泸州医药产业园区域性地震安全性评价报告

四川省六零六地质勘查有限公司

2024 年 3 月

项 目 名 称 ： 泸州医药产业园区域性地震安全性评价

委 托 方 ： 泸州医药产业园区管理委员会

承 担 方 ： 四川省六零六地质勘查有限公司

项目负责人： 邓莉莉

地 震 学 ： 吕 渊

地震地质学： 李友余

地震工程学： 郑玉清

专业技术人员： 吴长兵 余秋兵 朱 伟
赵 峰 谌天宇 田 巧

目录

0 前言

0.1 项目概况与任务来源

泸州医药产业园区域性地震安全性评价技术服务项目位于四川省泸州市泸县城区的西侧，目标区面积约 3.88 平方公里，中心坐标为 E105°19′48″，N29°08′52″。（图 0.1-1）。

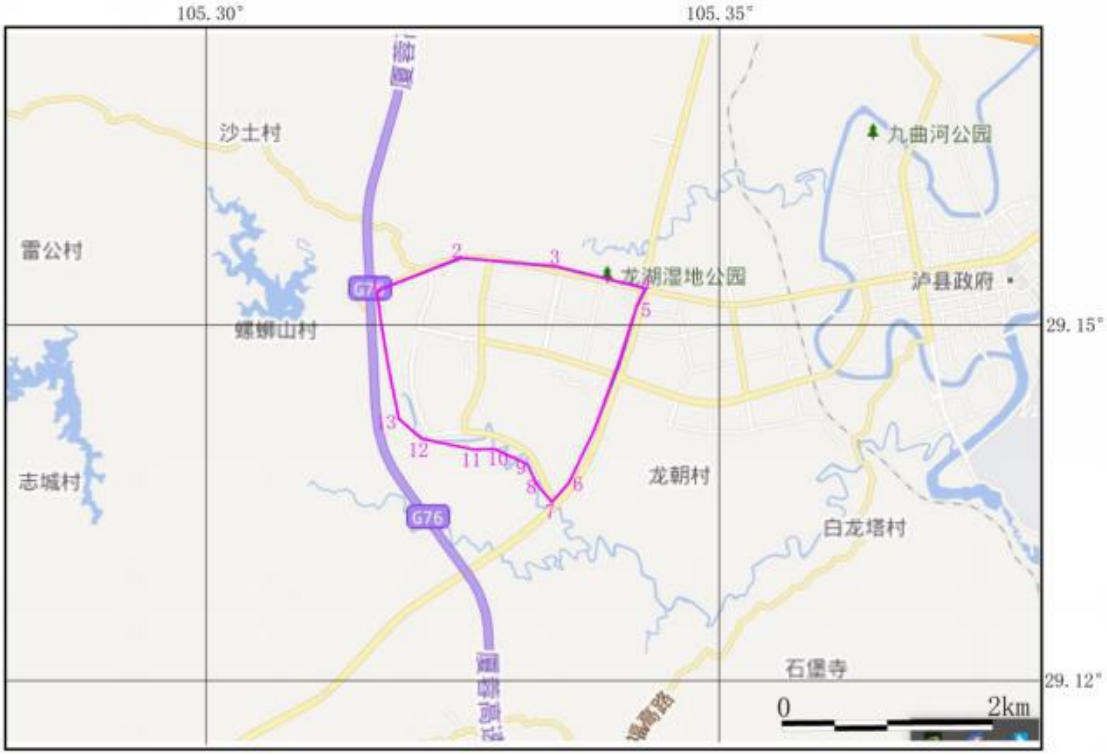


图 0.1-1　目标区地理位置示意图

目标区在现行的 GB18306-2015《中国地震动参数区划图》中，目标区位于 0.05g 和 0.10g 的分界线附近，靠近 0.10g 区，地震动加速度反应谱特征周期为 0.4s（图 0.1-2 和 0.1-3）。

为确保该区域内工程抗震设防的科学性和经济合理性，泸州医药产业园区管理委员会委托四川省六零六地质勘查有限公司对该医药产业园区进行区域性地震安全性评价工作。双方于 2023 年 8 月正式签订了技术服务合同书。

图 0.1-2　目标区位于中国地震动参数区划图(GB18306-2015)示意图

图 0.1-3　目标区位于中国地震动参数区划图(GB18306-2015)示意图

0.2 工作区范围

本项目涉及下列三个级别工作范围：

（1）区域范围

区域范围为场地周围≥150Km 的区域，本次工作取区域范围经纬度为：东经 102°6′～107°3′，北纬 27°18′～31°15′，相应图件的比例尺为 1：100 万。在《工

程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）要求区域范围不应小于工程场地外围150km 的基础上适当扩大。区域北边界距离工程场地约 230km，主要考虑到 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震对目标区的影响；西边界距离场地约 300km，主要考虑到安宁河-则木河全新世断裂带上发生的 814 年 4 月 6 日四川西昌一带 7 级地震、1536 年 3 月 29 日四川西昌北 7½级地震、1850 年 9 月 12 日四川西昌、普格间 7½级地震及多次 6.0-6.9 级地震对目标区的影响。区域确定满足规范要求。

（2）近场区范围

近场区范围为场地周围≥25Km 的区域。本次工作取东经 105°1′30″~105°37′50″、北纬 28°53′10″~29°24′40″，相应图件的比例尺为 1：25 万。

（3）目标区场地范围

目标区坐标点如表 0.2-1

表 0.2-1 目标区范围坐标拐点

点号	经度（°）	纬度（°）	点号	经度（°）	纬度（°）
1	105.316699	29.153210	8	105.332124	29.136830
2	105.324867	29.156002	9	105.331321	29.138468
3	105.334202	29.155253	10	105.328063	29.139808
4	105.342879	29.153372	11	105.326103	29.139731
5	105.341979	29.151742	12	105.320965	29.140684
6	105.335448	29.136943	13	105.318739	29.142415
7	105.333679	29.135292			

0.3 项目工作内容

（1）工作内容

根据《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》(中震防函〔2019〕21 号)、《四川省区域性地震安全性评价规范》（DB51/T 2946-2022）、《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）与《泸州医药产业园区地震安全性评价报告技术服务合同》，本次工作内容包含以下八个方面：

1）区域地震活动性和地震构造评价

研究以目标区为中心，半径不小于 150km 范围内，分析区域地震活动特征和未来地震活动趋势，评价区域范围内地震发生的条件，判识区域范围内对目标

区地震危险性有影响的发震构造，综合评价区域地震构造环境和地震活动水平，为地震区带和潜在震源区划分、地震活动性参数确定、地震构造区划分与弥散地震确定等提供依据。

2）近场区地震活动性和地震构造调查与评价

研究以目标区为中心，半径不小于 25km 范围的地震活动性、新构造运动特征及主要断裂活动性。研究近场的地震活动性和新构造运动特征，探讨近场区内的断裂活动性，评价近场地震构造环境。

3）目标区断层勘查和活动性鉴定

开展断层控制性调查与探测，查明目标区是否存在断层。对隐伏断层应采用地球物理探测方法进行探测，必要时，可采用多种方法联合探测；对发现的第四纪以来有活动的主要断层，开展断层的活动性鉴定；对于隐伏断层可采用跨断层钻孔联合地质剖面探测法，对近地表断层及裸露断层可采用地表地质调查或探槽，结合地层、地貌年代测定等，确定断层的位置、规模、产状、最新活动时代以及断层活动性特征。

4）目标区概率地震危险性分析

概率地震危险性分析方法将目标区周围地震构造环境特征、地震活动性特征以及地震动衰减特征的调查分析结果，表达为相应的概率分布函数，并通过概率理论计算，最终获得对目标区地震危险性的概率表达。主要包括地震动预测方程的确定和地震区、地震带和地震统计区的确定。根据相关规范，本项目拟提供 50 年超越概率 63%、10%、2%和 100 年超越概率 63%、10%、2%、1%的基岩危险性结果。

5）目标区地震工程地质条件勘测

收集、整理、分析目标区及附近地区已有的工程地质勘查资料，合理布设目标区勘测的场地钻孔、开展必要的原位测试工作，通过岩土动力特性试验，测定剪变模量比与剪应变关系、阻尼比与剪应变关系。钻孔岩土层波速测量、测量不同深度岩土层剪切波速，测量深度间距不大于 1m，在地层分界附近加密测点，为目标区结构类型分析和土层模型建立提供依据。

6）目标区地震反应分析与地震动参数确定

根据目标区钻孔地震危险性分析得到的基岩地震动反应谱为目标谱，采用人工合成方法确定自由基岩场地地震动时程。根据地震工程地质条件勘查结果，确

定目标区钻孔分层土厚度、密度、剪切波速及土动力学参数等场地土层模型参数，以钻探确定的基岩面、剪切波速不小于 500m/s 的土层顶面、钻孔深度超过 100m 且剪切波速有明显跃升的土层分界面或由其他方法确定的界面作为地震输入界面，建立各控制孔场地土层地震反应分析模型。按自由基岩场地地震动时程幅值的 50%确定场地土层地震反应分析的计算基底输入。按照不同概率水准合成的输入地震动时程，对目标区各控制孔场地进行土层地震反应计算，综合确定土层场地多概率水准的地表地震动参数。本项目拟提供 50 年超越概率 63%、10%、2%和 100 年超越概率 63%、10%、2%、1%的设计地震动参数结果。

7）目标区地震地质灾害评价

根据目标区地震工程地质条件勘测结果和地震地质灾害野外考察，对目标区开展活动断层错动、滑坡与崩塌、砂土液化、软土震陷等地震地质灾害评价。

8）区域性地震安全性评价技术服务系统建设

建设区域性地震安全性评价成果数据库建设，建设技术服务系统，包含设定场点地震动参数查询和地震地质灾害查询等

0.4 项目工作依据

主要执行的法律、法规：

（1）《地震安全性评价管理条例》（国务院令 323 号，2019）；

（2）《中华人民共和国防震减灾法》（中华人民共和国主席令第 94 号，2009）；

（3）《四川省工程建设场地地震安全性评价管理规定》（四川省人民政府令第 325 号，2017）；

（4）《四川省人民政府关于修改〈四川省工程建设场地地震安全性评价管理规定〉的决定》（2017 年）。

本次工作主要依据下列相关技术规范进行：

（1）《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》（中震防函〔2019〕21 号）

（2）《四川省区域性地震安全性评价规范》（DB51/T 2946-2022）

（3）《四川省地震局关于印发<四川省区域性地震安全性评价工作管理办法（试行）>的通知》（川震防发〔2020〕147 号）

（4）《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）

（5）《活动断层探测》(GB/T36072-2018)

（6）《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015）

（7）《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010，2016 年版）

（8）《岩土工程勘察规范》（GB50021-2001，2009 年版）

（9）《浅层地震勘查技术规范》（DZ/T 0170-2020）

（10）《建筑与市政工程抗震通用规范》（GB55002-2021）

（11）《全球定位系统（GPS）测量规范》（GB/T 18314-2009）

（12）《泸州医药产业园区地震安全性评价报告技术服务合同》

（13）《泸州医药产业园区域地震安全性评价实施方案》

0.5 技术思路

按照《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》（中震防函〔2019〕21号）、《四川省区域性地震安全性评价规范》（DB51/T2946-2022）和项目要求执行，全面系统收集区域（目标区边界外延大于 150km）范围内的最新不同精度的地质、地球物理、遥感和地震等资料。查明目标区地貌、地层、岩性、地质构造、水文地质条件、场地土类型和场地类别，对区域范围内进行了地震区带划分，利用地震危险性概率分析方法，对目标区内的控制点进行危险性计算，获得各控制点 50 年 63%、10%、2%和 100 年超越概率 63%、10%、2%、1%不同超越概率的基岩加速度峰值，根据实际峰值情况，将目标区划分为分区，给分区赋予不同超越概率的基岩加速度峰值。

根据目标区内的钻孔资料、波速测试分析及地貌单元分区，将目标区进行场地类别判别，用土动力学参数值和土类，建立土层计算模型，并进行土层反应计算，获得目标区不同风险水准下的地震动参数。根据地震动的特点，绘制地震动等值线图，较好的反应当地的地震动特点。可以为目标区内的不同建筑类型提供抗震设防参数和抗震验算参数（图 0.5-1）。

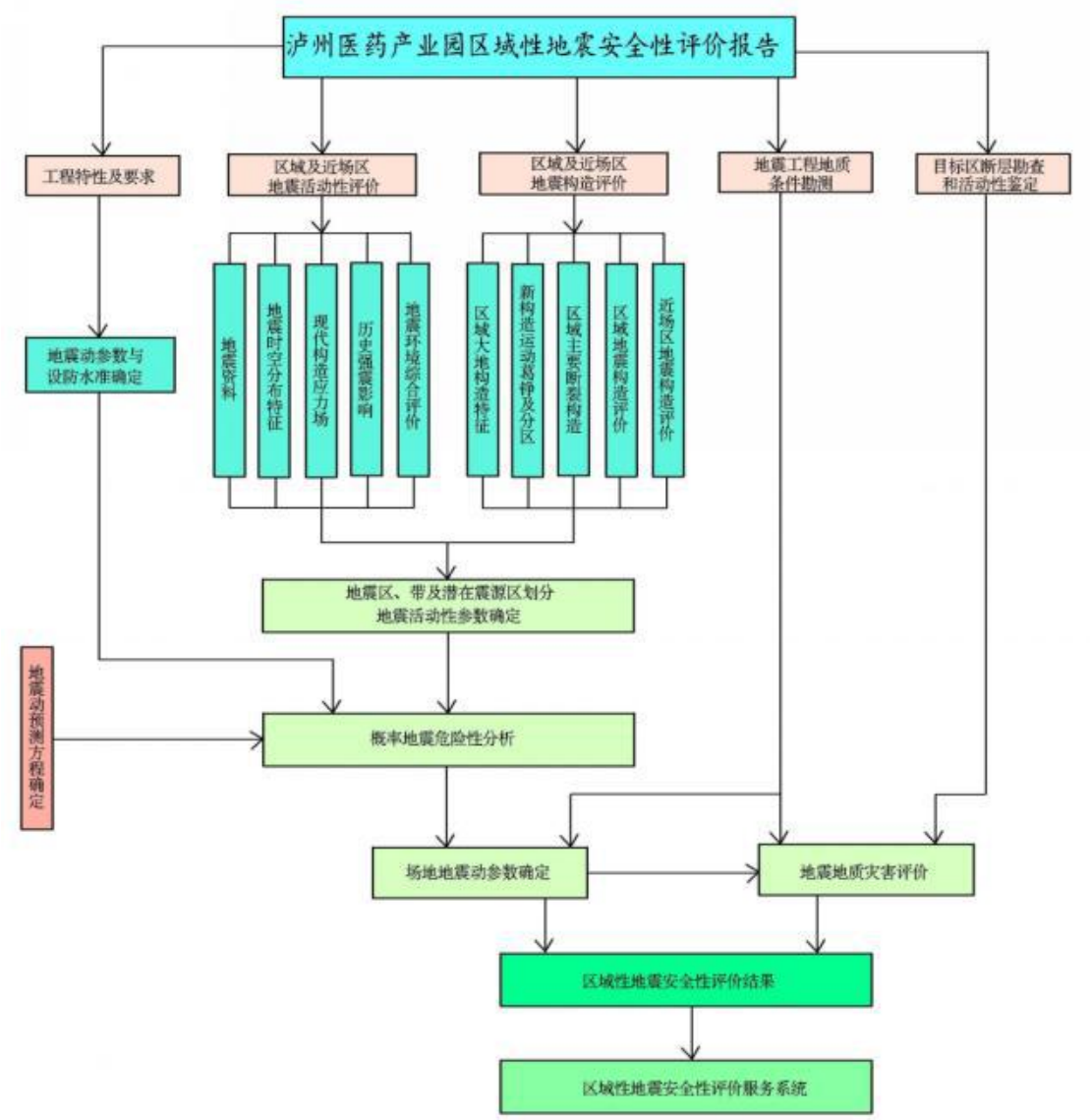


图 0.5-1　总体技术思路图

本项目提供的设设计地震动参数见下表。

表 0.5-1　主要技术指标

地震动参数	加速度峰值、反应谱特征周期	
	超越概率水平	50 年 63%、10%、2%和 100 年 63%、10%、2%、1%超越概率水准下基岩地震动参数，反应谱周期至 6s
	阻尼比	0.05
	所在层位	地表

0.6 项目组织实施

本项目由四川省六零六地质勘查有限公司，主要完成区域地震活动性和地震构造评价、近场区地震活动性和地震构造评价、目标区和场地周围的地震活动环境评价、潜在震源区的划分及参数确定、地震危险性分析、场地地震动设计参数

的确定、地震地质灾害评价、区域性地震安全性评价技术服务系统等工作。

本项目组成人员与分工如下：

项目组分为地震学、地震地质学、地震工程学 3 个专业组，邓莉莉担任项目负责人，3 个专业组负责人分别为吕渊、李友余、郑玉清。参加技术报告编写的技术人员：朱伟、吴长兵、余秋兵、赵峰、谌天宇、田巧等。

0.7 主要工作概况

本项目的主要实物工作量见表 0.7-1，近场区实际工作见图 0.7-1。

表 0.7-1　泸州医药产业园区地震安全性评价项目工作量一览表

工 作 内 容		单 位	数量	技 术 内 容
室内作业	航卫片解译	景	1	对线性构造和第四纪地质与地貌特征的判识。
	资料收集	批	1	收集不同比例尺的地形图和地质构造图、前人研究成果。
	遥感解译	Km^2	800	近场区和目标区断裂识别。
地质调查	线路	条	5	主要围绕近场区内较大断裂的活动性、构造地貌、地震地质灾害等调查，对断裂开展的地质地貌调查。
	调查点	个	20	
	剖面	个	12	确定断裂的活动时代和产状。
	工作照片	张	432	目标区地形、地貌及断层的典型照片。
	浅层地震勘探	Km	6.2	查明目标区是否有隐伏断层。
钻探	场地钻孔	个	17	查明目标区内岩土分布状况、动三轴样品取样，累计完成 进尺 299.9m。
原位测试	剪切波速测试	个	17	单孔法，测量深度间距为 1m。
室内试验	土动三轴试验	组	25	确定不同深度、土类的动剪切模量比和阻尼比。

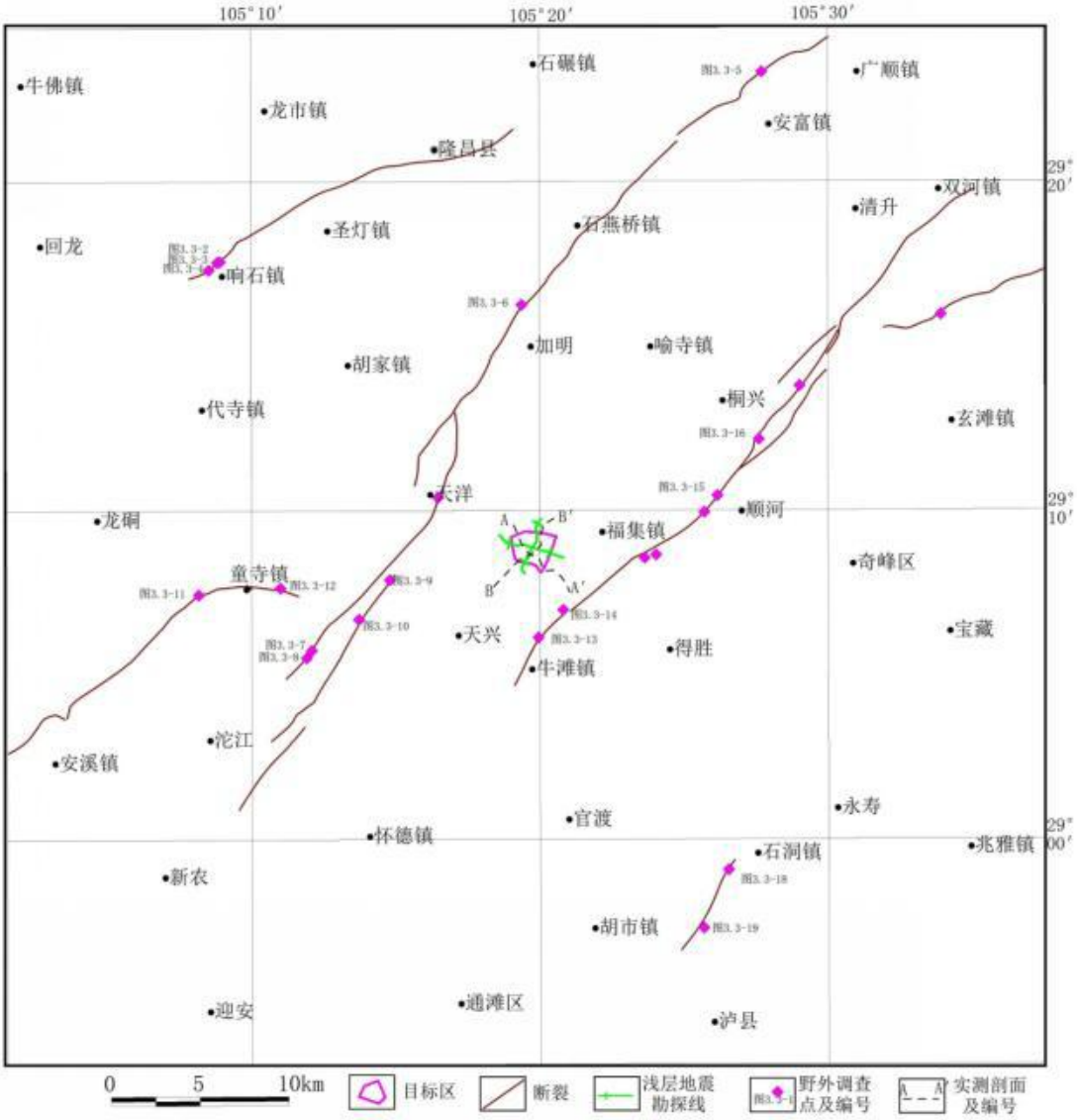


图 0.7-1　近场区实际材料图

0.8 致谢

在项目完成的工作期间得到了泸州医药产业园区管理委员会的大力支持和协助，在报告的编写过程中得到四川省地震局部分专家的热心指导，在此一并表示感谢。

1 区域地震活动性

在目标区的地震危险性分析中，一项基本的内容是了解目标区所在区域范围内的地震活动规律，预测在工程使用年限内，目标区周围可能发生地震的地点、强度和对目标区产生的影响。区域地震活动的时空非均匀性是地震危险性评价中必须考虑的重要内容之一。本章之目的就在于通过对区域地震活动时空分布特征、历史地震对目标区的影响以及现代构造应力场和震源错动类型的分析，为后续章节中地震构造环境评价、划分潜在震源区和确定地震活动性参数提供地震学依据。按照国家标准《工程场地地震安全性评价》（GB17741—2005）中对区域范围的要求，将区域确定为东经 102°06′～107°03′、北纬 27°18′～31°15′的范围。

1.1 地震资料的整理和区域地震目录编制

1.1.1 区域地震目录的编制

根据正式公布的地震目录和地震报告，收集整理相关地震资料；历史地震资料包括区域内自有地震记载以来的全部破坏性地震事件；仪器记录地震资料包括区域内自有仪器记录以来所记录到的可定地震参数的全部地震事件；编制区域破坏性地震目录。包括发震时间、震中位置地理坐标（经度、纬度）与参考地名、震级、震中烈度、震源深度及震中定位精度信息；历史地震震级依据 Ms 震级确定；破坏性地震同时存在宏观震中与微观震中时，采用宏观震中位置。本报告在研究区域地震活动性时，利用了我国丰富的历史地震资料和地震台网观测资料，将地震资料时段取至 2023 年 10 月 30 日。

区域地震资料的主要来源有：《中国历史强震目录（公元前 23 世纪—公元 1911 年）》（国家地震局震害防御司编，1995），《中国近代地震目录（公元 1912 年—1990 年 Ms≥4.7）》（中国地震局震害防御司编，1999），1990 年以后的地震目录主要取自全国第五代地震动参数区划图地震目录（截至 2010 年 12 月底）和中国地震台网中心地震目录（2011 年 1 月～2023 年 10 月 30 日）。

地震震级的确定：无仪器记录的地震，其震级的确定均由史料记载评定其震中烈度，再按震级（Ms）与震中烈度的经验关系换算；凡有仪器记录的地震，

其震级以仪器测定的为准。

现代小震通常采用近震震级 ML，在以往工作中，将其转换为 MS 震级时，所采用公式为 1971 年郭履灿等根据邢台地震资料进行统计得出的转换公式：MS=1.13，ML-1.08。该公式适用于华北地区，其它地区兼用，震中距≤1000km（（国家地震局震害防御司，1990）。在编制第五代区划图的工作中，对 MS、ML 的关系重新进行了统计分析。根据 1990-2007 年间同时测定有 MS、ML 数据且震源深度＜70km 的（6577 个）地震，拟合得到的关系式接近于 MS=ML（汪素云等，2009）。因此，对于没有测定 MS 的地震，本项目在进行震级标度转换时直接使用 MS=ML 进行转换，统一表示成 M。

区域内共记到 M≥4.7 级破坏性地震 175 次，最早记载到的破坏性地震是公元前 26 年 3 月 28 日四川宜宾一带 5½级地震，记载到的最大地震是 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震。表 1.1-1 给出了区域范围内 M≥4.7 级地震的目录。表 1.1-2 是各震级档次的破坏性地震频次分布表。

表 1.1-1　区域范围内破坏性地震目录（M≥4.7，B.C.26～2023 年 10 月）

序号	地震日期年.月.日	地震震中位置			震级	震源深度（km）	地震震中烈度	精度
		北纬（°）	东经（°）	参考地点				
1	-26-03-28	28.8°	104.6°	四川宜宾一带	5½	*	VII	5
2	624-08-18	27.9°	102.2°	四川西昌一带	6	*	≥VIII	4
3	814-04-06	27.9°	102.2°	四川西昌一带	7	*	IX	4
4	12160324	28.4°	103.8°	四川雷波马湖	7	*	IX	5
5	1216-07-02	29.6°	102.6°	四川汉源北	5	*	VI	4
6	1327-09--	30.1°	102.7°	四川天全	6	*	*	4
7	1480-09-22	28.6°	102.5°	四川越西一带	5½	*	VII	3
8	1488-06-21	29.6°	103.8°	四川乐山东	4¾	*	*	3
9	1489-01-15	27.8°	102.3°	四川西昌、越西	6¾	*	IX	3
10	1512-06-22	30.2°	103.6°	四川邛崃南	4¾	*	*	3
11	1536-03-29	28.1°	102.2°	四川西昌北	7½	*	X	2
12	1610-02-03	28.5°	104.5°	四川高县庆符	5½	*	VII	2
13	1637-06-08	28.5°	103.5°	四川屏山西南	5	*	*	4
14	1732-01-29	27.7°	102.4°	四川西昌东南	6¾	*	IX	2
15	1734-03-	30.2°	103.5°	四川蒲江	5	*	VI	2
16	1748-10-12	31.0°	102.4°	四川小金崇德	5½	*	≥VI	2
17	1786-06-10	29.4°	102.2°	四川泸定得妥	5	*	*	3
18	1787-12-13	31.0°	103.6°	四川灌县	4¾	*	VI	2
19	1805-09-27	29.9°	102.2°	四川泸定	4¾	*	VI	2

20	1844-08-00	28.1°	103.9°	云南大关北	5	*	*	3
21	1850-09-12	27.7°	102.4°	四川西昌、普格间	7½	*	X	2
22	1854-12-24	29.1°	107.0°	四川南川陈家场	5½	*	VII	1
23	1881-06-00	28.6°	102.5°	四川越西一带	5	*	VI	2
24	1885--	27.3°	103.7°	云南鲁甸	5	*	VI	2
25	1892-02-10	28.9°	105.0°	四川南溪	5	*	VI	2
26	1896-02-14	29.3°	104.9°	四川富顺	5¾	*	VII	2
27	1898-08--	27.3°	103.7°	云南昭通	5	*	VI	2
28	1900-08--	30.5°	103.5°	四川邛崃一带	5	*	VI	2
29	1905-11-08	29.4°	104.7°	四川自贡	5	*	VI	2
30	1913-07-16	29.6°	103.7°	四川乐山	5	*	VI	*
31	1913-08--	28.7°	102.2°	四川冕宁	6	*	VIII	*
32	1917-01-28	30.0°	103.0°	四川雅安	4¾	*	VI	*
33	1917-07-31	28.0°	104.0°	云南大关北	6¾	*	IX	*
34	1919-07--	27.30°	103.70°	云南昭通	5	*	VI	*
35	1923-08--	28.7°	102.2°	四川冕宁大桥	5½	*	VII	*
36	1927-05-22	29.4°	104.7°	四川自贡	4¾	*	*	*
37	1928-04--	28.5°	105.5°	四川泸县	4¾	*	VI	*
38	1930-09-23	27.3°	106.0°	贵州金沙	5½	*	*	*
39	1935-12-18	28.6°	103.7°	四川马边	6	*	VIII	2
40	1935-12-18	28.7°	103.2°	四川马边	5¾	*	*	*
41	1935-12-19	29.1°	103.3°	四川马边	6	*	*	3
42	1935-12-19	28.7°	103.2°	四川马边	5¼	*	*	*
43	1936-04-27	28.7°	103.7°	四川马边	6¾	*	IX	2
44	1936-04-27	28.9°	103.5°	四川马边	5¾	*	*	3
45	1936-04-27	28.7°	103.2°	四川马边	5½	*	*	*
46	1936-04-27	28.7°	103.2°	四川马边	6	*	*	*
47	1936-04-29	28.8°	103.6°	四川马边	5½	*	*	3
48	1936-05-08	28.9°	103.6°	四川马边	5¾	*	*	3
49	1936-05-16	29.1°	103.9°	四川马边	5½	*	*	3
50	1936-05-16	28.5°	103.6°	四川马边	6¾	*	*	2
51	1936-09-25	28.7°	105.1°	四川江安	5	*	*	*
52	1940-11-07	28.7°	103.6°	四川马边附近	5½	*	*	2
53	1941-06-12	30.1°	102.5°	四川泸定、天全	6	*	*	3
54	1944-06-20	28.0°	103.0°	四川昭觉	5¼	*	*	3
55	1947-10-18	29.4°	104.8°	四川自贡	4¾	*	VI	*

56	1948-05-01	28.5°	103.6°	四川马边	5½	*	*	*
57	1948-10-10	27.6°	103.8°	云南大关	5¾	*	*	3
58	1948-10-23	28.5°	103.6°	四川马边	5½	*	VII	*
59	1948-12-14	28.0°	103.5°	云南永善附近	5¼	*	*	*
60	1951-03-16	29.3°	102.6°	四川石棉	5	*	VI	*
61	1952-02-06	27.9°	102.3°	四川西昌附近	5	*	VI	*
62	1952-06-26	30.1°	102.2°	四川康定、泸定间	5¾	*	*	3
63	1952-08-31	31.2°	103.0°	四川理县附近	5	*	*	3
64	1952-09-30	28.4°	102.2°	四川冕宁、石龙	6¾	17	IX	2
65	1954-10-24	29.4°	104.8°	四川自贡市	5	*	VII	*
66	1957-08-09	29.6°	103.0°	四川汉源东南	5	*	*	3
67	1959-03-11	28.2°	104.0°	云南盐津附近	5	*	*	2
68	1959-08-13	27.7°	103.7°	云南大关附近	5	*	*	4
69	1959-11-13	29.0°	105.0°	四川富顺附近	5	*	*	4
70	1962-07-01	29.9°	103.2°	四川洪雅附近	5.1	30	*	3
71	1966-04-30	29.1°	102.5°	四川石棉南	4.8	*	*	*
72	1966-10-11	27.9°	103.8°	云南永善南	5.2	*	VI	2
73	1967-01-24	30°15′	104°08′	四川仁寿附近	5.5	4	VII	2
74	1967-05-05	29.3°	103.7°	四川峨边东	4.8	30	*	2
75	1970-02-24	30°36′	103°12′	四川大邑西	6.2	15	VII	1
76	1970-03-05	30.60°	103.40°	四川大邑	4.7	30	*	3
77	1970-03-15	30.60°	103.00°	四川大邑西	4.8	53	*	3
78	1970-07-31	28°33′	103°40′	四川雷波东北	5.4	44	VII	1
79	1971-08-16	28°53′	103°35′	四川马边	5.9	24	VII	1
80	1971-08-17	28°54′	103°47′	四川马边东	5.7	7	*	1
81	1971-08-17	28°49′	103°49′	四川马边	4.9	*	*	*
82	1971-08-17	28°49′	103°40′	四川马边	4.7	*	*	*
83	1971-08-17	28°49′	103°36′	四川马边	4.8	10	*	*
84	1971-08-17	28°50′	103°37′	四川马边	5.4	19	*	*
85	1971-08-17	28°49′	103°36′	四川马边	4.8	*	*	*
86	1971-08-17	28°46′	103°44′	四川沐川	5.2	35	*	*
87	1971-08-18	28°48′	103°37′	四川马边东	5	17	*	*
88	1971-08-23	28°44′	103°44′	四川马边东	5.4	5	*	*
89	1971-08-23	28.80°	103.70°	四川马边	4.8	*	*	2
90	1971-09-04	28.80°	103.70°	四川马边	4.8	*	*	*
91	1971-11-05	28°49′	103°35′	四川马边南	4.9	11	*	*
92	1972-05-07	27.90°	102.40°	四川西昌东	4.8	20	VI	1

93	1973-04-22	27.60°	104.20°	云南彝良附近	5.0	*	VI	1
94	1973-06-29	28.90°	103.90°	四川马边东	4.8	20	*	1
95	1973-06-29	28.80°	103.60°	四川马边东	5.4	10	*	1
96	1973-06-29	28.90°	103.70°	四川马边东	4.9	*	VI	1
97	1973-06-30	28.90°	103.80°	四川马边东	5.2	20	VI	1
98	1973-08-02	27°47′	104°30′	云南彝良东北	5.4	*	VII	1
99	1973-12-30	29.80°	103.30°	四川洪雅西南	4.7	28	*	1
100	1974-05-11	28.20°	103.90°	云南大关北	7.1	14	IX	1
101	1974-05-11	28.10°	104.00°	云南大关北	4.9	33	*	*
102	1974-05-12	28.30°	104.00°	云南大关北	4.8	19	*	1
103	1974-06-01	28.30°	104.20°	云南大关北	4.7	13	*	2
104	1974-06-05	28.30°	104.20°	云南大关北	5.0	*	*	1
105	1974-06-15	28.40°	104.20°	云南大关北	5.7	18	*	1
106	1974-06-15	28.50°	104.10°	云南大关北	4.8	*	*	1
107	1974-06-15	28.30°	104.10°	云南大关北	5.2	15	*	1
108	1974-07-10	28.30°	104.00°	云南大关北	5.2	22	*	1
109	1974-07-10	28.20°	103.90°	云南大关北	4.7	*	*	1
110	1974-07-13	28.30°	104.00°	云南大关北	4.7	*	*	1
111	1974-12-30	29.00°	103.90°	四川沐川	5.2	*	*	*
112	1975-03-08	28.30°	104.10°	云南盐津北	5.3	30	VI	1
113	1975-12-04	28.70°	105.20°	四川长宁东	4.7	17	*	*
114	1977-01-13	28.20°	102.50°	四川冕宁南	4.8	18	V+	*
115	1985-03-29	29°23′	104°49′	四川自贡	4.8	7	VII	1
116	1989-06-09	29°14′	102°15′	四川石棉西北	5.0	9	VII	1
117	1989-11-10	27.42°	103.93°	云南昭通东	4.7	16	*	1
118	1989-11-20	29.84°	106.88°	四川重庆北	4.7	31	*	1
119	1989-11-20	29°51′	106°51′	四川重庆江北	5.3	23	VII	1
120	1990-01-15	30°37′	103°13′	四川大邑西	4.7	21	VI	1
121	1990-08-04	29°16′	103°04′	四川峨边西北	4.7	14	VI	1
122	1993-08-07	29.02°	103.67°	四川沐川	4.8	13	VI	*
123	1994-12-30	29.03°	103.64°	四川马边	5.5	16	VI	*
124	1995-04-26	29.02°	103.70°	四川沐川	4.9	33	VI	*
125	1996-02-28	29.03°	104.59°	四川宜宾	5.4	32	VII	*
126	1997-08-13	29.42°	105.53°	重庆市荣昌	4.9	17	VI	*
127	2002-04-10	27.49°	102.50°	四川西昌	4.9	28	VI	*
128	2003-11-26	27.31°	103.72°	云南鲁甸	5.0	13	*	*
129	2006-07-22	28.04°	104.13°	云南盐津	5.1	17	*	*

130	2006-08-25	28.08°	104.26°	云南盐津	5.1	15	VI	*
131	2006-08-29	28.10°	104.18°	云南盐津	4.8	16	VI	*
132	2008-05-12	31.02°	103.42°	四川汶川	8.0	14	XI	1
133	2008-05-12	31.23°	104.20°	四川绵竹	4.8	13	*	*
134	2008-05-12	31.03°	103.38°	四川汶川	5.2	9	*	*
135	2008-07-26	30.78°	103.33°	四川崇州	4.8	9	*	1
136	2009-11-23	31.00°	103.23°	四川汶川	4.7	17	*	1
137	2009-11-28	31.23°	103.80°	四川彭州	5.0	15	*	1
138	2010-01-31	30.28°	105.71°	四川遂宁	5	5	VI	1
139	2010-05-25	31.17°	103.49°	四川汶川	5	20	*	1
140	2012-09-07	27.51°	103.97°	云南彝良	5.7	14	VII	1
141	2012-09-07	27.56°	104.03°	云南彝良	5.6	14	VII	1
142	2013-02-19	31.21°	105.2°	四川三台	4.9	20	VI	1
143	2013-04-20	30.30°	102.99°	四川芦山	7.0	17	IX	1
144	2013-04-20	30.32°	102.92°	四川芦山	5.0	10		1
145	2013-04-20	30.24°	102.94°	四川芦山	5.4	15		1
146	2013-04-21	30.36°	103.05°	四川芦山	5.0	27		1
147	2013-04-21	30.34°	103.0°	四川芦山	5.4	17		1
148	2013-04-25	28.40°	104.95°	四川长宁	4.8	5	VI	1
149	2014-04-05	28.14°	103.57°	云南永善	5.1	13	VI	1
150	2014-08-17	28.12°	103.51°	云南永善	5.2	7		1
151	2014-10-01	28.38°	102.74°	四川越西	5.2	10	VI	1
152	2015-01-14	29.30°	103.2°	四川金口河	5	20	VI	1
153	2016-12-27	29.44°	105.62°	重庆荣昌	4.9	10	VI	1
154	2017-01-28	28.09°	104.72°	四川筠连	4.9	10	VI	1
155	2017-05-04	28.18°	104.89°	四川珙县	4.8	10	VI	1
156	2018-12-16	28.24°	104.95°	四川兴文	5.7	12	VII	1
157	2019-01-03	28.19°	104.88°	四川珙县	5.1	15	VI	1
158	2019-02-25	29.47°	104.5°	四川荣县	4.9	5	VI	1
159	2019-05-16	28.06°	103.53°	云南永善	4.7	10	VI	1
160	2019-06-17	28.34°	104.96°	四川长宁	6.0	8	VIII	1
161	2019-06-17	28.47°	104.72°	四川珙县	5.3	10	*	1
162	2019-06-18	28.39°	104.95°	四川长宁	5.1	9	*	1
163	2019-06-22	28.40°	104.94°	四川长宁	5.6	10	*	1
164	2019-07-04	28.40°	104.78°	四川珙县	5.5	8	*	1
165	2019-09-08	29.58°	104.82°	四川威远	5.4	10	VI	1
166	2019-12-18	29.60°	104.83°	四川资中	5.2	14	VI	1

167	2020-02-03	30.72°	104.46°	四川青白江	5.0	21	VI	1
168	2021-07-14	30.97°	103.37°	四川汶川	4.8	15	VI	1
169	2021-09-03	28.09°	104.92°	四川珙县	4.8	15	VI	1
170	2021-09-16	29.20°	105.34°	四川泸县	6.0	10	VIII	1
171	2022-04-06	28.22°	105.03°	四川兴文	5.1	10	VI	1
172	2022-05-20	29.67°	102.48°	四川汉源	4.8	20	VI	1
173	2022-06-01	30.38°	102.93°	四川芦山	6.1	17	VIII	1
174	2022-09-07	29.43°	102.17°	四川石棉	4.8	11	*	1
175	2023-05-04	28.14°	105.12°	四川兴文	4.9	10	*	1

注：破坏性地震震中定位精度（1970 年前）：1 类，误差≤10km；2 类，误差≤25km；3 类，误差≤50km；4 类，误差≤100km；5 类，误差＞100km。地震台网震中精度（1970 年后）：1 类，误差≤5km；2 类，误 差≤15km；3 类，误差≤30km；4 类，误差＞30km

表中“*”号表示缺乏资料。

表 1.1-2　区域各震级档次的破坏性地震频次分布一览表

资 料 时 段	B.C.26～2023 年 10月				
震 级 分 档	8.0～8.9	7.0～7.9	6.0～6.9	5.0～5.9	4.7～4.9
地 震 频 次	1	6	17	94	57

区域内自 1970 年 1 月～2023 年 10 月共记到 M=2.0～4.6 级小震 30430 次，表 1.1-3 给出了各震级档次的近代中小地震频次分布一览表；从表中可见，区域内的中小地震活动绝大多数为 2.0～3.9 级的小震。

表 1.1-3　区域各震级档次近代中小地震频次分布一览表

资 料 时 段	1970～2023 年 10 月		
震 级 分 档	2.0～2.9	3.0～3.9	4.0～4.6
地 震 频 次	26332	3614	484

1.1.2 地震资料完整性分析

由于历史地震目录受各种因素的限制，不同地区、不同时段所记载的历史地震资料的完整性是有差异的。分析区域内现有历史地震资料在时间域的情况可知，自公元前 26 年至 1500 年的一千五百年间，区域内仅有 9 次 M≥4.7 级地震记载，平均约 170 年才 1 次，显然与本区地震活动的实际情况极不相符，表明 1500 年以前区域历史地震记载有严重的缺失遗漏。根据黄玮琼等的研究结果，本区 M≥5 级地震 1931 年后基本完整（图 1.1-1），6 级以上地震 1904 年以来基本完整（图 1.1-2）。

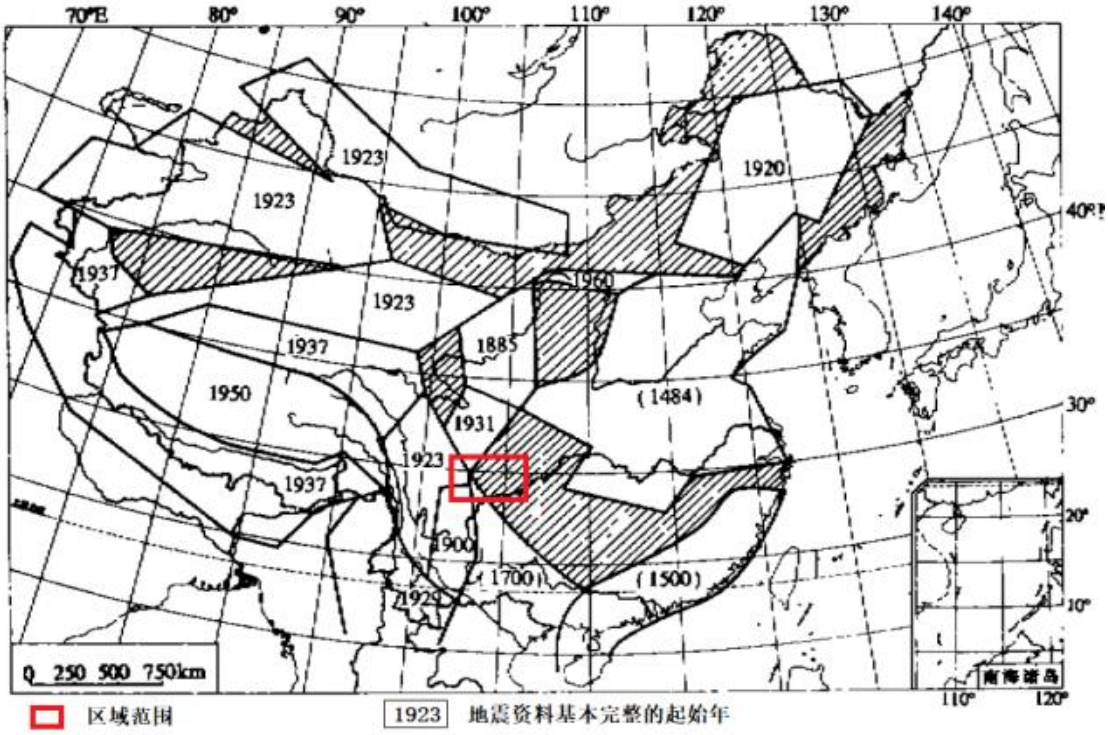


图 1.1-1　中国大陆分区 M≥4 3/4 和 M≥5 地震资料完整性分布图（黄玮琼，1994）

（括号内年份表示 M≥4 3/4 地震的起始年，无括号年份表示 M≥5 地震的起始年）

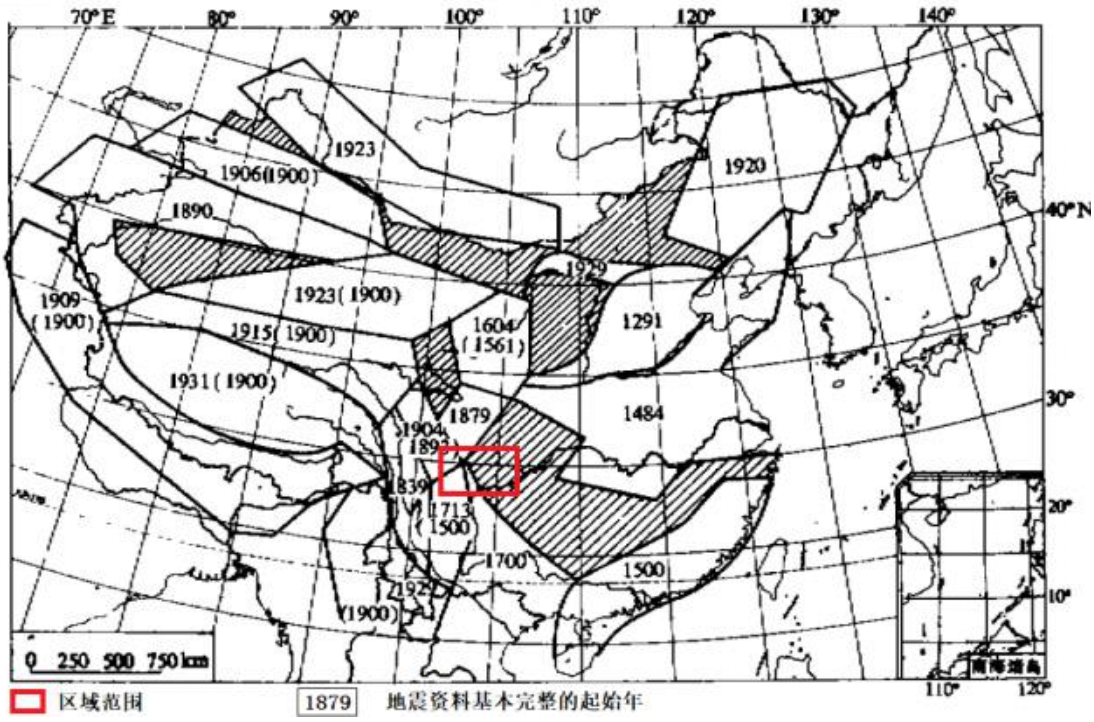


图 1.1-2　中国大陆分区 M≥6 和 M≥7 地震资料完整性分布图（黄玮琼，1994）

（括号内年份表示 M≥7 地震的起始年，无括号年份表示 M≥6 与 M≥7 地震的起始年一致）

根据焦远碧、吴开统等人（1990）的研究结果，包括本区在内的西南地区，1970年以来基本处于区域地震台网对ML≥3.0级地震的有效监测范围内，到1989年台网监测能力达到ML≥2.5级。“十五”中国地震数字地震观测网络项目顺利

完成后，中国地震台网监测能力取得飞跃式发展，根据2008年10月1日～2015年9月17日的地震监测资料研究结果显示（图1.1-3），区域最小完整性震级2.0级。（王亚文，2017）

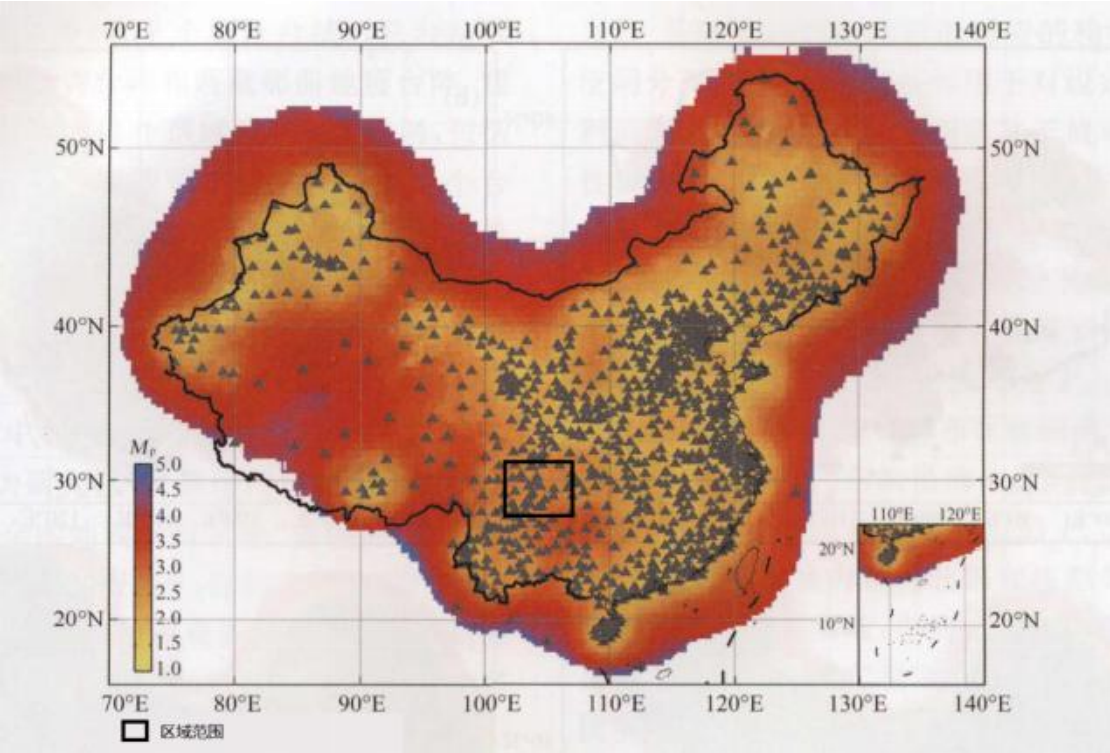


图 1.1-3 中国地震台网最小完整性震级的空间分布图（王亚文，2017）

区域范围主要位于四川省，2008年，四川仅有52个数字地震观测台，随着台站数字化的改造和多个项目的实施，已有台站与邻省、市县和企业建设台站以及流动加密台站实现实时共享，四川台网的台站数量不断增加。2013年芦山地震发生时四川测震台站234个，2017年九寨沟地震时增至402个，目前已达到2246个。

图1.1-4给出了区域地震台网监测能力图（据四川地震监测台网资料）。从图中可见，区域处于M≥2.0级地震的有效监测范围内，目标区及其近场处在M≥1.6级地震的有效监测范围内。

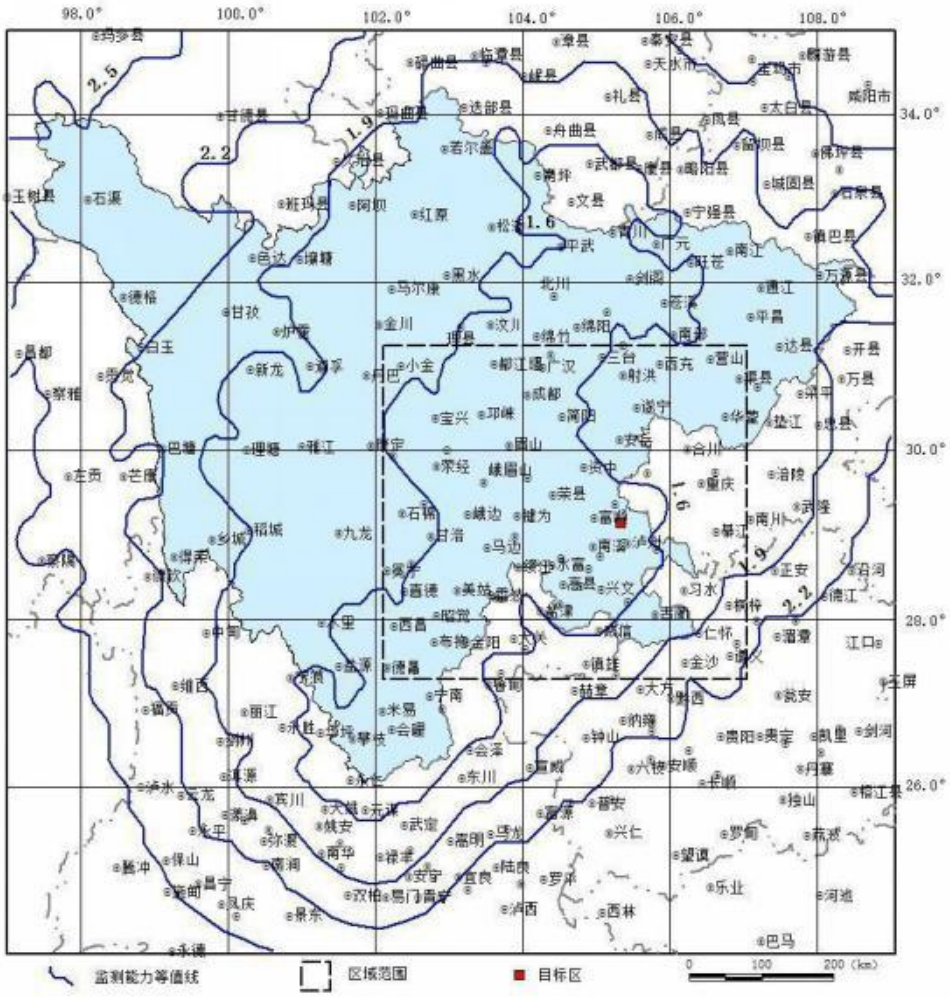


图 1.1-4　四川地震台网监测能力图（2011 年 12 月）

1.2 区域地震空间分布特征

1.2.1 区域地震活动的空间分布特征

图 1.2-1 给出了区域破坏性地震震中分布图（M≥4.7）。从图中可见，区内破坏性地震的空间分布格局有下述特征：

第一，区域地震活动具有明显的分区特点，并与活动断裂分布有着密切的关系。在区域西侧，强震活动多沿川滇块体北东边界的鲜水河断裂南东段、安宁河断裂和则木河断裂成带展布，形成了著名的鲜水河-安宁河-则木河强震活动带，破坏性地震频度高、强度大，石棉、冕宁、西昌-普格、巧家等地更是强震多次重复发生的场所，区域内的 3 次 7 级以上强震和多次 6.0～6.9 级地震均发生在这些地震带上；区域北西部以龙门山断裂带中南段为主体构造格架，在龙门山断裂带中南段的北川-映秀-都江堰、茂县-汶川、大邑、天全等地亦有多次破坏性地震

发生，如 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震、2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级地震及其余震 2022 年 6 月 1 日四川芦山 6.1 级地震等，这些地震在空间上形成了一条北北东-北东向活动条带；在鲜水河-安宁河断裂带以东、龙门山断裂带以南的区域中南部地区，M≥6.0 级地震集中分布在马边-雷波-盐津-大关北一线，在空间上形成了一条与荥经-马边-盐津断裂带走向基本吻合的北北西向强震密集带，该带历史上曾发生过 2 次 M≥7.0 级强震和数次 6.0～6.9 级地震；在区域中东部的四川盆地和四川北部地区，地震活动水平明显降低，多为零星分布的 4～5 级破坏性地震，且以华蓥山断裂带南西段的宜宾附近及自贡-荣昌地区为主要活动场所；在川南的长宁、珙县一带有数次 4.7～6 级破坏性地震活动，如 2019 年 6 月 17 日四川长宁 6.0 级地震；在川东遂宁、重庆长寿、南川和贵州金沙也有零星的 4～5 级破坏性地震活动，如 2010 年 1 月 30 日发生在四川遂宁市、重庆潼南交界处的 5.0 级破坏性地震。2021 年 9 月 16 日四川泸县 6.0 级地震发生在目标区以北 5km 附近。

第二，地震活动的空间分布具有显著的不均匀性。其空间分布格局的不均匀性主要表现在地震活动沿某些带或在某些区域分布较为集中，而在另一些区域则很少发生，强震活动的这种特性则表现得更为明显。

根据区域地震监测台网的观测结果，绘制了区域 1970 年 1 月～2023 年 10 月 M=2.0～4.6 级中小地震震中分布图（图 1.2-2）。从图中可见，近代中小地震活动多集中分布在区域性断裂及断裂的交汇部位，如在川滇块体边界断裂带上的石棉-甘洛-昭觉一线、则木河断裂带南东段至小江断裂带北西段的普格-巧家一线、龙门山断裂带南西段的都江堰-大邑-宝兴一线以及荥经-马边-盐津断裂带的荥经-峨边-马边-雷波-盐津一线上均有成带、成丛的中小地震分布；四川盆地内的自贡、兴文、长宁、华蓥及荣昌等地也有成团、成丛分布的近代中小地震活动。

在目标区附近的泸州地区，中小地震也密集成丛分布。由此可见，近代中小地震活动具有两个突出的特点：一是近代中小地震活动的空间分布具有明显的非均匀性；二是绝大多数近代中小地震均沿断裂带丛生，显示出活动断裂对中小地震的 空间分布具有重要的控制作用。

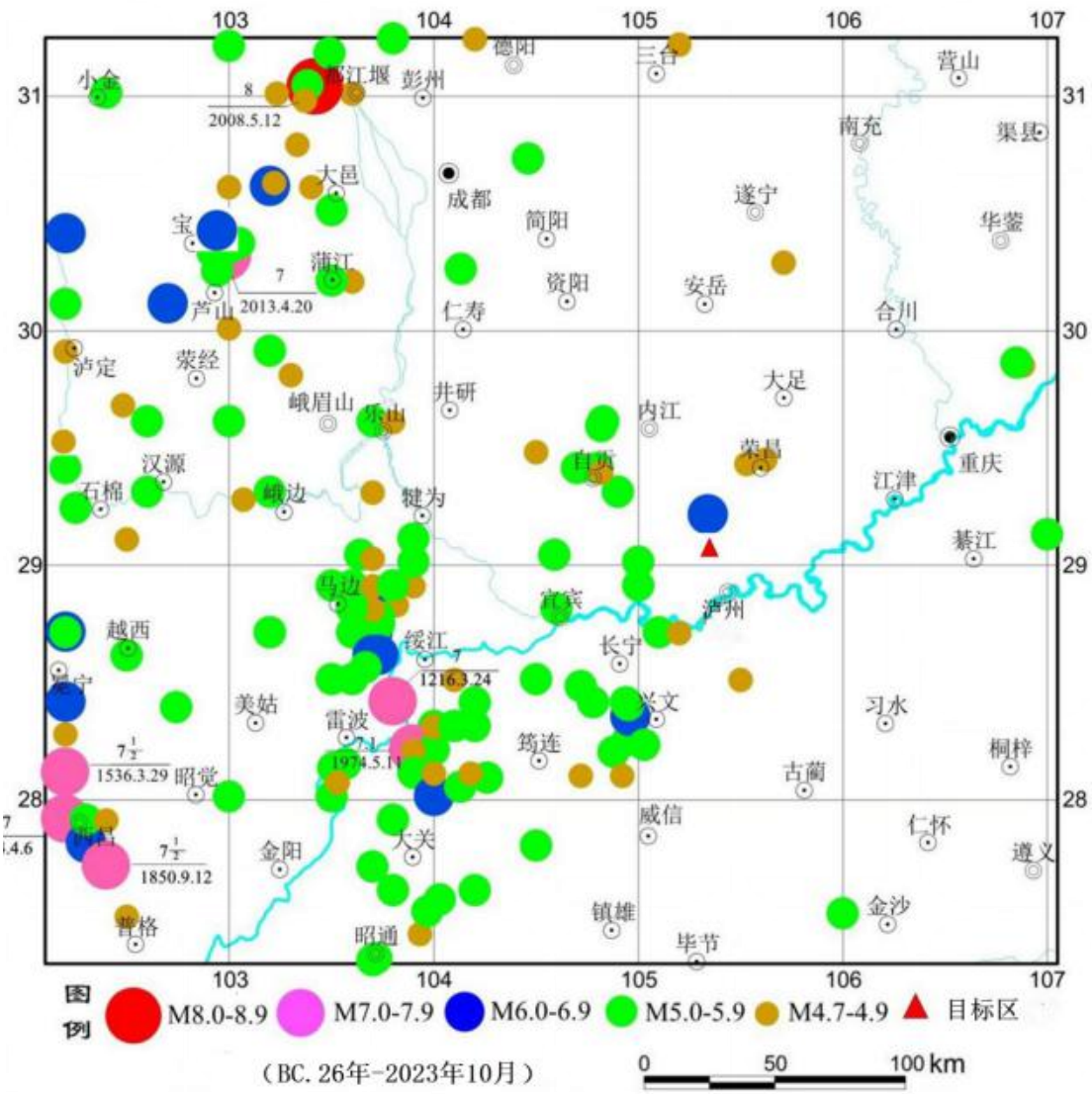


图 1.2-1　区域破坏性地震震中分布图

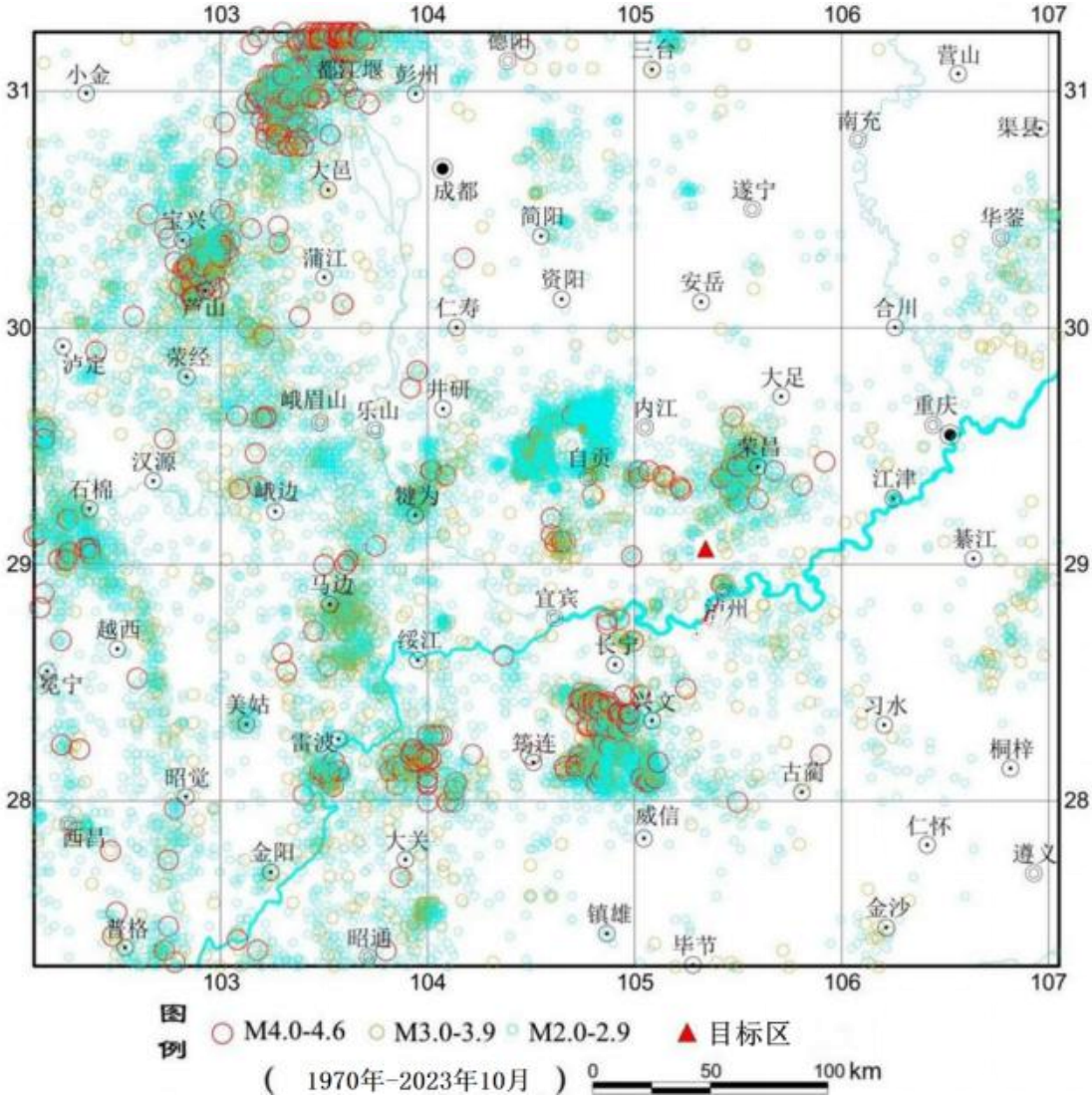


图 1.2-2　区域中小地震震中分布图

综上所述，区域强震、中小地震活动在空间分布上呈明显的不均匀性，其分布格局与区域性断裂构造有十分密切的关系，强震的主要活动场所是活动断块的边界、活动断裂的交汇部位和新构造运动十分强烈的地区。因此，地震活动空间分布格局的差异，显示在不同地区断裂运动方式和运动强度存在着差异，这将为地震区（带）划分和潜在震源区的确定提供重要的依据。

1.2.2 地震震源深度分布特征

（1）破坏性地震的震源深度分布

在区域范围内，共检索到 M≥4.7 级地震震源深度 92 次，表 1.2-1 给出了中强地震震源深度不同层位分布数据的统计结果图 1.2-3 是区域中强地震震源深度沿经度分布剖面图，图 1.2-4 是区域中强地震震源深度沿纬度分布剖面图。

表 1.2-1　区域部分破坏性地震（M≥4.7）震源深度分布一览表

地震震源深度（km）	1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	>30
地 震 次 数	5	24	22	22	5	7	7
占总数的百分比（%）	5.43	26.09	23.91	23.91	5.43	7.61	7.61

从表中可见，半数以上 M≥4.7 级地震震源深度分布在地下 6～20km 范围内，约 5.43%的地震震源深度集中分布在地下 1～5km 层位内，约 79%的地震位于 20km 以下层位。由图 1.2-3 和图 1.2-4 可以看出，在东经 103.0°～104.0°之间和北纬 28.5°、30.5°附近，地震震源深度分布较深，可达到 50km 左右，地表对应在雷波地区和大邑—蒲江一带；其余地区地震震源深度多在 6～20km 之间，优势分布层位亦在 6～20km 之间。2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震震源深度为 14km，2021 年9 月 16 日四川泸县6.0 级地震震源深度为 10km，2022 年6 月 1 日四川芦山6.1 级地震震源深度为 17km， 均属浅源地震。

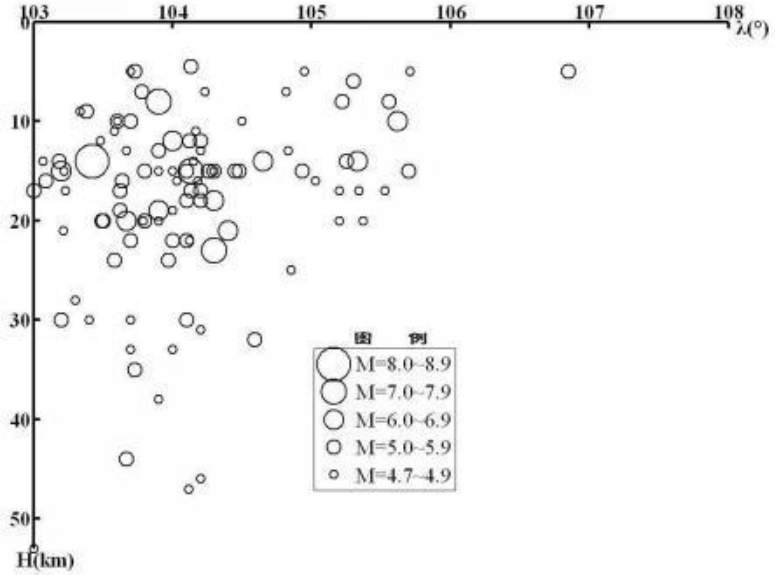


图 1.2-3　区域破坏性地震震源深度沿经度分布剖面图

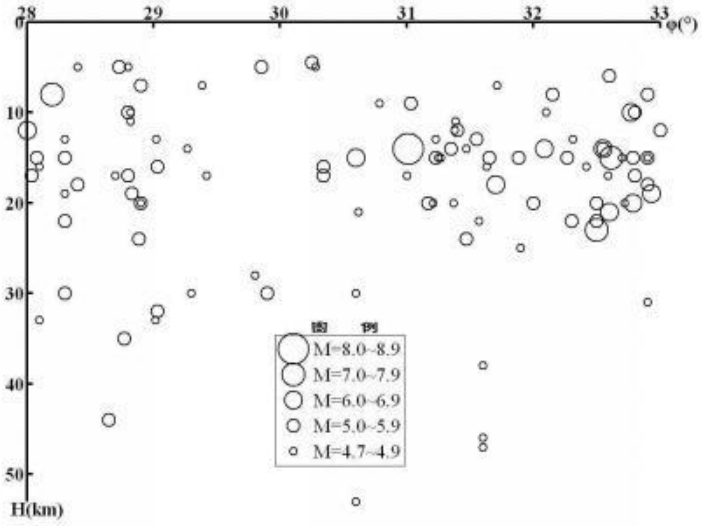


图 1.2-4　区域破坏性地震震源深度沿纬度分布剖面图

（2）近代中小地震的震源深度分布

在区域范围内，共检索到M＝2.0~4.6 级近代中小地震震源深度24064 次，表 1.2-2 给出了近代中小地震震源深度不同层位分布数据的统计结果，图 1.2-5 和图 1.2-6 是近代中小地震震源深度分别沿经度、纬度分布剖面图。

从表中可见，近代中小地震震源深度的优势分布层位处于地下 1~10km 范围内，而地下 1~15km 的层位中更是包括了约 84.41%的近代中小地震活动，深度>20km 层位中的中小地震分布明显减少。

表 1.2-2　区域部分近代中小地震（M ＝2.0~4.6）震源深度分布一览表

地震震源深度（km）	1—5	6—10	11—15	16—20	21—25	26—30	＞30
地 震 次 数	9927	6476	3911	2331	972	284	163
占总数的百分比（%）	41.25	26.91	16.25	9.69	4.04	1.18	0.68

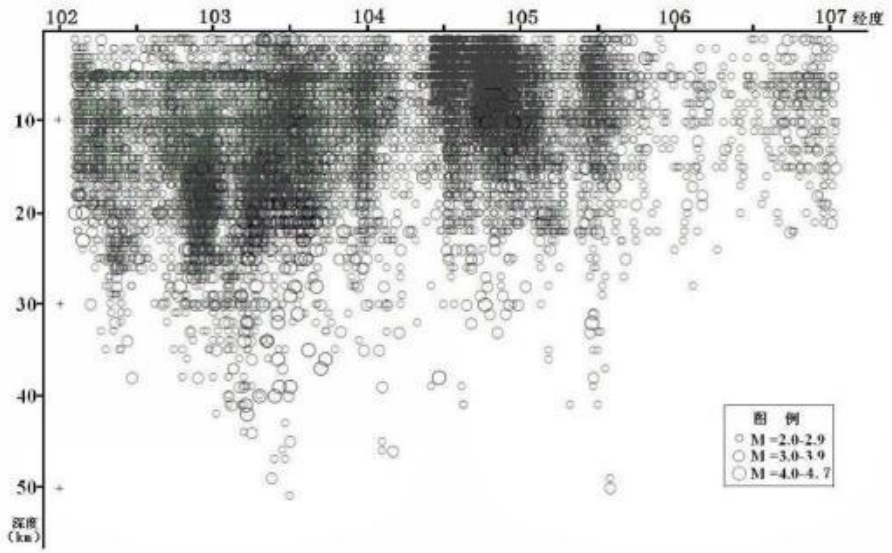


图 1.2-5　近代中小地震震源深度沿经度分布剖面图

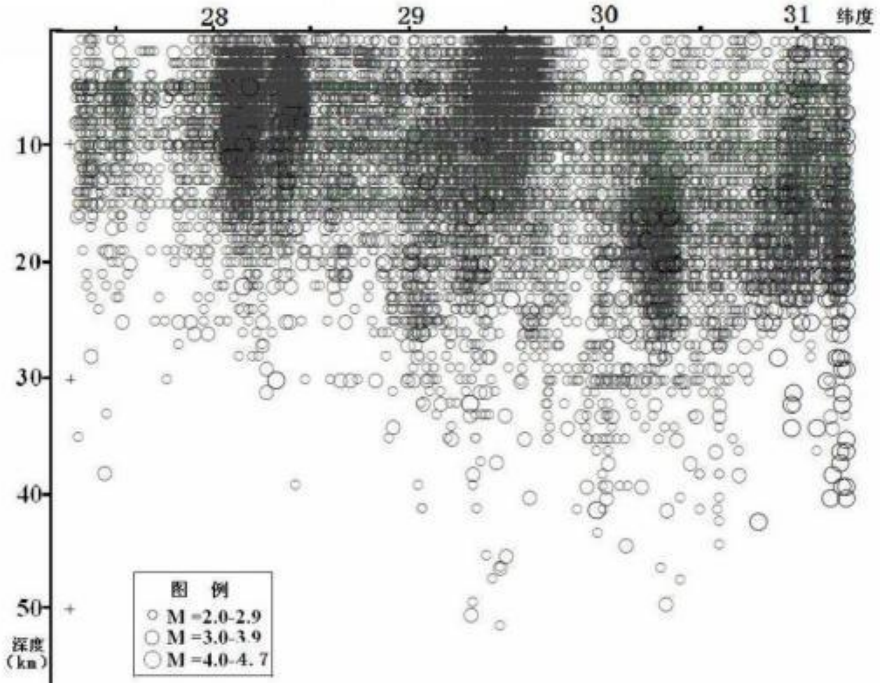


图 1.2-6　近代中小地震震源深度沿纬度分布剖面图

由图 1.2-5 和图 1.2-6 可以看出，在东经 103°～104°之间和 105.5°附近、北纬 29°～29.5°之间及 30°～30.7°、31°～31.25°附近，地震震源深度分布较深，最深可达到 50km，地表分别对应于雅安—峨边地区、荣昌一带、都江堰以及龙门山断裂带南西段；其余地区地震震源深度多在 1～15km 之间，优势分布层位在 1～10km 范围内。

综上可见，区域强震、中小地震震源深度的优势分布层位是有明显差异的，M≥4.7 级地震震源深度的优势分布层较之近代中小地震震源深度优势分布层更

深一些，但都属于浅源地震的震源深度分布范围。

1.3 地震活动的时间分布特征与未来地震趋势估计

1.3.1 地震区（带）划分

从前述可知，由于地震活动和断裂构造有密切的关系，并且区域地震活动有较明显的分区特征，需进行地震区（带）的划分，以体现地震活动的空间不均匀性。地震带是分析地震活动时间分布特征、估计未来百年地震活动趋势以及在地震危险性分析中确定地震活动性参数的基本统计单元。地震区（带）的划分，直接影响着目标区地震危险性评价的结果，因此是概率法主要的基础工作之一。在本报告中，根据区域地震活动空间分布的实际情况，考虑地震活动对目标区的影响及合理的统计计算需求，充分考虑了 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震对区域地震活动性的作用和影响，吸收、利用了《中国地震动参数区划图（GB18306-2015）》的工作成果，图 1.3-1 给出了地震区带划分方案图。从图中可见，区域主要位于龙门山地震带、鲜水河—滇东地震带、长江中游地震带和右江地震带。因此我们将对这 4 个地震带的概况进行讨论，并以此作为地震时间分布特征研究、地震活动趋势预测和地震危险性分析的统计单元。现将各地震带的地震活动概况简述如下：

（1）龙门山地震带

本带位于六盘山—祁连山地震带的南侧，其西为巴颜喀拉山地震带。龙门山地震带主要包括龙门山山脉及秦岭的西段，大地构造上为龙门山褶皱带与秦岭褶皱系的一部分。带内北部以北西西向的西秦岭北缘断裂带及甘南—川西北弧形构造系为主，南部则以北东向的龙门山断裂带为主体构造格架，并发育有近南北向的岷江断裂、虎牙断裂等，是青藏高原东缘的重要组成部分。深部构造资料亦表明，本带是柴达木—阿尔金地震带、六盘山—祁连山地震带所对应的地壳厚度陡变带、重力梯级带和航磁异常带向南的延续，也是中国大陆东西部地区地壳结构和特征具明显差异的分界线。龙门山地震带位于我国著名的南北地震带中部，强烈地震主要丛集在天水—武都—松潘地区及龙门山断裂带，如 1654 年甘肃天水南 8 级大震、1879 年甘肃武都南 8 级大震、1713 年和 1933 年茂县较场 7 级和 7½级地震及 1976 年松潘—平武 7.2 级强震群、2008 年汶川 8.0 级地震、2013 年芦山 7.0 级地震，2022 年芦山 6.1 级地震等，是青藏高原北部地震亚区主要强震

活动带之一。

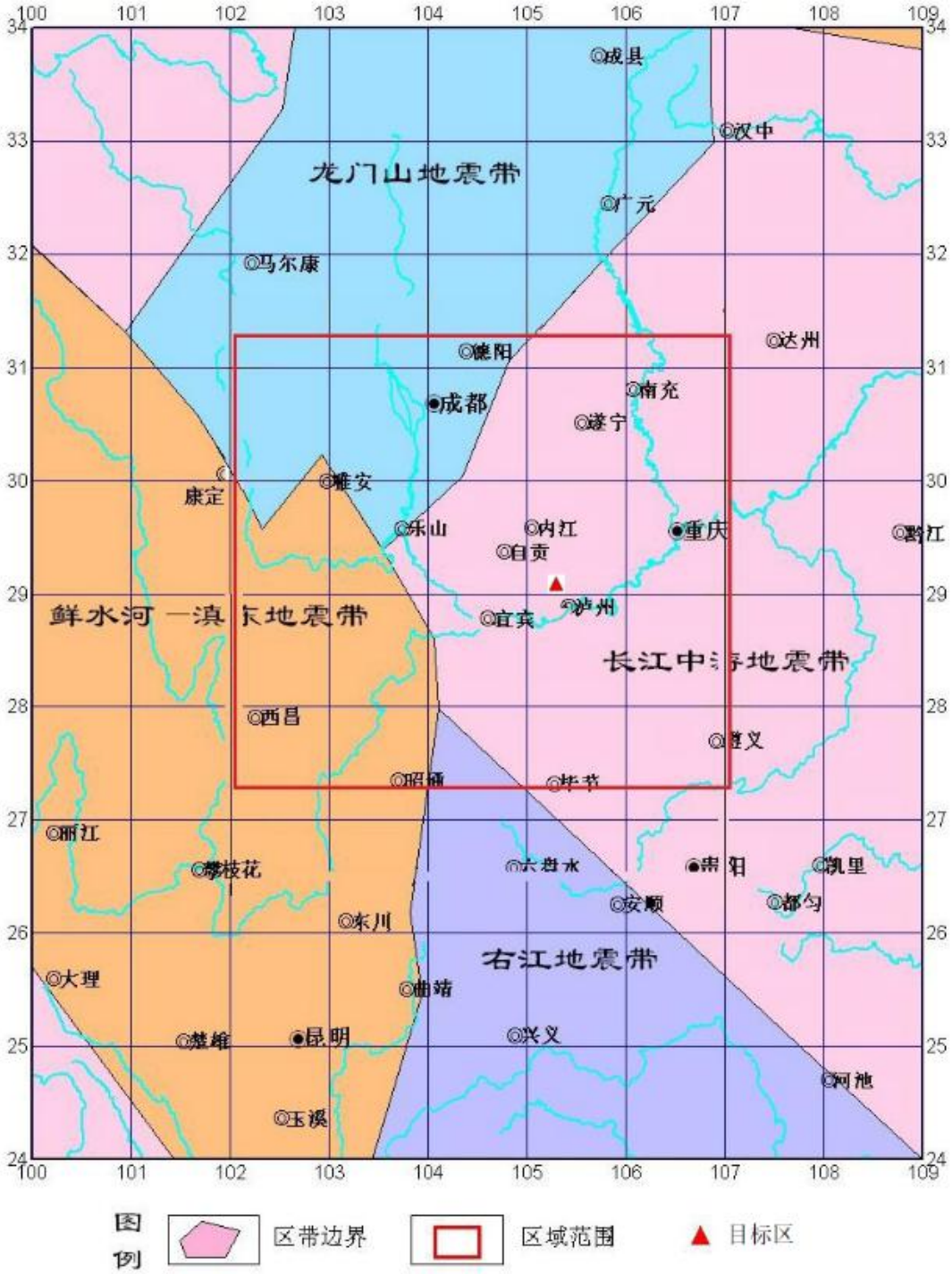


图 1.3-1　地震区带划分图

龙门山地震带自公元前193年起就有地震记载，至2023年10月共记到M≥4.7级地震241次（已删除余震，震群型地震只取最大的1～2次），其中8级大震3次，7.0～7.9级强震10次，6.0～6.9级地震35次；带内目前的最大地震是1654年甘肃天水南8级地震、1879年甘肃武都南8级地震和2008年四川汶川8.0级地震

（2）鲜水河-滇东地震带

本带西起青藏高原中北部的昆仑山南缘，东到云南昭通、文山，包括了青海南部、四川西部、云南中东部以及西藏部分地区，带内地质构造复杂，边界断裂和块体内部断裂活动强烈，地震活动强度大、频度高。该带新构造运动以水平挤压为主，在强烈挤压作用下块体间产生大规模水平滑移，兼有垂直差异运动。主要断裂在新构造时期均有活动，第四纪以来断裂活动尤为明显，断裂活动具有挤压走滑性质，是我国西部地震活动最强烈的地区之一。该地震带内的活动断裂多呈北西、北北西和近南北向展布，最著名的断裂带有鲜水河—安宁河—则木河—小江断裂带、金沙江断裂带、红河断裂带、通天河断裂带等。沿该带内诸多断裂构造发生的强烈地震形成了中国西部几条著名的地震活动条带：鲜水河—安宁河—则木河—小江强震活动条带、峨山—通海强震活动条带、剑川—大理强震活动条带，以及川滇块体内部的巴塘、理塘、永胜、盐源—宁蒗和楚雄—建水等区域性地震活动条带。鲜水河—滇东地震带在大地构造位置上属甘孜印支褶皱带大部和扬子地台部分地区，该带东缘处在布格重力异常梯度带和地壳厚度陡变带上，西部则变化比较平缓；地壳厚度在48～70km之间，且具有自南东向北西逐渐增厚的趋势；航磁异常变化范围大，具有明显的分区性，分区界线既是区域大断裂带，也是航磁异常梯度带。本带的主压应力场方向具有自北西向南东逐步呈NEE→EW→NW→NNW方向的转折，与块体的滑移方向相适应。

鲜水河—滇东地震带自公元624年起有地震史料记载，至2023年10月共记到M≥4.7级地震763次（已删除余震，震群型地震只取最大的1～2次），其中8级大震1次；7.0～7.9级地震30次；6.0～6.9级地震99次。本带目前的最大地震是1833年9月6日发生在云南嵩明的8级地震。

（3）长江中游地震带

本带北邻华北地震区，南接右江地震带和华南沿海地震带，是华南地震区最北的一个地震带，包括四川、重庆、湖南、湖北、贵州、广西和江西的部分地区。长江中游地震带位于华南加里东褶皱带和扬子地台西部，地壳厚度 33～40km，且由东向西逐渐增厚，到四川盆地又减薄；重、磁场变化平缓。带内断裂以北东、北北东向最为发育，并控制早第三纪盆地发育，其中以江汉—洞庭湖断陷规模最大，堆积了厚达 500～800m 的下第三系。晚第三纪以来，这些断裂仍有不同程度的活动，但差异活动不明显，地震活动常沿断裂带分布。本带的主压应力场总体呈北西—北西西向，向南逐渐转为北北西向与华南地区的主压应力场衔接。

长江中游地震带地震活动相对较弱，记载最早的一次地震是公元前 143 年湖北竹山西南的 5 级地震，至 2026 年 6 月已记到 M≥4.7 级地震 124 次（已删除余震，震群型地震只取最大的 1～2 次），其中 6.0～6.9 级地震 5 次，5.0～5.9 级地震 72 次；带内目前的最大地震是 1631 年发生在湖南常德的 6¾级地震，近年来发生的 2 次 6.0～6.9 级以上地震如 2019 年 6 月 17 日四川长宁 6.0 级地震和 2021 年 9 月 16 日四川泸州 6.0 级地震。

（4）右江地震带

右江地震带是华南地震区内的一个地震带，位于长江中游地震带西南侧，鲜水河滇东地震带东南侧，主要包含了贵州、云南、广西的部分地区。本带的主要地震构造为北西向展布的右江构造带，沿构造带局部发育了一些小型盆地，断裂晚第四纪以来活动性较弱，仅零星发生了少数中等强度的地震，晚第三纪以来，新构造运动以缓慢的整体抬升为特征。

右江地震带自公元 1526 年贵州晴隆 5 级地震记载以来，至 2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 53 次（已删除余震），其中 6.0～6.9 级地震 1 次，5.0～5.9 级地震 30 次，带内目前的最大地震是 1875 年广西凌云北 6½级地震。

1.3.2 地震活动的时间分布特征与未来地震趋势估计

（1）龙门山地震带

龙门山地震带历史地震记载悠久，自公元前 193 年甘肃临洮 6½级地震迄今已积累了 2200 多年的地震史料。根据历史地震资料完整性分析结果可知，本带自 15 世纪以后大地震基本能有保障，兼顾到本带地震强度大、活动周期长的特点，选取 1500 年以后的资料论述本带地震活动的时间分布。图 1.3-2 绘制了龙门山地震带地震震级和累积应变能释放量随时间分布图。

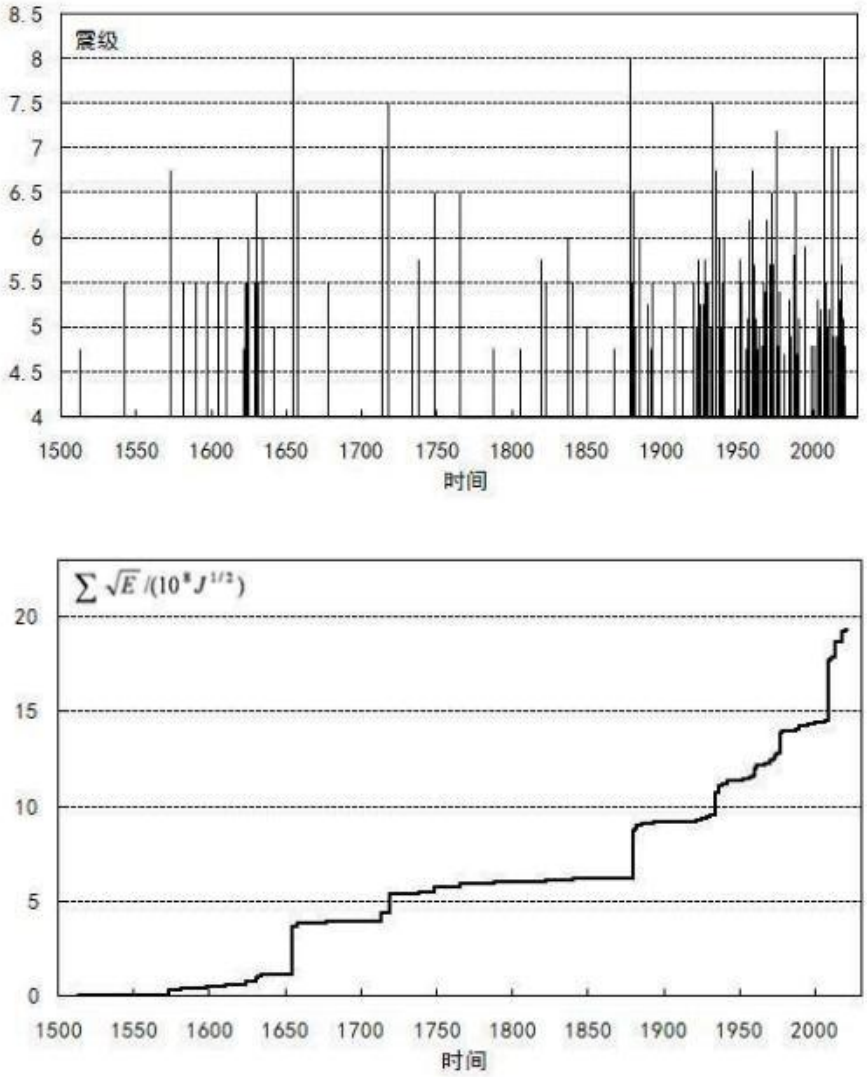


图 1.3-2　龙门山地震带地震震级和累积应变释放能量随时间分布图

由图可见，本带地震活动的时间分布具有一定的周期性特征。若以地震相对平静期内地震活动强度不大于 6.5 级来划分，则自 1573 年来可划分出两个地震相对活跃期，表 1.3-1 给出了地震活动分期结果及有关参数。结合图表分析得知，第一个地震相对活跃期从 1573 年起，历经 146 年至 1718 年结束，这期间曾发生 8 级大震 1 次，7.0～7.9 级强震 2 次，6.0～6.9 级地震 6 次；而从 1719 年～1878 年的 160 年间，龙门山地震带的地震活动水平总体较低，未发生过 7 级以上地震，6 级左右地震也仅记到 3 次，最大地震强度仅为 6½级，显示该带处于地震相对平静期；第二个地震相对活跃期始于 1879 年，这期间已发生 8 级大震 2 次，7.0～7.9 级强震 5 次，6.0～6.9 级地震 17 次；第二地震相对活跃期已发生了 2 次 8 级地震，6～7 级地震频次也较第一地震相对活跃期明显增多，应变能累积释放总

量也大大超出了第一活跃期的能量释放水平。

表 1.3-1　龙门山地震带地震活动时段划分一览表

分期	地震活动时段划分	持 续	各级地震次数			Mmax
编号		时 间	6.0～6.9	7.0～7.9	≥8.0	
1	相对平静期（ ? ～1572） 相对活跃期 （1573～1718）	? 146	（1） 6	2	1	（6¼) 8
2	相对平静期 （1719～1878） 相对活跃期 （1879～)	160 （143）	3 （17）	0 （5）	0 （2）	6½ （8）

注：表中括号内的数字是根据现有资料统计的结果。

综合现有资料分析认为，龙门山地震带地震活动具有一定的周期性，虽然自1879 年开始的第二个地震相对活跃期在最大震级、地震频次和应变能累积释放总量上均达到或超过了第一活跃期，但持续时间仍相差三年。据此估计，未来百年内，本带仍处于第二活跃期末期及下一个活动周期内的相对平静期内，不能排除发生 7 级以上地震的可能，地震活动水平略高于 1879 年至今的平均地震活动水平。

（2）鲜水河—滇东地震带

本带最早记载的历史地震是公元 624 年四川西昌一带≥6 级地震。从公元 624 年至十七世纪晚期的一千余年中，带内的历史地震记载多集中在本带南东部川滇块体的中南部地区，本带北西部地区（如鲜水河断裂带、金沙江断裂带、通天河断裂带等）则相对缺少历史地震记载。自十七世纪末期开始，鲜水河—滇东地震带的历史地震资料逐年增多，分布区域也相对合理。因此，对本带地震活动时间进程的讨论，在十七世纪末期以后的时间域内进行将更为合理。图 1.3-3 绘制了鲜水河—滇东地震带 1600 年来 M≥4.7 级地震的地震震级和累积应变释放能量随时间分布图。

从图中可见，地震活动的时间进程呈现出相对平静与相对活跃相间起伏的特点。若按相对平静期内地震活动强度不大于 6.5 级进行划分，在研究时段内可分出 6 个地震相对活跃期，表 1.3-2 给出了地震活动分期结果及有关参数。结合图表分析可知，各地震相对平静期的持续时间从 10 年至 34 年不等，平均为 20 年左右，相对平静期内地震活动强度多保持在 5½～6½级；各地震相对活跃期的持续时间从 20 年至 65 年不等，平均约 42 年左右，相对活跃期内地震的最大震级为 7¼～8 级；各活动时段的地震活动频次和累计应变能释放总量各异，呈

显著的不均匀状态。

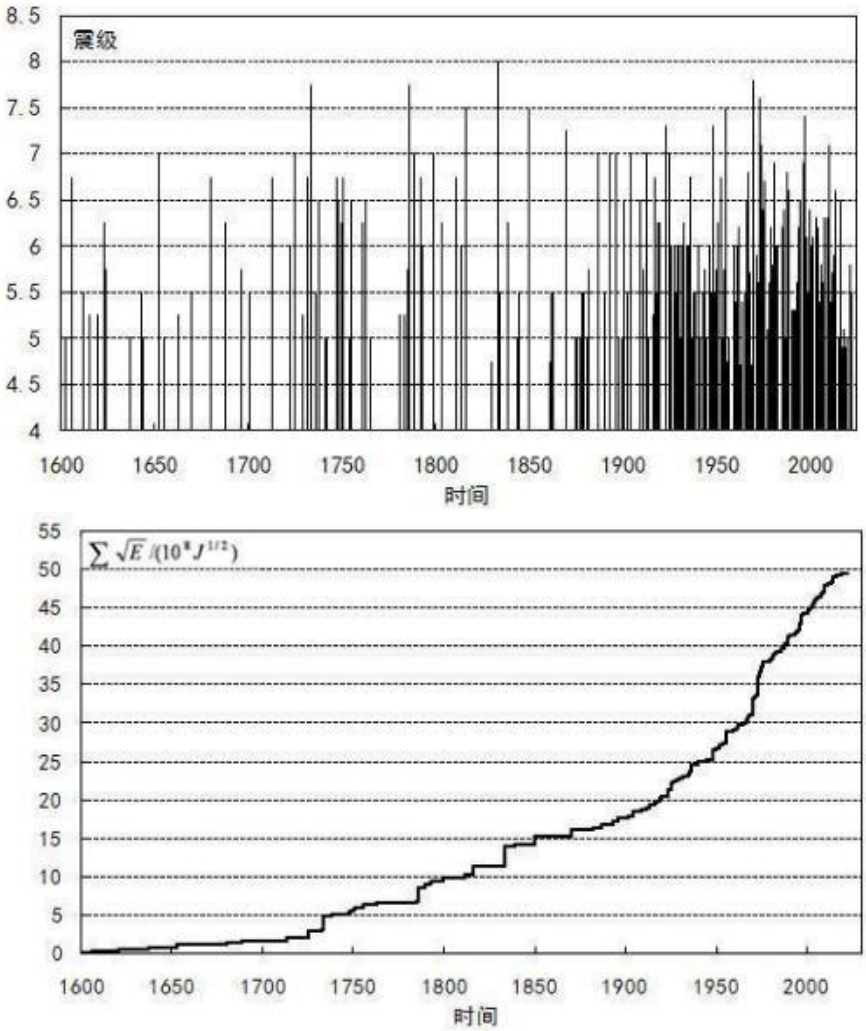


图 1.3-3　鲜水河—滇东地震带地震震级和累积应变释放能量随时间分布图

表 1.3-2　鲜水河-滇东地震带地震活动时段划分一览表

分期	地震活动时段划分	持 续	各级地震次数			M_{max}
编号		时 间	6.0～6.9	7.0～7.9	≥8.0	
1	相对平静期（1681～1712）	32	1	0	0	6¼
	相对活跃期（1713～1751）	39	9	2	0	7¾
2	相对平静期（1752～1785）	34	4	0	0	6½
	相对活跃期（1786～1850）	65	7	5	1	8
3	相对平静期（1851～1869）	19	0	0	0	5½
	相对活跃期（1870～1925）	56	10	8	0	7¼
4	相对平静期（1926～1935）	10	11	0	0	6¼
	相对活跃期（1936～1955）	20	9	2	0	7½

5	相对平静期（1956～1966）	11	5	0	0	6.5
	相对活跃期（1967～1997）	31	20	5	0	7.8
6	相对平静期（1998～2009）	12	9	0	0	6.4
	相对活跃期（2010~)	（12）	（4）	（1）	（0）	（7.1）

注：表中括号内的数字是根据现有资料统计的结果。

综上分析认为，鲜水河-滇东地震带最近 300 余年来的地震活动时间分布有一定的准周期性变化特点，每个地震活动时段（平静期+活跃期）的持续时间为 30～99 年不等，平均约 63 年左右；各相对活跃期内的最大地震震级为 7¼≤Mmax≤8.0 级，相对平静期内的最大地震震级为 5.5≤Mmax≤6.5 级，各相对活跃期内 7 级以上强震的发生频次一般为 2～8 次，平均为 5 次左右。进入 20 世纪后，鲜水河—滇东地震带的地震活动周期相对缩短。2010 年 4 月 14 日青海玉树 7.1 级地震后，本带进入新一个相对活跃期中，据此推测，在未来百年内，鲜水河—滇东地震带的地震活动将保持在活跃水平，并可能发生多次 M≥7.0 级地震。

（3）长江中游地震带

本带历史地震记载悠久，最早记录的一次地震是公元前 143 年 6 月 7 日湖北竹山西南 5 级地震，此后直至公元 1400 年之前的 1500 余年间，该带仅发生了 7 次 M≥4.7 级地震，表明长江中游地震带早期地震记录缺失且地震活动频度较低。尽管 1400 年以来不能保证该带内 M≥5 级地震资料的完整，但为了定性地分析地震活动在时间上的变化过程，选取 1400 年以后的资料论述本带地震活动的时间分布。图 1.3-4 给出了长江中游地震带 1400 年以来地震震级和累积释放应变能量随时间分布图。

从图中可见，本带地震活动的总体水平较低，在600余年的研究时段内，仅发生过4次M≥6级地震，本带的地震活动多以M≤5.9级地震为主。根据本带地震活动的实际水平，若按相对平静期内地震活动强度不大于5½级进行划分，在研究时段内可分出2个地震相对活跃期（1469—1640年，1819—？年），表1.3-3给出了地震活动分期结果及有关参数。结合图表分析得知，自1469年湖北钟祥5½级地震后，本带经历了172年的地震相对活跃期，期间发生了1次6¾级地震和多次5~5.5级地震；自1819年贵州贵定5¾以来的地震相对活跃期间，发生了3次6.0~6.9级地震和多次5~5.9级地震。

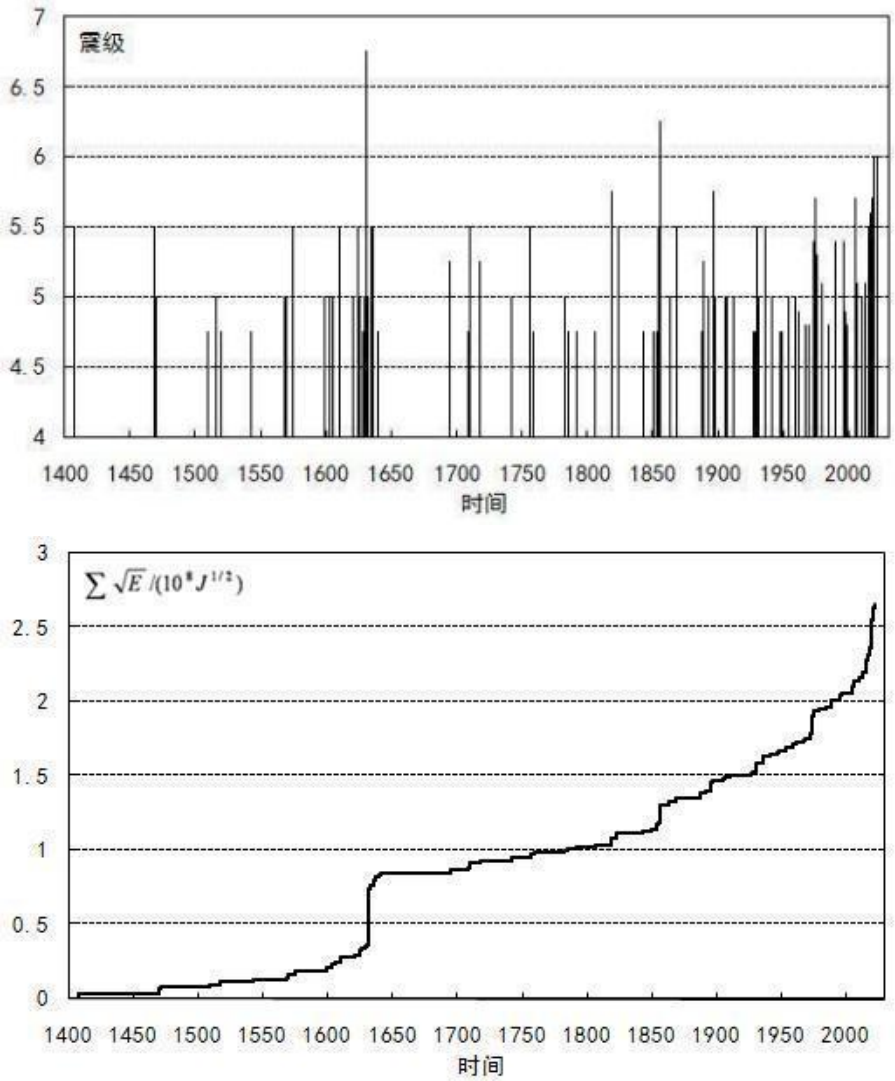


图 1.3-4　长江中游地震带地震震级与累积释放应变随时间分布图

表 1.3-3　长江中游地震带地震活动时段划分一览表

分期	地震活动时段划分	持　续	各级地震发生次数			M_{max}
编号		时　间	5.0～5.9	6.0～6.9	≥7.0	
1	相对平静期（?　　～1468） 相对活跃期（1469～1640）	172	19	1	0	6¾
2	相对平静期（1641～1818） 相对活跃期（1819～　　）	178 （203）	6 （43）	0 （3）	0 0	5½ 6¼

注：表中括号内的数字是根据现有资料统计的结果。

综合现有资料分析认为，长江中游地震带目前正处在自 1819 年开始的地震相对活跃期中；从这个活跃期现有的地震活动水平可见，无论是 M≥5.0 级地震的活动频次、累积应变能释放总量还是最大地震震级和持续时间，该带目前大致处于相对活跃期后期。因此，未来百年内长江中游地震带的地震活动仍将保持相对活

跃水平。

（4）右江地震带

右江地震带自公元 1526 年贵州晴隆 5 级地震记载以来，已积累了近 500 年的地震史料。该地震带地震活动较弱，仅零星发生了少数中等强度的地震，为定性地分析地震活动在时间上的变化过程，选取 1800 年以后的资料分析本带地震活动的时间分布。图 1.3-5 绘制了右江地震带 1800 年以来地震震级和累积应变能释放量随时间分布图。

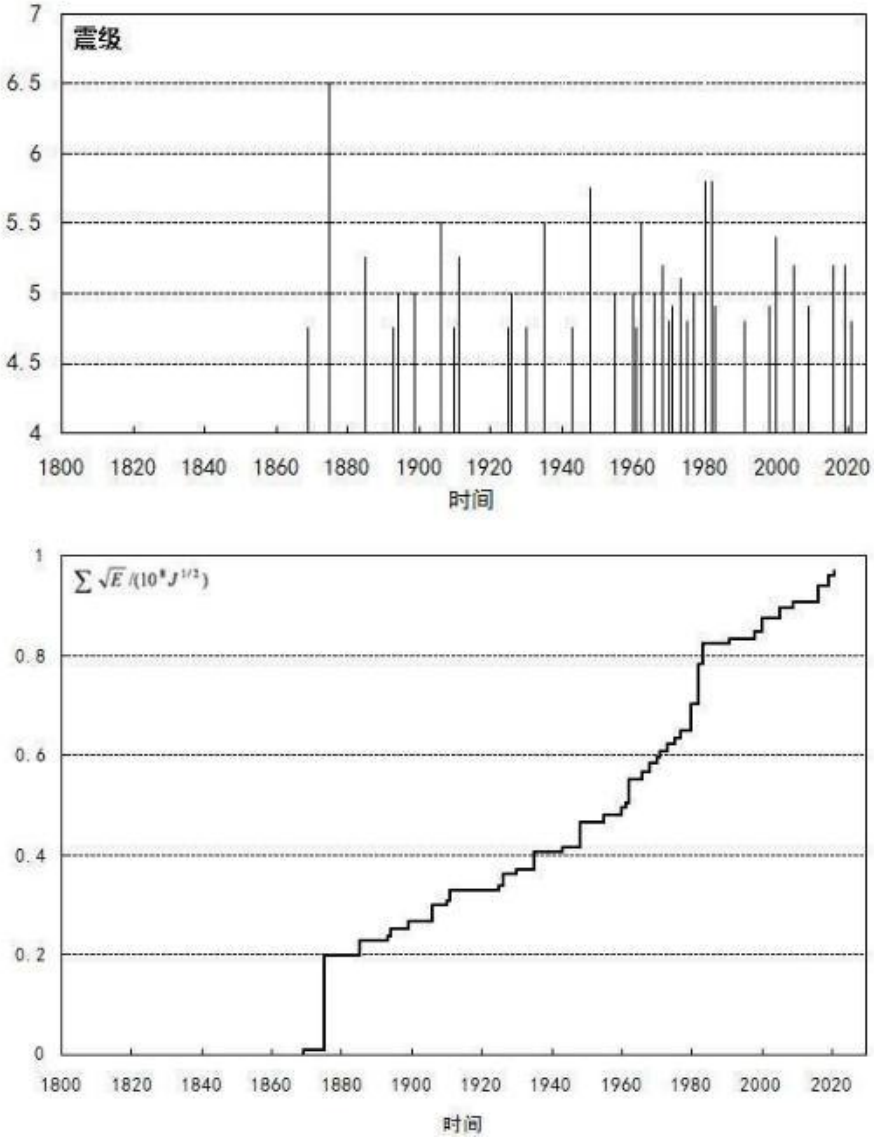


图 1.3-5　右江地震带地震震级和累积应变释放能量随时间分布图

由图可见，本带地震活动的总体水平较低，在 200 多年的研究时段内，仅发生过 1 次 M≥6 级地震，本带的地震活动多以 5 级左右的地震为主。根据本带地震活动的实际水平，若按相对平静期内地震活动强度不大于 5½级进行划分，在研究

时段内可分出 3 个地震相对活跃期，表 1.3-4 给出了地震活动分期结果及有关参数。结合图表分析得知，自 1875 年广西凌云北 6½级地震后，本带出现了 3 个地震活动相对活跃期，其持续时间约为 30 年，它们分别出现在 1875～1906 年，最大地震震级为 6½级；1935～1962 年，最大地震震级为 5¾级；1982 年来，记录到的最大地震震级为 5.8 级。上述几个相对平静期与相对活跃期持续时间间隔为 18～40 年。

表 1.3-4　右江地震带地震活动时段划分一览表

分期编号	地震活动时段划分	持续时间	各级地震次数			M_{max}
			5.0~5.9	6.0~6.9	≥7.0	
1	相对平静期　（?　～1874）	?	?	?	?	?
	相对活跃期　（1875～1906）	32	4	1	0	6½
2	相对平静期　（1907～1934）	28	2	0	0	5¼
	相对活跃期　（1935～1962）	28	6	0	0	5¾
3	相对平静期　（1963～1981）	18	5	0	0	5.4
	相对活跃期　（1982~　　)	（40）	（7）	（0）	（0）	（5.8）

注：表中括号内的数字是根据现有资料统计的结果。

综合现有资料分析：右江地震带大致具有 60 年左右的地震活动周期（平静期+活跃期）。目前本带处于自 1982 年开始的地震活跃期中，从这个活跃期现有地震活动水平可见，M≥5.0 级地震的活动频次、应变释放总量均已达到该带在相对活跃期内的平均地震活动水平。因此，未来百年内，右江地震带处于相对活跃的地震活动水平。

1.4 地震震源机制及现代构造应力场分析

现代构造应力场是驱动区域断裂构造活动和地震活动的基本原因，不同的现代构造应力场会引起不同类型断层的变形特征，不同的断层变形性质，产生的地震强度也不同，从而对目标区地震安全性的评定结果产生影响。

根据单个地震震源机制解反推地震发生地区的现代构造应力场，是目前常用的有效方法。图 1.4-1 给出了区域地震震源机制解空间分布示意图，所用资料主要取自《中国地震震源机制解》张诚等，1990；《四川地震资料汇编（第三卷）》编辑组，2000；王绍晋等，1988；王绍晋等，2001；四川省地震局监测研究所，2002，

2003，2004，2005；周光全等，2002）和USGS震源机制解资料（表1.4-1）。从图1.4-1和图1.4-2中可见，区域地壳水平主压应力方向有一定的分区特点：区域西侧的鲜水河断裂带南东段—安宁河—则木河断裂带一线，主压应力方向自北向南呈近东西→北西向分布；在区域北西部的龙门山断裂带中南段都江堰—大邑—宝兴一线，主压应力轴以北西西—北西向为主，据《2008年5月12日汶川特大地震震源特性分析报告》（陈运泰等，2008年5月），汶川8.0级地震主压应力方向为北西西向，据陈运泰院士课题组刘超等的矩张量反演结果，2013年4月20日在四川省芦山县发生的7.0级地震为逆冲型地震，其主压应力方位角为126°,呈北西向，2022年6月1日四川芦山6.1级地震为2013年4月20日芦山7.0级地震的余震，其主压应力方向为304°,为北西向（USGS），在这样的应力作用下，龙门山断裂带主要以逆冲为主、兼少量右旋走滑分量；区域南部的荥经—马边—雷波—大关—昭通一线，主压应力方向的优势分布方位则呈北西—北西西向；在区域中东部的四川盆地和四川北部地区，破坏性地震的震源机制解结果较少，区域中部自贡—内江以及泸州等地显示水平应力优势分布为北北西—北东向，2021年9月16日四川泸县6.0级地震主压应力方向为205°,为北东向（USGS）。从图中还可看出，在研究区域内有少数地震震源机制与其余地震有较大差异，这可能是因构造环境和介质特性的差异而导致的局部应力场畸变。

表1.4-1　区域地震震源机制解参数一览表

地震日期	震中位置		震级	节面A			节面B			P轴		T轴		N轴	
年月日	北纬（°）	东经（°）	M	走向	滑动角	倾角	走向	滑动角	倾角	方位	仰角	方位	仰角	方位	仰角
19170731	28	104	6¾	10	ES	48									
19360516	28.5	103.6	6¾	55	NW	71	162	NE	51	12	43	112	13	215	44
19520930	28.5	102.2	6¾	65	NW	75	354	NE	40	128	21	13	45	235	36
19590311	28.2	104	5	311	SW	60	234	NW	69	181	6	275	37	84	52
19620701	29.9	103.2.	5.1		299	78		64	20	130	54	285	31	25	16
19661011	27.9	103.8	5.2	280		90	190	NW	87	325	2	235	2	100	87
19670124	30.3	104.01	5.5	150	NE	78	65	SE	70	106	23	198	5	302	66
19670430	29. 1	102.1	4.6		63	84		248	6	63	39	243	51	333	1
19670505	29.3	103.7	4.8	352	SW	76	268	NW	67	41	5	309	26	143	63
19700224	30.6	103.2	6.2	77	NW	75	170	NE	80	303	5	34	17	217	73

19700731	28.5	103.6	5.4	171	SW	70	78	SE	83	305	10	212	20	62	69
19710310	28.6	103.0	4.5	76	NNW	75	340	SWW	68	299	27	207	5	107	63
19710501	29.2	102.0	3.7	100		90	100		90						
19710816	28.9	103.6	5.9	358	E	85	87	N	80	316	5	44	11	205	79
19710817	28.8	103.8	5.7	358	E	87	85	N	80	314	4	42	12	204	80
19710817	28.8	103.6	5.4		87	50		179	88	321	29	215	26	91	50
19710817	28.8	103.7	5.2	85	NNW	75	348	SWW	64	309	30	215	8	111	59
19710817	28.9	103.8	4.9	358	E	85	87	N	88	315	4	42	11	208	80
19710817	28.9	103.6	4.7		273	81		4	84	139	11	49	2	315	79
19710817	28.8	103.6	4.8	73	SSE	56	355	SWW	74	120	12	219	36	16	52
19710817	28.9	103.6	4.8	357	E	86	87	N	80	316	4	42	11	205	80
19710818	28.8	103.6	5	81	SSE	74	358	SWW	68	128	5	220	28	31	63
19710823	28.9	103.7	5.4		129	86		358	6	133	41	305	49	39	4
19710823	28.7	103.12	4.8	83	NNW	65	356	NEE	83	307	13	42	23	191	64
19710904	28.8	103.7	4.8	55	NW	80	331	NE	60	106	14	9	29	219	59
19711105	28.8	103.6	4.9	55	NW	70	321	SW	81	277	21	9	8	118	23
19720507	28.0	102.4	4.8	4	E	76	92	N	80	138	3	47	17	236	73
19720721	28.9	102.2	4. 1	114		89	24		90						
19720820	29.8	102.1	3.8	100		89	10		90						
19730422	27.7	104.2	5.0	300	NE	85	26	NW	55	350	27	249	21	127	55
19730629	28.8	103.9	4.8	43	SE	62	133	直立	90	85	20	182	20	313	62
19730629	28.8	103.6	5.4	77	SE	58	338	NE	77	113	33	211	13	320	55
19730629	28.8	103.7	4.9	62	SE	80	161	SW	80	291		201	29	21	61
19730630	28.9	103.8	5.2	22	SE	71	110	NE	83	65	19	175	9	271	70
19730802	27.9	104.5	5.4	18	NW	75	107	SW	85	333	7	241	14		
19730802	27.8	104.3	4.6	23	NE	36	78	SSE	68	327	19	208	57	67	27
19731230	29.7	103.3	4.7	235	SE	55	157	SW	80	104	16	204	32	351	53
19740511	28.2	103.9	7. 1	47	NW	87	317	SW	82	272	8	182	4	68	81
20031126	27.37	103.72	5.0	250	170	36	152	55	84	94	40	214	30	328	35
20060826	28.01	104.26	5.1	232	130	57	355	45	50	295	4	198	57	27	33
20080512	31.00	103.42	8.0	222	152	29	338	64	77	88	27	218	51	344	25
20120907	27.57	103.97	5.7	236	139	52	354	46	59	114	4	209	53	21	37
20130219	31.21	105.2	4.9	320	- 175	83	226	-5	85	182	4	274	5	30	85
20130420	30.30	102.99	7.0	218	103	39	22	80	52	119	6	247	80	28	8
20181216	28.29	105.0	5.7	80	173	87	349	3	83	305	7	214	3	100	83
20190617	28.40	104.96	6.0	314	62	65	185	135	37	64	15	182	60	327	25
20190908	29.53	104.82	5.4	240	118	52	19	59	46	311	3	212	68	42	22
20210714	30.97	103.37	4.8	178		53	59		57	119	2	26	54	211	36
20210903	28.09	104.92	4.8	74		41	248		49	341	4	121	85	251	3
20210916	29.20	105.34	6.0	279	67	32	125	104	61	205	15	65	71	299	12
20211202	28.34	104.3	4.2	137	75	50	340	107	42	238	4	348	78		

20220601	30.37	102.93	6. 1	224	105	53	20	71	40	304	7	185	76	35	12

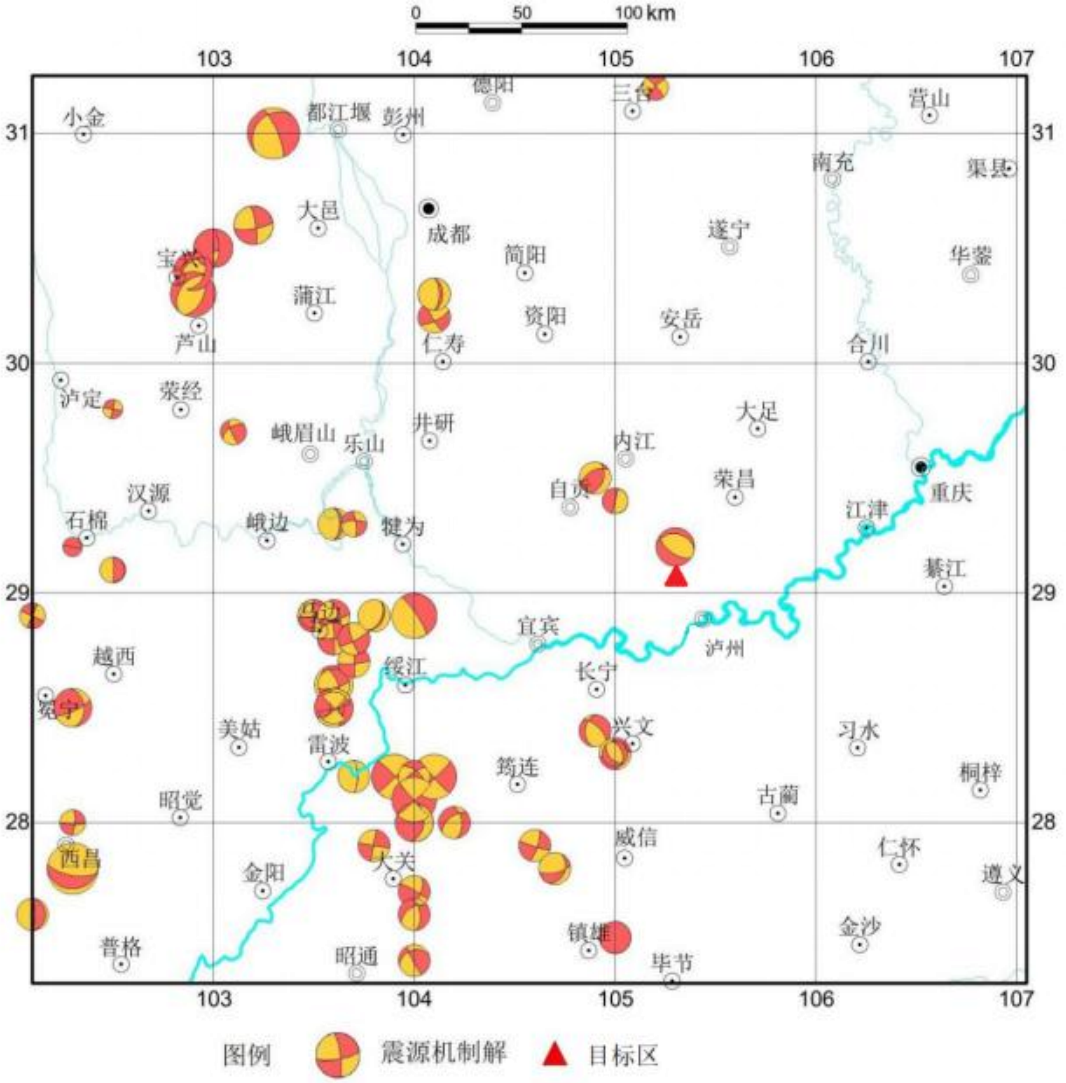


图 1.4-1　区域地震震源机制解空间分布图

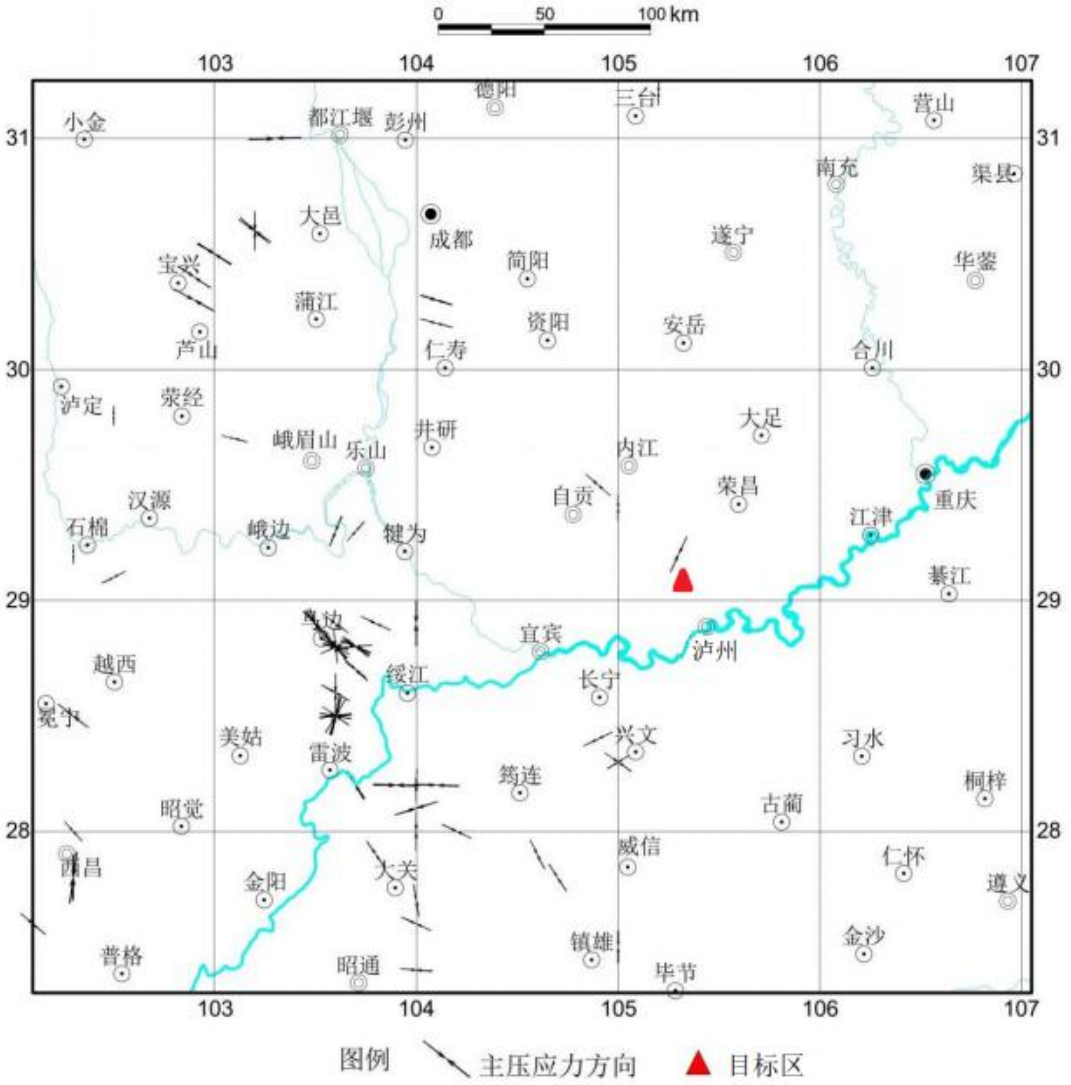


图 1.4-2　区域主压应力轴方位分布图

通过对区域现有地震震源机制解资料有关参数的统计显示（表 1.4-2），有 73.38％的节面倾角都大于或等于 60°,有 43.51%节面倾角近似直立(≥80°),表明区域地震可能的震源错动面多数是较为陡立的；对 P、T 轴倾角统计表明，主应力中水平力(≤10°)和近水平力（10°—30°)比例达 73.61%，介于水平力和垂直力之间的作用力（31°—59°)约为 18.75%，近垂直力（60°—79°)和垂直力(≥80°)仅占 7.64%。统计结果表明区域主压应力方向是近水平的，地震错动面的倾角较大。

表 1.4-2　区域及附近地震震源机制解节面及 P 、T 轴倾角分布统计

次数及百分比 倾角 数值范围	节面I		节面II		P 轴		T 轴	
	n	%	n	%	n	%	n	%
0-10	1	1.27	2	2.67	34	47.89	22	30.14
11-30	3	3.8	1	1.33	24	33.8	26	35.62
31-59	19	24.05	15	20	11	15.49	16	21.92
60-79	26	32.91	20	26.67	2	2.82	7	9.59
80-90	30	37.97	37	49.33	0	0	2	2.74

根据地震震源机制解的结果，图 1.4-3 绘制了 P 轴方位角直方图。图中纵坐标代表地震个数，横坐标代表方位角统计范围。从图中可见，P 轴优势分布方位在 91°~135°及 271°~315°范围内，优势分布方向为北西西—南东东向。

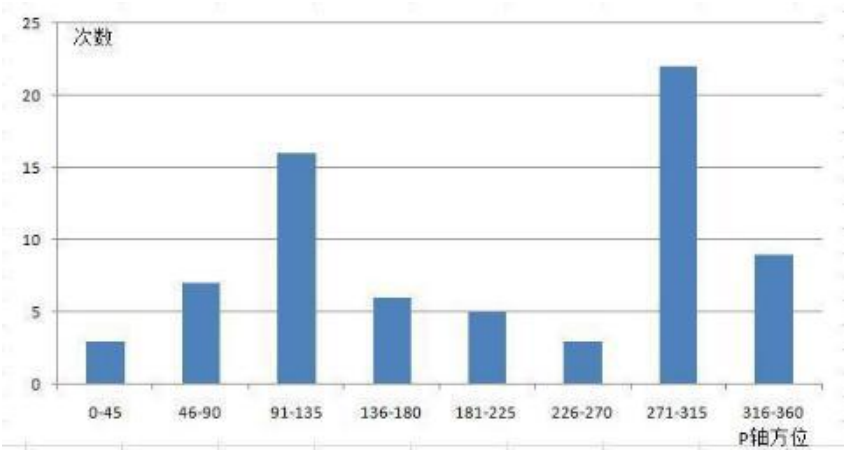


图 1.4-3　区域地震震源机制解 P、T 轴方位及倾角分布示意图

综上所述，区域基本处于以北西—北西西向近水平主压应力为主的现代构造应力场中；在这样的应力场作用下，易于发生以走滑为主或走滑兼具倾滑型的断层活动，北西及近南北向的断层易产生左旋走滑运动，北东向的断层易产生右旋走滑运动。

1.5 历史地震对目标区的影响

据史料记载，目标区附近及外围地区曾发生过多次中、强破坏性地震，这些地震对目标区均造成了不同程度的影响和破坏。因此，准确地评价历史地震对目标区的地震影响烈度就显得尤为重要。图 1.5-1 给出了目标区附近部分历史地震综合等烈度线图，表 1.5-1 给出了对目标区有一定影响的 15 次中强地震的有关参数《中国历史强震目录》（公元前 23 世纪—公元 1911 年）国家地震局震害防御司，1995；

《中国近代地震目录》（公元 1912 年—1990 年 Ms≥4.7）中国地震局震害防御司，1999；《四川地震资料汇编》第一卷（一九四九年前）编辑组，1980；《四川地震资料汇编》第二卷（一九四九年至一九七九年）编辑组，1981；《四川地震资料汇编》第三卷（1979 年 6 月至 1999 年 12 月）编辑组，2000；《中国地震资料汇编》谢毓寿蔡美彪主编，1983；《西南地震简目》编辑组，1988；《四川地震全记录》（公元前 26 年—公元 1949 年 9 月）上卷，《四川地震全记录》（公元 1949 年 10 月—公元 2009 年）下卷，四川地震全记录编委会，2009 年 9 月）。

由于目标区主要受到其西部强震的影响，为弥补历史地震资料的不足，利用青藏区地震烈度衰减关系《中国地震动参数区划图》（GB18306-2015），对目标区产生较大影响的历史地震进行烈度值计算，计算结果见表 1.5-1。青藏区地震烈度衰减关系：

$$I = 6.458 + 1.2746M - 4.4709\log_{10}(R+25) \qquad \sigma = 0.6636$$

$$I = 3.3682 + 1.2746M - 3.3119\log_{10}(R+9) \qquad \sigma = 0.6636$$

式中 R 为震中距，单位为 km，M 为震级，为保守起见，采用长轴方向的衰减关系进行计算。

表 1.5-1　历史地震对目标区的影响烈度统计表

序号	日期	震中位置			震级 M	震中烈度	距目标区最近距离（km）	影响烈度		
		北纬（°）	东经（°）	地点				计算烈度	等震线烈度	最大影响烈度
1	1216-3-17	28	103.8	四川雷波马湖	7	IX	170	5.1	*	V
2	1536-3-29	28.1	102.2	四川西昌北	7½	X	310	4.7	VI	VI
3	1786-6-1	29.9	102.0	四川康定南	7¾	≥X	346	4.8	VI	VI
4	1850-9-12	27.7	102.4	四川西昌、普格间	7½	X	310	4.7	*	＜V
5	1892-2-10	28.9	105	四川南溪	5	VI	41	4.5	*	＜V
6	1896-2-14	29.3	104.9	四川富顺	5¾	VII	46	5.5	VI	VI
7	1917-7-31	28	104	云南大关北	6¾	IX	181	4.7	*	＜V
8	1936-4-27	28.9	103.6	四川马边	6¾	IX	170	4.8	V	V
9	1936-5-16	28.5	103.6	四川马边	6¾	IX	183	4.7	IV	IV
10	1974-5-11	28.1	104	云南大关北	7.1	IX	174	5.1	V	V

11	2008-5-12	31	103.4	四川汶川	8.0	XI	278	5.6	VI	VI
12	2019-6-17	28.4	104.9	四川长宁	6.0	VIII	95	4.7	V	V
13	2019/9/8	29.58	104.82	四川威远	5.4	VI	55	4.8	*	V
14	2019/12/18	29.6	104.83	四川资中	5.2	VI	55	4.6	*	IV
15	2021-9-16	29.2	105.3	四川泸县	6.0	VIII	5.5	7.5	VII	VII

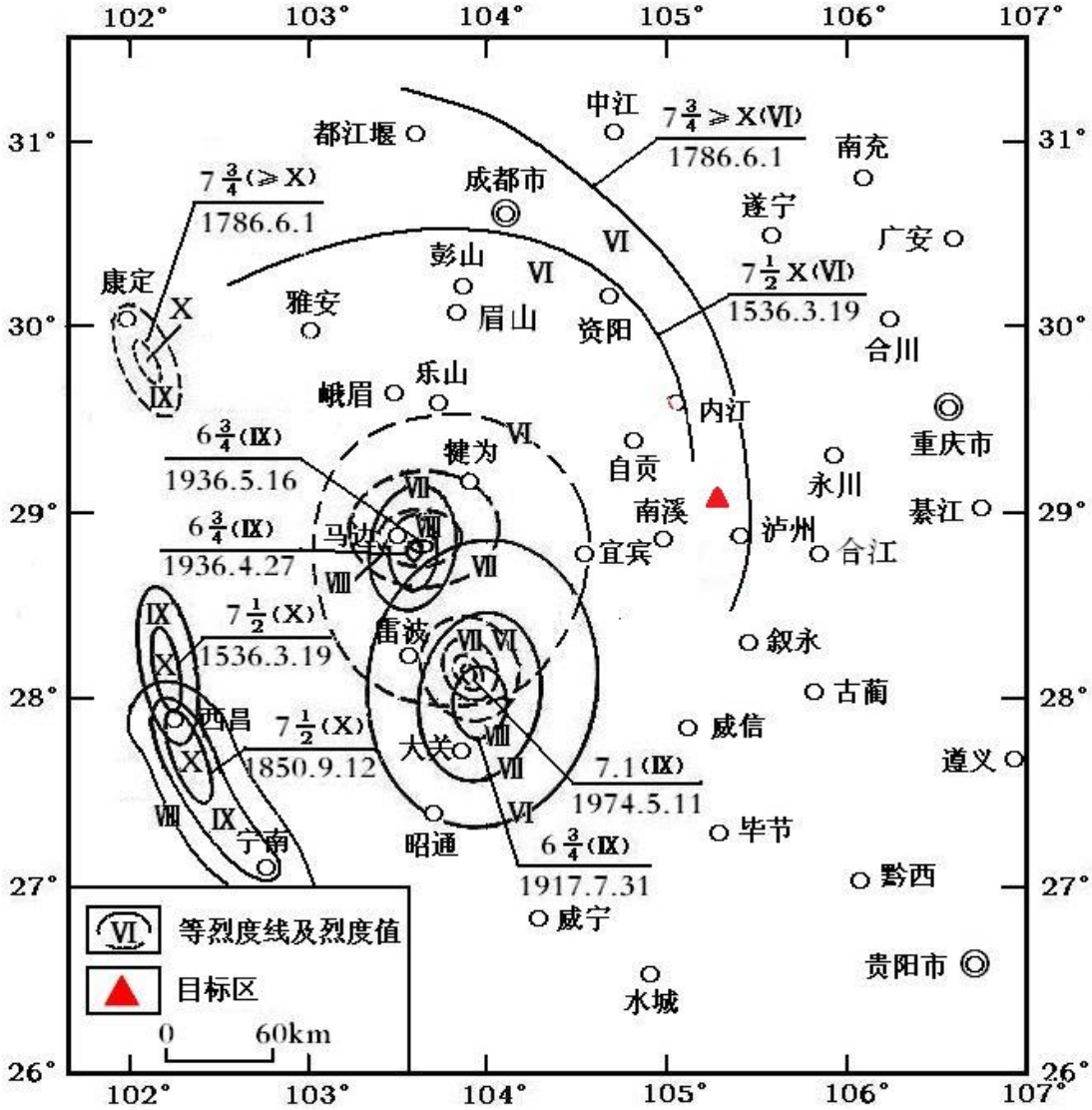


图 1.5- 1　目标区外围历史地震等烈度线图

由表 1.5-1 可知，目标区遭受过 5 次Ⅵ度及以上地震的影响，对目标区影响大的破坏性地震是 2021 年 9 月 16 日四川泸县 6.0 级地震，最大影响烈度为Ⅶ度。综合判断，历史地震对目标区的最大影响烈度为Ⅶ度。

根据史料记载的震害情况，结合实地考察结果，以及地震宏观考察资料，将对目标区影响较大的历史地震简述如下：

1.5.1 1216 年 3 月 17 日雷波马湖 7 级地震

1216年3月17日雷波马湖7级地震。据《宋史·宁宗纪》载：〔南宋宁宗嘉定九年二月〕“辛亥，东西两川地大震，三月乙卯又震，壬申又震”。主震当在3月17日，随后21、30日、4月2日、7日都是较强的余震。南宋宁宗时，东西两川指成都府路和潼川府路，辖境在今四川盆地西部。马湖夷界，指马湖夷部。汉唐以来，均称彝族居地为马湖部，南邻马湖江（今金沙江下游），以今雷波县东北马湖为中心。据考证，马湖在易汉建兴三年（公元225年）前就已存在。又据雷波县志第一卷中记载，现今的金沙江中、下游自唐朝以来就称为马湖江。

根据史料记载和实地考察结果可以断定，《四川地震资料汇编》记载：“马湖夷界山崩八十里，江水不通”的地点应在雷波县黄琅乡至渡口乡，北至草鞋沟沿金沙江两岸的地带，即马湖区或黄琅地区。故1216年地震震中也应在这一带。据《中国历史强震目录》（公元23世纪—公元1911年，1995）给出的震中位置为：N28.4°、E103.8°,震级为7级，震中烈度为IX度；据上述史料的记载情况分析及地震烈度衰减关系推算，该次地震对目标区的最大影响烈度为V度。

1.5.2 1536 年 3 月 19 日西昌北 7½级地震

1536 年 3 月 19 日（明嘉靖十五年二月二十八日丑时）在西昌北发生一次强烈地震，其宏观震中在西昌新华一带，震级为 7½级，震中烈度为X度（图 1.5-1）。史料嘉靖《四川总志》卷 16（经略下）页 40 至 41 记载：“据四川行都司佥事，都指挥佥事曹元呈称：续据越隽卫、镇西、邛（邛崃）、雅（雅安）、崇庆、嘉（乐山）、眉（眉山）、资阳、大邑、峨眉等卫、所等县各申：地震倒塌城垣不等数目前来，臣又会行各议修理……”据记载震中区官民房屋、寺观俱行倒塌，死亡近万人。山崩石裂，地裂水涌，段氏所施之田，尽皆化为沧海。波及邛崃、雅安、崇庆、乐山、眉山、资阳、峨眉等州、县城垣倒塌不等，远达平武、三台、宜宾、富顺、成都、岳池等均震。据此，该次地震对乐山、宜宾等均有较大影响。从上述史

料的记载情况分析及图 1.5-1 中可看出，目标区处于该地震VI度破坏线的延长线附近，估计受VI度影响。

1.5.3 1786 年康定、泸定磨西间 7¾级地震

清乾隆五十一年五月初六日（1786 年 6 月 1 日）在康定、泸定磨西间发生了一次 7¾级地震，这是我省历史上最大的一次地震。这次地震对目标区有较强烈的影响，特别是大渡河沿河地区受地震水灾破坏严重。目标区周边的乐山、犍为、宜宾、内江、江安、马边等地均对该次地震有记载（上述各地均较目标区距地震的震中位置远）。据嘉庆《嘉定府志》卷 47，页 4～5 记载："乾隆五十一年五月，大渡河山崩水噎，凡九日决，自峨眉界来府，崇朝而至，涛头高数丈，漂没居民以万计，郡城丽正门崩入二百余丈，长亦如之。"民国《犍为县志》杂志，页 15 记载："乾隆五十一年五月初六、七、十二、三十及六月十七等日，[犍为]地震，墙垣房屋颇多为之倾圮。"据《中国历史强震目录》中记载陈愉龙 1985 年实地调查资料："宜宾：青云山观音阁千手观音自移飞下。"四川省地震局地震地质队王新民等对该次地震进行了史料的考证及实地的详细考察，确定该次地震的震中在泸定县与康定县间的雅家埂附近，震中烈度≥X度，并勾绘出了地震等烈度线图（图 1.5-1）。VI度线包括彭县、成都、乐山、犍为、宜宾、马边等地。从上述史料的记载情况分析及（图 1.5-1）中可看出，该次地震对目标区的地震影响烈度为VI度。

1.5.4 1850 年 9 月 12 日西昌、普格间 7½级地震

1850 年 9 月 12 日（清道光三十年八月初七日亥时）西昌、普格间 7½级地震。此次地震震灾严重，人员伤亡惨重，虽发生于 100 多年前，但留下了丰富的文献史料及碑刻记载，地震形变带的痕迹至今尚存。据《大清历朝实录》咸丰朝卷记载："四川西昌县城乡一带，于八月初七日地震，城垣、衙署、仓库、监狱概行倒塌，压毙男妇二万六百余名口。"据史料《清代地震档案史料》记载："附城一带及县属之上所、中所、下所、礼州、太和场、高草坝、德昌所、鱼水场等处各乡场，亦均被震受灾。"据同治《会理州志》记载："道光三十年庚戌八月初七日子时，西昌、会理、越西、冕宁、德昌、米易、河西、礼州、冕山等处同时地震。会理属之披砂、松林坪、大佛场、新村等处共震倒房屋至一千八百三十八户，打毙男女二千八百七十六名。"又据《中国历史强震目录》记载："南充、

仁寿、德阳、庆符、南溪、筠连、乐山及云南宣威、永胜、普洱、盐丰均震。”由此可见该次地震震灾严重，影响范围是相当大的。我们根据文献史料、碑刻记载的震害情况及野外考察发现，在西昌南大箐梁子及其以南的普子里底、五道箐乡、扯扯街一带，有断续延伸的地震地裂缝带等地表破坏现象，据此确定地震的宏观震中位于西昌至五道箐乡、扯扯街一带，并勾绘出了该次地震的等烈度线图（图1.5-1），等烈度线沿则木河断裂带延伸的北西向长椭圆形。

据《中国历史强震目录》给出的震中位置为：N27.7°、E102.4°,震级为7½级，震中烈度为X度；通过对地震史料震害情况综合分析，按地震烈度衰减关系推算，再结合等烈度线的分布情况（图1.5-1），该次地震对各目标区的最大影响烈度为＜V度。

1.5.5　1896 年 2 月 14 日四川富顺 5¾级地震

沿滩场、黄镇铺、自流井(自贡)大风地震，屋宇动摇，县丞衙署、官运局照墙间有倒塌，震毁民房 90 余间，压毙 20 余人，伤 12 人。

南溪:云台山寺庙倾其半，殿宇、房犀多被震倒，压毙受伤僧俗6人。

宜宾:南街牌坊宝顶震落，乡间破旧房屋瓦片掉落。

遂宁:山水簸荡，崩坏房屋其多。

合川:水皆荡漾，木尽摇曳，行人立皆不稳。

根据史料的记载情况及图 1.5-2 可看出，该次地震对目标区的地震影响烈度为Ⅵ度。

1.5.6　1917 年 7 月 31 日云南大关 6¾级地震

1917 年 7 月 31 日云南大关 6¾级地震。地震造成五连峰下横江两岸，吉利铺等地，纵横约百里村落房屋全部折断倒塌。大关河两岸山岳崩颓，石块堵江，河水暴溢，倒流十余里。马帮、过客及兵民死 1800 余人。据民国三十五年盐津县志记载道：“民国六年七月三十一日拂晓时大关县属吉利铺后

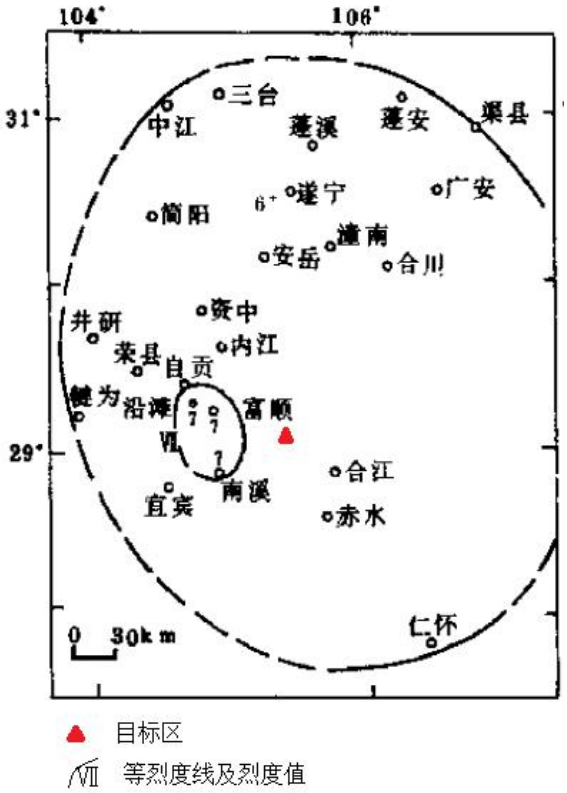


图 1.5-2　1896 年 2 月 14 日四川富顺 5¾级地震等烈度线图（据《中国历史地震目录》）

山发生地大灾震，境内山崩地裂房屋倒塌，周围波及盐津筠连、高县、庆符、珙县、长宁、宜宾”。

盐津：铁锁桥扭翻，房屋倒塌，伤数十人，并有山崩。

大关：石碑坊倒塌，翠华寺屋基陷，民房被震歪斜，城外山裂，村落有数处倒塌，伤害人口。

鲁甸：牌坊村牌坊宝顶被震落。

彝良：猫猫山、代鸟关等处损坏民居 200 余户，压死 3 人，山崖有崩塌。县城一学校房屋有裂缝。

昭通：石山震裂丈余，万寿亭围墙震倒，庄房全部屋瓦摇落。

镇雄：墙倾，压毙幼童。

巧家：土山塌方，土墙开裂较多，屋瓦震落 70%~80%，房屋倒塌约 10%。

寻甸：旧房震倒。

雷波：渡口乡石砌房有倒塌，石砌墙震裂，撒水坝崖陷落 8 米。

宁南：村寨少数房屋院墙倒塌、山崩甚多，河边有塌方。

会东：大桥、新街石桥开裂，石崖塌下，个别老朽房屋倒塌。

乐山、夹江：两县间山崩数处，复压数家。

犍为：有些房子部分倒塌。

眉山：屋瓦为倾。

洪雅：止戈有垮岩现象（记载无月、日）。

鲁甸、合川、汉源、荣县、宜宾、大定、五通桥、毕节、威宁、会泽均有感。

据《中国近代地震目录》给出的震中位置为：N28.0°、E104.0°,震级为 6¾级，震中烈度为IX度；通过对地震史料震害情况综合分析，按地震烈度衰减关系推算，再结合等烈度线的分布情况（图 1.5-1），该次地震对目标区的最大影响烈度为Ⅳ度。

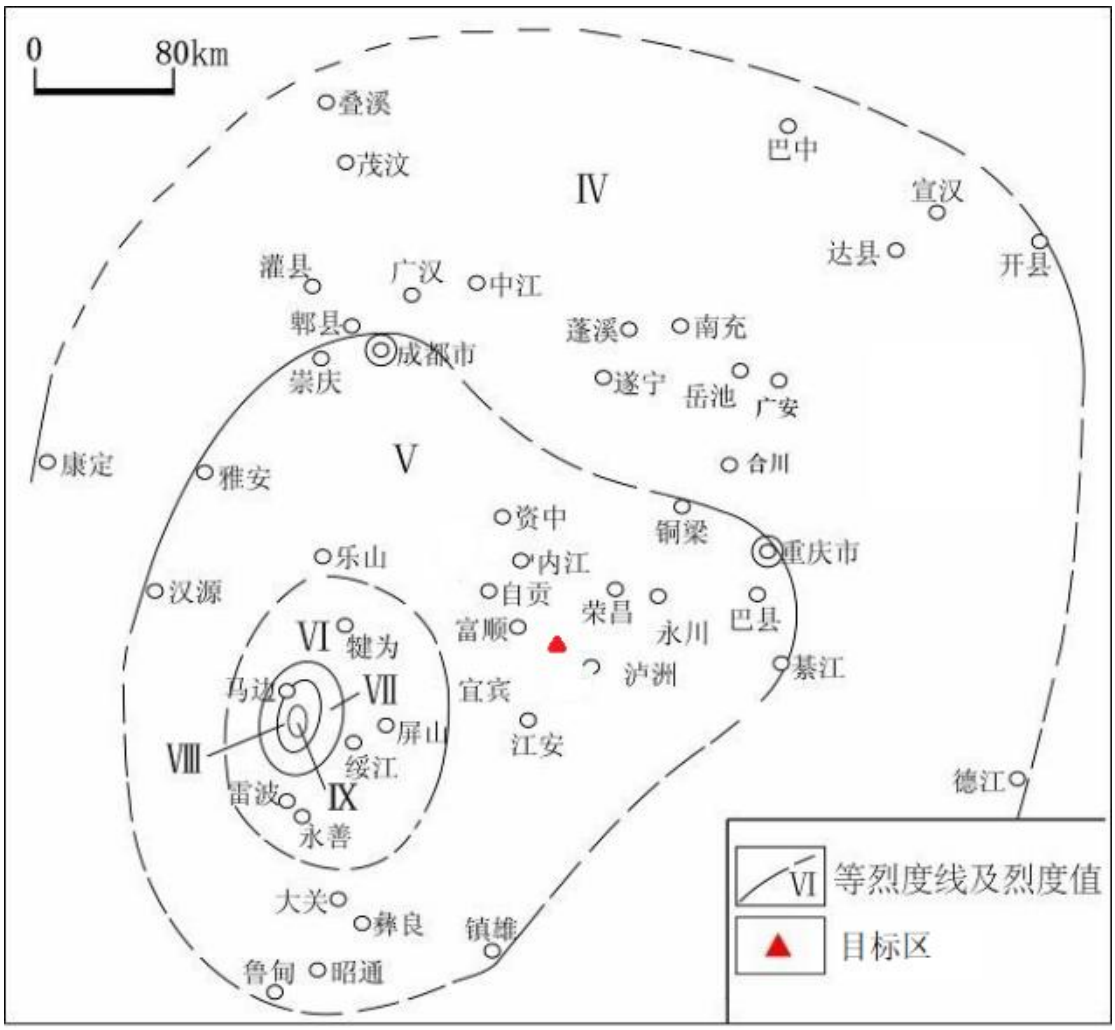


图 1.5-3　1936 年 4 月 27 日马边 6¾级地震等烈度线图（据《四川西藏地震等烈度线图资料汇编》1994）

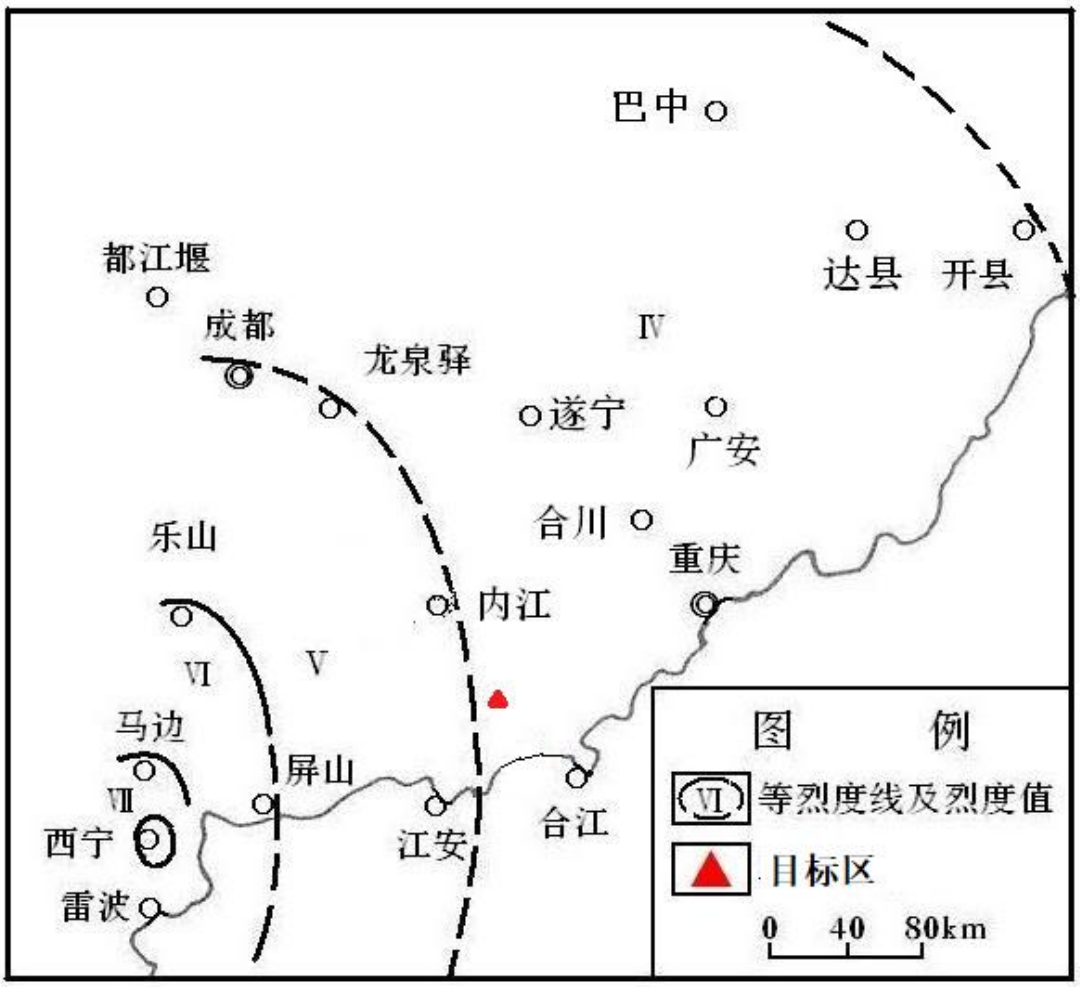


图 1.5-4 1936 年 5 月 16 日雷波西宁 6¾级地震等烈度线图（据《四川西藏地震等烈度线图资料汇编》1994）

1.5.7 1935 年至 1936 年马边、雷波一带 6¾级震群

前人对马边玛瑙 6¾级地震先后多次做了较为详细的调查工作。在前人工作的基础上，四川省地震局工程地震研究所对该次地震又进行了更深入的调查研究工作，并勾绘出了该次地震以震害为主带综合性质的地震等烈度线图（图 1.5-3），确定其震中位于玛瑙一带，烈度为IX度，等烈度线呈近南北向延伸的椭圆形。该次地震对内江、自贡均造成一定的破坏和影响；内江：个别院墙倒塌，砖墙倒塌一处。自贡：个别朽墙倒塌，屋瓦掉落。相对目标区距震中区较远的成都、铜梁、重庆、綦江、巴县等地对该次地震亦有相关的记载。据史料记载的震害情况分析及实际调查资料结果，以及从图 1.5-3 可看出，该次地震对目标区的地震影响烈度为V度。

雷波西宁 6¾级地震震害史料记载较少，仅在当时《华西日报》刊载道：“屏

山县长李壁珍顷电省府报称，该县十六日又发生剧烈地震，以所属第二区（即西宁）为最剧，民房被毁者占有十分之六七，死亡居民有四、五百之多。”该次地震对成都、江安、合江、乐山、重庆、开县等地均造成一定的破坏和影响。据《重庆新蜀报》民国二十五年五月十七日第二版刊载道：“（重庆）昨日午后二钟许，忽发生地震，时记者正伏案编稿，突觉桌椅摇摇摆动，电灯摆动不已，玻璃也震动作声，俄而邻家亦相呼地震云。”又据《重庆新蜀报》民国二十五年五月二十三日第二版刊载道：“（开县）十六日午后三点四十五分又发生地震，较之前月廿七日地震时震力稍弱，记者忽觉晕眩，室内所悬之电灯等物摇摆不定，碗内之菜荡漾不已，历时卅秒方止云。”据史料的记载情况，震害最严重为西宁。故其震中应在西宁镇附近，震中烈度可达IX度（图 1.5-5）。而重庆、开县相对目标区距震中区较远江安个别砖墙亦为地震震倒；合江人震感强烈，屋瓦楼角动摇。

据史料记载的震害情况分析及实际调查资料结果，以及从图 1.5-4 可看出，该次地震对目标区的地震影响烈度为IV度。

因此，据史料记载的震害情况分析以及从图 1.5-3、图 1.5-4 可看出，1936 年 4 月 27 日马边 6¾级地震对目标区的地震影响烈度为V度，1936 年 5 月 16 日雷波西宁 6¾级地震对目标区的地震影响烈度为IV度。

1.5.8 1974 年 5 月 11 日云南大关北 7.1 级地震

1974 年 5 月 11 日云南大关北 7.1 级地震。据实际调查资料结果，该次地震的宏观震中位于木杆公社钟家坪，震中烈度为IX度。

极震区：南起大关县的木杆公社北，北到永善县团结公社的苏田坝南，西起团结公社鄱家山、向阳坪、田坝，东至木杆公社兴火地、向家崖口一带。土搁梁房倒塌约一半，石墙房多数倒塌。木杆公社海口子村 30 户毛石墙草顶房部分倒平，大多数毛石墙全倒。团结公社田坝村，夯土墙房 60%土墙倒塌，其余严重破坏，区内崩塌、滑坡和地裂缝普遍，几乎所有山头均遭到不同程度破坏。道路、农田和水渠严重毁坏。大关到绥江公路有 186 公里长的地段遭到破坏，近四万亩耕地受到破坏。海口~马颈子一段大规模滑坡，长 300 米，宽 200 米，厚 50 米，滑坡体逆冲到对岸，高出河床约 30 米，阻塞河流，形成湖泊。手扒崖大规模滑坡，将团结公社顺河二队掩埋大半，建筑物毁坏，农田被掩埋，木杆河阻塞成湖泊。团结公社文家湾和大水船有溶洞塌陷。

大关：房屋遭受破坏，土搁梁房约半数倒塌，因大规模崩滑和塌方，使木杆到丁木的公路交通中断。县北部受灾较重，往南渐轻。县城强烈有感。

永善：团结公社所在地长坪共 17 户，土墙裂缝，局部倒塌；桧溪公社木利共 30 多间房屋，其中 3 间土搁梁房山墙、屋顶塌落，其它开裂。三江口~砂石公路滑坡，崩塌几十处，破坏农田。城关有感。

盐津：西部一些公社个别老朽房倒塌，少数夯土墙裂缝，落瓦。公路个别地段损坏。

绥江：西南部个别老房倒塌，少数夯土墙裂缝、落瓦。公路、水渠个别损坏。

雷波：璜琅公社回龙至下坪一带及渡马湖等公社部分地区受灾较重。土搁梁房屋倒塌 50%以上，未倒者亦严重破坏。其余地区公个别老房倒塌。

该次地震对雷波、宜宾、泸州、自贡、内江、筠连、高县具有一定的影响。据实地调查，筠连、高县强烈有感，个别的有土墙裂缝，房屋发出响声。昭通、东川、曲靖、四川省宜宾、泸州、自贡、内江、成都、南充、重庆、渡口、西昌、康定、马尔康、万县、贵州省之遵义、贵阳等地有感。

据《中国近代地震目录》给出的震中位置为：N28.2°、E103.9°,震级为 7.1，震中烈度为IX度；通过对地震史料震害情况综合分析，按地震烈度衰减关系推算，再结合等烈度线的分布情况（图 1.5-1），该次地震对各目标区的最大影响烈度为V度。

1.5.9　2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震

2008 年 5 月 12 日在汶川发生的 8.0 级地震，给当地人民的生命和财产带来了重大损失。这次地震具有影响范围广、震源浅、烈度高、破坏极其严重的特点，现已查明的地震地表破裂带总长度达到 240 公里以上，震中区位于映秀—北川一带，呈南西—北东狭长型，烈度达到XI度（图 1.5-5），极震区内房屋建筑损毁严重，并出现多处大型崩塌、滑坡、泥石流、堰塞湖等。乐山市犍为县、沐川县、宜宾市、宜宾市屏山县也遭受该次地震的影响和破坏。据实际考察结果，其主要震害情况如下：

泸州市：胡市镇来龙社区：砖木、砖混结构房屋轻微破坏，个别中等破坏；胡市镇敦和村：砖木结构房屋轻微破坏，个别中等破坏或毁坏，少数严重破坏；胡市镇三教村：砖木结构房屋轻微破坏，个别中等破坏。

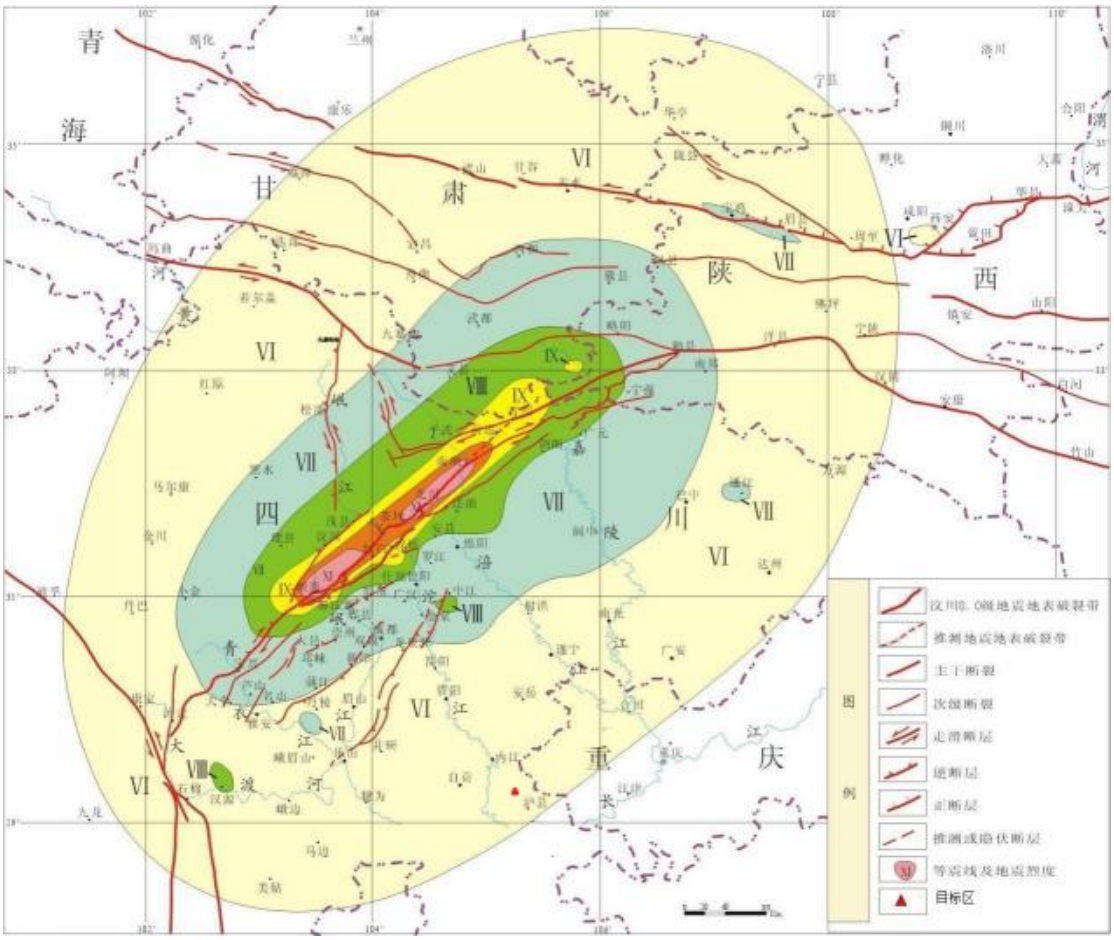


图1.5-5　2008年5月12日汶川 8.0 级地震等烈度线图（据中国地震局）

泸州市纳溪区：上马镇德龙桥德龙桥：始建于 1996 年，为石拱桥，跨径为 13 米，桥长 27.1 米，桥宽 7.5 米。于 2005 年进行过维修加固。观测发现，桥一侧拱圈,从拱脚到拱顶原有裂缝出现扩展，现裂缝宽度为 3—4 厘米；主拱圈个别加固水泥出现剥落。泸州市纳溪区上马镇朝龙村民房：住户约 40 户左右，约 160 人，砖混结构房屋占 60%，土木结构约 40%。此次地震中土木房屋个别出现溜瓦现象。主体结构基本完好。泸州市纳溪区政府办公楼：始建于上世纪 90 年代，原为四层砖混结构，后增加两层。震害现象为：在 5、6 楼墙体抹灰层出现细微裂缝，结构基本完好。泸州—德龙桥沿途民房：沿途民房无溜瓦等震害现象。泸州市纳溪区来龙中心学校：教学楼I：砖混结构，三层。每层 2 个教室、1 个办公室，建筑面积 800m2，建于 1980 年。楼梯间横向裂缝震后加剧、加大，楼梯平台窗户（水泥格）表层脱落，钢筋出露，教室窗户上方出现水平裂缝。据当地群众介绍，地震时震感强烈，路上行走时有震感。教学楼II：砖混结构，三层。走廊护栏表层脱落严重，钢筋出露，墙体有微小变形，门原来打开顺利，震后打开

受阻。泸州市纳溪区安宁中心学校：多媒体教室：建筑面积约 200m2，单层砖瓦房。教室中间墙体原有纵向裂缝（之前只开裂至墙体中部）贯穿延伸至地面；墙角纵向裂缝贯穿。泸州市纳溪区高阳村：居民 610 户，2160 人，每户建筑面积约 100m2，土房约占 20%，砖房约占 80%，其中遗弃土房倒塌 2 间，有零星落瓦现象，砖房 14 户墙体有微小裂缝。根据以上的震害情况及图 1.5-5 来看，该次地震对目标区的影响烈度为Ⅵ度。

1.5.10　2019 年 6 月 17 日长宁 6.0 级地震

2019 年 6 月 17 日四川长宁发生 6.0 级地震。这次地震造成部分房屋倒塌、毁坏，13 人死亡，200 余人受伤，受灾区面积为 3058km2，给当地人民的生命财产造成了极大的损失。该次地震的宏观震中位于长宁的双河镇，即：N28.34°、E104.96°,震中烈度为VIII度，等震线长轴呈北西走向，长轴 72 千米，短轴 54 千米，主要涉及宜宾市长宁县、高县、珙县、兴文县、江安县、翠屏区 6 个县区（图 1.5-6）。

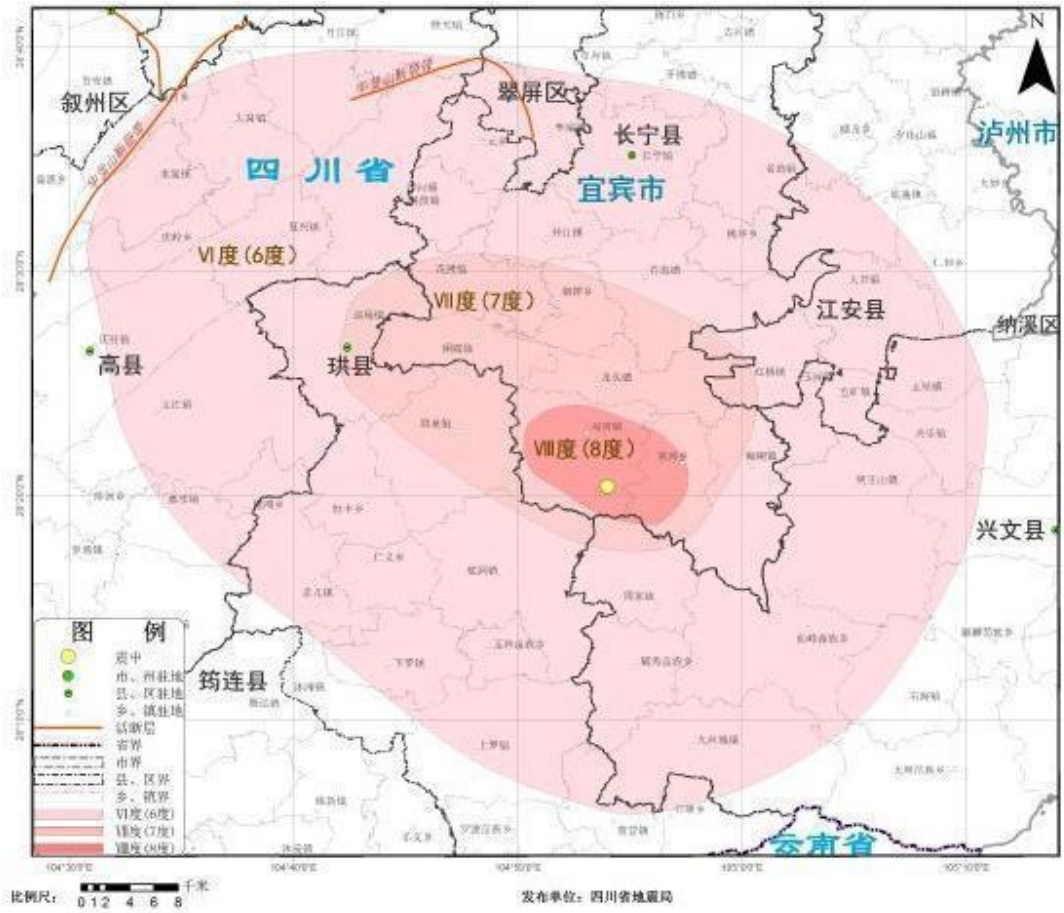


图1.5-6　2019年6月17日长宁6.0级地震等烈度线图（目标区出图幅）（据四川省地震局）

VIII度区面积 84 平方千米，主要涉及长宁县双河镇、富兴乡，兴文县周家

镇，共 3 个乡镇。

VII度区面积为 436 平方千米，主要涉及长宁县双河镇、梅硐镇、硐底镇、花滩镇、竹海镇、龙头镇、铜锣乡、井江镇、富兴乡，珙县巡场镇、珙泉镇、底洞镇，兴文县周家镇，江安县红桥镇，共 14 个乡镇。

VI 度区面积为 2538 平方千米，主要涉及高县、兴文县、珙县、长宁县、江安县、翠屏区的 58 个乡镇。

根据以上实际调查的震害资料情况以及（图 1.5-6）来看，该次地震的对目标区的最大影响烈度为V度。

1.5.11　2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震

2021 年 09 月 16 日 04 时 33 分，四川泸县（北纬 29.20 度，东经 105.34 度）发生 6.0 级地震，震源深度 10 千米。此次地震的最高烈度为VIII度（8 度），等震线长轴呈北西西走向，长轴 62 千米，短轴 54 千米，VI 度（6 度）区及以上面积为 2613 平方公里，主要涉及到四川省泸州市泸县、龙马潭区；自贡市富顺县、大安区；内江市隆昌市等 5 个县（市、区），51 个乡镇（街道）；重庆市荣昌区 1 个区，10 个乡镇（街道），截至 2021 年 9 月 21 日 12 时，地震造成泸州等地 12.1 万人受灾，3 人死亡，146 人受伤；1400 余间房屋倒塌，6400 余间严重损坏，2.9 万间一般损坏。

VIII度（8 度）区面积约 103 平方公里，主要涉及四川省泸州市泸县福集镇、嘉明镇、玉蟾街道 3 个乡镇（街道），内江市隆昌市云顶镇 1 个乡镇，共 4 个乡镇（街道）。东起泸县福集镇鱼目村-盐滩村一带，西至云顶镇新桥村-大坪村一带，南自玉蟾街道熊湾村，北达嘉明镇狮子山村。

VII度（7 度）区面积约 340 平方公里，主要涉及四川省泸州市泸县喻寺镇、天兴镇、福集镇、嘉明镇、得胜镇、牛滩镇、玉蟾街道 7 个乡镇（街道），内江市隆昌市胡家镇、云顶镇、石燕桥镇、金鹅街道 4 个乡镇（街道），自贡市富顺县古佛镇、童寺镇 2 个乡镇，共 13 个乡镇（街道）。东起泸县得胜镇关大井村-高石塔村，西至古佛镇羊坪村，南自牛滩镇横江村，北达石燕桥镇加速村-李家坝村一带。

VI度（6 度）区面积约 2170 平方公里，主要涉及四川省泸州市泸县 17 个乡镇（街道），泸州市龙马潭区 7 个乡镇（街道），自贡市大安区 2 个乡镇，内江

市隆昌市 13 个乡镇（街道），自贡市富顺县 11 个乡镇（街道），重庆市荣昌区 10 个乡镇（街道），共 60 个乡镇（街道）。东起泸县毗卢镇罗汉村-阴阳湾村一带，西至东湖街道黄泥村，南自安宁街道福林村，北达界市镇包家村-新房村一带。此外，位于VI度（6 度）区之外的部分地区也受到波及，个别老旧房屋出现破坏受损现象。

图1.5-7　2021年9月16日泸县6.0级地震等烈度线图（据四川省地震局）

根据以上实际调查的震害资料情况以及（图 1.5-7）来看，该次地震的对目标区的最大影响烈度为Ⅶ度。

综上所述，历史地震对目标区影响最大的是 1536 年西昌北 7½级地震、1786 年在康定、泸定磨西间 7¾级地震、1896 年四川富顺 5¾级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2021 年泸县 6.0 级地震，其中，2021 年泸县 6.0 级地震对目标区的影响最大，为VII度，其他地震对目标区的最大影响烈度均为VI度。

1.6 区域地震活动性综合评价

综上所述，目标区所处的区域地震活动环境有如下几个方面的特征：

1、在以目标区为中心，东经 102°06′～107°03′、北纬 27°18′～31°15′的区域范围内，自公元前 26 年至 2023 年 10 月的二千余年中，共记到 M≥4.7

级破坏性地震 175 次，其中 8 级 1 次，7.0～7.9 级 6 次，6.0～6.9 级 17 次，5.0～5.9 级 94 次，4.7～4.9 级 57 次；自 1970～2023 年 10 月间，区域范围内共记到 M=2.0～4.6 级中小地震 30430 次。区域目前记到的最大地震是 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震。

2、区域范围强、弱地震震源深度的优势分布层位是有明显差异的，M≥4.7 级地震震源深度的优势分布层较之近代中小地震震源深度优势分布层更深一些，中强地震震源深度的优势分布层位在 6~20km 之间，近代中小地震震源深度的优势分布层位处于地下 1～10km 范围内，都属于浅源地震的震源深度分布范围。

3、区域地跨龙门山地震带、长江中游地震带、鲜水河—滇东地震带和右江地震带。龙门山地震带自公元前 193～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 241 次，其中 8 级大震 3 次，7.0～7.9 级强震 10 次，6.0～6.9 级地震 35 次；鲜水河—滇东地震带自公元 624～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 763 次，其中 8 级地震 1 次，7.0～7.9 级地震 30 次，6.0～6.9 级地震 99 次；长江中游地震带自公元前 143～2023 年 10 月已记到 M≥4.7 级地震 123 次，其中 6.0～6.9 级地震 5 次，5.0～5.9 级地震 72 次；右江地震带自 1526～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 53 次，其中 6.0～6.9 级地震 1 次，5.0～5.9 级地震 30 次。这 4 个地震区内的地震活动随时间分布是不均匀的，其活动方式也有十分明显的差异。分析表明，龙门山地震带地震活动具有一定的周期性，目前本带仍处于第二活跃期，未来地震活动水平应略高于平均的地震活动水平；鲜水河—滇东地震带在未来百年内仍将保持活跃的地震活动水平，并有可能发生多次 M≥7.0 级地震；长江中游地震带未来百年内的地震活动时间进程仍将主要持续现在的地震相对活跃期，地震活动将保持活跃水平；右江地震带正处在自 1982 年开始的地震相对活跃期中，未来将处于相对活跃的地震活动水平。

4、区域范围基本处于以北西—北西西向近水平的主压应力为主的现代构造应力场中。在这样的应力场作用下，易于发生以走滑为主或走滑兼具倾滑型的断层活动，北西及近南北向的断层易产生左旋走滑运动，北东向的断层易产生右旋走滑运动。

5、自有历史地震记载以来，历史地震对目标区影响最大的是 1536 年西昌北 7½级地震、1786 年在康定、泸定磨西间 7¾级地震、1896 年四川富顺 5¾级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2021 年泸县 6.0 级地震，其中，2021 年泸县 6.0 级地

震对各目标区的影响最大，为Ⅶ度；其他历史地震对目标区的最大影响烈度均为Ⅵ度。

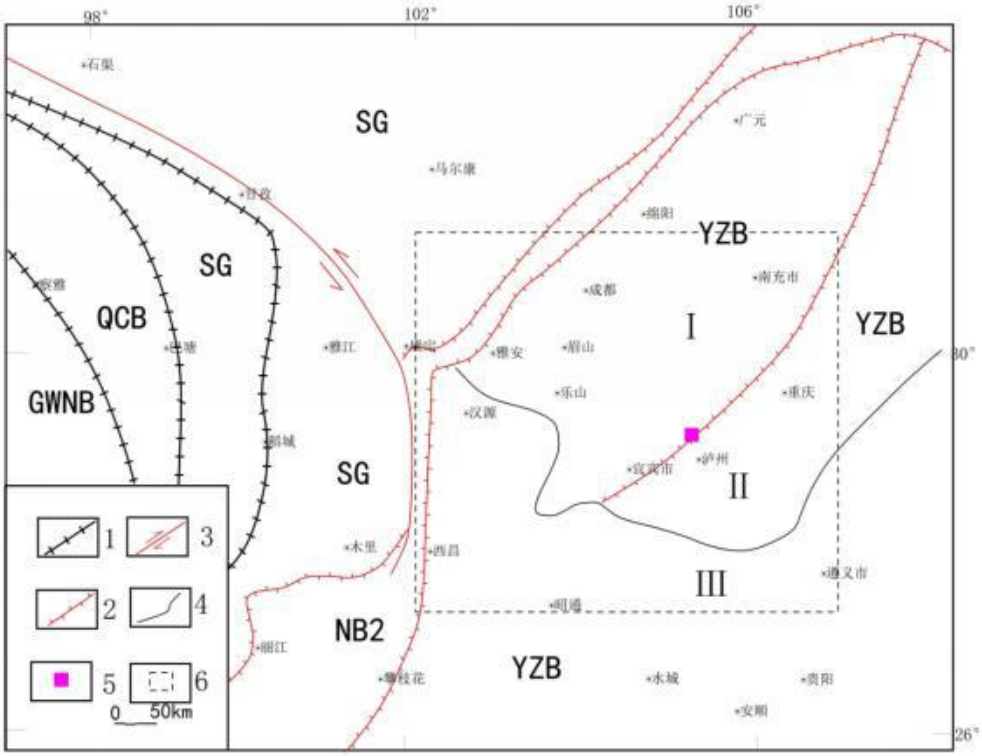
2 区域地震地质环境

区域以目标区为中心，半径不小于 150km 范围内，区域内主要跨越了巴颜喀拉块体、川滇块体和华南块体，这些块体的边界断裂如龙门山断裂带、盐津-马边断裂带、安宁河-则木河断裂带等的强烈活动，近代以来发生了多次历史强震，如 1935 年至 1936 年马边、雷波一带 6¾级震群、2008 年汶川 8.0 级地震、2013 年 4 月 20 日雅安市芦山县 7 级地震、2019 年 6 月 17 四川长宁 6.0 级地震、2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震和 2022 年 6 月 1 日芦山 6.1 级地震等，分析区域地震和地震构造的主要是分析地震带的地震活动水平、地震构造的发震能力以及历史地震对场地的影响，为地震区代划分、地震活动水平分析、地震构造区划分、潜在震源区划分等提供地震、地质依据。本次工作取东经 102°6′～107°3′，北纬 27°18′～31°15′作为研究的区域范围。

2.1 区域大地构造环境与新构造运动

2.1.1 区域大地构造环境

区域及邻区以龙门山—锦屏山—玉龙雪山构造带为界，可分为两个性质绝然不同的大地构造单元（图 2.1-1）。以东为稳定的扬子陆块，以西是由冈瓦纳大陆、羌塘—昌都陆块和松潘—甘孜造山带拼合的复杂地质块体（许志琴，1992）。扬子陆块为晋宁旋回固化的稳定克拉通，以晚元古界变质基底之上的典型地台盖层沉积为特征。其北缘大致沿青海玛沁、甘肃迭部和四川平武、青川一线以北，早古生代时为扬子地台大陆边缘与昆仑—秦岭洋过渡区，志留纪末的加里东运动使昆仑- 秦岭洋由南向北俯冲、闭合（许志琴，1986），从而使扬子陆块与华北地台拼合为一个完整陆块。扬子陆块西缘的广大地域由于与北部劳亚大陆及西部羌塘—昌都陆块的相互作用而卷入强大的造山事件中，构成了松潘—甘孜印支期造山带的主体。



1、板块缝合线；2、逆冲断裂；3、平移断裂；4、次级大地构造单元界线；5、目标区；6、区域范围。
构造单元代号：CWNB.冈瓦纳大陆；QCB.羌塘—昌都陆块；SG.松潘—甘孜造山带；YZB.扬子陆块；NB1.龙门山前陆逆冲楔；NB2.盐源前陆逆冲楔； Ⅰ.川中台拱；Ⅱ.川东陷褶束；Ⅲ.上扬子台褶带

图2.1-1　区域大地构造单元划分示意图

松潘-甘孜造山带是古特提斯洋开启和闭合的产物，归因于扬子陆块向北俯冲于昆仑地块之下，同时又向西俯冲于羌塘—昌都陆块之下的双向俯冲结果，致使造山带的平面形态呈一独特的倒三角形，同时又记录了新特提斯运动的构造变形过程。研究结果表明，松潘—甘孜造山带形成的主要时段 P12～T32，持续时间约 50Ma，历经了收缩变形与伸展变形等过程，形成有深层高温韧性剪切带，并伴随有高温面理、线理、“A”型褶皱等构造变形现象。在 T3 晚期以来，随着新特提斯洋的开启与闭合以及热流作用，致使造山带地壳上部的体积膨胀，在强大的近东西向挤压作用下，造山带整体上升，地壳上部物质的塑性流动导致沿龙门山—锦屏山构造带发生大规模冲断作用，形成龙门山和盐源前陆薄皮逆冲楔，四川盆地则进入前陆盆地的发育时期。

广义的四川盆地包括了川、滇、黔、渝各一部，实质上是龙门山、大巴山和雪峰山冲断带前缘所共有的一个中、新生代前陆盆地。根据沉积建造及变形的强弱可将四川盆地进一步划分为上扬子台褶带和四川台拗两个二级大地构造单元，四川台拗以华蓥山断裂带为界又可进一步划分为川中台拱和川东陷褶束两个三

级大地构造单元。川中台拱地层近水平，变形微弱，以鼻状或短穹隆状背斜构造为特点，地表几乎未见断裂构造；川东陷褶束变形稍强，以狭长的背斜和宽缓的向斜大致等距平行展布为特点，地表断裂与背斜构造具有伴生现象，且大多断于背斜的轴部或陡翼。目标区位于川东陷褶束带内。

大致始于 50Ma 的印-亚板块会聚导致新特提斯洋的闭合及青藏高原快速隆升，对青藏高原东缘地区的地质地貌变革具有深刻的影响。一方面由于东喜马拉雅构造结 在向北的推进过程中，产生了强大的向东的推挤力，形成了由西向东的推覆，现已确认的有中咱、兰坪和泰国清迈等推覆构造体，皆是由西向东逆冲，推覆距离达 80～100km 左右（马杏垣，1989；许志琴等，1992）。另一方面由于高原的迅速崛起，在重力势的作用下地壳上部物质向东蠕散所产生的水平推挤力（周玖等，1980）。在这两者的共同作用下，龙门山—盐源推覆构造带最终形成并定位，在两侧形成显著的地形高差。再者，就是在东缘地区形成大型的弧形走滑断裂系，显示优势的水平应力场，突破了原有构造体系的束缚，形成新的大地构造单元，即川青块体向南东东方向的逸出和川滇块体向南南东方向的侧向滑移。据研究，作为印支块体和川滇块体分界的红河断裂的右旋走滑运动大致发生在 13～15Ma（Tapponnier 等,1990），而作为川青块体和川滇块体分界的鲜水河断裂的左旋走滑运动发生在 15～20Ma（许志琴等，1992）。这一重要的运动转型期，不仅对东缘地区地质、地貌的表现，而且对地震发生具有重要的制约作用。

第四纪基本上继承了上述运动转型期以来的构造变形表现形式，在研究区域范围内的差异运动主要发生在龙门山与四川盆地、四川盆地与凉山断块的交界部位，差异运动幅度约 1000～3000m。目标区所在的四川盆地差异运动微弱，基本上处于整体抬升状态，第四纪以来的隆升幅度不超过 500m，是一个新构造运动较微弱的地区。

2.1.2 活动块体及其 GPS 形变场

根据中国活动块体划分方案（邓起东等，2002；张培震等，2003），研究区及其附近主要涉及巴颜喀拉块体、川滇块体与华南块体（图 2.1-2），研究区主体位于华南块体的四川盆地。在印度洋板块与欧亚板块碰撞后继续向北挤压的大背景下，位于青藏高原东缘的这些构造块体主要沿大型走滑断裂带向东和南东方向“逃逸”，正是沿这些走滑断裂的脆性变形行为，导致了中国大陆的大地震主

要沿这些块体边界断裂发生。

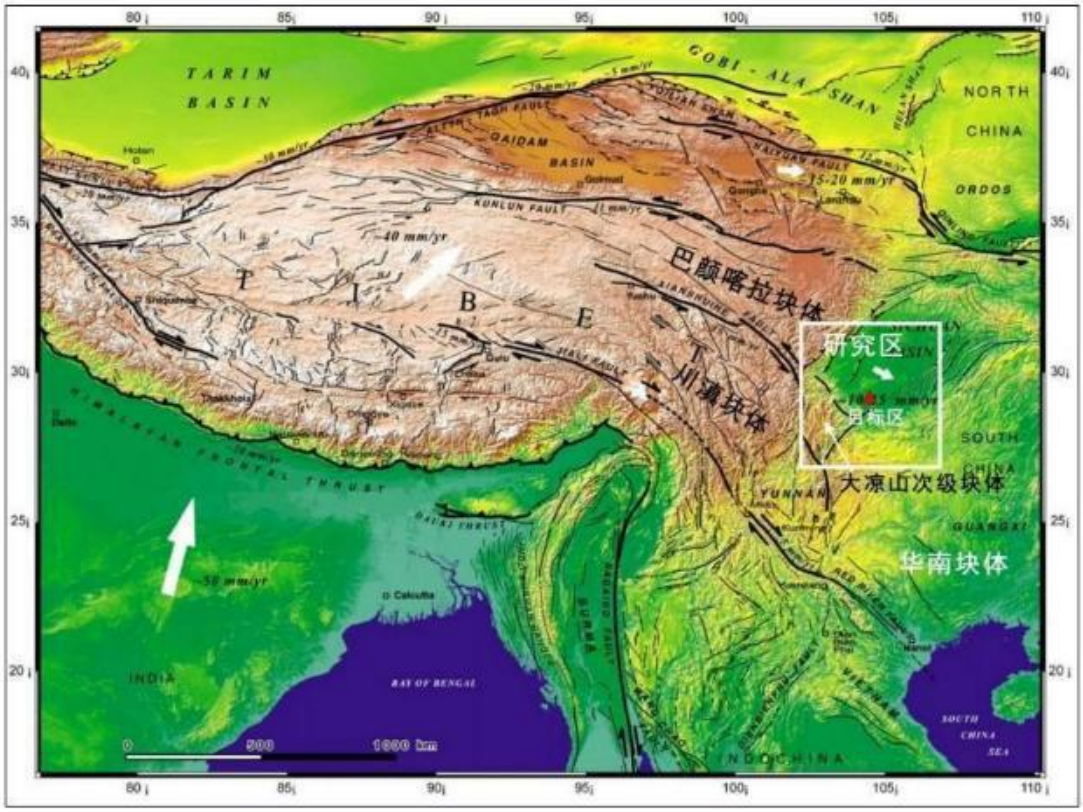


图2.1-2　青藏高原东缘活动块体划分示意图(据 Tapponnieret al.，1990修改)

（1）川滇菱形块体

川滇菱形块体位于青藏高原的东南部，由金沙江断裂、红河断裂以及鲜水河断裂-安宁河断裂-小江断裂带所围限。块体上的 GPS 速度矢量运动方向表现为 SE150°～160°，在鲜水河一带表现为 SE120°运动方向，在昆明一带表现为 SE165°的运动方向（王琪等，2001；张培震等，2002;Zhang et al.,2004; Gan et al., 2004），反映了川滇菱形块体的总体运动方向为南南东方向。沿鲜水河-安宁河-大凉山-则木河断裂带的两侧 GPS 速度矢量的方向均平行于断裂，造成了整条断裂系的左旋走滑性质。在鲜水河断裂上，具体表现为断裂南侧的运动速度大于北侧，这样导致了断裂的左旋走滑运动。在安宁河断裂和大凉山断裂交汇一带，安宁河以东的 GPS 速度矢量更多的向东偏转、速度加快，造成断裂仍然以左旋走滑为主兼具少量逆冲分量；在则木河断裂两侧，GPS 速度矢量的方向与断裂走向近于平行，造成了左旋走滑运动主导了则木河断裂的构造变形（张培震等，2002）。

块体的边界断裂有历史记载以来共发生 23 次 7 级以上强震（张培震等，2003）。其中块体的东边界鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带，作为发震构造产生了 17

次 7 级以上历史强震。块体的西南边界红河断裂带控制了 3 次 7 级以上地震及一系列 6 级左右地震发生；南段的多次 7 级以上强震沿楚雄-建水断裂带分布，并未沿红河断裂分布。

（2）华南块体

华南活动块体北西以龙门山断裂带为分界与巴颜喀拉块体相邻，而南西侧以安宁河-则木河断裂和大凉山断裂及马边-荥经断裂带共同组成的边界带为界与川滇菱形块体相邻。

由安宁河-则木河断裂、马边-荥经断裂带及昭通断裂带共同围限的区域，称为大凉山次级块体（闻学泽，2013）。块体东边界的荥经—马边—盐津断裂带表现出左旋走滑-挤压逆冲的晚第四纪活动特征，垂直滑动速率为 0.8mm/a；西边界的安宁河—则木河断裂带以左旋走滑作用为主，水平滑动速率 4-7mm/a；大凉山活动断裂带左旋走滑速率为 3-4mm/a（何宏林等，2008）。NE 向昭通、莲峰断裂带为活动与变形的大凉山次级块体与相对稳定的华南地块之间的分界带，GPS 运动观测显示，大凉山次级块体类似于巴颜喀拉块体的运动方式，块体总体向 SE 运动，被莲峰断裂及昭通断裂所阻挡，进而这两条断裂带形成不同程度的闭锁与应变积累（闻学泽，2013）。近年新发现的 NE 雷波断裂系，具备晚更新世新世活动性（韩竹军等，2009），也应为大凉山次级块体的边界断裂的一部分。

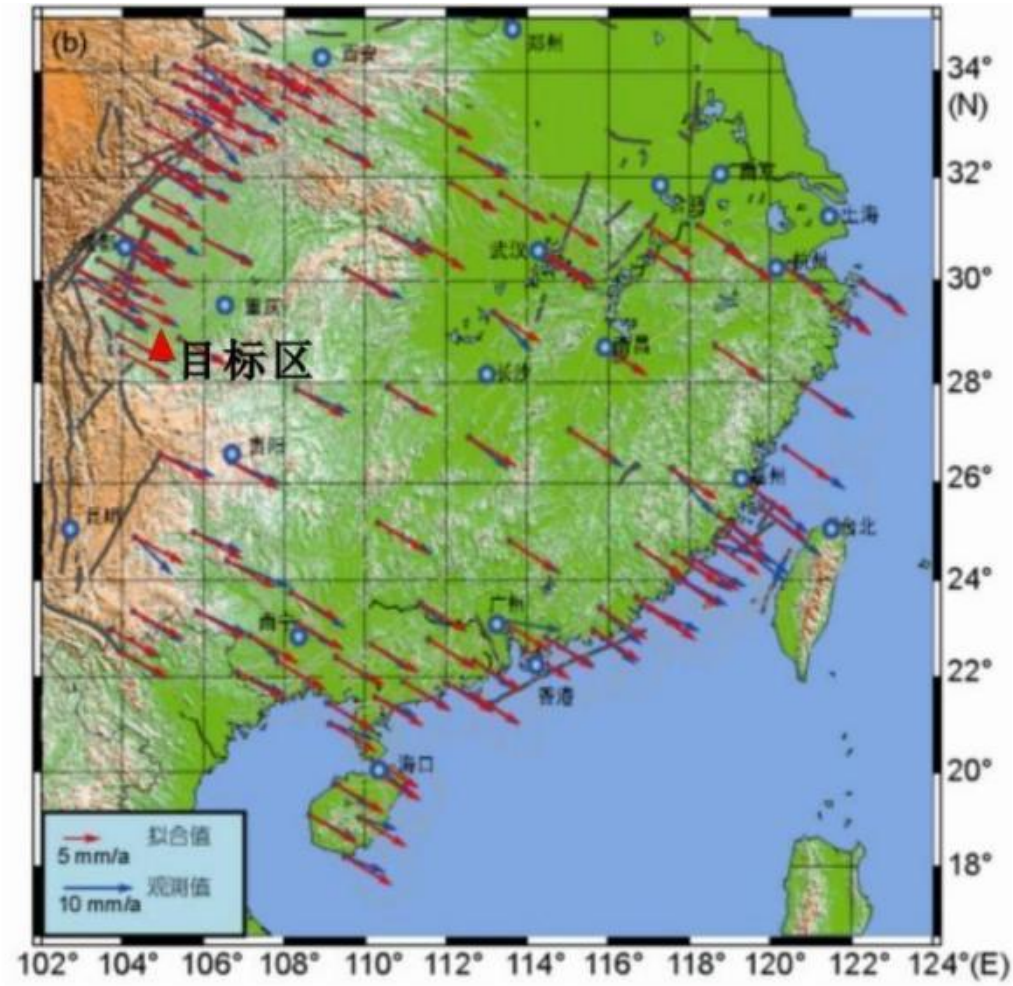


图2.1-3　华南块体的 GPS 速度分布（蓝色箭头）和刚性块体旋转产生的速度场（红色箭头）（据张培震等，2013）

总体上，整个华南地块内部不存在明显的速度梯度带，整体向 NE102°方向运动（图 2.1-3），平均速率约为 10.5mm/a（张培震等，2002）。块体在新构造运动上属于相对稳定的地块，地震活动性相对较弱。

（3）巴颜喀拉块体

巴颜喀拉块体位于青藏高原中部，其东部和东北部为相对稳定的华南块体和鄂尔多斯块体，西南部为川滇块体，北西侧为祁连块体。该块体作为松潘-甘孜造山带的一部分，具有复杂的构造演化史。它的北边界为东昆仑断裂带，南边界鲜水河断裂带，而东边界则是由龙门山断裂带及其北西侧的若干次级断裂带组成的活动构造与断裂系统。

巴颜喀拉块体的运动方向约为 NE61°，东部由于受到稳定的华南块体的阻挡，在这两个块体的边界带龙门山断裂带及其附近，以挤压逆冲为主兼具右旋走

滑性质的构造变形为响应，在龙门山以西的宽度约 200 多公里的地带产生 3.5～6mm/a 的水平缩短和 2～6mm/a 的剪切变形（张培震等，2002）。

GPS 给出的研究区及周边现今地壳运动场与活动断裂研究得出的构造变形模型具有一致性。在以华南地块为参考框架的运动场中，龙门山断裂的滑动速率很小，与四川盆地之间只有 2-3 mm/a，甚至更小的差异运动（张培震等，2002，Gan et al.,2004）。

2.2 区域新构造运动的基本特征

研究区地跨中国西部强烈隆升区和东部弱升区两个截然不同的一级新构造运动单元。目标区位于川东盆岭区（II_2）（图 2.2-1）。

研究区东部和西部地区的新构造运动特征及地貌塑造过程具有明显的差异（图 2.2-2）。东部地区即四川盆地第四纪以来表现为缓慢抬升，现存三期夷平面，高程分别为 300～500m、600～900m 和 1100～1600m(盆周区)，第四纪以来抬升幅度在 500m 至 1500m 的范围内，区内差异运动不明显。整体性较好，构造较简单，断裂规模小，活动性弱。仅有一些零星的 5 级左右中强地震记载。

西部地区即四川西部高原第四纪以来为强烈快速抬升区。新第三纪末期尚处于准平原状态，高程仅 1000m 左右，第四纪以来与青藏高原同步快速抬升，为青藏高原的组成部分。现存高夷平面海拔 4200～4500m，第四纪以来的抬升幅度达 3000～3500m。断裂带规模大，由于高原的差异抬升以及高原内部断块的水平移动，致主要的边界断裂表现出明显的活动性，是研究区内 6 级以上强震的分布区（唐荣昌等，1993）。

在西部强隆区和东部弱升区之间的过渡地区，主要是指龙门山、大相岭、大凉山及攀西等地区，第四纪以来的抬升幅度大约在 2000m 左右，主要表现为中深切割的高山峡谷地貌，强震主要集中在不同块体的边界断裂上，而块体内部整体性较好，较少 6 级以上地震发生。

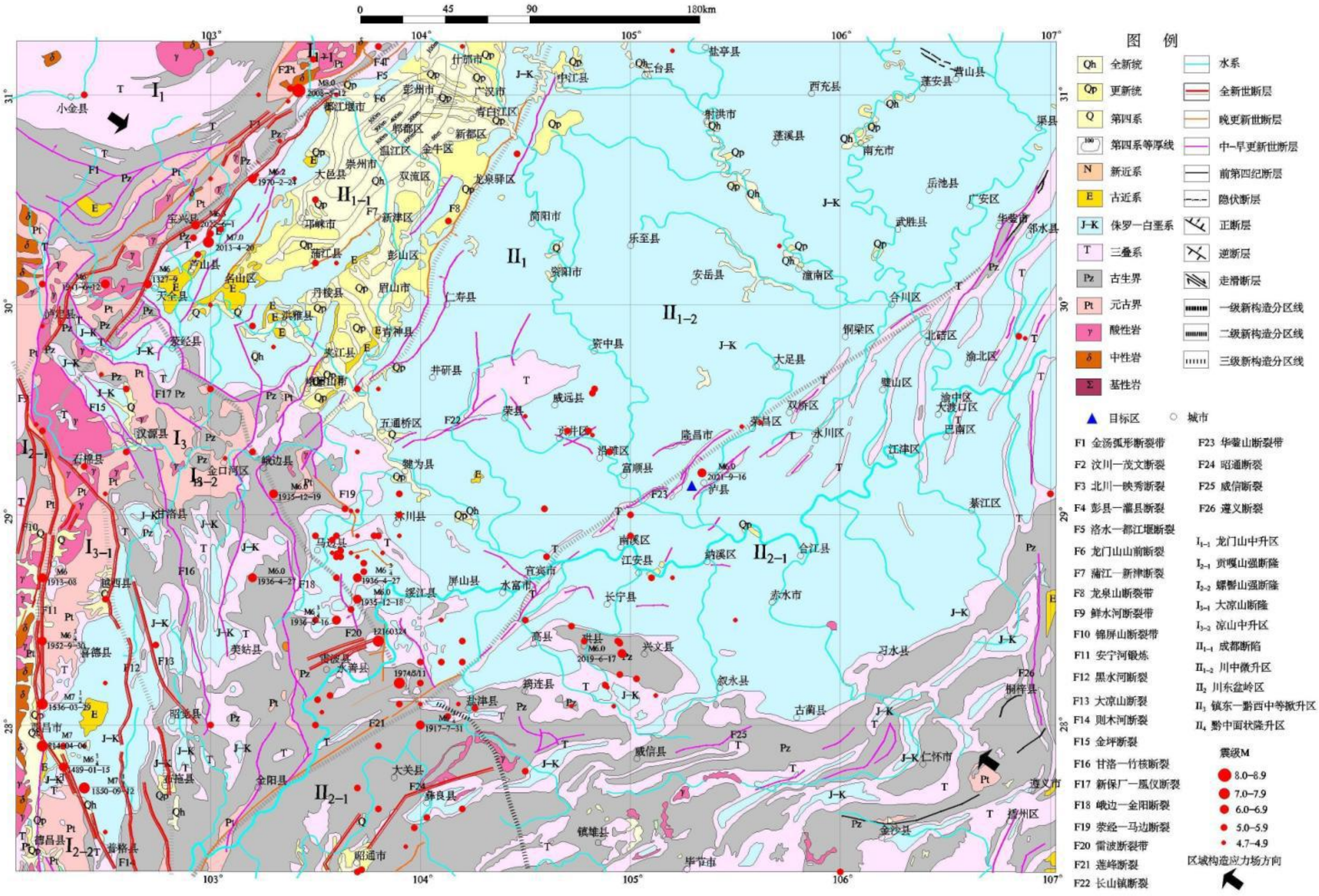


图2.2-1　区域新构造分区与地震构造图

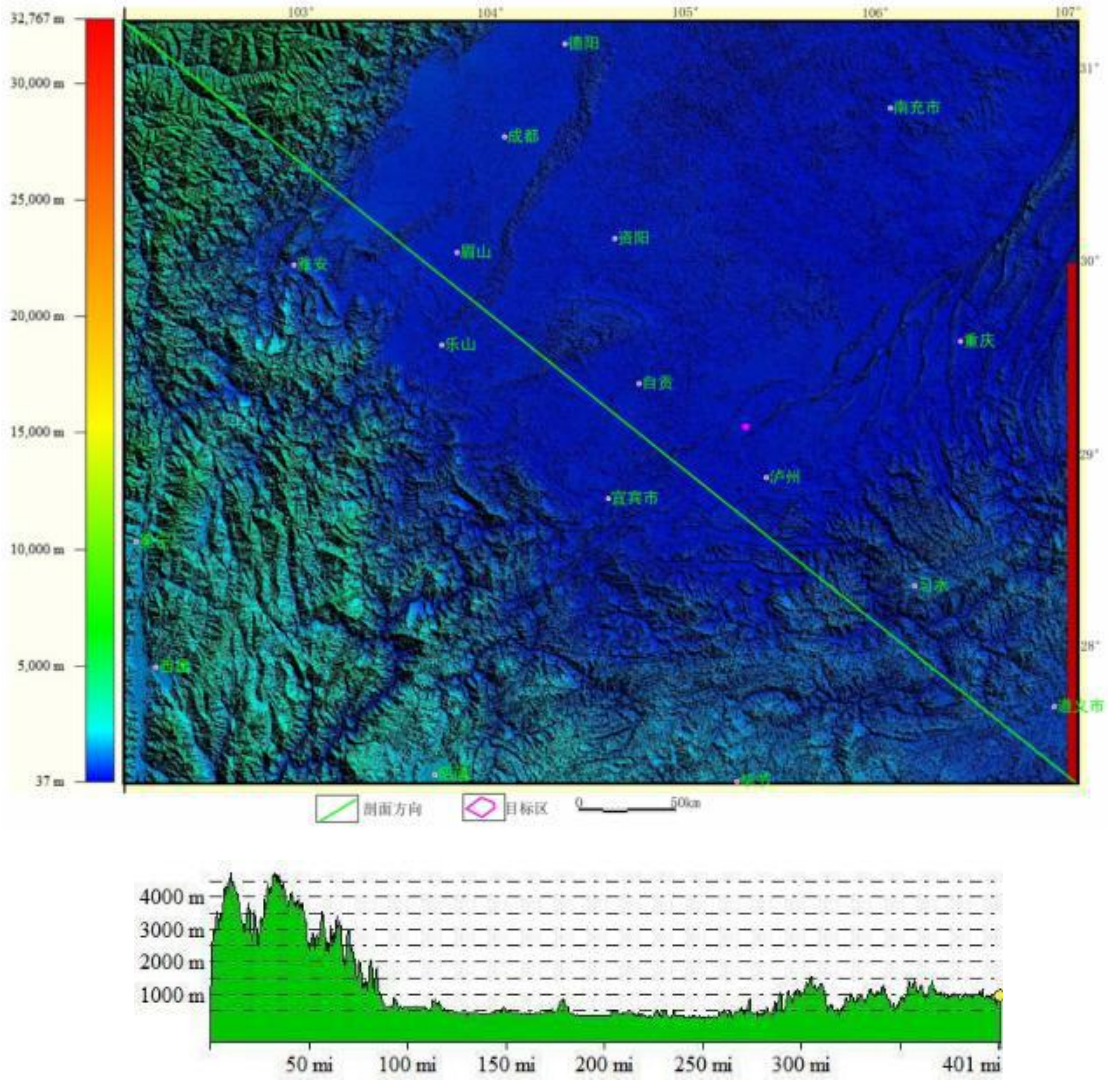


图2.2-2　区域地貌图和地形剖面图

四川地区的新构造运动及地貌格局主要受喜马拉雅运动的影响。喜马拉雅运动可分为三期，即老第三纪末、新第三纪末和第四纪。第三纪的运动性质以褶皱造山运动为主，第四纪则表现为大面积的整体抬升。在区域整体快速抬升的同时，沿一些边界断裂发生了明显的差异运动(包括水平与垂直运动)，这种运动的速度差异直接导致了不同的地貌格局，为新构造的进一步分区提供了依据。根据第四纪抬升幅度的差异，研究区的新构造运动可划分为如下几个区（表 2.2-1）。简述如下。

表2.2-1　区域新构造运动分区表

一级区	二级区	三级区
西部强隆区（I）	川青面状强隆区（I_1）	龙门山断隆（I_{1-1}）
	川西面状强隆区（I_2）	贡嘎山强断隆（I_{2-1}）
		螺髻山强断隆（I_{2-2}）
	大凉山中升区（I_3）	大凉山断隆（I_{3-1}）
		凉山中升区（I_{3-2}）
东部弱升区（II）	四川盆地弱升区（II1）	成都断陷（II_{1-1}）
		川中微升区（II_{1-2}）
	川东盆岭区（II2）	黔北-黔中断隆（II_{2-1}）
		滇东北掀斜断隆（II_{2-2}）

西部强隆区（I）：包括西部强烈隆起抬升区和强隆区与弱升区之间的过渡地区，第四纪以来的抬升幅度较大，可进一步划分为川青面状强隆区（I_1）、川西面状强隆 区（I_2）和大凉山中升区（I_3）3 个二级区。

川青面状强隆区（I_1）表现为大面积隆起抬升，整体性较好，第四纪以来的抬升幅度在 3000m 以上，又可细划出龙门山断隆（I_{1-1}）。

龙门山断隆（I_{1-1}）处于高原向四川盆地的过渡地区，表现为中深切割的高山峡谷地貌，第四纪抬升幅度具有由南东向北西逐渐增大的趋势，在 1000-3000m 之间。

川西面状强隆区（I_2）第四纪以来的抬升幅度在 3000～4000m，又可细划为贡嘎山强断隆（I_{2-1}）和螺髻山强断隆（I_{2-2}）2 个三级区。

贡嘎山强断隆（I_{2-1}）的西边界为玉农希断裂，北、东边界为鲜水河断裂和锦屏山断裂，第四纪以来的抬升幅度平均为 3900m，主峰地区达 5000m 以上（陈富斌等，1992），是一个典型的断块隆起区，第四纪以来发育有多期冰川，现代冰川亦很发育，典型的冰川侵蚀地貌及冰碛物在许多地段现仍清晰可辨。

螺髻山强断隆（I_{2-2}）处于安宁河、则木河断裂交切部位的南西侧，是一个比较典型的断块隆起山地，第四纪以来的隆升幅度约在 3000—4000m。

大凉山中升区（I_3）表现为整体性的大面积抬升，抬升幅度在 2000m 左右。除边界断裂和大凉山断裂表现出明显的走滑运动外，其余断裂活动性较弱。可细划为大凉山断隆（I_{3-1}）和凉山中升区（I_{3-2}）2 个三级区。

大凉山断隆（$Ⅰ_{3-1}$）位于安宁河、则木河断裂以东、莲峰断裂以北及大凉山断裂以西，高原面平均海拔高度在 3000m 以上，盆地面海拔高度在 2000m 左右，地貌上主体为高原，最高海拔 4700m，第四纪以来隆升幅度约 2000—3000m。凉山中升区（$Ⅰ_{3-2}$）位于大凉山断裂以东，荥经—马边—盐津断裂带以西的地区，第四纪以来表现为整体性的大面积抬升，抬升幅度在 2000m 左右。

东部弱升区（Ⅱ）：第四纪以来抬升幅度较西部地区小，可进一步划分出川盆地弱升区（$Ⅱ_1$）、川东盆岭区（$Ⅱ_2$）两个二级区。

四川盆地弱升区（$Ⅱ_1$）

为华南断块西北部的一个隆起区。位于龙门山断裂以东，七曜山断裂以西。新构造时期以来表现缓慢抬升，根据新构造运动性质、构造变形的差异，该区自西向东可进一步划分为为成都断陷（$Ⅱ_{1-1}$）和川中微升区（$Ⅱ_{1-2}$）2 个三级区：

成都断陷（$Ⅱ_{1-1}$）：第四纪以来一直处于下降状态，第四系最大厚度可达 541m。

川中微升区（$Ⅱ_{1-2}$）第四纪一直处于剥蚀状态，抬升幅度小于 500m，形成大面积的丘陵地貌。

川东盆岭区（$Ⅱ_2$）位于华蓥山断裂以东，整体性较好，第四纪以来一直处于剥蚀状态，抬升幅度小于 500m，表现为盆地、丘陵相间分布的地貌类型。可细划为黔北-黔中断隆（$Ⅱ_{2-1}$）和滇东北掀斜断隆（$Ⅱ_{2-2}$）2 个三级区：

黔北-黔中断隆（$Ⅱ_{2-1}$）处于云贵高原向北与四川盆地的过渡地区。区内地势即表现由西向东下降，又表现自南向北梯级降落。区内主要发育二级夷平面，I 级夷平面海拔高（南部）2000m，向北降为 1200m 左右，II 级夷平面海拔高（南部）1700－1800m，向北降为 1000m 或以下。区内断裂以北东向为主，次为近东西向，第四纪以来活动微弱，块体内部差异活动不明显，历史上只发生过少量中等强度地震。研究区内仅包括该断隆带西北部一小部分。

滇东北掀斜断隆（$Ⅱ_{2-2}$）位于北东向莲峰断裂以南，寻甸－来宾铺断裂以北，近南北向小江断裂和北西向威宁－水城断裂之间。新构造时期以来表现大幅度抬升和向东、向南掀斜。区内 II 级夷平面发育，海拔高有西北部的 3000m 向东、向南降到 2200－2500m 左右。区内发育北东向、近南北向和北西向断裂，其中近南北向和北西的断裂第四纪以来活动性较强，受其控制块体内部差异活动较明显，历史上又多次中强地震发生。

综上所述，目标区所处的新构造分区（川东盆岭区（II_2））第四纪以来新构造运动不强，整体性较好。从强震活动与新构造运动的关系来看，研究区 6 级以上强震往往发生在新构造运动分区界线附近，这些分区界线也常常分布有第四纪以来具有明显活动性的断裂构造。

2.3 区域地球物理场

2.3.1 布格重力场特征

地球布格重力场主要反映地壳内部乃至上地幔的地质构造及物质分布状态。由图 2.3-1 可见，区域内的布格重力异常值均为负值，且具有由南东向北西逐渐降低的特点，变化的幅度和范围在-70～-420mgal 之间，且分区特点显著。据等值线的展布方向和疏密程度可以划分出两个不同的重力异常区。

四川盆地布格重力异常相对高值区：位于绵阳—乐山—宜宾以东区域，形成了以大足为中心的呈封闭状的相对布格重力异常高值区，异常等值线变化比较平缓，表明四川盆地地壳厚度变化较小。

布格重力异常梯级带：该梯级带在龙门山地区呈北北东向，平均变化梯度在 2mgal/km 左右，反映了该地区的莫氏面呈一向西倾斜的斜坡，该重力带是北东向龙门山断裂带通过的位置，表明了龙门山断裂是一条切割深度已达上地幔岩石圈的深大断裂。在北纬 30°附近的康定、泸定、雅安地区，该梯级带分岔呈现三支条带变化：一支呈北西向由雅安经峨边、马边、盐源延伸进贵州境内；另一支呈北东向由康定经九龙、木里延伸进滇西地区（出图幅）；再一支呈南北向由泸定经石棉、西昌、德昌至会理。这三条重力梯度带实质上是荥经-马边-盐津断裂、锦屏山构造带和安宁河断裂带在深部的具体反映。

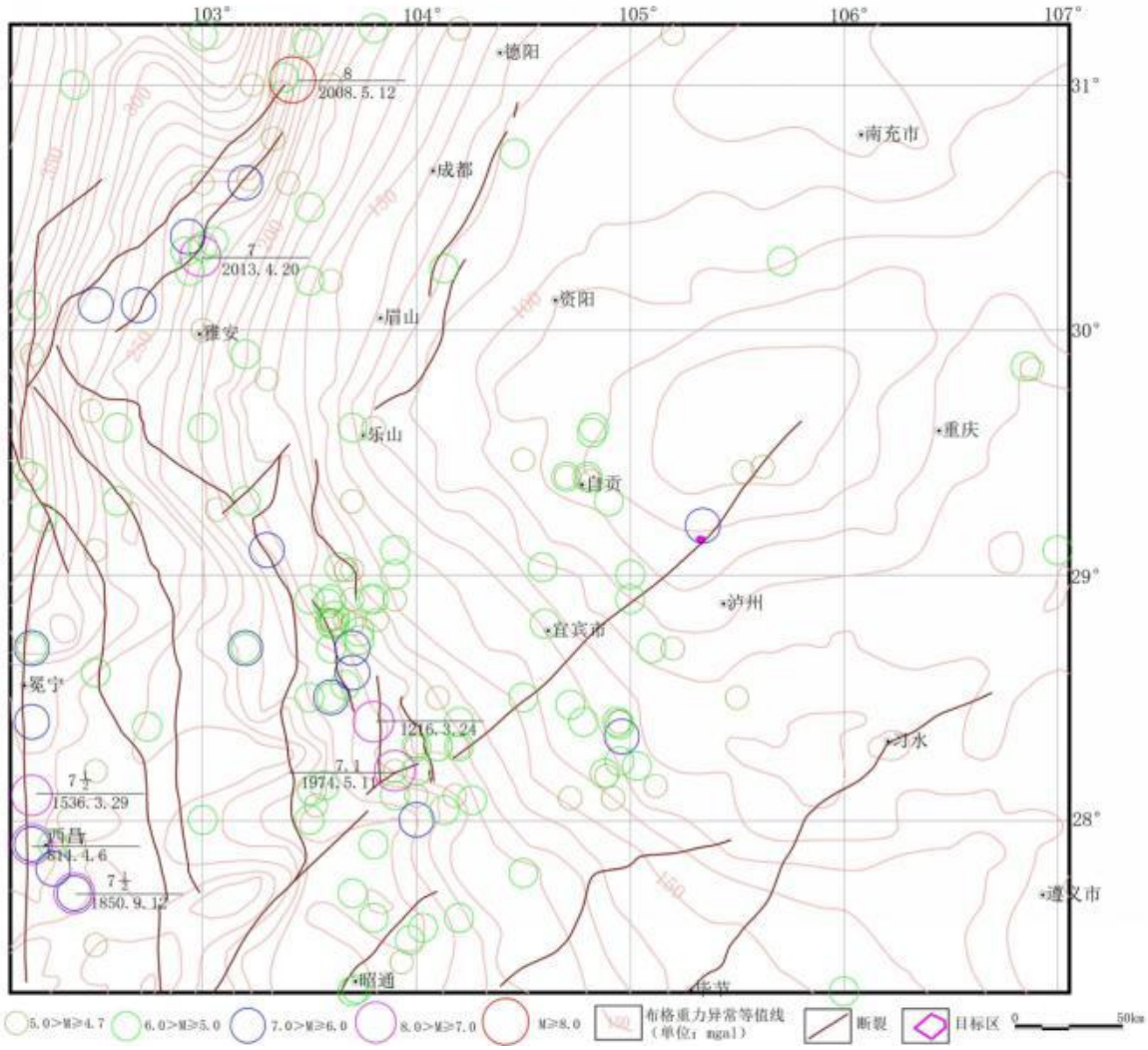


图2.3-1　区域布格重力异常图

2.3.2 航磁特征

航磁场是地壳内不同磁性体的综合反映，不同的磁异常特征与基底的性质和后期的岩浆活动有关。图 2.3-2 是本区域内航磁△T 化极上延 20km 异常图，从该图可见，磁场变化具有北强南弱的分区特征：

（1）丹巴—小金负磁异常区：该区航磁异常等值线变化平缓，磁异常值在-20 纳特～-40 纳特之间，反映了该地区大面积分布的弱磁性的浅度变质砂板岩系。在负磁异 常背景上出现的局部环状磁性正异常，是该区域存在的局部花岗岩侵入体的具体反映。

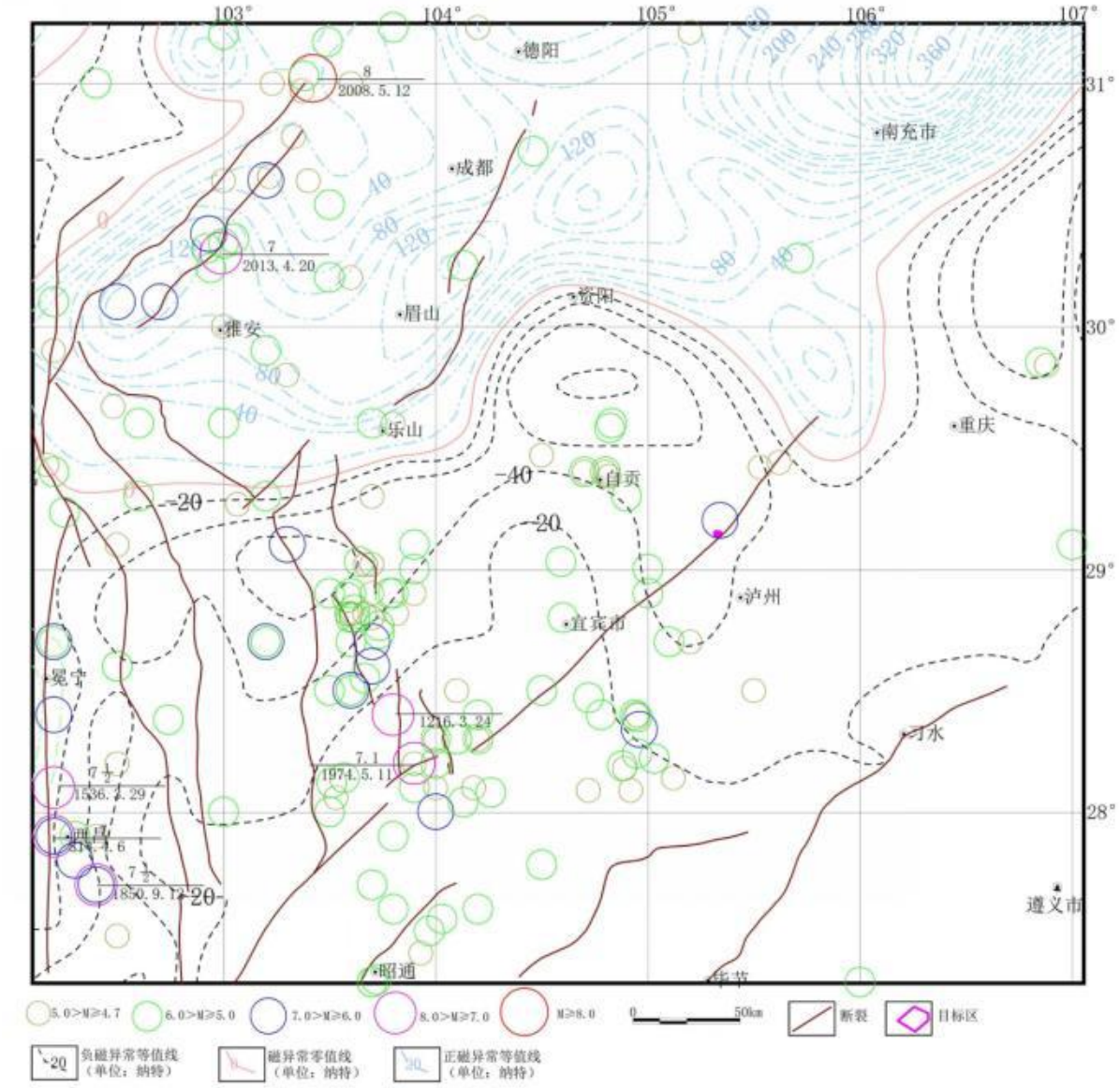


图2.3-2　区域航磁△T 化极上延 20km异常图

（2）南充—成都正磁异常区：该区域磁异常的总体形态呈北东向展布，异常值最高可达+360 纳特，与四川盆地的范围大致吻合，反映了四川盆地的基底是由中-基性岩浆杂岩及各种深变质的片麻岩组成，岩石的磁性强，结晶程度好。在上述两个正、负磁异常的分界位置，正好是龙门山断裂带的通过位置，反映了龙门山断裂两侧绝然不同的基底性质，同时也是龙门山深大断裂性质的航磁场证据。

（3）泸州—筠连—昭通负磁异常区：该区位于区域的南部，主要以负磁异常为主，异常值为 0~-80nT，变化幅度较小，且无一定走向，仅在冕宁～西昌地区呈显局部正磁场，这可能与该地区存在的晋宁期花岗岩及钒钛磁铁矿有关。可

以推断以南地区弱负磁异常区可能为川鄂古陆刚性基底和江南塑性基底之间的中深变质结晶基底的反映。

2.3.3 地壳结构特征

图 2.3-3 是由布格重力异常值反演而得的区域地壳厚度等值线图，由此图可见，地壳厚度等值线的疏密程度及异常形态，清晰地反映出该区莫氏面的起伏状态。在区域内，地壳厚度具有东薄西厚的特点，变化范围在 42—66 km 之间。东部地壳厚度变化平缓，由东向西呈不均匀逐渐增厚，形成以简阳、资中、大足为中心的幔隆区，地壳厚度最薄处约 42km。西部地壳厚度由东向西急剧增厚，呈明显的幔坡带，尤其是在龙门山地区，莫氏面呈向西陡倾，平均梯度值可达 0.2km/km。在区域南部，其东侧是幔隆区的一部分，以西为地幔拗陷区，地壳最厚约 60km，莫氏面在向西陡倾这一大背景下又出现局部的隆、凹叠加（西昌幔隆和金阳幔凹），表明区域内的边界断裂具有深大断裂性质，断裂切割深达下地壳或上地幔。

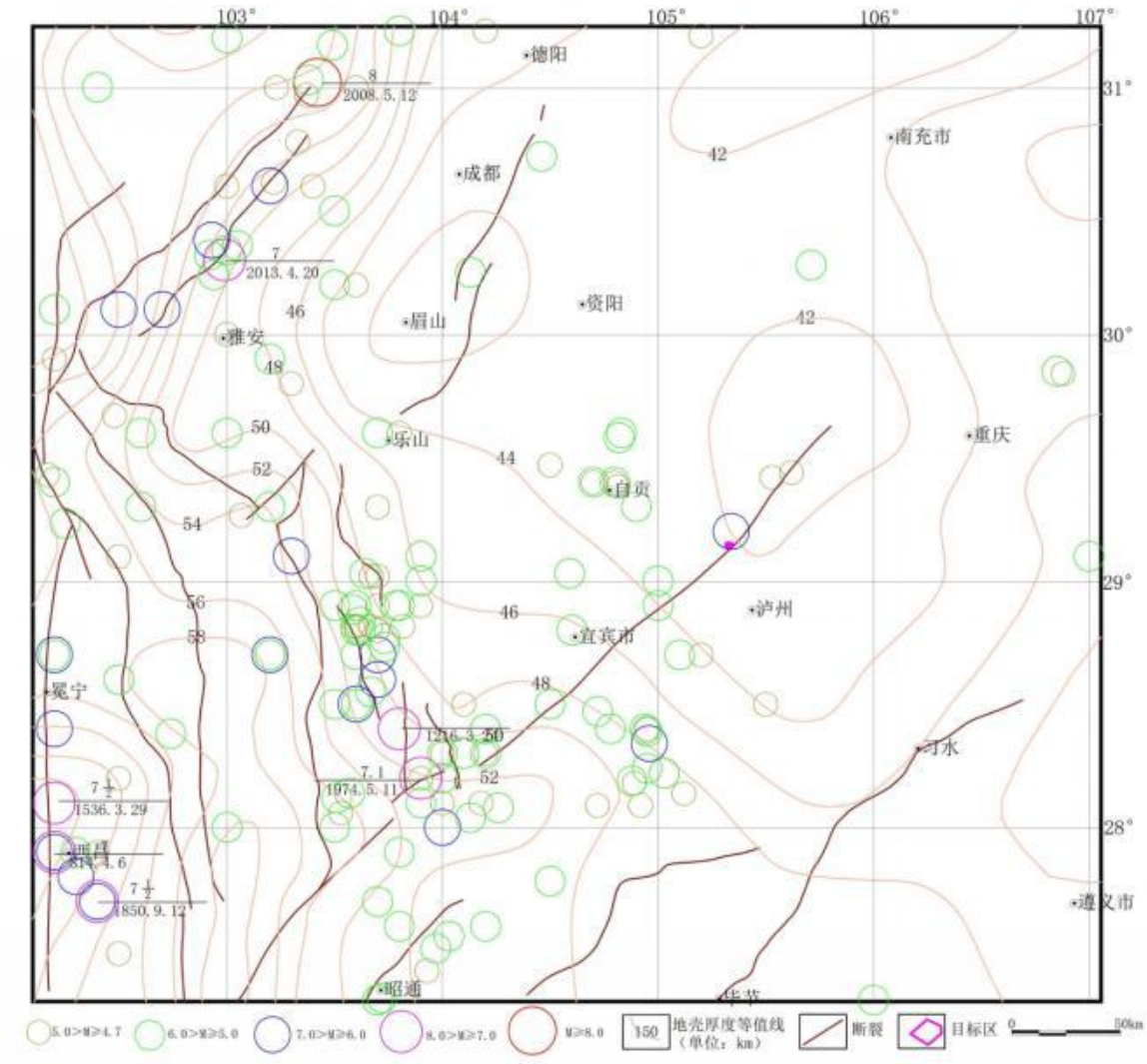
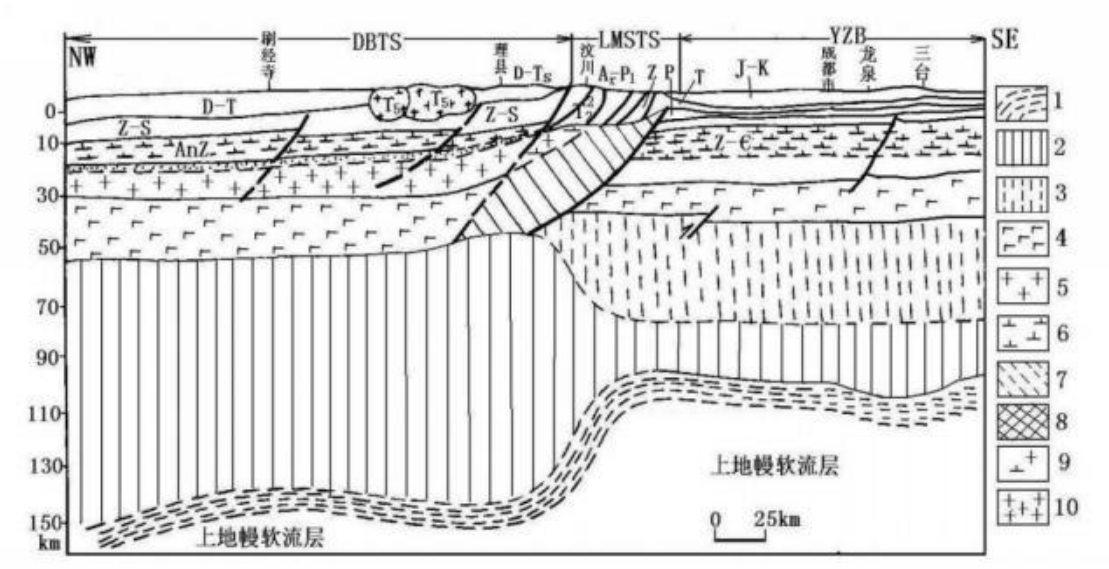


图2.3-3　区域地壳厚度等值线图

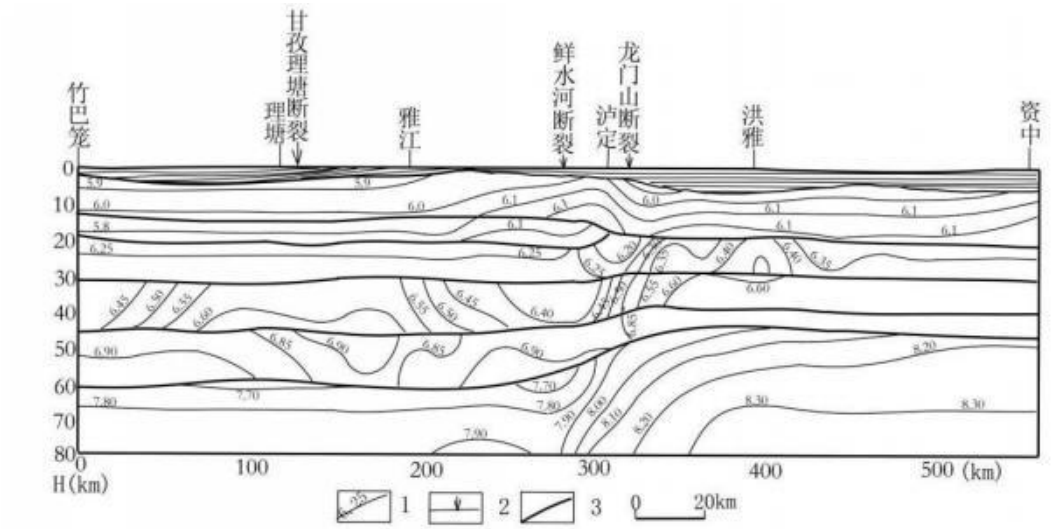
据四川省地矿局物探队（1990）所做的黑水—重庆—秀水地学断面西段（图2.3-4）剖面，区域内的岩石圈底界从扬子地块向松潘—甘孜造山方向发生深度突变，在 80km 范围内岩石圈厚度由 95km 增至 140km，这一厚度陡变带正处于龙门山构造带之下，表明了龙门山构造带为一条切割深度已达岩石圈的深大断裂。特别是在龙门山西侧 20km 左右深处的中地壳之上出现的 3～5km 厚的低速低阻层，可能是川西高原深部滑脱的拆离带，与该地区 20km 深度左右的优势发震层基本吻合，而且也可以从地震波层析成象所得到结果（图 2.3-5）加以映证（王椿镛等，2002 年）。可以认为，在印—亚板块会聚及高原地壳物质重力势的作用下，青藏高原东缘地区的上地壳物质沿此滑脱面向东逸出，在龙门山地区转化为脆性逆冲运动，于该地区形成一系列铲式逆冲断裂叠瓦系的逆冲构造岩片（推

覆体），叠置而成构造形态西厚东薄的逆冲楔，楔体最大厚度为 10km，最大延深达 20km。因此，龙门山构造带应是典型的前陆薄皮逆冲构造。



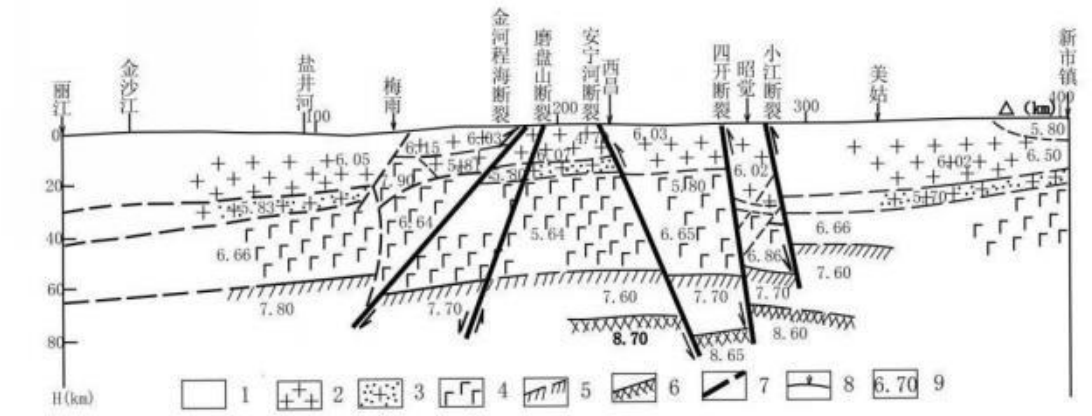
1.上地幔软流圈；2.上地幔；3.异常上地幔；4.硅镁层；5.硅铝层；6.结晶基底；7.高阻层；8.低速低阻层（花岗质熔融层）；9.混合岩；10.花岗岩；DBTS（丹巴岩片）；LMSTS（龙门山前陆逆冲楔）；YZB（扬子陆块）

图2.3-4　黑水—重庆—秀水—地学断面西段图



1.层速度（km/s） 2.断裂带； 3.推测界面；

图 2.3-5　竹巴笼—资中人工地震测深剖面图（王椿镛等，2002 年）



1.表层；2.硅铝质层；3.低速层；4.硅镁质层；5.莫霍界面； 6.地壳—地幔过渡带界面；7.断裂带；8.人工爆破点位置；9.层速度（km/S）

图 2.3-6　丽江—新市镇人工地震测深地壳结构剖面图

丽江—新市镇的人工地震测深解释图（图 2.3-6）（崔作舟等，1988），呈近东西 向横切区域南部，由此图可见，区域的地壳为高、低速相间的多层层状结构。上地壳和上地壳底部低速层微向西倾，显塑性的低速层埋于地表下 20～30km。在新市镇低速层埋深 28km，到美姑、昭觉一带增至 34km，与该地区的优势震源深度位置大致相等， 可能是青藏高原东缘地区上地壳相对下地壳剪切滑脱的深部拆离带。

从合川-长寿深地震深度反射剖面上（图 2.3-7）分析（王赞军等，2018 年），地壳中部有一条连续性较好的反射波组，推测为地壳中酸性花岗岩质层与基性玄武岩质层的界面，其埋深约 22 千米，被华蓥山基底断裂切割。下地壳中存在几个有一定连续性的反射波组，在测线西部近于水平，而在华蓥山断裂以东表现出一定的起伏变化，反映本区下地壳地层结构较为复杂，可能与壳内软弱层的存在有关。剖面位置莫霍面埋深介于 40～43 千米左右，从剖面两端向中间逐渐抬高，最大抬升约 1.5 千米左右。在深部，华蓥山基底断裂切割了地壳中酸性花岗岩质层与基性玄武岩质层的界面，但未切穿莫霍面。

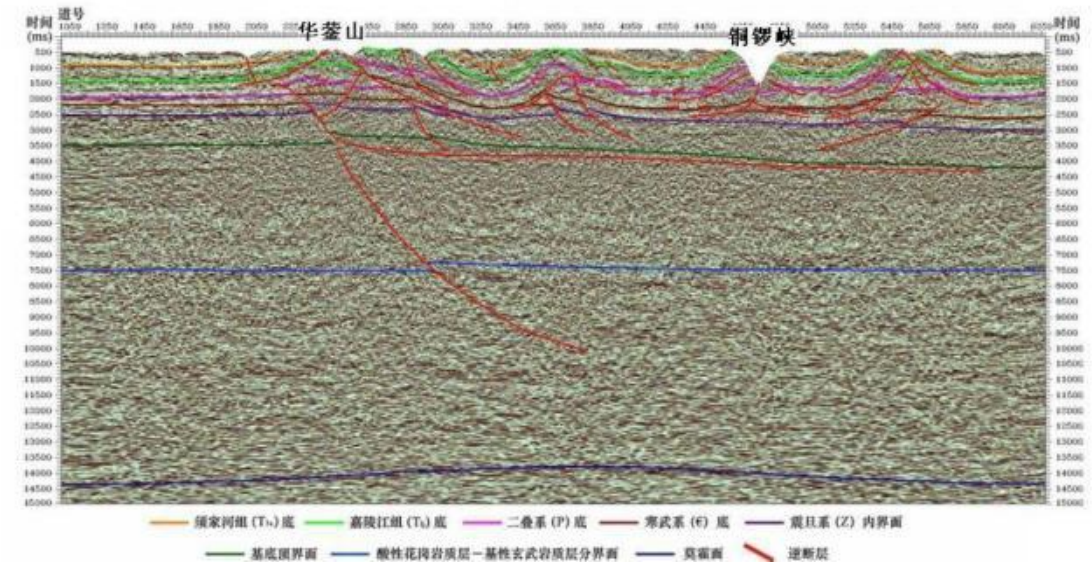


图 2.3-7　合川-长寿深地震反射测线解释剖面（王赞军等，2018 年）

2.3.4 区域地球物理场与地震活动的关系

（1）区域内的地球物理场特征变化比较复杂，布格重力异常梯度带、航磁异常变异带和地壳厚度陡变带与龙门山断裂带、安宁河断裂及荥经—马边—盐津断裂的展布位置具有明显的一致性，表明这几条断裂为深大断裂性质。而华蓥山断裂切割深度达下地壳，但未切穿莫霍面，与其基底断裂的性质一致。

（2）区域内的地壳结构具有多层结构，由于受深大断裂的切割，不同的构造层的埋深在不同的地段具有较大的差异。特别是在龙门山断裂以西地区 20km 左右深处，出现了一低速层，可能是川西高原深部滑脱的拆离带，与该地区的优势发震层基本吻合。

（3）区域的地壳厚度具有东薄西厚的特点，四川盆地的地壳最薄，对应上地幔隆起区；西北部地区地壳最厚，对应上地幔凹陷区。但这种变化是非均匀的，在龙门山构造带两侧地壳厚度发生突变，形成地壳厚度陡变带。在区域南部，大凉山断块地壳厚度也有较大变化，形成了局部的隆、凹叠加（西昌幔隆和金阳幔凹）。地壳厚度的变化表明区域内的边界断裂具有深大断裂性质，断裂切割深达下地壳或上地幔。工程场区处于四川盆地内部，地壳厚度在 42～44km 左右。

（4）区域内的 6 级以上地震特别是 7 级以上大震集于布格重力异常等值线或航磁异常陡变带或弯折区等这些地球物理场畸变带和地壳厚度陡变带上。因此这些地区特别是岷山断块、龙门山构造带、大凉山断块带具备发生 7 级左右强震的深部构造背景。

2.4 区域主要断裂带特征及其活动性

活动断裂研究是涉及断裂最大可能潜在地震能力估计和潜在震源区划分的重要内容。区域包括了青藏高原东缘及四川盆地的一部分，岷山断块和龙门山构造带是青藏高原东边界的重要成员。以此为界，区域东、西两侧的构造变形及其地震活动性出现明显的差异。岷山断块、龙门山构造带和荥经－马边－盐津断裂带及其以西的地区，断裂规模大、活动性强，地震频发，尤其是 6 级以上强震主要集中于块体边界断裂上，是活动构造区；以东的四川盆地断裂构造不甚发育，规模小，活动性弱，仅有一些零星的中强地震活动记载，是相对的稳定区（图 2.2-1）。现将主要断裂带特征及其活动性简述如下（表 2.4-1）：

表 2.4-1　区域主要断裂活动特征一览表

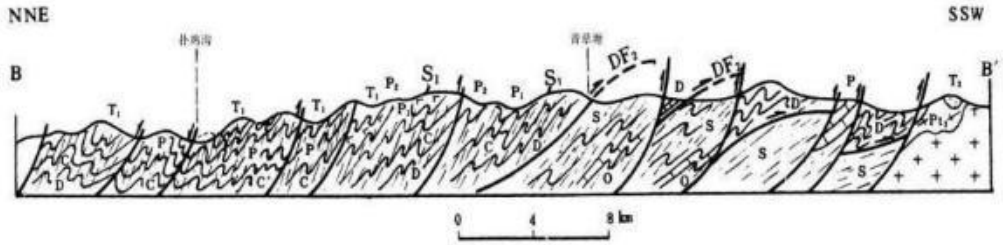
断裂编号	断裂名称	产状	长度(km)	性质	分段性(活动时代)	滑动速率(mm/a)	地震活动
1	金汤弧形断裂带	走向 NE、倾向 NW		逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
2	茂汶-汶川断裂	N30～50°E/NW∠50～70°	500	逆冲兼右旋走滑	陇东段（Q_P^3）		中小地震分布
					茂汶-草坡段（Q_h）	1（水平）0.80（垂直）	1657 年 6½地震
3	北川-映秀断裂	N30～50°E/NW∠50～ 70°	500	逆冲兼右旋走滑	南西段（Q_P^3）		
					北川-映秀段（Q_h）	1（水平和垂直）	1958 年 6.2 和 2008 年 8.0 级地震
					南坝段（Q_P^3）		中小地震分布
4	彭县-灌县断裂	N30～50°E/NW∠50～70°	500	逆冲兼右旋走滑	都江堰-天全段（Q_h）	1(水平和垂直)	1327 年≥6 级、1970 年 6.2 级和 2008 年 8.0 级地震、2013 年 7.0 级地震、2022 年芦山 6.1 级地震
					江油段（Q_P^1-Q_P^2）		中小地震零星分布
5	洛水-都江堰断裂	N30～50°E/NW∠60～70°	逆冲	逆冲	Q_h	0.36mm/s	
6	龙门山山前断裂	N50～60°E/NW∠60～80°	90	逆冲	大邑段（Q_P^3）	0.13～0.24	中小地震分布
					彭州段（Q_P^3）		
7	蒲江-新津断裂	N30～40°E/SE∠50～70°	130	逆冲	新津-新都段（Q_P^3）	0.15～0.33	弱震分布
					蒲江-新津段（Q_P^3）		1734 年 5 级和 1962 年 5.1 地震
8	龙泉山断裂	N20～30°E/SE∠50～70°	250	逆冲	西支（Q_P^3）		1967 年 5.5 级地震、2020 年青白江 5.1 级地震
					东支（Q_P^1-Q_P^2）		
9	鲜水河断裂南东段	走向 N20～30°W，倾向不定，近于直立	400	左旋走滑	雅拉河段（Q_h）	2.0±1.0	多次古地震地质记录
					色拉哈段（Q_h）	5.5±1.0	1725 年 7 级地震及多次 古地震地质记录

断裂编号	断裂名称	产状	长度(km)	性质	分段性(活动时代)	滑动速率(mm/a)	地震活动
					折多塘段（Q_h）	3.5±1.0	1955 年 7½级地震及多 次古地震地质记录
					磨西段（Q_h）	10.0±2.0	1786 年 7¾级地震及数 次古地震地质记录
					擦罗段（Q_h）	3～5	
10	锦屏山构造带	N20~30°E/NW∠60~80°	70	逆冲	Q_P^2-Q_h		中小地震分布
11	安宁河断裂	NS/E∠60～80°	350	左旋走滑兼逆冲	冕宁-田湾段（Q_h）	5（水平）	1913 年 6 级地震及晚全新世以来多次古地震
					西昌-冕宁段（Q_h）	5.5（水平）	1536 年 7½级地震和 1952 年 6.7 级地震
					西昌-会理段（Q_P^1-Q_P^2）		
12	黑水河断裂	N5～15ºW，倾向不定，∠60～70º	140	逆冲走滑	Q_h		
13	大凉山断裂	N20～30°W/NE∠60°	280	左旋走滑	海棠-越西段（Q_h）	2.6～3.3	中小地震分布
					普雄河段（Q_h）		及多次古地震地质记录
					布拖段（Q_h）		
					交际河段（Q_h）		
14	则木河断裂	330°/SW∠60～80°	130	左旋 走滑	Q_h		地震活动强烈，最大地震为 1850 年 7½级地震
15	金坪断裂	N30～40°W/SW∠60～75°	84	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
16	甘洛-竹核断裂	北段 N30°W/SW∠60～75°	120	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
		南段 NS/W∠70～80°					
17	保新厂-凰仪断裂	N40°W/SW∠70～80°	100	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
18	峨边-金阳断裂	NS/W∠60～75°	110	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
19	荥经-马边-盐津断裂	N25～30°W/SW∠60°	250	左旋走滑兼逆冲	峨边段（Q_P^1-Q_P^2）		
					马边段（Q_h）		1216 年 7 级、1974 年 7.1 级地震、多次 6.0-6.9 级地震
20	雷波断裂带	N70°E/SW∠65°	70	右旋走滑	Q_P^3-Q_h	2~3	
21	莲峰断裂	N30-50°E/SE∠50～80°	150	逆冲	Q_P^3		中小地震分布
22	长山镇断裂	N40～50°E/NE∠60～80°	60	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
23	华蓥山断裂带	邻水-达县（北段）：N30～35ºE/SE∠30～70°	120	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		
		邻水-合川（中段）：N30～35ºE/SE∠30～80°	80				
		合川-宜宾（南段）：N40～45ºE/SE∠50～	250	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		数次 5 级左右中强地震：BC.26 年宜宾 5½级

断裂编号	断裂名称	产状	长度(km)	性质	分段性(活动时代)	滑动速率(mm/a)	地震活动
		80°					地震及 1610 年高县 5½级地震，2021 年泸县 6.0 级地震等
24	昭通断裂	NE∠40-65°	130	逆冲	Q_h		2014 年鲁甸 6.5 级地震，探槽揭示 3 次古地震事件
25	威信断裂	N15°-60°E/SW ∠60～70°	96	压扭	Q_P^2		中小地震分布
26	遵义断裂	NS/SE∠50-80°	140	逆冲	Q_P^1-Q_P^2		

2.4.1 金汤弧形断裂系

金汤弧形断裂系是松潘—甘孜造山带汶川—丹巴弧形构造带中一系列弧顶向南凸出的一系列滑脱—逆冲断裂系（图 2.4-1），近场区主要弧形断裂有 6 条，即鸡冠坪断层、么堂子断层、金棚山断层、大草-塘层、九奔流断层、青草塘断层。弧形断裂系中还发育了一系列规模不等方向各异的派生次级断层，么堂子断层是规模最大的一条派生断层。



图中自左至右依次为：鸡冠坪断层、穿天坡断层、么堂子断层、大草塘断层、 贵强湾断层、九奔流断层、青草塘断层、金棚山断层、贝母山断层、黑悬沟断层、 长河坝断层

图 2.4-1　金汤弧形构造带的逆冲断裂系剖面图（据许志琴等，1992）

丹巴—汶川弧形构造带分布于松潘—甘孜造山带主体的东缘，其地层岩性由扬子陆块西缘的元古界变质火山岩基底及古生界的变质碎屑岩、含硅质条带的碳酸盐岩和二叠系海相枕状玄武岩组成。弧形构造带的东翼逆冲于龙门山前陆逆冲楔之上，向南凸出的弧顶部位逆冲在康定杂岩之上，北部及西部被三叠系西康群覆盖。根据许志琴等（1992）对松潘—甘孜造山带的造山过程的研究，弧形构造带成生于印支期末，经早期（160～200Ma）自北向南的滑脱—逆冲作用，形成近东西向的构造带；中期（160～20Ma）在南北向挤压作用的强化下，被改造为弧形构造带；最后，在晚期（<20Ma）近东西向挤压作用的叠加下才最终定型为现今的构造形态。弧形构造带的东西两翼主要表现尾多层次滑脱构造，中部则主要为叠瓦式逆冲挤压构造。

新生代以来，受印度板块俯冲于欧亚大陆之下所产生的北西—南东向的挤压力的作用下，松潘—甘孜造山带主体内部产生了一系列大型的平移韧性剪切带，其中最为显著的是鲜水河断裂带切断龙门山—盐源前陆逆冲楔，左旋平移距离达80～100Km，而将造山带主体一分为二形成两个构造块体，即川滇块体和川青块体。川青地块的运动方向为南东东方向，主压应力场的优势方向是100 ～130 方位（程万正等，2003）。据GPS观测结果，川青块体龙门山以西的邻近地带（称岷山块体）的内部变形很小，可以看作刚性块体（吕江宁、沈正康等，2003）。金汤弧形断裂系正发育于川青块体南东端（岷山块体内部），因而其第四纪活动性远不如边界的龙门山断裂带和鲜水河断裂带。

2.4.2 龙门山断裂带

龙门山推覆构造带整体呈北东走向，主要由多条平行逆冲断裂组成，分别为后山断裂（汶川-茂县断裂、青川-平武断裂）、中央断裂（北川-映秀断裂）、前山断裂（江油-灌县断裂）、山前隐伏断裂等，主要断裂均倾向北西，具有前展式构造特征。

晚第四纪以来龙门山构造带的新活动性具有明显的分段性，显示右旋逆冲运动方式，具有较有明显的地质地貌证据。首先是沿龙门山构造带安县以南的中南段发生了强烈的差异活动，形成了成都第四纪断陷盆地（第四系最大厚度可达541m）。另外，几条主干断裂均有晚第四纪以来活动的显示。北川以北的北东段主要由平武-青川断裂、茶坝-林庵寺断裂和江油-广元断裂组成，第四纪以来也有不同程度的活动性。

2008年汶川Ms8.0地震就发生在龙门山断裂带上，并且造成了中央断裂的中段北川-映秀断裂和前山断裂的中段灌县-江油断裂2条断裂同时发生地表破裂，表明这2条断裂的最新活动性非常强烈（陈立春等，2008；徐锡伟等，2008；Xu et al.，2009）。而位于后山断裂中段的汶川-茂县断裂却没有发现同震地表破裂现象（徐锡伟等，2008）。

后山断裂全长约500km；从NE到SW分别为平武-青川断裂、汶川-茂县断裂和耿达-陇东断裂（唐荣昌等，1991）。已有成果认为：茂汶断裂晚第四纪以来存在一定的活动性（谢新生等，2011），而王旭光等（2017）则通过对区域内地质地貌考察，结合影像解译、差分GPS测量等工作，推测汶川-茂县断裂在T3

阶地（ 40～50ka BP）形成以来有过活动，而在 T2 阶地（约 20ka BP）形成以来不再活动。

龙门山山前至成都平原已确定存在许多隐伏断层（黄圣睦等，2003）。前人根据断层切割第四系、全新世地层形变、砂土液化等方面研究，认为山前的洛水-都江堰隐伏断层（关口断层）、彭县隐伏断层晚第四纪以来有过一定的活动记录（Zhou et al.，2007；董绍鹏等，2008；刘保金等，2009；杨晓平等，2009；任俊杰等，2012；Liu-Zeng et al.，2017）；

龙门山山前断裂由数条次级断裂羽列而成，在成都断陷区内，主要由大邑断裂、彭州断裂、竹瓦铺-什邡断裂和绵竹断裂呈左阶羽列组成。

大邑断裂北起大邑，向南西方向延伸经邛崃，沿蒙山东麓延伸至名山南消失，北段走向 60～70°，南段走向 25～35°，全长约 100km，在成都范围内，断裂南起西江村北，经敦义、大邑、银屏、东关、龙黄堰等地，全长约 30km。许多学者（Burchfiel 等，1995；李勇、周荣军等，2006a、b；Densmore 等，2007）认为大邑断裂是龙门山地区最东南边的一条活动断裂，但密集的人类活动和植被覆盖给大邑断裂的研究带来困难。另一方面，由于大邑断裂很可能属于龙门山前逆冲活动造成的盲断裂（Blind fault）（Chen，1996），断裂最新活动迹象不易直接出露地表。

根据《成都市活动断层初查与鉴定（Ⅰ期）技术报告》和《成都市地震活断层普查详勘》成果资料，通过地球物理勘探、石油地质剖面资料等手段确定了大邑断裂的走向，通过钻孔联合地质剖面确定了大邑断裂断错晚更新断层，未断错全新世地层，为一条晚更新世活动断层。

彭州断裂隐伏于第四纪沉积物之下，为龙门山山前隐伏断裂中的重要成员，控制了成都平原第四纪崇州-温江-郫县凹陷的北部边界。断裂自西南徐渡起，经玉石乡、城灌路、唐昌镇、彭州石化路，北至师古镇，长度约 50km，断裂走向 N55～60E，倾 NW，为一逆断层。根据《成都市活动断层初查与鉴定（Ⅰ期）技术报告》的工作成果，彭州断裂是一条由前第四纪基岩组成的一个向南东方向陡倾、受控于深部盲逆断层作用的膝折带。四川赛思特科技有限责任公司（2017）对彭州断裂通过地质调查、物探、钻探等手段，证实了该断裂具备晚更新世活动性，未断错全新统地层。竹瓦铺断裂两侧基岩埋深差异显著，北西侧为基岩出露的走石山，南东侧第四系最厚可达 541m，显示强烈的差异活动，在竹瓦铺～走

石山一带，断裂西侧的走石山直接出露灌口组（K2g）基岩，上覆厚约 10 余米的黄褐色亚粘土（热释光年龄值为距今 83600±6800～113900±9600a）。东侧的地表则出露晚更新世-全新世砂砾石层。绵竹断裂的差异活动稍弱，但绵竹县城附近的钻孔证实该断裂已错切晚更新世早期沉积物。在安县以北，花荄-彰明断裂为潜伏性质，未直接出露地表，但近年的中小地 震活动仍显示出其具有一定的现今活动性。综上，龙门山山前隐伏断裂倾 NW，具有较明显的晚第四纪活动性。该断裂为现今小震密集活动带，较大地震为 1787 年 12 月 13 日灌县附近的 4.7 级地震和 1993 年 12 月 30 日竹瓦铺北西的 4.4 级地震，近年来绵竹附近 1999 年 9 月 14 日 4.8 级和 1999 年 11 月 30 日 4.7 级地震均表明该断裂现今仍具有一定的活动性。

（1）茂汶—汶川断裂

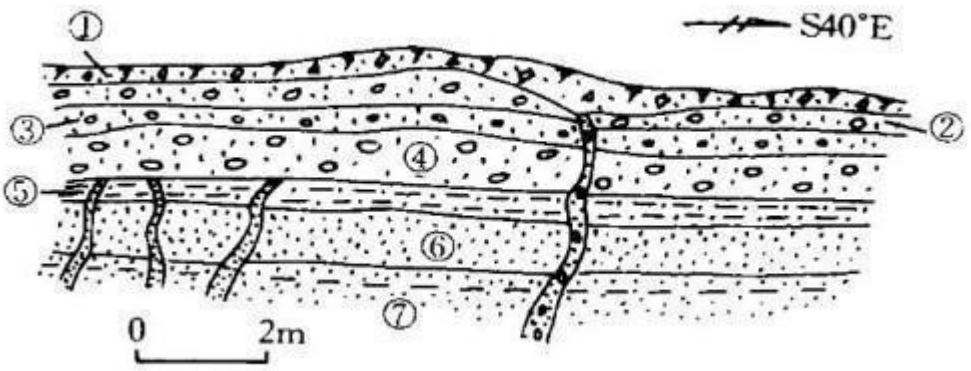


图 2.4-2　汶川姜维城III级河流阶地中的古地震砂脉

①灰黄色坡洪积砂砾石；②褐灰色砂夹次棱角状砾石； ③粗砂；④褐灰色砂砾石；⑤黄褐色细—粉砂；⑥土黄色细砂；⑦青灰色细—粉砂

茂县县城附近已有茂汶—汶川断裂断错岷江III级河流阶地的报道（She Fa Chen 等，1994），估计的断裂平均垂直滑动速率为 0.84mm/a（周荣军等，2003）。在汶川县城岷江南岸的姜维城，高出现代河床 120m 的 V 级阶地上的冲洪积地层中发育有压扭性断层，断层走向 N30°E，倾向 SE，倾角 70°，与主干断裂组成“入”字型构造，指示断裂的右旋错动性质（四川省地质局，四川省地震局地质编图组，1980）。另在姜维城相当于III级河流阶地高程的冲洪积砾石层中发育一组（共 4 条）砂脉，砂脉一般宽 0.5～1cm，最宽可达 3～5cm，有可能是两次古地震事件（图 2.4-2）。此外，在高坎和金波寺等地亦可见到断裂逆冲—右旋断

错冲沟、山脊等断错地貌现象。该断裂于汶川附近发生过 1657 年 6½级地震及多次中强地震。因此，该断裂为晚更新世-全新世活动断裂。

（2）北川—映秀断裂

该断裂在龙门山构造带几条主干断裂中活动构造地貌保存最为完好，表明了是一条活动性较强的断裂。北川县城附近的盖头山新隆起处于该断裂的左阶羽列区，可能是北川-映秀断裂的右旋错动在该羽列区所导致的地貌效应，并发育有两条 NE 向正断层业已错切至近地表，错切了 14C 年龄值为 13810±260a 的地层（图 2.4-3）。在绵竹清平、彭县白水河及映秀附近，断错地貌表现尤为清晰，河流阶地及冲沟均显示出北西盘上冲，同时具有右旋错动分量。白水河附近的胥家沟一带，北川-映秀断裂在航片上呈现出较好的线性影象特征，斜切山体边坡，形成比较典型的坡中槽地貌。

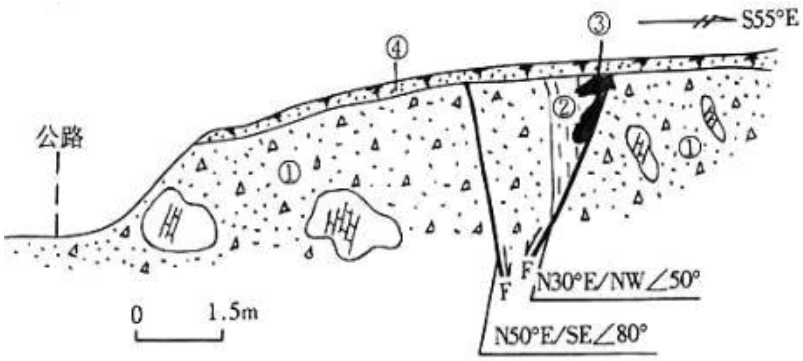


图 2.4-3　擂鼓北盖头山新断层剖面

①褐红色粘土夹灰岩碎块；②土黄色粘土；③黑色粘土夹泥炭；④现代腐殖土层；▲：测龄样品位置

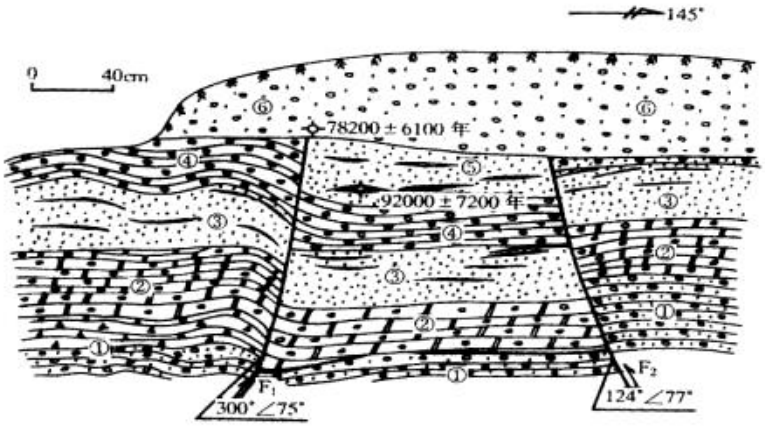


图 2.4-4　宝兴五龙北川-映秀断裂剖面图（据杨晓平等，1999）

①黑灰色粗砂角砾；②细砂夹砾石层；③细砂夹细砾石，内夹数条粘土带；④灰黄色角砾石层；⑤粗砂夹细砂、粘土条带；⑥亚粘土夹角砾层

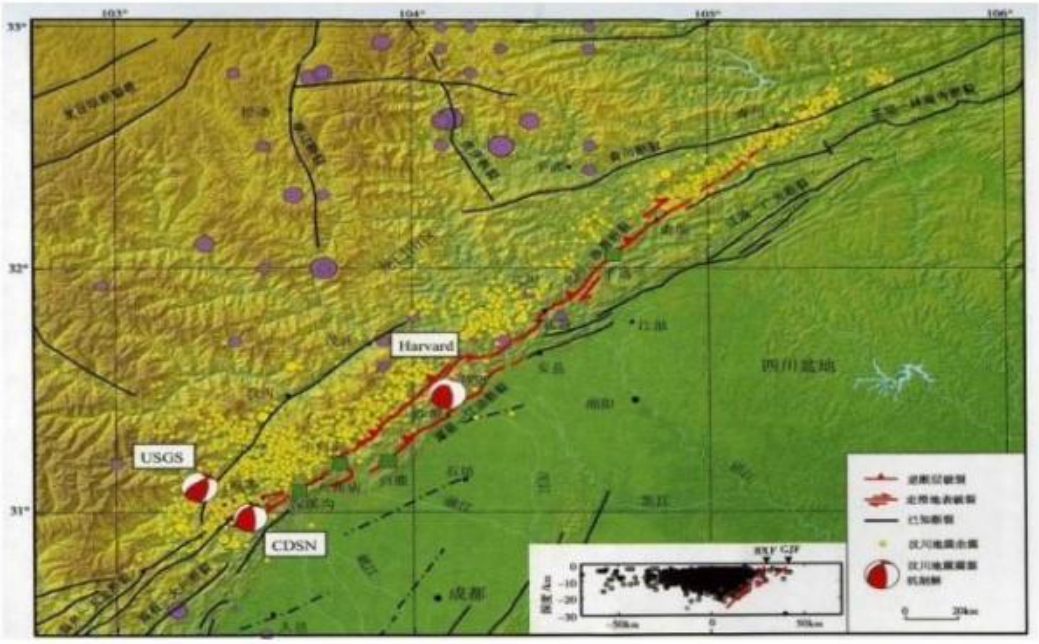


图 2.4-5　汶川地震区地震构造与地震分布图（徐锡伟等，2008）

（震源机制解来自中国地震台网中心、USGS 和 Havard）

北川-映秀断裂将该冲沟侧缘陡壁右旋位错了 20～30m，据此估计该断裂的平均水平滑动速率应在 0.82～1.3mm/a 之间。映秀附近也有该断裂右旋断错冲沟及垂直断错岷江河流阶地的现象（中国地震局地壳应力研究所，2001）。因此，北川-映秀断裂北川-映秀段应具有全新世活动性，而南西段仅错切了晚更新世沉积物（图 2.4-4）（杨晓平等，1999），为晚更新世活动段。历史上该断裂的中强地震主要丛集在北川一带，最大历史地震为 1958 年北川 6.2 级地震。2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震的地表破裂裂从映秀南西开始，北川-映秀断裂的

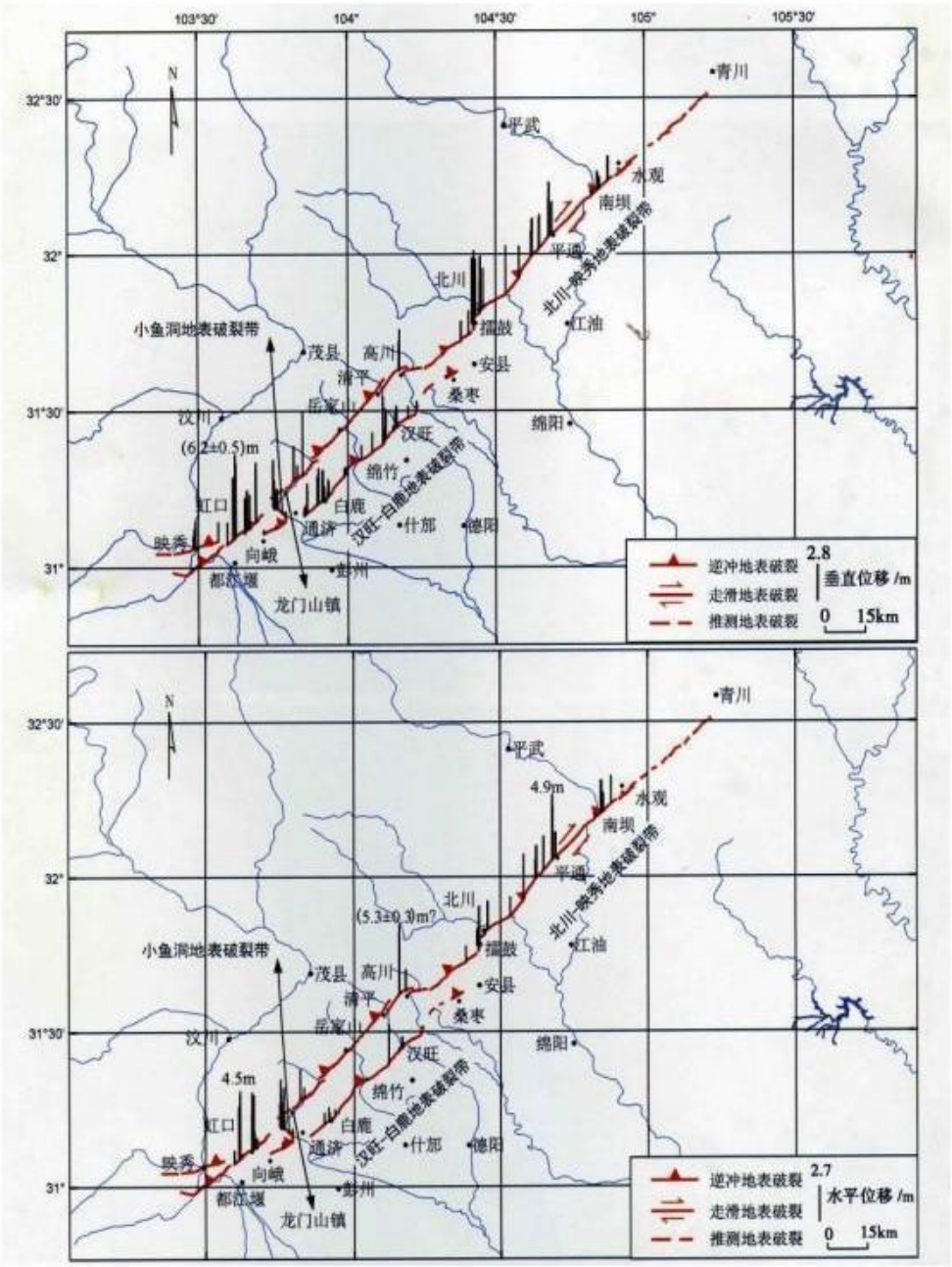


图 2.4-6　5.12 汶川地震地表破裂带及其同震位移分布图（徐锡伟等，2008）
上图为同震垂直位移分布图；下图为同震右旋走滑位移分布图

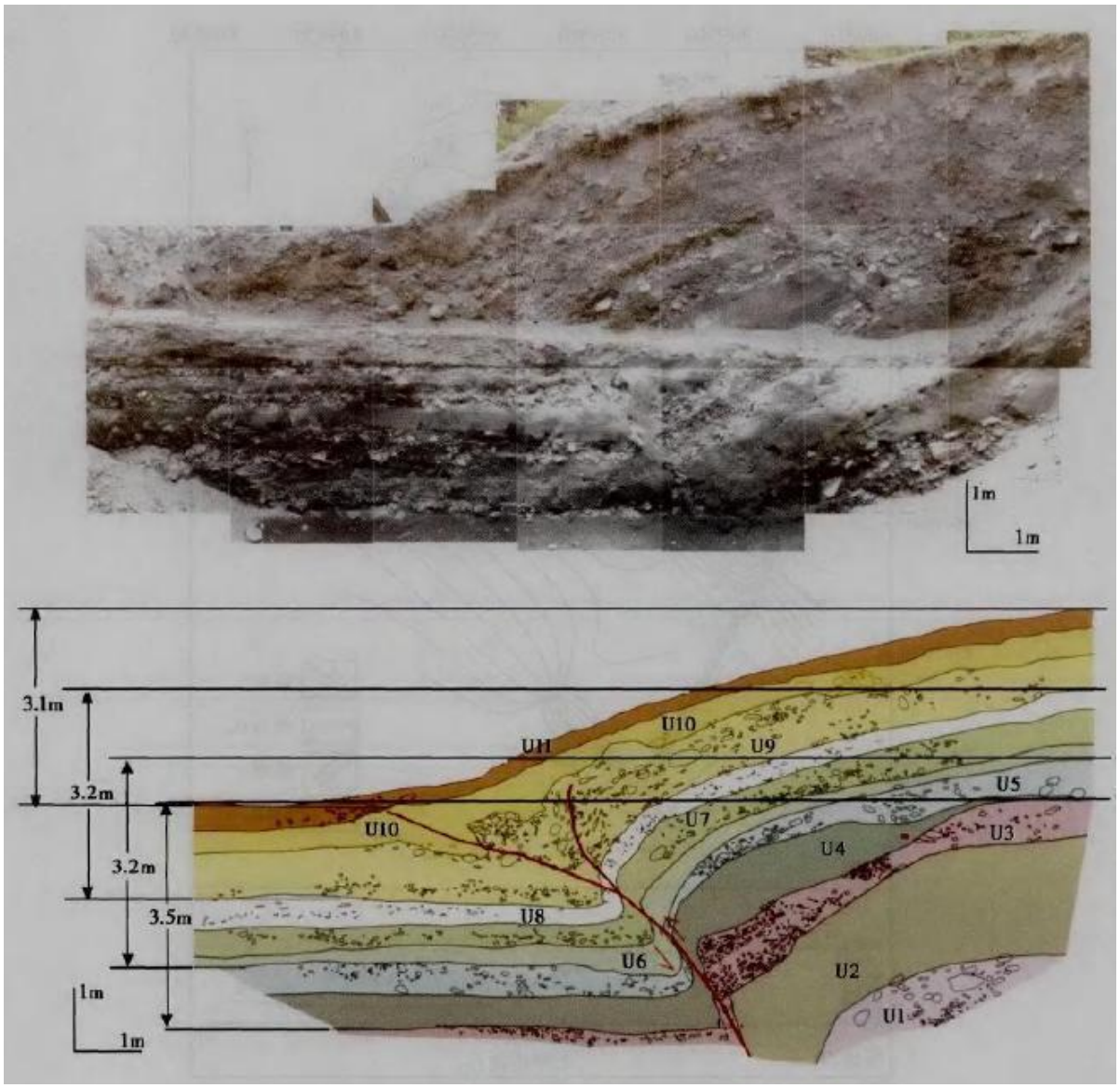


图 2.4-7 平通木耳地探槽南壁影像和解释图（冉勇康等，2012）

北中段全部破裂贯通，茶坝-林庵寺断裂的南西段也发生了地表破裂，其中北川-映秀断裂地表破裂长度达 240km，其地表破裂带分布特征见图 2.4-5、图 2.4-6（徐锡伟等，2008），现已发现的垂直同震位错最大值位于北川曲山镇附近，垂直位错达 10m 左右，水平同震位错最大值位于虹口附近，水平位错量为 5.85m。平武县平通镇附近的水平位错量约为 4.9m（图 2.4-7）（冉勇康等，2012）。

现已发现的同震位错最大值位于北川附近，垂直位错量约为 8.6±0.5m 左右，古地震研究显示，该断裂上一次同级别地震发生在 2300a～3300a 之间（Ran et al., 2010），推断该断裂上的地震复发周期在 3000～4000a 左右（Ran et al., 2010；Shen et al., 2009）。

（3）彭县—灌县断裂

在彭县老君山附近，一系列山脊被断裂同步右旋位错了 10～20m。彭县菩萨岗— 代明寺一带，彭县—灌县断裂将两条冲沟同步右旋位错了 75m 和 120m，并在断层陡坎下方形成有断塞塘，可见到晚更新世早期洪积物（顶面ESR年龄 值为 96000±7300a）逆冲于晚更新世晚期湖沼相粘土（TL 测龄值为 14300±1100a）之上（图 2.4-8），断面附近松散物中颗粒有定向现象。根据断错开始的相应时间估计，断裂的平均水平滑动速率为 0.78～1.25mm/a，均值为 1mm/a。大邑双河一带，邓起东等（1995） 亦报道了主干断裂新活动所形成的边坡脊与断塞塘，野外工作中还发现有右旋位错冲沟的现象，估计的断层平均水平滑动速率在 0.9mm/a 左右。在都江堰附近，该断裂将岷江III级阶地垂直位错了 12m 左右，I、II级阶地可能也存在位错现象，估计该断裂的垂滑动速率约为 0.2mm/a（中国地震局地壳应力研究所，2001）。有史料记载以来，该断裂上发生过 1327 年天全≥6 级地震和 1970 年大邑 6.2 级地震。

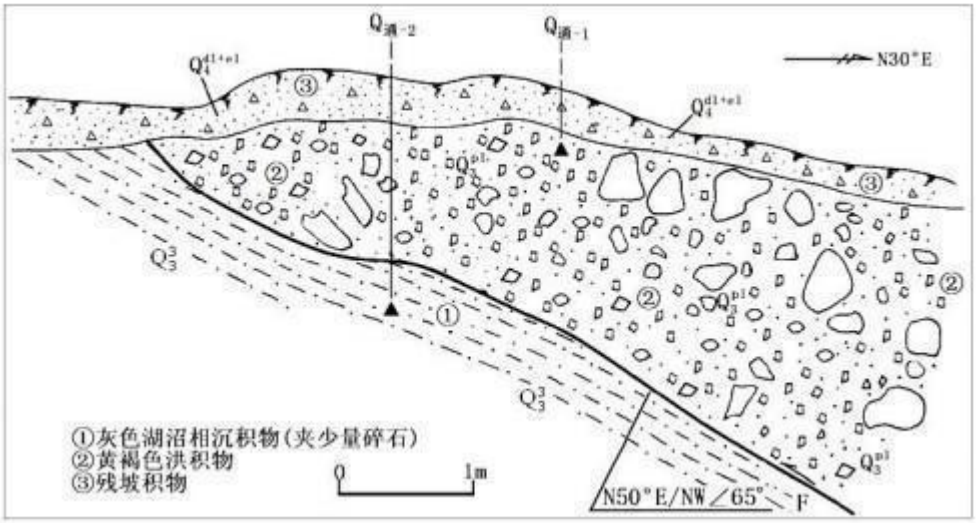


图 2.4-8　菩萨堂东南侧第四纪断层剖面

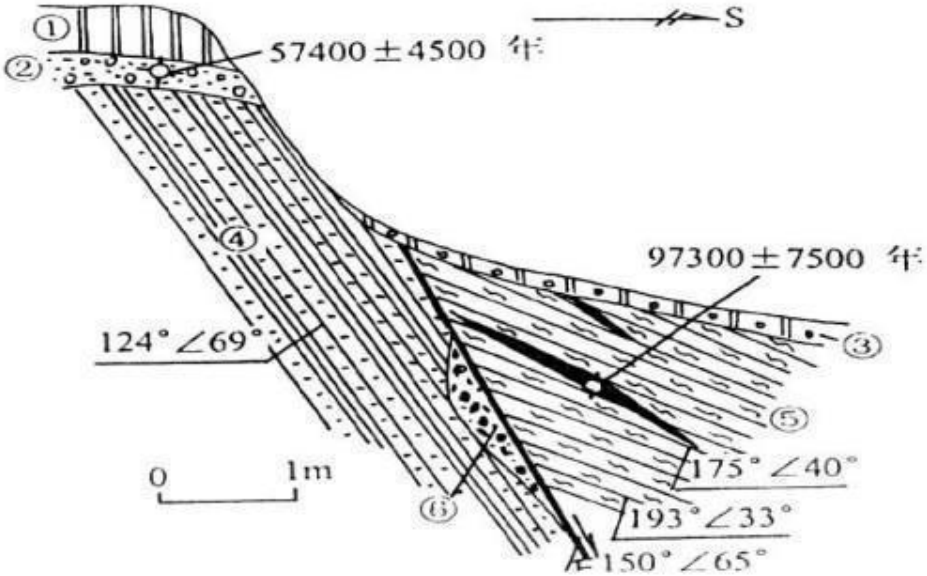


图 2.4-9　宝兴灵关附近彭县—灌县断裂剖面图(据杨晓平等,1999)

①灰黄色粘土；②中砂夹砾石层；③耕作土层；④粉砂夹粘土层；⑤铅灰色淤泥夹粉砂透镜体； ⑥铅灰色淤泥，小砾石夹炭屑

2008 年 5 月 12 日 汶川 8.0 级大地震时，彭县—灌县断裂的向峨—桑枣段亦同时发生了破裂，同震位错以垂直位错为主，并具一定的右旋错动分量，现已发现的最大垂直位错在 3m 左右，总长度近 90km。该断裂南西段还发现了切错晚更新世沉积物现象（杨晓平，1999）（图 2.4-9）

2013 年雅安芦山 7.0 级地震：2013 年 4 月 20 日在南西段发生了雅安芦山 7.0 级地震，根据震后应急科考结果（中国地震局，2013），这次震区没有发现典型意义的地震地表破裂带，推断应属于盲断层型地震，其主要证据如下：

①地震余震条带平面、剖面展布特征

根据中国地震局地球物理研究所房房立华等使用双差定位方法对余震序列重新定位结果可知，202 个余震主要集中在双石—大川断裂两侧呈 NE 向线性分布（图 2.4-10），震源深度优势分布在地下 10-20km（图 2.4-11），横跨余震 NE 向密集带的 NW 向剖面图显示，余震在 20-15km 范围内出现一个缓倾角密集带，与震源机制解给出的 35 度左右的发震断层一致。

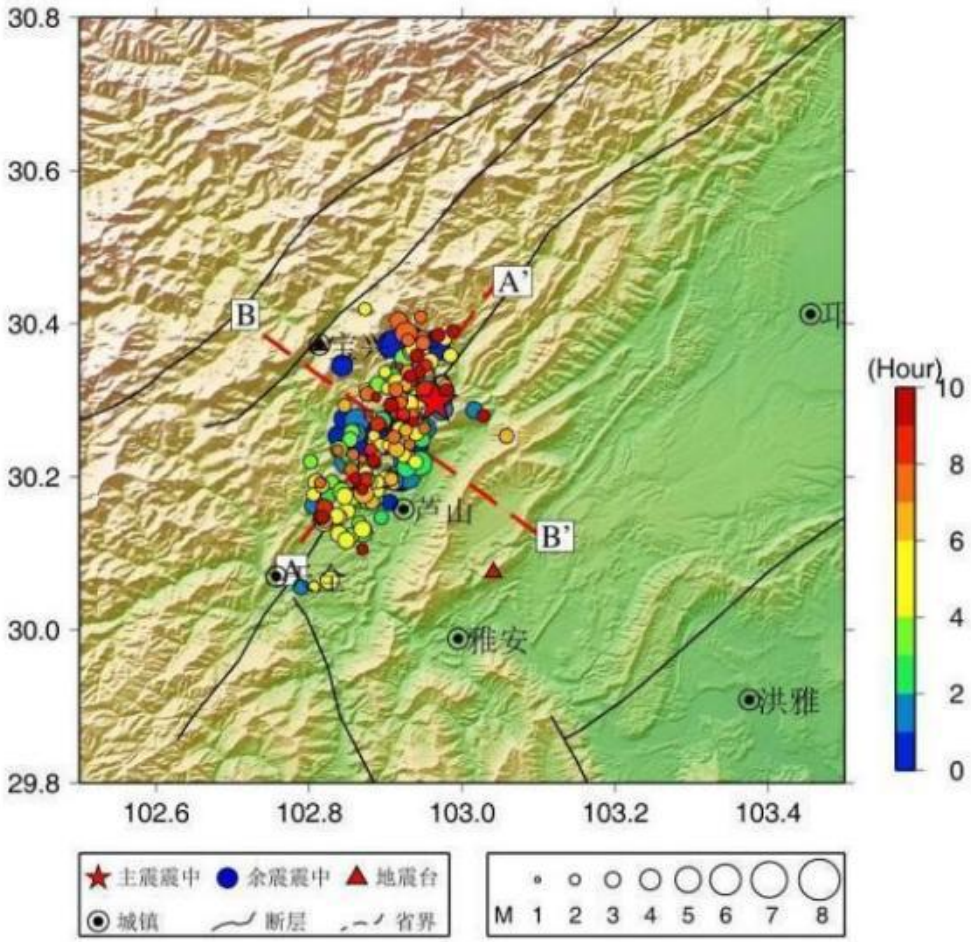


图 2.4-10　重定位后的地震余震震中分布图（据房立华等，2013）

圆点表示余震震中，圆点大小与震级成正比，不同圆点的颜色随时间(小时)增加由蓝变红。红色五角星表示 M7.0 地震的震中。

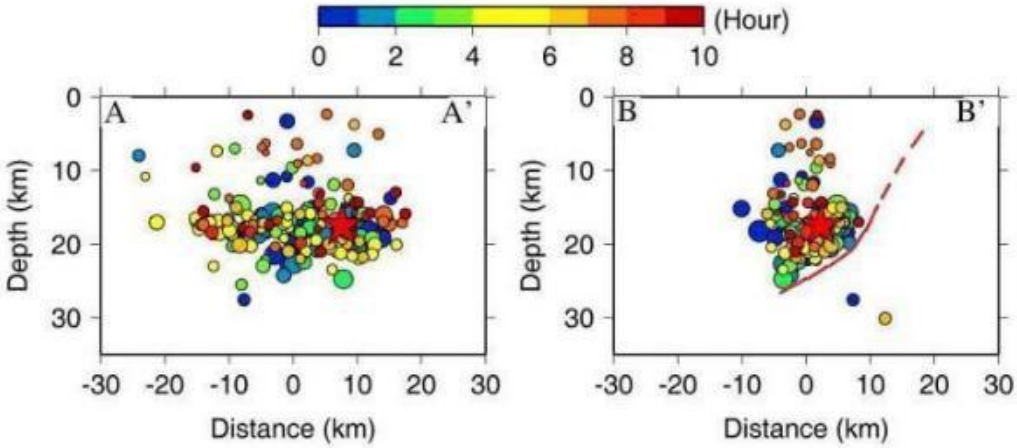


图 2.4-11　震源深度分布剖面 AA'（左）和 BB'剖面（右）（据房立华等，2013）

②震区石油物探剖面

本项目收集穿越震区的石油物探剖面，（图 2.4-12），从图中可见，震中区的龙门山构造带南段是由一系列 NW 倾向的断层组成的叠瓦状逆冲断层等，地

表至地下 5-6Km 深度范围内的断层面倾角在 30-40°左右，主要由大川—双石断裂、新开店断裂和蒙泉院断裂三条主干断裂组成，且已断至地表，另发育一些规模不大的盲冲断层。

通过上述资料综合分析，结合震源机制解结果本次地震属逆断层型地震，系龙门山断裂带前山断裂由 NW 向 SE 方向的逆冲作用所致。

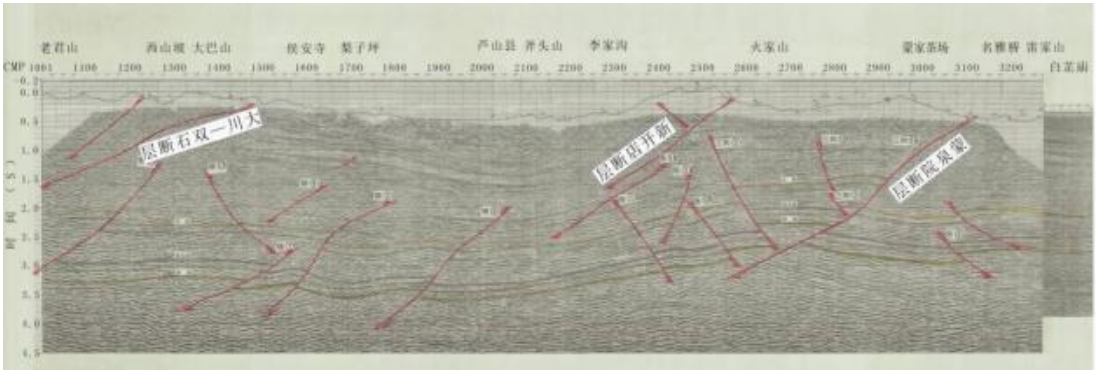


图 2.4-12　芦山震区石油物探剖面

2.4.3 洛水-都江堰断裂

洛水-都江堰断裂位于龙门山与成都平原分界地带，在卫星影像上洛水-都江堰断裂 线性特征非常明显，走向北东，北端起自绵竹县西北部山前遵道场，向西南经什邡洛水、彭州关口、桂花场、都江堰鑫玉大道，南至怀远镇，更南可能与发育在白垩系与侏罗系之间 SSW 向断续延伸，为一条晚更新世以来的活动断层，垂直滑动速率大于 0.36mm/a（任俊杰等，2012）。

2.4.4 龙门山山前断裂

该断裂由数条次级断裂羽列而成。在成都断陷区内，主要由大邑断裂、彭州断裂和洛水—断裂组成，均为隐伏断裂性质，控制了成都断陷的北西边界。

大邑断裂断裂北起大邑，向南西方向延伸经邛崃，沿蒙山东麓延伸至名山南消失，北段走向 60°-70°，南段走向 25°-35°，全长约 100km，在成都范围内，断裂南起西江村北，经敦义、大邑、银屏、东关、龙黄堰等地，全长约 30km。

大邑断裂西北盘大面积出露中生界的白垩纪地层，零星分布有古近系和新近系，地貌上构成低山。大邑县城东北坟山沟—龙凤场地质剖面图显示，从 NW 向 SE，白垩系由向 NW 缓倾逐渐转变为向 SE 缓倾，总体上呈平缓褶皱形态。其中 NW 大部分段落地层倾角都很缓，仅 7°-9°，越向 SE，地层倾角越大，由 13°逐渐增大到 54°。剖面的这种形态反映东南边缘之下应存在隐伏断裂（盲断裂）(Yeats，1986)，从褶皱形态分析，断裂应倾向 NW。此外，在断裂的西北盘，沿

河流普遍发育多级阶地，而在东南盘沿河流仅有一级阶地，反映中更新世以来大邑断裂活动使西北盘抬升，东南盘下降。根据《成都市活动断层初查与鉴定（I期）技术报告》和《成都市地震活断层普查详勘》成果资料，通过地球物理勘探、石油地质剖面资料等手段确定了大邑断裂的走向，通过钻孔联合地质剖面确定了大邑断裂断错晚更新断层，未断错全新世地层，为一条晚更新世活动断层。

彭州断裂展布于近场区的北西侧，属数条龙门山山前隐伏断裂之一，主要隐伏于第四纪沉积物之下，控制了成都平原第四纪崇州—温江—郫县凹陷的北部边界。断裂自西南徐渡起，经玉石乡、城灌路、唐场镇、彭州石化路，北至师古镇，长度约 50km，断裂走向 N55～60 E，倾 NW，为一逆断层。根据《成都市活动断层初查与鉴定（I期）技术报告》和《成都市地震活断层普查详勘》成果资料，该断裂为晚更新世断裂。

洛水—都江堰断裂位于龙门山与成都平原分界地带，为龙门山构造带的组成部分。北东端起自绵竹县西北部山前遵道场，向西南延伸经什邡洛水、彭州关口（现为丹景山镇）、桂花场、都江堰鑫玉大道，至玉堂镇附近消失，长度约为 70km。主要发育在侏罗系莲花口组（J3l）地层中，呈单条断层形式展布。由于洛水—都江堰断裂大部分隐伏在第四系之下，根据《成都市活动断层初查与鉴定（I期）技术报告》和《成都市地震活断层普查详勘》成果资料，通过地球物理勘探、探槽开挖、钻孔布设等手段确定了洛水都江堰断裂的走向，同时洛水—都江堰断裂为一条全新世活动断裂，断裂垂直滑动速率约 0.36mm/a，距离现今最近的地震事件发生在 1500a 左右。

2.4.5 蒲江—新津断裂

作为成都断陷的南东边界，该断裂系成都平原内部的一条重要活动断裂。断裂南西端始于蒲江以南，向北东经新津、双流、成都直达新都，全长约 130km。断裂走向 N30～40 E，倾向南东，倾角不定，为逆断层性质。综合研究结果表明，该断裂具有一定的晚第四纪活动性，且表现出明显的不连续性和分段的特点。新津以北，随着熊坡背斜的向北倾没以及横向断裂的影响，该断裂随之潜入成都平原。

据四川省石油管理局地质勘探开发研究院（1978、1998）的资料，横跨蒲江—新津断裂的人工地震勘探结果表明，该断裂具有与背斜构造共生的特点，断裂常发生于 背斜的轴部或陡翼。断距在地表或近地表最大，向下则迅速锐减，断

层倾角在地表或近地表较陡，向下则逐渐变得平缓，最后连同背斜构造一起消失于某一深度的滑脱面之上（图 2.4-13、图 2.4-14）。

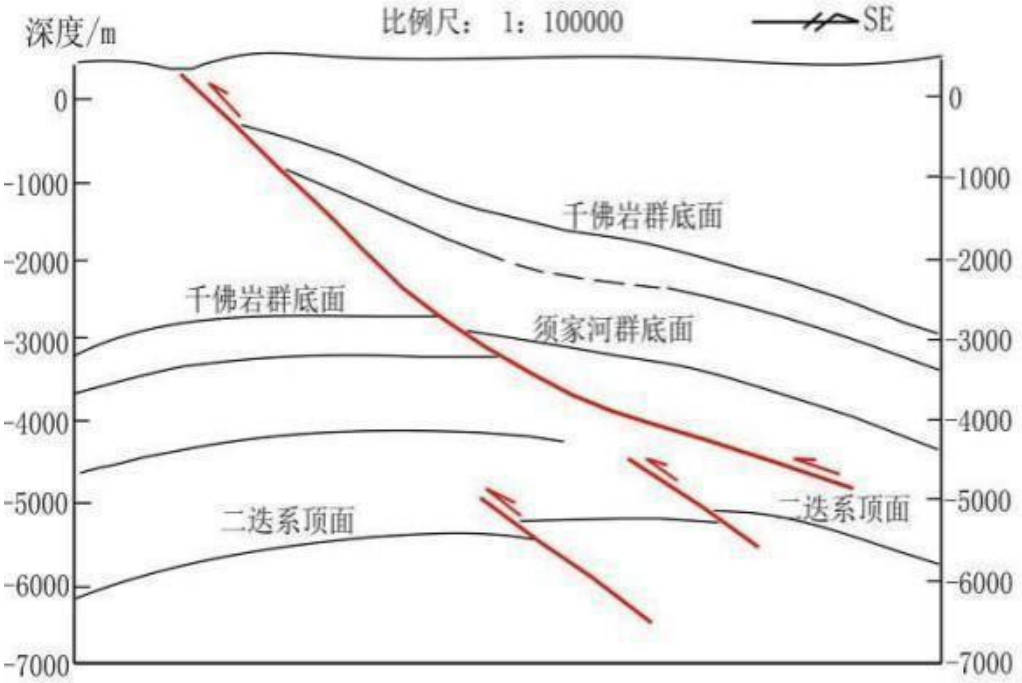


图 2.4-13　蒲江以北寿安场一带地震 3335 测线（据四川省石油管理局地质勘探开发研究院资料，1978）

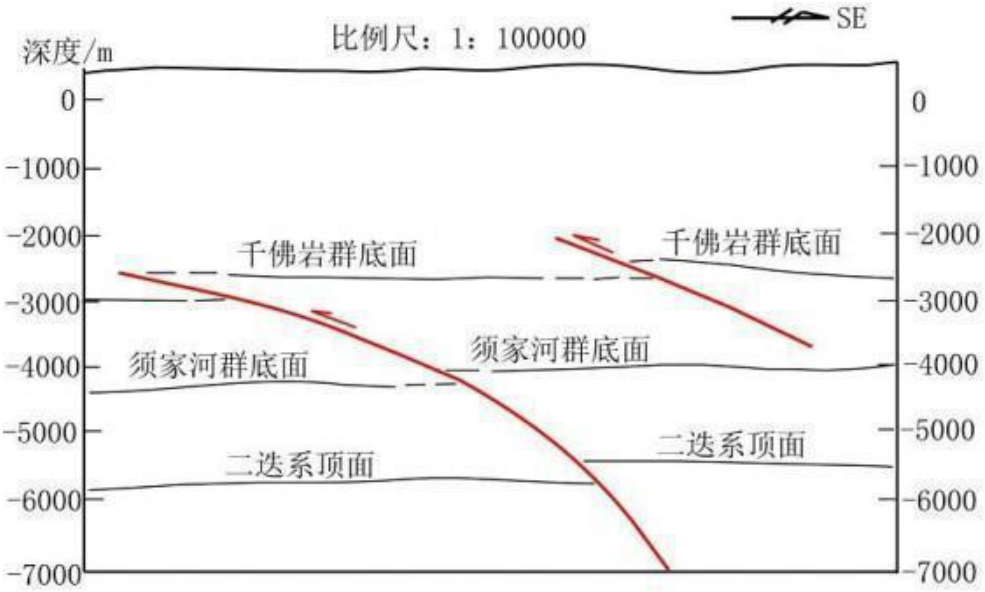


图 2.4-14　双流王家场附近地震 70 测线剖面图（据四川省石油管理局地质勘探开发研究院资料，1978）

据人工地震勘探资料，蒲江—新津断裂新津以南段连续性较好，断距较大，可达 3300m 左右，断裂切割深度约 7km；新津以北断裂呈断续状分布，断距较小一般在数十米—百米之间，切割深度仅 2～3km，最深可达 4.5km，最浅仅 1km

左右。导致这一现象的原因不仅是可能存在的横向断裂的影响，从晚新生代以来的块体运移规律来分析，更可能与四川盆地的顺时针旋转运动有关，这也为古地磁资料所证实（Raschbacher 等，1996）。

在蒲江县城南东黄土坡，见侏罗系红色粉砂质泥岩逆冲于中、下更新统蒲江组砂 卵石层之上（图 2.4-15），侏罗系红色粉砂质泥岩产状 35°/305°∠75°，断层产状 35°/125°∠70°，逆断层性质

从以上断层剖面来看，蒲江—新津断裂断错了中、上更新统地层，说明蒲江-新津断裂具有较明显的晚第四纪活动性。

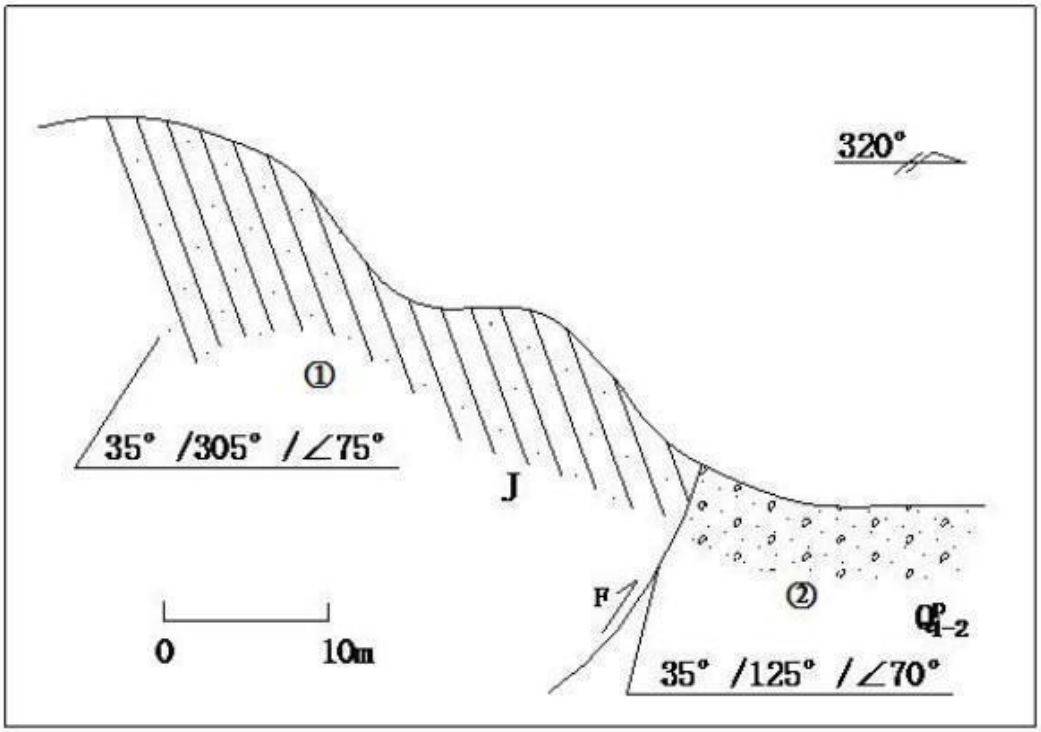


图 2.4-15　蒲江县城南东黄土坡蒲江—新津断裂剖面图

①侏罗系红色粉砂质泥岩；②中、下更新统蒲江组砂卵石层

2.4.6 龙泉山断裂带

龙泉山断裂带由东、西两条断裂组成，它们相向倾斜，分布在龙泉山背斜的东西两翼，呈北东向断续延伸，全长 200 多公里，单条断裂长数公里至数十公里。由于龙泉山断裂带的挤压逆冲性质，使龙泉山崛起成为成都平原的东部屏障。

龙泉山西坡断裂：是龙泉山断裂带的主要分支，主要由草山断层、龙泉驿断层和镇阳场断层组合而成，具逆断层性质。据地震勘探剖面，龙泉山西坡断裂由地表向深处断距逐渐减小，倾角变缓，最后消失于三叠系雷口坡组内。深部构造反映的褶皱形态表明，龙泉山背斜是受深部滑脱面控制的脱顶构造，龙泉山背斜

形成与龙泉山断裂有密切的成因联系。在中江黄家坳、洛带等处采集的多个断层泥物质的测年样品，经热释光测定结果在 297800±17400～95600±7600a（黄祖智、唐荣昌，1995），SEM 分析显示断裂在早更新世早期至晚更新世均有活动，表明龙泉山西坡断裂的主要活动时代应在中更新世至晚更新世，且具有蠕滑性质。与成都平原西侧的龙门山断裂带相比，龙泉山的抬升幅度低得多，对地貌和第四纪沉积的控制作用都不如龙门山断裂带强，其活动性远低于龙门山断裂，这可能是造成龙泉山西坡断裂的断层泥热释光年龄偏老的原因。

王伟涛等（2008）认为，在金堂附近，龙泉山断裂在通过沱江阶地时，对I、II级阶地没有产生影响，而使III级阶地形成了 1.65m 的高差。Wang et al.,（2017）通过对龙泉西坡断裂的地貌、地质剖面进行了研究，认为断裂存在全新世活动性。然而，这些地质、地貌证据在现场核实调查中，不同的专家存在较大认识分歧，同时证据过于单一，本报告认为目前的证据不足以支撑修改对龙泉山断裂的活动性认识。

以上资料表明龙泉山西坡断裂的局部地段具有一定的新活动性，在地貌上控制了龙泉山地与成都平原的分界，历史上曾发生过 5 级左右中强地震，为晚更新世弱活动断裂。

龙泉山东坡断裂：北起中江杰兴场，经金堂淮口、久隆、文公场、仁寿至童家场，全长约 160km 左右。出露于龙泉山大背斜之东翼，由合兴场断层、红花塘断层、久隆场断层、尖尖山断层、马鞍山断层、文公场断层、仁寿断层组成。这些断层的性质相同，规模大致相当，在平面上呈斜列式展布，总体走向呈 N10º～35º E 方向延伸，倾向与龙泉山西坡断裂相反。

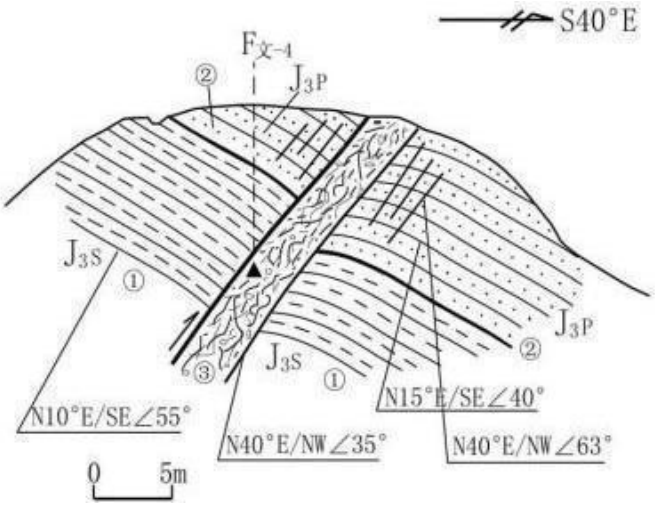


图 2.4-16　简阳县丹景乡新场文家沟龙泉山东坡断裂剖面

①侏罗系上统遂宁组（J3s）粘土岩；②侏罗系上统蓬莱镇组（J3p）砂岩；③破碎带；▲：测龄样品采集位置

在简阳县丹景乡新场文家沟东侧山坡上，见该断裂露头（图 2.4-16），断层断于侏罗系上统遂宁组（J3s）粘土岩与侏罗系上统蓬莱镇组（J3p）砂岩中，断层产状 N40 E/NW∠35 ，破碎带宽约 3m，主要由挤压劈理、角砾岩、碎裂岩等组成，压性特征明显，靠近断层蓬莱镇组砂岩地层节理发育，产状与断层产状基本一致，取破碎带内碎裂岩样品，经 ESR 法测龄，年龄值为 730000±70000a。

以上资料表明龙泉山断裂的新活动性不强，现场考察亦未见沿断裂带有断错地貌显示。因此，综合判定龙泉山东坡断裂为中更新世活动断裂。

2.4.7 鲜水河断裂

鲜水河断裂北西起于甘孜西北，向南东经炉霍、道孚、乾宁、康定、泸定磨西，至石棉新民以南活动形迹逐渐减弱，最终消失于石棉公益海附近。断裂走向在康定木格措以西为 N40～50° W，过木格措后断裂走向向南逐渐偏转呈 N20～30° W，全长约 400km，区内主要展布的是鲜水河断裂南东段，长度约为 350km。

综合鲜水河断裂带几何展布、历史地震破裂、地震活动、深部结构、断层滑动速率、古地震、强震复发特征以及最晚一次地震的离逝时间等资料，对鲜水河断裂带进行破裂分段，总共分为 8 个段落，分别为炉霍段、道孚段、乾宁段、雅拉河段、色拉 哈段、折多塘段、雪门坎段和磨西段（图 2.4-17）（安艳芬，2010）。

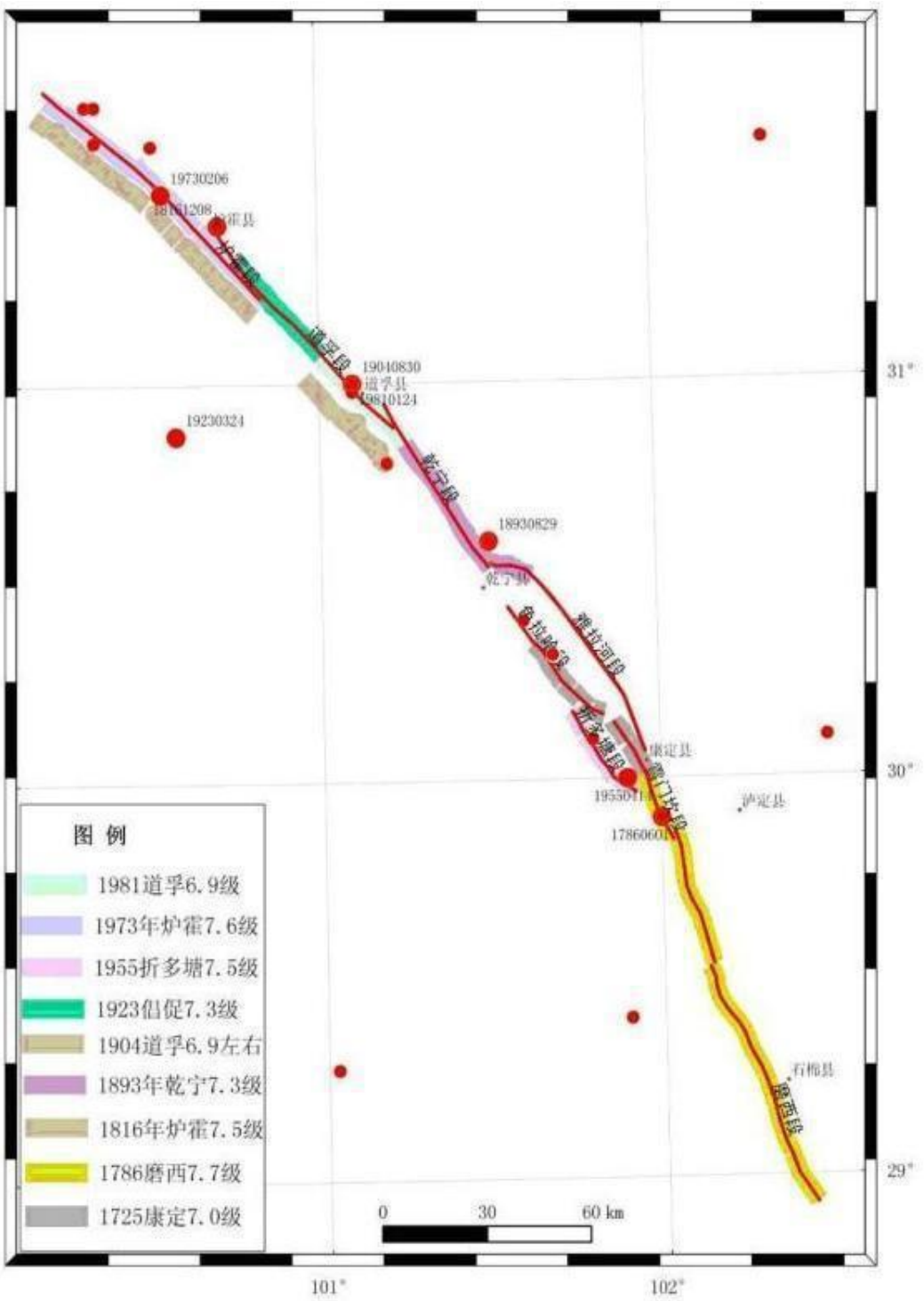


图 2.4-17　鲜水河断裂带历史地震分布图（安艳芬, 2010）

根据梁明剑等人 2020 年在雅拉措(北海子)北侧 T_2 台地上的地表破裂形成的浅槽边上的顶部开挖一剖面（图 2.4-18），剖面揭露了 2 套地层：①深褐色含砾砂土层，富含植物根系和有机质；②略泛黄色的砾石层，砾石磨圆差，呈棱角状。同时，分别于地层①上部和底部取了 2 个 ^{14}C 样品(炭屑)YLGC3 和 YLGC6，其测年结果分别为 1717—1784cal AD 和 1669—1780cal AD。地震破裂带切过 T_2 台

地面，现在仍可清晰地辨识出台地面上地表破裂形成的反向浅槽，表明 T_2 台地面顶部的砂土层堆积之后发生过地震，因此地震应发生于地表砂土层沉积之后，即 1669—1780cal AD 之后。

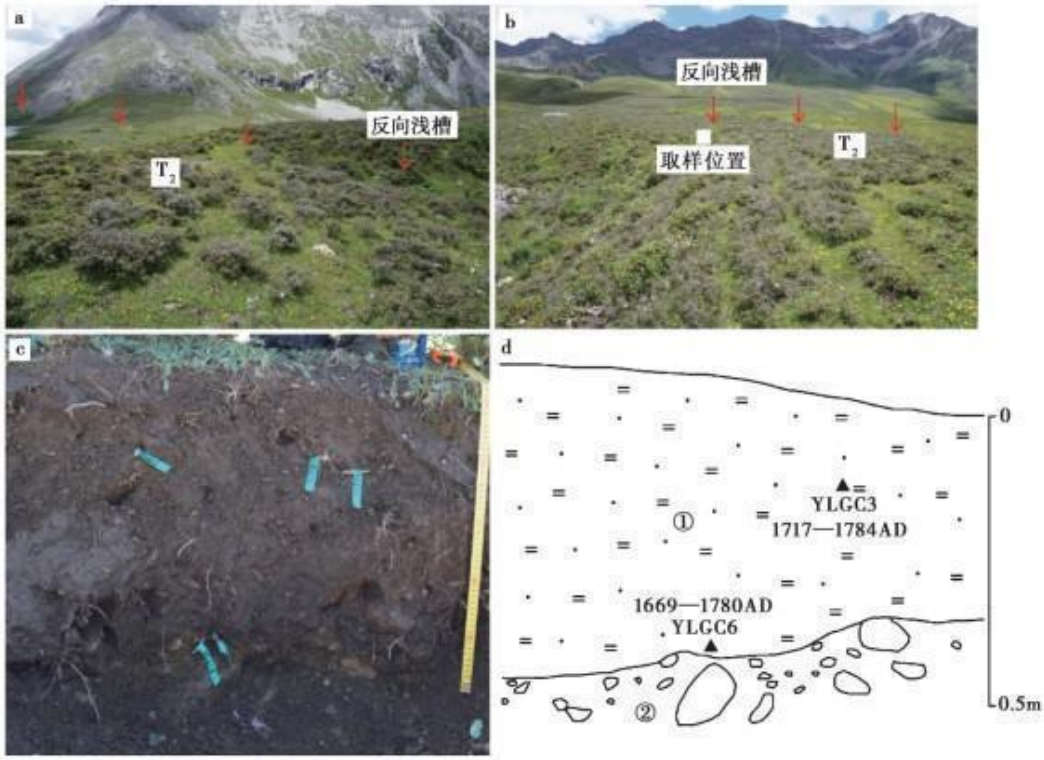


图 2.4-18　雅拉措 T2 台地破裂带残留的浅槽及取样剖面 (梁明剑,2020)

a、b 破裂带在 T_2 台地面上形成反向浅槽；c、d 取样剖面。

地层:①深褐色砂土层；②略泛黄色砾石层。年代样品由美国 Beta 实验室测定，结果经校正

晚新生代以来，鲜水河断裂表现出强烈的左旋走滑运动，是松潘—甘孜造山带内部一条大型走滑断裂，横切了松潘—甘孜造山带的主体，系造山运动后期陆内变形的产物(许志琴等，1992)，晚新生代以来的位移总规模在 60km 左右(Wang E.等，1998)。 综合研究结果表明，鲜水河断裂全新世以来的活动以惠远寺拉分盆地为界可分为两段：北西段长约 200km，由一条单一的主干断裂组成，平均水平滑动速率在 10～15mm/a 之间(钱洪等，1988；闻学泽等，1989；Allen 等，1991)；南东段结构比较复杂，乾宁 —康定段由三条次级断层近于平行展布而成，单条断裂的滑动速率<10mm/a，但三条断层滑动速率之和在 10mm/a 左右(Zhou R.等，2000；周荣军等，2001)，康定以南断层又呈一条单一的主干断层延伸，滑动速率值亦在 9～10mm/a 左右（Zhou R.等，2000；闻学泽等，2001）。有史料记载

以来，鲜水河断裂共发生过 8 次 7 级以上地震和多次 6.0～6.9 级地震，显示出强烈的近代活动性。

前人沿鲜水河断裂各个断裂开展的古地震工作显示，断裂带大地震活动行为并不遵循周期性或者准周期性，主要遵循丛集行为，甚至出现类似脉冲式的应变加速释放的特征（梁明剑，2019）。史料记载以来，鲜水河断裂共发生过 8 次 7 级以上地震和多次 6.0～6.9 级地震，显示出强烈的近代活动性。

因此，鲜水河断裂带为一条全新世活动断裂。

2.4.8 锦屏山构造带

该构造带包括了金河—箐河前缘冲断带，小金河主冲断带和玉农希后缘冲断带等，平面上呈向北东聚敛，南西撒开，弧顶向南东的帚状。该构造带主要形成于印支期，显示优势的由北向南推覆逆掩运动。新生代以来，锦屏山构造带仍然由北北西向南南东方向推覆，箐河冷山等地多处可见古生界逆冲于第三系之上（潘桂棠等，1990），在地貌上形成显著的地形反差。特别是持续的推挤作用致使金河—箐河冲断带前缘翘起，在重力作用下其后缘产生横向张裂下陷，形成盐源盆地，堆积了厚达 2000m 的老第三纪冲、洪积相—山麓相磨拉石建造，以及厚约数百米的新第三纪河湖—泥炭沼泽相含煤碎屑岩建造。研究结果表明，锦屏山—玉龙雪山构造带北侧块体大致在中新世发生了顺时针的扭动，导致北东向的断裂具有明显的左旋走滑运动特征，如北东向的丽江断裂在宁蒗天生桥附近左旋错断了冲沟与洪积扇（向宏发等，2000），形成北东向的地震密集条带。不仅如此，该构造带北侧块体的顺时针扭动还可能是安宁河、滇西北地区产生南北向纵向张裂的重要原因，1996 年丽江地震的震源机制解及地震地表 破裂均显示出南北向张性破裂的特点（苏有锦等，1997；张建国等，1997）。

《四川省活断层普查》项目凉山州活断层普查子项目凉山州（含攀枝花地区）1:25 万活动断层普查项目通过在锦屏山断裂东支的锦屏镇、巴甫村一带进行进行无人机测图，在锦屏镇获取了锦屏山断裂东支左旋滑动速率为 1.31~2.78mm/a，垂直滑动速率为 0.20~0.34mm/a。通过跨断层陡坎处开挖探槽，揭示了锦屏山断裂在洪积层中形成的逆冲断层以及地层变形特征裂在洪积层中形成的逆冲断层以及地层变形特征。根据地层的沉积特征、空间关系与构造变形，识别出了 2 次古地震事件（图 2.4-19(a)）。

巴甫村古地震结合年代结果，探槽北壁事件如下：

1）次新事件 E1 表现为断层 F3 的逆冲活动，时间发生在 27925-27680 cal BP 至 25564-25066 cal BP 之间。

2）最新事件 E2 表现为断层 F2 的逆冲活动，将近水平的淤泥层发生褶皱或变形，致使断层两侧该层倾角陡变，由 8~10°转变为 15~20°左右，受此事件影响的地层为 U5~U7，均发生了一致性的拱区变形，而 U9 地层并未受此事件影响（图 2.4-19(b)）。

因此，此事件发生在 10150-9736 cal BP 之后。

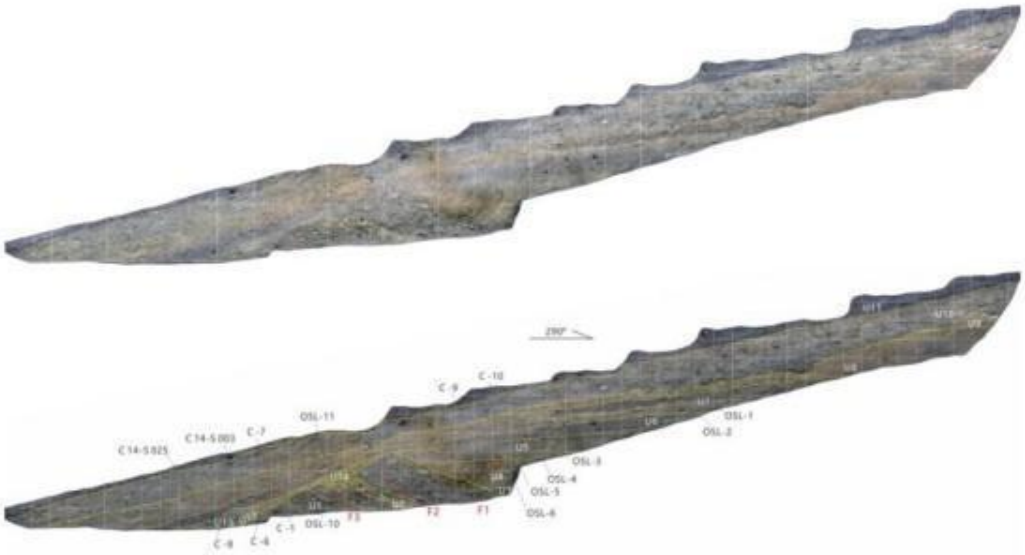


图 2.4-19a　巴甫村探槽南壁剖面（凉山州（含攀枝花地区）1:25 万活动断层普查项目 题专题 3 凉山州（含攀枝花地区）主要断裂平面分布及其活动性专题验收报告，2022）

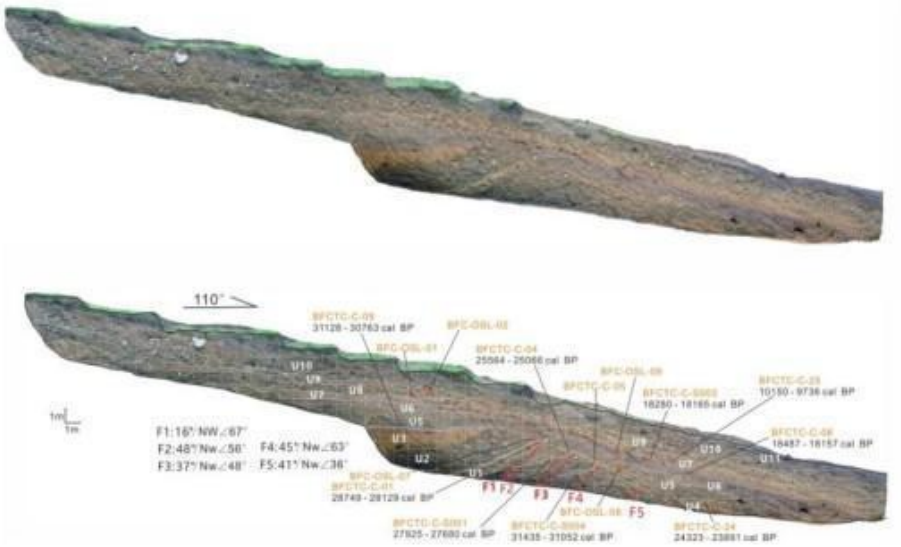


图 2.4-19b　巴甫村探槽北壁剖面及测年结果（凉山州（含攀枝花地区）1:25 万活动断层普查项目题 专题 3 凉山州（含攀枝花地区）主要断裂平面分布及其活动性专题验收报告，2022）

2.4.9 安宁河断裂带

安宁河断裂是一条以左旋走滑性质为主的全新世活动断裂，断裂北端起于石棉，向南经野鸡洞、紫马垮、冕宁、泸沽、德昌至会理一带消失，断裂总体走向近南北，全长约 375km。唐荣昌等（1993）结合古地震、地震地质、地震活动性等方面的研究成果，将安宁河断裂带以西昌和冕宁为界分为北、中、南三段。

北段（冕宁以北）大致包含石棉田湾至冕宁马尿河附近，长约 100km。该段具有复杂的断裂结构，有 3～4 条表现出比较明显的全新世活动性的分支断层组成。断错地貌在石棉田湾、紫马垮、野鸡洞等地表现最为醒目。闻学泽等（2000a，2000b，2008）通过探槽开挖认为该段至少存在 4 次全新世古地震事件，最新一次地震事件应为历史地震记录中 1480 年的越西地震，矩震级为 7.5±0.3 级。周荣军等（2001）认为该段滑动速率为为 4.7～5.3mm/a，最新一次地震事件应为历史地震记录中的 1327 年天全地震，震级大于等于 6 级；冉永康等（2008a，2008b）通过地质地貌调查与古地震研究，在安宁河断裂北段的紫马跨和野鸡洞揭示出 3 次古地震事件，分别为距今约 1634～1811a、1030～1050a和 280～550a，左旋位移量在 3m左右，复发间隔为 520～660a；同时认为大海子—干海子最新一次古地震事件为 1536 年西昌北 7½级地震，其它古地震事件分别发生在距今 1768～1826、2755～4108 和 4108～6593a，重复间隔为 1300～1900a，并获得了晚全新世以来的左旋位移速率为 6.2mm/a，垂直位移速率 1.4mm/a；断层水平和垂直位移速率的比例约为 4：1。该段 1913 年发生过 1 次小盐井 6.0 级地震。

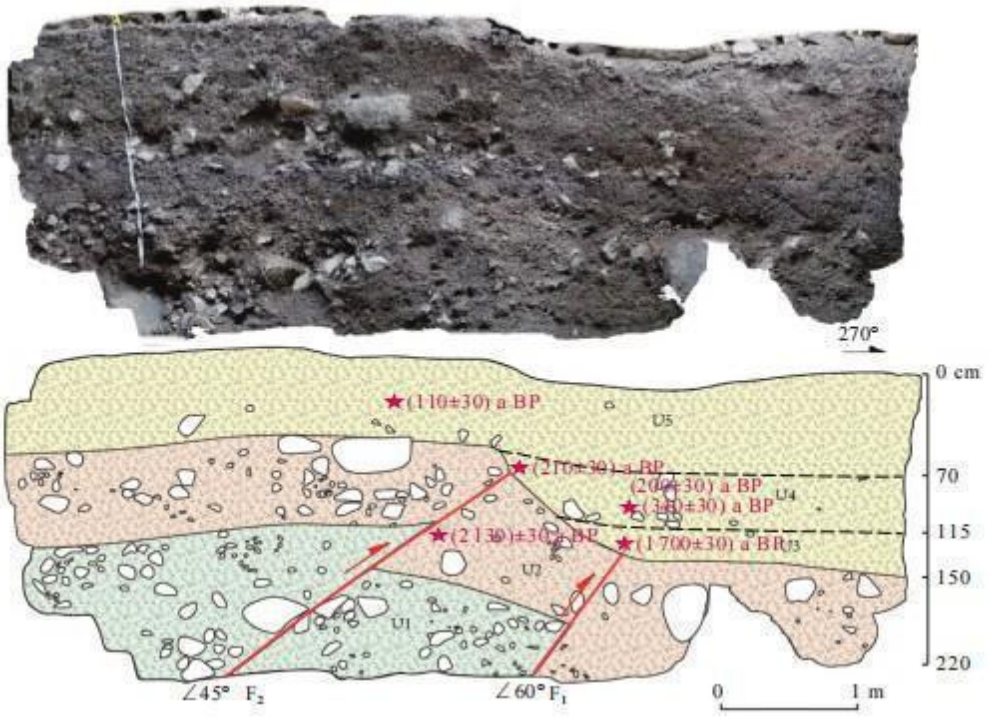


图 2.4-20　中村探槽南壁剖面（罗浩，2023）

U1 为碎石层，磨圆较差，部分碎石直径可达 10cm，夹有大块砾石，直径 30～50cm；U2 为粗砂层，上部覆盖 1 层砾石，磨圆一般，直径 5～10cm；U3 为深灰色粉砂层，底部可见粗砂，向上逐渐变细；U4 为粗砂层，底部含有直径 5～10cm 大砾石，砾石上侧存在 1 层黄褐色粗砂；U5 为深灰色粉砂层，偶尔可见砾石。

2023 年罗浩等人在中村 T1 阶地上垂直于断裂开挖了 1 个探槽）。探槽剖面如图 2.4-20 所示，探槽南壁共揭露 2 条断层，呈叠瓦式由东向西逆冲。断层由西向东依次命名为 F1 和 F2。在剖面上各地层界线较清晰，近水平。在断层下盘形成 2 组崩积楔，揭露了以下 2 次古地震事件。古地震事件Ⅰ：F1 断至 U3 层底部，U3 层仅存在剖面的西侧部分，为一次古地震事件的迅速沉积层。该层形成于事件Ⅰ之后，在 U2 层和 U3 层分别采集了年代学样品，U2 层样品年代为（2130±30）a BP ，为该事件活动的最大年龄，U2 层样品年代为（1700±30) a BP，为该事件活动的最小年龄。

中段（西昌—冕宁）长约 100km，断裂结构较北段简单，主要由两条分支断裂组成，该段断错地貌清晰，晚第四纪以来的左旋水平滑动速率为 5.5mm/a 左右（王新民等，1998）；何宏林等（2007）通过对断裂错断的阶地和冲沟的位错研究，获得了安宁河断裂中段晚更新世以来平均左旋走滑速率为 3～7mm/a；该段历史上发生过 1536 年西昌新华 7½级地震和 1952 年石龙 6.7 级地震；闻学泽等（2007）通过地质、地貌调查认为杨福山村以北及大坪子村以西的地表破裂均由 1536 年大地震产生，反映了 1536 年大地震断错了安宁河与则木河断裂带的过渡

段，而且可能到达了或者很接近于西昌。Wang et al.（2017）通过在安宁河断层南段探槽开挖，揭露了 5 次古地震事件，地震复发间隔差别较大，平均复发间隔约为 730～838a。

南段（西昌以南），断裂长约 175km，总体上，该段已无明显的晚第四纪活动性，断错地貌不发育，仅发现一些规模较小的断层和褶皱发育于Q1 的昔格达地层中（唐荣昌等，1993），现今地震活动较弱，无M≥4.7 级地震的记载。

2.4.10 黑水河断裂

黑水河—越西河断裂南段发育于菩萨梁子向斜西翼，由三条近平行、东倾的逆冲断层组成，断层倾角 45°至 80°，表现为东盘的寒武系—奥陶系—二叠系地层逆冲于西盘的侏罗系地层之上，地层错距达 2000m。尽管断裂下降盘没有发育第四纪盆地，但可能受断层逆冲活动影响，黑水河下游河段主河道坐落于断裂下降盘，沿断裂西侧自北向南展布。

越西河-黑水河断裂在影像上线性特征明显，野外调查表明越西河-黑水河断裂活动以逆冲活动为主，沿断裂保留断层陡坎、线性脊、冲沟位错等新构造活动遗迹。

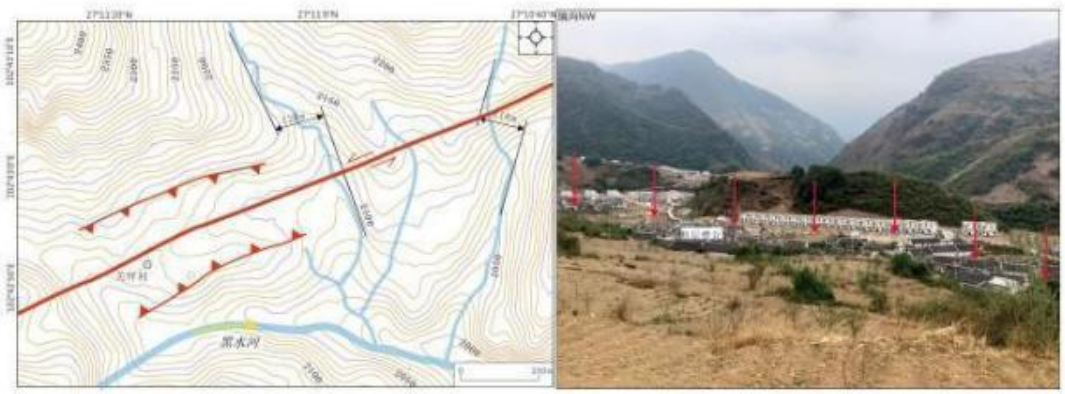


图 2.4-21　关坪村断错地貌及照片

在海子乡一带，断裂从黑水河东岸的海子村-关坪村-牛牛村一线通过，沿线可见断层陡坎、断层槽谷、断错山脊和水系，其中在关坪村一带最为显著。断裂从洪积台地上经过，造成多条冲沟左旋位错，位错量在 110-120m，断裂向北形成断层槽谷（图 2.4-21）。

在瓦洛乡一带，断裂主要从黑水河西岸的幸福堰村-布尔村-火山村一线经过，该段可见断层陡坎、断错水系和断层槽谷。在幸福堰村附近，黑水河在西岸保存两级地貌面T0、T1，一系列山前次级冲沟汇入主流，在山前形成洪积扇或

洪积台地。其中P1 洪积扇在时代上对应黑水河T2 阶地，P2 洪积台地在时代上对应黑水河T3 阶地。黑水河断裂从P1 洪积台地中部穿过，形成高 10～20m 的断层陡坎，延伸长度近 1.5km。冲沟横跨断裂发生左旋位错（图 2.4-22）。

综上地质剖面和地貌的表现，黑水河断裂在全新世有明显的活动特征，因此为全新世断裂。

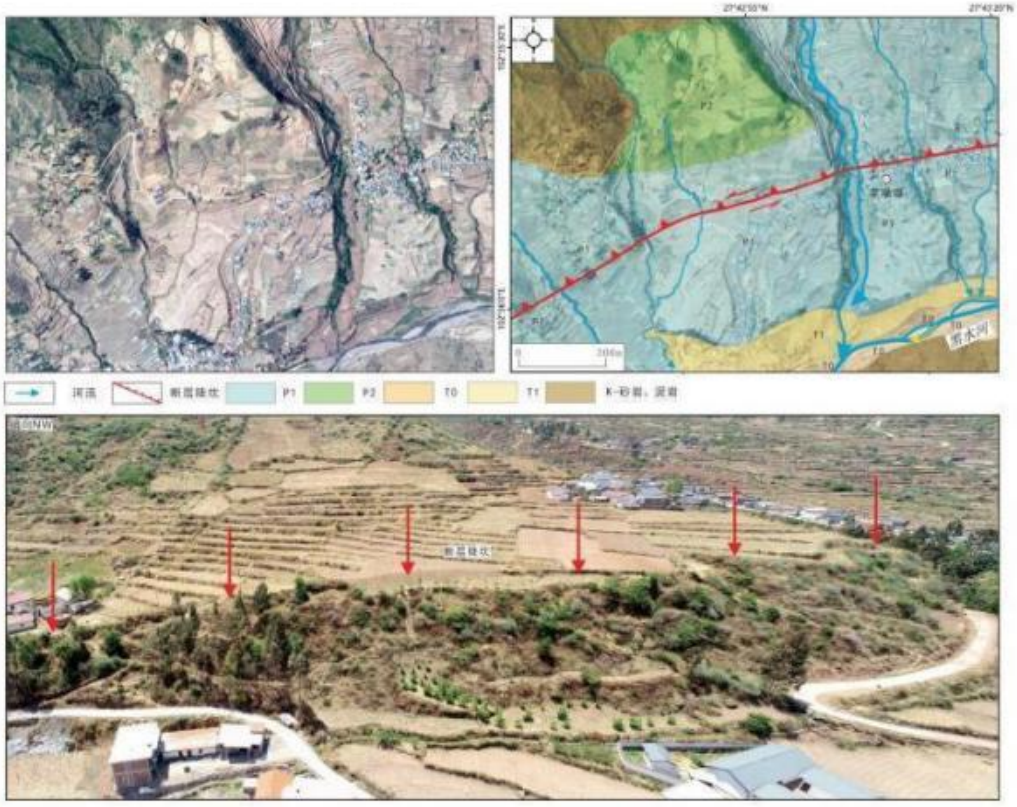


图 2.4-22　幸福堰村断错地貌卫星影像及解译图和典型断错地貌照片

2.4.11 大凉山断裂带

大凉山断裂（图 2.4-23）为竹马断裂、公益海断裂、越西断裂、普雄河断裂、布拖断裂及交际河断裂组成宽度约 15km的断裂构造带，结构上表现为雁列式和平行式的混合结构（何宏林等，2008；孙浩越等，2015）。断裂北起于四川石棉以北的安顺场一带，向南延伸过越西、普雄经昭觉、布拖至云南巧家与小江断裂带交汇，全长约 280km。

何宏林等（2008）通过遥感解译及地质调查认为大凉山断裂带为新生的断裂带，其在构造上起着安宁河断裂与小江断裂的截弯取直作用；魏占玉等（2012）通过对典型断错地貌的测量及地层年代约束得出大凉山南段的活动速率在 2.5～4.5mm/a；孙浩越等（2015）通过野外地质调查认为大凉山断裂北段全新世以来

的水平滑动速率为 1.5～3.1mm/a，并通过探槽开挖揭示出 2 次晚更新世古地震事件，分别发生在（50.3±0.7）～30ka BP和 30～（17.4±1.2）ka BP。韩渭宾等（2005）从地震活动性的角度分析，认为大凉山断裂带活动性弱于安宁河断裂带；唐荣昌等（1993）认为大凉山断裂带的普雄河断裂晚更新世以来的滑动速率为 1～3mm/a；周荣军等（2003）通过对普雄河断裂上水系位错研究得出断裂晚第四纪水平滑动速率为 3.1mm/a，次级断裂的滑动速率为 2.6mm/a，并在普雄河断裂上开挖了探槽，揭露了两次古地震事件，最老一次事件时间不明，最新一次事件发生在 2850±150a至今，事件表现为正断层性质，表明断裂为全新世活动断裂。

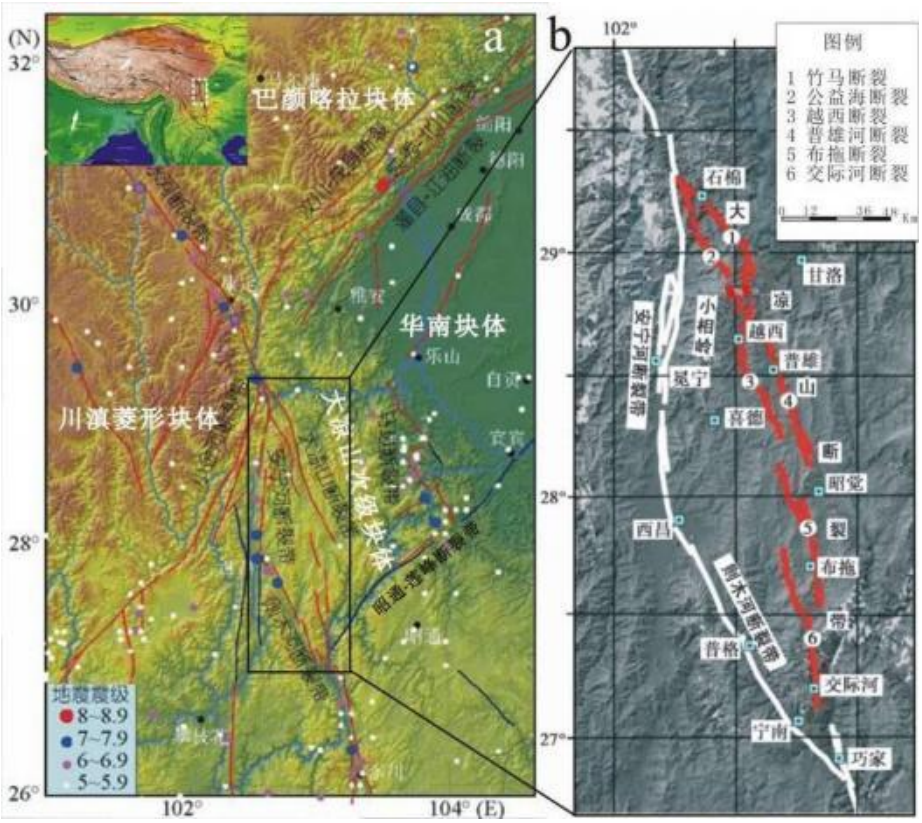


图 2.4-23　大凉山断裂带位置（a）及其结构组成（b）

宋方敏等（2002）通过地震探槽分析认为大凉山断裂带存在 9 次古地震事件，其中 4 次发生在全新世，其震级估计在 7 级以上；其中在普雄河断裂上，探槽揭示了两次古地震事件，为正断层性质，分别为距今 2800～30000a和 24000a，显示该段为晚更新世活动。高伟等（2016）在普雄河断裂南端的探槽揭示出 3 次古地震事件。洛莫探槽揭露了 2 次古地震事件，年代分别为 8206BC～1172AD和 1084～1549AD；三莫洛探槽揭露了 3 次事件，年代分别为 17434～7557BC、1577～959BC、927～1360AD。这些资料反映普雄河断裂古地震约束年代范围跨度大，复发间隔变化大，可能是由于探槽位置地层沉积不连续，遗漏了古地震。

但据《凉山州（含攀枝花地区）1:25 万活动断层普查项目-专题 3 凉山州（含攀枝花地区）主要断裂平面分布及其活动性专题验收报告》在德昌县南砖厂(102°9′50.36″， 27°21′28.68″，1430m)发现大型断面，高约 20m。上部地层取样 DC-C14-01，该样品为灰黑色粘土，具水平层理。被断层错断。断层左侧为未固结黑色粘土层，具水平层理，右侧为绿色、黄绿色粘土，无层理（图 2.4-24）。

图 2.4-24 安宁河断裂德昌南砖厂剖面（镜向 N-NNE）

Sun et.al.（2018）在大凉山南段的布拖断裂和交际河断裂上开展了古地震研究，认为布拖断裂 20000 年以来发生了六次破裂事件，表现为丛集特征；而交际河断裂 42000 年以来发生了 7 次破裂事件，总体上表现为一定的准周期性，复发间隔在 1710～2460 年之间。研究认为大凉山断裂南段已经累积了发生 7.6 级地震的位错量。

2.4.12 则木河断裂

展布于西昌、普格、宁南、巧家一带，总体走向北北西，全长约 130km（图

3.2-3）。主要由多条呈左阶雁列的断裂组合而成，在阶步区发育有第四纪断陷盆地，表明该断裂在第四纪时期具有强烈的左旋走滑活动。断裂具有多期活动的性质，晚更新世以来仍十分活跃，沿断裂，断崖、槽谷、断层三角面、断陷盆地和断错水系及山脊位错明显，并分布有温泉。根据断错地貌，推测它在全新世的左旋走滑速率为 5.9mm/a.。据 1972～1993 年的跨断层形变测量，它的北东盘向南西盘逆冲，其垂直差异速率为 0.1～0.85mm/a.。公元 1850 年西昌-普格一带的 7 1/2 级地震发生在该断裂上，地震的地表破裂带长达 90km，最大水平位错为 5.7m（杜平山等，2000）。

根据王虎等在大箐梁子开挖的三维组合探槽揭示出拉分盆地从下至上划分为 6 套地层堆积序列，每套地层序列又可分为次一级地层单元，划分的地层序列在物质组成、堆积环境有所区别，同时还表现出不同的断层切盖关系，说明受到不同期次的古地震事件的影响(图 2.4-25）。西支断层为走滑拉张型，例如 U5-2，U5-1，U4-2 和 U3-2 等地层有相对垂直下掉的同震变形迹象，东支断层为走滑挤压型，例如东盘地层 U1-1 整体挤压隆升变形，断层拐弯局部挤入到西盘更年轻的地层中，东西两支断层的同震应变使得断层所围限的空间为相对下降区域，从剖面上看类似于小型负花状构造，有利于地层的连续堆积(图 2.4-15(a)～(c))。每一次古地震事件位错形成相对下降区域后再堆积新的地层序列，事件依次重复发生伴随着多套地层序列的形成，最后形成现今探槽揭露的 6 套地层序列。

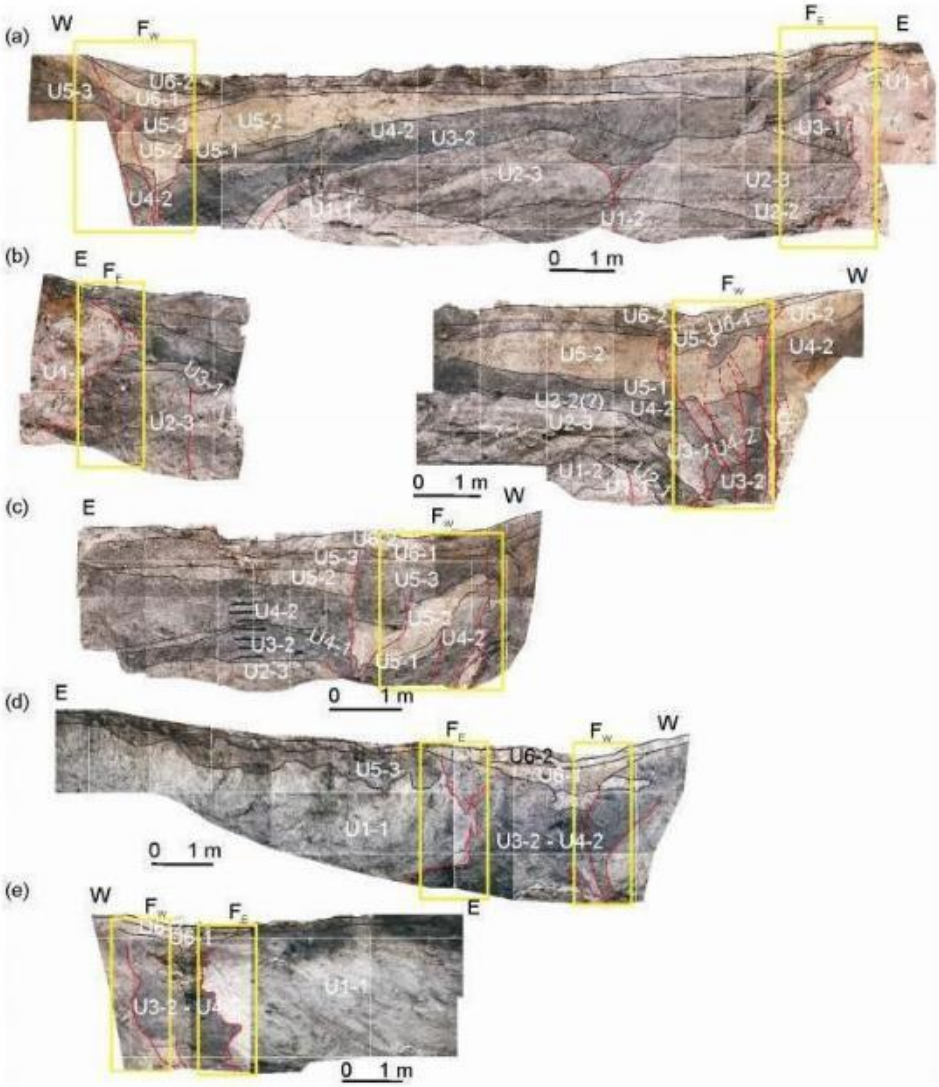


图 2.4-25　大箐梁子地点探槽（王虎，2013）

(a)探槽 Tc1 北壁；(b)探槽 Tc1 南壁；(c)探槽 Tc2 南壁；(d)探槽 Tc3 南壁；(e)探槽 Tc4 北壁．地层从下至上划分为 6 套堆积序列：序列 U1 主要由下部盆地粉质、基岩风化后残积物质和上部灰白色砂质与黑色砂质粘土呈不规则互层；序列 U2 主要为灰色砂质粘土层；序列 U3 和 U4 不易区分，主要为黝黑色泥炭层；U5 主要为黄色砂土含小砾石层；U6 主要为黄色砂土，草根大量发育。黄色矩形框为东西两支断层(FE,FW)的位置，图内字母为地层单元代号，红线示意断层，黑线示意地层界线；虚线示意推测部分。图中探槽可见大量的含炭成分，如泥炭、树木、炭屑。尤其是地层 U3-2～U4-2 地层由于有机物含量高，颜色发黝黑色

在断裂带中部附近，黑水河若干支流在穿越断裂处被左旋错断 700～1000m，形成断头的弃沟地貌。在西昌-普格之间路布村南山前，洪积扇被左旋错动(85±5)m，洪积扇顶面堆积物热释光年龄(13.29±1.0)ka，由此获得的晚更新世末期以来的左旋走滑平均速率为(6.4±0.6)mm/a（黄祖智，1982）。

Wang et al (2013)选择在大箐梁子通过组合探槽开挖与大量 14C 样品测年，限定了多期古地震事件的年代，分别发生在 1370AD- 现今、690-940 AD、5900-1400 BC、6590-6350 BC、7380-7110 BC，揭示大地震平均复发间隔约 2300a。

综合分析，该断裂为全新世活动断裂。

2.4.13 金坪断裂

该断裂北西起于泸定瓦斯营盘附近，向南东经金坪、火厂坝,于汉源片马以南消失。断裂总体走向 NW，倾向 SW，倾角在 50 以上，属一条高角度的逆冲断层。断裂全长 84km，主要发育于晋宁期花岗岩与中生代地层之间和古生代地层内部。在汉源县大树乡南王家田西侧冲沟中，见该断裂发育于震旦纪上统灯影组（Zbd）灰岩中。断层走向 N20 W，倾向 NE，倾角 60 。断层破碎带宽大于 40m，显压性特征。根据断层两侧地层的展布和断面上擦痕判定，断层具左旋斜冲特征。在断层挤压破碎带中发育多条平行于主断面的次级断层，在其中一条小断层上取断层泥经热释光法鉴定结果为 116200±9200 年。在汉源灯场坝北，该断裂被一晚更新世洪积扇覆盖，基岩破碎带可见宽度在 20m，但上覆洪积扇未变形。此外断裂在瓦斯营盘、灯场坝、大树等附近所穿过的大渡河阶地均未产生变形，也未在新沉积物中形成新断层。

因此，金坪断裂应为中更新世断裂。

2.4.14 甘洛—竹核断裂

甘洛—竹核断裂北起于甘洛附近，向南延伸经尔合乡、布区洛，于则觉、竹核间与普雄河断裂相交，全长约 100km。断裂总体走向近 NS，断面倾 E，倾角在 60 以上， 为高角度逆冲断裂性质。在热口北，见二叠纪玄武岩逆冲在中、下侏罗纪紫红色砂、 泥岩之上。断裂破碎带宽约 20m，主要构造角砾岩、碎裂岩及糜棱岩等组成，压性特征。主断面产状为走向 N10 W，倾向 NE，倾角 70 。在主断面取断层泥经 TL 法测定的年龄值为 20.80±1.40 万年，为中更新世断裂。

2.4.15 保新厂—凰仪断裂

该断裂北西起于石杠子沟北，向南东经赤竹坪、保新厂、凰仪，止于轿顶山北，断裂总体走向 N40 W，中部于凰仪附近向东突出呈弧形，倾向 SW，倾角在 70 以上，属一条高角度的逆冲断层。断裂总长度约 100km，主要断于古

生代地层中、晋宁期钾长花岗岩与古生代、中生代地层之间。

在新庙附近，见断裂发育于晋宁期钾长花岗岩与三叠系上统须家河组(T3X)煤系地层之间。于断层带附近与主断层平行的次级断层上取方解石测龄样品，经热释光法测定结果为 463000±56000a。另在断裂北西段陈香岩附近，断层破碎带中取断层泥物质经SEM 特征分析，断裂主要活动期在中更新世末期，粘滑运动方式。上述资料表明，保新厂—凰仪断裂为中更新世断裂。沿断裂地震活动微弱，至今尚无破坏性地震发生的记载。

2.4.16 金阳-峨边断裂

北起于峨边，南经马边西，止于金阳一带，总体走向近南北，倾向东或西，倾角大于 60°，长约 200km。通过地层主要为古生代及中生代地层，破碎带宽达数十米至近百米，具强烈挤压现象，如在马边烟峰西安子，该断裂发育于二叠系玄武岩中，破碎带宽达百米，挤压破碎强烈，见绿泥石化动力变质带以及大量挤压透镜体。在卫星影像上有清晰的线性特征，峨边县城一带地貌上表现为线性槽谷。第四纪以来断裂也有活动表现，断层泥热释光测年结果为 27 万年左右，表明它在中更新世有过较强烈活动（中国地震局地壳应力研究所，2008，）。

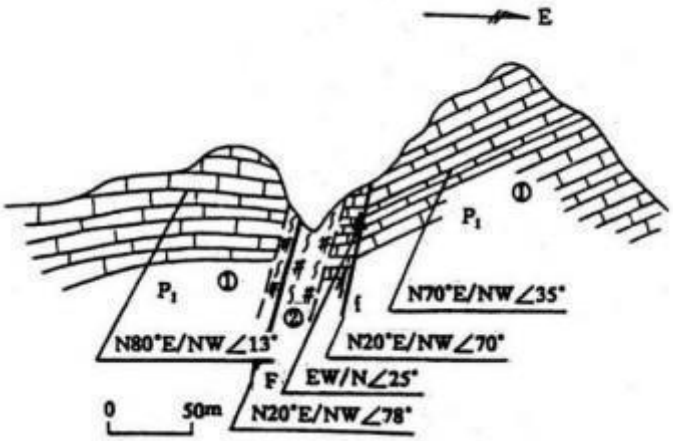


图 2.4-26　峨边沙坪附近峨边-金阳断裂剖面图

①二叠系下统灰岩；②断层破碎带；▲：测龄样品采集位置

在峨边县北西沙坪附近，断裂发育在二叠纪下统（P1）灰岩之中（图 2.4-26）。断层破碎带宽约 50m，破碎带中发育有多条与主断面上平行的次级断层，且次级断面上发育厚约 0.5～2cm 的黄色断层泥，显压性特征。在其中一断面上取断层泥测龄样品。经 TL 法测试的结果为：224400±17700a。

沿断裂有一定程度的地震活动。该断裂带属于早第四纪断裂。

2.4.17 荥经—马边—盐津断裂带

该断裂带位于四川盆地西南缘，是凉山活动断块的东边界。北起天全以南，向南经荥经、峨边、马边至云南盐津北，全长 250 余千米。由 9 条规模不等的断裂组成一条宽 25—30km 的北北西向断裂带，总体走向北 25—30°西。断裂带在活动时代、活动强度上具有明显的北老南新、北弱南强的特点。北段（马边以北）断裂组合形式单一，地质上主要活动期在晚更新世以前，如天全—荥经断裂和峨边—金阳断裂的热释光年龄值分别为 46 万年和 27 万年左右。北段仅利店断裂活动性稍强，在断面上取断层泥或方解石脉经热释光（TL）法测定，其最晚一次活动时间在晚更新世早期。1994—1995 年在沐川凤村至杨村一带连续发生了三次 5 级地震。南段（马边以南）断裂组合形式复杂，由北至南由靛兰坝断裂、中都断裂、玛瑙、猴子坝断裂、关村断裂及中村断裂等组成，可见到断错河流阶地及第四纪沉积物中有断层或褶皱等变形现象（成都地震大队地震地质队，1972）。因此，该断裂段普遍具有较强的晚更新世活动性，特别是靛兰坝、玛瑙、猴子坝断裂等为全新世活动断裂。断裂南段地震活跃，强震频繁，历史上曾发生过 1216 年雷波马湖 7 级地震及 1974 年云南大关北 7.1 级地震及马边 6.7 级震群。此外，大毛滩等地有古地震砂脉现象（图 2.4-27）（国家地震局地质研究所、四川省地震局，1990），表明该断裂段可能还发生过一些古地震事件。

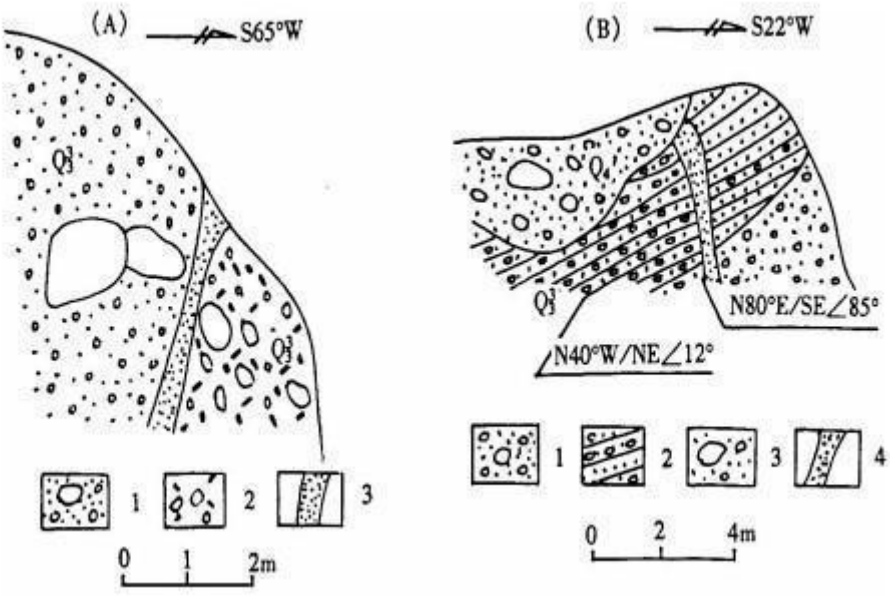


图 2.4-27　大毛滩南砂脉剖面图

（A）：1.砂砾石层；2.炭屑；3.砂脉（B）：1.砂砾石层；2.含沙砾石层；3.坡积含砾土层；4.砂脉

2.4.18 雷波断裂带

雷波断裂带走向北东，发育于 NE 向的城墙岩背斜的南翼，以右旋走滑运动为主，主要有 3 条分支断裂组成，自北西向南东分别是火烧棚断裂、额子沟断裂和五子坡断裂，它们共同构成了总长~70km、宽~10km 的北东东向断裂带。断裂沿线构造地貌清晰，发育有线状构造，尤其是垭口地貌，且断裂沿线地形起伏较为剧烈，侵蚀作用强，第四系分布局限，只在垭口相对平缓地段残留有晚第四纪坡积物。另外，断裂沿线可见水系、山脊等同步被右旋错断，最大位移可达 300m。韩竹军等（2009）通过野外露头和探槽解译认为中支断裂具有逆断性质，并利用光释光年代学数据推测雷波断裂带在距今~6.4ka以来未发生过明显错断地表的构造活动。张世民等（2005）通过对该断裂带的构造地貌分析认为雷波断裂带是几组NE向、NEE向阻断或分割荥经-马边-盐津逆冲构造带的横向断裂之一，活动方式以右旋走滑活动为主，兼有正断性质，且该断裂带只发育在逆冲构造带的上盘，是对荥经-马边-盐津逆冲构造带西盘逆冲席块之间差异运动进行调节的一种横向撕裂断裂。雷波断裂带 3 条断裂各自的晚第四纪最大水平位错速率为 2~3mm/a左右。

据《四川省活断层普查》项目阿坝州活断层普查子项目阿坝州（含盆地区）1：25 万活动断层普查在莲花石村地区断层槽谷中开挖探槽，莲花石探槽一剖面揭示断裂活动发生于U3 层与U4 之间，由此可以认为断裂的活动时代为全新世，形成时代分别为 3545-1484a BP。

2.4.19 莲峰断裂

为华莹山断裂带的西南分支断裂，沿莲峰背斜轴部发育。北起盐津县中河附近，向西南经莲峰、金阳，止于巧家官田附近，长约 180km。总体走向北东，断面倾向北西，倾角 40°～80°不等。断裂结构复杂，由多条断层组合成 2～5km 宽的断裂带。

断裂对二叠纪火山活动有明显的控制作用，切割了震旦至中生代地层，总断距可达数百米，主要显示挤压逆冲性质。卫星影像上，断裂线性特征明显。断错地貌醒目，在五莲峰主峰西北麓的金沙江东岸，沿断裂发育多种断错地貌。根据被断错地质体的形成时代和水系等级推测，该段在中～晚更新世有较明显的活动。在头坪次级断层取断层泥热释光法测定，年龄距今(174.7±12.9)ka，在新田

次级断层所取断层泥用电子自旋共振法测得年龄距今(106.2±31.8)ka（侯治华等，1998），表明莲峰断裂在新生代有过多次活动，最新活动年代为晚更新世。

在新华村北东的见另一第四纪剖面（，断层产状 35°/NW∠50°，断层断错冲洪积含砾石细砂层，取断错的细砂进行光释光测年（OSL），细砂测年结果为（47.1±5.8）ka，表明断层晚更新世曾有过活动。断层上覆坡积红粘土层未见断错，未断错的粘土取样进行光释光测年（OSL），结果为（15.7±1.7）ka（云南省地震工程勘察院，2019）。表明断层全新世以来未曾活动。

根据莲峰断裂在永善县水竹乡、金阳县对坪镇和田坝镇等地断错了金沙江两岸的高台地，形成断层槽谷等负地形（图 2.4-28），这些台地相当于金沙江II或III级阶地，形成于晚更新世。

图 2.4-28　金沙江南东岸莲峰断裂地貌

a.金阳县对坪镇附近，镜向 S；b.金阳县田坝镇附近，镜向 S

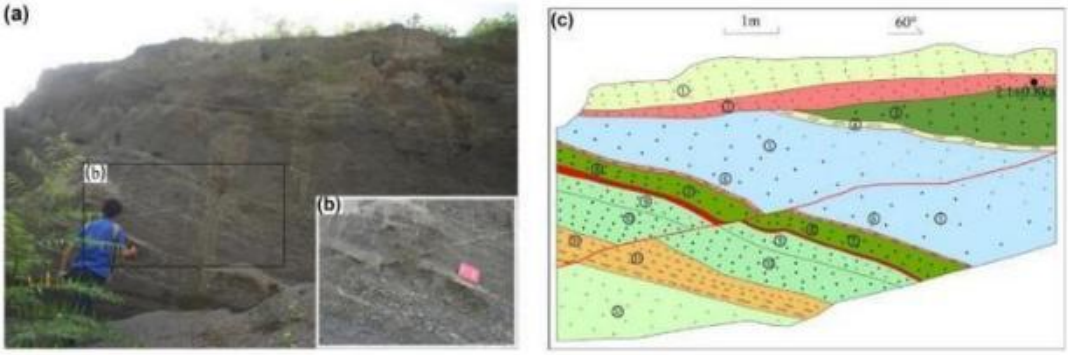


图 2.4-29　山江乡西南附近金沙江 T1 阶地中的莲峰断裂剖面（Wang et al，2022）

Wang et al（2022）在莲峰断裂带金阳-巧家段附近对金沙江河阶地沉积物进行了调查，通过对在莲峰断裂金阳-巧家段周边的金沙江阶地的地貌、沉积、构造和年代学研究，及对河流阶地沉积物中砂脉充填剖面特征的分析认为莲峰断

裂金阳-巧家段最晚活动年龄不早于全新世早中期（图 2.4-29），Xu et al（2023）也同样发现莲峰断裂全新世活动证据，但仍存在争议。

沿断裂强震活动主要集中在断裂两端与近南北向断裂的复合部位。综合上述分析认为，该断裂最新活动年代为晚更新世。

2.4.20 长山镇断裂

长山镇断裂发育于铁山背斜的轴部或陡翼，南西起于金石井以西，在帽顶山一带消失，全长约 40km。断裂总体呈北东东向展布，断倾向 NW，倾角一般为 50～60 。该断裂由大致平行的两条断裂组成，北支为主干断裂，南支为次级断裂，两者走向相同，断面对倾。

在观音山见长山镇断裂断于上三叠统须家河中细粒砂岩之中，断层走向 N40ºE，倾向 NW，倾角 40º，断层破碎带可见宽度约 3m 左右，破碎带以糜棱岩、碎裂岩为主，断层泥呈透镜状产出。在断面上取断层泥经热释光法测得的年龄值为 332000±49800 年，表明断裂的最新活动时代为中更新世。

2.4.21 华蓥山断裂

该断裂带北起达县北、向南西经大竹、邻水、合川、铜梁、荣昌至宜宾南（图 2.4-30），长约 460Km，是四川盆地内规模最大的断裂带。断裂带总体走向北 40—45°东，倾向南东，倾角 30—70°，具挤压逆冲性质。地表断裂主要发育于背斜轴部或陡翼，由一系列长数公里—数十公里的断裂斜裂或平行展布而成。深部在相应位置则存在华蓥山基底断裂。

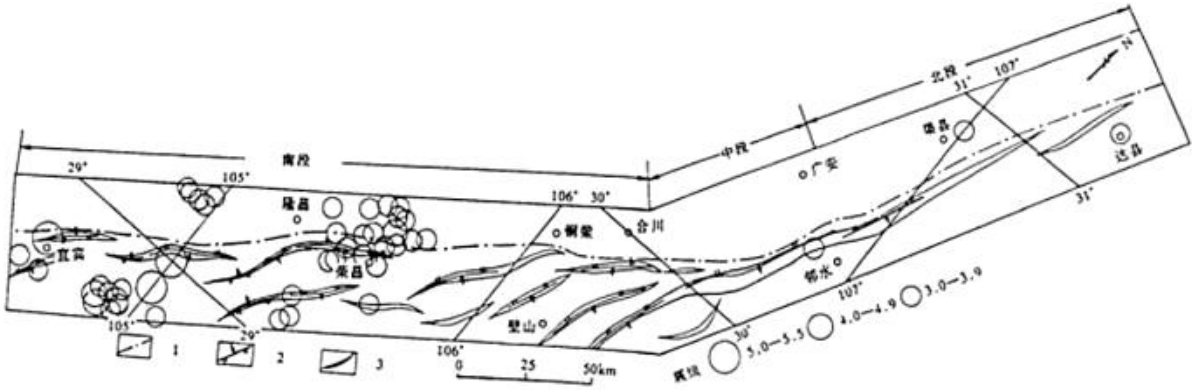


图 2.4-30　华蓥山断裂带平面分布及分段图

1. 基底断裂；地表逆断层；3. 背斜

物探资料表明，华蓥山基底断裂两侧结晶基底的埋深与性质有着迥然的差别，西侧的川中地区基底由一套基性、中性及较强磁性的火成岩所组成，具有密

度高、磁性强的特点，表明基底为一变质深和硬化程度高的刚性块体，其埋深 5—6Km；东侧的川东地区的基底主要由一套巨厚的沉积变质碎屑岩夹碳酸盐岩与火山碎屑岩的复理式建造所组成，属低密度和弱至无磁性的塑性基底结构，埋深一般 7—9Km，最深可达 11—12Km（赵从俊，1984；赵从俊等，1989）。华蓥山断裂带在第四纪有一定的活动性，在北西西向主压应力场作用下，显示为挤压逆冲性质，并具有一定的右旋滑动分量。从断裂带的平面展布形态、几何组合特征、地表背斜与断裂构造的规模、基底断裂特征、断裂活动性及其地震空间分布图象和地球物理场特征来看，华蓥山断裂带大致以合川和邻水为界，可分为南段、中段和北段。分述如下：

（1）南段（宜宾南—合川段）

该段南起宜宾南，北止于合川附近，全长约 250 余 Km，走向北 45°东左右。该段由 5—6 条规模不等的背斜构造呈右阶羽列而成，断裂常发育于背斜的轴部或靠近轴部的陡翼一侧，显压性特征。背斜长度不等，长约 10Km 至 60Km，背斜高点高程不等，一般为数百米。断裂规模不等，长数 Km 至 30 余 Km。在平面形态上，背斜端部略呈“S”形弯转，表明断裂具有一定的右旋分量。在布格重力异常图和航磁△Ta 异常向上延拓 20Km 图上，沿断裂呈明显的北东向梯度带，水平梯度值分别为 0.5—0.6×10^{-5}M / S^2 • Km 和 1.2nT/Km 左右。在荣昌、宜宾、高县及富顺等地，取断裂破碎带中的断层泥、方解石等 8 件年代学样品经热释光（TL）法测定的年龄值在 102200±60000 年—702400±38400 年之间。SEM 法鉴定结果也表明，断裂晚更新世以来无明显的活动性，且以蠕滑活动方式为主。该段断裂曾发生过 5 级左右的地震，如公元前 26 年宜宾一带 5½级地震，1610 年高县庆符 5½级地震等，小震亦沿断裂密集成带分布，表明该段断裂现今仍具有一定活动性。

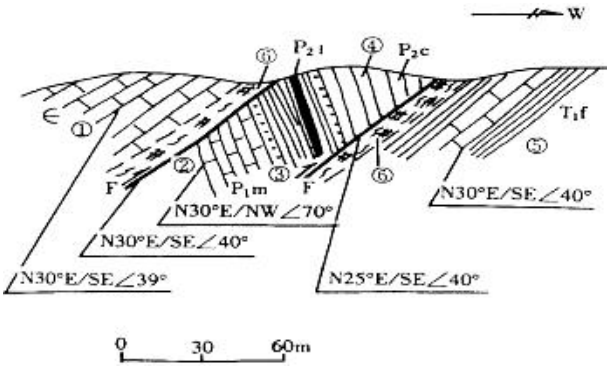


图 2.4-31　溪口场北田坝子华蓥山断裂剖面图

①寒武系灰岩；②下二叠系茅口组灰岩；③上二叠系罗坪组煤系地层；④上二叠系长兴组灰岩；⑤三叠系飞仙关组砂页岩、灰岩互层；⑥断层破碎带

（2）中段（合川—邻水北段）

该段南起合川，北至邻水北，全长约 80 余 Km，走向北 30°东左右。该段断裂发育于华蓥山复式背斜的西翼，在平面上由 3—4 条断裂近于

平行展布、剖面上构成迭瓦状构造，并出现有反向冲断层。华蓥山复式背斜轴部高点达 1700m 左右，高出四川盆地 1300—1400m，显示出较强的差异运动。在剖面上，常见下古生界寒武系地层逆冲在二叠系地层之上，断距在 2000m 以上（图 2.4-31）。基底断裂对两侧的沉积建造及古地理环境具有明显的控制作用。重力和航磁△Ta 水平梯度值分别为 0.5—0.6×10^{-5}M/s^2.Km 和 6nT/Km 左右。从合川至邻水，于断裂破碎带中所取 7 件年代学样品经热释光（TL）法测定的年龄值在 140900±11800 年—262400±20700 年之间。SEM 法鉴定结果表明活动亦在中更新世中晚期，以粘滑活动方式为主。现今有弱震沿断裂零星分布。最大地震为 1986 年邻水 3.5 级地震。

（3）北段（邻水北—达县北段）

该段南起邻水北，北至达县以北，全长约 120Km，走向北 30°东左右。该段主干断裂未出露地表，仅天池—桂兴北之间出露有 20—30Km 长的次级断裂。背斜构造形迹亦呈减弱的趋势，轴部高点降低，但深部的基底断裂依然显示清晰。在桂兴乡所取断面上的方解石经热释光（TL）法测得的年龄值为 404700±29100 年。现今地震活动呈零星状分布。

综上所述，华蓥山断裂带地表可以比较明显的分为上述三段，深部地震探测资料亦表明该断裂可按上述段落进行分段：断裂中段断距大，地表断裂向下延伸与基底断裂相连；南段和北段地表断裂向下未切穿寒武系，不与基底断裂相连。从断裂和背斜构造的地表形态上来看，中段差异活动幅度最大，南、北两段次之。现今地震活动则是南段最强，中段次之，北段最弱。

2.4.22 昭通断裂带

昭通断裂南起于巧家县的崇溪南，在新街子一带分为东西两支展布。

西支由多条相互平行的断裂组成，西南起于崇溪南，向北东经铅厂、三盆地、龙头山、龙树，止于洒渔北西，全长约 90km，总体走向 20°～40°，倾向南东，倾角大于 50°。在龙头山附近断裂走向偏向北北东向，南东盘向北西盘逆冲，显压扭性。沿断裂带岩石多挤压破碎，局部地段岩层倒转、扭曲剧烈，发育配套的北西向横向断层。

在铅厂与老店之间，沿断层发育近百米宽断层破碎带，表现为碎裂的灰岩体、煤系地层和众多的平行断层。在铅厂附近公路边见断层露头，断层产状 10°/SE∠80°。断层断错了中更新世晚期冰碛物，但上覆晚更新世地层平

稳覆盖，未见构造变形迹象。另据龙树乡龙树村二社横跨该断层陡坎开挖了一探槽表明，探槽至少揭露了 3 次地震事件，断层在晚更新世以来有过活动[29]。

东支断裂规模较大，西南起于鲁甸西南的弯刀坎，向北东经鲁甸、昭通、北闸、盘河，延至彝良北东，总体走向 30°～40°，倾向南东，倾角大于 50°。该断裂地貌上沿断裂形成深度大且较为平直的沟谷、断层三角面、断层沟槽、陡坎等。昭通、鲁甸盆地是由鲁甸断层拉伸、挤压与走滑三种构造应力场之间的组合和过渡活动机制形成的。在鲁甸盆地和昭通盆地北西侧断层地貌清晰可见。

在鲁甸南西七里村东侧 500m 的盆地边，见断层出露于下二叠统梁山组砂岩中，断错了上覆的坡积含碎石、角砾粘土层，该层经光释光年龄测定，结果距今(71.3±6.4)ka（云南省地震工程勘察院，2013），但对地表的壤土层未见断错或构造变形，表明该断层为晚更新世活动。

图 2.4-32　龙树乡龙树村二社附近龙树断裂断层地貌

a. 断层陡坎地貌，镜向 SE；b. 断层陡坎地貌，镜向 SW

于龙树乡龙树村二社，横跨该断层陡坎开挖了一探槽（图 2.4-32、图 2.4-33），探槽长约 4-5m，深约 0.5-1.5m。探槽揭露的地层如下：

①褐色、深褐色砂土层；

②土黄色砂层，可见较多小砾石；

③土黄色砂层，含小砾石及淤泥团块；

④暗褐色砂层，含较多淤泥团块；

⑤暗灰、黑色淤泥层；

⑥土黄色砂层，含小砾石。

图 2.4-33　龙树乡龙树村二社探槽场地的地貌

a. 断层陡坎地貌，镜向 SE；b. 断层陡坎地貌，镜向 NE

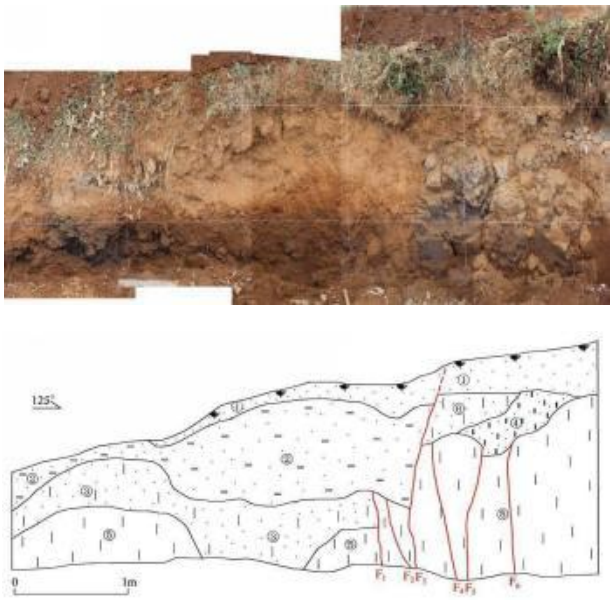


图 2.4-34　龙树乡龙树村二社探槽剖面及照片

从断层与地层的相互关系来看（图 2.4-34），探槽至少揭露了 3 次地震事件：事件一，断层 F_1 和 F_2 断错了层⑤和层③，层②未见被断错和受构造扰动的迹象；事件二，断层断层 F_5 和 F_6 断错了层④；事件三，断层 F_3 断错了层②、③和⑤，甚至顶部层①也存在断错和构造扰动的迹象。

2003 年 11 月 15 日、26 日，在云南鲁甸(北纬 27.2，东经 103.6) 发生 5.1、5.0 级地震，2004 年 8 月 10 日，又在云南省鲁甸县发生 5.6 级地震。2012 年 9 月 7 日，在彝良发生 5.7、5.6 级地震以及 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震。

综上所述，昭通断裂晚第四纪活动形迹明显，多处发现其新活动的地质地貌证据，该断裂应为全新世活动断裂。

2.4.23 威信断裂

断裂西南起于滇黔交界的可乐镇北，向北东经五德、雨河、威信，过双河后延入四川境内，止于长秧以西，呈弧形或波状延伸，基本上平行于雨河背斜、黄连坝向斜、瓦石背斜三个弧形褶皱轴向发育，为雨河-威信旋扭构造的组成部分。

断裂总体走向北东-北东东，倾向南东，倾角较陡，区域内长约 96km。

地貌上主要表现陡崖、宽缓的谷地地貌等。此断裂为四川盆地东南边缘北东向构造带的成分，走向北东 15°-60°，倾向南东，倾角 60°以上，该断裂是由多条压扭性断层组成。断裂主要发育于寒武系、奥陶系、志留系、二叠系以及三叠系地层中，从断裂波状延伸的形态来看，断裂经历了多次构造运动和多次的改造。被卷入与此断裂关联的褶皱最新地层为白垩系，显示此断裂在燕山晚期—喜山早期曾有过比较强烈的压扭性活动。

根据威信幅区域地质报告和镇雄幅区域地质报告，该断裂自三叠纪以来曾表现出强烈的右旋特征，水平断距 1500m 左右，最大水平错距达 4250m。沿断层线表现为冲沟等负地形和断层陡崖的地貌特征，沿断裂切错的地层大多为碳酸盐岩地层，沿断裂破碎带侵蚀作用较强但构造作用少见，因此仅有侵蚀盆地而无第四纪断陷盆地，无破坏性地震记录。

断裂在威信县城及周边广泛出露，断错多个地层，多期活动特征明显。在马关沟附近，断层带主要由构造角砾岩和断层泥组成。断层两盘均为寒武系灰岩，断面上有斜向擦痕，显示断层西北盘为斜上逆冲在南东盘之上。断层泥为灰白色，有一定程度的胶结，其热释光（TL）年龄值为（194.17±16.50）ka，表明中更新世曾有活动。在石龙桥断层两侧均为奥陶系厚层灰岩，破碎带宽约 15m，主要由角砾岩、碎裂岩组成，角砾岩、碎裂岩钙质胶结。上覆晚更新统～全新统棕黄色残积曾未被切穿。主断面上断层泥的热释光（TL）年龄值为（267.72±22.76）ka，为中更新世。

上述资料表明，断裂新活动迹象不明显，特别是晚更新世以来无活动迹象，属于早第四纪断裂。

2.4.24 遵义断裂

遵义-贵阳断裂是川黔南北向构造带的主要断裂，南起罗甸西北，向北经惠水、贵阳、息烽、遵义、桐梓延入四川境内的南川、长寿附近，全长约 400km，并在桐梓、息烽和贵阳等地被北东向断裂所错切。在深部的相应位置则存在一条南北向的长寿－遵义基底断裂。在贵阳北扁山村附近，见遵义－贵阳断裂，中寒武系娄山关群白云岩逆冲在下三叠系夜郎组薄层灰岩之上，断裂走向北 30° 东，倾向南东，倾角 70°，破碎带宽约 20m，主要由碎裂岩、角砾岩等组成，显压性特征，取破碎带内物质经 TL 法测龄，年龄值为 33.15±2.59 万年。在惠水县

永红砖瓦厂，遵义－贵阳断裂发育于白垩系紫红色粉砂岩内部，破碎带宽约 5m，由挤压劈理、角砾岩、挤压透镜体等组成，显压性特征，取破碎带内物质经 TL 法测龄，年龄值为 16.76±1.31 万年。

因此，该断裂为中更新世断裂。

2.5 区域地震构造环境综合评价

2.5.1 区域地震构造环境评价

区域位于青藏高原东缘和四川盆地，喜马拉雅运动以来，受青藏高原持续抬升和高原物质向东蠕散的影响，高原的东部地区表现出地壳抬升、变形与缩短和块体的旋转与侧向挤出等复杂的变形过程，导致频繁的强震活动。研究区内共发生过 8 级地震 1 次，为 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级地震，7.0—7.9 级地震 6 次，分别为 1786 年康定—泸定磨西间 7¾级地震、1536 年西昌北 7½级地震、814 年西昌一带 7 级地震、1850 年西昌—普格间 7½级地震、1216 年雷波马湖 7 级地震、1974 年云南永善－大关间 7.1 级地震，6.0—6.9 级地震 16 次。这些地震主要集中分布于川滇块体东边界断裂和荥经—马边—盐津断裂上，而块体内部和四川盆地较少发生 6.0 级以上地震，因为这些地区新构造和现代构造活动较弱，地壳结构较单一，整体性较好，差异运动不明显，表现为整体性抬升。

现将区内 M≥6 级地震中一些具有典型意义的历史强震发生的地质构造环境进行分析，以便从中总结区域地震构造环境特征与归纳强震发生的构造标志，进而确定区域内的强震构造。

（1）2008 年 5 月 12 日汶川特大地震及其对龙门山断裂带的认识

据中国地震台网测定，2008 年 5 月 12 日 14 时 28 分 04.0 秒，在四川省汶川县映秀镇一带发生 8.0 级特大地震，震中地理坐标为北纬 31.0°、东经 103.4°，震源深度 14km。

通过对汶川 8.0 级地震序列的重新定位，该地震序列具有明显的分段活动特征。南段以北川-映秀断裂和彭县—灌县断裂破裂活动为主，茂汶—汶川断裂也有一些强余震发生；北段复杂，除北川-映秀断裂之外，平武-青川等多条断裂也参与了发震过程。经地震波反演，该地震的震源断层破裂过程是多次事件，主要是 2 次事件由南向北扩展的过程（陈运泰，2008）。

地震的地表破裂形变是表征一次强震发震构造最为直接的证据。通过对

2008 年 5 月 12 日汶川特大地震的现场调查，该地震的地表破裂变形的表现形式是多种多样的，其中具有构造意义的主要是地震断层、地震坎、挠曲褶皱、基岩裂缝等。据中国地震局汶川 8.0 级地震科考队的调查，其地表破裂形变南始映秀，北止青川，走向北东，带长约 240km，宽达数十米，最大的同震垂直位移 6.2m、右旋走滑位移 4.9m，为兼有右旋走滑分量的逆断层破裂型，破裂形变主要沿北川—映秀断裂和彭县—灌县断裂展布，在茂汶—汶川断裂上没有发现同震地表破裂现象（徐锡伟等，2008）。

经多学科综合分析认为（邓启东，2008），该地震序列的发震构造为北东向龙门山断裂带内的北川-映秀断裂（龙门山中央断裂）和彭县-灌县断裂（前山断裂），具有多点破裂和破裂性质的转换，是深部滑脱带向前端断坡（含茂汶—汶川断裂和龙门山山前断裂）扩展的结果，在上地壳表现为双断坡破裂,这说明逆断层破裂扩展的型式和过程更加复杂，不仅可以沿逆断裂带中一条断坡产生破裂,也可以产生双断坡乃至多断坡破裂。余震的空间分布和南北两段震源机制的变化也说明震源断层的分段性。同震破裂带的分段性和同震位移的起伏变化也反映了破裂过程是一个多点破裂过程,整个破裂序列的初始破裂点和每一段破裂的初始破裂点都对应位移峰值。在整个破裂序列中,破裂的运动性质发生变化,汶川地震破裂带的映秀段以逆冲为主,至北川以北段转变为右旋走滑为主,这种变化反映了在整个破裂序列中应力场发生了调整和转换,在逆断裂段中间主应力为北东向,而在走滑段则近直立。虽然汶川 8.0 级地震的初始破裂点和主破裂段都位于龙门山断裂带中段,但在整个破裂过程中,北川以北的破裂事件突破了龙门山断裂带的中段。

龙门山断裂带是青-藏亚板块与南华亚板块的拼合构造带,经历了长期的地质演化,具有十分复杂的地质结构和演化历史。在横剖面上，组成龙门山断裂带的汶川-茂县断裂、北川-映秀断裂和灌县-江油断裂呈叠瓦状向四川盆地内逆冲推覆,在地表附近的断裂倾角约为 60°～70°,随着深度的增加其倾角逐渐变缓,大约在 20km 深处,3 条断裂收敛合并为一条滑脱带(张培震,2008)。除这 3 条断裂之外,在龙门山山前的成都盆地内还存在一系列与龙门山平行的隐伏活动断裂(唐荣昌等,1993；邓起东等,1994；徐锡伟等,2005；李永昭等,2008)。研究表明,5.12 汶川地震发生时,两个大的破裂滑动在地面上的投影分别对应映秀-汉旺一带和北川县附近。在映秀-汉旺段,北川-映秀断裂和彭县—灌县都发生了错动,前一断裂在深

度 15.5km 处达到 1249cm 的最大错动；后一断裂在深度 9.1km 处错动最大,达到 516cm (王为民等,2008)。北川-映秀断裂和彭县—灌县断裂的最大同震垂直位移分别达 6.2m 和 3.5m(徐锡伟等,2008)，而在龙门山山前的什邡市师古镇附近发现的两处同震地表破裂的垂直位移分别 0.2～0.3m 和 lm,推测是彭县—灌县断裂的同震位移在深约 6～7km 处发生分解,一部分位移沿近水平的滑脱层向成都盆地内传播,当到达成都盆地内时,断层倾角随着深度的变浅逐渐变陡,最终部分地出露地表。这就意味着，隐伏于成都盆地内的龙门山山前断裂也参与了在本次地震破裂过程。

综上所述，虽然在茂汶-汶川断裂上没有发现同震地表破裂现象，但经重新地位后，茂汶—汶川断裂仍有强余震发生，说明在汶川地震中，整条龙门山断裂带皆有活动。

（2）1850 年西昌、普格间 7 1/2 级地震

1850 年 9 月 12 日（道光三十年八月初七日）西昌及其附近发生 7 1/2 级地震。经多次调查研究，该次地震的宏观震中位于西昌南东约 30km 处的五道箐乡一带，极震区（X度）围绕着则木河断裂的西昌至普格段呈对称展布，长轴方向北西-南东向，长约 62.5km，短轴北东-南西向，长约 7.5km，并沿断裂形成长约 30km 的地震断层。

西昌—普格段是则木河断裂新活动最为强烈的段落。断裂断错沿线包括全新统在内的所有地层。断错地貌清晰，多处可见水系左旋扭错和洪积扇、山脊断错现象。地壳形变资料表明，断裂北盘以 0.7mm/a.的速率上升。该段处于低重力异常带。

（3）1974 年大关 7.1 级地震

极震区（IX度）位于大关县木杆乡和永善县团结乡一带，长轴北西—南东向，长约 16km；短轴北东-南西向，长约 8km。经地震现场考察，在IX和VIII度区内产生大量的滑坡、崩塌、地裂等地震地质灾害，但未发现地震断层或有构造意义的地裂缝，先存断裂也不显著。

通过判读 1：100 万地质图和 1：50 万卫星照片，在VII度区的中和场-元江溪-黄荆坝一带发育有数条北西向断裂，为马边-盐津断裂的组成部分，卫星照片显示出左旋断错地貌，北东向五莲峰断裂未进入VII度区内，两条断裂在极震区及附近形成闭锁状态。

从地球物理异常场来看，马边-盐津强震区的布格重力异常值介于 150～-200 毫伽之间，等值线总体呈北北西-南南东向，但在震区及附近具有向北东-南西方向转折的趋势，并出现低异常区，地震活动分布带两侧的等值线密度明显变疏，航磁异常相对简单，以低异常、分布零散和走向不稳定为其特征，但大致是以震中分布的轴线为界，东北侧为负异常，西南侧为正异常，值的大小在 20～-60 伽玛，其分区的界线与马边-盐津断裂基本吻合。

研究区地壳厚度变化的总趋势是东薄西厚，并存在一个幔隆和幔凹，其走向分别为北东和近南北向。在地壳结构发生变化的部位及附近均有活动断裂的存在，如北东向幔隆的南东缘为华莹山断裂所在，近南北向幔凹的南东缘有昭觉-布拖断裂通过，中部地壳厚度梯度带与马边-盐津断裂吻合，强震均发生在这些具有一定地壳结构背景的断裂及附近。这一方面说明了本区的强震活动具有一定的深部构造背景，另一方面也反映了本区的地震构造具有深断裂的特征。

（4）1936 年马边 6 3/4 级震群

1936 年 4 月 27 日和 5 月 16 日，在四川马边玛瑙和雷波西宁附近相续发生一次 6 3/4 级地震。经四川省地震局多次考证[11]，1936 年 4 月 27 日的 6 3/4 级地震的宏观震中地理坐标是北纬 28.7°、东经 103.7°，其位置是在马边县玛瑙乡大田坝和后院子附近，震中烈度IX度，极震区长轴方向近南北，基本上围绕着马边—盐津断裂东支全新世活动断裂段展布，并被确认为该地震的发震构造。

深部构造环境与 1971 年大关 7.1 级地震类似。

2.5.2 区域强震发生的构造条件

根据前述区域新构造、第四纪活动构造及其与强震活动关系的分析，结合研究区的实际情况，我们将本区的强震分为 M≥7 级和 M＝6.0～6.9 级两档，分别讨论它们的地震地质标志，为潜在震源区划分提供依据。

（1）M≥7 级地震的地震地质标志

①强烈活动的断块边界断裂：多为走滑型活动断裂。断裂在晚更新世以来特别是全新世活动强烈，断错地貌清晰，有明显的位移证据，断裂带上往往有近代地震或古地震的地表破裂带分布。如 1850 年西昌、普格间 7½级地震等。

②活动断裂的粘滑、闭锁段：这些粘滑、闭锁段大多出现在断裂弯曲、转折部位，主干断裂的分叉区及枢纽部位。光弹力学实验结果表明，这些构造部位在

相同的受力 条件下表现为应力集中。如 1974 年大关 7.1 级地震和 1850 年西昌、普格间 7½级地震等。

③具有明显的古地震遗迹的活动断裂段：近代强震往往发生在古地震遗迹明显的活动断裂段上，即“古震”与“近震”具有明显的同源性。如 1536 年西昌北 7½级地震等。

④具有全新世活动性的深大断裂：这些断裂往往表现为重力异常梯度带、航磁异常突变带或地壳厚度陡变带。如 1536 年西昌北 7½级地震和 1216 年雷波马湖 7 级地震等。

⑤一、二级新构造运动分区的边界性断裂：这些断裂也常常是差异活动最为明显的地带。如鲜水河和安宁河断裂上的 7 级以上地震、龙门山断裂上的汶川 8.0 级地震和芦山 7.0 级地震等。

（2）M=6.0～6.9 级地震的地震地质标志

研究区的 6.0～6.9 级地震的标志与 7 级以上地震的标志并无严格的区别，只是强度和规模稍弱。在断层活动时代上可下延至晚更新世，在新构造运动分区上，6.0～6.9 级地震可发生在三级新构造运动分区的边界性断裂上。因此，地震发生的空间范围比 7 级以上地震有所扩展。特别应当指出的是，本 6.0～6.9 级地震还具有以下两个特征标志：

①大型走滑型断裂带的岩桥区：出现在走滑型断裂的羽列部位，为主干断裂上的应力调节单元，特别是拉分岩桥区常常 6 级左右地震活动的有利场所。如马边地区 6.0～6.9 级地震等。

②主干断裂上的第四纪盆地：研究区大量的 6.0～6.9 级地震的震例资料表明，6.0～6.9 级地震与主干断裂上的第四纪盆地密切相关，如西昌附近多次 6.0～6.9 级地震等，这可能与主干断裂的差异活动有关。

（3）M=5.0～5.9 级地震的地震地质标志

四川盆地 5.0～5.9 级地震随机性较大。

四川盆地地区地震构造条件为：

（1）具备发生 6.0～6.9 级地震或≥7 级地震构造部位。

（2）规模较大或具一定规模的中更新世明显的断裂或断裂段。

2.5.3 区域主要发震构造评价

区域范围内的发震构造主要有荥经—马边—盐津断裂带、鲜水河断裂南东段、安宁河断裂、则木河断裂、龙门山断裂带、大凉山断裂等，以下将分别讨论这几条断裂的分段性、潜在地震能力和强震复发间隔等，为区域范围内高震级潜在震源区的地震活动性参数确定提供地质学依据。

（1）荥经—马边—盐津断裂带

地表有多条次级断裂组成，其深部是一条连续的北西向构造带，它是四川盆地与川西高原的分界断裂带。历史上已发生 1216 年雷波马湖 7 级地震，根据历史地震与构造类比估计该断裂的最大潜在地震震级为 7 级。但在该断裂的南端与近东西向断裂带交汇的部位有发生更大地震的可能。如在与东西向盐津断裂带的交汇部位发生 1974 年云南永善、大关间 7.1 级地震。因此交汇部位最大潜在地震可确定为 7.5 级。

（2）鲜水河断裂南东段

区域内仅包括了鲜水河断裂南东段康定以南部分，成为磨西断裂，呈一条主干断裂延伸，为全新世活动断裂，平均水平滑动速率估值为 8±2mm/a（周荣军等，2001），发生过 1786 年康定、泸定磨西间 7¾级地震，强震复发间隔在 300—500a。根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 8.0 级。

（3）安宁河断裂

安宁河断裂带以冕宁和西昌为界，可分为三段：北段为全新世活动断裂，平均水 平滑动速率在 4.7—5.3mm/a 左右，最大潜在地震能力在 7.5 级左右，最晚一次强震的发生时间在 A.D.1480 年，距今时间已 521a。根据古地震研究成果，该断裂段的强震平均复发间隔在 570—660a（闻学泽等，2000；周荣军等，2001），因此未来百年内强震复发的可能性极大。中段由三条断裂呈羽列组合而成，为全新世活动断裂，平均水平滑动速率在 5.5mm/a 左右，最大潜在地震能力在 8 级左右，发生过 A.D.1536 年 7½级地震和 A.D.1952 年 6.7 级地震，根据该断裂段古地震研究结果，7.0 级以上的强震复发间隔约在 900a 左右，未来百年内存在强震复发的可能性, 冉永康等（2008）通过地质地貌调查与古地震研究，在安宁河断裂北段的紫马跨和野鸡洞揭示出 3 次古地震事件，分别为距今约 1634~1811a、1030~1050a 和 280~550 a， 左旋位移量在 3 m 左右，复发间隔为 520~660 a；同时认为大海子-干海子最新一次古地震事件为 1536 年西昌北

7½级地震，其它古地震事件分别发生在距今 1768~1826、2755~4108 和 4108~6593 a，重复间隔为 1300~1900 a，并获得了晚全新世以来的左旋位移速率为 6.2mm/a，垂直位 移速率 1.4mm/a；断层水平和垂直位移速率的比例约为 4：1。该段 1913 年发生过 1 次小盐井 6.0 级地震。南段活动性相对较弱，为早中更新世活动断裂，迄今未为 6 级以上强震的历史记载。

根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 8.0 级。

（4）则木河断裂

①则木河断裂北西段（西昌—松新段）该断裂段长度约 90km，断错地貌清晰，晚第四纪以来的平均水平滑动速率为 4.7mm/a 左右。历史上曾发生过公元 814 年西昌 7 级地震和 1850 年西昌大箐梁子 7½级地震，最晚一次地震的地表破裂展布于西宁—松新间，长度约 90m，最大同震位错在大箐梁子一带可达 5.7m。根据大箐梁子和四呷布史两个探槽的研究结果，则木河断裂北西段全新世以来发生过 7 次古地震事件，大震复发间隔介于 1036～1758a 之间，均值为 1323a。

②则木河断裂南东段该断裂段长度约 40km。则木河断裂南东段的活动性远逊于北西段，但仍可以见到断错地貌现象，晚更新世以来的平均水平滑动速率为 2～3mm/a。按走滑型断裂的 1 次 7 级左右地震的平均同震位错约为 1.5～1.8m 可以估计，该断裂段大地震的复发间隔约为 500～800a。

根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 8.0 级。

（5）龙门山断裂带

该断裂带主要由茂汶—汶川断裂、北川—映秀断裂和彭县—灌县断裂等三条断裂组成，其中茂汶—汶川断裂的茂汶—草坡段、北川—映秀断裂北中段、彭县—灌县断裂的都江堰—天全段和茶坝—林庵寺断裂的石坎子以西段为全新世活动段，平武—青川断裂和茶坝—林庵寺断裂的石坎子—茶坝段为晚更新世活动段，历史上曾发生过数次 6 级左右地震，最大地震为 2008 年汶川 8.0 级地震。根据断裂分段性及活动性差异，划分出汶川 8.0 级、宝兴 7.5 级、青川 7.0 级、大邑 7.0 级、彭州 6.5 级和竹园 6.5 级五个潜在震源区。龙门山断裂带单条断裂上的滑动速率估值在 1mm/a 左右，估计 8 级大地震的复发间隔在 2000～3000a。

（6）大凉山断裂带

可以将大凉山断裂带划分成海棠-越西、普雄河、布拖和交际河四个不同的段落，这四条段落均呈左阶或右阶羽列排列，羽列距 4－20km 不等。大凉山断

裂的四条次级断裂均存在明显断错地貌现象，晚更新世晚期－全新世以来的平均水平滑动速率介于 2.6－3.9mm/a 之间，平均值约为 3mm/a（周荣军等，2003）。这四条断裂均有可能为独立的破裂单元。有史料记载以来，大凉山断裂上迄今尚未有 6 级以上强震发生，但探槽业已证实该断裂发生过史前强震，相对较长的强震复发间隔及历史地震的漏记有可能是该断裂上无强震记载的主要原因。按大凉山断裂带的分段结果，可以将大凉山断裂带划分为石棉 7.5 级潜在震源区、昭觉 7.5 级潜在震源区、布拖 7.5 级潜在震源区。

（7）昭通断裂带

该断裂长逾 150km，对地层发育与区域构造变形也起明显控制作用。地表多条断层不连续分布，控制着昭通、鲁甸新生代盆地发育，其线性地貌清楚。野外调查发现，断裂断错了晚第四纪地层，具有晚第四纪新活动性。沿该断裂带历史上发生多次 5-5.5 级地震，是一条中、小地震活动带。根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 7.5 级。

（8）黑水河断裂

黑水河断裂北接鲜水河断裂、南连小江断裂，位于安宁河断裂与大凉山断裂之间总长约 200km。黑水河断裂可分为北、中、南三段，最新研究成果表明该断裂具备全新世活动性。该断裂探槽开挖揭示出的地层变形证据，识别出了全新世以来的 4 次古地震事件，地震平均复发间隔约为 2130 年，其中最新事件应为 1489 年西昌-越西地震。 根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 7.5 级，将该断裂归入布拖 7.5 级潜在震源区。

2.5.4 四川盆地中强地震发震构造评价

与目标区密切相关的四川南部及东部地区，地表主要表现为一系列标准的隔档式 褶皱，背斜成山，向斜为谷，且背斜构造具有大致等间距排列的梳状构造特点。有史料记载以来，川南及川东地区仅发生过十余次中强地震（4.7—6 级），最大地震为 2021 年泸县 6.0 级地震，这些中强地震一般都发生在背斜构造的轴部或陡翼。地质资料及深部物探资料表明，区内的盖层构造在地表至三叠系底界地层内比较清楚，再向下则迅速减弱，消失于某一深度的低强度层之上，表明背斜构造受沉积盖层中某种深部的滑脱面的制约，褶皱通常被限于 3—6km 的深度范围。断层与背斜构造共生，背斜隆起的地方正是断层倾角变陡，断距增大的场

所；在地腹深处，随着背斜两翼变得平缓，断层的倾角也相应变小，断距锐减最后消失于水平地层中。这种现象表明，盖层中的背斜构造与断层活动有着密切的成因联系。Chester（1991）认为这种情况下背斜的形成和发展是断层不断延展的结果，称之为“断层弯曲或断层扩展背斜”，并通过模拟实验重现了这种褶皱作用过程。根据实验结果，可以把区域及邻区背斜构造的成因作如下简化说明（钱洪等，1992）：

区内盖层建造序列特征表明，沉积岩系由脆性的灰岩和塑性的泥岩、页岩相间而成（图 2.5-1），它们具有不同的力学性质。喜马拉雅运动中，由于强大的水平构造力的作用，在基底断裂运动的同时，盆地内的盖层表现为沿不同层次塑性岩层的缩短和滑动。由于滑动岩层的厚度差异和物性差异，特别是盆地内基底断裂活动而造成的基底变化，使盖层滑动受到阻碍，滑动面上部逐步积累起来的应力使脆性岩层破裂，形成低角度剪切破裂面。水平滑动面上的缩短运动开始沿低角度剪切破裂发展成逆掩断层。随着滑动的推进，断层的前方逐步延伸。研究区域的中生代地层大多为低强度的砂页岩和泥岩，内摩擦角小，使断层面的倾角明显增大。在水平滑动转向逆掩运动的过程中，由于断层坡上的摩擦和拖拽，断层上盘形成小规模的背斜褶皱。随着断层不断延伸，背斜不断发展，在核心部位可出现反向冲断层。华蓥山基底断裂以东为相对塑性的基底，比西侧的花岗岩质基底更易于沿挤压方向产生压缩，从而带动上覆盖层的缩短。在相似的成因条件下，可形成一系列大致平行的隔档式褶皱系。与背斜密切相关的逆断层可直达地表，也可隐伏地下，其主要取决于断层扩展背斜作用的发展程度。

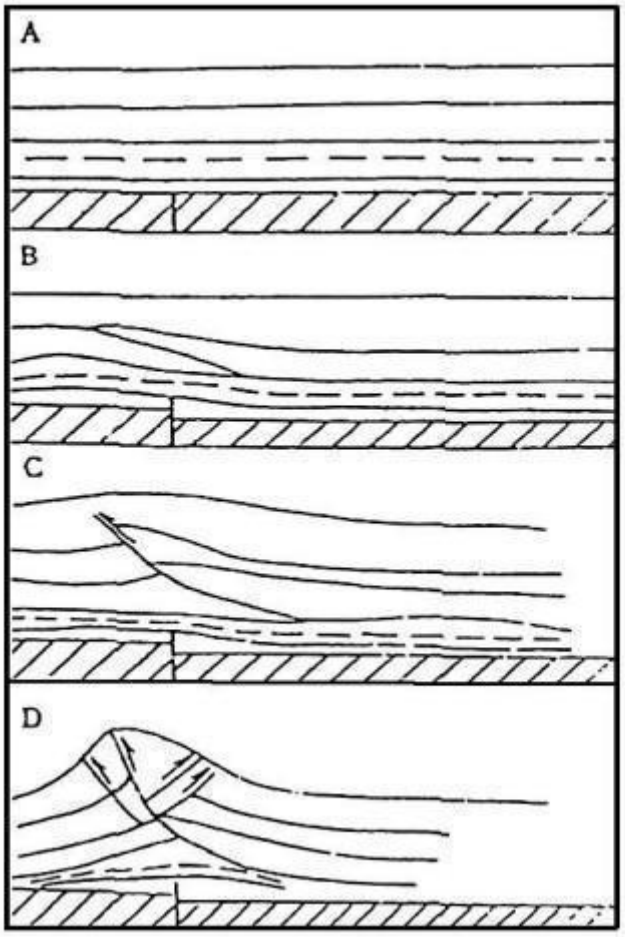


图 2.5-1　盖层构造形成模式示意图

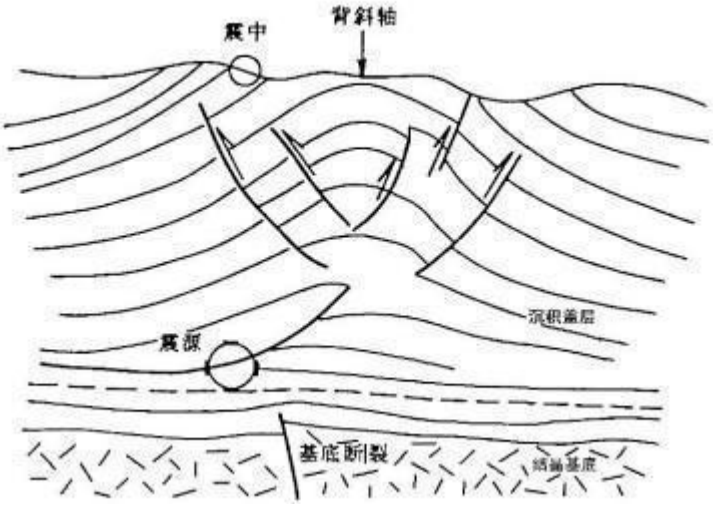


图 2.5-2　川南及川东地区地震构造关系示意图（钱洪等，1992，有修改）

这类特殊的盖层构造往往对地震活动有重要的控制作用。如图 2.5-2 所示，当盖层在滑脱面上缓慢滑动过渡到低角度逆掩断层时，断面的摩擦和障碍导致该处应变能的积累，积累的应变能达到断面附近岩石的强度极限时，发生地震。由于逆掩断层与背斜构造成因上的联系，因而震中位置位于背斜核部附近，且等烈

度线的长轴与背斜轴方向一致，并导致震级小、震源浅、震中烈度略偏高、极震区范围较小的特点。如 1989 年江北统景 4.7、5.3 级地震，震源深度为 5Km，震中烈度为VII度；1985 年自贡 4.8 级地震，震源深度 5—7Km，震中烈度为VII度以及 1854 年南川 5½级地震，震源深度不明，震中烈度为VII度等。这一类地震皆与滑脱面之上背斜核部的断层活动有关。在这样的震源深度范围内，主要为泥岩、页岩、偶夹砂岩，由于岩石强度低，不可能积累大量的应变能，这也是这类构造地震强度较低的重要原因。考虑到研究区域已有两千余年的历史地震记载资料，因此已发生的地震强度有可能代表了这一类盖层构造的实际地震水平。

航磁、重力、电磁测深及地震爆破等地球物探资料已经查明川南及川东地区基底断裂的存在，这些基底断裂均具明显的地球物理场标志。值得注意的是目标区外围为数不多的中强地震发生的位置均与基底断裂的空间展布有密切关系，即中强地震发生在不同方向的基底断裂的交汇部位：1854 年南川 5½级地震发生在七曜山—金佛山基底断裂与长寿-遵义基底断裂的交汇部位；1989 年江北统景 4.7、5.3 级地震发生在长寿-遵义基底断裂与涪陵-长寿基底断裂的交汇部位。推测上述地震的发生可能与基底断裂相交形成的特殊环境以及基底断裂的微弱活动、深部应力的集聚有某种联系，具体的构造机制尚待进一步研究。

3 近场区地震活动性和地震构造评价

本章旨在通过对地震活动性、新构造运动特征、主要断裂特征及其活动性的分析，判断近场区域可能发生地震的地点，综合评价近场及场区地震构造，为确定近场潜在震源区和场地地震动参数提供依据。

3.1 近场地震活动性

按照国家标准《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）中对近场范围的要求，将目标区的近场地震活动性的研究区域确定为东经 105°1′30″~105°37′50″、北纬 28°53′10″~29°24′40″。

3.1.1 近场地震资料概况

在近场范围内，自有历史地震记载以来，迄今已记录到 M≥4.7 级的地震只有 1 次，为 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震（表 3.1-1，图 3.1-1）。该地震对目标区的最大影响为Ⅶ度。

表 3.1-1　近场区内破坏性地震目录（M≥4.7，1732～2023 年 10 月）

序号	地震日期	北纬（°）	东经（°）	参 考 地 点	震级	震源深度（km）	地震震中烈度	精度
1	20210916	29.2	105.34	四川泸县	6.0	10	VIII	1

注：破坏性地震震中定位精度（1970 年前）：1 类，误差≤10km；2 类，误差≤25km；3 类，误差≤50km；4 类，误差≤100km；5 类，误差＞100km。地震台网震中精度（1970 年后）：1 类，误差≤5km；2 类，误差≤15km；3 类，误差≤30km；4 类，误差＞30km

近场范围内自 1970 年 1 月～2023 年 10 月共记到 M=2.0～4.6 级中小震 610 次，表 3.1-2 给出了各震级档次的近代中小地震频次分布一览表；从表中可见，近场范围内的中小地震活动绝大多数为 2.0～2.9 级的小震。（图 3.1-1）

表 3.1-2　区域各震级档次近代中小地震频次分布一览表

资 料 时 段	1970～2023 年 10 月		
震 级 分 档	2.0～2.9	3.0～3.9	4.0～4.6
地 震 频 次	503	93	14

表 3.1-3　近场区 M=4.0～4.6 地震目录（1970～2023 年 10 月）

地震日期	东经（°）	北纬（°）	震源深度（km）	震 级	参 考 地 点
19850329	105.07	29.35	29	4.0	四川隆昌
19870516	105.11	28.90	12	4.0	四川长宁
19930328	105.55	29.36	8	4.0	重庆荣昌

19980218	105.41	29.31	12	4.0	四川泸县
20090808	105.49	29.40	5	4.4	重庆荣昌
20091120	105.60	28.95	33	4.2	四川泸县
20100222	105.46	29.36	30	4.2	重庆荣昌
20100910	105.43	29.36	6	4.5	重庆荣昌
20111106	105.07	29.40	20	4.0	四川隆昌
20121110	105.22	29.32	25	4.2	四川隆昌
20121111	105.24	29.31	12	4.2	四川隆昌
20121111	105.23	29.32	22	4.3	四川隆昌
20161228	105.60	29.41	10	4.0	重庆荣昌
20210723	105.44	29.28	15	4.2	四川泸县

近场区内的现代地震空间分布不均匀，小震活动的集群特征表现为团簇状。现代小震主要分布在近场东北部安富镇、广顺镇；西北部圣灯镇；目标区以北的福集镇；南部胡市镇等地密集成丛、成带分布，近场其余地方中小地震活动较弱。

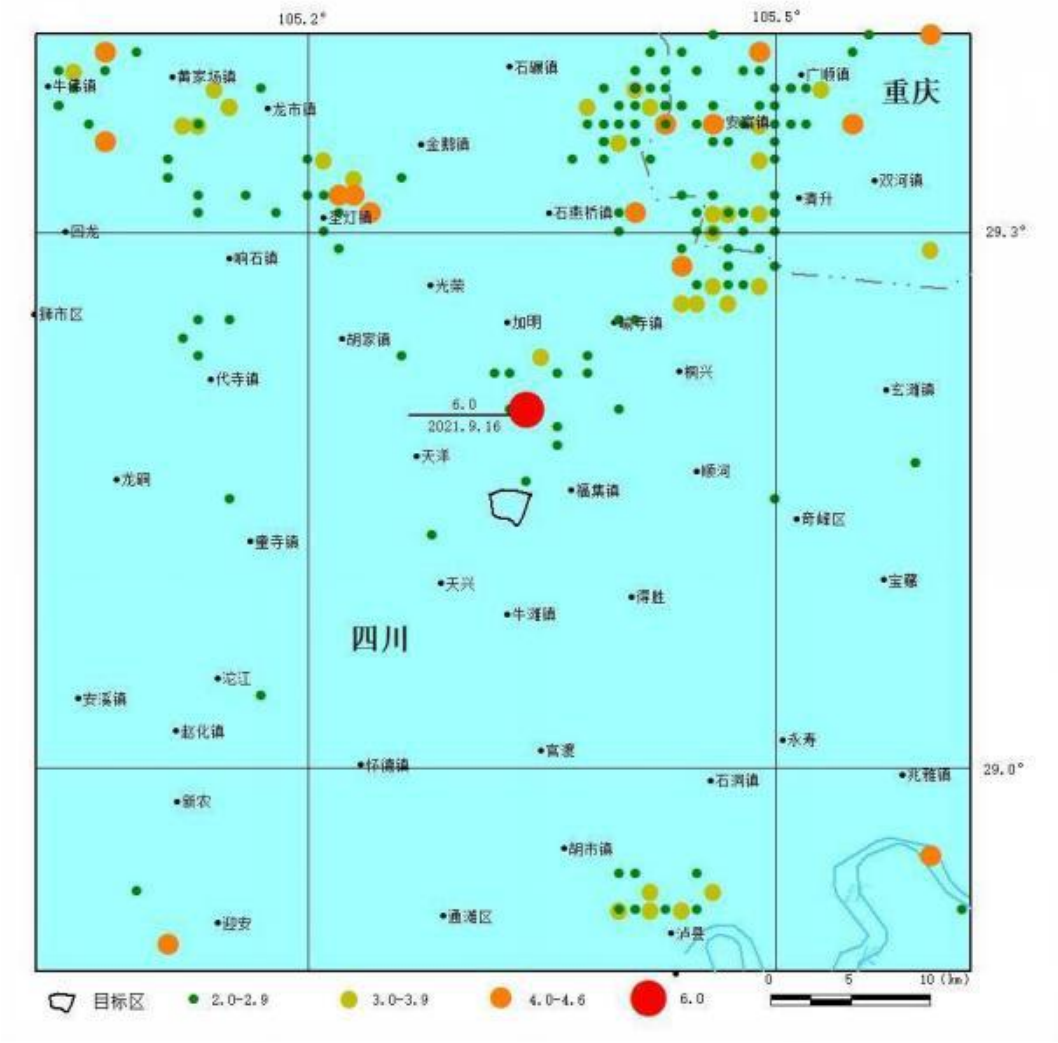


图 3.1-1　近场地震震中分布图

3.1.2 近场地震活动特征

对近场地震资料分析可知，近场区只记录到 1 次 M≥4.7 级的地震，为 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震，对目标区的最大影响为Ⅶ度。对近代小震资料分析可知，近场范围内的中小地震活动绝大多数为 2.0～2.9 级的小震。近场区内的现代地震空间分布不均匀，小震活动的集群特征表现为团簇状。现代小震主要分布在近场东北部安富镇、广顺镇；西北部圣灯镇；目标区以北的福集镇；南部胡市镇等地密集成丛、成带分布，近场其余地方中小地震活动较弱。

3.2 近场地貌地层和新构造运动的基本特征

3.2.1 近场区地貌

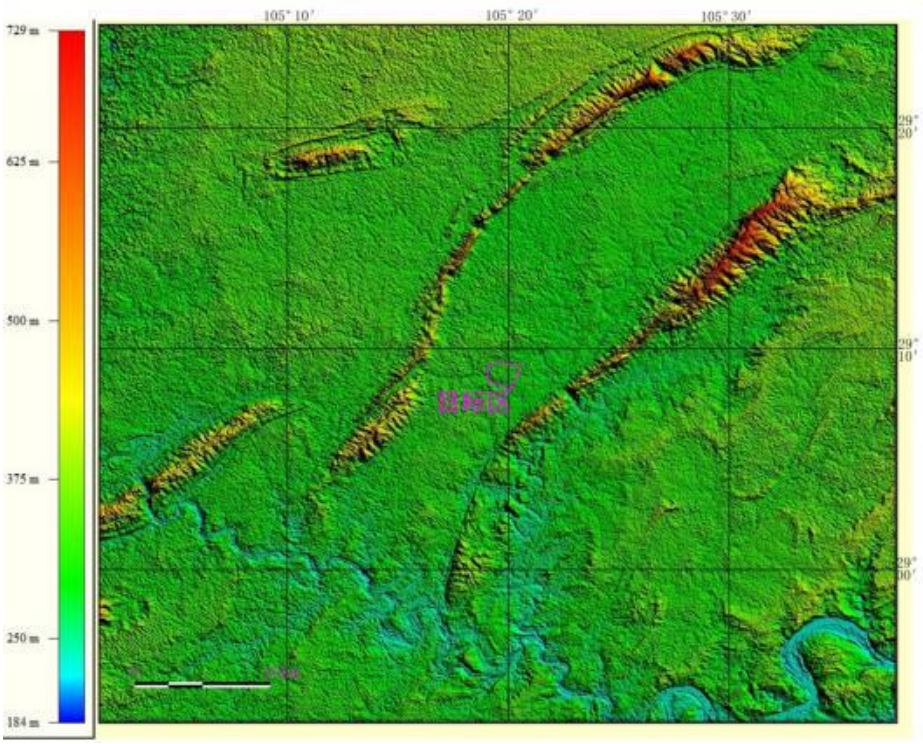


图 3.2-1　近场区 DEM 影像图

近场区位于四川盆地内部，近场区大部发育丘陵地貌，丘顶平坦，丘陵山顶之间分布树枝状水系。近场区北部和南部为低山地貌，属华蓥山山脉的分支，海拔高度多在 500—700m（图 3.2-1）。近场区中部发育长江、沱江河谷，普遍发育 5 级阶地：一、二级阶地阶面平坦宽阔，宽达 500-1000m，海拔多在 250m 以下，相对高差小于 30m；三、四、五级阶地分布于河谷两岸的基座台面上，海拔 260-400m。近场区内长江、沱江各级阶地的拔河高度见表 3.2-1。

表 3.2-1 河流阶地对比简表

时代	代号	级次	阶地情况[拔河高度（m）/ 阶地性质]	
			沱江	长江
全新世	Q_4^1	Ⅰ	4—10/堆积	11—16/堆积
晚更新世	Q_3^3	Ⅱ	20—35/基座	30—39/基座
	Q_3^2	Ⅲ	40—60/基座	45—65/基座
	Q_3^1	Ⅳ	70—86/基座	75—96/基座
中更新世	Q_2	Ⅴ	90—104/基座	105—125/基座

近场区第四纪以来的构造运动以整体性、间歇性的微弱隆升为主。近场区有 2 期夷平面，其相应夷平面的高度分别为 300～400m 和 100～200m。前者高程多在 300—400 之间，代表了乌江期夷平面，形成于中更新世。1 近场区内的水系侵蚀切割乌江期夷平面，形成规模不等的侵蚀谷地。长江、沱江河谷是近场区内最大的河谷，从丘顶的乌江期夷平面下蚀的深度在 100-125m。根据长江、沱江对乌江期夷平面的下蚀深度为 100-125m 来推算，近场区第四纪中更新世以来的地壳平均抬升速率估计为 0.13mm/a～0.17mm/a。

近场区处于川东南平行褶皱岭谷区南端与大娄山的复合部，地貌主要分为盆中丘陵和盆中山地两种地貌类型（图 3.2-2），总的特点是境内地势由西北向东南缓倾，大部分属盆中丘陵，海波高度一般在 200-350m。盆地山地地貌主要分布于近场区中北部，海波高度一般在 350-750m。

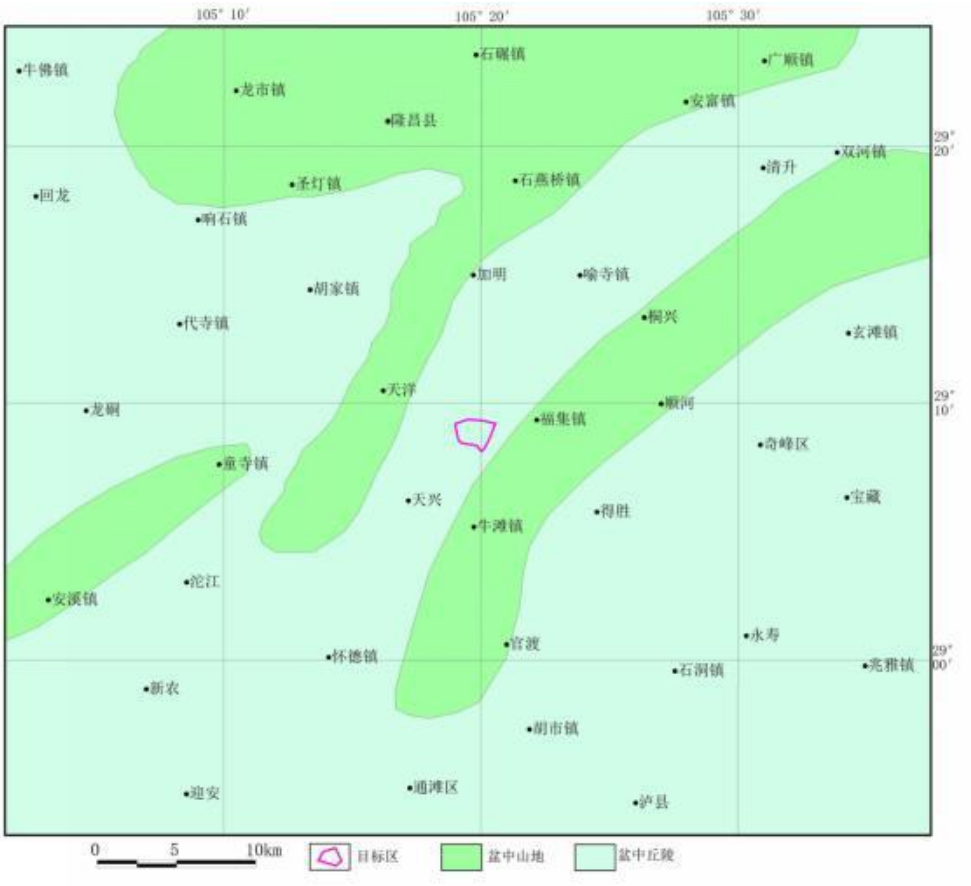


图 3.2-2　近场区地貌分区图

3.2.2 近场区地层

近场区内侏罗系地层广泛分布于全区，岩性主要为紫红色砂岩、砂质泥岩及泥岩不等厚互层；三叠系地层在背斜核部分布，岩性为灰色、灰黑色长石石英砂岩夹泥页岩及煤层；第四系松散堆积物沿河流两岸小面积分布。地层由老至新主要有三叠系上统须家河组（T_3xj），侏罗系下统珍珠冲组（J_1z），侏罗系中下统自流井组（$J_{1\text{-}2}z$），侏罗系中统新田沟组（J_2x）、下沙溪庙组（J_2xs）、上沙溪庙组（J_2s），侏罗系上统蓬莱镇组（J_3p）及第四系（$Q4^{al+pl}$-$Q2^{al+pl}$），见图 3.2-3。

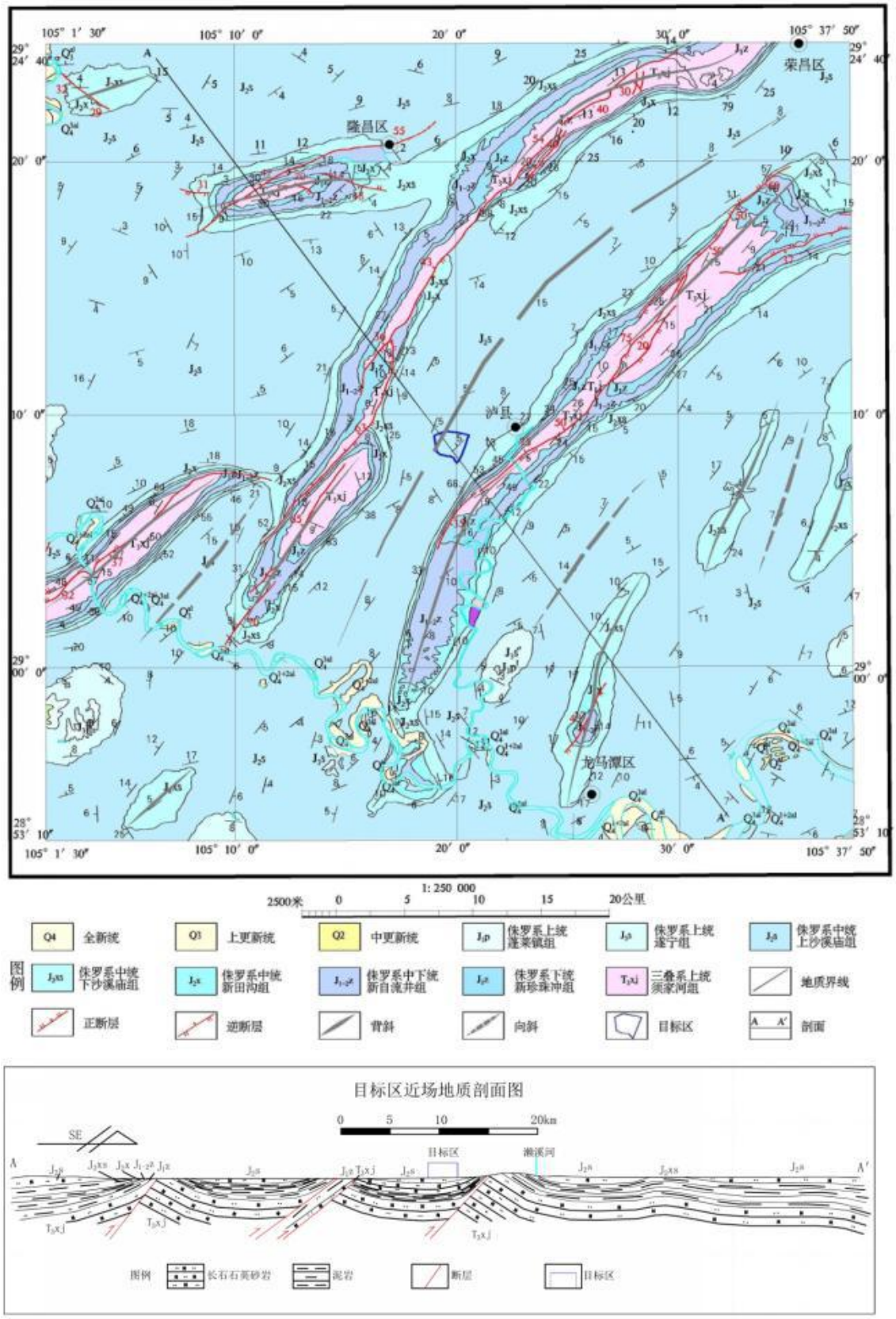


图 3.2-3　近场区地质构造图

3.2.3 近场区新构造运动特征

近场区的地质构造表现出继承性的特点，不同程度上继承了先存构造格局和

活动方式。喜山运动基本上奠定了区域内总体褶皱隆起、不同地块存在隆起形式和幅度差异的基本构造格局新构造运动也大体继承了这一基本格局，隆起区依然处于隆起抬升状态，隆起强烈地区依然抬升幅度大。但在运动强度、幅度和方式上，又有其新生性，四川盆地内的由褶皱隆起转变为大面积缓慢间歇性整体抬升，隆起幅度和断裂构造活动也明显减弱。新构造运动在近场及附近地区亦表现为间隙性抬升，形成了多级夷平面和河流阶地。

3.2.4 近场区遥感影像解译

（1）影像数据选择

针对不同比例尺的精度要求，米级分辨率遥感影像用于活动断层宏观线性特征和地质地貌单元遥感解译，亚米级分辨率遥感影像用于断层错断地貌、构造精细结构、微地貌遥感解译和参数量测。根据近场区的地形地貌特点，以及资料现有情况，选择空间分辨率优于1.0米的Bigmap GIS提供的Mapbox卫星高精度影像图作为遥感数据源。

Bigmap多源卫星影像包括Quick Brid、LANDSAT-7、IKONOST 和SPOTS 等多种数据格式真彩色影像，其中LANDSAT-7 影像的地面分辨率为15m，SPOT5可以提供分辨率为2.5m的影像、IKONOS可提供1m左右的影像，而快鸟就能够提供最高为0.61m的高精度影像。其数据格式为带有Alpha通道的三波段（红、绿和蓝）彩色影像图，格式为Tiff。此类影像图是经过彩色合成、图像增强、辐射矫正等处理，经空间矫正后可以直接用于图像分析处理。经空间矫正过后，图像精度可以优于1.0米，可满足1:1万比例尺遥感解译。

由于地表受人类活动及工程建筑影响较大，本项目选择2020年影像图作为最终数据。

（2）影像数据处理

在充分收集分析近场范围地物化遥、地震等资料的基础上，对遥感影像进行坐标与投影设置、校正与配准、融合与镶嵌、分幅剪裁等数据预处理，以满足精度的要求，再结合 DEM 数据，进行近场全区遥感初步解译，形成全区遥感解译的活动断层基本构造格架以及全区新构造活动的初步分析，宏观掌握活动断层及地貌发育信息。解译内容主要包括：

1）地层要素：解译松散沉积层和基岩等地层单元，区分松散沉积层和基岩，

详细解译划分第四系地层及其类型。

2）地貌要素：阶地识别与分级，冲（洪）积扇的识别与分期，水系、冲沟、裂点提取，夷平面、基岩残山、古滑坡体、台地等。

3）构造地貌要素：断层陡坎、断错阶地、断层崖、地表破裂带、断错洪积扇、断塞塘等。

遥感图像增强处理空间增强方法有两种：

1）平滑：可采用中值滤波、均值滤波和低通滤波进行平滑，去除影像噪声，抑制影像细节，能突出宏观结构特征；

2）锐化：可采用定向检测和高通滤波等算法进行锐化，能突出影像边缘、线性目标或某些亮度变化率大的部分，突出断层陡坎、沟谷等线性构造特征。

（3）影像数据解译

以影像资料与DEM模型为基础，结合地质资料，对近场区进行了构造解析，近场区构造以北东向线性构造为主，发育北东向褶皱，在褶皱核部发育有断层，主要发育有薄刀岭断层、黄泥垭断层、天洋坪断层、大凹场断层、白云寺断层、堆金湾断层、阳高山断层。近场区内，除了20万地质图实测的断层线性构造外，还解译出4个线性特征点（图3.2-4）。根据现场工作复核，解译的4个线性特征未发现断层特征。

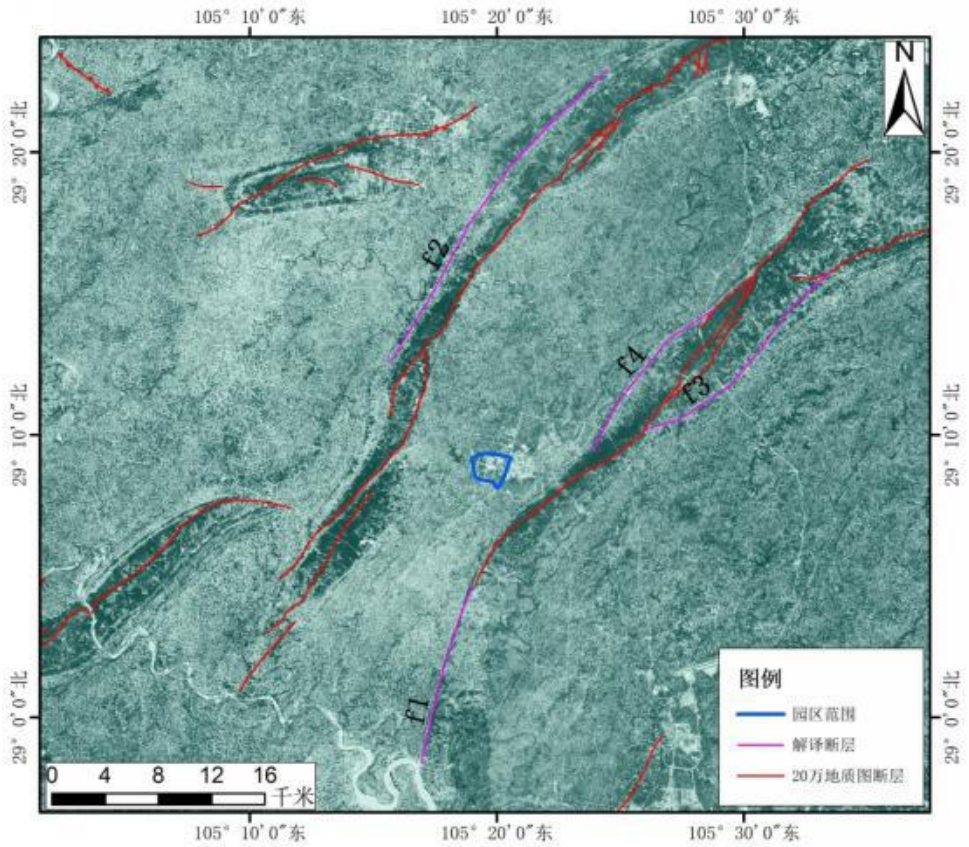


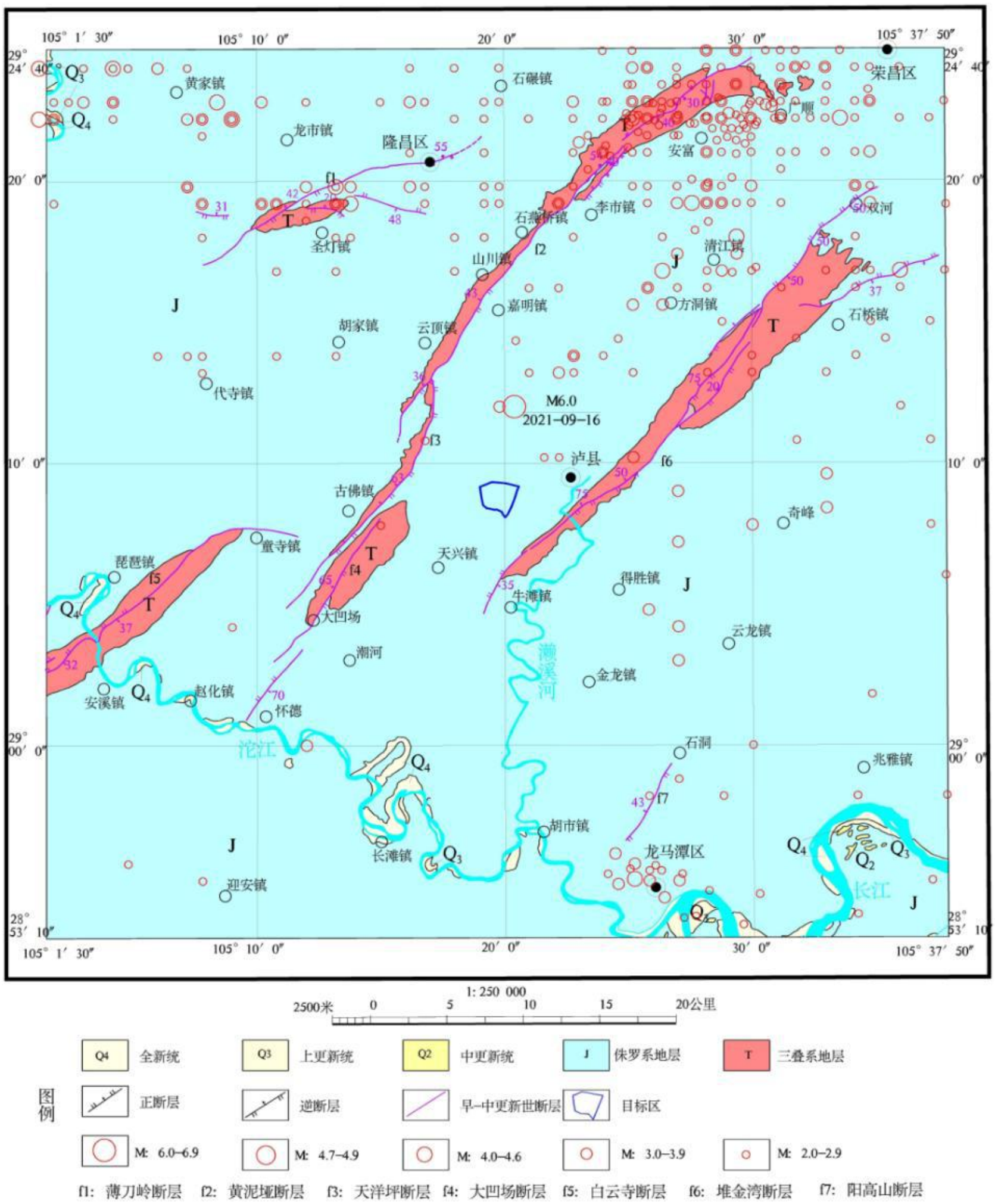
图 3.2-4　近场区遥感解译图

3.3 近场区主要断裂特征与活动性

近场区的断裂构造不发育，主要为北东向。整体来说，近场范围内断裂构造为北东向为主的华蓥山断裂带。具体来看，近场范围内华蓥山断裂带主要由薄刀岭断层、黄泥垭断层、天洋坪断层、大凹场断层、白云寺断层、堆金湾断层、阳高山断层等一系列北东向次级断裂组成，主要断裂特征见（见图3.3-1、表3.3-1）。

表 3.3-1　近场区主要断裂特征及活动性一览表

编号	断裂名称	断裂产状	断裂长度（km）	距目标区距离（km）	断裂性质	最新活动时代
f1	薄刀岭断层	60°/NW∠30°-42°	18	21	逆断层	Q_P^{1-2}
f2	黄泥垭断层	N40° E/NW∠30-70°	25	8.5	逆断层	Q_P^{1-2}
f3	天洋坪断层	N40° E/NW∠30-63°	18	4.5	逆断层	Q_P^{1-2}
f4	大凹场断层	N30°E/NW∠28-43°	11.6	6.7	逆断层	Q_P^{1-2}
f5	白云寺断层	N45°E/SE∠37-77°	7.2	12.5	逆断层	Q_P^{1-2}
f6	堆金湾断层	N40°E/NW∠50-75°	22.4	3.1	逆断层	Q_P^{1-2}
f7	阳高山断层	45°-80°/NW∠60°-70°	6	20	逆断层	Q_P^{1-2}



1: 250 000

2500米 0 5 10 15 20公里

图例

Q4 全新统　Q3 上更新统　Q2 中更新统　J 侏罗系地层　T 三叠系地层

正断层　逆断层　早-中更新世断层　目标区

M: 6.0–6.9　M: 4.7–4.9　M: 4.0–4.6　M: 3.0–3.9　M: 2.0–2.9

f1: 薄刀岭断层　f2: 黄泥垭断层　f3: 天洋坪断层　f4: 大凹场断层　f5: 白云寺断层　f6: 堆金湾断层　f7: 阳高山断层

图 3.3-1　近场区地震构造图

3.3.1 薄刀岭断层（f1）

断层北起隆昌以东，南到河坝子，长 18 公里。走向北 60°东，倾向北西，倾角 30-42°，最大断距 176 米。斜截圣灯山背斜，断于须家河组至上沙溪庙组中。断面舒缓波状，上有断层泥，两盘均有小型压性断层与之平行伴生，为压性逆断层。断层地貌特征不清晰，断裂穿越河流未见构造意义上的同步变形现象（图 3.3-3）。

在响石镇工厂后山，可见断层露头，上三叠统须家河组(T_3xj)砂岩逆冲于下侏罗统珍珠冲组粉砂岩组(J_1z)之上（图 3.3-2），断层破碎带宽约 0.5m。

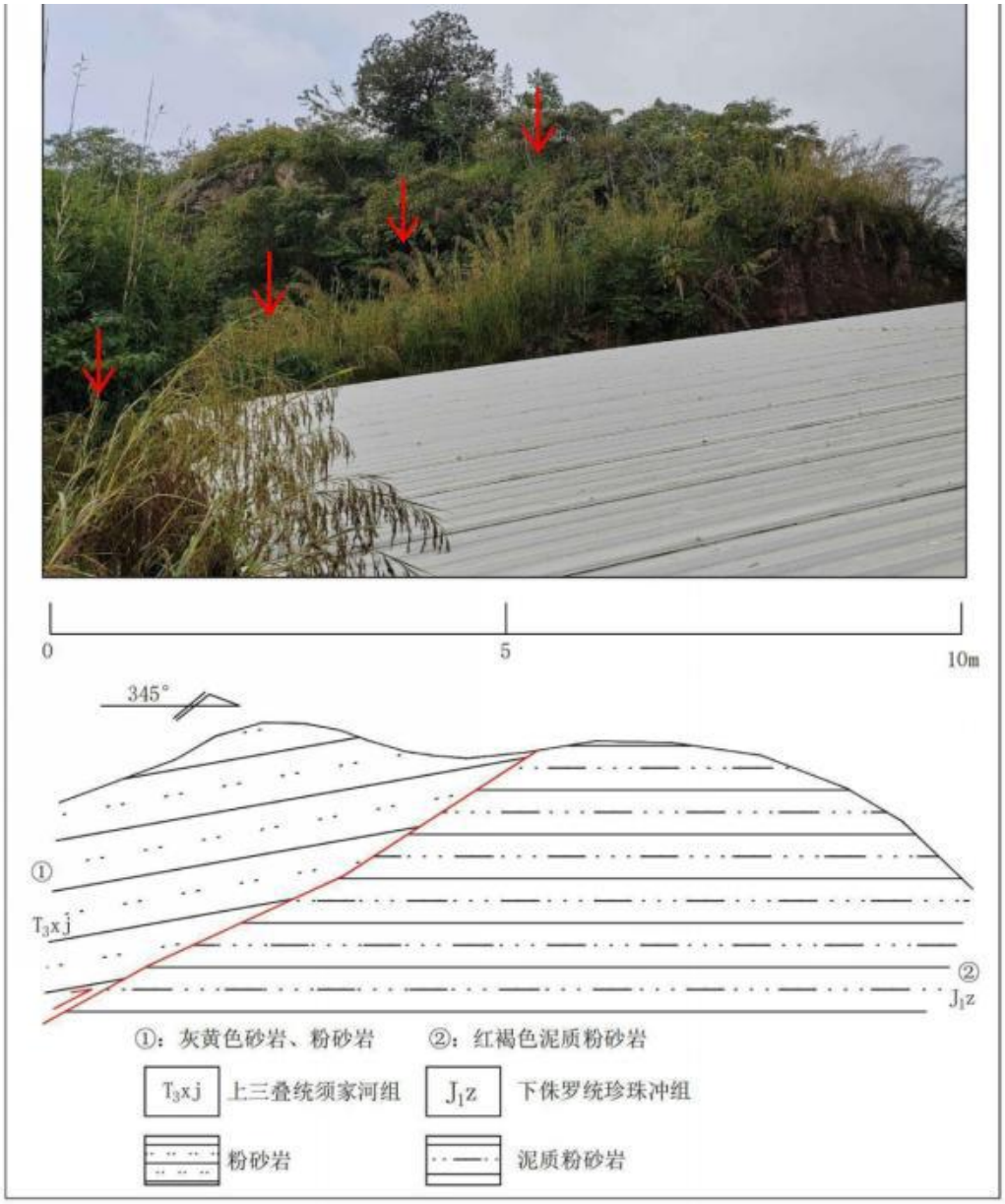


图 3.3-2 响石镇工厂后山断层剖面

图 3.3-3　响石镇工厂后山断层地貌（镜向 NE）

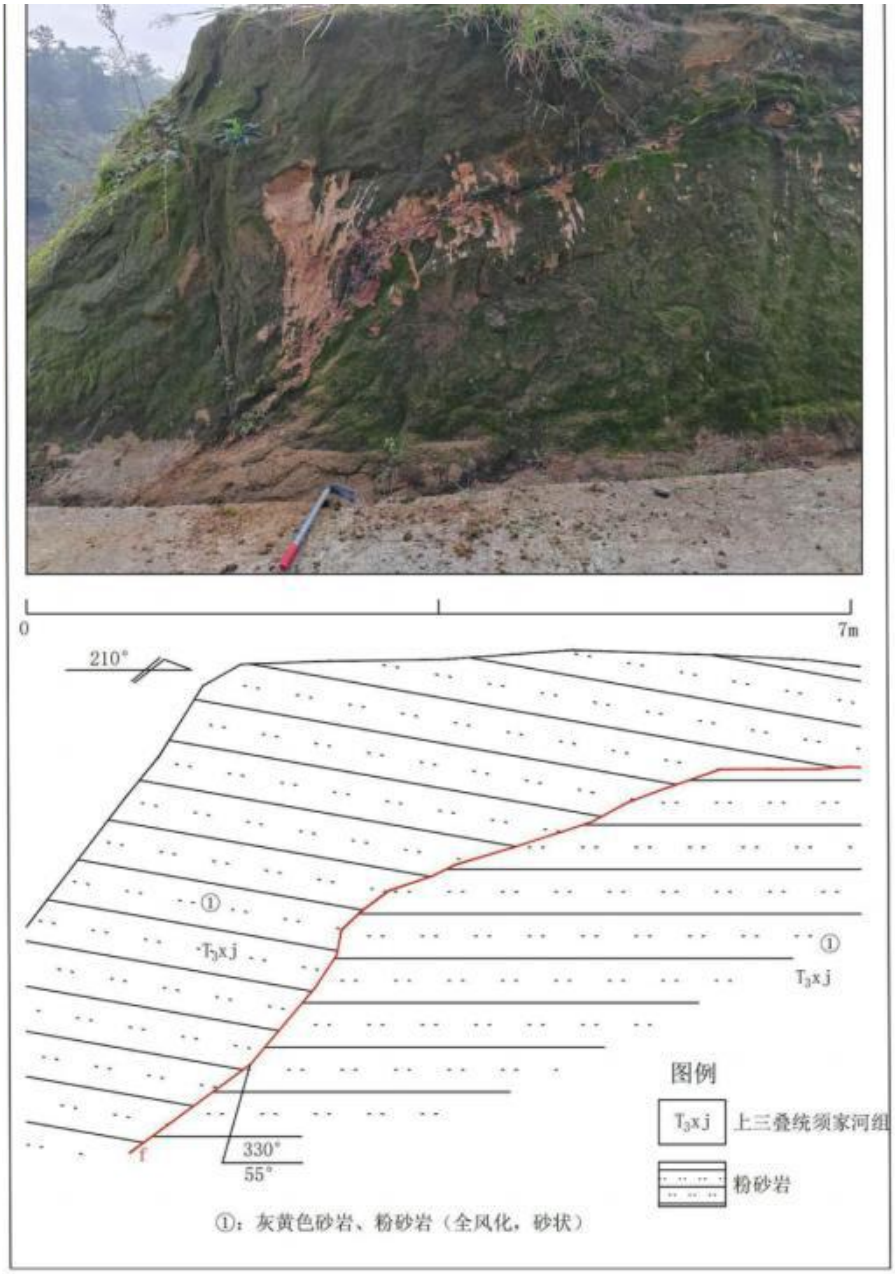


图 3.3-4　响石镇山腰公路边断层剖面

在响石镇山腰公路边（图 3.3-4），可以断层露头发育于三叠系长石石英砂

岩中，断层产状为 N55°E/NW∠55°，断层面紧闭，无明显活动痕迹。发育宽约 0.3m 的碎粉岩，碎粉岩固结坚硬。

根据断裂地貌特征及断层内部物质固结程度，断层应为早-中更新世。

3.3.2 黄泥垭断层（f2）

断层北端已插入螺观山背斜。北起隆昌三块石，中经马滩、云顶场，南至天洋坪，长 25 公里。走向北 40°东，倾向北西，倾角 30-70°不等，断距 125-375 米。断于须家河组至自流井组间，伴有小断层和小褶曲，为压性逆断层，为华蓥山断裂带的主干断层。断裂线性特征较清晰，表现为沟谷，在石燕桥镇潘家村附近发育II、III、IV级阶地，其中，II级阶地保存完好，在河谷平原上广泛发育、III、IV级阶地保存较好，发育于台地之上。根据区域地质资料类比，II、III阶地发育于晚更新世，IV级阶地发育于中更新世，断裂从III级阶地上通过，断裂通过处阶地未发生明显的构造变形。（图 3.3-5）。

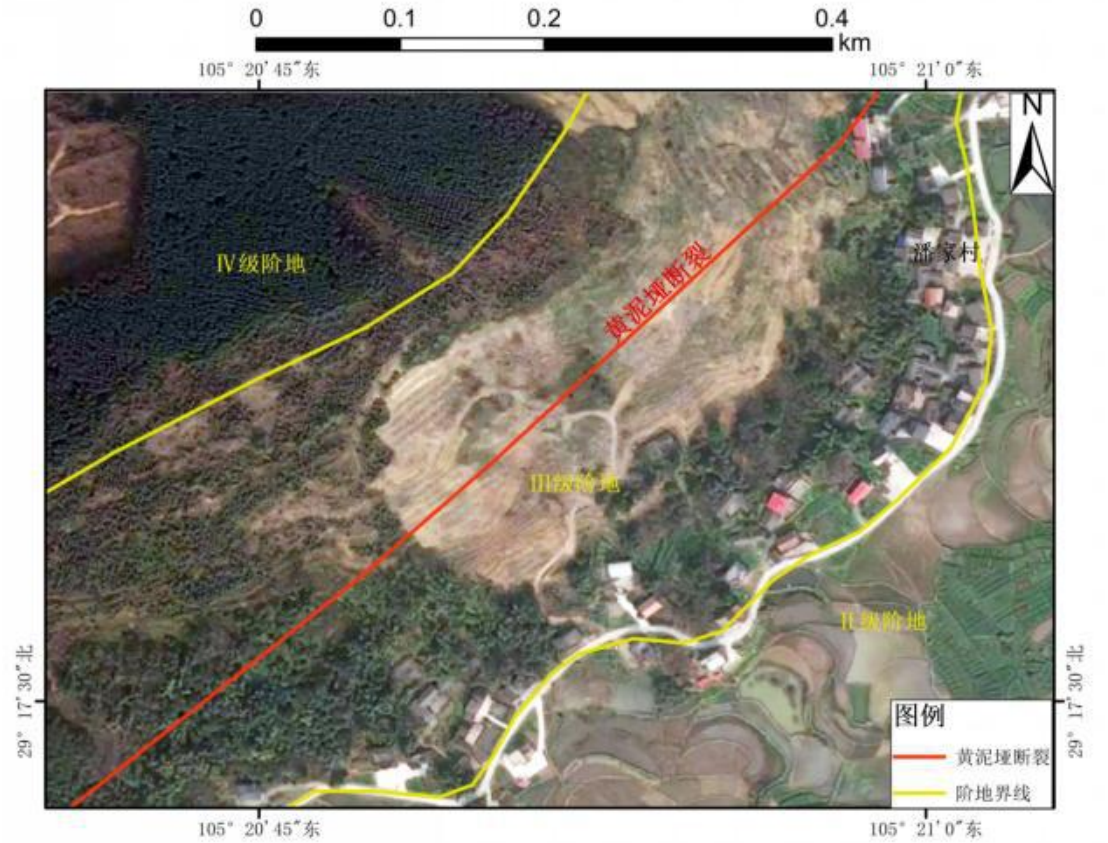


图 3.3-5　黄泥垭断裂地貌解译图

在山川镇国道 321 附近可见断层露头（图 3.3-6），地貌上呈沟谷。断层上盘为三叠系砂岩，顶部为灰黑色碳质页岩，碎片状，产状平缓，下部为灰黄色粉砂岩。下盘为灰白色砂岩，底部夹黑褐色碳质页岩。砂岩厚层状构造，岩石节理

裂隙发育。断层为逆断层，走向北东向，倾角较陡。

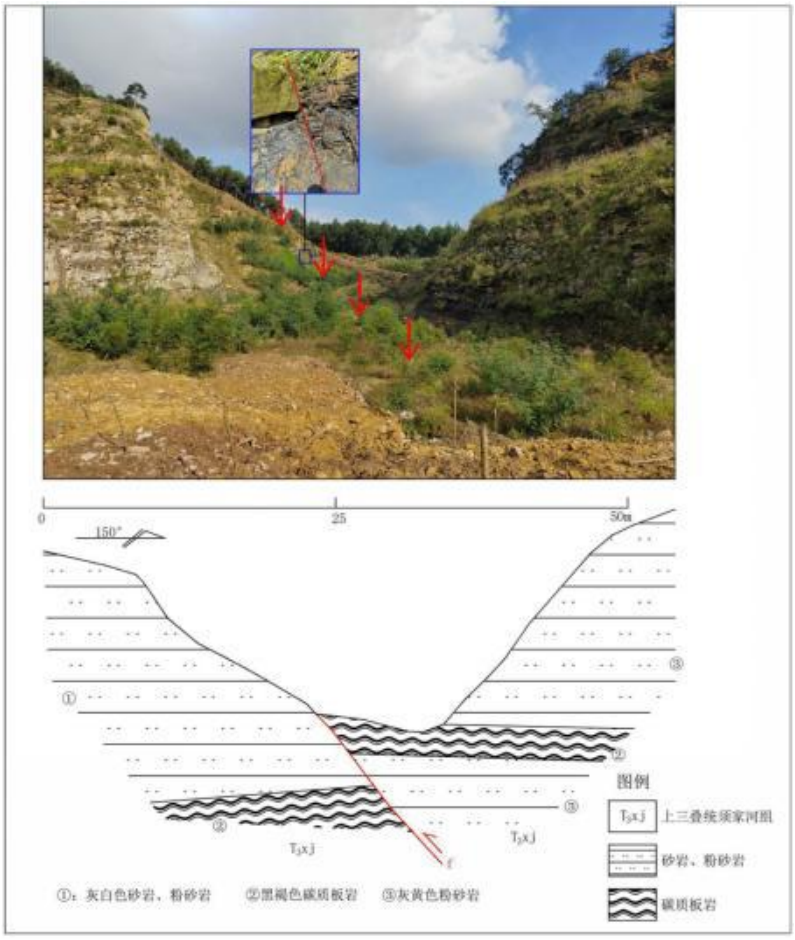


图 3.3-6　山川镇国道 321 附近断层剖面

在荣隆镇尖子山山腰小路边，可见断层露头发育于三叠系地层中（图 3.3-7），断层为逆断层，错断煤层。断层产状为N50°E/SE∠50°，发育宽约 0.5m的挤压片理化带。

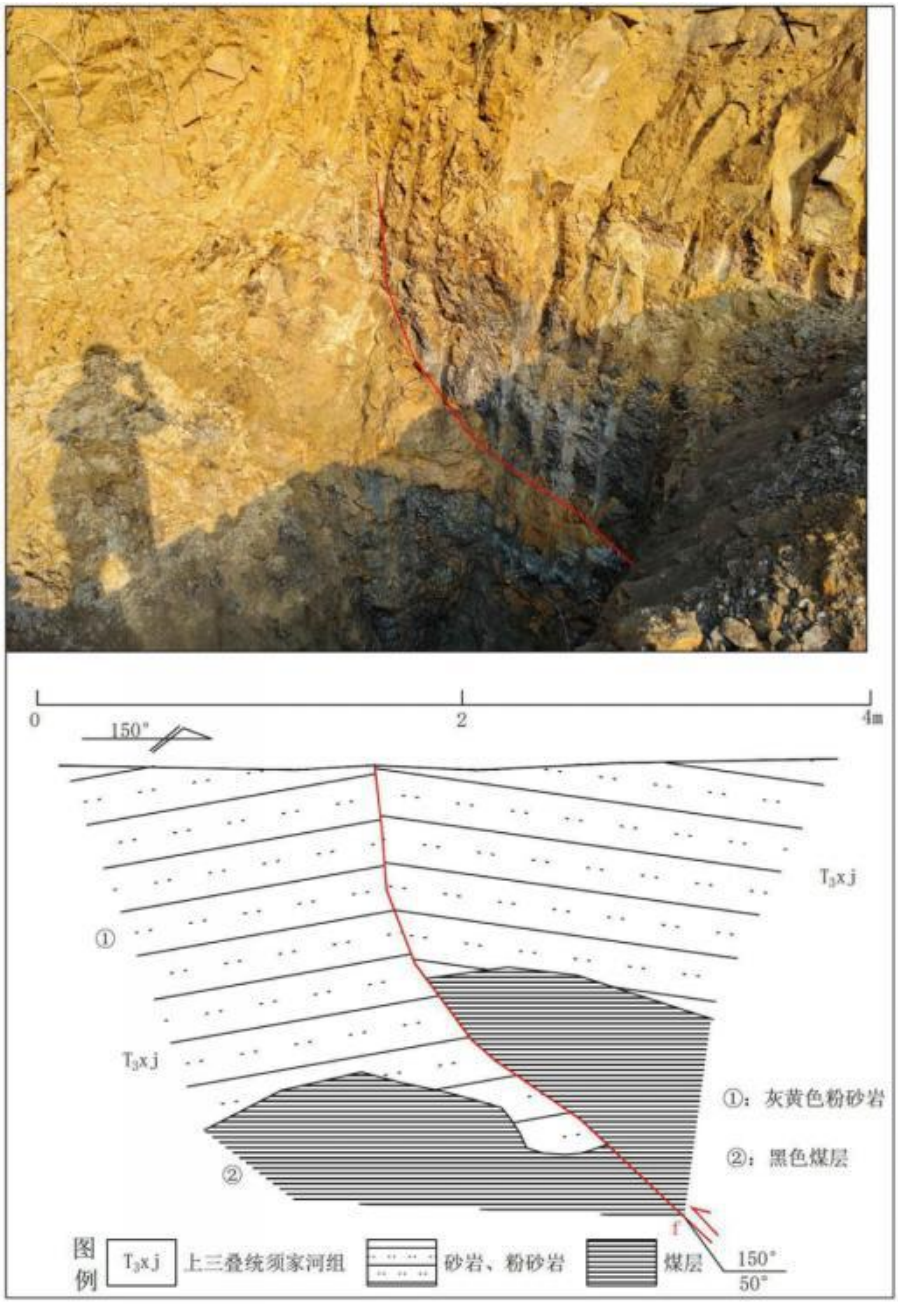


图 3.3-7　荣隆镇尖子山山腰小路边断层剖面

根据断裂地貌特征，断层应为早-中更新世。

3.3.3 天洋坪断层（f3）

断层南起大圳场，北至云顶场与黄泥址断层斜交，长 18 公里走向北 45°东，倾向北西，倾角 30-63°。天洋坪附近见须家河组逆冲于下沙溪庙组之上，上盘有牵引褶曲，为压性逆断层，为华蓥山断裂带的主干断层。

民政村西南公路边可见断层露头，发育于三叠系长石石英砂岩中（图 3.3-8），砂岩灰黄色，灰白色，厚层状构造。断层面清晰平直，可见擦痕，断层产状断层产状为N45°E/SE∠34°，发育宽约 0.1m的碎粉岩。

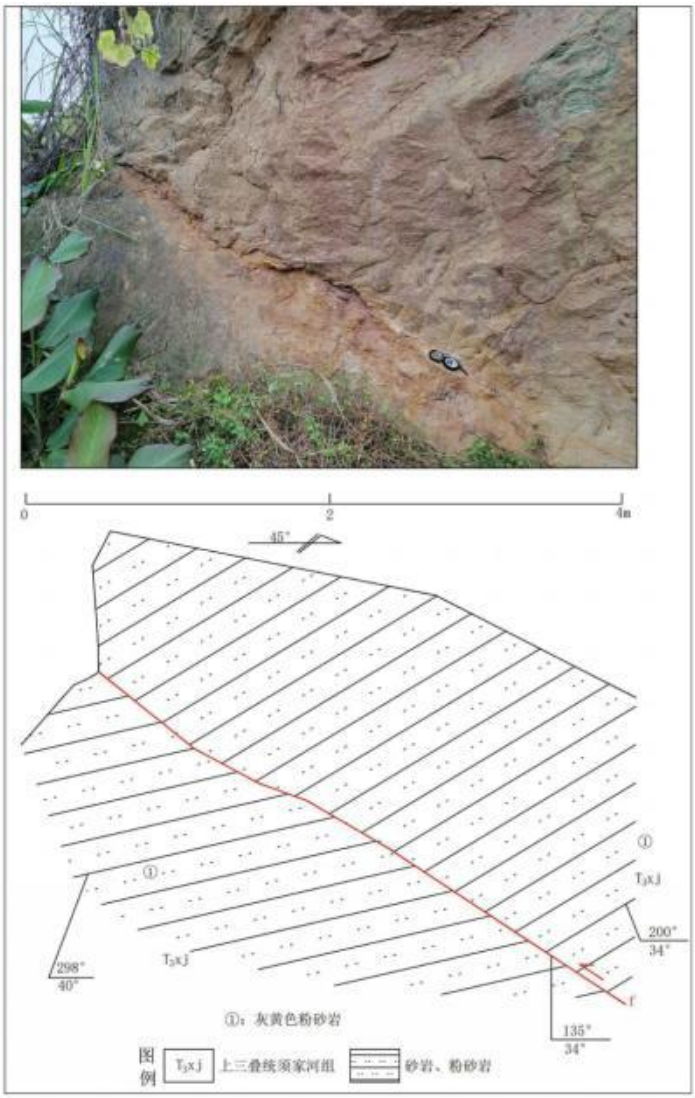


图 3.3-8 民政村西南公路边断层素描图

图 3.3-9 为民政村西南另一断层剖面，断层地貌上为沟谷。断层发育于三叠系砂岩中，断层产状 N45°E/SE∠22°，发育宽约 0.1m 的碎粉岩，碎粉岩固结紧密。

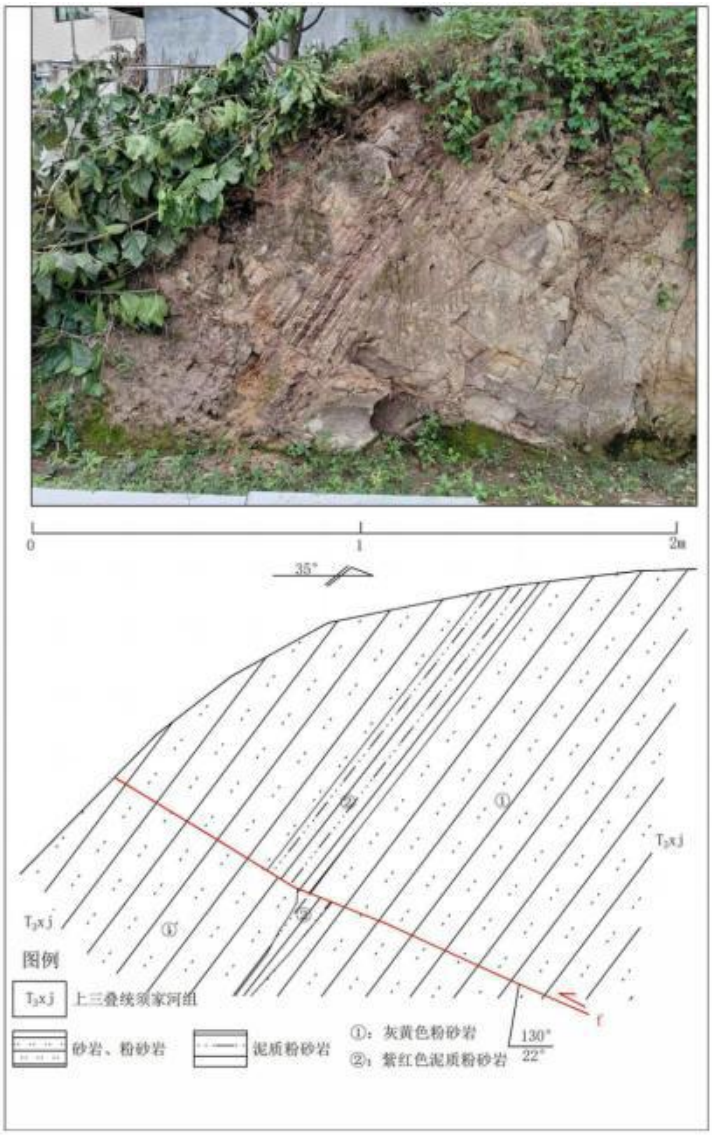


图 3.3-9 民政村西南公路边断层素描图

综合分析，断层最新活动时代应为早-中更新世。

3.3.4 大凹场断层（f4）

断层位于近场区西南部，南起大城乡，向北东方向沿王坪乡和云顶镇一带延伸，为压性逆断层，为华蓥山断裂带的主干断层。

板栗村乡村公路边见断层露头发育于三叠系砂岩中（图 3.3-10），断层走向 225°，倾向北西，倾角较陡，断面清晰。下盘砂岩产状多变，呈褶皱状。发育宽约 0.5m 的断层破碎带，主要为挤压碎粉岩。

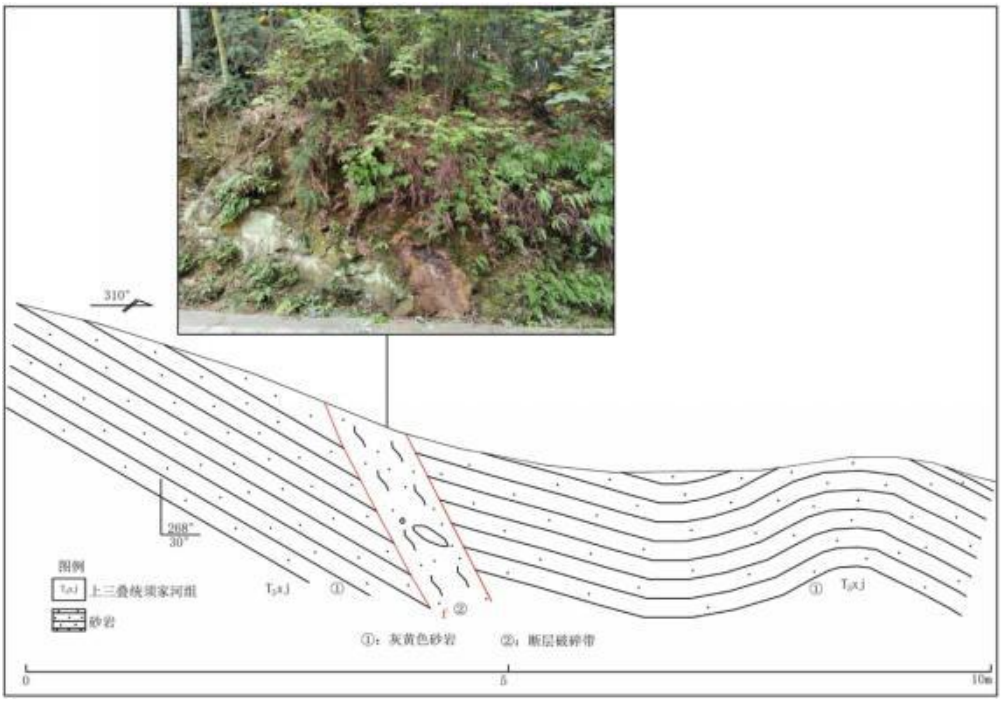


图 3.3-10　板栗村乡村公路边断层素描图

在槽沟村北东公路边可见断层露头发育于三叠系长石石英砂岩中（图 3.3-11），断层走向 55°，倾向北西，倾角 30～50°。断层为破碎带宽 10～25cm，发育碎粉岩，碎粉岩固结紧密。

综合分析，断层最新活动时代应为早-中更新世。

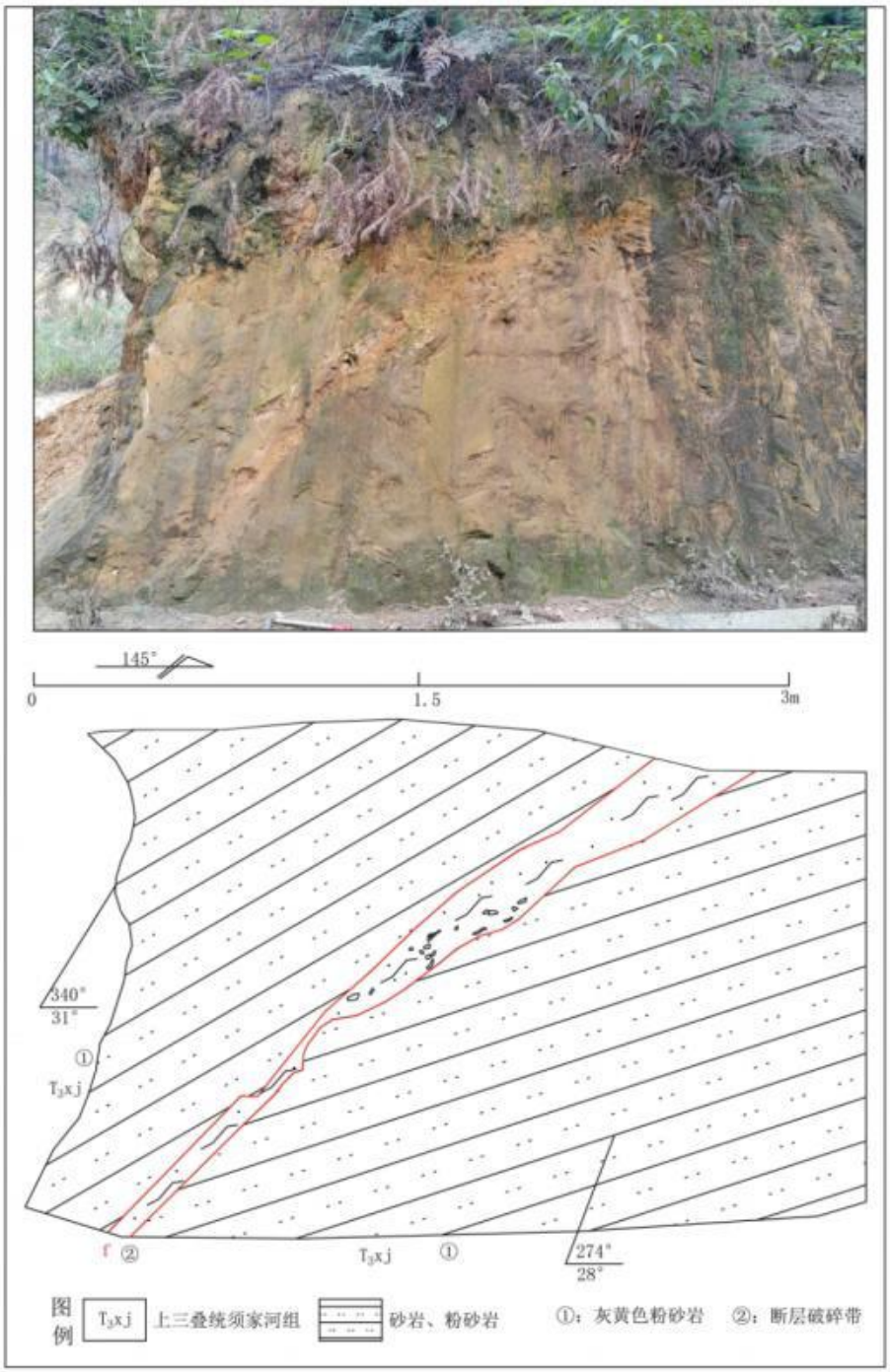


图 3.3-11　槽沟村北东断层素描图

3.3.5 白云寺断裂（f5）

断层位于近场区西南部，为压性逆断层，为华蓥山断裂带的分支断层。

该点位于童寺镇南东公路边，可见断层露头（图 3.3-12）。下盘为紫红色夹灰白色砂岩,产状 350°∠55°，上盘为紫红色泥质粉砂岩，薄层状构造，产状 10°∠50°。断层产状 N45°E/NW∠35°，断面清晰。

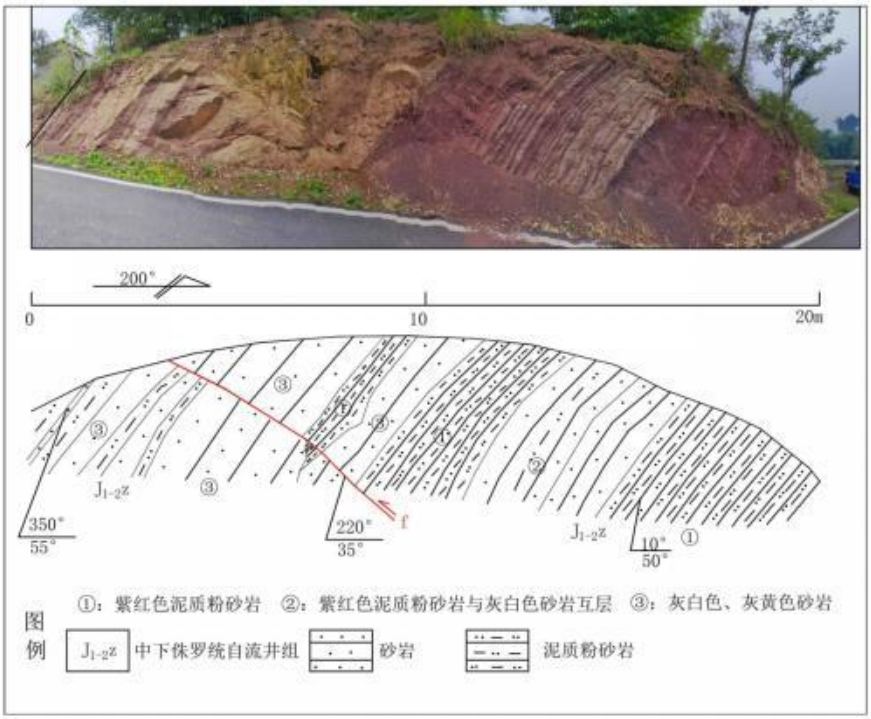


图 3.3-12　童寺镇南东断层素描图

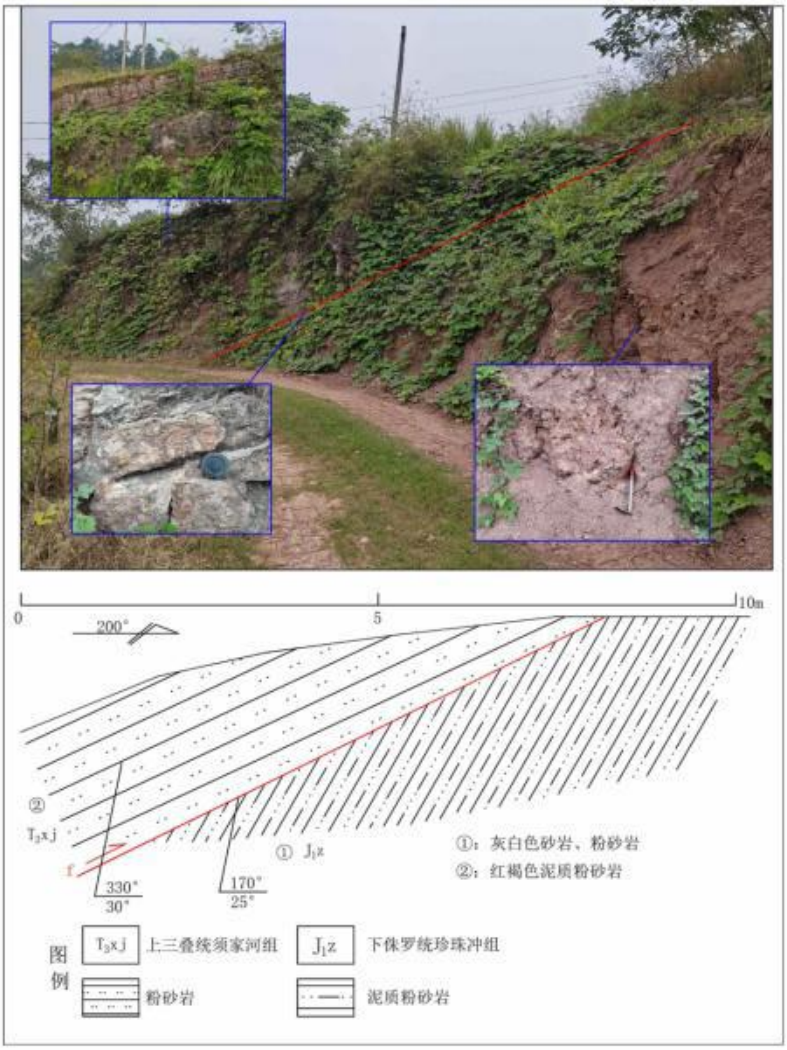


图 3.3-13　李子湾西南断层素描图

在李子湾西南沟谷内见逆断层发育基岩中（图 3.3-13），断层产状N80°E/NW∠20-30°，断层面清晰。上盘为三叠系灰白色长石石英砂岩逆冲于点东侏罗系紫红色泥质粉砂岩之上。下盘为泥质粉砂岩强风化，产状凌乱，呈球状风化，薄层状构造，岩石破碎。点西灰白色长石石英砂岩，中厚层状构造，产状 330°∠30°。砂岩可见擦痕阶步，擦痕方向 160°，可见断层角砾岩，角砾岩固结坚硬。

综合以上分析，断层最新活动时代应为早-中更新世。

3.3.6 堆金湾断层（f6）

断层位于近场区东南部，南起大城乡，向北东方向沿王坪乡和云顶镇一带延伸，为压性逆断层，为华蓥山断裂带的分支断层。地貌上表现为沟谷（图 3.3-14）。

图 3.3-14　杨柳沟西南断层地貌（镜向 NE）

目标区东南小路边在三叠系砂岩中可见断层露头（图 3.3-15），形成 1m左右宽的断层破碎带，断层产状N45°E/NW∠65°。上盘为灰白色长石石英砂岩，岩石产状多变，呈褶皱形态，顶部岩石破碎。下盘为灰白色长石石英砂岩，岩石节理裂隙发育，呈网格状破碎。

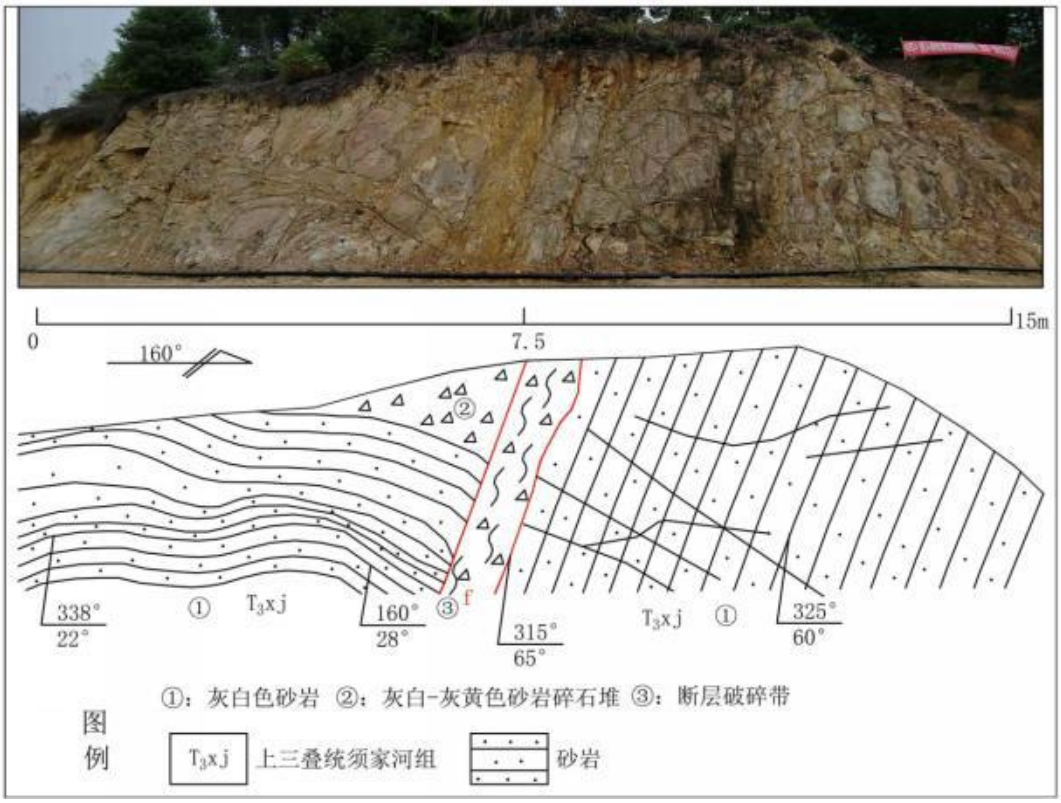


图 3.3-15　目标区东南断层素描图

在山腰水库附近公路边见断层露头发育三叠系地层中（图 3.3-16），断面清晰，断层产状N40°E/NW∠65°，断层为逆断层。上盘为三叠系石英砂岩，灰白色，灰黄色，紫红色，岩石全风化，呈砂状，节理裂隙发育。断层发育宽约1m的破碎带，主要发育角砾岩及断层泥，均固结坚硬。

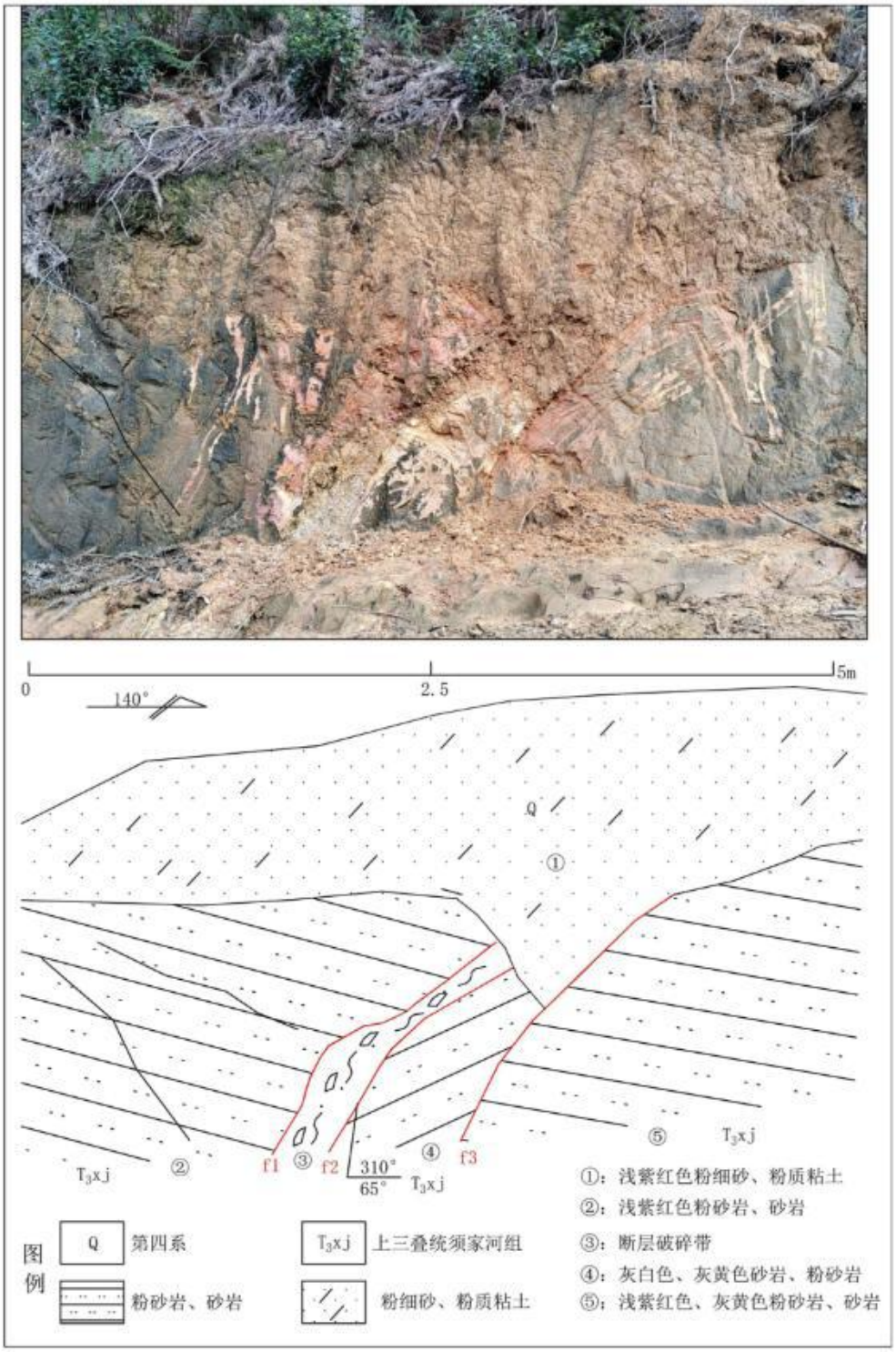


图 3.3-16　山腰水库附近公路边断层素描图

图 3.3-17 为五仙山公路边断层露头，断层发育于三叠系砂岩中，断面清晰，断层产状N40°E/SE∠80°，断层两侧岩石产状不同，上盘岩石产状多变，褶皱发育，下盘岩石陡倾近直立。

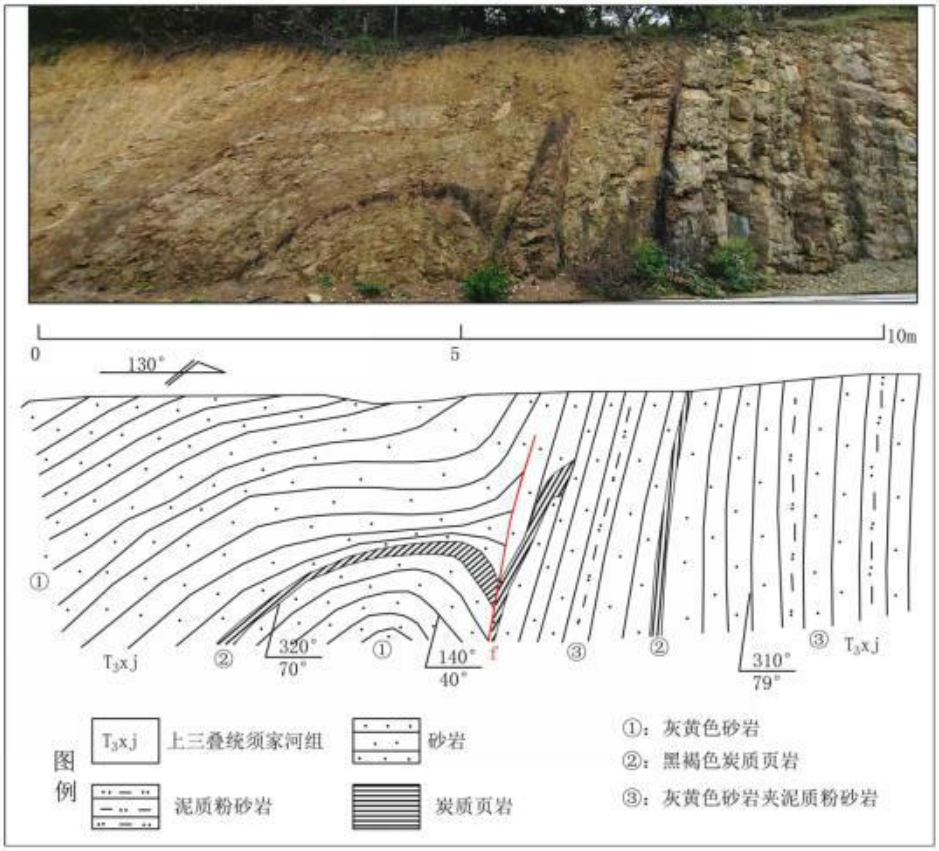


图 3.3-17　五仙山公路边断层素描图

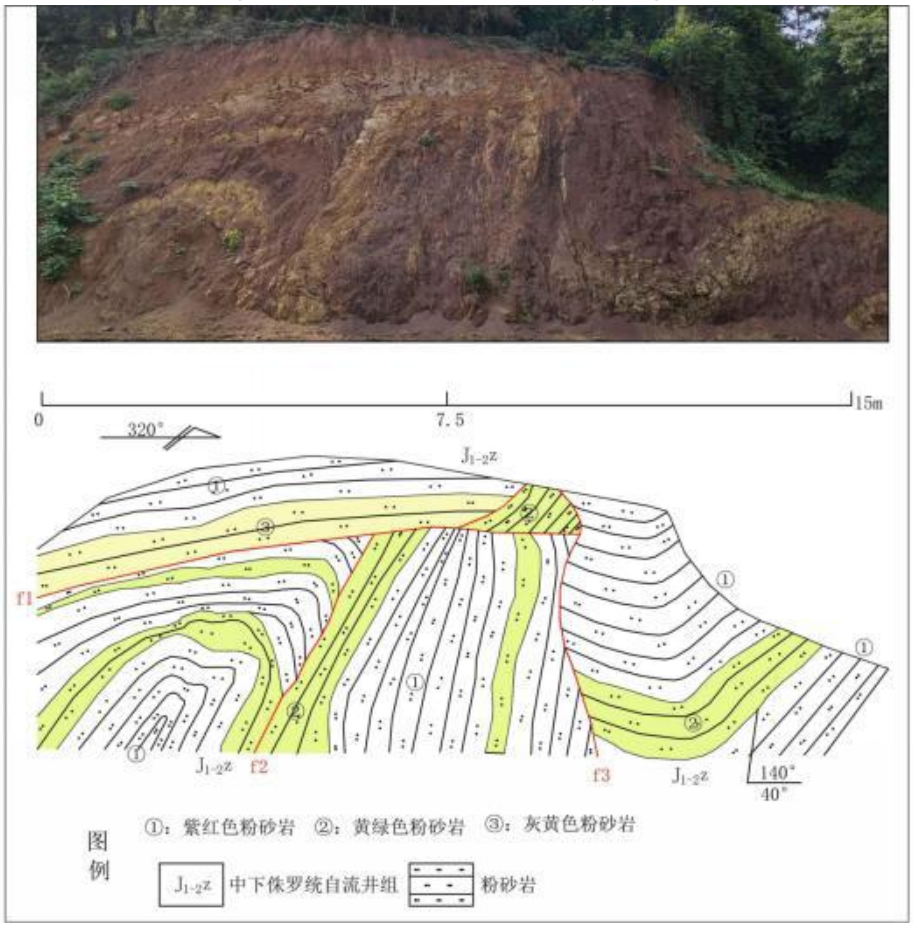


图 3.3-18 石桥镇省道 303 公路边断层素描图

在石桥镇省道 303 公路边可见断层露头（图 3.3-18），在侏罗系紫红色泥质粉砂岩夹灰黄色、黄绿色泥质粉粉砂岩之中发育 3 条断层。岩石极破碎，可见揉皱现象。断层面清晰，两条陡倾的断层形成宽约 5m的破碎带，破碎带主要碎粉岩，碎粉岩固结紧密。

综合以上分析，断层最新活动时代应为早-中更新世。

3.3.7 阳高山断层（f7）

该断层是一条主要分布在泸州市北部的断层，从北部的石洞附近，向南延伸，经过安宁镇西部，一直到龙马潭区北部，全长 6km。断裂在航卫片上无线性影像显示，断层地貌不明显。

在安宁镇西的公路旁，发现该断层的露头（图 3.3-19），阳高山断层主要错断了侏罗系沙溪庙组的紫红色砂泥岩，断层产状为 83°NW∠66°。根据其断层断面判断，无明显活动迹象，判断其活动性因为早更新世时期。

在石洞镇附近发育阳高山断裂（图 3.3-20），该断裂与背斜相伴生，NE走向，长度约为 6km，发育于侏罗系地层中，产状N30°E/SE∠40°，上覆第四系残积物未见扰动，胶结较为致密，成生时代应为Qp^2，因此，该断裂不具备晚第四纪活动性。

图 3.3-19　安宁镇附近阳高山断裂

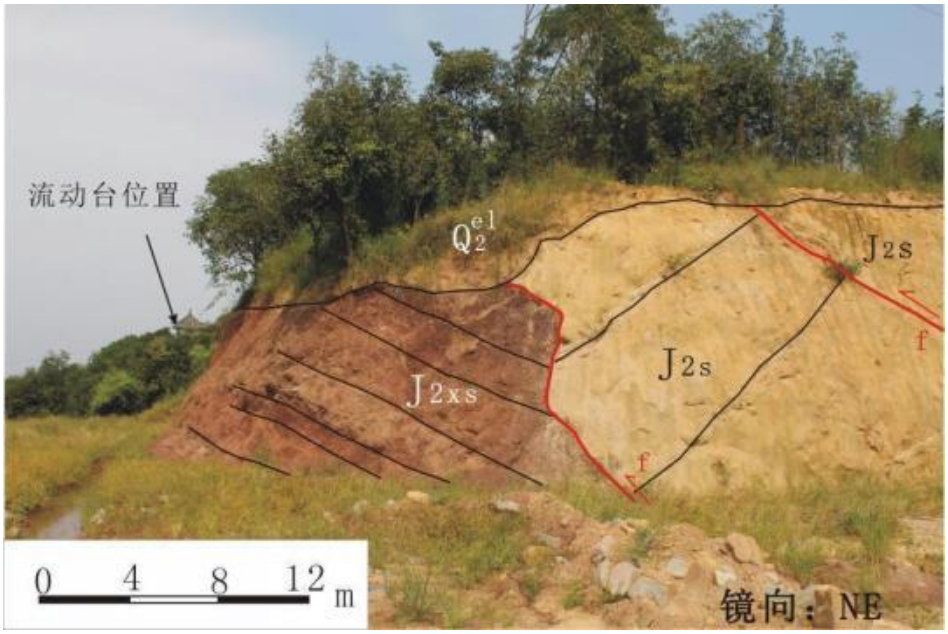


图 3.3-20　阳高山断裂石洞镇北剖面

3.4 近场背斜特征

（1）近场背斜特征

近场范围内褶皱构造由长条形高陡背斜与平缓开阔的向斜相间排列，形成“格挡式”褶皱，断层多与褶皱伴生，位于背斜轴部或近轴部。近场区主要背斜有圣灯山背斜、古佛山背斜、海潮背斜、梯子崖背斜、青山岭背斜。

①圣灯山背斜：位于隆昌以西。东起徐家桥，中经圣灯寺，西到响石，长10公里。轴向北70°东核部由须家河组构成，高点在骡子漕。两翼为珍珠冲组至上沙溪庙组构成，两翼不对称，呈梳状。北翼倾角14-50°，南翼倾角13-33°。背斜西端分别向西和南西鼻状突起，形成两个鼻状背斜，属北东向、东西向构造的叠加成分。

②古佛山背斜：为一轴线呈北东—南西展布的两翼不对背斜，背斜东翼地层倾角 10°～30°，西翼地层倾角为 12～80°（局部甚至倒转），轴部被断层切割破坏，轴迹微向北西弯突，北西翼地层缺失不全，出露地层为三叠系嘉陵江组，两翼依次为三叠系须家河组、侏罗系珍珠冲组、自流井组、新田沟组及沙溪庙组。

③海潮背斜：位于海潮、福集间。南起海寺，中经兴隆场，北至龙岩寺附近被断层截断，长 25 公里。轴向北 20°东，轴线微向西弯突。核部由须家河组至自流井组构成。两翼地层为上、下沙溪庙组，东翼倾角 2-4°，两翼倾角 6-78°，呈单箱状。北段被断层破坏，南端与荔枝滩背斜呈斜鞍相接。

④梯子崖背斜：位于隆昌、赵化间。南起赵化，中经大城天洋坪，北至石燕

桥，长 38 公里。以天洋坪为界分南北两段：南段，轴向北 25°东，核部地层为须家河组，两翼地层为珍珠冲组至上沙溪庙组，两翼倾角 20°-30。南东翼稍陡，局部岩层倾角可达 60°，西翼被断层破坏；北段，核部和构造高点均被断层破坏，北西 12-25°，南东 12-30°，呈梳状。

⑤青山岭背斜：位于富顺，南溪间。北起童家寺，中经青山岭，仙峰寺，南至顺南场，长 49.5 公里。轴向北 30°-55°东，呈“S”状。核部由飞仙关组、嘉陵江组、须家河组构成，两翼叠次出露须家河组至上沙溪庙组，北西翼倾角 19-70°，南东翼倾角 20-87°，呈梳状。核部和两翼均伴有走向断层。枢纽起伏形成南、北、中 3 个闭合构造北称沙宽头高点，中为尖山坡高点，南是鸡心湾高点。北端源出于梯子崖背斜，南端与南广背斜呈斜鞍相接。

（2）主要背斜活动性

通过对近场区各阶地地质资料综合分析，认为圣灯山背斜、古佛山背斜、海潮背斜、梯子崖背斜及青山岭背斜等相关构造两侧的阶地没有起伏变化，说明自中更新世早期V级阶地形成背斜构造已停止活动。同时通过对区内夷平面的分析认为，各背斜及其相关构造并未对该级夷平面造成垂直位错，因此认为背斜及其相关构造在中更新世中晚期以来已停止活动。

褶皱带的构造演化史表现为与断层相伴生，这些断层是反映断层活动性的窗口，前已论述，与这些背斜相伴生的断层均不具备晚第四纪活动性，因此，综合断层活动性、穿越背斜阶地发育情况以及夷平面发育情况，说明圣灯山背斜、古佛山背斜、海潮背斜、梯子崖背斜及青山岭背斜带不具备晚第四纪活动性。

3.5 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震发震构造分析

2021 年 9 月 16 日四川省泸州市泸县发生*M*s6.0 级，地震震中（29.20°N，105.34°E）位于泸县福集镇．截至 2021 年 9 月 25 日 24 时，共观测到本次泸县 6.0 级地震的余震 133 次，其中 M_L0.0～0.9 的 81 次、M_L1.0～1.9 的 35 次、M_L2.0～2.9 的 14 次、M_L3.0～3.9 的 3 次，最大余震为 9 月 16 日 4 时 55 分泸县 M_L3.4 4（*M*s2.8）地震。

该地震震中位于NE走向的华蓥山褶断带内部，震中烈度达到VIII级，对目标区最大影响烈度达VII级。该次地震主震后余震活动频度低、强度弱，呈现孤立型地震序列特征。易桂喜等（2021）利用四川区域地震台网宽频带波形资料，通

过CAP波形反演获取的泸县*M*s6.0 地震震源机制解节面I参数（走向、倾角、滑动角）为 286°、45°、103°，节面II参数为 88°、46°、77°，揭示本次地震为逆冲型，但节面走向与华蓥山褶断带NE走向具有明显差异。P轴方位 187°、俯仰角 1°，反映震源区主压应力呈近NS向水平推挤特征。重新定位后的泸县*M*s6.0 地震震中位于华蓥山褶断带南西段的喻家寺向斜轴部附近（图 3.5-1），经重新定位后的震源初始破裂深度 5.1km，表明该地震发生在四川盆地上地壳浅部沉积盖层内，符合近年来四川盆地中强地震活动深度分布普遍较浅的特征。推测此次泸县*M*s6.0 地震为沉积盖层内NWW向隐伏逆冲断层在近NS向水平主压应力作用下挤压错动所致。

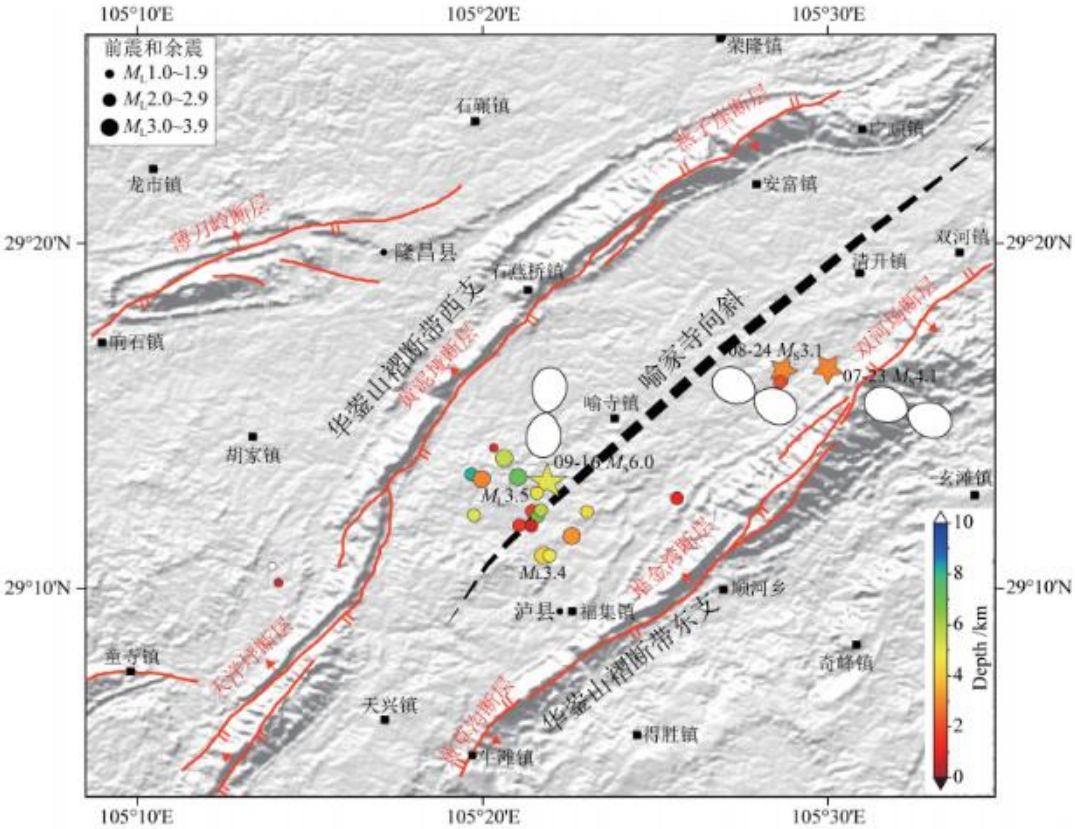


图 3.5-1 序列重新定位地震分布与 7 月 23 日泸县 Ms4.1、8 月 24 4 日泸县 Ms3.1 和 9 月 16 日泸县 Ms6.0 地震应变花样

彩色圆点代表*M*s6.0 地震序列中重新定位的地震震中（易桂喜，2021）

吴萍萍等（2023）基于最新布设在四川泸县*M*s6.0 地震震区的 70 套短周期密集地震观测台站记录到的连续波形数据，采用地震背景噪声成像方法，构建了泸县地震震源附近区域的三维精细S波速度结构（图 3.5-2）。华蓥山断裂东／西支局部深部速度结构表现出明显的非均匀性，但整体上表现为NE、SW向展布的高速特征。泸县震区西侧出现低速区，东侧则表现高速异常，泸县 6.0 级主震位

于高低速异常分界带附近，余震序列主要沿着震中往东侧 6.0km范围内呈几何线性特征展布，震源深度优势分布层位主要集中在 3.0-5.0km之间，说明泸县震区及周边介质速度结构的非均匀分布是控制地震序列空间展布形态的深部构造因素。泸县地震震源体西侧 4.0-6.0km深度处存在的低速异常指示着该处可能存在流体，与震后大地电磁阵列测深三维反演结果所揭示的震区西侧低阻异常分布一致，推测泸县 6.0 级地震的发生可能是在区域构造应力和流体扰动的作用下，震区的先存隐伏断层发生错动所致。

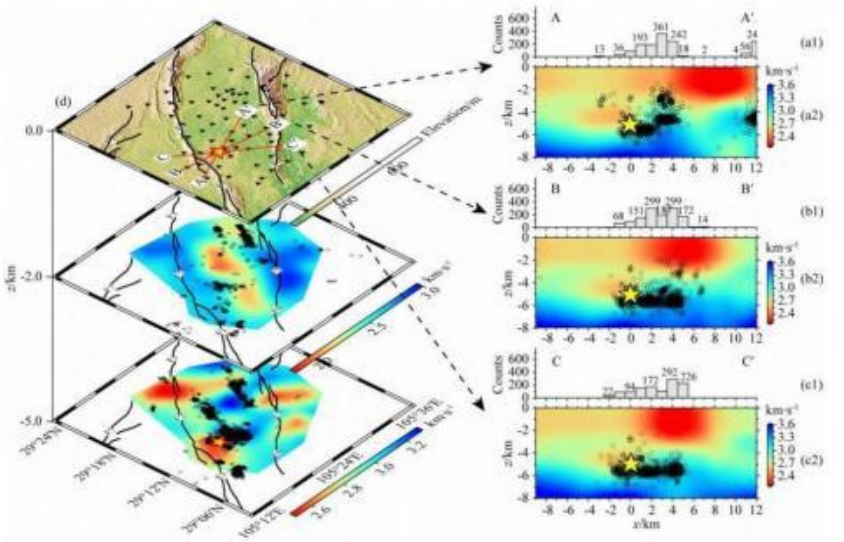


图 3.5-2　泸县地震震区水平和垂直速度剖面图（吴萍萍等，2023）

（d）中红色线为剖面 AA’、BB’和 CC’的位置，黄色五角星为泸县地震震中.(a1)和(a2)为沿 AA’剖面的地震数量 统计和速度剖面图；(b1)和(b2)为沿 BB’剖面的地震数量统计和速度剖面图；(c1)和(c2)为沿 CC’剖面的地震数量统 计和速度剖面图。

泸县附近主要为北东向华蓥山断裂带，该断裂带北起达县北、向南西经大竹、邻水、合川、铜梁、荣昌至宜宾南，长约 460km，是四川盆地内规模最大的断裂带。断裂带总体走向北 40-45°东，倾向南东，倾角 30-70°，具挤压逆冲性质。地表断裂主要发育于背斜轴部或陡翼，由一系列长数公里-数十公里的断裂斜裂或平行展布而成。深部在相应位置则存在华蓥山基底断裂。在宜宾、荣昌、高县及富顺等地沿断裂带取断层泥作热释光测龄，结果在 102200±6000-768700±61500a 之间。最新活动时代为中更新世中晚期，以粘滑活动方式为主。

沿华蓥山断裂带曾发生过多次中强地震，如公元前 26 年宜宾一带 5½级地震、1610 年高县 5½级地震、2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震。

泸县震区的先存隐伏断层最新活动时代应为早-中更新世，根据构造类比原则，分析认为具备发生 6.5 级左右地震的构造条件。

3.6 近场地震构造综合评价

（1）近场区位于四川中生代前陆盆地内，区内构造变形定型于印支期，喜马拉雅运动对此有所改造和加强。四川台拗内的川中台拱地质构造简单，地层近水平，变形微弱，仅发育有一些鼻状或穹隆状构造。川东陷褶束地表表现为背斜构造与向斜大致等间距的梳状构造，具“断层弯曲背斜”或“断层扩展背斜”的典型特征。而上扬子台褶带表现宽缓的褶皱构造。均为较稳定的大地构造单元。

（2）近场区处于四川盆地弱升区内的川东盆岭区三级新构造运动单元内，第四纪以来表现为大面积的整体间歇性缓慢隆升，形成有多级夷平面和河流阶地等层状地貌，隆升幅度不超过 500m。晚第四纪以来不存在明显的差异运动。

（3）近场区内发育有NE向断层主要为薄刀岭断层、黄泥垭断层、天洋坪断层、大凹场断层、白云寺断层、堆金湾断层、阳高山断层等一系列北东向次级断裂组成，属于华蓥山断裂带，断裂发育于背斜构造的轴部或陡翼，规模较小，呈断续状延伸。已有资料显示这些断裂均为第四纪早、中期或前第四纪活动断裂，不具备晚第四纪活动性。四川盆地中强地震发震构造条件研究结果表明，这一类的背斜构造对中强地震的发生具有明显的制约作用。因此，近场区内的背斜构造不能排除发生中强地震的可能性。

（4）近场区自有历史地震记载以来至 2023 年 10 月共记到 1 次 ≥4.7 级破坏性地震即 2021 年 9 月 16 四川泸县 Ms6.0 级，该地震震中位于 NE 走向的华蓥山褶断带内部，震中烈度达到VIII级，对目标区最大影响烈度达VII级。

4 目标区断层勘查和活动性鉴定

4.1 地形地貌及地层岩性

（1）地形地貌

目标区位于川东盆岭区，属构造剥蚀丘陵地貌，地处濑溪河西岸的山前堆积体上，地势总体上西高东低，地形较平缓（图 4.1-1 和 4.1-2），分布广阔的红色丘陵，海拔高度在 310～290m 之间。目标区及附近基岩出露较好，为上沙溪庙组（J_2s）红色砂泥岩。

图 4.1-1　目标区地形地貌图

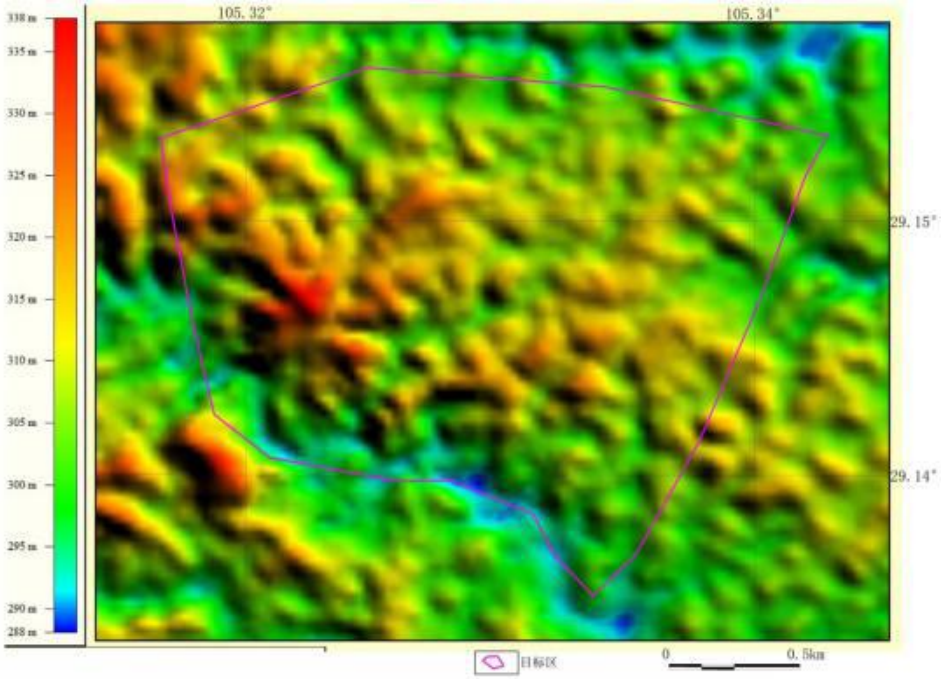


图 4.1-2　目标区 3D 地形地貌图

（2）地层岩性

通过收集资料及现场踏勘，目标区出露地层主要第四系和上沙溪庙组（J_2s），现将其岩性由上至下分述如下：

1）第四系

目标区内第四系地层主要为表层第四系人工填土层（Qh^{ml}），包括杂填土、素填土，耕植土等，含少量植物根茎。沉积物厚度 1-23m，主要为泥岩、砂岩等块石与粉质粘土组成的碎石土，粉质粘土主要粉粒和粘粒组成，可塑状，下伏上沙溪庙组（J_2s）泥质粉砂岩。

2）侏罗系中统上沙溪庙组（J_2s）

目标区内出露较好，岩性主要为紫红色泥质粉砂岩，岩石全-中风化，薄-中厚层状构造，产状整体平缓，局部发育长石石英砂岩夹层。见图 4.1-3。

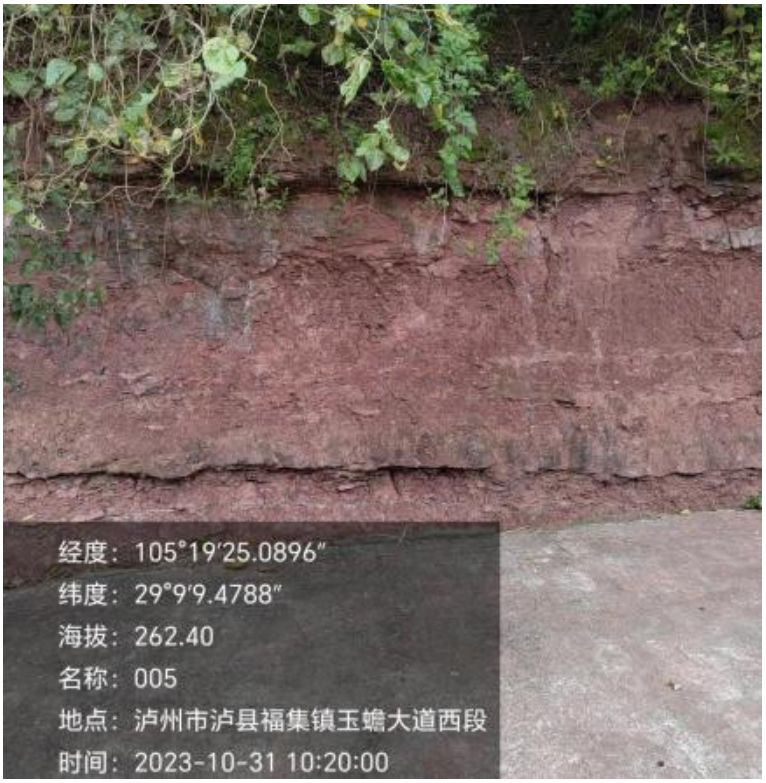


图 4.1-3　目标区出露紫红色泥质粉砂岩

4.2 目标区地质构造调查

根据地质资料及现场调查工作成果，结合遥感解译，目标区及附近基岩出露较好。目标区西北侧地层倾向 SE，南东侧地层倾向 NW，整体表现为向斜构造，两翼地层产状平缓，未发现断层发育。

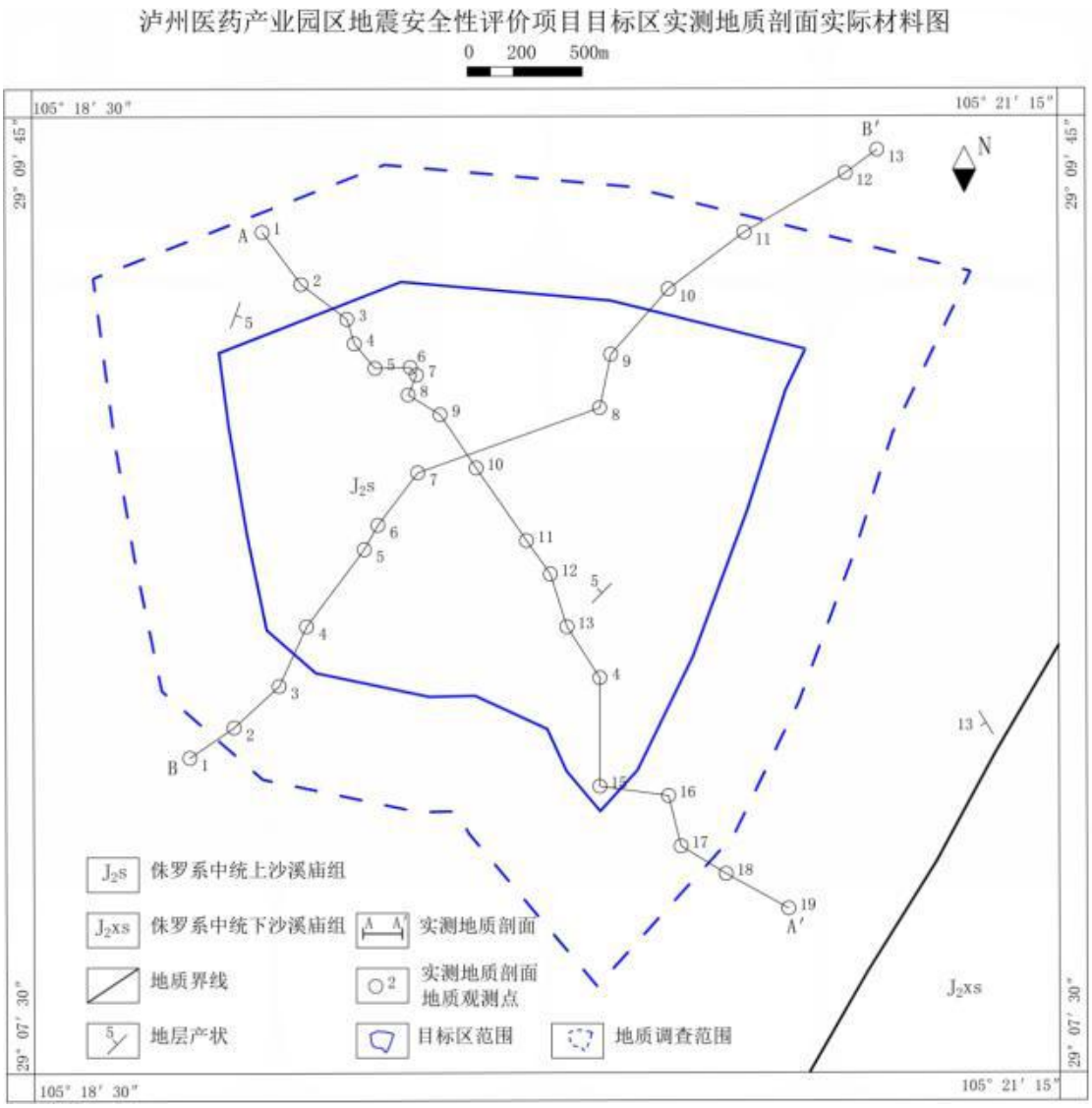


图 4.2-2　目标区实测地质剖面布置图

本次工作在目标区北西向和北东向共完成 2 条实测地质剖面（表 4.2-1 和图 4.2-3 和 4.2-4），根据实测地质剖面成果，目标区及附近区域基岩大面积出露，岩性单一，为中侏罗统上沙溪庙组紫红色泥质粉砂岩，地层产状整体较平缓，倾角 4°～25°，倾向多变，褶皱发育，地层连续性好，未发现断层发育。

表 4.2-1　目标区实测地质剖面基本情况一览表

剖面编号	起点坐标			终点坐标			长度（km）	观测点数
	经度	纬度	高程	经度	纬度	高程		
A-A′	105°19′06.99″	29°9′28.70″	279.13	105°20′31.43″	29°7′53.19″	261.82	4.12	19
B-B′	105°18′55.14″	29°8′14.50″	280.88	105°20′45.94″	29°9′40.22″	267.06	4.16	13

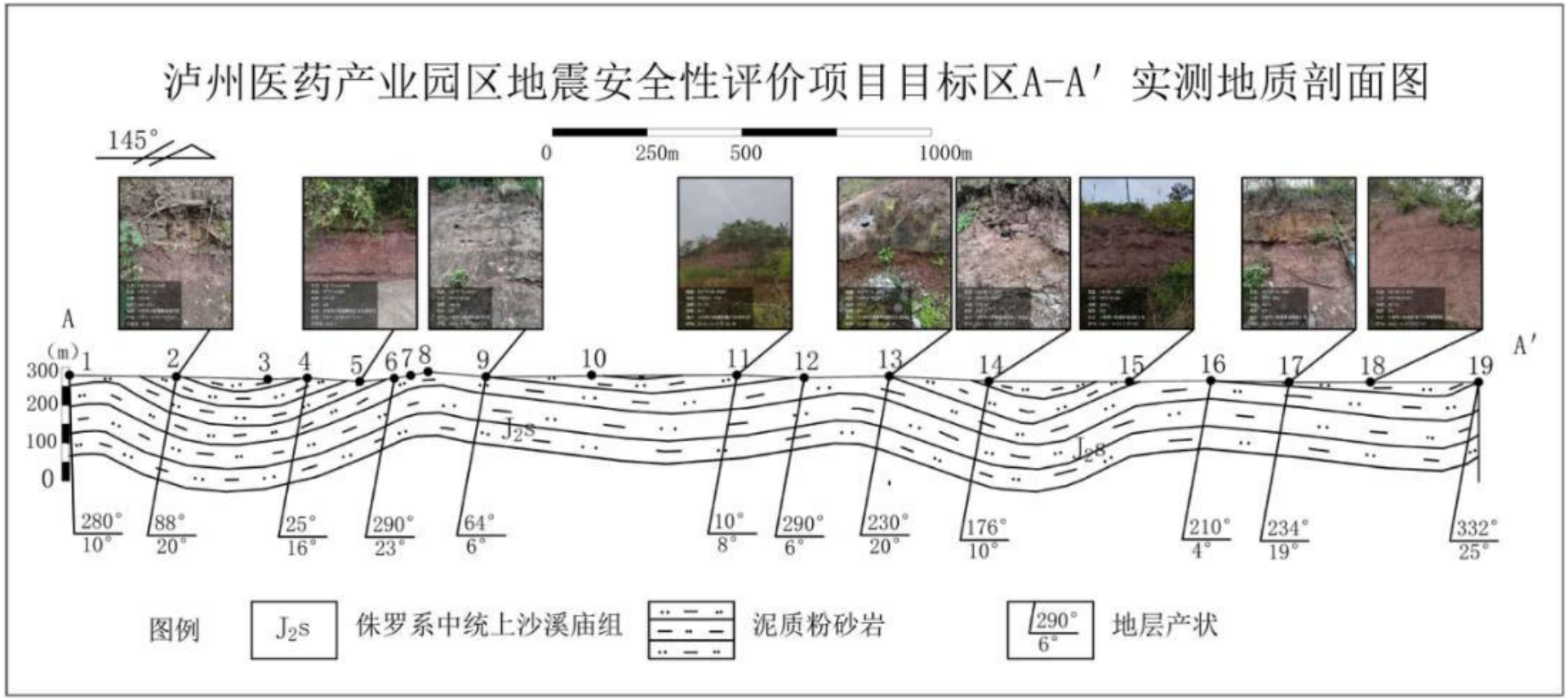


图 4.2-3　目标区 A-A′实测地质剖面图

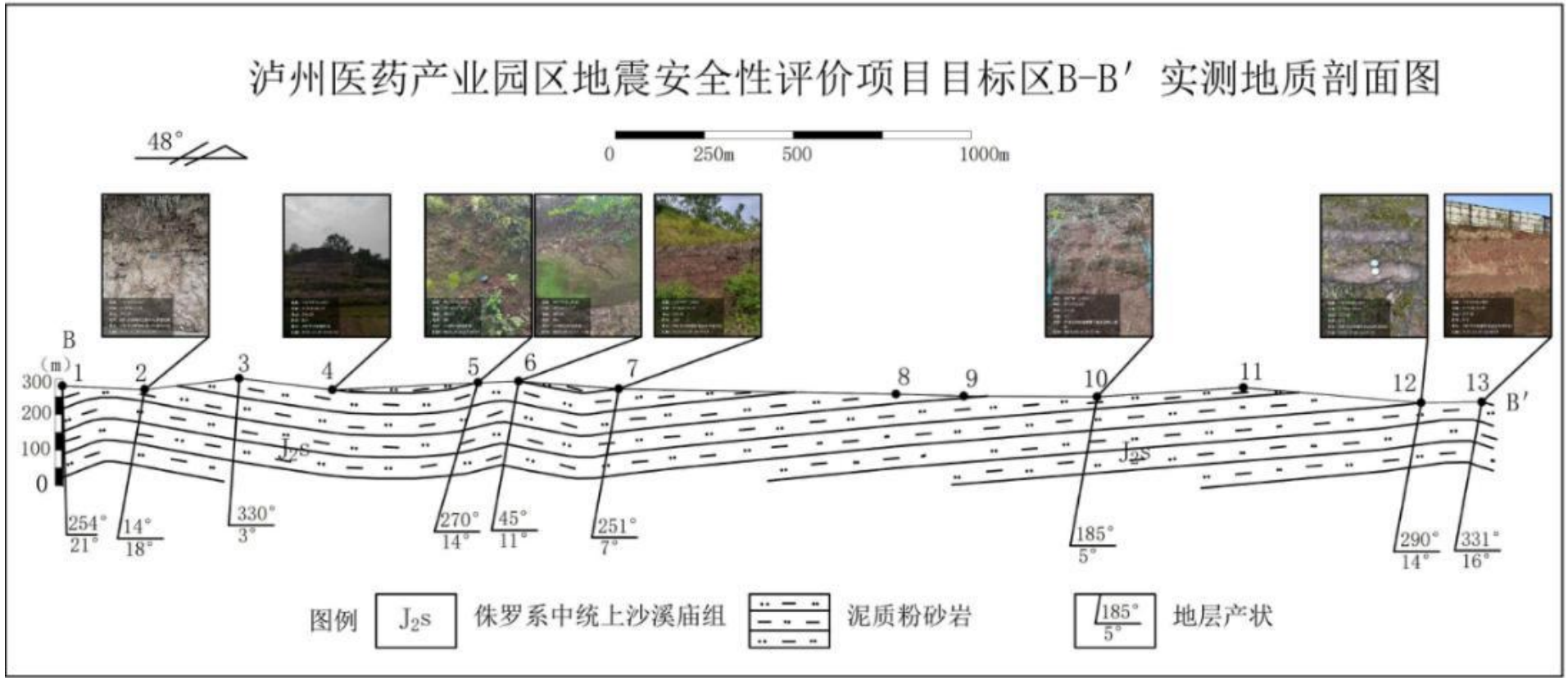


图 4.2-4　目标区 B-B′实测地质剖面图

4.3 浅层地震勘探

（1）测线布设

本次工作采用浅层地震勘探手段在第四系覆盖区进行了综合测试。考虑目标区内公路、楼房及地形等条件的限制，测线布置在方案的基础上适当调整，结合已有的地质资料，测线平面布置图见图 4.3-1，本次工作完成浅层地震勘探测线 2 条共 6.80km（点距 2m）。

表 4.3-1　物探测线详细信息一览表

线号	起点		终点		长度（千米）	备注
	北纬（°）	东经（°）	北纬（°）	东经（°）		
L1	105.3133016	29.1428727	105.3449840	29.1443652	3.76	
L2	105.3274760	29.1598430	105.3196801	29.1369007	3.04	
合计					**6.80**	

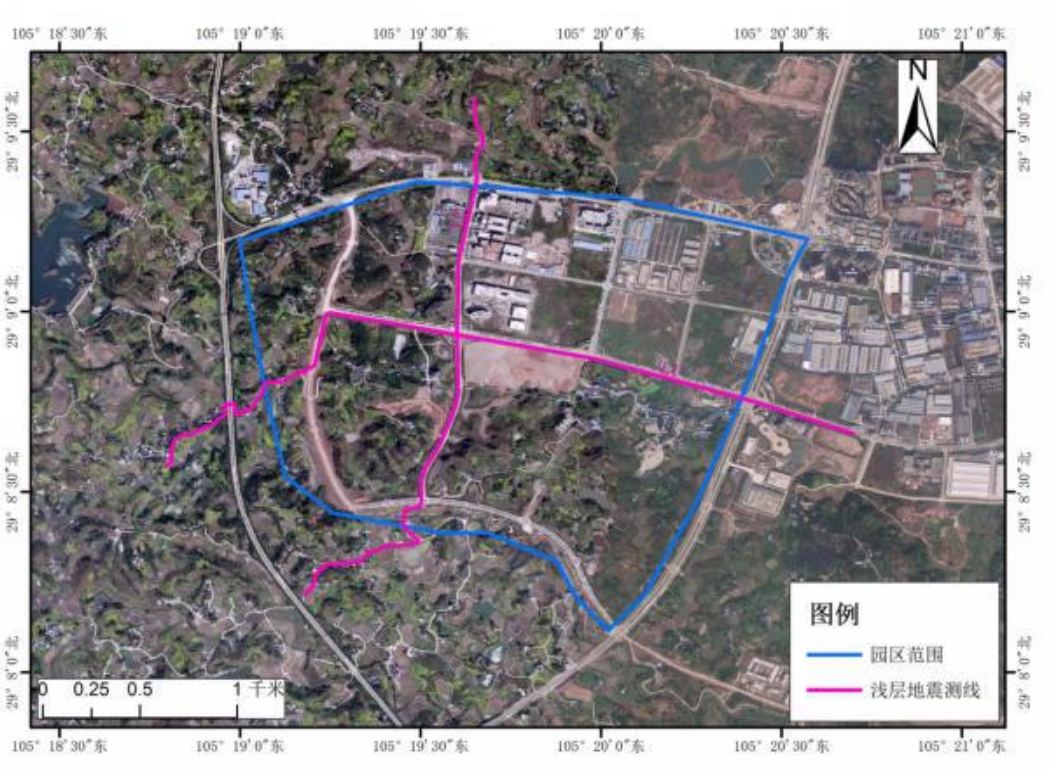


图 4.3-1　目标区物探测线布设示意图

（2）施工设备及方法

根据探测目标、踏勘情况、参数测试等，选择合理的参数进行数据采集。

（1）震源

根据现场情况，场地覆盖层厚度约 20 米左右，下部为沙溪庙组地层，本次

采用的震源为 200 千克机械锤击震源（图 4.3-2），锤重量 200 千克。

图 4.3-2　重锤震源

图 4.3-3 为使用该震源进行试验的地震成果剖面，可以看出，探测的有效深度可以达到 500 米左右。实践表明，使用该震源，有效探测深度可达 200～300 米，完全满足本次项目要求。

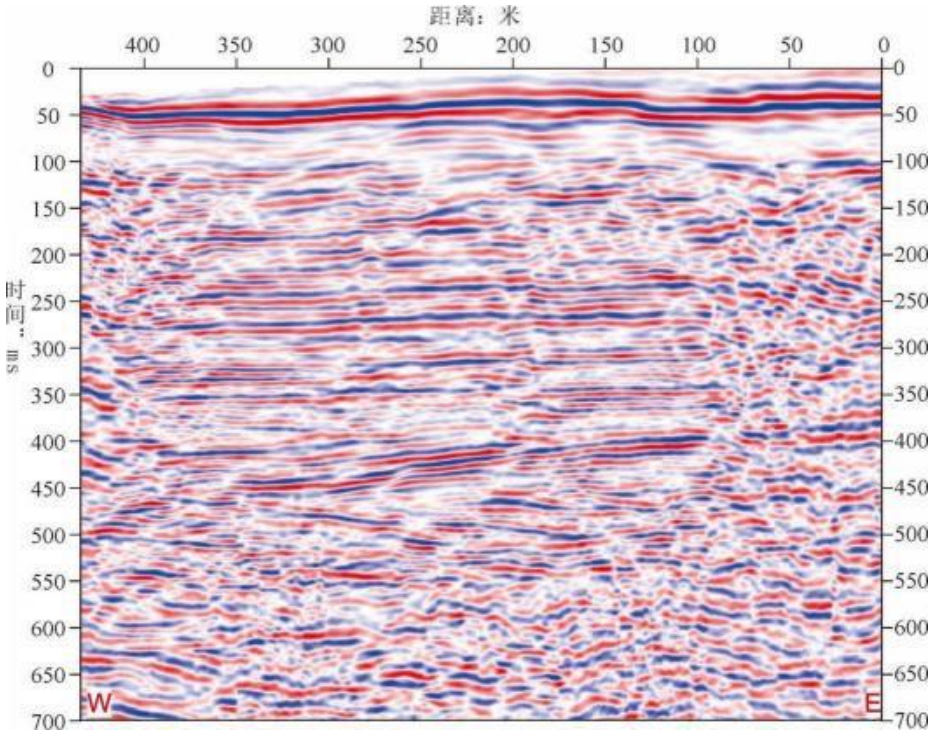


图 4.3-3　试验地震剖面成果

试验工作是整个地震勘探工作必不可少的关键环节之一，其参数选择合理与否对后续工作起到至关重要的作用，所以必须有针对性地选择试验点及合理的试验参数。结合在该区工作的经验，本项目试验的主要内容是可控震源的激发参数试验，包括震源的震动次数、扫描频率、扫描长度和电平荷载等试验，目的是确

定最佳的施工参数，确保工程质量。

（2）一致性试验

如图 4.3-4 所示，对节点设备进行一致性试验。得到的测试数据如图 4.3-5，图 4.3-6 为图 4.3-5 的部分放大，可以看到，各检波器采集到的信号起跳时间一致，每道波形数据的一致性也较好。可以看出，本次野外数据采集的设备一致性良好。

图 4.3-4　仪器一致性试验

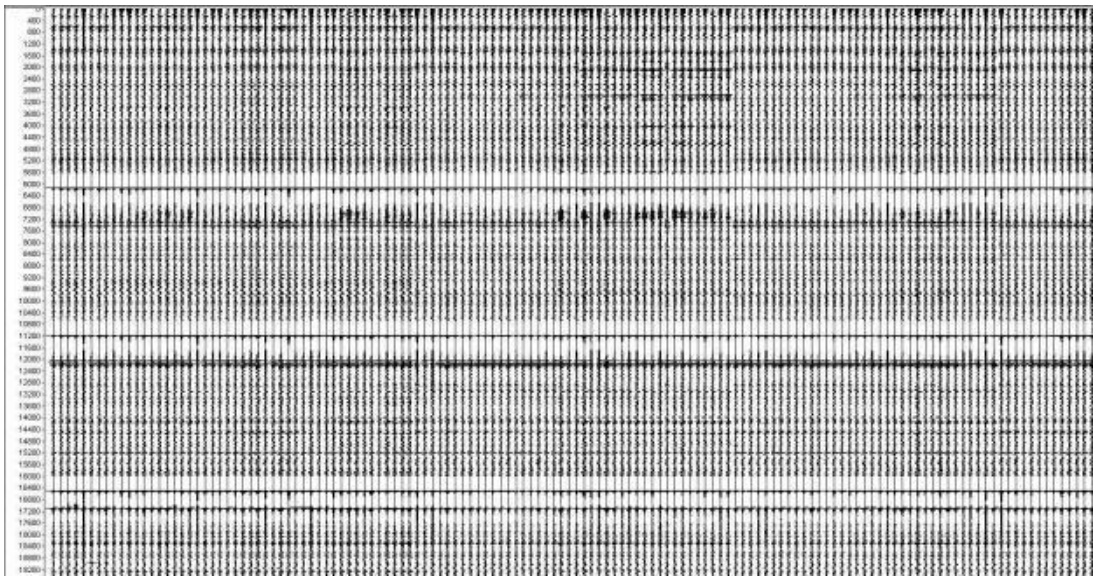


图 4.3-5　检波器一致性测试数据

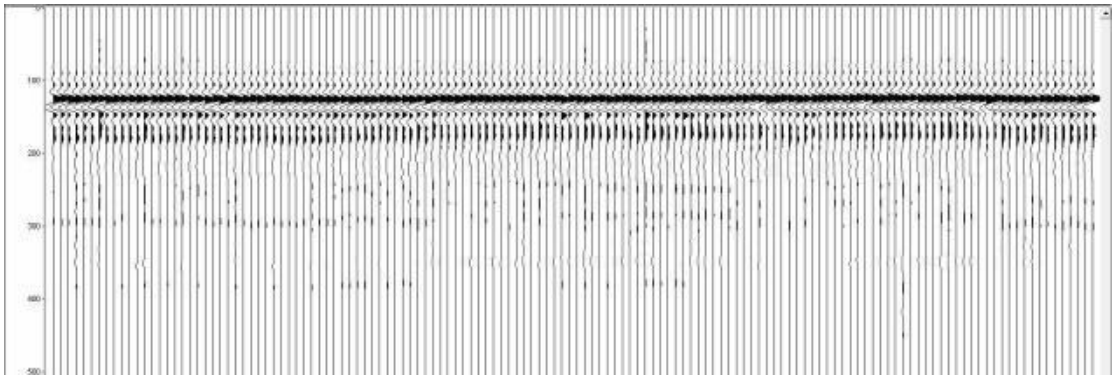
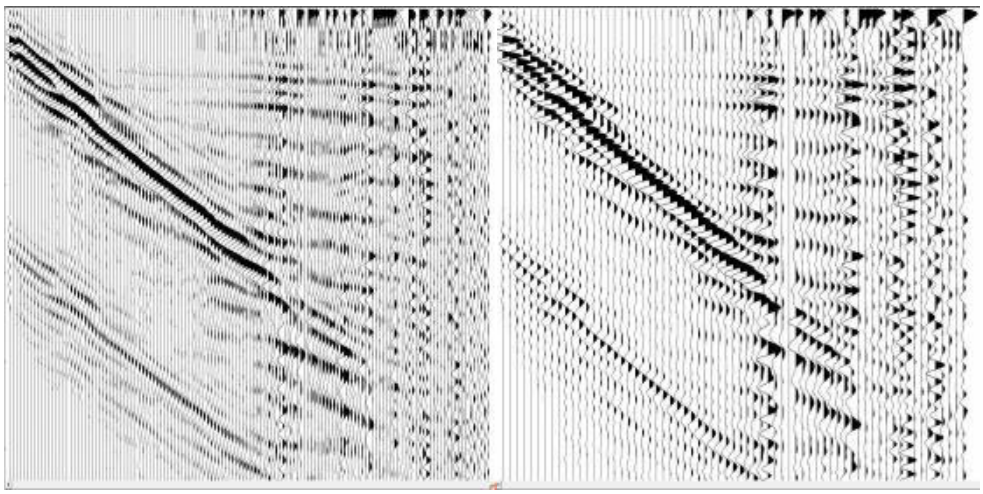


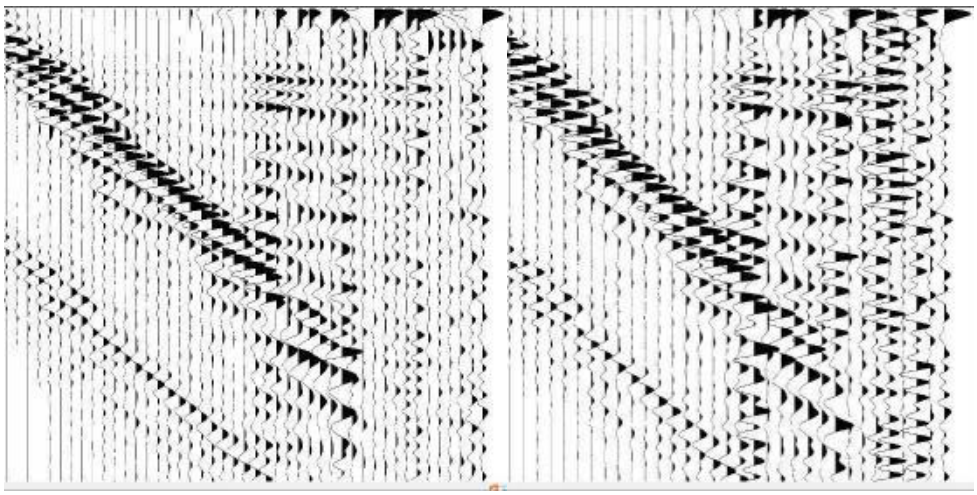
图 4.3-6　检波器一致性测试数据放大图

（3）参数试验

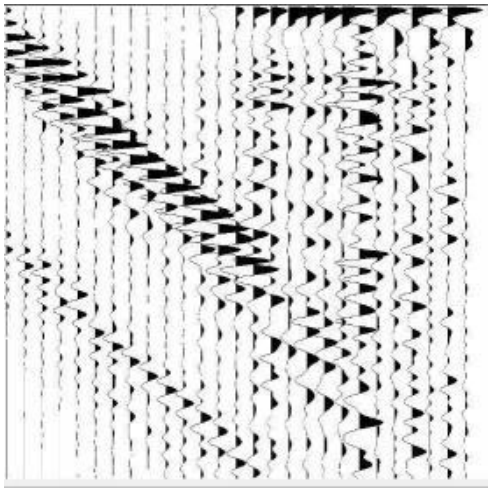
在工区内选择一段测线进行参数测试。点距分别选择 1m、2m、3m、4m 和 5m，得到的各个单炮记录如图 4.3-7 所示。可以看出，1m 点距的单炮记录质量最好，反射波同相轴连续性强，信噪比较高；2m 点距和 3m 点距次之；4m 点距仍可看到反射同相轴，但噪声能量已较强；而 5m 点距的同相轴连续性已经较差了。综上，选择 2m 点距作为最优的道间距，进行数据采集。



（a）　　（b）



（c）　　（d）



（e）

图 4.3-7　参数测试

（a）1m 点距；（b）2m 点距；（c）3m 点距；（d）4m 点距；（e）5m 点距

（4）数据采集

本次采用单边激发方式，观测系统为 1L50S150T，即对于每个滚动的排列，震源 50 炮，每炮对应 150 个检波器接收。道间距 2m，炮间距 2m，最小偏移距为 0m，最大偏移距 298m。具体采集参数如表 4.3-2 所示，图 4.3-8 为观测系统示意图。

表 4.3-2　观测系统参数

观测系统	1L50S150T	道间距	2m
覆盖次数	满覆盖 150 次	炮间距	2m
接收道数	150 道	最小偏移距	0m
最大偏移距	298m		

图 4.3-8　观测系统示意图

（5）地震数据解译

L1 测线解释

该测线位于园区建成区中部，东高西低，坡度较陡，线路较曲折，全线为水泥路，测线附近有少量强风化-全风化基岩出露，可视范围内主要为建筑或农田。测线方向为近东西向，测线总长为 3.76 千米。

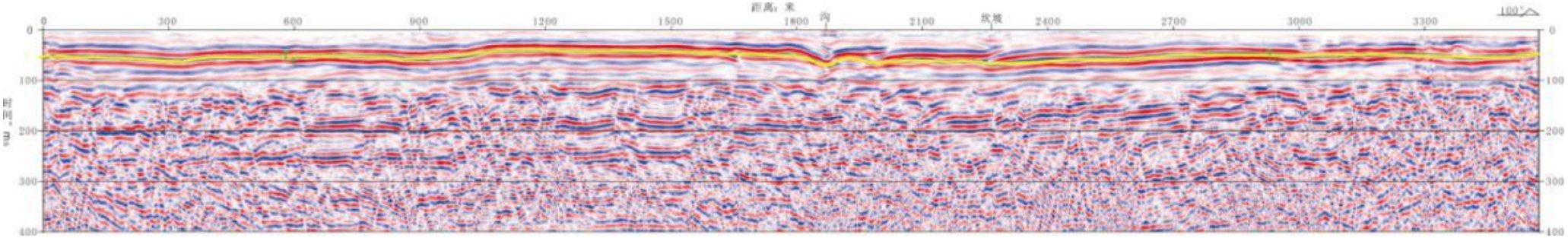
图 4.3-9 为 L1 线地震时间剖面图与深度剖面图，时间剖面信噪比高，反射波发育，剖面显示地层整体平整，结合地质调查及资料分析，在测线浅地表的结

构较稳定，波组特征明显，测线的近浅地表的地层较破碎，局部同向波组连续性差，可能是由于地形或线路拐弯造成的资料差异。通过波组对比及分析，在 L1 线未发现活动断层。

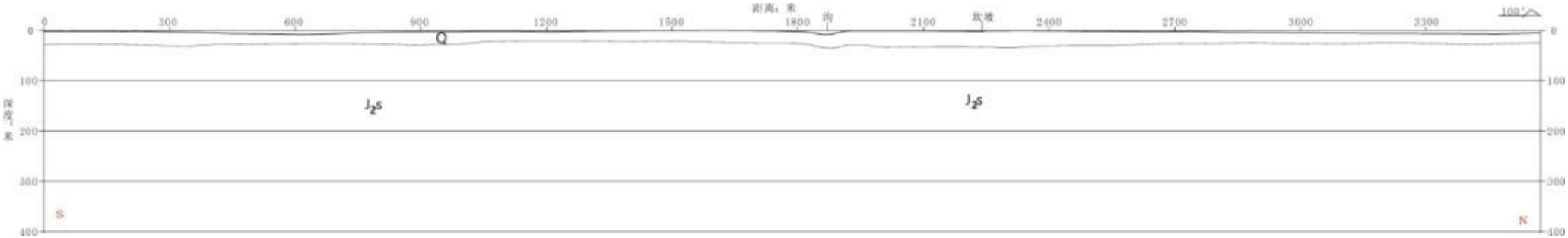
L2 测线解释

该测线位于园区建成区中部，测线较起伏、曲折，全线为水泥路，测线附近有少量强风化-全风化基岩出露，可视范围内主要为建筑或农田。测线方向为近南北向，测线总长为 3.04 千米。

图 4.3-10 为 L2 线地震时间剖面图与深度剖面图，时间剖面信噪比高，反射波发育，剖面显示地层整体平整，结合地质调查及资料分析，在测线浅地表及近浅地表的结构较稳定，波组特征明显，局部同向波组连续性差，可能是由于地形或线路拐弯造成的资料差异。通过波组对比及分析，在 L2 线未发现活动断层。

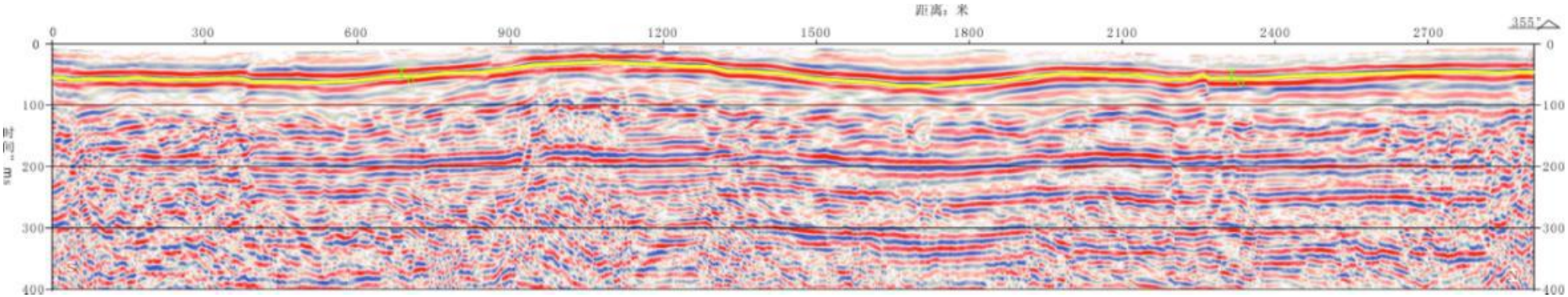


（a）时间剖面

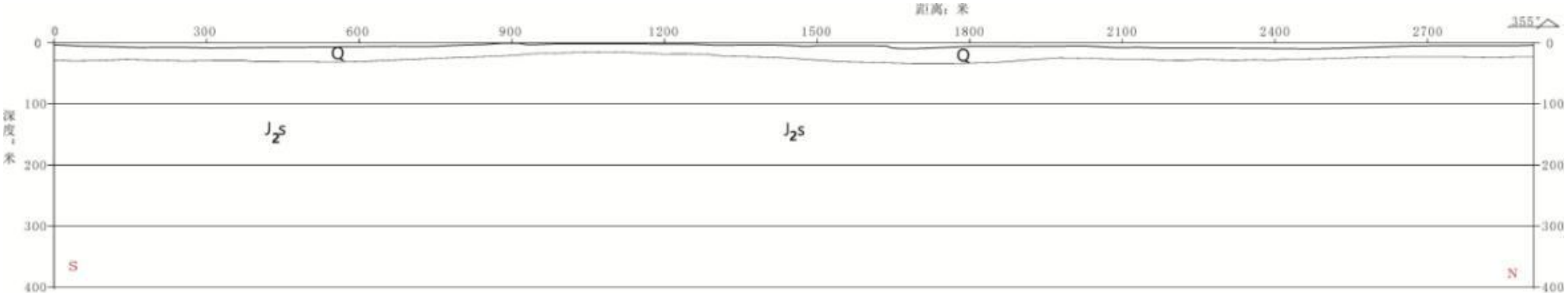


（b）深度剖面

图 4.3-9　L1 线解译图



（a）时间剖面



（b）深度剖面

图 4.3-10　L2 线解译图

（6）断裂平面分布与活动性特征

本次浅层地震探测共施工测线条数 2 条，根据浅层地震勘探成果及地表调查，目标区无活动断层通过。具体见附件 1。

4.4 目标区综合评价

1.根据近场区断裂的研究成果及目标区地震构造图，结合现场地震地质调查和本次 2 条地球物理勘探剖面结果表明，目标区内未发现断裂发育或隐伏断层通过。

2.根据《筑抗震设计规范》（GB50011-2010）4.1.7 条规定，目标区无断裂，可不考虑断层地表错动影响。

5 目标区地震工程地质条件勘测

5.1 目标区工程地质条件勘测

5.1.1 目标区概况与地形地貌

泸州医药产业园区地震安全性评价技术服务项目位于四川省泸州市泸县城区的西侧，目标区面积约 3.88 平方公里，中心坐标为 E105°19′48″，N29°08′52″。（图 5.1-1）。

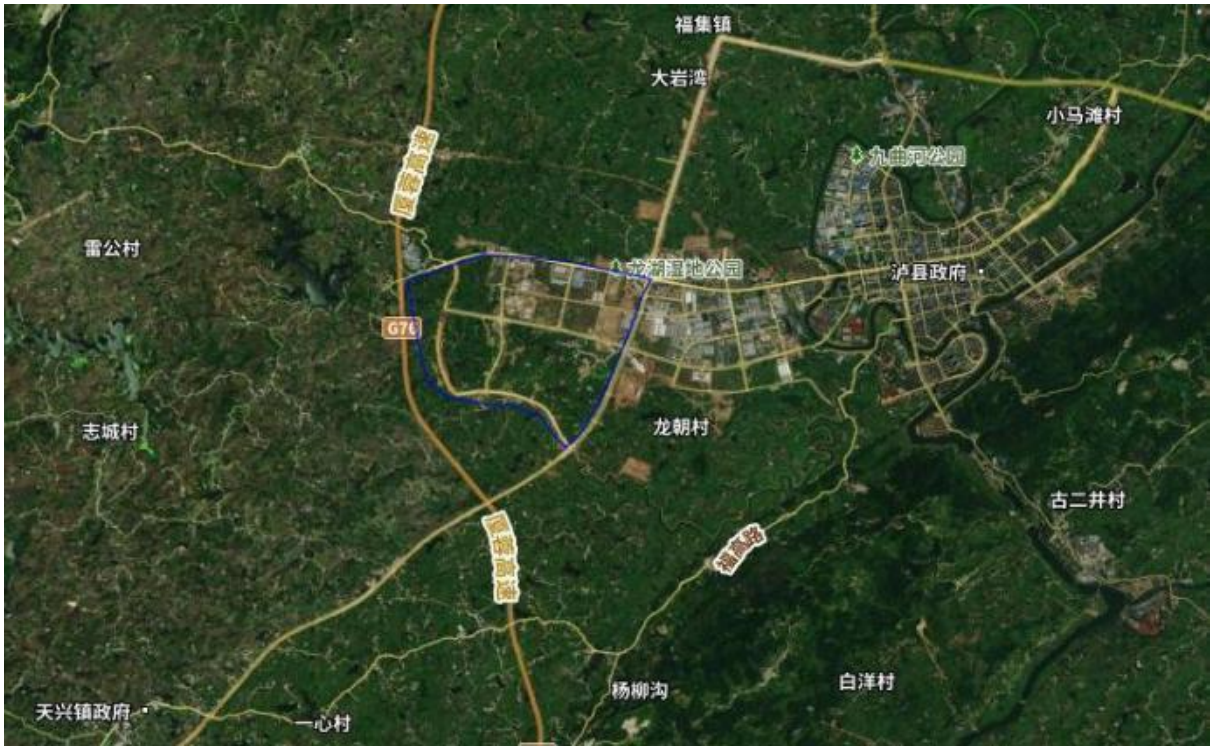


图 5.1-1 泸州医药产业园区地理位置示意图

5.1.2 工作布置原则

1）根据《区域性地震安全性评价工作大纲(试行)》(中震防函〔2019〕21 号)的要求，勘探点按场地红线及建筑物边线进行“方格网”布置，勘察钻孔到边界红线的距离间不大于 200m，两钻孔间的距离不大于 700m，共布置 17 个钻孔。钻孔间距在 338-687m 之间（图 5.1-2）。钻孔间距不大于 700m，布置满足规程规范要求。钻孔深度要求进入中风化岩石 2～5m(剪切波速度不小于 500m/s)。

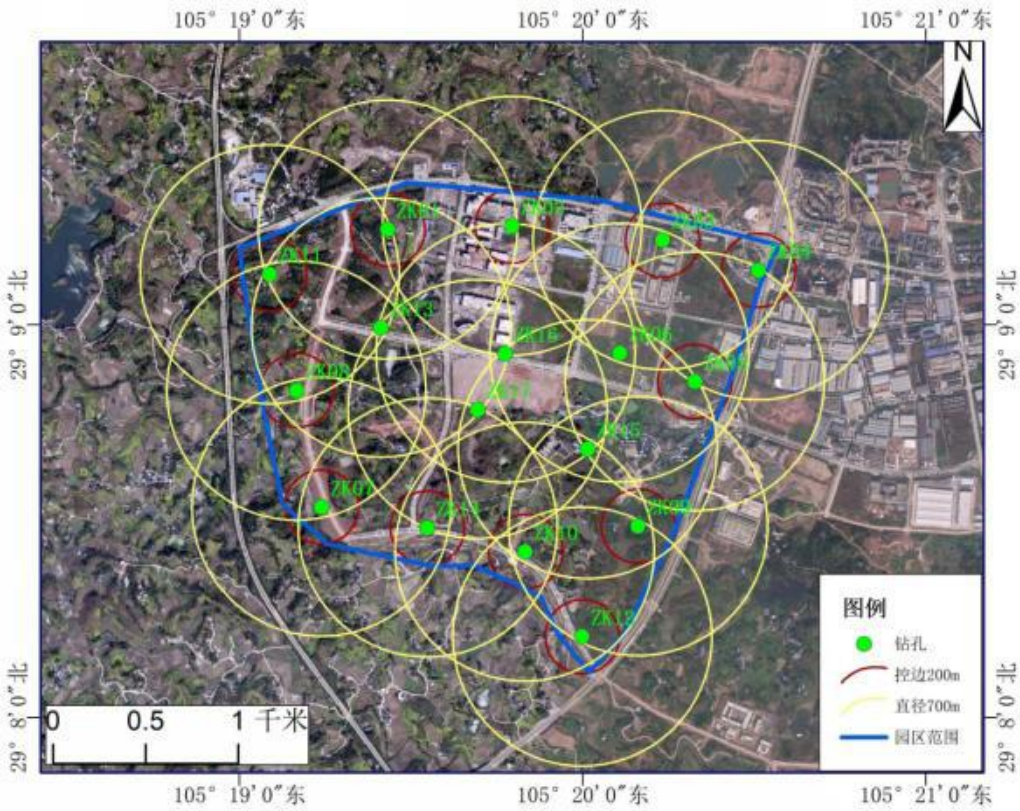


图 5.1-2　泸州医药产业园区钻孔布置图

2）现场原位测试：a）标准贯入试验：判别黏性土的状态和砂土液化，测定土的强度。b）17 个钻孔土层剪切波速测试，为划分建筑场地类别提供依据，测试深度至强、中风化岩石 2～5m(剪切波速度不小于 500m/s)。

3）室内试验：室内岩、土试验分为常规试验、天然快剪试验、固结快剪、土质化学分析实验等，采用全自动数据采集取得测试数据，试验项目主要包括：比重、天然含水量、天然密度、天然孔隙比、饱和度、液限、塑限、液性指数、塑性指数、压缩系数、压缩模量、抗剪指标 c、φ值、土质化学成分含量等，提供岩土的物理力学性质指标、强度、变形参数和腐蚀性评价指标。

5.1.3 勘察工作量

钻孔野外施工于 2023 年 10 月 13 日进场开展工作，于 2023 年 11 月 10 日共完成钻孔 17 个，累计完成进尺 299.9m，累计完成钻孔剪切波波速测试 299.9m，具体完成工作量见表 5.1-1、图 5.1-3。

表 5.1-1　钻孔完成进尺及剪切波波速测试完成工作量统计表

序号	钻孔编号	2000 国家大地坐标			完成进尺/m	波速测试/m	样品采集（件）
		经度	纬度	高程			
1	ZK01	105°19′25.95″	29°9′14.50″	260.260	17.1	17.1	2
2	ZK02	105°19′47.54″	29°9′14.96″	263.512	19.6	19.6	1
3	ZK03	105°20′13.89″	29°9′12.63″	263.483	16	16	2
4	ZK04	105°20′30.69″	29°9′8.17″	260.764	14.2	14.2	1
5	ZK05	105°20′19.81″	29°8′50.69″	263.630	16.5	16.5	1
6	ZK06	105°20′6.58″	29°8′55.58″	270.058	11.5	11.5	1
7	ZK07	105°19′14.17″	29°8′32.42″	263.603	35.5	35.5	3
8	ZK08	105°19′9.93″	29°8′49.82″	267.784	16	16	2
9	ZK09	105°20′9.62″	29°8′28.95″	268.997	23	23	2
10	ZK10	105°19′49.62″	29°8′24.79″	255.966	14.2	14.2	2
11	ZK11	105°19′5.46″	29°9′7.72″	270.620	19.5	19.5	2
12	ZK12	105°19′59.76″	29°8′12.09″	256.526	16.5	16.5	2
13	ZK13	105°19′24.49″	29°8′59.38″	271.881	11	11	1
14	ZK14	105°19′32.92″	29°8′28.89″	260.763	16.8	16.8	2
15	ZK15	105°20′0.82″	29°8′40.81″	275.491	17.7	17.7	1
16	ZK16	105°19′46.05″	29°8′55.49″	271.957	15.4	15.4	2
17	ZK17	105°19′41.55″	29°8′46.86″	266.116	19.4	19.4	2
合计					299.9	299.9	29

泸州医药产业园区区域地震安全性评价项目工程场地勘察钻孔平面布置图

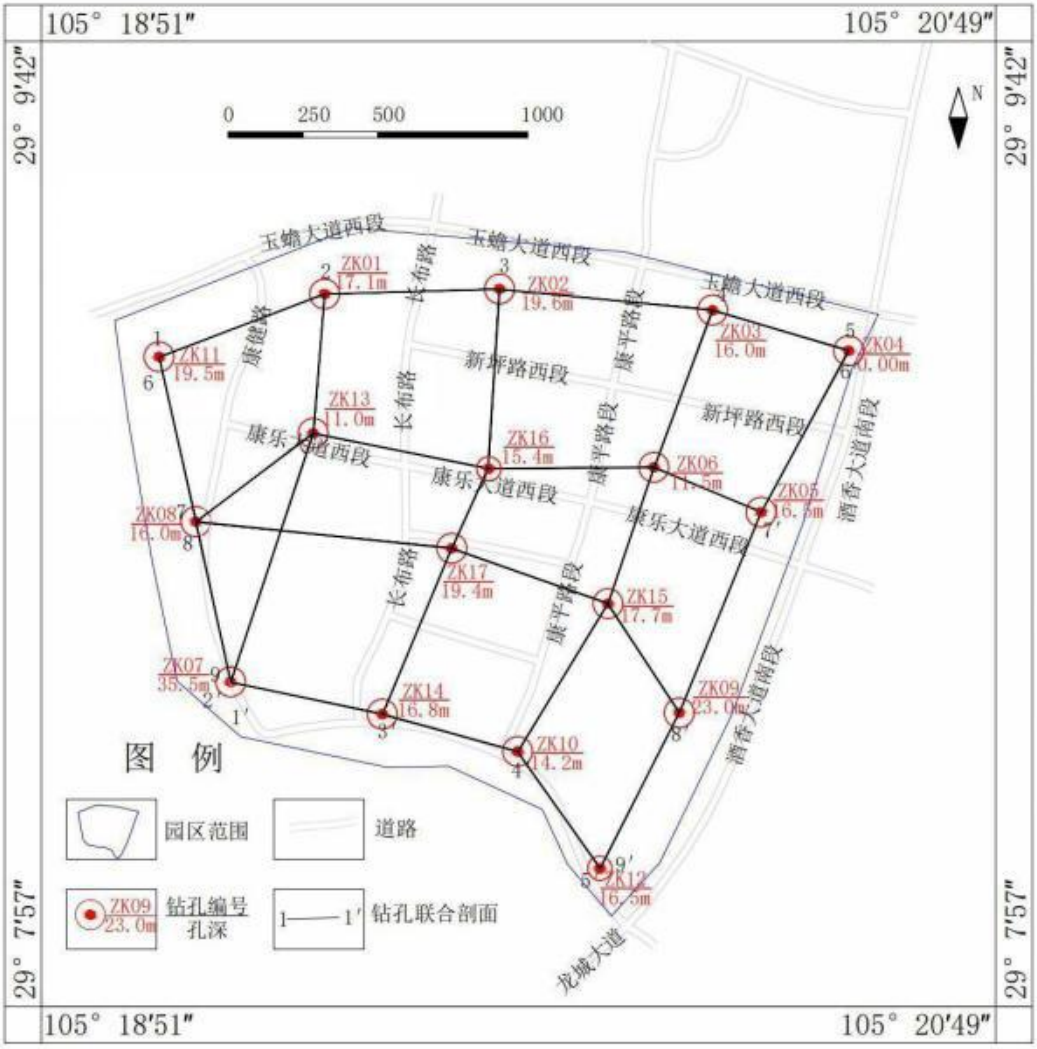


图 5.1-3　目标区钻孔分布图

5.1.4 钻探成果

目标区共布置17个钻孔，目前完成17个钻孔ZK01~ZK17，钻孔深度11.0~35.5m，钻孔总进尺299.9m，岩心照片见照片5.1-1~5.1-17，柱状图见图5.1-4~5.1-20，钻孔联合剖面图见图5.1-21~5.1-29。

本次钻孔揭露地层主要为表层第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）和下伏中侏罗统上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩基岩层。

（1）第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）（杂填土、素填土、耕植土）：杂色、紫红色、土黄色，稍湿，松散~稍密状，由粉质粘土、砂粒、砖块、瓦片、卵石、植物根须组成，本次钻探揭露层厚为0～20.3m。

（2）中侏罗统上沙溪庙组粉砂岩（J_2s）：紫红色，粉砂质结构，中-厚层状构造。主要成分为石英、长石、云母。岩芯全-强-中风化，呈碎块状、短柱状，破碎，岩体较完整，本次钻孔未揭穿。

ZK01 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK01 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-17.1m

照片 5.1-1　ZK01 钻孔及岩芯照片

ZK02 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK02 岩心照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-19.6m

照片 5.1-2　ZK02 钻孔及岩芯照片

ZK03 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK03 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-14.8m	14.8-16m

照片 5.1-3　ZK03 钻孔及岩芯照片

ZK04 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK04 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-14.5m	

照片 5.1-4　ZK04 钻孔及岩芯照片

ZK05 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK05 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	10-16.5m

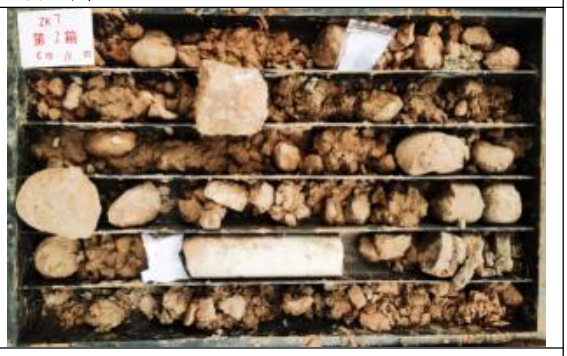
照片 5.1-5　ZK05 钻孔及岩芯照片

ZK06 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK06 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-11.5m	

照片 5.1-6　ZK06 钻孔及岩芯照片

ZK07 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK07 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-20m

20-25m

25-30m

30-35m

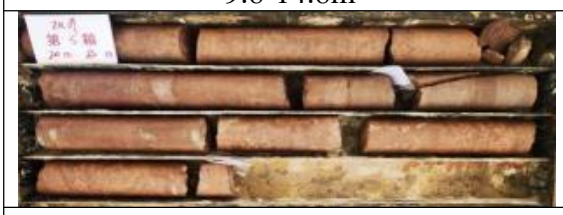
35-35.5m

照片 5.1-7　ZK07 钻孔及岩芯照片

ZK08 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK08 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-16m

照片 5.1-8　ZK08 钻孔及岩芯照片

ZK09 钻孔照片	
	
机台施工现场	波速测试现场
ZK09 岩芯照片	
	
1-5m	5-9.8m
	
9.8-14.8m	14.8-20m
	
20-23m	

照片 5.1-9　ZK09 钻孔及岩芯照片

ZK10 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

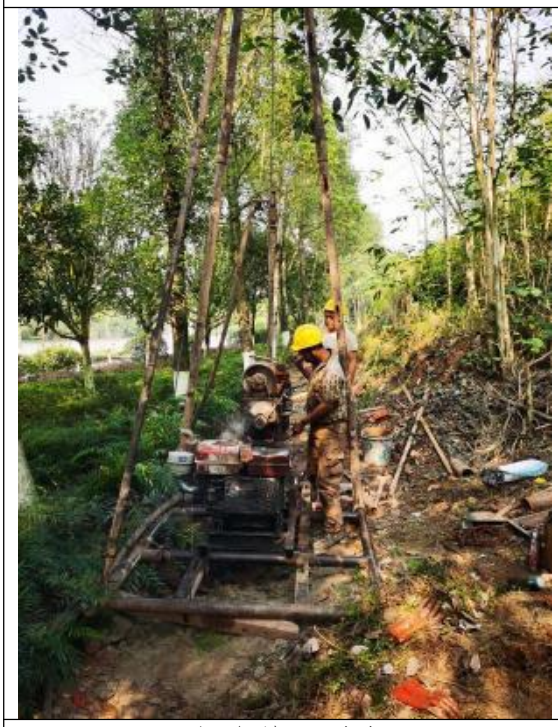
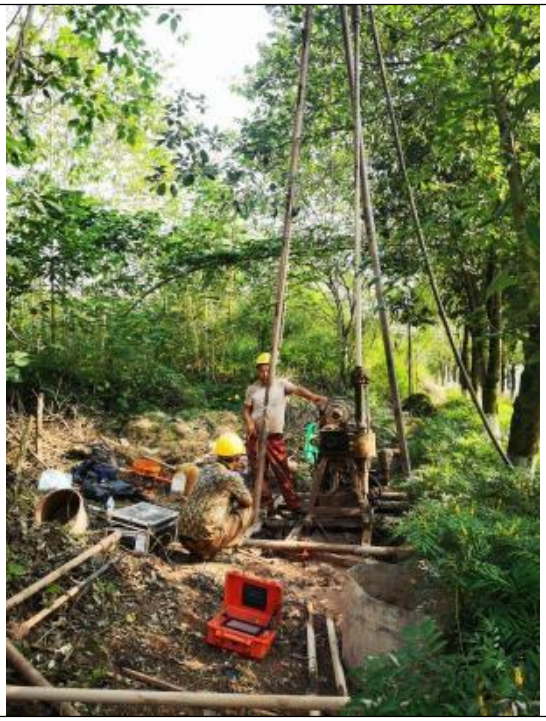
ZK10 岩心照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-14.2m	

照片 5.1-10　ZK10 钻孔及岩芯照片

ZK11 钻孔照片	
	
岩心+钻机	波速测试

ZK11 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-19.5m

照片 5.1-11　ZK11 钻孔及岩芯照片

ZK12 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试

ZK12 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-15m	15-16.5m

照片 5.1-12　ZK12 钻孔及岩芯照片

ZK13 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK13 岩芯照片	
	
1-5m	5-10m
	
10-11m	

照片 5.1-13　ZK13 钻孔及岩芯照片

ZK14 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK14 岩芯照片	
	
1-5m	**5-10m**
	
10-15m	**15-16.8m**

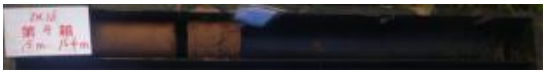
照片 5.1-14　ZK14 钻孔及岩芯照片

ZK15 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

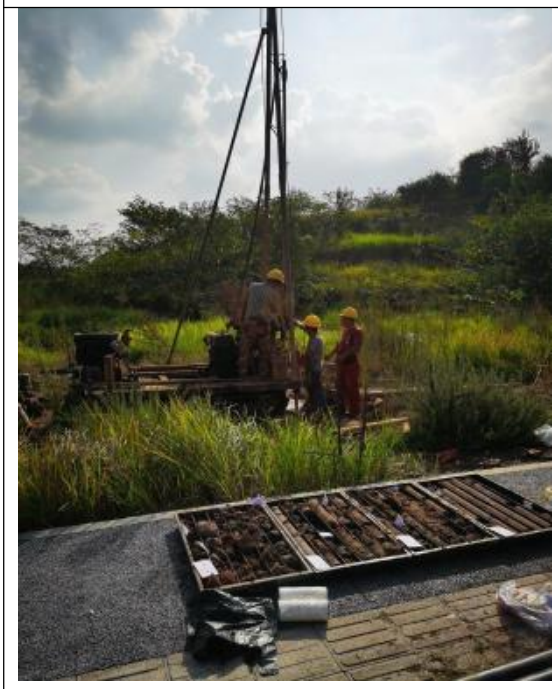
ZK15 岩芯照片	
	
1-5m	**5-10m**
	
10-15m	**15-17.7m**

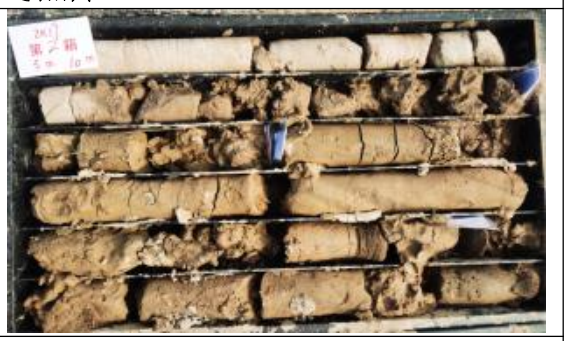
照片 5.1-15　ZK15 钻孔及岩芯照片

ZK16 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK16 岩芯照片	
	
1-5m	**5-10m**
	
10-15m	**15-16.4m**

照片 5.1-16　ZK16 钻孔及岩芯照片

ZK17 钻孔照片	
	
机台施工照片	波速测试照片

ZK17 岩芯照片	
	
1-5m	**5-10m**
	
10-15m	**15-19.4m**

照片 5.1-17　ZK17 钻孔及岩芯照片

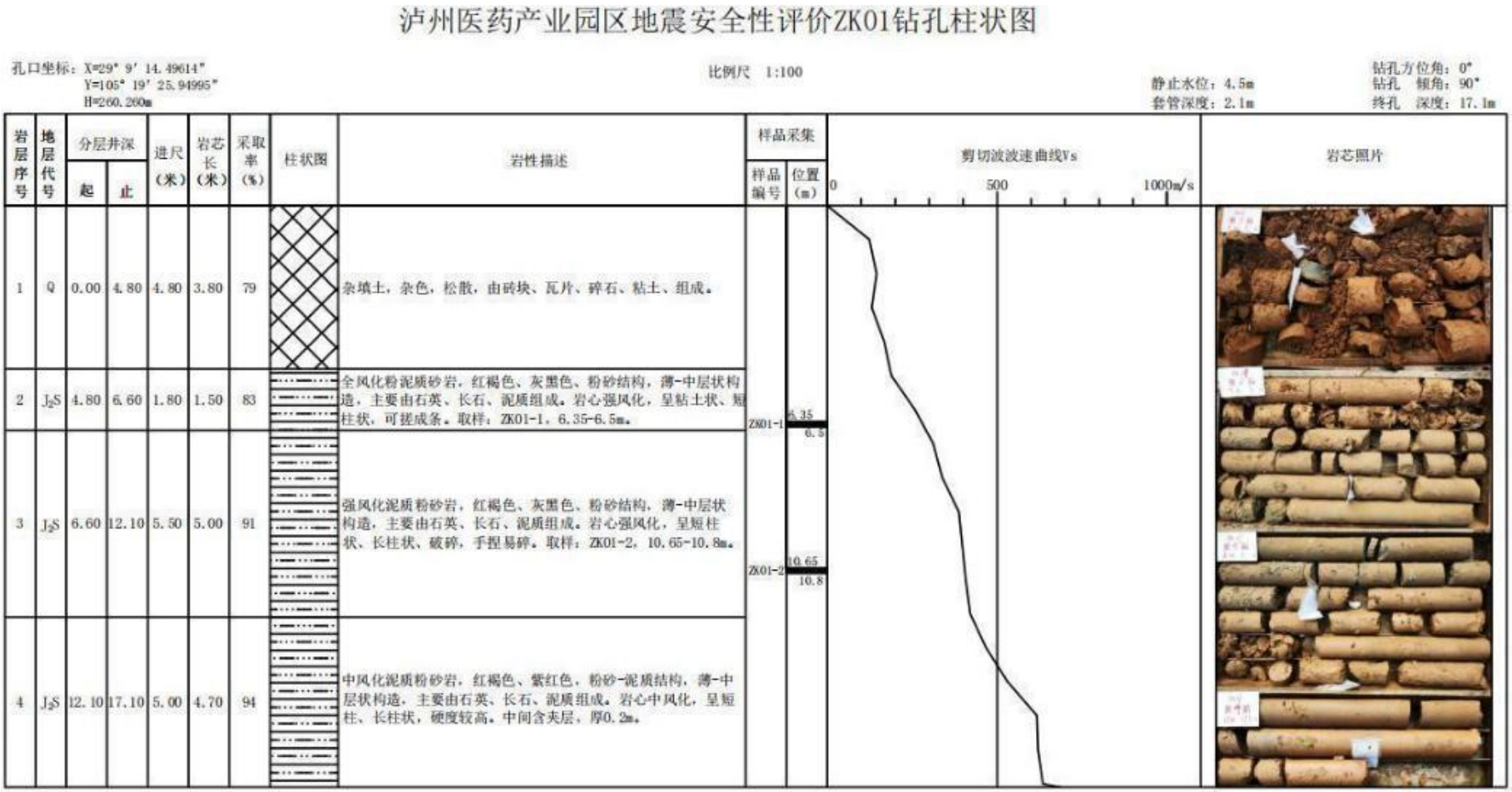


图 5.1-4　ZK01 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区地震安全性评价ZK02钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 9′ 14.96479″
Y=105° 19′ 47.54467″
H=263.512m

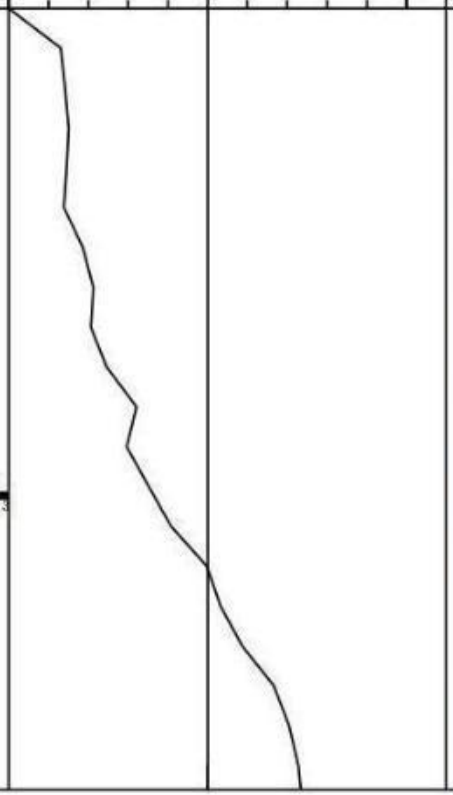
比例尺 1:100

静止水位：5.3m
套管深度：6.4m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：19.6m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.00	7.50	7.50	5.80	77		杂填土，杂色，松散，由粘土、砂粒、混凝土、砖块，砂岩组成。		
2	J_2S	7.50	12.80	5.30	4.30	81		强风化粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、粉砂组成。岩心强风化，呈碎块状、柱状，手捏易碎。取样：ZK02-1，12.15-12.30m。	ZK02-1	12.15 12.3
3	J_2S	12.80	14.10	1.30	1.10	85		强风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈碎块状、短柱状。		
4	J_2S	14.10	19.60	5.50	5.10	93		中风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心中风化，呈短柱状、长柱状，硬度较高。局部强风化，呈碎块状。		

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

图 5.1-5　ZK02 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区域地震安全性评价ZK03钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 9′ 12.62919″
Y=105° 20′ 13.88621″
H=263.483m

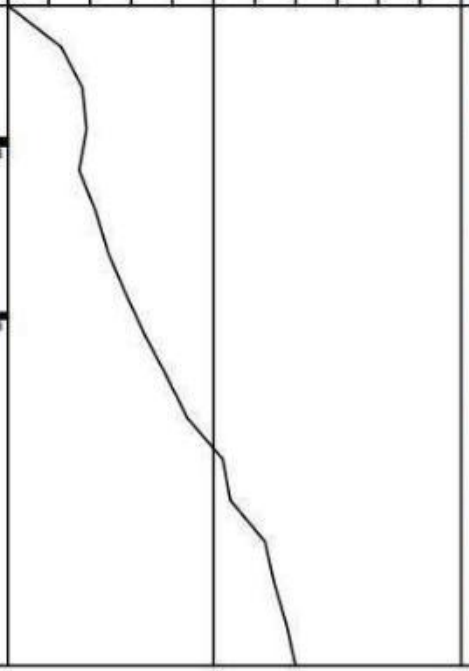
比例尺 1:100

静止水位：4.2m
套管深度：4.2m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：16m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.0	1.80	1.80	1.3	72		素填土，杂色、黄褐色，松散，由粉质粘土、砂粒、碎石组成。		
2	J_2S	1.8	7.45	5.65	4.5	80		全风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心全风化，绝大部分成粘土状。取样：ZK03-1，3.2-3.4m。	ZK03-1	3.2 3.4
3	J_2S	7.5	10.25	2.80	2.4	86		强风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈碎块状、短柱状。取样：ZK03-2，7.45-7.58m。	ZK03-2	7.45 7.58
4	J_2S	10.3	16.00	5.75	5.1	89		中风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心中风化，呈长柱状。		

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

图 5.1-6　ZK03 钻孔柱状及波速曲线图

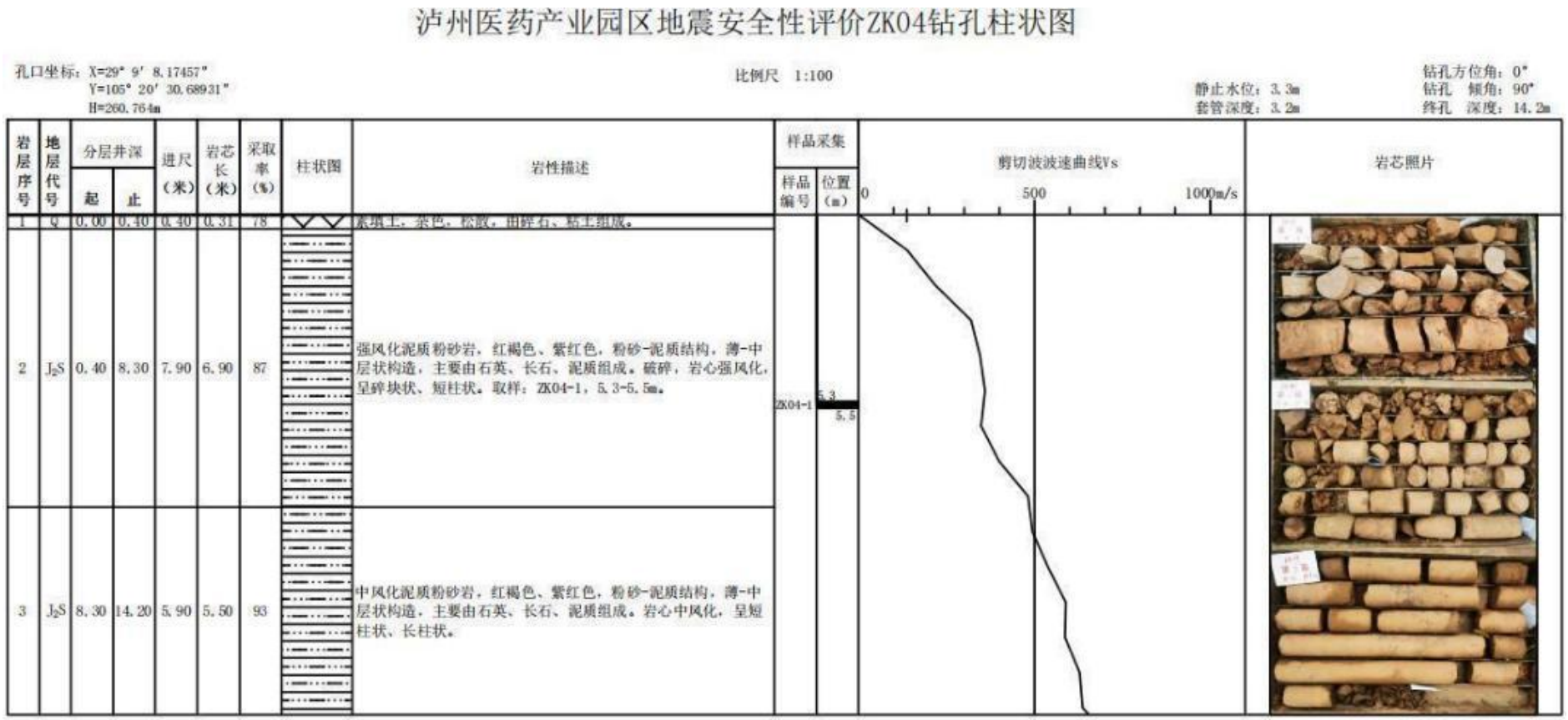


图 5.1-7　ZK04 钻孔柱状及波速曲线图

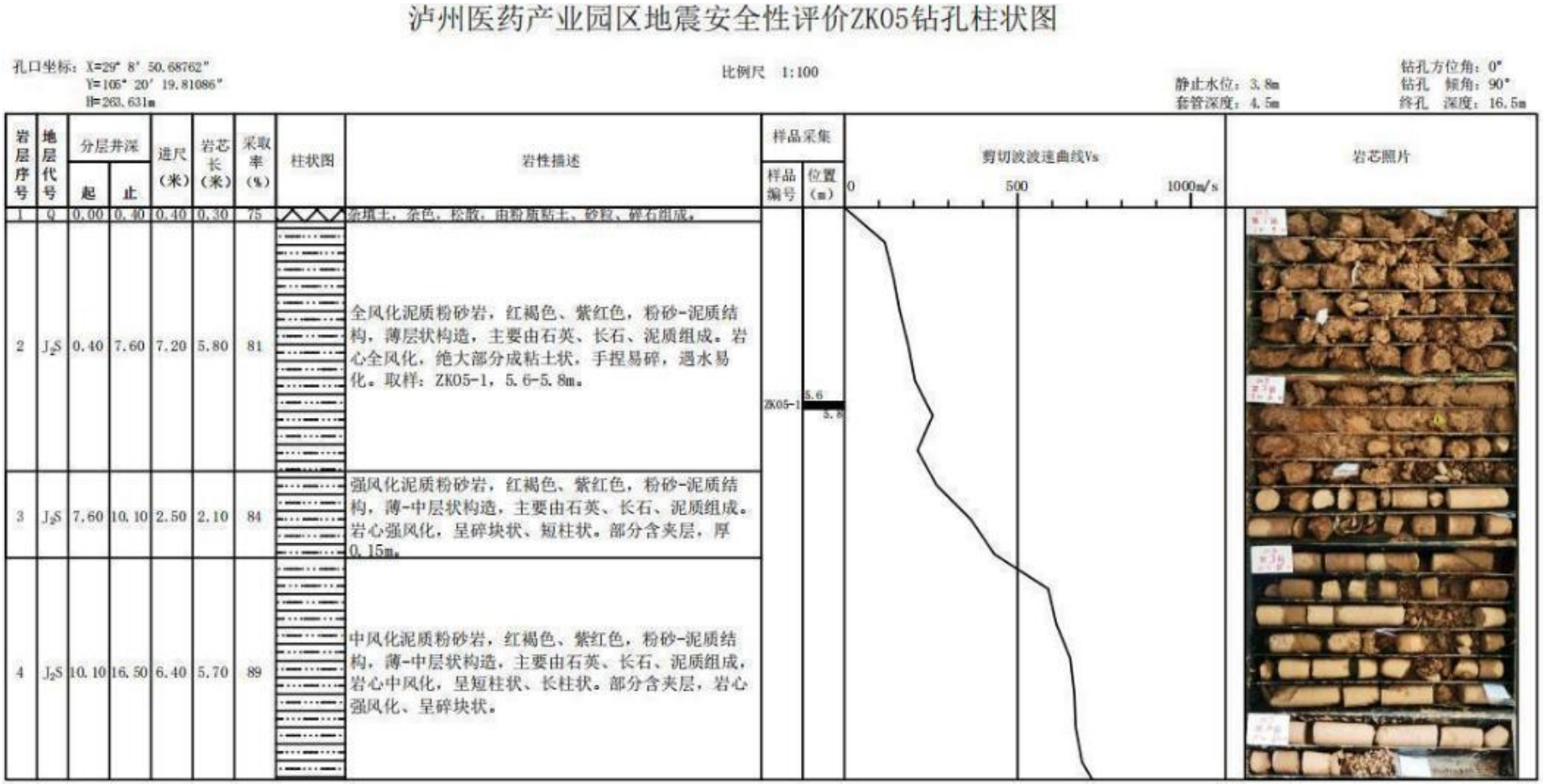


图 5.1-8　ZK05 钻孔柱状及波速曲线图

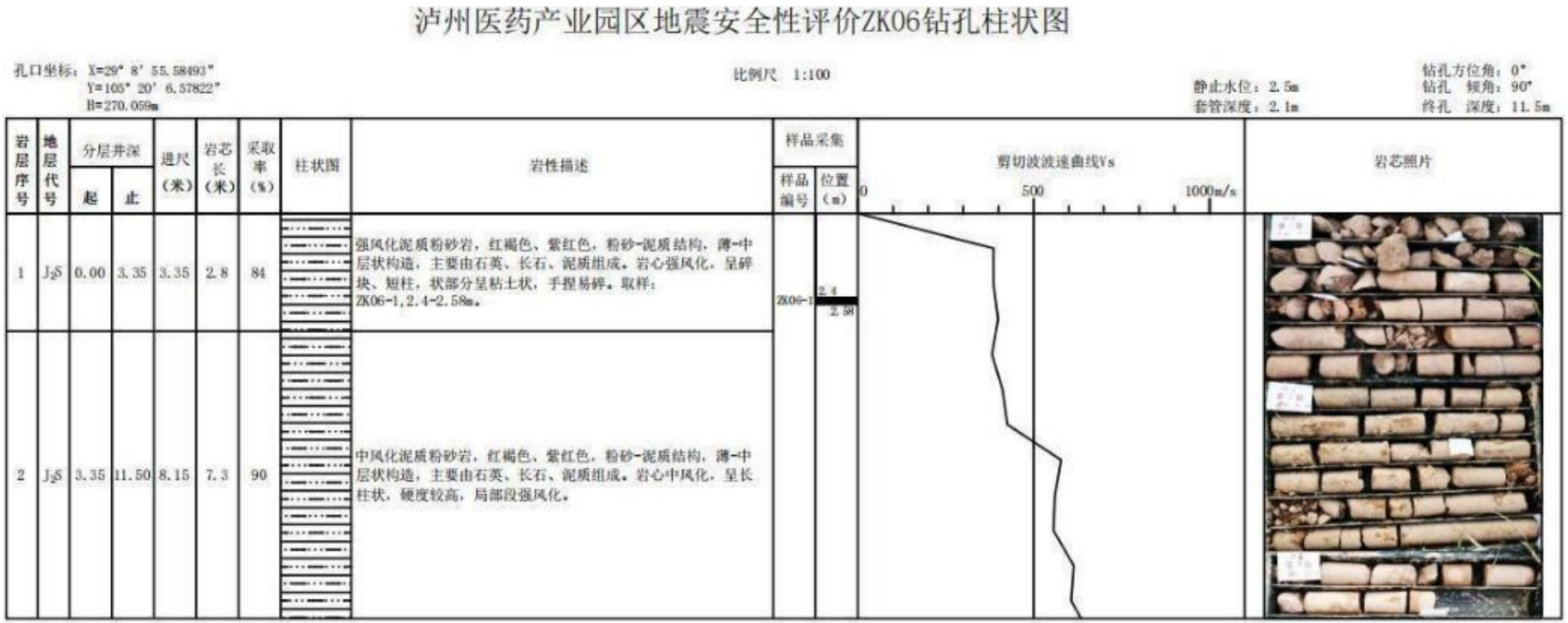


图 5.1-9　ZK06 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区地震安全性评价ZK07钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 8′ 32.41805″
Y=105° 19′ 14.16775″
H=263.604m

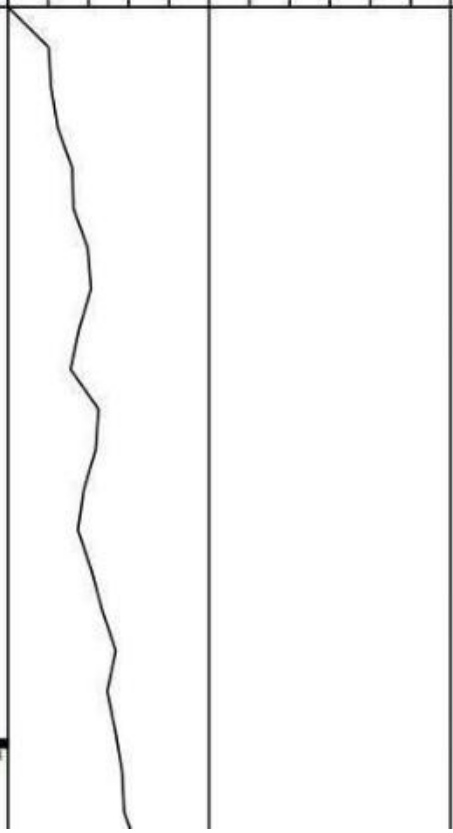
比例尺 1:100

静止水位：7.5m
套管深度：20m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：35.5m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.00	20.30	20.30	15.00	74		素填土，杂色，松散，由砂岩、碎石、粘土、粉质粘土、细沙、卵石组成。取样：ZK07-1,18.2-18.4m。	ZK07-1	18.2 18.4

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

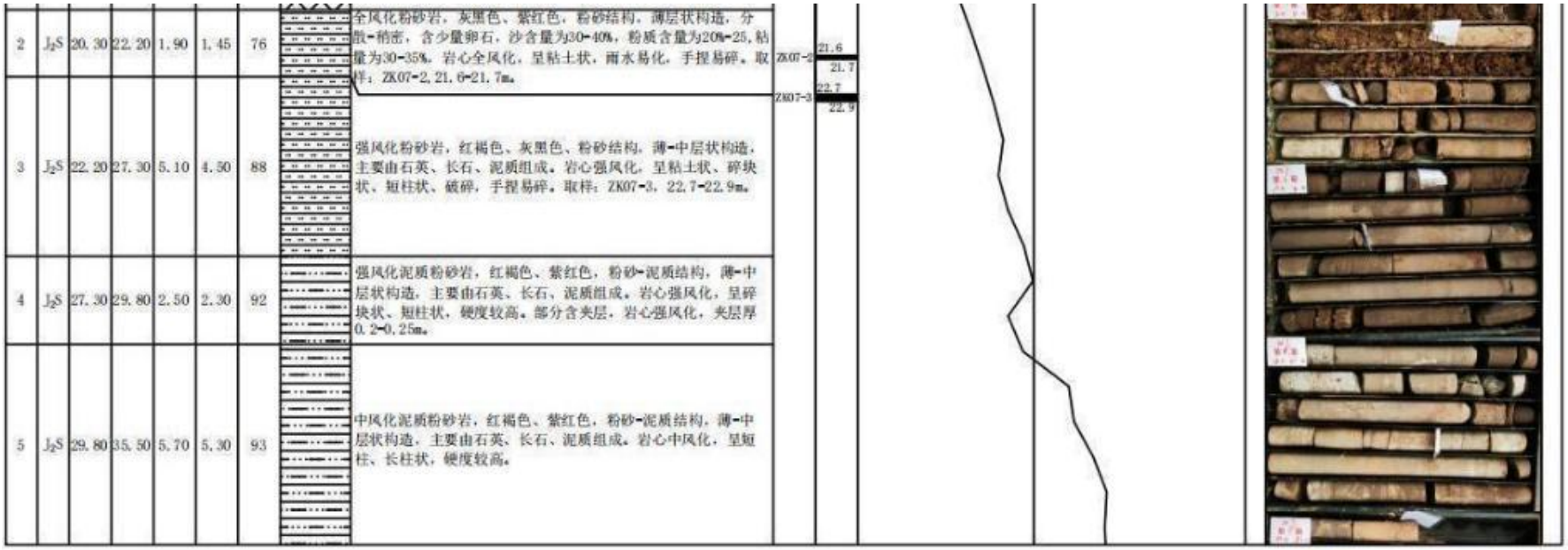


图 5.1-10 ZK07 钻孔柱状及波速曲线图

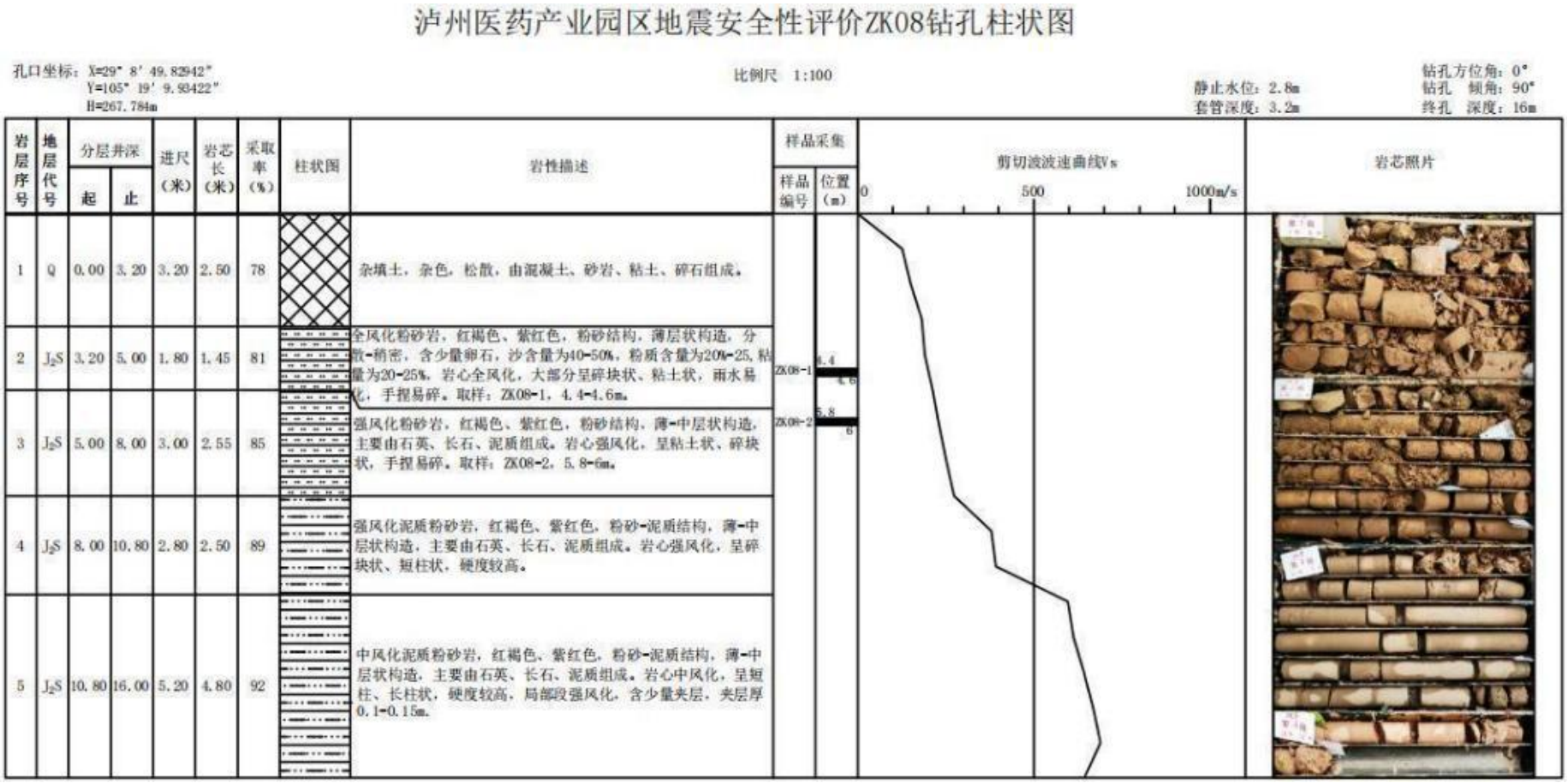


图 5.1-11　ZK08 钻孔柱状及波速曲线图

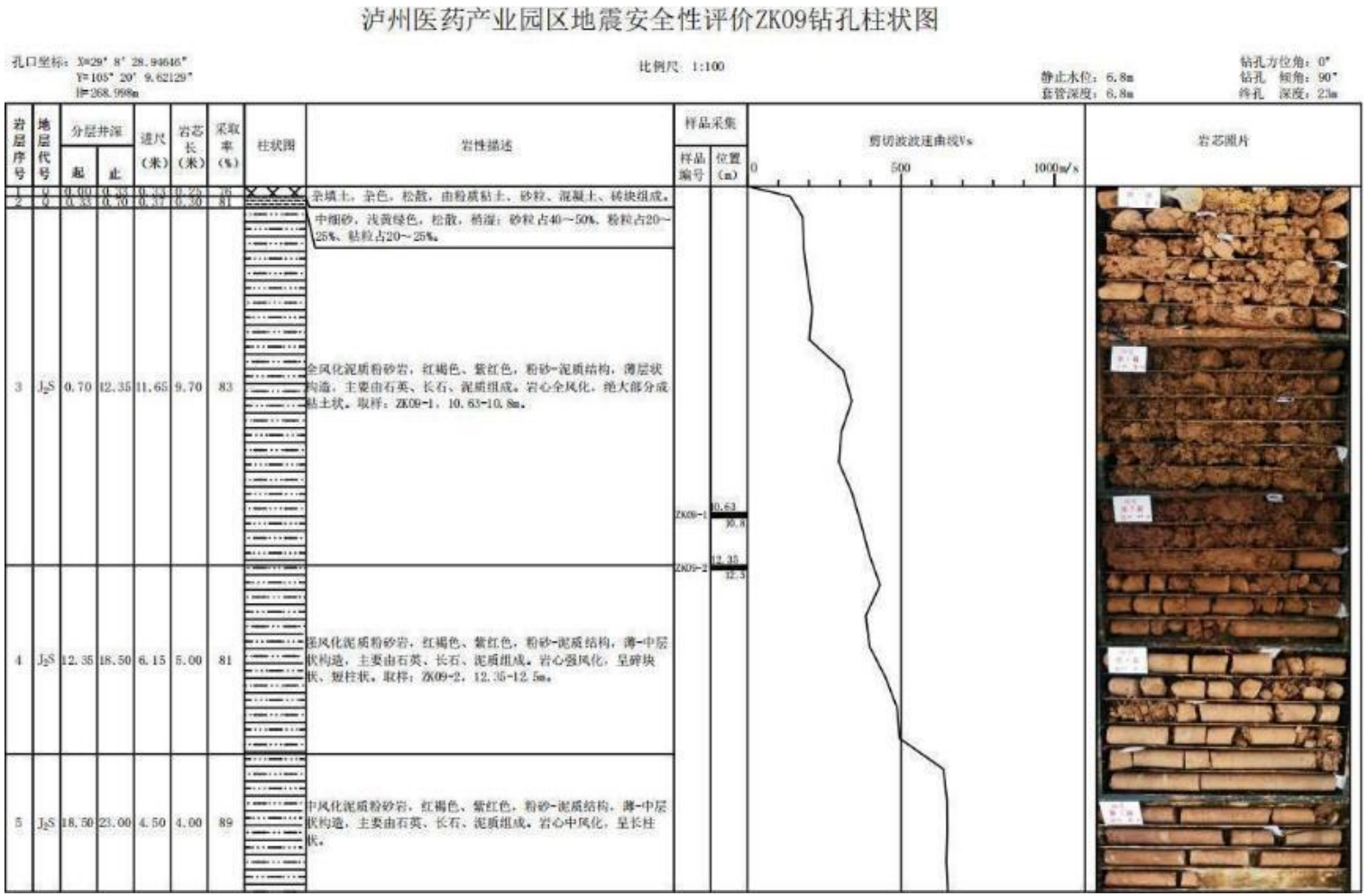


图 5.1-12　ZK09 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区地震安全性评价ZK10钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 8' 24.78820"
Y=105° 19' 49.62601"
H=255.966m

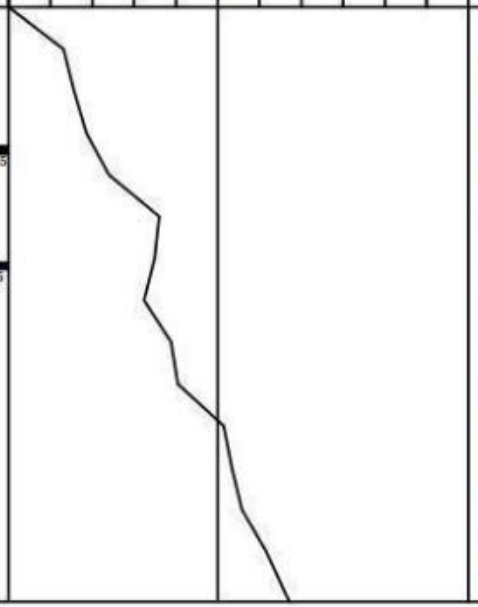
比例尺 1:100

静止水位：1.8m
套管深度：1.2m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：14.2m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.00	2.40	2.40	1.90	79		杂填土，杂色，松散，由粉质粘土、砂粒、碎石、砖块组成。		
2	J_2S	2.40	3.50	1.10	0.90	82		全风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心全风化，大部分呈碎块状、粘土状，手捏易碎，遇水易化。取样：ZK10-1，3.32-3.5m。	ZK10-1	3.32 3.5
3	J_2S	3.50	9.10	5.60	5.00	89		强风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈碎块状、短柱状。取样：ZK10-2，6.1-6.25m。	ZK10-2	6.1 6.25
4	J_2S	9.10	14.20	5.10	4.80	94		中风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心中风化，呈短柱状、长柱状。部分含夹层，岩心强风化、呈碎块状。		

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

图 5.1-13　ZK10 钻孔柱状及波速曲线图

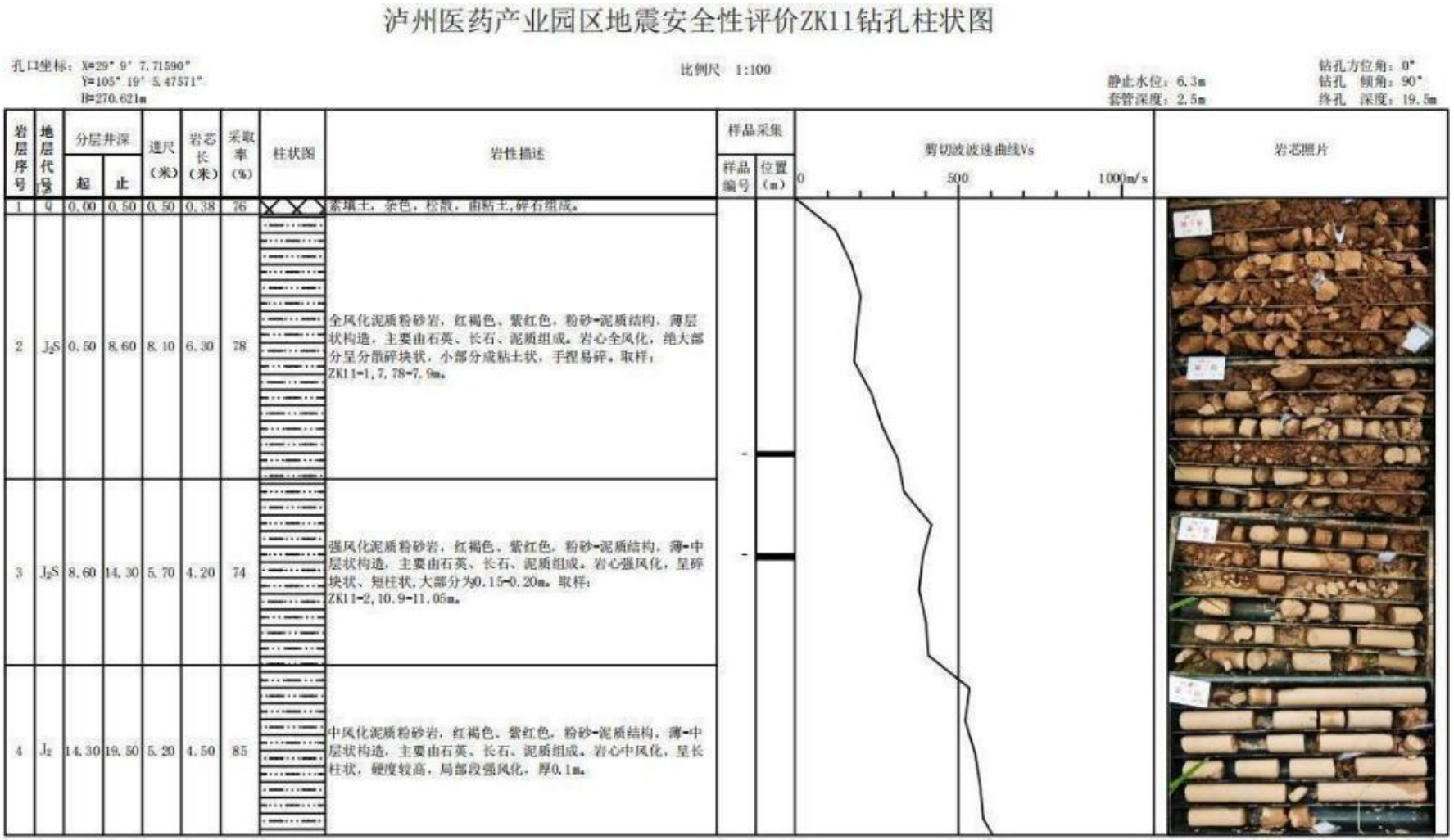


图 5.1-14　ZK11 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区地震安全性评价ZK12钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 8′ 12.09180″
Y=105° 19′ 59.76077″
H=256.527m

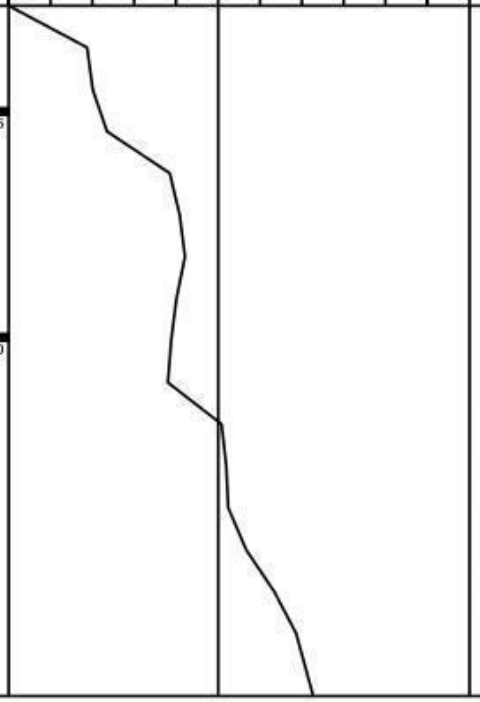
比例尺 1:100

静止水位：3.1m
套管深度：3.2m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：16.5m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.00	0.60	0.60	0.47	78		素填土，杂色，松散，由碎石、粘土、组成。		
2	J_2S	0.60	2.60	2.00	1.60	80		全风化泥质粉砂岩，红褐色、灰黑色、粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈粘土状、碎块状，可搓成条。取样：ZK12-1，2.45-2.6m。	ZK12-1	2.45 2.6
3	J_2S	2.60	10.00	7.40	6.70	91		强风化泥质粉砂岩，红褐色、灰黑色、粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈短柱状、长柱状。中间含夹层，厚0.5m。取样：ZK12-2，7.85-8m。	ZK12-2	7.85 8.0
4	J_2S	10.00	16.50	6.50	6.20	95		中风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心中风化，呈长柱状，硬度较高。中间含夹层，厚0.1.5m。		

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

图 5.1-15　ZK12 钻孔柱状及波速曲线图

泸州医药产业园区域地震安全性评价ZK13钻孔柱状图

孔口坐标：X=29° 8′ 59.37879″
Y=105° 19′ 24.46848″
H=271.881m

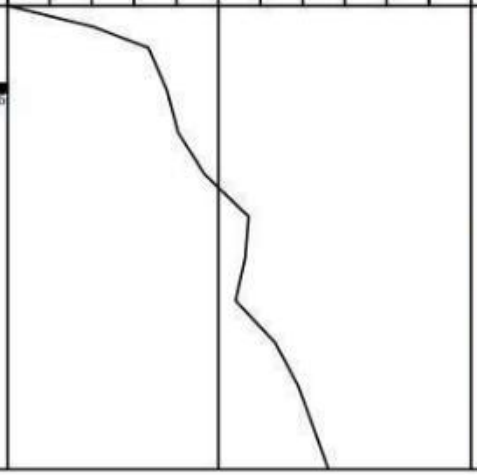
比例尺 1:100

静止水位：1.8m
套管深度：3.4m

钻孔方位角：0°
钻孔 倾角：90°
终孔 深度：11m

岩层序号	地层代号	分层井深 起	分层井深 止	进尺（米）	岩芯长（米）	采取率（%）	柱状图	岩性描述	样品采集 样品编号	样品采集 位置（m）
1	Q	0.00	0.50	0.50	0.39	78		素填土，杂色，松散，由细沙、粘土、碎石组成。		
2	J_2S	0.50	2.30	1.80	1.45	81		全风化粉砂岩，红褐色、紫红色，泥质结构，薄层状构造，分散-稍密，主要由石英、长石、砂岩组成。岩心全风化，大部分呈分散碎块状，手捏易碎。取样：ZK13-1,1.85-2.05m。	ZK13-1	1.85 2.05
3	J_2S	2.30	4.10	1.80	1.55	86		强风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心强风化，呈碎块状、短柱状。		
4	J_2S	4.10	11.00	6.90	6.40	93		中风化泥质粉砂岩，红褐色、紫红色，粉砂-泥质结构，薄-中层状构造，主要由石英、长石、泥质组成。岩心中风化，呈短柱状、长柱状，硬度较高。部分含夹层，岩心强风化，厚度大约0.15m。		

剪切波波速曲线Vs



岩芯照片

图 5.1-16 ZK13 钻孔柱状及波速曲线图

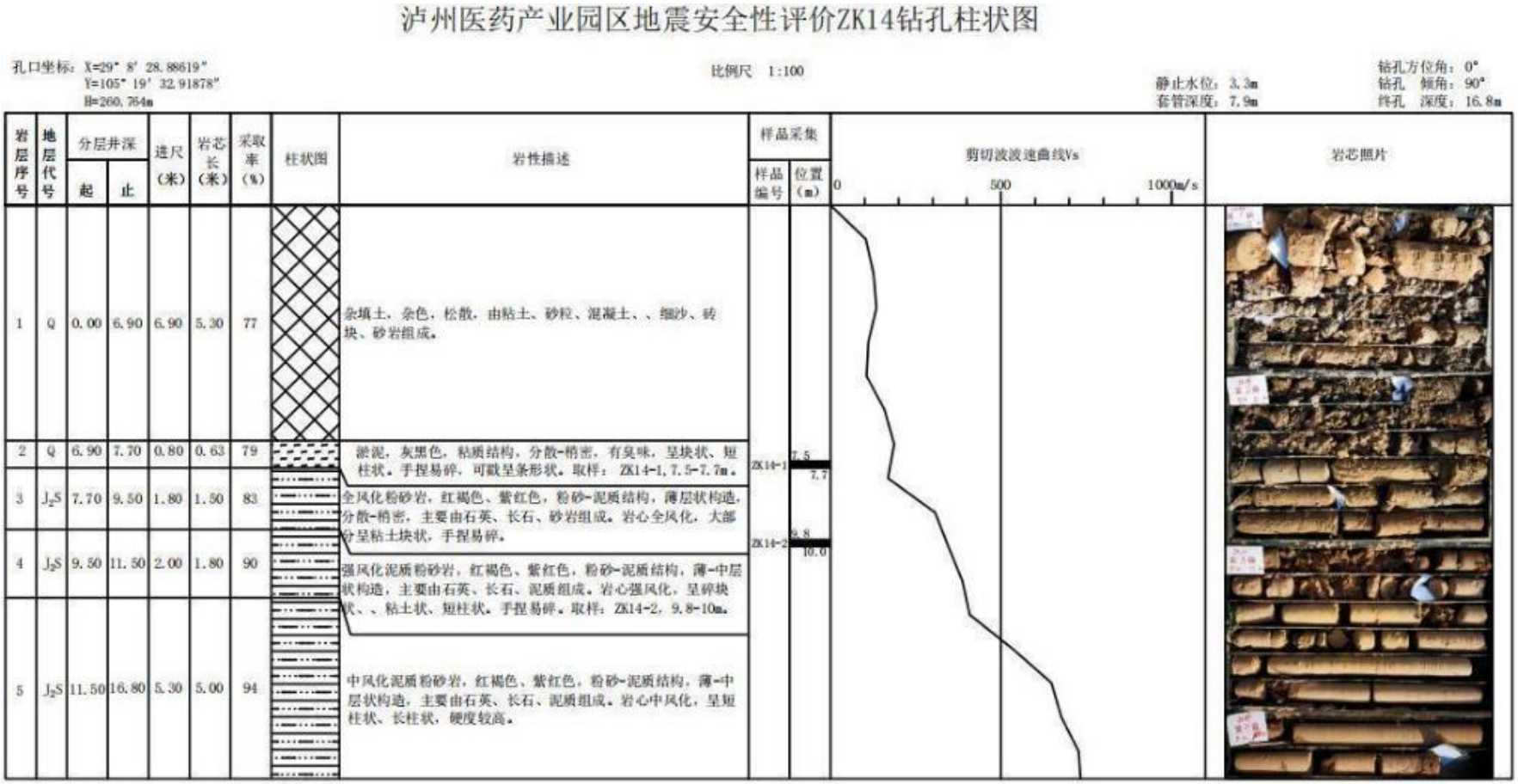


图 5.1-17　ZK14 钻孔柱状及波速曲线图

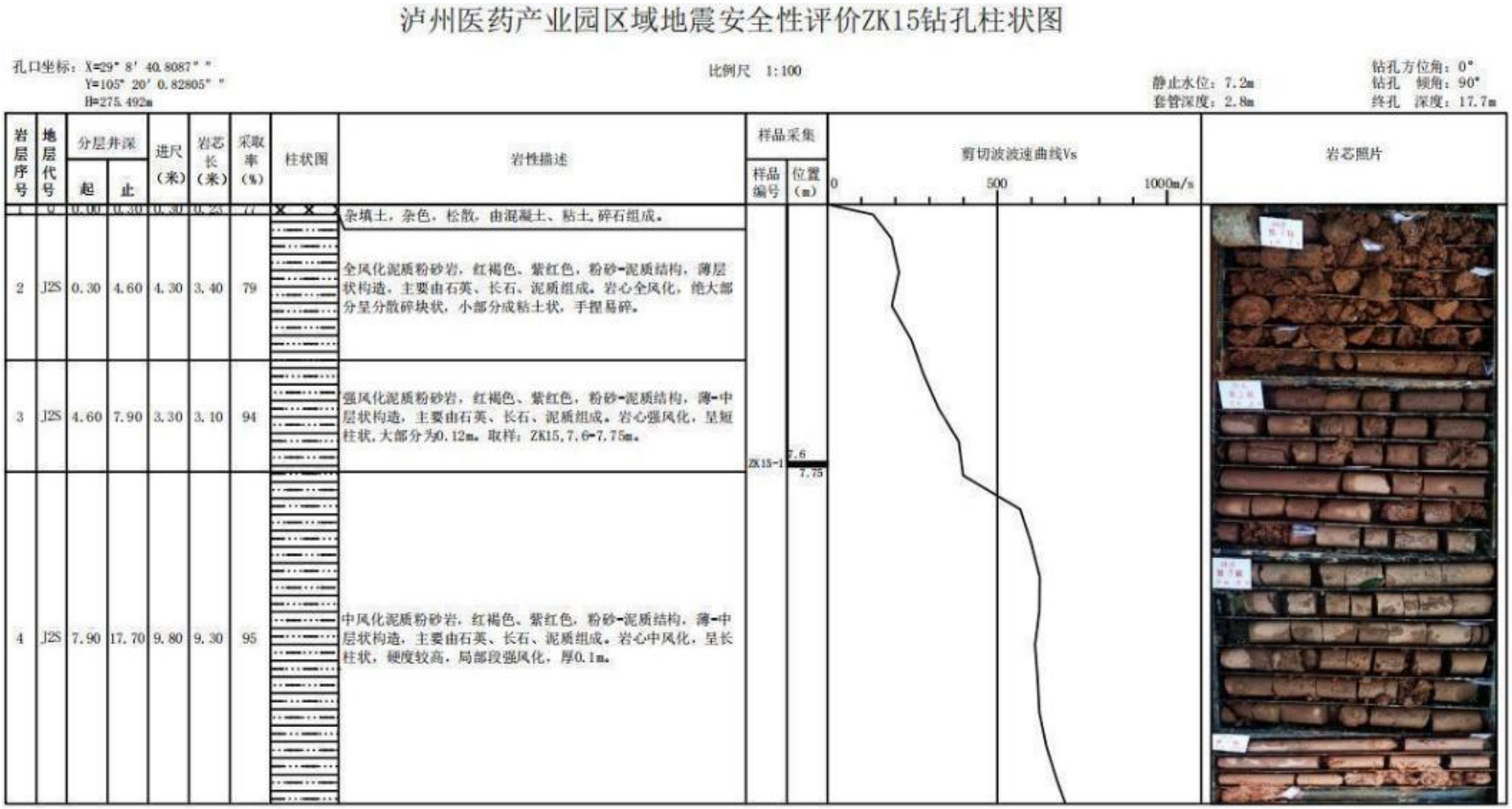


图 5.1-18　ZK15 钻孔柱状及波速曲线图

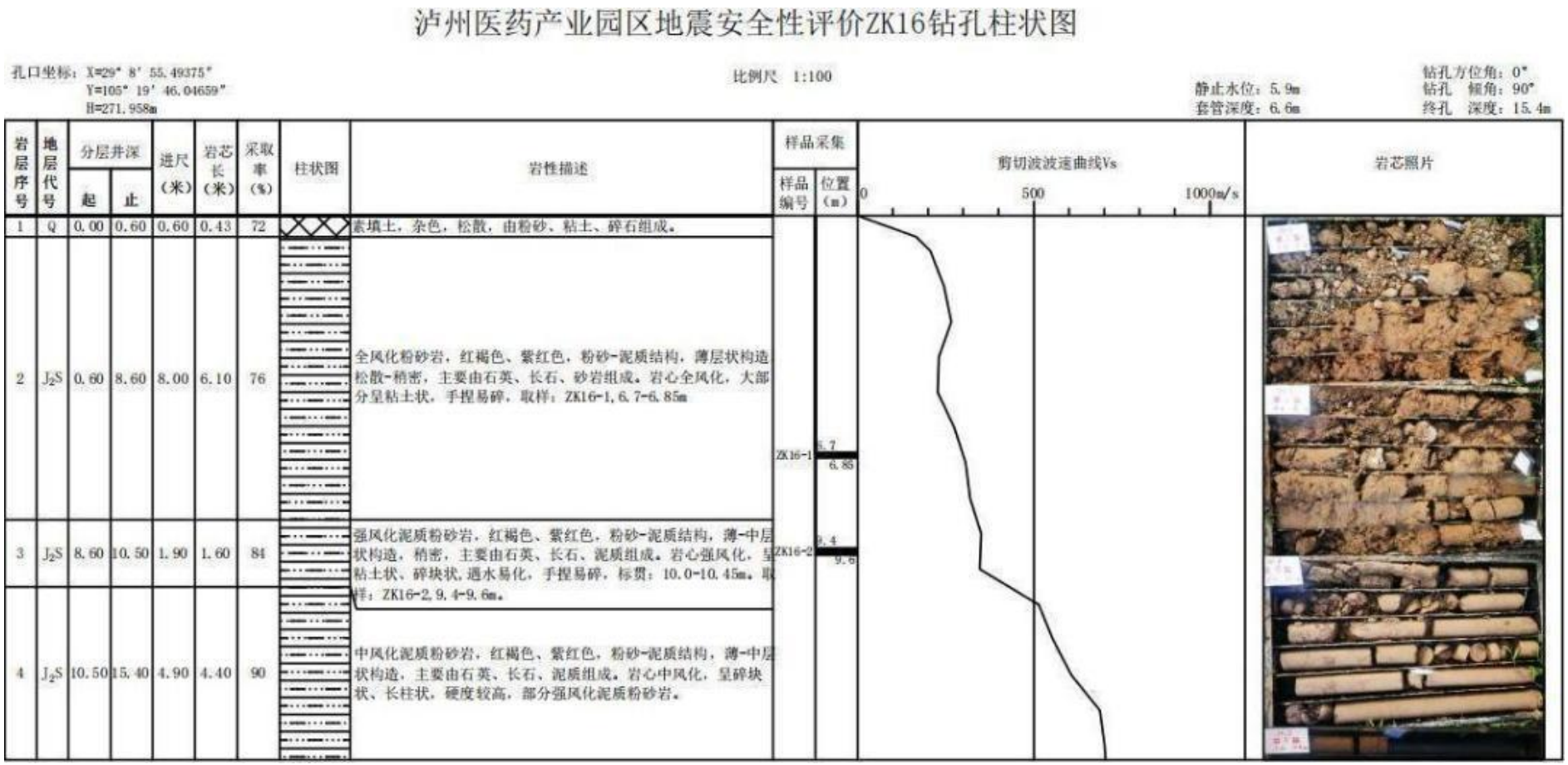


图 5.1-19　ZK16 钻孔柱状及波速曲线图

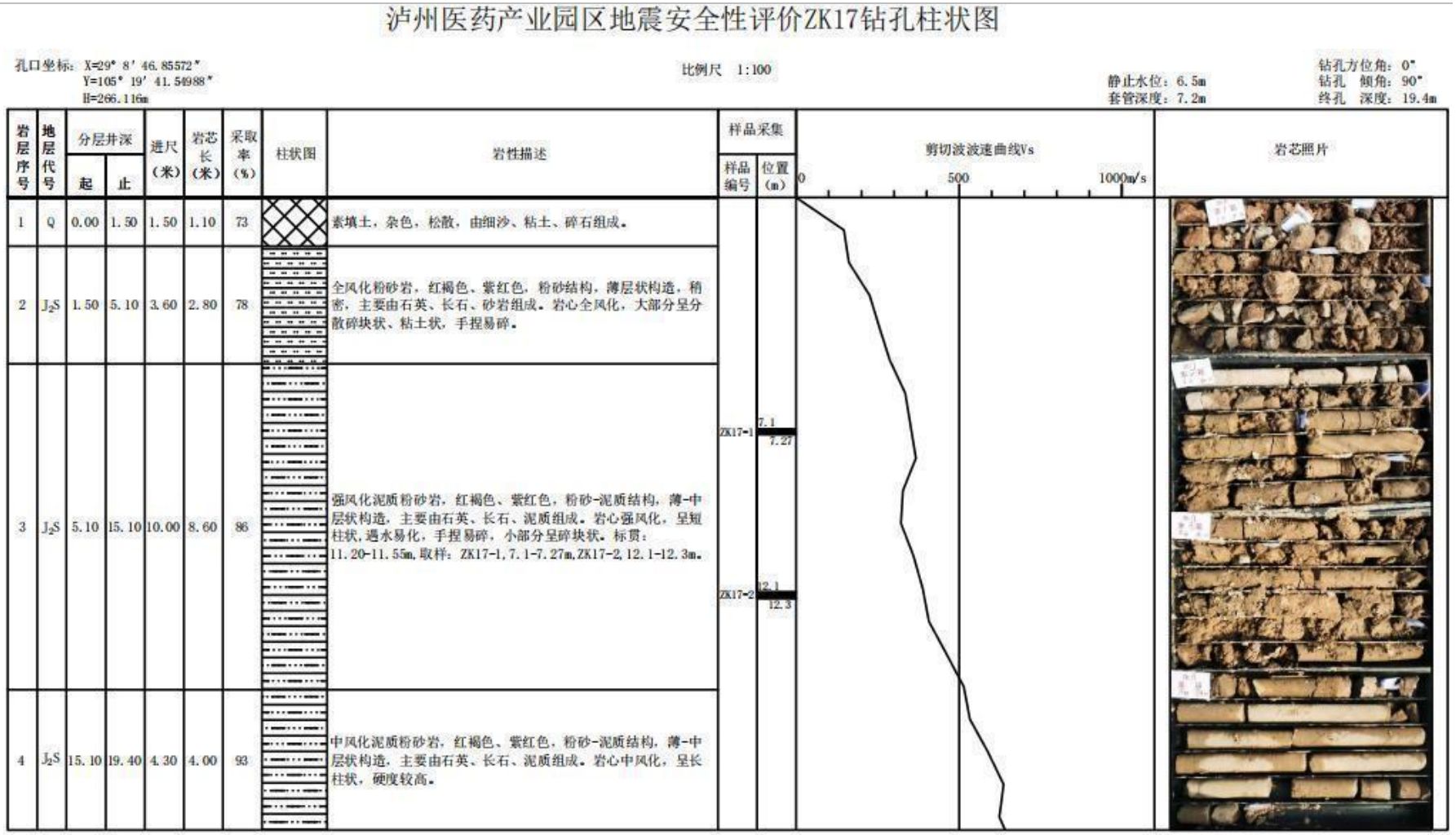


图 5.1-20　ZK17 钻孔柱状及波速曲线图

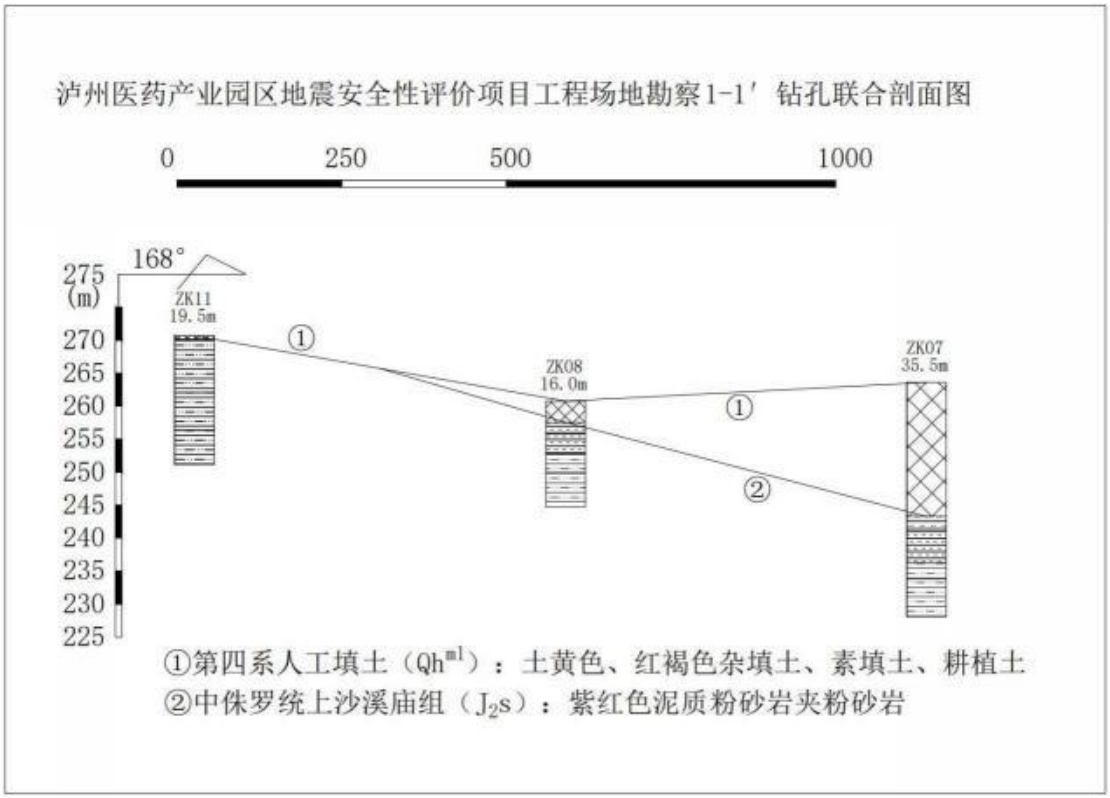


图 5.1-21　1-1′钻孔联合剖面图

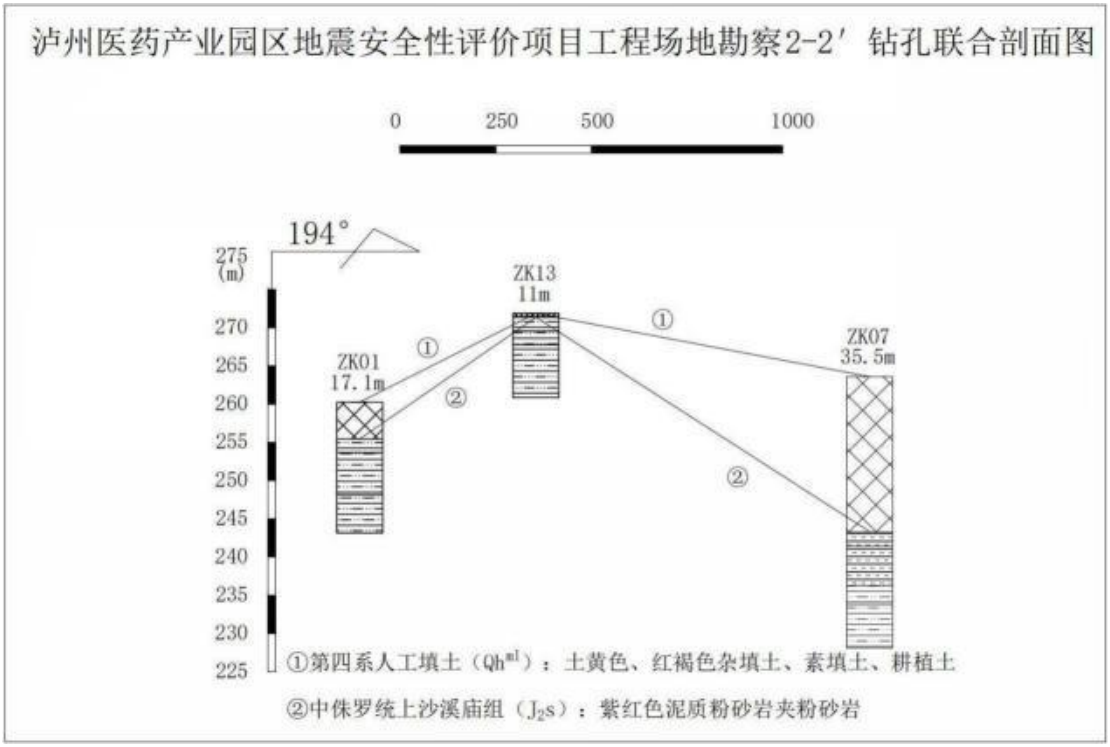


图 5.1-22　2-2′钻孔联合剖面图

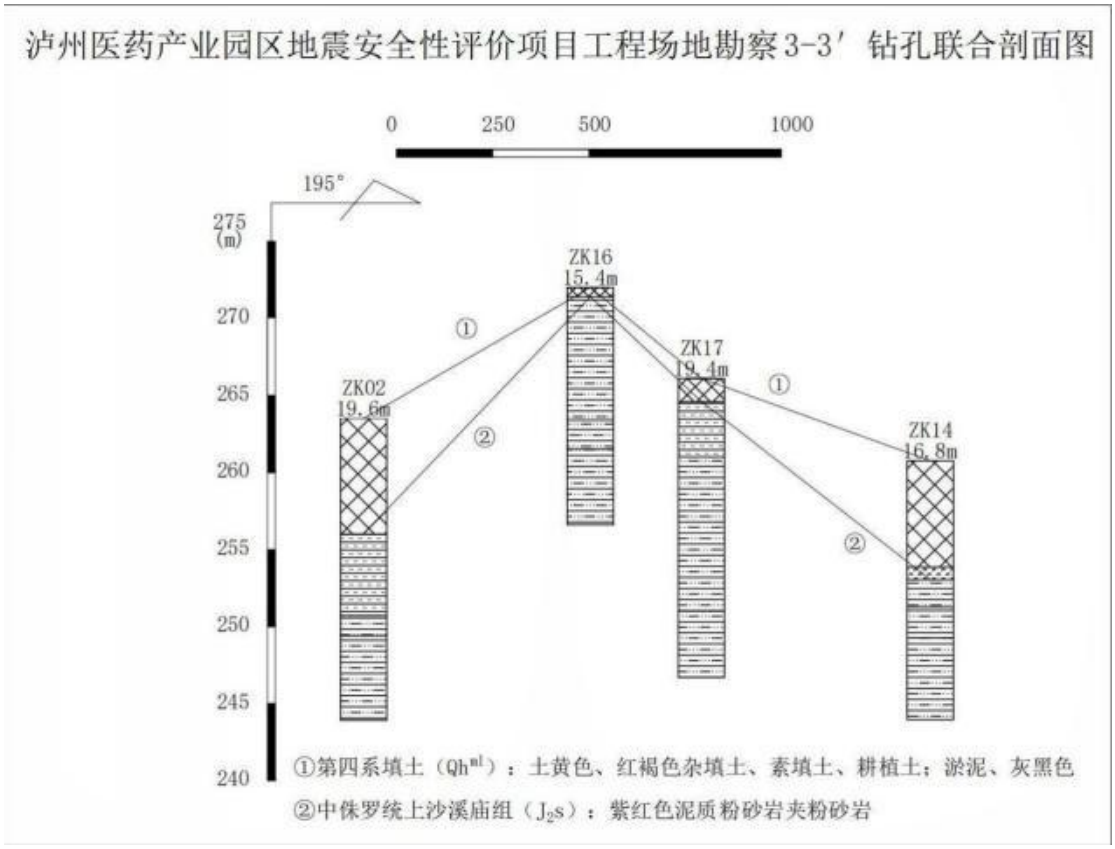


图 5.1-23　3-3′钻孔联合剖面图

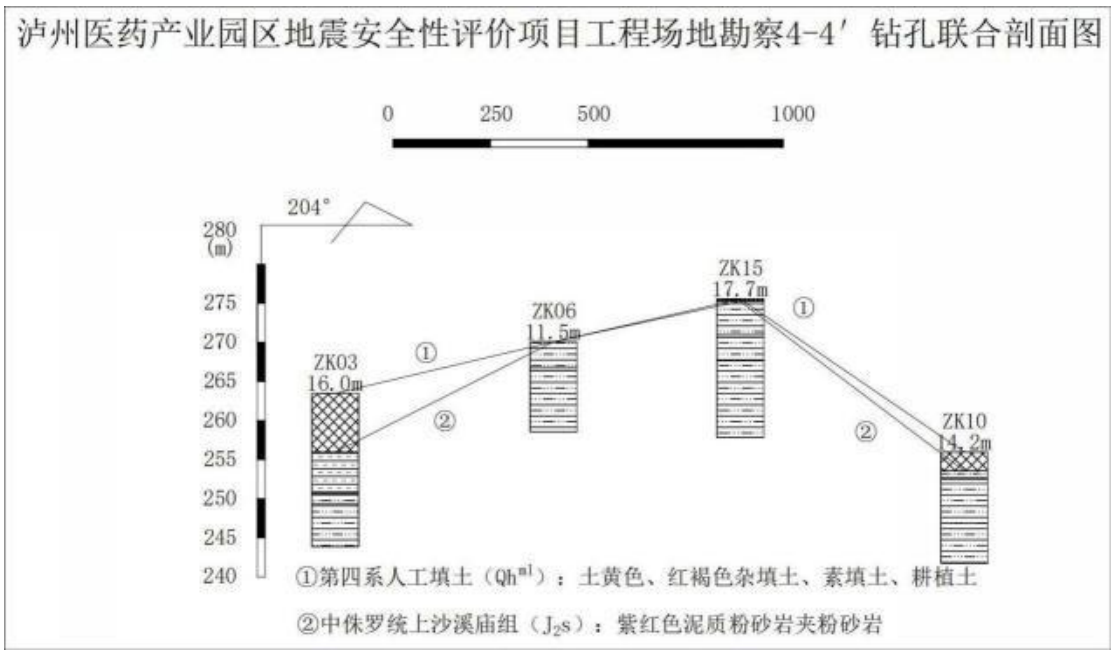


图 5.1-24　4-4′钻孔联合剖面图

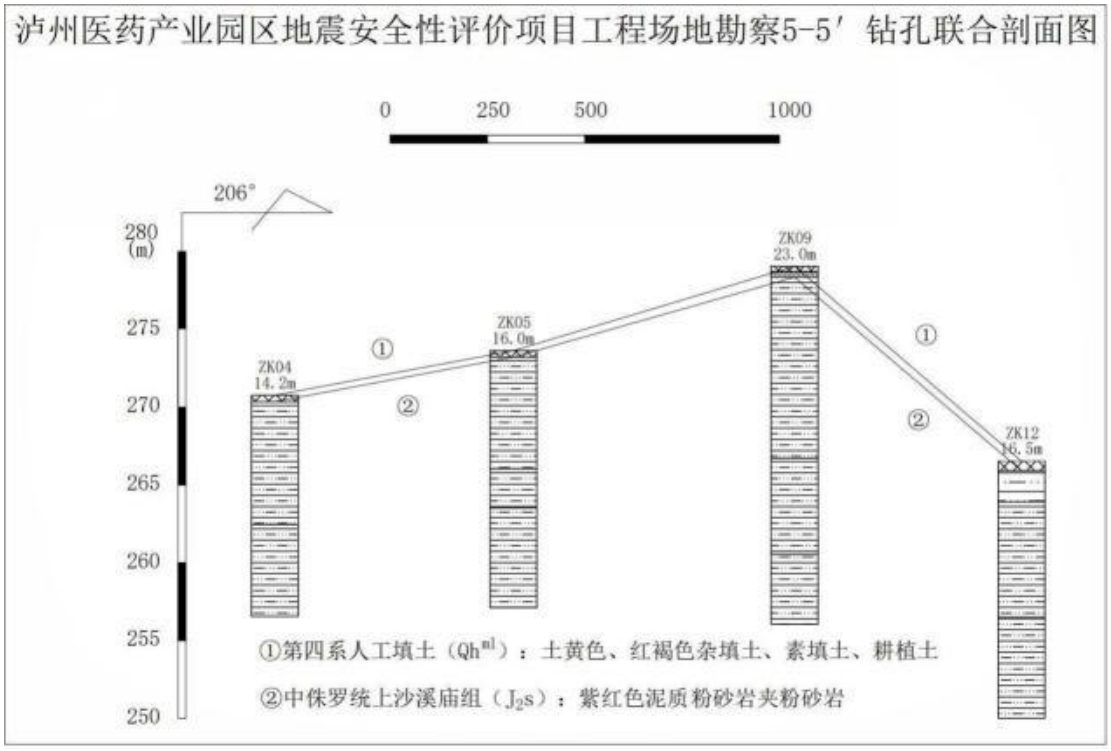


图 5.1-25　5-5′钻孔联合剖面图

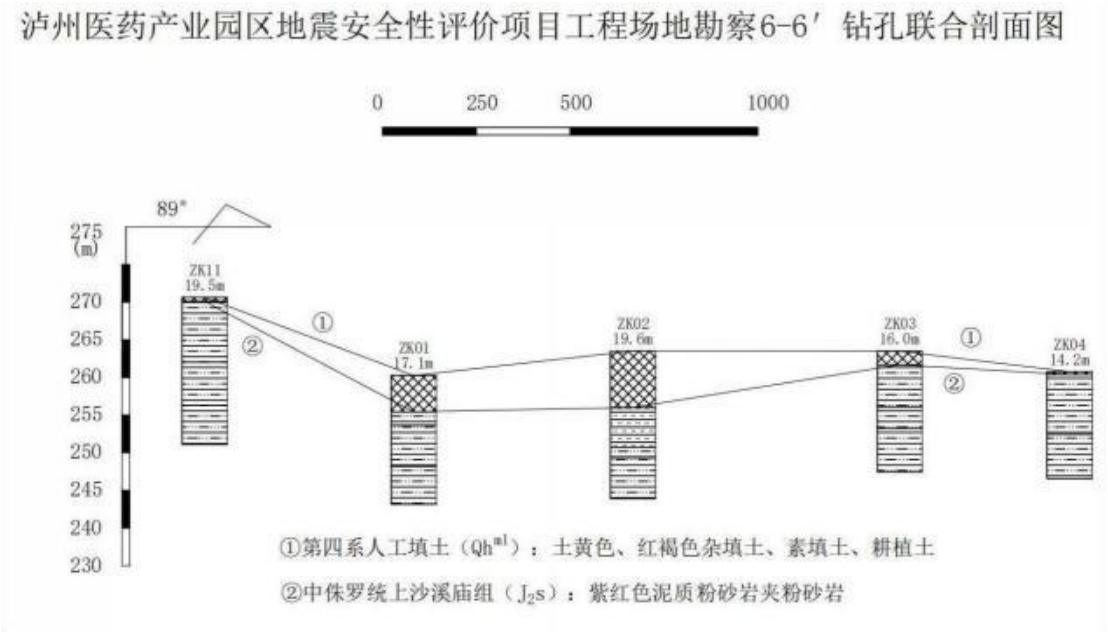


图 5.1-26　6-6′钻孔联合剖面图

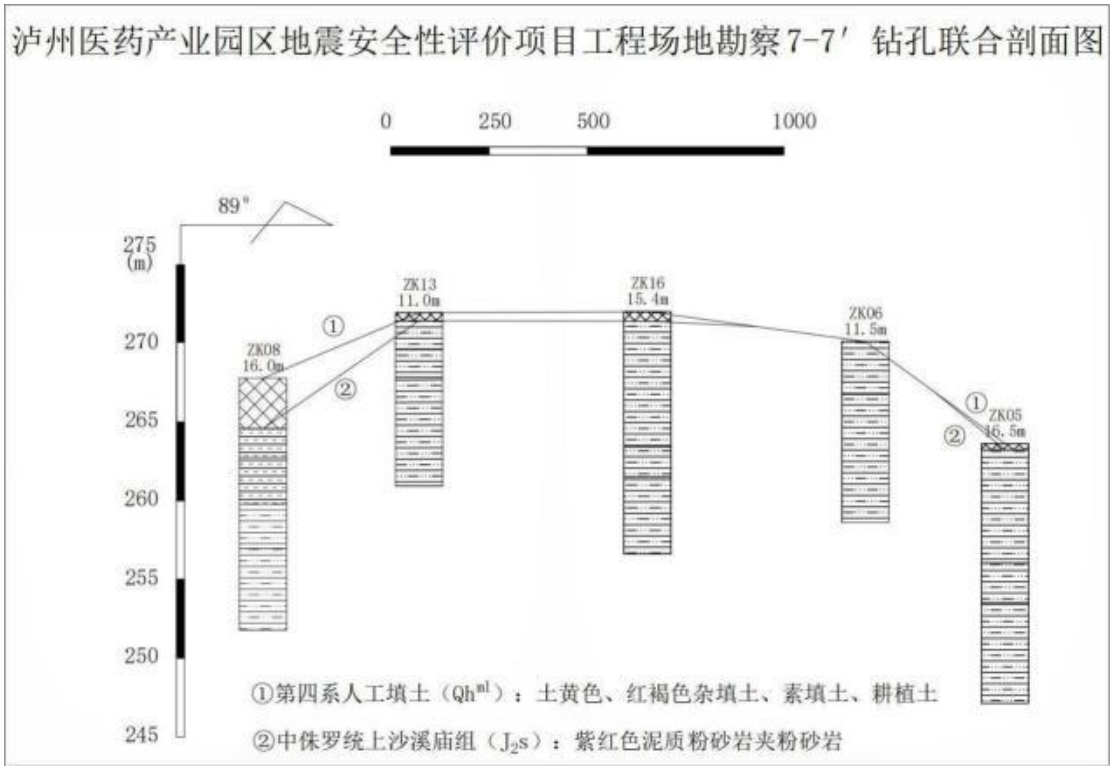


图 5.1-27　7-7′钻孔联合剖面图

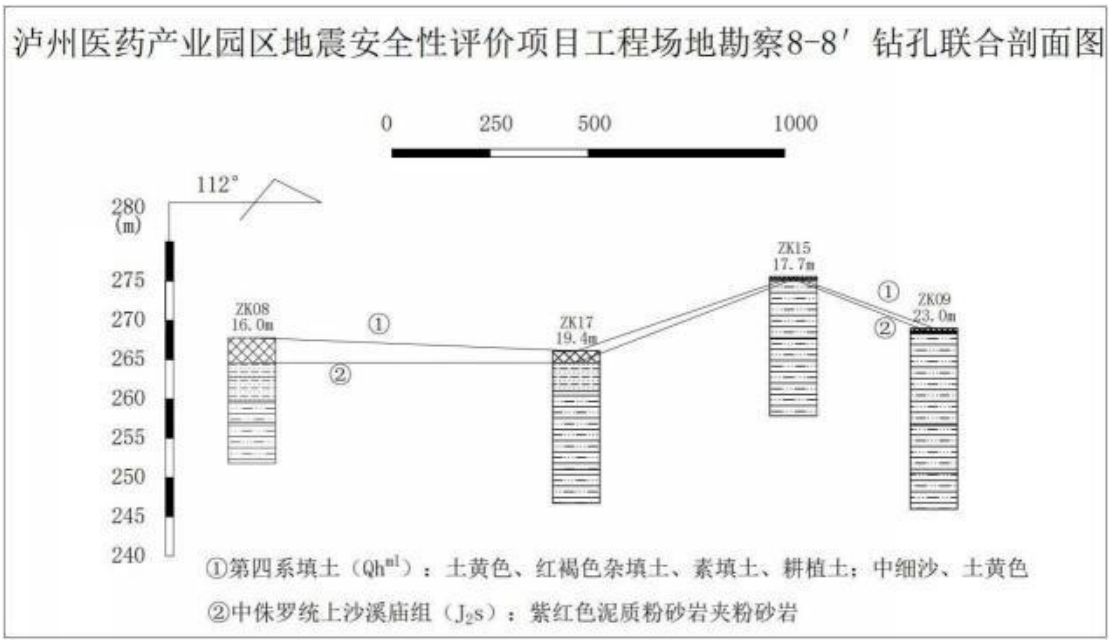


图 5.1-28　8-8′钻孔联合剖面图

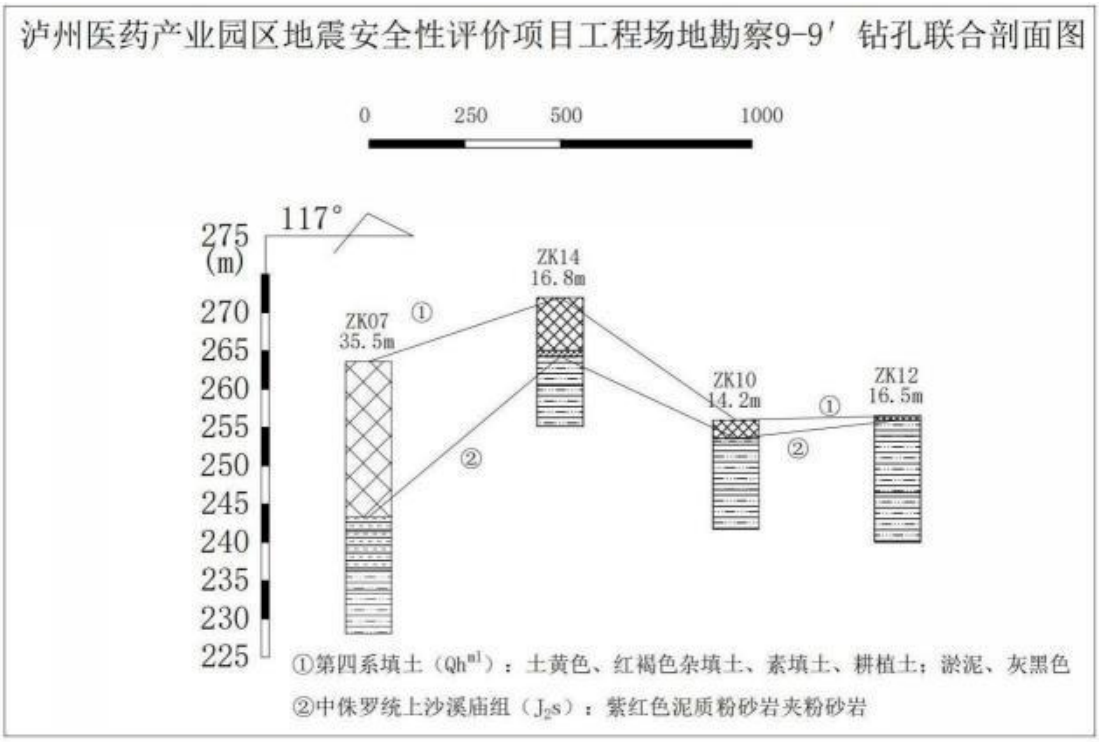


图 5.1-29　9-9′钻孔联合剖面图

5.2 场地土层剪切波速测试方法和结果

5.2.1 测试依据及目的

测试工作依据国家行业标准《地基动力特性测试规范》GB/T50269-2015、《建筑抗震设计规范》GB 50011-2010（2016 版）、《岩土工程勘察规范》GB50021-2001（2009 版）进行。测试点距为 1m，岩性分层处加测。根据测试结果，提供以下动力参数：

1、场地内各地层纵波（Vp）和横波（Vs）的传播速度。

2、场地卓越周期。

3、动弹性模量(Ed)，动剪切模量（Gd）和动泊松比（Ud）。

5.2.2 试验仪器设备和方法

（1）试验仪器设备

1）震源设备

本次试验采用击板法：将激振板放在离孔口约 1m 处的地面，并保持两者之间接触良好，木板上压约 500kg 重物。用铁锟头，水平敲击木板端部，木板与地面产生剪切力，使地层产生剪切波，测试示意图如下：

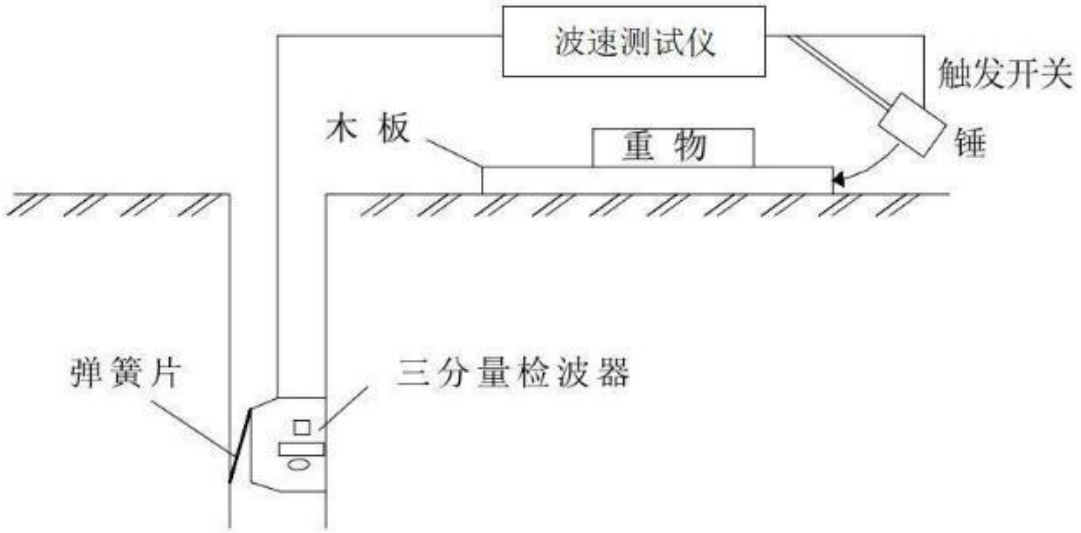


图 5.2-1　单孔波速测试示意图

2）试验仪器

数据采集仪采用上海岩联工程技术有限公司的 YL-SWT 剪切波波速测试仪，检波器为上海岩联工程技术有限公司的三分量井下传感器。

（2）试验方法

试验步骤

1）平整场地、使激震板离孔口的水平距离约 1m ，上压重物约 500kg。

2）接通电源，在地面检查测试仪正常后，即可进行试验。

3）把三分量检波器放入孔内预定深度，通过地面控制开关将弹簧片张开，使三分量检波器紧贴孔壁。

4）用铁锤水平敲击激振板一端，地表产生的剪切波经地层传播，由孔内三分量检波器的水平检波器接收 SH 波信号，该信号经电缆送入仪器放大记录。试验要求仪器获得三次清晰的记录波形。然后反向敲击木板，以同样获得三次清晰波形。最后竖向敲击木板，以获得纵波波速信号。

5）上提探头，把孔内三分量检波器放到下一测试点的深度，重复上述步骤。

6）整个钻孔测试完后，要检查野外测试记录是否完整，并测定孔内水位。

试验方法

波速测试采用单孔法，如下图。

O 为孔口，dx 为激振板中心到孔口的距离。

第 i 测试点至第 i-1 测试点的横波波速：

Vsi=dh/(ticos α i-ti-1cos α i-1)

Dh：第 i 点至 i-1 点的地层厚度。

ti，ti-1：第 i 点和第 i-1 点 Vsi 的走时。

α i，α i-1：激振源 A 到第 i 点和第 i-1 点的连线分别与井轴线的夹角。

推算场地卓越周期：

$$T=\Sigma 4hi/Vsi$$

5.2.3 土的划分和覆盖层厚度的划分依据

土层的划分和相应的剪切波速度范围，见表 5.2-1

表 5.2-1　土的划分和剪切波速度范围表

土的类型	岩土名称和性状	土层剪切波速范围 (m/s)
岩石	坚硬和较坚硬的稳定岩石	Vs>800
坚硬土或软质岩石	破碎和较破碎的岩石或软和较软的岩石，密实的碎石土	800≥Vs>500
中硬土	中密、稍密的碎石土，密实、中密的砾、粗、中砂，fak>150 的粘性土和粉土，坚硬黄土	500≥Vs>250
中软土	稍密的砾、粗、中砂，除松散外的细、粉砂，fak≤150 的粘性土和粉土，fak>130 的填土，可塑新黄土	250≥Vs>150
软弱土	淤泥和淤泥质土，松散的砂，新近沉积的粘性土和粉土，fak≤130 的填土，流塑黄土	Vs≤150

各类建筑场地的覆盖层厚度以及场地划分，见表 5.2-2。

表 5.2-2　各类建筑场地的覆盖层厚度（m）

岩石的剪切波速或土的等效剪切波速（m/s）	场地类别				
	I_0	I_1	II	III	IV
Vs>800	0				
800≥Vs>500		0			
500≥Vs>250		<5	≥5		
250≥Vs>150		<3	3～50	>50	
Vs≤150		<3	3～15	15～80	>80

5.2.4 测试成果

1)根据 17 个钻孔的孔中波速测试综合计算结果，本场地卓越周期约为 0.23s。

2）该场地等效剪切波平均波速为 201m/s，该场地类别均为 II 类。

3）根据波速测试结果计算的场地卓越周期和等效剪切波速见表 5.2-3，各地层动力参数统计见表 5.2-4。

表 5.2-3 场地卓越周期和等效剪切波速表(各孔)

钻孔编号	覆盖层厚度（m）	计算深度（m）	计算场地卓越周期 Tg(s)	场地等效剪切波速 Vse(m/s)	场地类别
ZK01	12.1	12.1	0.26	188	II
ZK02	14.1	14.1	0.34	168	II
ZK03	10.25	10.25	0.22	191	II
ZK04	8.3	8.3	0.14	245	II
ZK05	10.1	10.1	0.24	171	II
ZK06	3.35	3.35	0.09	156	II
ZK07	29.8	20	0.62	128	II
ZK08	10.8	10.8	0.20	216	II
ZK09	18.5	18.5	0.26	283	II
ZK10	9.1	9.1	0.19	189	II
ZK11	14.3	14.3	0.27	210	II
ZK12	10	10	0.16	251	II
ZK13	4.1	4.1	0.08	204	II
ZK14	11.5	11.5	0.31	148	II
ZK15	7.9	7.9	0.20	158	II

ZK16	10.5	10.5	0.19	223	II
ZK17	15.1	15.1	0.21	286	II
平均	/	/	0.23	201	/

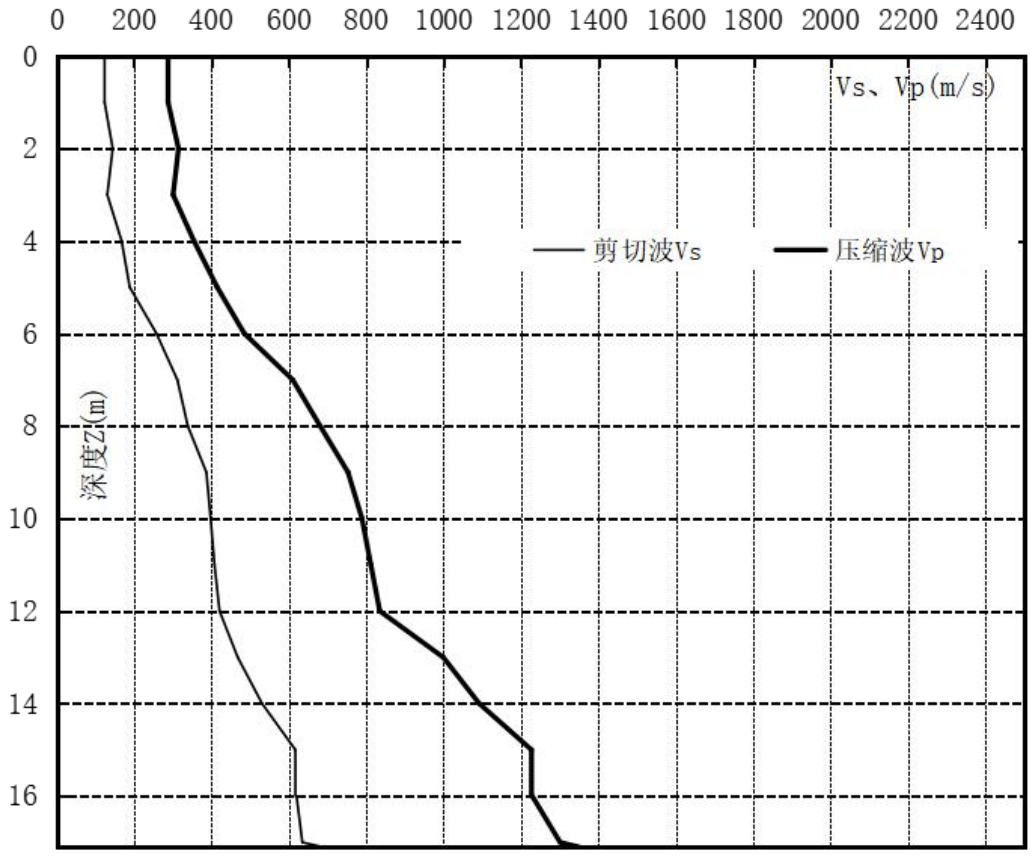
表 5.2-4　各地层动力参数表

岩土名称	横波波速 Vs（m/s）	纵波波速 Vp（m/s）	动泊松比 Vd	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)
耕植土	106	269	0.41	19.4	54.6
杂填土	115	287	0.40	22.1	63.2
素填土	138	286	0.35	32.6	87.2
强风化粉砂岩	399	763	0.31	350.4	919.9
强风化泥质粉砂岩	413	833	0.34	375.3	1003.4
强风化砂岩	402	791	0.33	355.5	942.8
中风化粉砂岩	717	1271	0.27	1234	3126
中风化泥质粉砂岩	725	1443	0.33	1261.5	3358.5
中风化砂岩	710	1424	0.33	1209.8	3229.3

ZK01 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	4.8	4.8	杂植土	145	315	1.7	35.7	97.6	0.37
2	6.6	1.8	全风化泥质粉砂岩	255	378	1.8	117.0	253.4	0.08
3	12.1	5.5	强风化泥质粉砂岩	377	688	1.8	255.8	657.7	0.29
4	17.1	5.0	中风化泥质粉砂岩	521	1027	2.20	597.2	1584.6	0.33

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.26	188	12.10	0.06

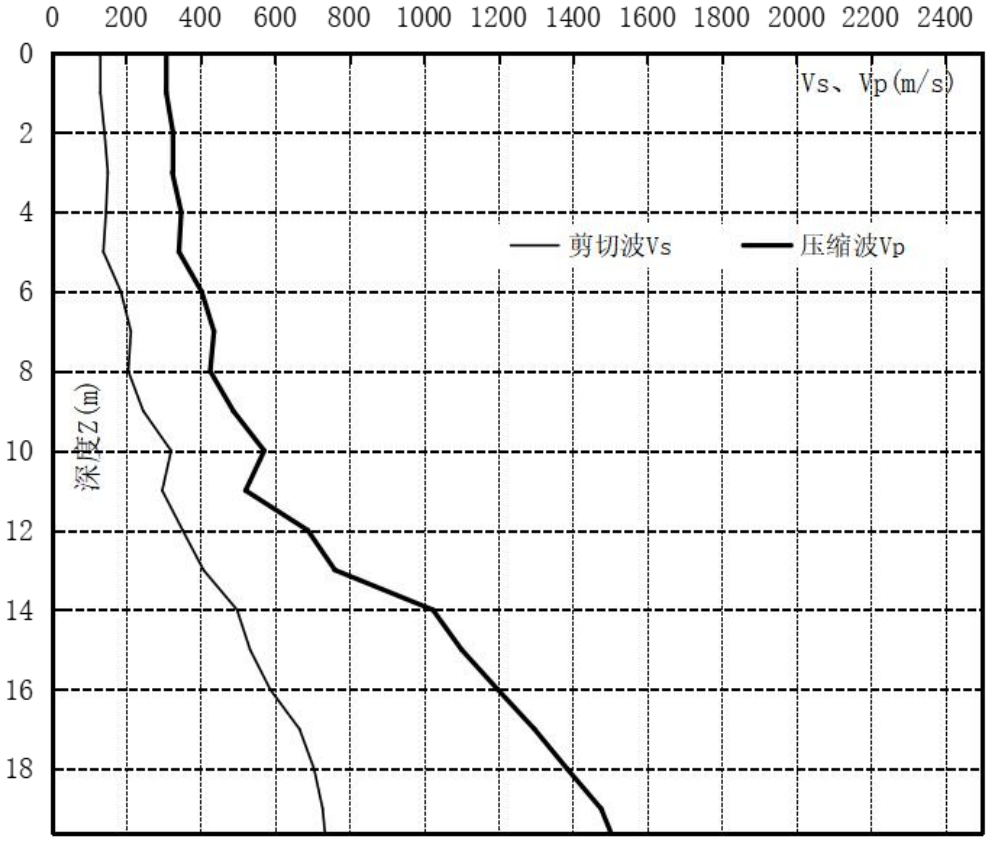


ZK01 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	124	288	杂填土	26	72	0.39
2	1	145	315	杂填土	36	98	0.37
3	1	131	301	杂填土	29	81	0.38
4	1	168	355	杂填土	48	130	0.36
5	1	189	415	杂填土	61	166	0.37
6	1	258	485	全风化泥质粉砂岩	120	312	0.30
7	1	312	610	全风化泥质粉砂岩	175	464	0.32
8	1	339	681	全风化泥质粉砂岩	207	552	0.34
9	1	387	753	强风化泥质粉砂岩	329	870	0.32
10	1	398	789	强风化泥质粉砂岩	348	927	0.33
11	1	408	812	强风化泥质粉砂岩	366	975	0.33
12	1	421	835	强风化泥质粉砂岩	390	1037	0.33
13	1	468	999	强风化泥质粉砂岩	482	1310	0.36
14	1	531	1092	中风化泥质粉砂岩	677	1821	0.35
15	1	617	1227	中风化泥质粉砂岩	914	2432	0.33
16	1	620	1229	中风化泥质粉砂岩	923	2453	0.33
17	1	635	1301	中风化泥质粉砂岩	968	2601	0.34
17.1	0.1	687	1350	中风化泥质粉砂岩	1133	3002	0.33

ZK02 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm³)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	7.5	7.5	杂填土	142	346	1.7	34.3	95.9	0.40
2	12.8	5.3	强风化粉砂岩	297	521	2.2	194.1	488.8	0.26
3	14.1	1.3	强风化泥质粉砂岩	382	624	2.2	321.0	770.7	0.20
4	19.6	5.5	中风化泥质粉砂岩	566	897	2.40	768.9	1797.9	0.17

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.34	168	14.10	0.08

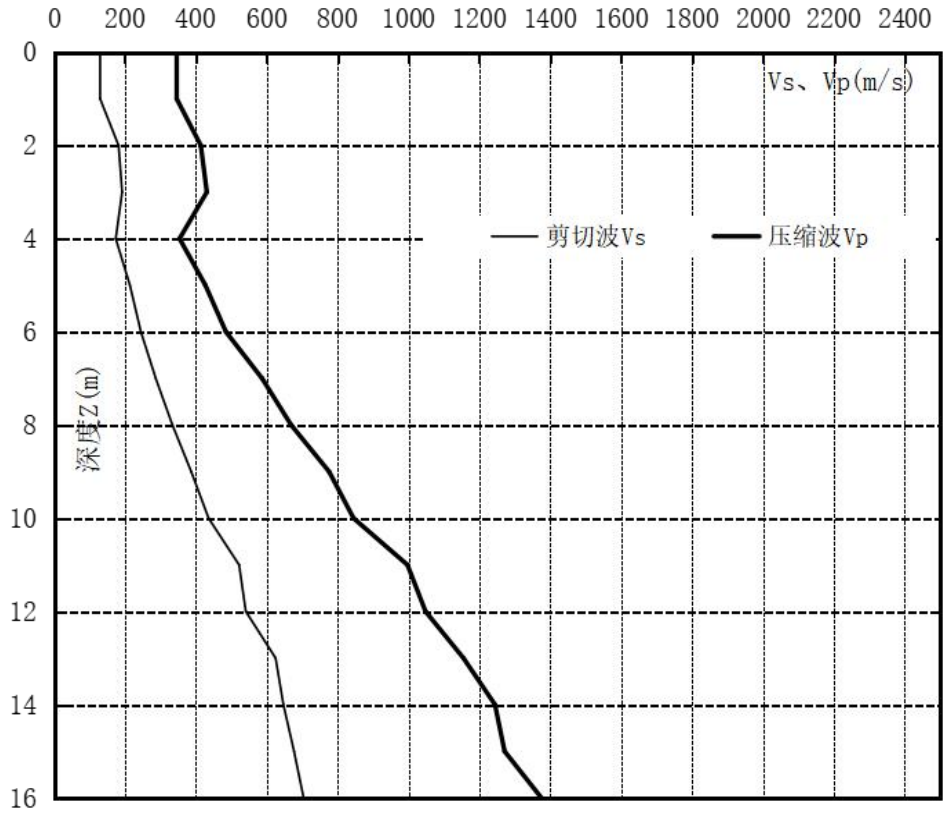


ZK02 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	131	308	杂填土	29	81	0.39
2	1	142	326	杂填土	34	95	0.38
3	1	151	324	杂填土	39	106	0.36
4	1	146	348	杂填土	36	101	0.39
5	1	139	342	杂填土	33	92	0.40
6	1	186	403	杂填土	59	161	0.36
7	1	213	436	杂填土	77	207	0.34
8	1	206	426	强风化粉砂岩	93	252	0.35
9	1	246	488	强风化粉砂岩	133	354	0.33
10	1	321	571	强风化粉砂岩	227	575	0.27
11	1	297	521	强风化粉砂岩	194	489	0.26
12	1	352	688	强风化粉砂岩	273	721	0.32
13	1	408	761	强风化粉砂岩	366	951	0.30
14	1	498	1024	强风化泥质粉砂岩	546	1468	0.35
15	1	533	1101	中风化泥质粉砂岩	682	1837	0.35
16	1	587	1198	中风化泥质粉砂岩	827	2220	0.34
17	1	666	1297	中风化泥质粉砂岩	1065	2812	0.32
18	1	705	1385	中风化泥质粉砂岩	1193	3161	0.33
19	1	728	1476	中风化泥质粉砂岩	1272	3407	0.34
19.6	0.6	734	1502	中风化泥质粉砂岩	1293	3473	0.34

ZK03 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1.8	1.8	素填土	130	346	1.7	28.7	81.5	0.42
2	7.45	5.65	全风化泥质粉砂岩	245	485	1.8	108.0	287.1	0.33
3	10.25	2.8	强风化泥质粉砂岩	334	669	2.2	245.4	654.8	0.33
4	16	5.75	中风化泥质粉砂岩	677	1271	2.4	1100.0	2864.3	0.30

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.22	191	10.25	0.05

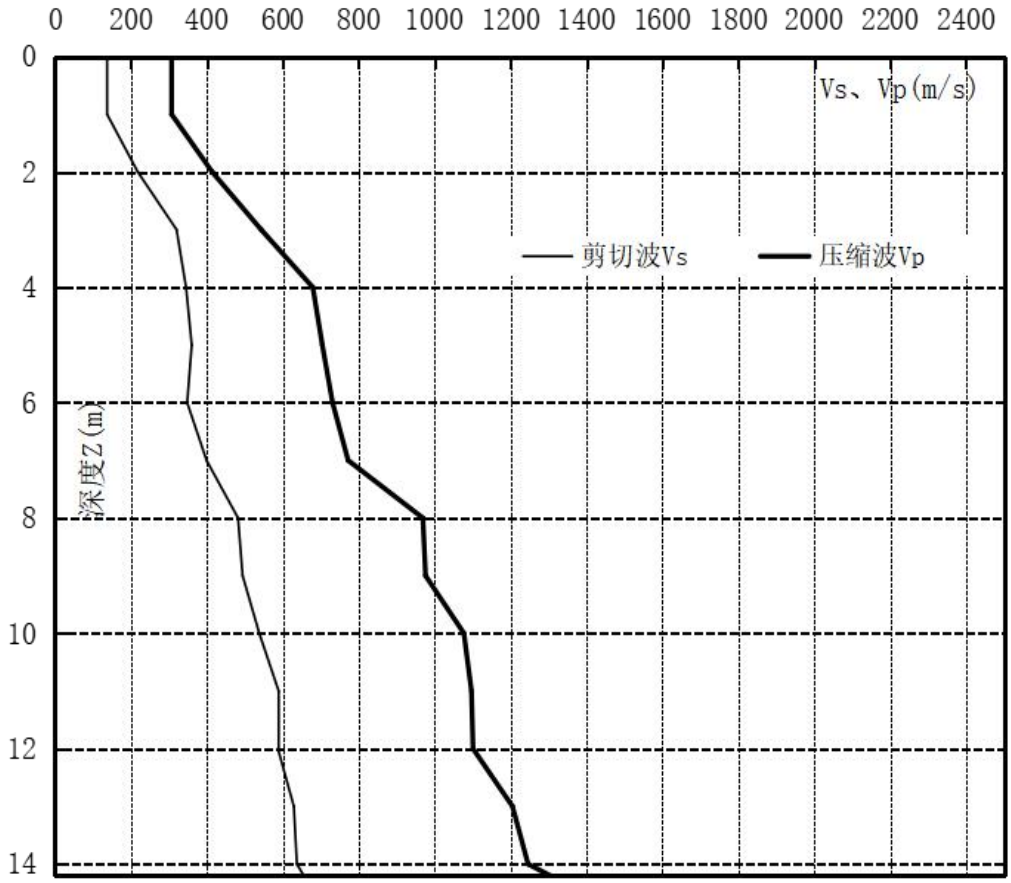


ZK03 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
1	1	130	346	杂填土	29	81	0.42
2	1	182	414	全风化泥质粉砂岩	60	165	0.38
3	1	192	431	全风化泥质粉砂岩	66	183	0.38
4	1	174	354	全风化泥质粉砂岩	54	146	0.34
5	1	214	427	全风化泥质粉砂岩	82	220	0.33
6	1	245	485	全风化泥质粉砂岩	108	287	0.33
7	1	287	587	全风化泥质粉砂岩	148	398	0.34
8	1	334	669	强风化泥质粉砂岩	245	655	0.33
9	1	387	776	强风化泥质粉砂岩	329	879	0.33
10	1	436	845	强风化泥质粉砂岩	418	1103	0.32
11	1	522	997	中风化泥质粉砂岩	654	1715	0.31
12	1	541	1048	中风化泥质粉砂岩	702	1852	0.32
13	1	625	1155	中风化泥质粉砂岩	938	2424	0.29
14	1	647	1244	中风化泥质粉砂岩	1005	2641	0.31
15	1	677	1271	中风化泥质粉砂岩	1100	2864	0.30
16	1	704	1375	中风化泥质粉砂岩	1189	3146	0.32

ZK04 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.4	0.4	素填土	137	307	1.7	31.9	87.8	0.38
2	8.3	7.9	强风化泥质粉砂岩	360	704	1.8	233.3	617.2	0.32
3	14.2	5.9	中风化泥质粉砂岩	577	1101	2.2	732.4	1920.0	0.31

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.14	237	8.30	0.04

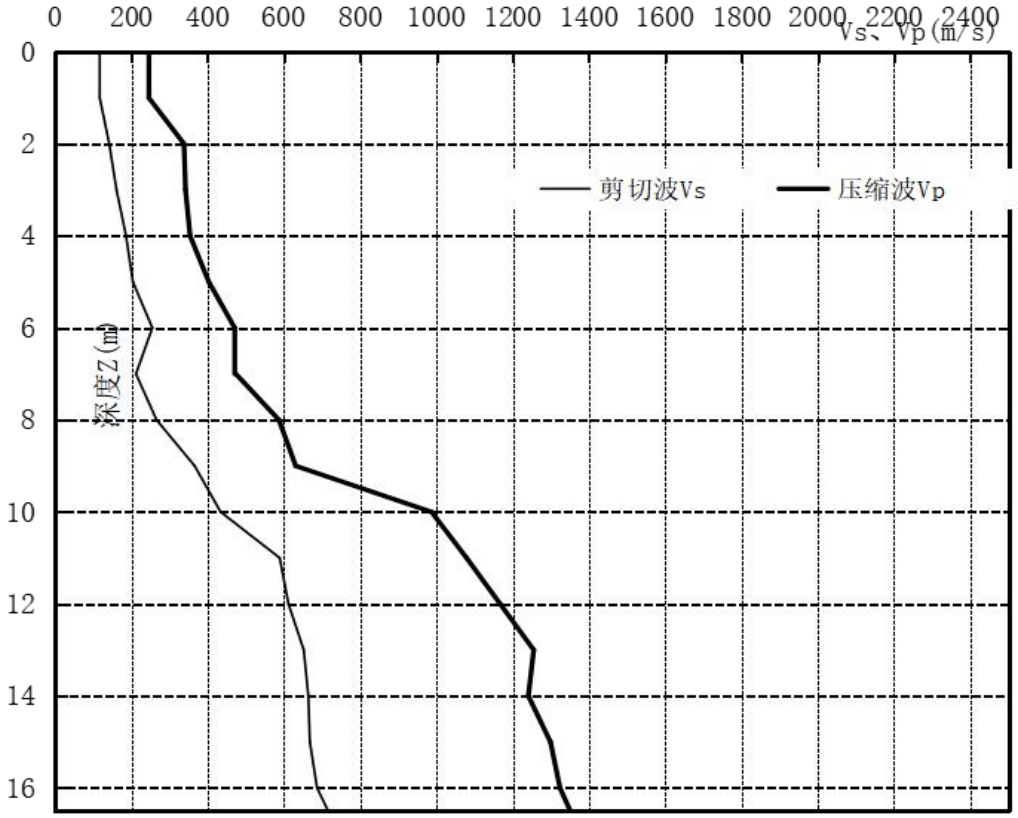


ZK04 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	137	307	杂填土	32	88	0.38
2	1	218	414	强风化泥质粉砂岩	86	224	0.31
3	1	320	543	强风化泥质粉砂岩	184	455	0.23
4	1	345	679	强风化泥质粉砂岩	214	568	0.33
5	1	360	704	强风化泥质粉砂岩	233	617	0.32
6	1	348	731	强风化泥质粉砂岩	218	590	0.35
7	1	399	772	强风化泥质粉砂岩	287	755	0.32
8	1	482	969	强风化泥质粉砂岩	559	1469	0.31
9	1	494	976	强风化泥质粉砂岩	685	1722	0.26
10	1	538	1077	中风化泥质粉砂岩	637	1699	0.33
11	1	589	1097	中风化泥质粉砂岩	833	2161	0.30
12	1	587	1101	中风化泥质粉砂岩	827	2152	0.30
13	1	629	1205	中风化泥质粉砂岩	950	2493	0.31
14	1	637	1246	中风化泥质粉砂岩	974	2577	0.32
14.2	0.2	655	1304	中风化泥质粉砂岩	1030	2742	0.33

ZK05 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.4	0.4	杂填土	117	246	1.7	23.3	63.0	0.35
2	7.6	7.2	全风化泥质粉砂岩	186	354	1.81	62.6	164.0	0.31
3	10.1	2.5	强风化泥质粉砂岩	366	631	2.2	294.7	734.7	0.25
4	16.5	6.4	中风化泥质粉砂岩	664	1241	2.40	1058.2	2750.0	0.30

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.23	172	10.10	0.06

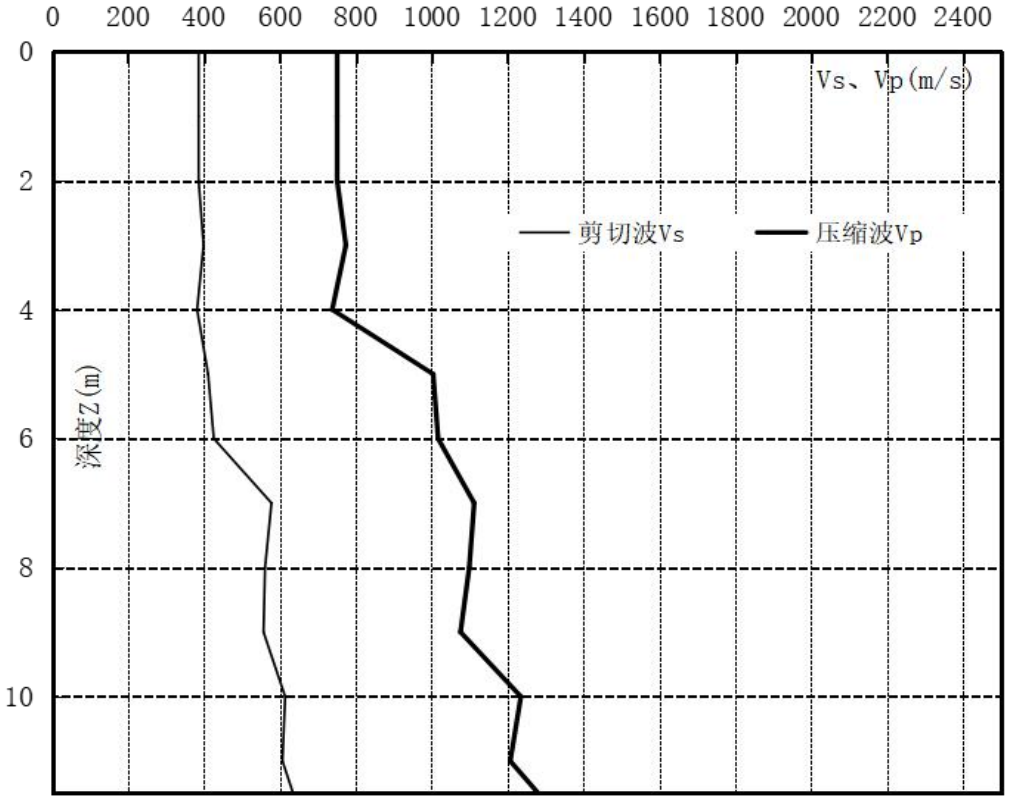


ZK05 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
1	1	117	246	素填土	23	63	0.35
2	1	142	338	全风化泥质粉砂岩	36	101	0.39
3	1	161	342	全风化泥质粉砂岩	47	127	0.36
4	1	186	354	全风化泥质粉砂岩	62	163	0.31
5	1	204	403	全风化泥质粉砂岩	75	199	0.33
6	1	255	471	全风化泥质粉砂岩	117	303	0.29
7	1	212	474	全风化泥质粉砂岩	81	222	0.37
8	1	266	587	全风化泥质粉砂岩	127	349	0.37
9	1	366	631	强风化泥质粉砂岩	295	735	0.25
10	1	434	987	强风化泥质粉砂岩	627	1622	0.29
11	1	589	1079	中风化泥质粉砂岩	833	2144	0.29
12	1	612	1167	中风化泥质粉砂岩	899	2356	0.31
13	1	652	1255	中风化泥质粉砂岩	1020	2684	0.32
14	1	664	1241	中风化泥质粉砂岩	1058	2750	0.30
15	1	668	1299	中风化泥质粉砂岩	1071	2828	0.32
16	1	687	1324	中风化泥质粉砂岩	1133	2981	0.32
16.5	0.5	716	1351	中风化泥质粉砂岩	1230	3211	0.30

ZK06 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm³)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	3.35	3.35	强风化泥质粉砂岩	387	778	2.2	329.5	880.1	0.34
2	11.5	8.15	中风化泥质粉砂岩	635	1325	2.4	967.7	2614.7	0.35

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.09	156	3.35	0.02

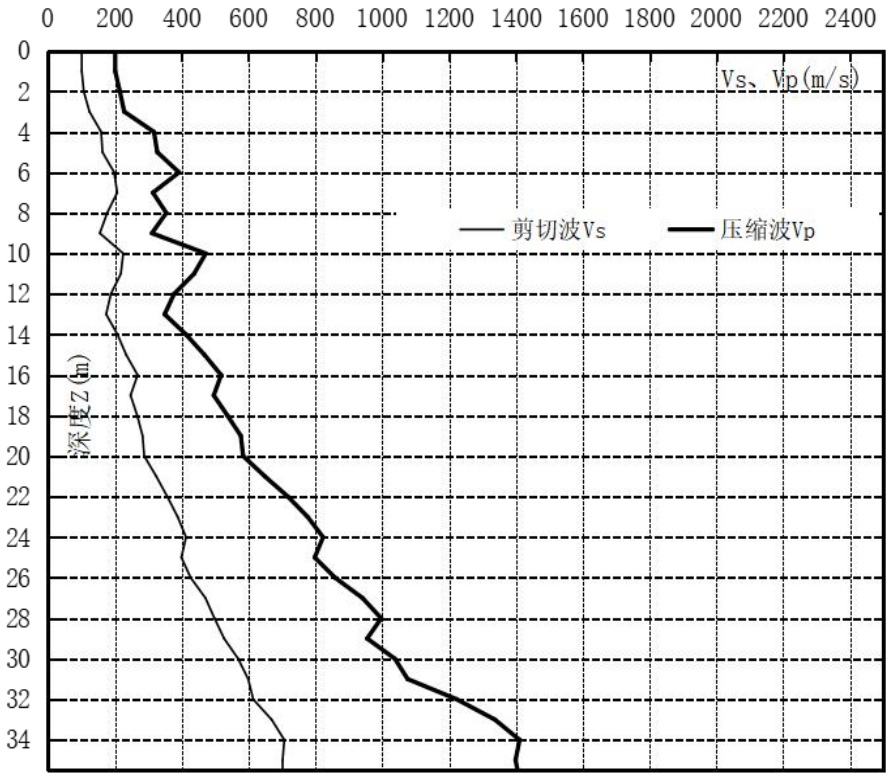


ZK06 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
1	1	386	751	强风化泥质粉砂岩	328	866	0.32
2	1	386	751	强风化泥质粉砂岩	328	866	0.32
3	1	399	774	强风化泥质粉砂岩	350	924	0.32
4	1	382	738	强风化泥质粉砂岩	321	846	0.32
5	1	411	1004	强风化泥质粉砂岩	574	1523	0.33
6	1	426	1017	强风化粉砂岩	609	1604	0.32
7	1	578	1112	中风化粉砂岩	802	2109	0.31
8	1	561	1099	中风化粉砂岩	755	2000	0.32
9	1	557	1076	中风化粉砂岩	745	1961	0.32
10	1	614	1235	中风化粉砂岩	905	2417	0.34
11	1	607	1207	中风化粉砂岩	884	2353	0.33
11.5	0.5	635	1281	中风化粉砂岩	968	2588	0.34

ZK07 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	20.30	20.30	杂填土	163	327	1.7	45.2	120.6	0.33
2	22.20	1.90	全风化粉砂岩	357	718	2.0	254.9	681.0	0.34
3	27.30	5.10	强风化粉砂岩	413	823	2.2	375.3	999.5	0.33
4	29.80	2.50	强风化泥质粉砂岩	477	955	2.20	500.6	1335.3	0.33
5	35.50	5.70	中风化泥质粉砂岩	669	1337	2.40	1074.1	2863.7	0.33

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.62	128	20.00	0.16



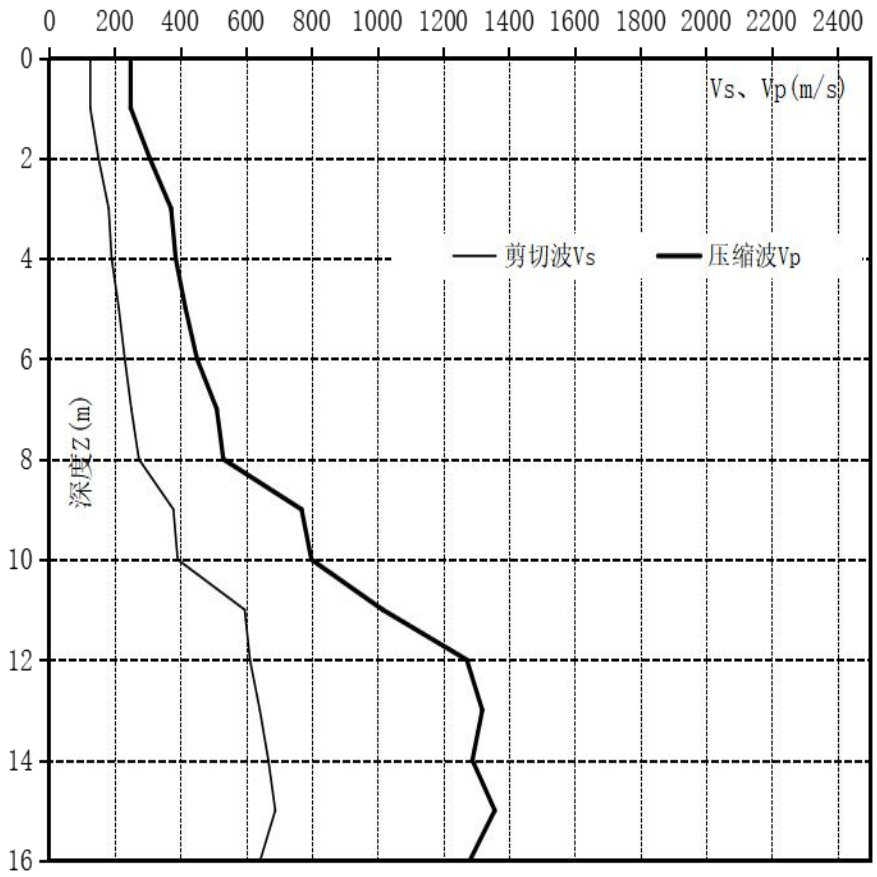
ZK07 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	101	201	杂填土	17	46	0.33
2	1	107	215	杂填土	19	52	0.34
3	1	124	228	杂填土	26	67	0.29
4	1	159	317	杂填土	43	114	0.33
5	1	163	327	杂填土	45	121	0.33
6	1	198	392	杂填土	67	177	0.33
7	1	207	314	杂填土	73	163	0.12
8	1	177	354	杂填土	53	142	0.33
9	1	155	311	杂填土	41	109	0.33
10	1	225	472	杂填土	86	233	0.35
11	1	218	437	杂填土	81	216	0.33
12	1	188	377	杂填土	60	160	0.33
13	1	174	349	杂填土	51	137	0.33
14	1	208	413	杂填土	74	196	0.33
15	1	234	468	杂填土	93	248	0.33
16	1	268	518	杂填土	122	322	0.32
17	1	247	496	杂填土	104	277	0.34
18	1	267	537	杂填土	121	324	0.34
19	1	283	577	杂填土	136	365	0.34
20	1	288	584	杂填土	141	378	0.34
21	1	324	649	全风化粉砂岩	210	560	0.33
22	1	357	718	全风化粉砂岩	255	681	0.34
23	1	388	777	强风化粉砂岩	331	884	0.33

24	1	413	823	强风化粉砂岩	375	999	0.33
25	1	399	798	强风化粉砂岩	350	934	0.33
26	1	427	859	强风化粉砂岩	401	1072	0.34
27	1	471	941	强风化粉砂岩	488	1301	0.33
28	1	498	997	强风化泥质粉砂岩	546	1455	0.33
29	1	527	955	强风化泥质粉砂岩	611	1565	0.28
30	1	569	1038	强风化泥质粉砂岩	712	1831	0.29
31	1	599	1076	中风化泥质粉砂岩	861	2197	0.28
32	1	614	1223	中风化泥质粉砂岩	905	2409	0.33
33	1	669	1337	中风化泥质粉砂岩	1074	2864	0.33
34	1	707	1411	中风化泥质粉砂岩	1200	3197	0.33
35	1	702	1399	中风化泥质粉砂岩	1183	3150	0.33
35.5	0.5	704	1405	中风化泥质粉砂岩	1189	3170	0.33

ZK08 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm³)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	3.2	3.2	杂填土	151	307	1.7	38.8	103.9	0.34
2	5.0	1.8	全风化粉砂岩	191	386	1.8	65.7	175.7	0.34
3	8.0	3.0	强风化粉砂岩	251	511	2.2	138.6	371.7	0.34
4	10.8	2.8	强风化泥质粉砂岩	379	769	2.20	316.0	846.6	0.34
5	16.0	5.2	中风化泥质粉砂岩	649	1319	2.40	1010.9	2709.7	0.34

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.20	216	10.80	0.05

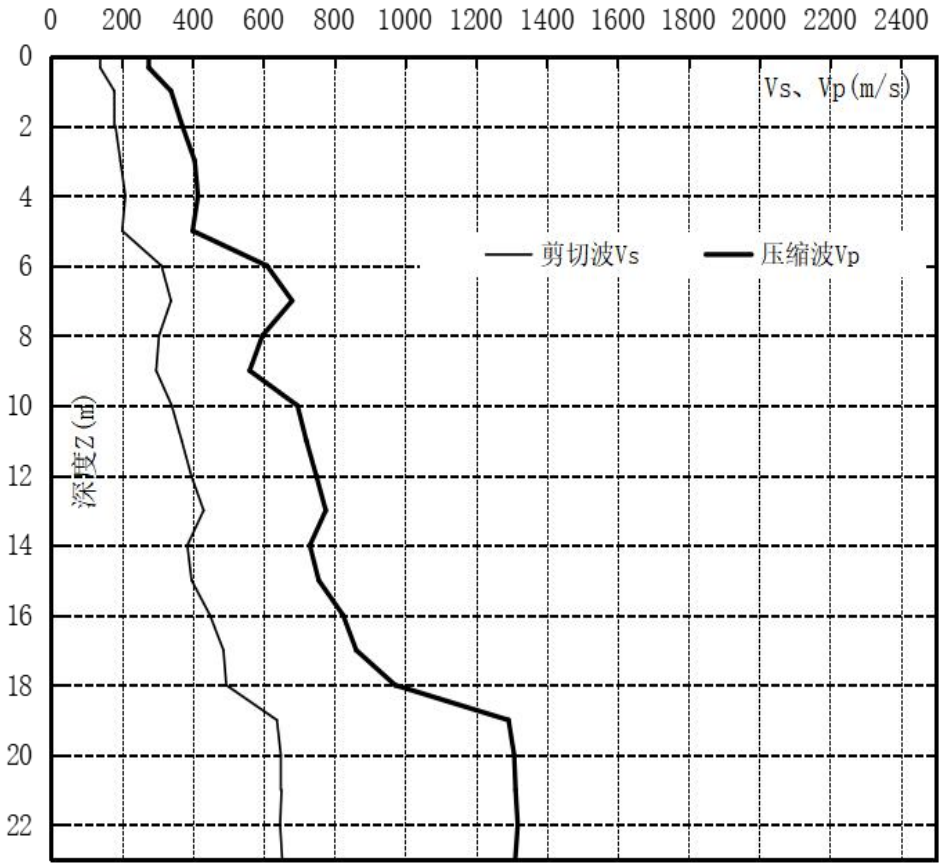


ZK08 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	126	249	杂填土	27	72	0.33
2	1	151	307	杂填土	39	104	0.34
3	1	182	372	杂填土	56	151	0.34
4	1	191	386	全风化粉砂岩	66	176	0.34
5	1	213	416	全风化粉砂岩	82	216	0.32
6	1	231	451	强风化粉砂岩	117	310	0.32
7	1	251	511	强风化粉砂岩	139	372	0.34
8	1	274	531	强风化粉砂岩	165	436	0.32
9	1	379	769	强风化泥质粉砂岩	316	847	0.34
10	1	392	799	强风化泥质粉砂岩	338	907	0.34
11	1	596	1016	中风化泥质粉砂岩	590	1587	0.34
12	1	612	1272	中风化泥质粉砂岩	899	2426	0.35
13	1	642	1319	中风化泥质粉砂岩	989	2660	0.34
14	1	668	1289	中风化泥质粉砂岩	1071	2820	0.32
15	1	689	1357	中风化泥质粉砂岩	1139	3022	0.33
16	1	643	1281	中风化泥质粉砂岩	992	2643	0.33

ZK09 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.33	0.33	杂填土	139	276	1.7	32.8	87.4	0.33
2	0.70	0.37	中细砂	179	339	1.8	57.7	150.7	0.31
3	12.35	11.65	全风化泥质粉砂岩	299	610	1.8	160.9	431.9	0.34
4	18.50	6.15	强风化泥质粉砂岩	419	825	2.20	386.2	1024.4	0.33
5	23.00	4.50	中风化泥质粉砂岩	617	1318	2.40	913.7	2484.5	0.36

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.26	283	18.50	0.07

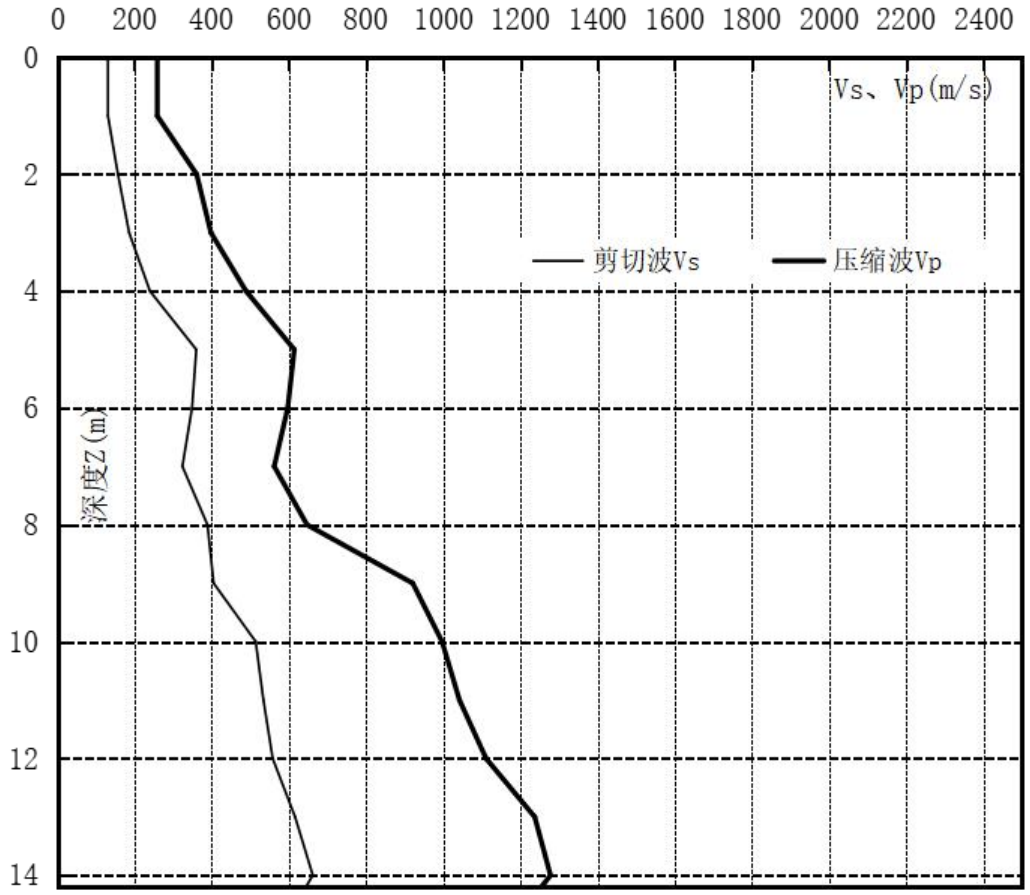


ZK09 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波 Vs(m/s)	压缩波 Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
0.33	0.33	139	276	杂填土	33	87	0.33
1	1	179	339	中细砂	58	151	0.31
2	1	182	371	全风化泥质粉砂岩	66	178	0.34
3	1	196	406	全风化泥质粉砂岩	77	207	0.35
4	1	210	415	全风化泥质粉砂岩	88	234	0.33
5	1	201	400	全风化泥质粉砂岩	81	215	0.33
6	1	312	610	全风化泥质粉砂岩	195	515	0.32
7	1	339	681	全风化泥质粉砂岩	230	614	0.34
8	1	305	597	全风化泥质粉砂岩	186	492	0.32
9	1	297	561	全风化泥质粉砂岩	176	461	0.31
10	1	341	696	全风化泥质粉砂岩	233	624	0.34
11	1	369	721	全风化泥质粉砂岩	272	720	0.32
12	1	396	749	强风化泥质粉砂岩	345	901	0.31
13	1	431	776	强风化泥质粉砂岩	409	1044	0.28
14	1	385	731	强风化泥质粉砂岩	326	853	0.31
15	1	397	756	强风化泥质粉砂岩	347	908	0.31
16	1	449	825	强风化泥质粉砂岩	444	1144	0.29
17	1	487	862	强风化泥质粉砂岩	522	1321	0.27
18	1	495	972	强风化泥质粉砂岩	539	1428	0.32
19	1	638	1292	中风化泥质粉砂岩	977	2616	0.34
20	1	649	1308	中风化泥质粉砂岩	1011	2702	0.34
21	1	651	1312	中风化泥质粉砂岩	1017	2719	0.34
22	1	647	1318	中风化泥质粉砂岩	1005	2695	0.34
23	1	653	1311	中风化泥质粉砂岩	1023	2732	0.34

ZK10 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	2.4	2.4	杂填土	131	259	1.7	29.2	77.5	0.33
2	3.5	1.1	全风化泥质粉砂岩	240	489	2	115.2	309.0	0.34
3	9.1	5.6	强风化泥质粉砂岩	346	647	2.2	263.4	684.6	0.30
4	14.2	5.1	中风化泥质粉砂岩	662	1278	2.40	1051.8	2769.6	0.32

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.19	194	9.10	0.05

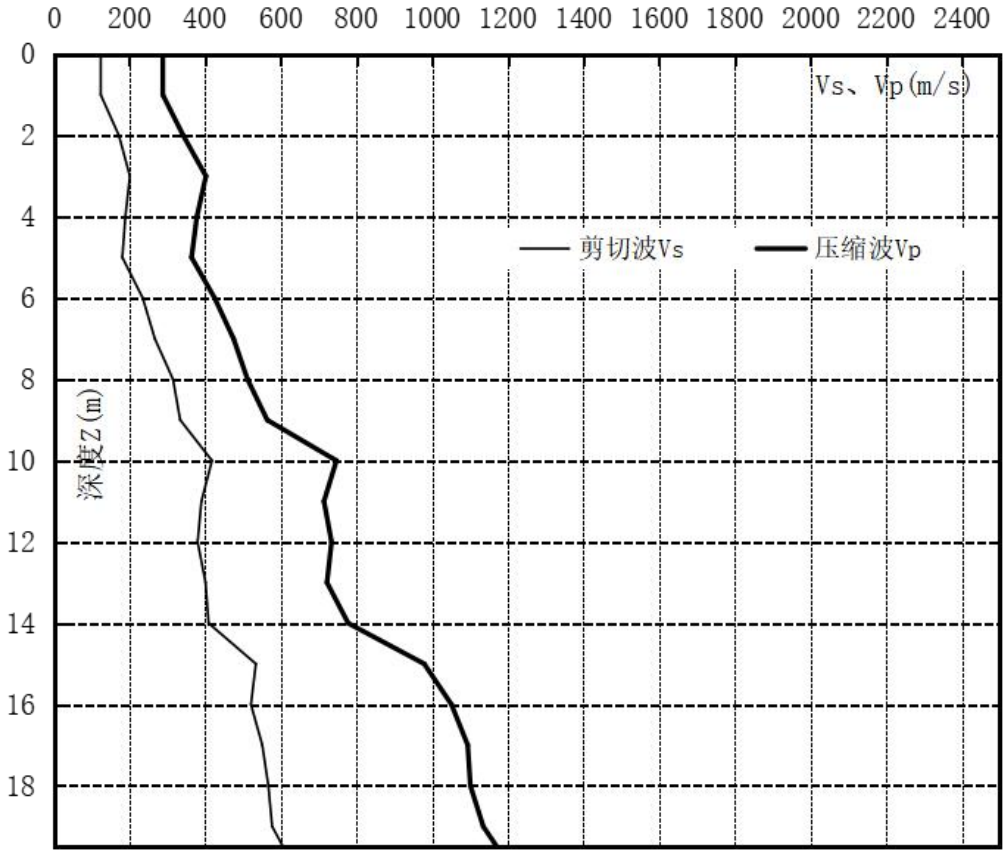


ZK10 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
1	1	131	259	素填土	29	77	0.33
2	1	157	361	素填土	42	116	0.38
3	1	186	398	素填土	59	160	0.36
4	1	240	489	全风化泥质粉砂岩	115	309	0.34
5	1	360	614	强风化泥质粉砂岩	285	706	0.24
6	1	349	597	强风化泥质粉砂岩	268	665	0.24
7	1	324	562	强风化泥质粉砂岩	231	578	0.25
8	1	389	647	强风化泥质粉砂岩	333	810	0.22
9	1	405	921	强风化泥质粉砂岩	361	996	0.38
10	1	514	997	中风化泥质粉砂岩	634	1673	0.32
11	1	534	1042	中风化泥质粉砂岩	684	1809	0.32
12	1	558	1111	中风化泥质粉砂岩	747	1990	0.33
13	1	616	1237	中风化泥质粉砂岩	911	2432	0.34
14	1	662	1278	中风化泥质粉砂岩	1052	2770	0.32
14.2	0.2	644	1254	中风化泥质粉砂岩	995	2630	0.32

ZK11 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.5	0.5	杂植土	124	288	1.7	26.1	72.5	0.39
2	8.6	8.1	全风化泥质粉砂岩	201	402	2.0	80.8	215.5	0.33
3	14.3	5.7	强风化泥质粉砂岩	390	614	2.2	334.6	777.6	0.16
4	19.5	5.2	中风化泥质粉砂岩	577	935	2.40	799.0	1905.6	0.19

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.27	210	14.30	0.07

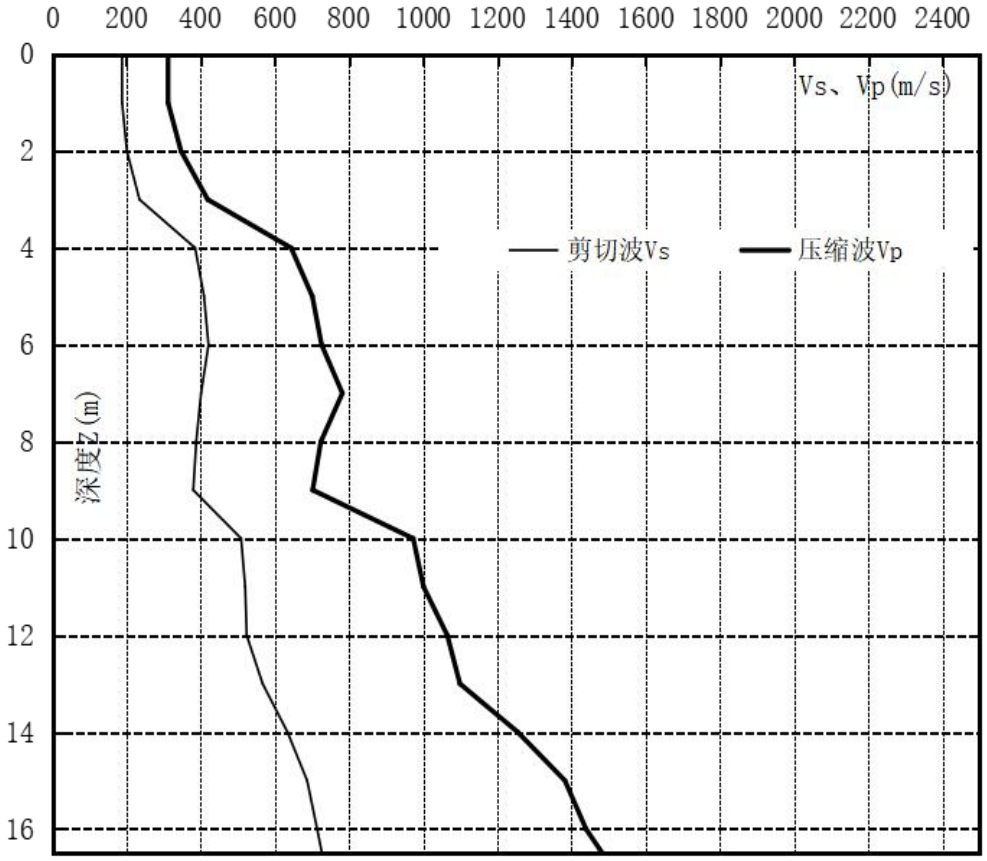


ZK11 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.5	124	288	杂填土	26	72	0.39
2	1	172	342	全风化泥质粉砂岩	59	157	0.33
3	1	201	402	全风化泥质粉砂岩	81	215	0.33
4	1	189	378	全风化泥质粉砂岩	71	191	0.33
5	1	181	364	全风化泥质粉砂岩	66	175	0.34
6	1	235	425	全风化泥质粉砂岩	110	283	0.28
7	1	267	475	全风化泥质粉砂岩	143	362	0.27
8	1	315	512	全风化泥质粉砂岩	198	474	0.20
9	1	334	564	全风化泥质粉砂岩	223	549	0.23
10	1	418	747	强风化泥质粉砂岩	384	978	0.27
11	1	390	714	强风化泥质粉砂岩	335	862	0.29
12	1	380	734	强风化泥质粉砂岩	318	837	0.32
13	1	401	722	强风化泥质粉砂岩	354	903	0.28
14	1	409	778	强风化泥质粉砂岩	368	964	0.31
15	1	534	979	中风化泥质粉砂岩	684	1763	0.29
16	1	521	1051	中风化泥质粉砂岩	651	1742	0.34
17	1	551	1094	中风化泥质粉砂岩	729	1938	0.33
18	1	567	1101	中风化泥质粉砂岩	772	2036	0.32
19	1	577	1135	中风化泥质粉砂岩	799	2119	0.33
19.5	0.5	606	1171	中风化泥质粉砂岩	881	2322	0.32

ZK12 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.6	0.6	杂植土	188	312	1.7	60.1	146.0	0.21
2	2.6	2.0	全风化泥质粉砂岩	235	419	2.0	110.5	280.7	0.27
3	10.0	7.4	强风化泥质粉砂岩	388	624	2.2	331.2	784.8	0.18
4	16.5	6.5	中风化泥质粉砂岩	714	1239	2.40	1223.5	3062.2	0.25

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.16	251	10.00	0.04

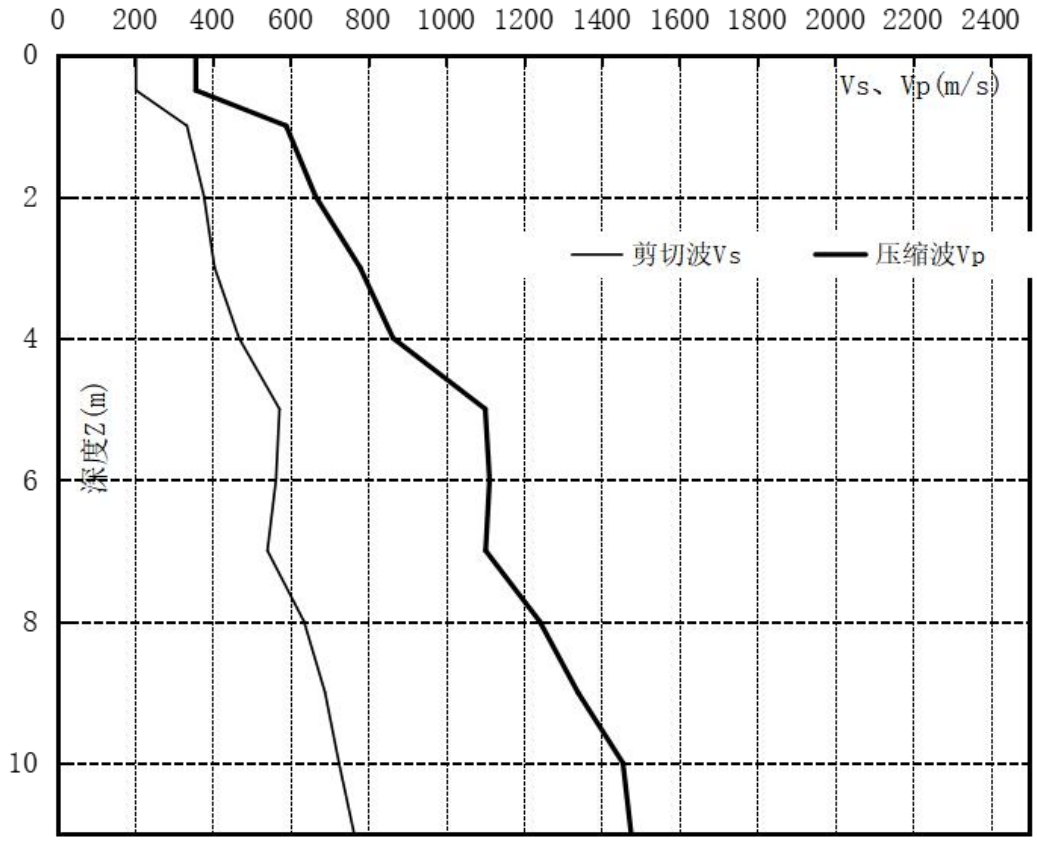


ZK12 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.5	188	312	杂填土	60	146	0.21
2	1	201	347	全风化泥质粉砂岩	81	202	0.25
3	1	235	419	全风化泥质粉砂岩	110	281	0.27
4	1	385	644	强风化泥质粉砂岩	326	797	0.22
5	1	409	701	强风化泥质粉砂岩	368	914	0.24
6	1	421	726	强风化泥质粉砂岩	390	972	0.25
7	1	401	782	强风化泥质粉砂岩	354	935	0.32
8	1	388	724	强风化泥质粉砂岩	331	860	0.30
9	1	380	702	强风化泥质粉砂岩	318	821	0.29
10	1	509	973	中风化泥质粉砂岩	598	1580	0.32
11	1	520	1001	中风化泥质粉砂岩	649	1707	0.32
12	1	524	1065	中风化泥质粉砂岩	659	1766	0.34
13	1	567	1099	中风化泥质粉砂岩	772	2035	0.32
14	1	634	1255	中风化泥质粉砂岩	965	2564	0.33
15	1	687	1382	中风化泥质粉砂岩	1133	3026	0.34
16	1	714	1439	中风化泥质粉砂岩	1224	3271	0.34
16.5	1	727	1483	中风化泥质粉砂岩	1268	3404	0.34

ZK13 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm³)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.5	0.5	杂植土	203	357	1.7	70.1	176.7	0.26
2	2.3	1.8	全风化泥质粉砂岩	378	665	2.0	285.8	720.9	0.26
3	4.1	1.8	强风化泥质粉砂岩	436	1001	2.2	643.9	1666.0	0.29
4	11.0	6.9	中风化泥质粉砂岩	725	1355	2.40	1261.5	3278.5	0.30

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.08	204	4.10	0.02

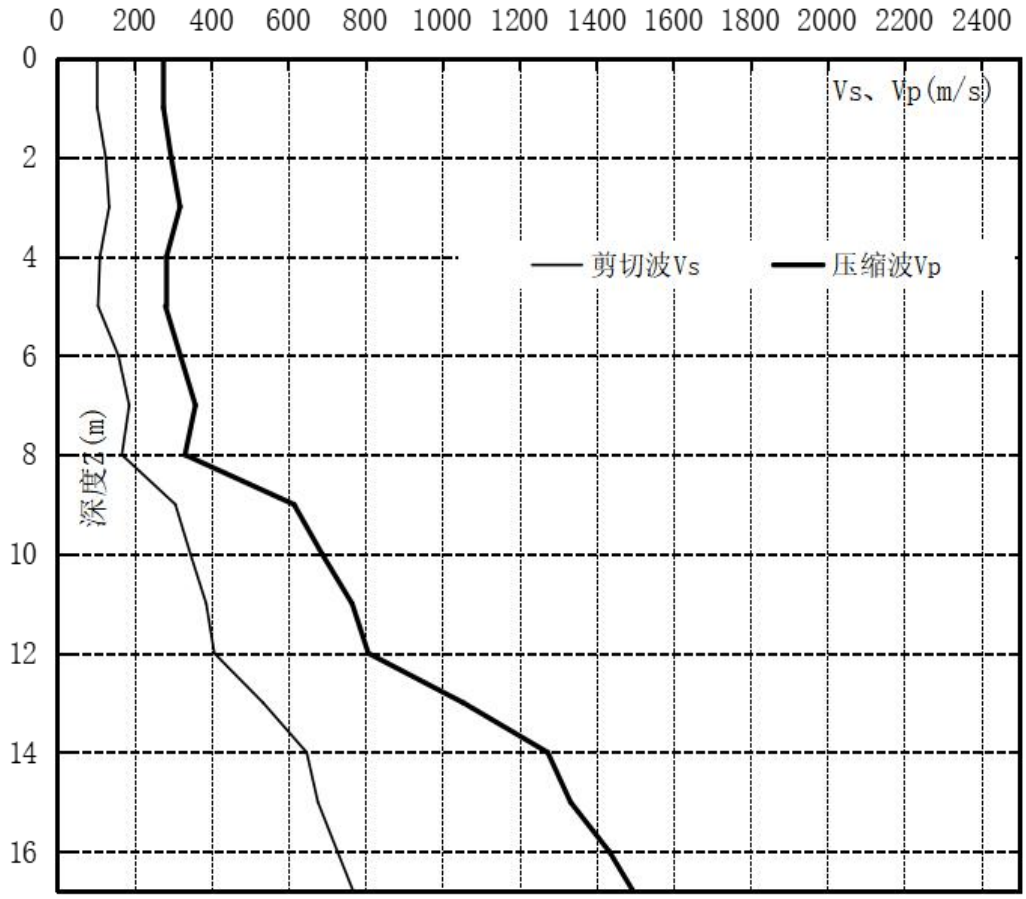


ZK13 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
0.5	0.5	203	357	杂填土	70	177	0.26
1	1	334	589	全风化泥质粉砂岩	223	564	0.26
2	1	378	665	全风化泥质粉砂岩	286	721	0.26
3	1	405	779	强风化泥质粉砂岩	361	949	0.31
4	1	468	864	强风化泥质粉砂岩	482	1245	0.29
5	1	572	1101	中风化泥质粉砂岩	785	2065	0.32
6	1	563	1112	中风化泥质粉砂岩	761	2020	0.33
7	1	541	1102	中风化泥质粉砂岩	702	1884	0.34
8	1	635	1241	中风化泥质粉砂岩	968	2560	0.32
9	1	689	1339	中风化泥质粉砂岩	1139	3008	0.32
10	1	725	1455	中风化泥质粉砂岩	1262	3368	0.33
11	1	764	1476	中风化泥质粉砂岩	1401	3690	0.32

ZK14 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	6.9	6.9	杂填土	126	296	1.7	27.0	75.0	0.39
2	7.7	0.8	淤泥	168	332	1.8	50.8	134.9	0.33
3	9.5	1.8	全风化泥质粉砂岩	346	688	1.8	215.5	573.5	0.33
4	11.5	2.0	强风化泥质粉砂岩	408	808	2.20	366.2	973.3	0.33
5	16.8	5.3	中风化泥质粉砂岩	677	1198	2.40	1100.0	2783.9	0.27

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.31	148	11.50	0.08

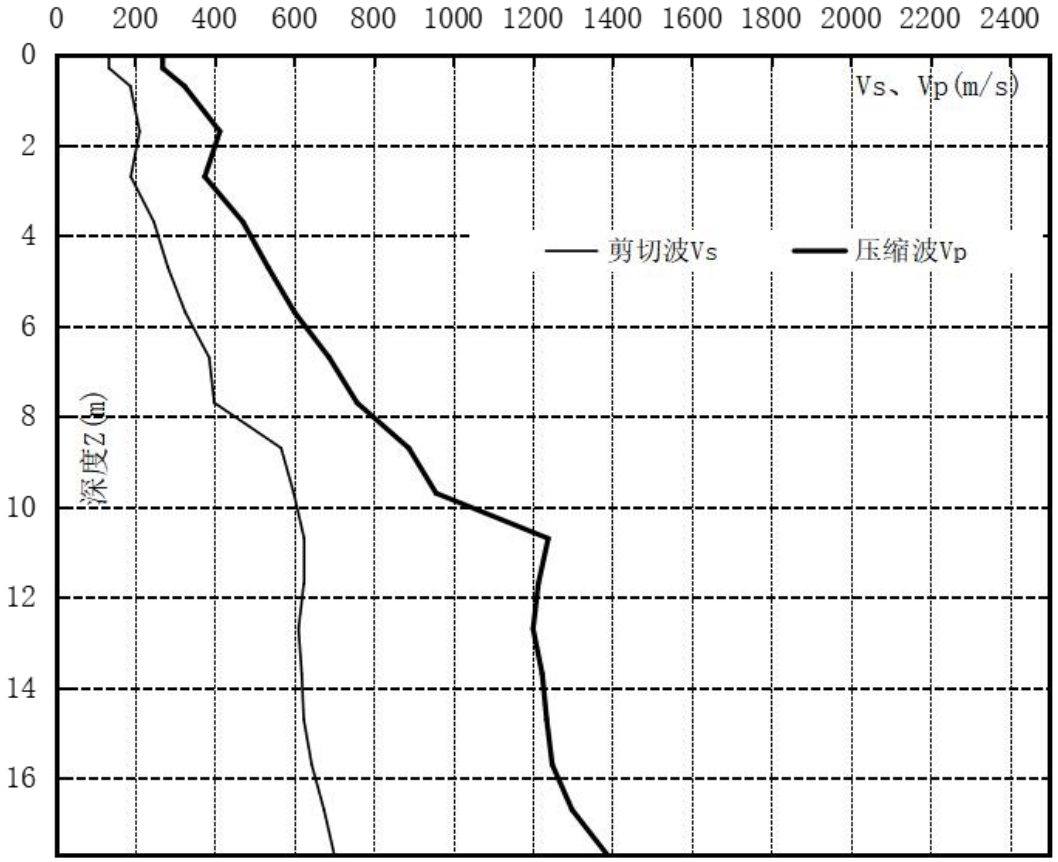


ZK14 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	104	276	杂填土	18	52	0.42
2	1	126	296	杂填土	29	79	0.39
3	1	135	319	杂填土	36	101	0.39
4	1	111	284	杂填土	25	69	0.41
5	1	106	281	杂填土	22	64	0.42
6	1	159	320	杂填土	51	135	0.34
7	1	187	359	杂填土	70	184	0.31
8	1	168	332	淤泥	56	150	0.33
9	1	307	615	全风化泥质粉砂岩	188	503	0.33
10	1	346	688	全风化泥质粉砂岩	239	637	0.33
11	1	387	766	强风化泥质粉砂岩	300	796	0.33
12	1	408	808	强风化泥质粉砂岩	333	885	0.33
13	1	535	1055	中风化泥质粉砂岩	630	1671	0.33
14	1	648	1274	中风化泥质粉砂岩	924	2449	0.33
15	1	677	1333	中风化泥质粉砂岩	1008	2674	0.33
16	1	728	1434	中风化泥质粉砂岩	1166	3093	0.33
16.8	1	769	1496	中风化泥质粉砂岩	1301	3436	0.32

ZK15 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.3	0.3	杂填土	134	269	1.7	30.5	81.5	0.33
2	4.6	4.3	全风化泥质粉砂岩	211	413	2.0	89.0	235.7	0.32
3	7.9	3.3	强风化泥质粉砂岩	386	688	2.2	327.8	832.8	0.27
4	17.7	9.8	中风化泥质粉砂岩	519	1024	2.40	646.5	1715.9	0.33

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.20	158	7.90	0.05

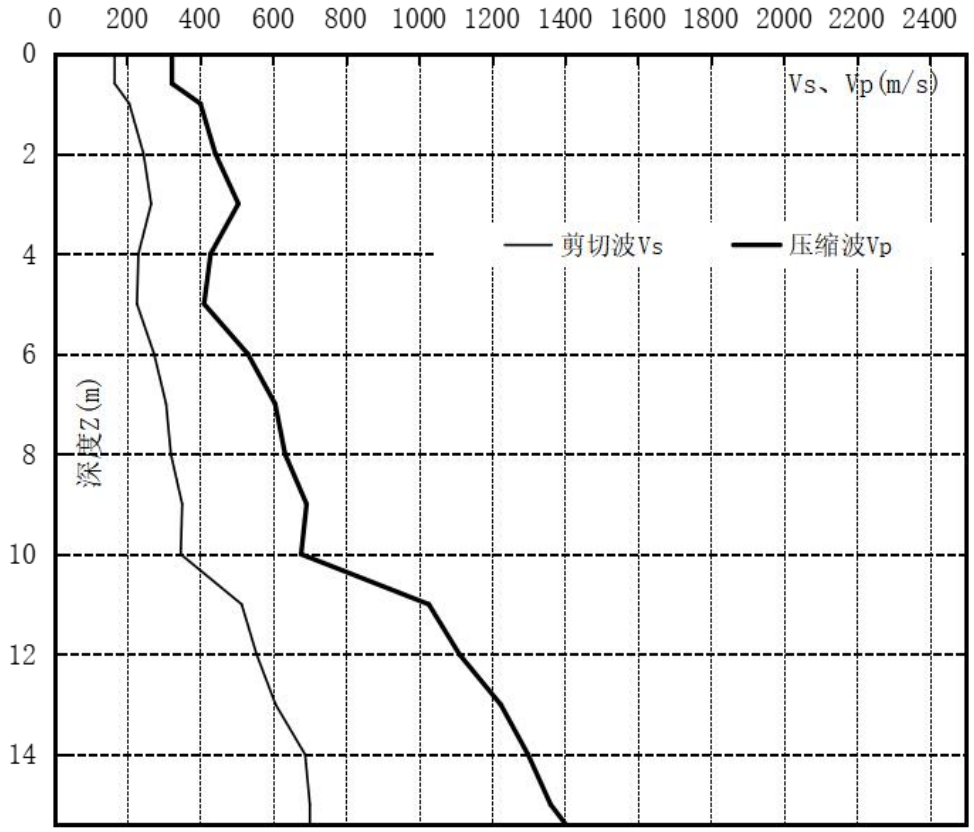


ZK15 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
0.3	0.3	134	269	杂填土	31	82	0.33
1	1	188	324	全风化泥质粉砂岩	71	176	0.25
2	1	211	413	全风化泥质粉砂岩	89	236	0.32
3	1	189	375	全风化泥质粉砂岩	71	190	0.33
4	1	247	471	全风化泥质粉砂岩	122	320	0.31
5	1	282	534	全风化泥质粉砂岩	159	416	0.31
6	1	326	601	强风化泥质粉砂岩	234	604	0.29
7	1	386	688	强风化泥质粉砂岩	328	833	0.27
8	1	399	758	强风化泥质粉砂岩	350	916	0.31
9	1	567	988	中风化泥质粉砂岩	772	1936	0.25
10	1	599	1057	中风化泥质粉砂岩	861	2176	0.26
11	1	625	1239	中风化泥质粉砂岩	938	2493	0.33
12	1	624	1214	中风化泥质粉砂岩	935	2468	0.32
13	1	611	1201	中风化泥质粉砂岩	896	2375	0.33
14	1	619	1224	中风化泥质粉砂岩	920	2443	0.33
15	1	624	1235	中风化泥质粉砂岩	935	2483	0.33
16	1	644	1249	中风化泥质粉砂岩	995	2626	0.32
17	1	675	1299	中风化泥质粉砂岩	1094	2876	0.32
17.7	0.7	701	1388	中风化泥质粉砂岩	1179	3134	0.33

ZK16 波速测试成果

层号	深度(m)	层厚(m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	0.6	0.6	杂填土	166	323	1.7	46.8	123.7	0.32
2	8.6	8.0	全风化泥质粉砂岩	266	505	2.0	141.5	370.2	0.31
3	10.5	1.9	强风化泥质粉砂岩	351	692	2.2	271.0	719.2	0.33
4	15.4	4.9	中风化泥质粉砂岩	607	1224	2.40	884.3	2364.4	0.34

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.19	223	10.50	0.05

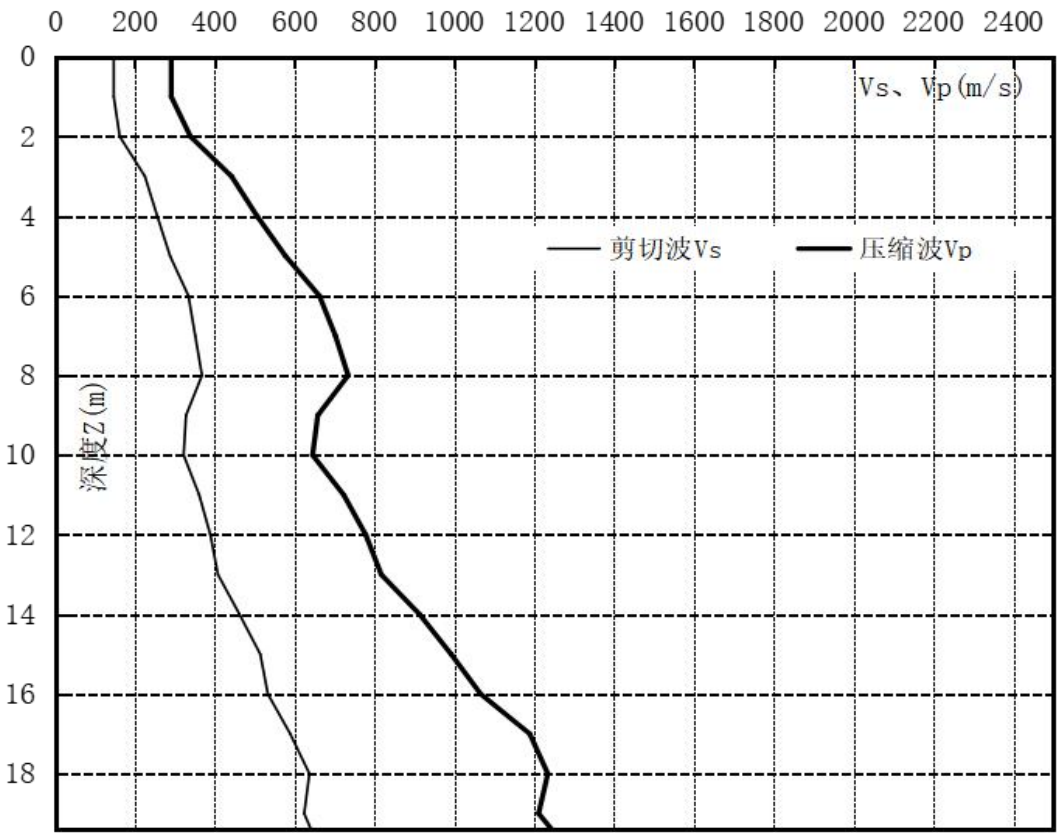


ZK16 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比Vd
0.6	0.6	166	323	杂填土	47	124	0.32
1	1	206	401	全风化泥质粉砂岩	85	224	0.32
2	1	245	442	全风化泥质粉砂岩	120	307	0.28
3	1	266	505	全风化泥质粉砂岩	142	370	0.31
4	1	231	429	全风化泥质粉砂岩	107	277	0.30
5	1	227	411	全风化泥质粉砂岩	103	264	0.28
6	1	274	531	全风化泥质粉砂岩	150	396	0.32
7	1	307	606	全风化泥质粉砂岩	188	500	0.33
8	1	320	633	全风化泥质粉砂岩	205	544	0.33
9	1	351	692	强风化泥质粉砂岩	271	719	0.33
10	1	347	677	强风化泥质粉砂岩	265	700	0.32
11	1	514	1027	中风化泥质粉砂岩	634	1690	0.33
12	1	555	1111	中风化泥质粉砂岩	739	1972	0.33
13	1	607	1224	中风化泥质粉砂岩	884	2364	0.34
14	1	688	1299	中风化泥质粉砂岩	1136	2965	0.31
15	1	701	1361	中风化泥质粉砂岩	1671	4409	0.32
15.4	0.4	703	1403	中风化泥质粉砂岩	1186	3161	0.33

ZK17 波速测试成果

层号	深度 (m)	层厚 (m)	地层名称	Vs (m/s)	Vp (m/s)	密度 ρ (g/cm^3)	动剪切模量 Gd(MPa)	动弹性模量 Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1.5	1.5	杂填土	147	291	1.7	36.7	97.6	0.33
2	5.1	3.6	全风化泥质粉砂岩	256	506	2.0	131.1	348.1	0.33
3	15.1	10.0	强风化泥质粉砂岩	462	913	2.2	469.6	1247.1	0.33
4	19.4	4.3	中风化泥质粉砂岩	624	1211	2.40	934.5	2465.7	0.32

场地地基土卓越周期 Tc(s)	场地地基土等效剪切波速 Vse(m/s)	计算深度 d_0(m)	剪切波从地面至计算深度的传播时间 t(s)
0.21	286	15.10	0.05



ZK17 单孔法测试成果表							
测深(m)	层厚(m)	剪切波Vs(m/s)	压缩波Vp(m/s)	地层名称	动剪切模量Gd(MPa)	动弹性模量Ed(MPa)	动泊松比 Vd
1	1	147	291	杂填土	37	98	0.33
2	1	162	339	杂填土	45	121	0.35
3	1	225	442	全风化泥质粉砂岩	101	268	0.33
4	1	256	506	全风化泥质粉砂岩	131	348	0.33
5	1	288	577	全风化泥质粉砂岩	166	443	0.33
6	1	334	662	强风化泥质粉砂岩	245	652	0.33
7	1	351	702	强风化泥质粉砂岩	271	723	0.33
8	1	368	734	强风化泥质粉砂岩	298	794	0.33
9	1	328	658	强风化泥质粉砂岩	237	632	0.33
10	1	322	645	强风化泥质粉砂岩	228	609	0.33
11	1	361	723	强风化泥质粉砂岩	287	765	0.33
12	1	389	778	强风化泥质粉砂岩	333	888	0.33
13	1	408	817	强风化泥质粉砂岩	366	977	0.33
14	1	462	913	强风化泥质粉砂岩	470	1247	0.33
15	1	514	992	中风化泥质粉砂岩	581	1530	0.32
16	1	533	1066	中风化泥质粉砂岩	682	1818	0.33
17	1	589	1189	中风化泥质粉砂岩	833	2227	0.34
18	1	637	1234	中风化泥质粉砂岩	974	2568	0.32
19	1	624	1211	中风化泥质粉砂岩	935	2466	0.32
19.4	0.4	641	1244	中风化泥质粉砂岩	986	2602	0.32

5.3 动三轴试验过程、方法和土体动力非线性参数确定

5.3.1 试验的内容和依据

云南省地震工程勘察院对泸州医院产业园区区域性地震安全评价所送土样进行了动三轴试验工作，获取工程场地不同土类的动力学特性，并为土层地震动反应分析提供土层动力学数据。试验的成样、试验方法及试验资料整理均按《土工试验方法标准（GB/T50123-2019）》中的有关规定进行。

5.3.2 试验的原理

在试验中，土样在各级荷载下轴向应力 P 和轴向应变ε的时间历程将被记录下来，由应力应变时程绘出应力应变滞回曲线，由滞回曲线 B 点的应力应变值可求得试样的轴向模量 E，由 E 可求得土样在该级荷载下模量：

$$E=\frac{P_B}{\varepsilon_B}$$

$$G=\frac{E}{2(1+\nu)}$$

式中，P_B、ε_B 分别为滞回线 B 点所对应的应力应变值，ν 为泊松比，由土类而定。对所求得各级荷载下不同幅值的模量，进行统计分析时，应力应变关系用双曲线函数表示：

$$\tau=\frac{\gamma}{A+B\gamma}$$

式中，τ和γ为剪应力和剪应变幅值，A 和 B 为回归常数，若令τ/γ=G，则：

如果以 1/G 为纵坐标，γ为横坐标，将实验结果标在该图中，可以近似用一条直线来表示它们的关系，显然当γ→0 时，可以得到系数 A 等于最大剪切模量的倒数，即 $1/G_{max}$，因此可得到对应不同模量与最大模量的比值和剪应变的关系：

$$\frac{G}{G_{max}}=\frac{1}{1+\gamma\cdot\frac{B}{A}}$$

继而，求出动三轴试样的不同剪应变下的动剪切模量比。

试样在荷载下的阻尼比λ可用下式求得：

$$\lambda=\frac{1}{4\pi}\cdot\frac{\Delta W}{W}$$

式中，△W 为一个循环消耗的能量，用应力应变滞回曲线所围的面积表示，

W 为施加的最大应变能。

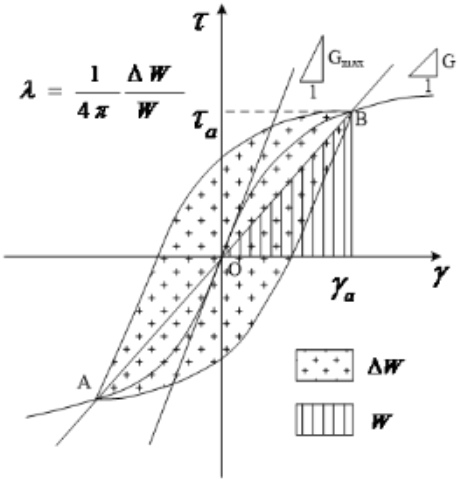


图 5.3-1　剪切模量和阻尼比的定义

5.3.3 试验仪器

本次试验仪器采用了北京市新技术研究所生产的DDS-70微机控制电磁式多功能静动三轴试验系统。该系统主要由主机、电控系统、静压控制系统和微机系统等组成。其工作原理是将圆柱形土试样置于充无气水的三轴室内上下活塞之间。通过气体压力对试样施加轴、侧向静压力。激振器和功率放大器将微机系统提供的一定频率、幅值的电讯号转换为轴向激振力，经下活塞施加至土试样上。测量系统将振动过程中的力、位移、孔隙水压力值记录下来。微机系统对试验进行控制和对试验数据进行处理并输出成果报告。

系统主要技术指标：

试样尺寸：　　直径 39.1mm，高 80mm

轴向最大动出力：　1370N（p－p）

侧向压力：　　0－0.6 MPa

反压：　　0－0.3 Mpa

波形：　　正弦波角波、方波

频率范围：　　1－10 Hz

最大允许轴向位移：　20 mm（p－p）

5.3.4 试验数据和结果

状土试样取样应严格按力学性质试验的要求，保持天然结构和含水率不改

变，方向不颠倒。本场地提供的土样有 25 个，试验室对其进行编号见表 5.3-1，

表 5.3-1　试样编号及其土样原定名

土样编号		取土深度 (m)	土样名称	容重 (kN/m3)	含水率（%）
试验室编号	室内编号				
1	ZK01-1	6.3-6.5	全风化泥质粉砂岩	20.33	12.06
2	ZK01-2	10.6-10.8	强风化泥质粉砂岩	21.46	10.97
3	ZK02-1	12.1-12.3	强风化粉砂岩	21.52	10.92
4	ZK03-1	3.2-3.4	全风化泥质粉砂岩	20.22	12.16
5	ZK03-2	7.4-7.6	强风化泥质粉砂岩	21.29	11.16
6	ZK04-1	5.3-5.5	强风化泥质粉砂岩	21.18	11.27
7	ZK05-1	5.6-5.8	全风化泥质粉砂岩	20.29	12.11
8	ZK06-1	2.4-2.6	强风化泥质粉砂岩	21.11	11.34
9	ZK07-1	18.2-18.4	素填土	17.96	35.66
10	ZK07-2	21.6-21.8	全风化泥质粉砂岩	20.56	11.85
11	ZK07-3	22.7-22.9	强风化粉砂岩	21.56	10.84
12	ZK08-1	4.4-4.6	强风化粉砂岩	21.15	11.30
13	ZK08-2	5.8-6	全风化粉砂岩	20.30	12.09
14	ZK09-1	10.6-10.8	全风化泥质粉砂岩	20.44	11.92
15	ZK09-2	12.3-12.5	强风化泥质粉砂岩	21.33	11.13
16	ZK10-1	3.3-3.5	全风化泥质粉砂岩	20.24	12.14
17	ZK11-1	7.7-7.9	强风化泥质粉砂岩	21.35	11.10
18	ZK12-1	2.4-2.6	全风化泥质粉砂岩	20.19	12.18
19	ZK12-2	7.8-8.0	强风化泥质粉砂岩	21.38	11.05
20	ZK13-1	1.85-2.05	全风化泥质粉砂岩	20.15	12.21
21	ZK14-1	7.5-7.7	淤泥	17.61	36.43
22	ZK14-2	9.8-10.0	强风化泥质粉砂岩	21.44	11.00
23	ZK15-1	7.6-7.8	强风化泥质粉砂岩	21.32	11.14
24	ZK16-1	6.7-6.9	全风化泥质粉砂岩	20.36	12.00
25	ZK17-1	7.1-7.3	强风化泥质粉砂岩	21.27	11.20

将试验所求得动剪切模量比和阻尼比的结果进行曲线拟合，即可得出各试样的拟合曲线，如图 5.3-2-5.3-26 所示。各试样的剪应变标准点的动剪切模量比和阻尼比，见表 5.3-2。

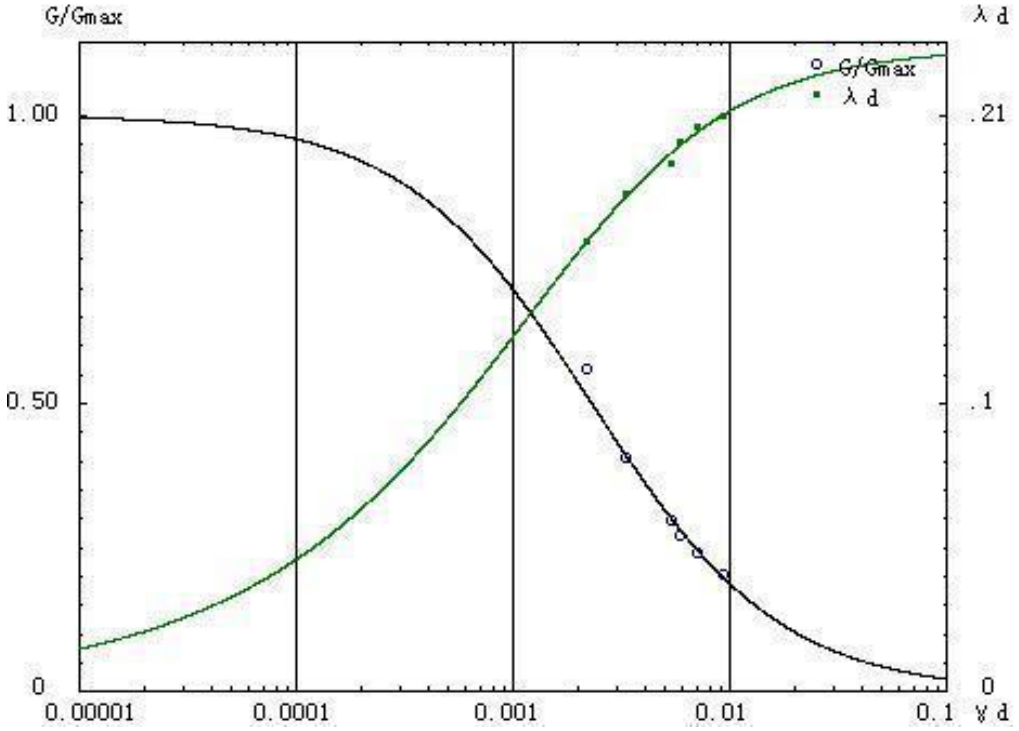


图 5.3-2　试样 1 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

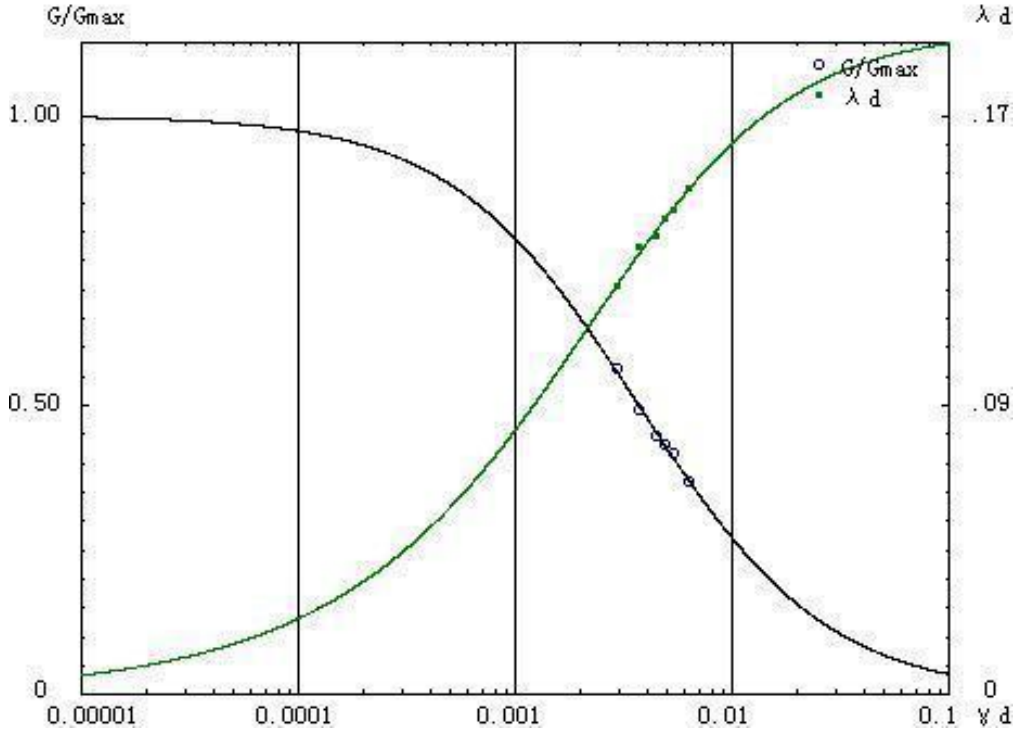


图 5.3-3　试样 2 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

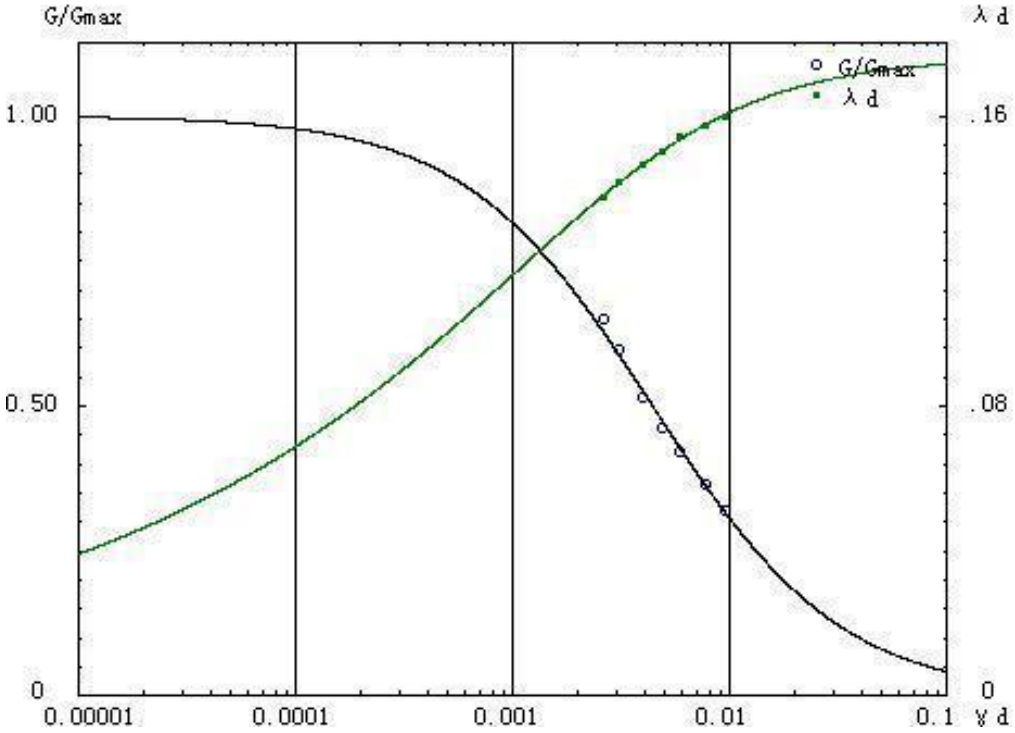


图 5.3-4　试样 3 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

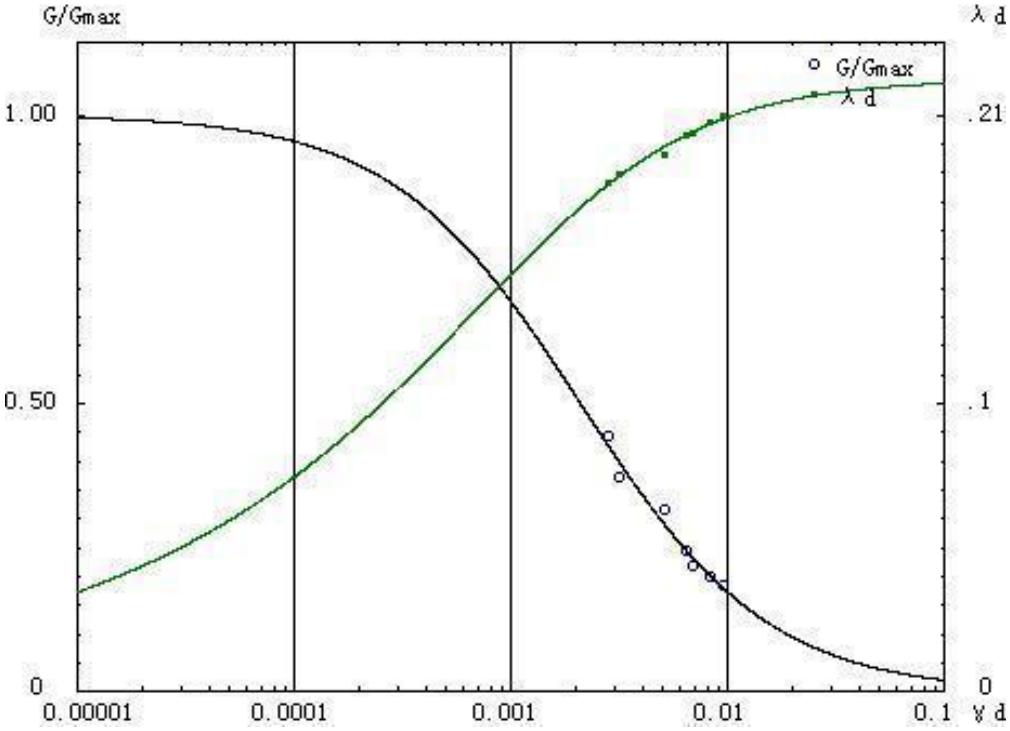


图 5.3-5 试样 4 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

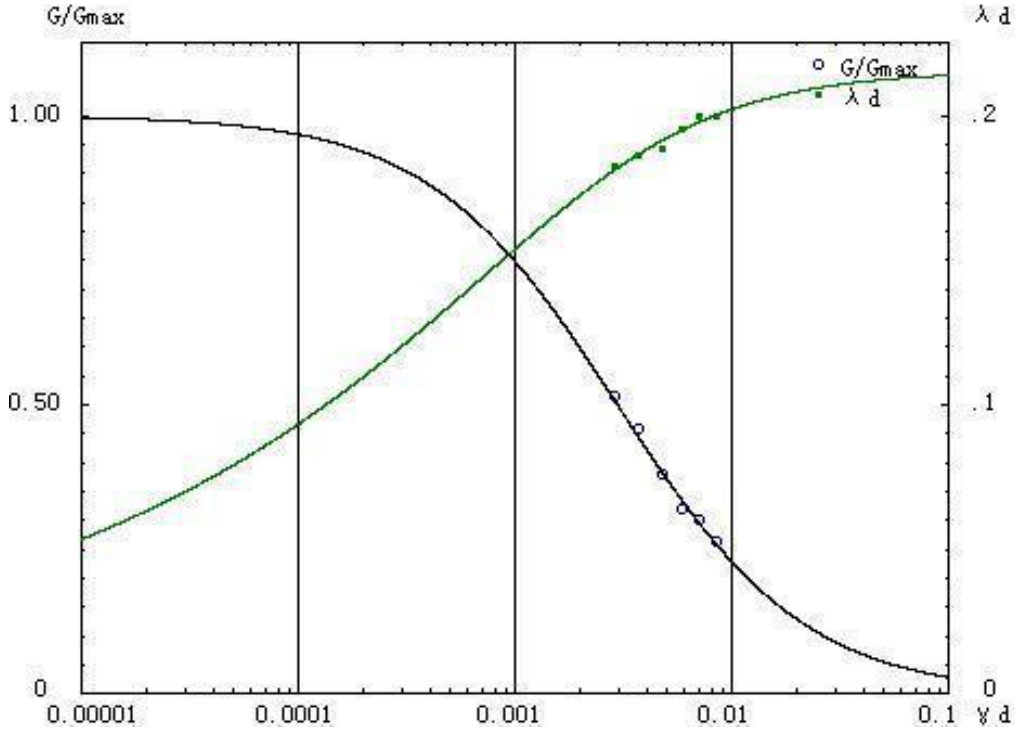


图 5.3-6 试样 5 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

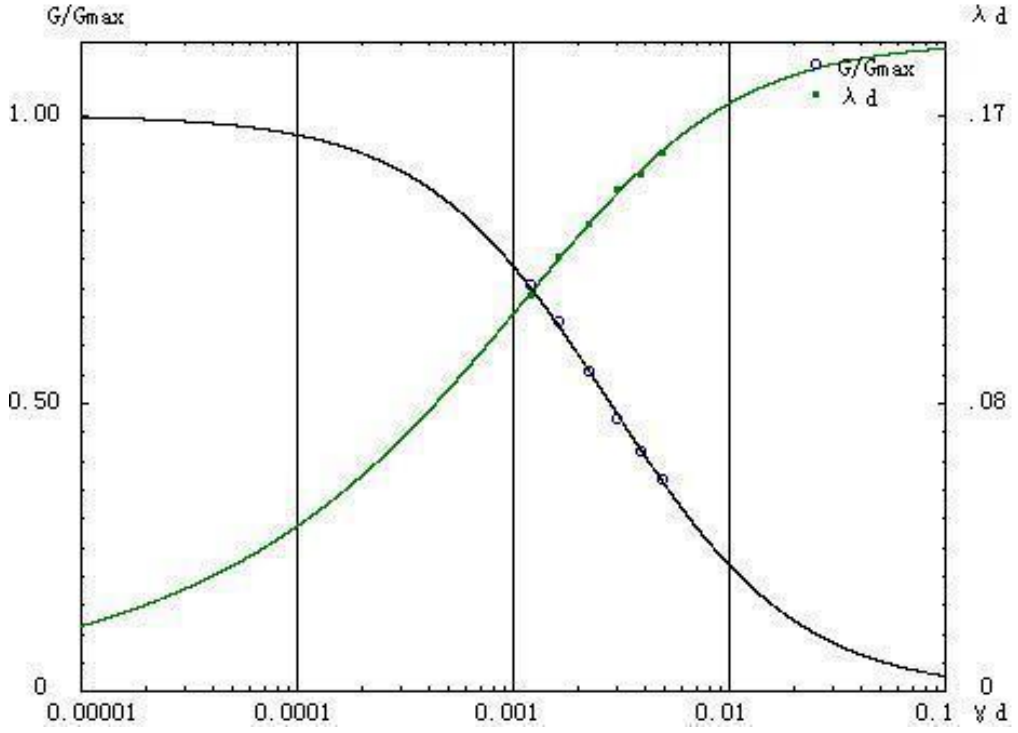


图 5.3-7 试样 6 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

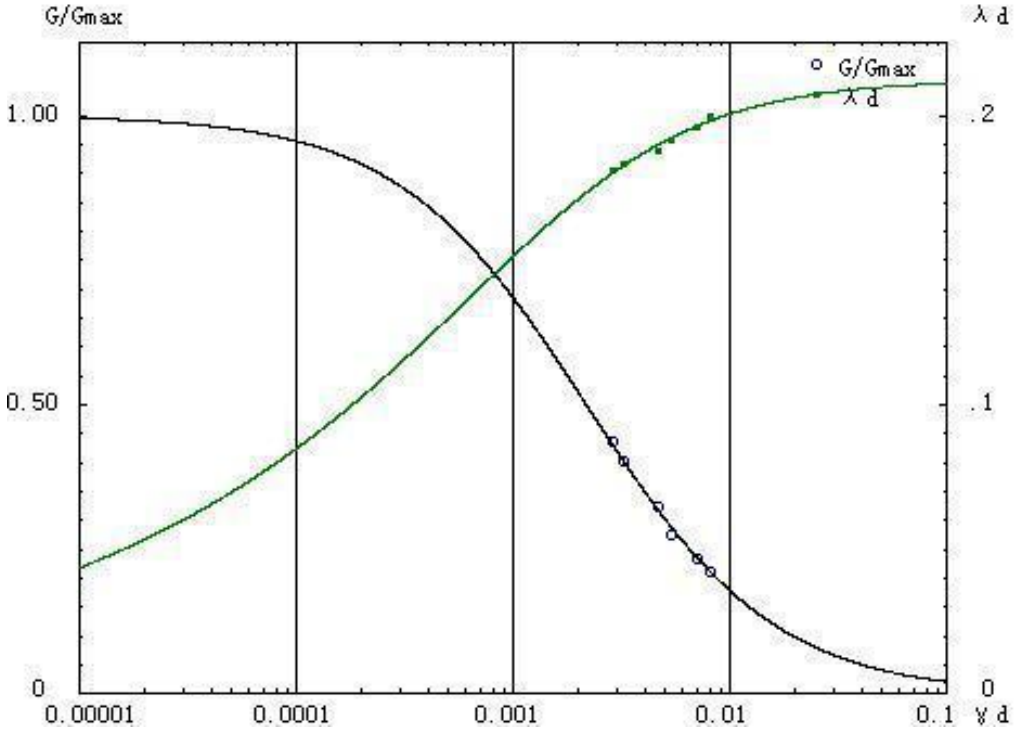


图 5.3-8 试样 7 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

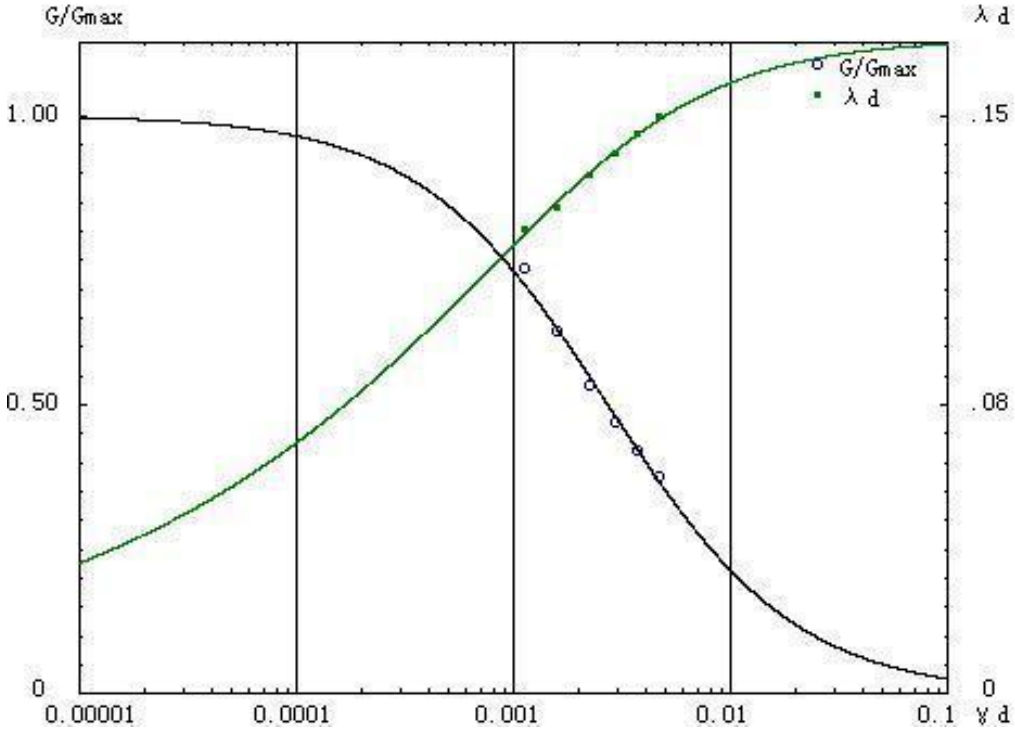


图 5.3-9 试样 8 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

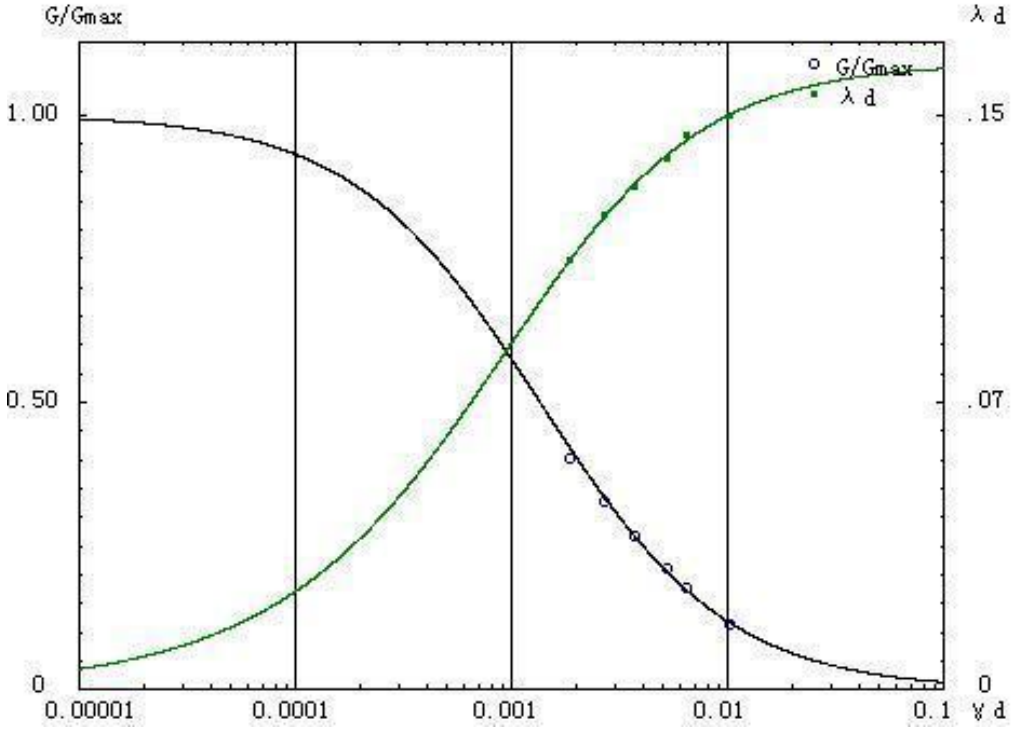


图 5.3-10 试样 9 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

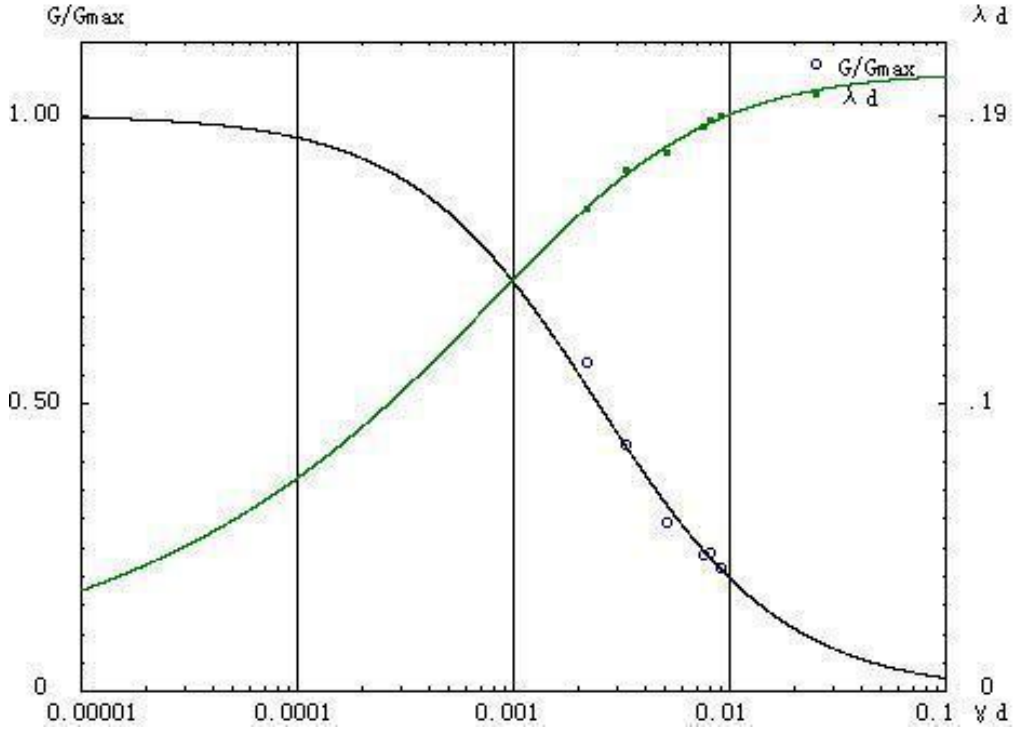


图 5.3-11 试样 10 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

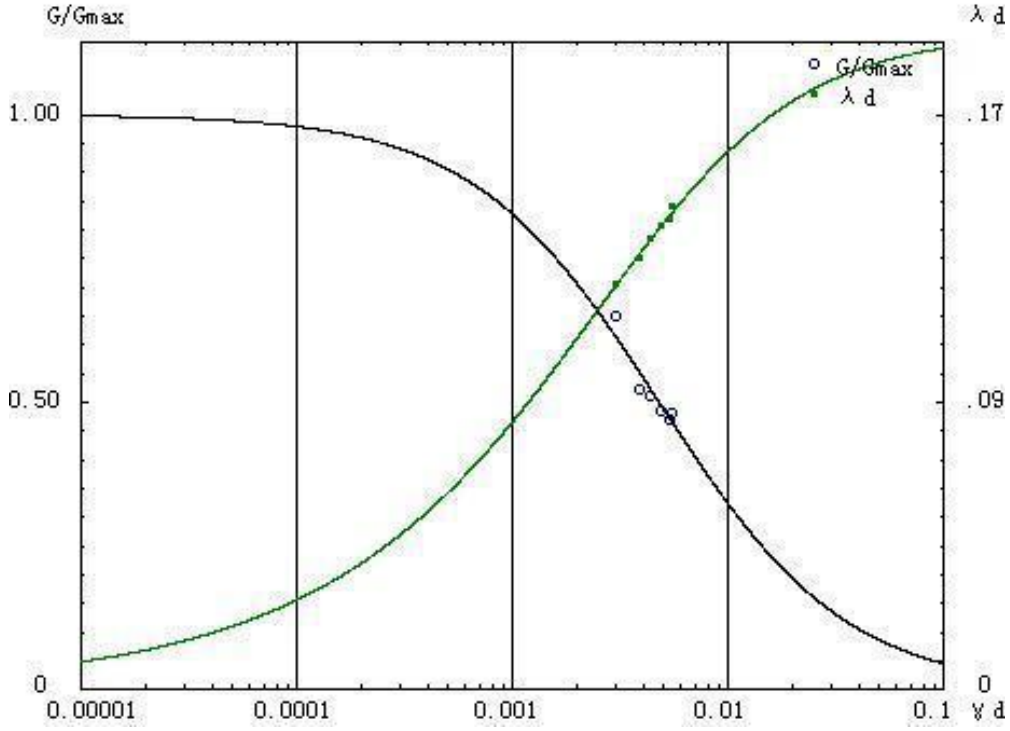


图 5.3-12 试样 11 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

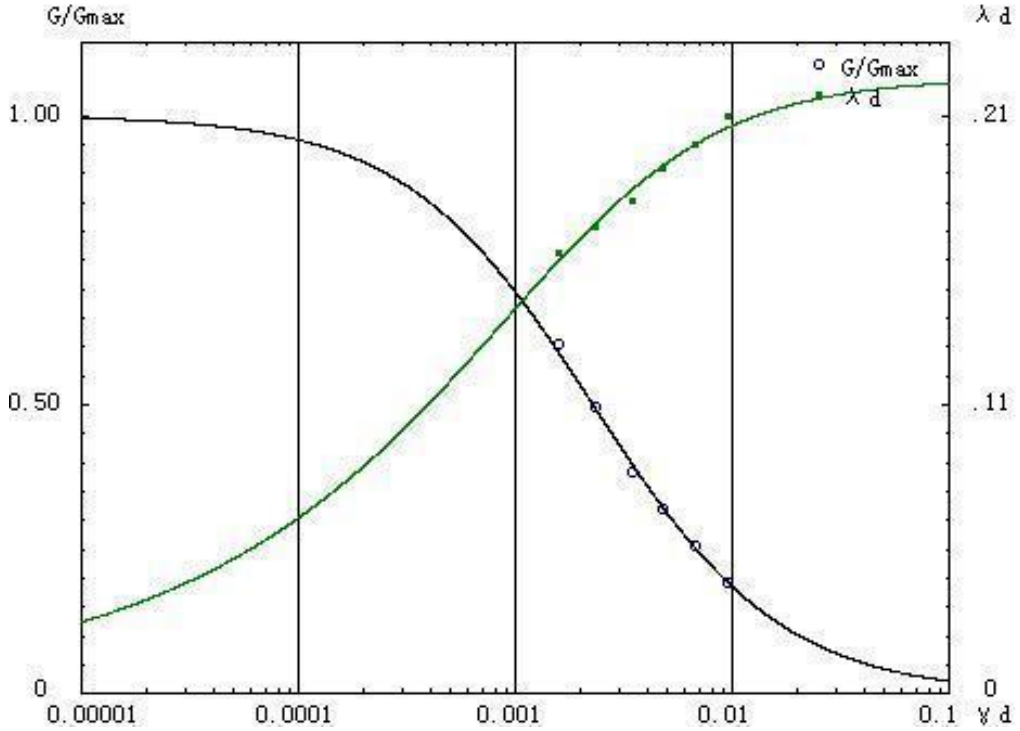


图 5.3-13 试样 12 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

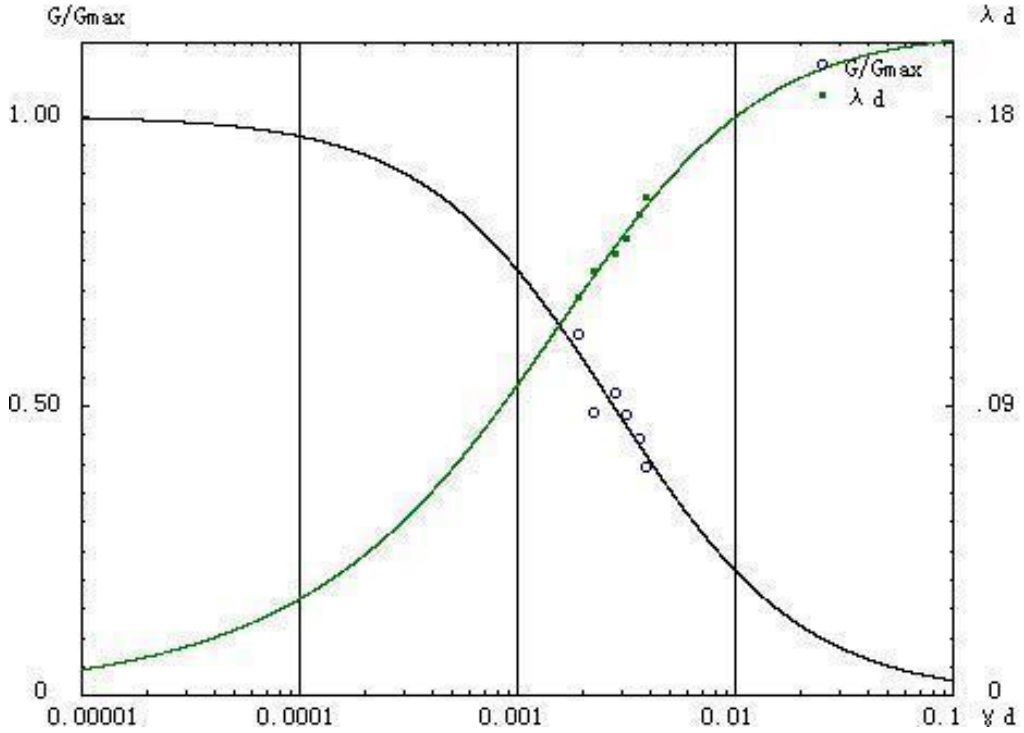


图 5.3-14 试样 13 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

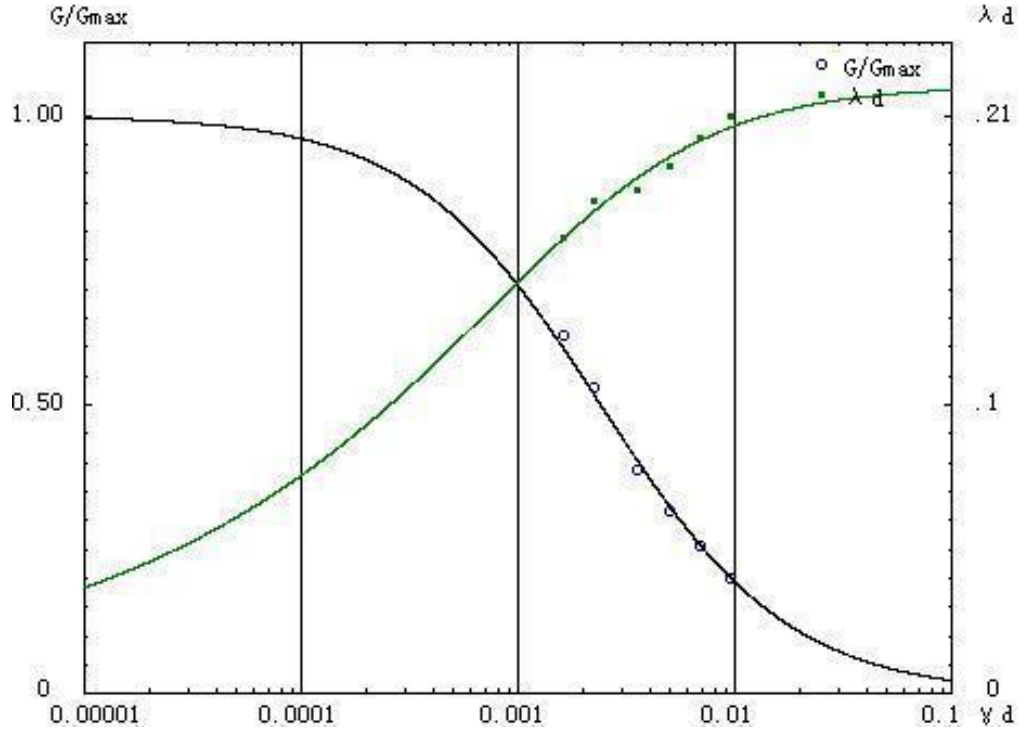


图 5.3-15 试样 14 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

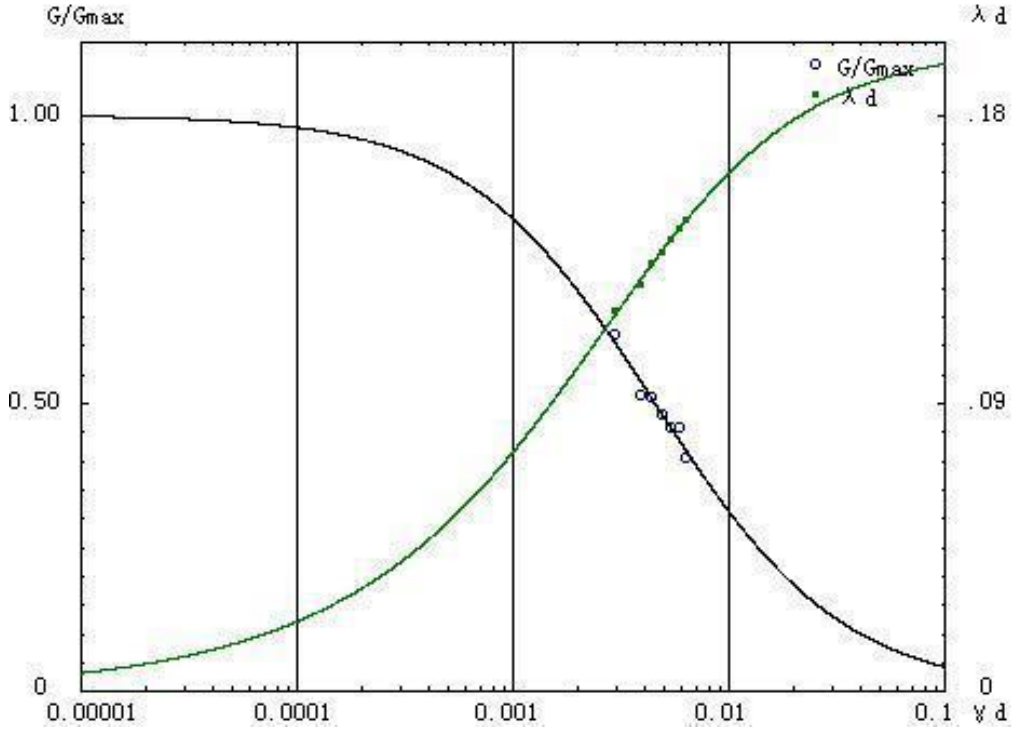


图 5.3-16 试样 15 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

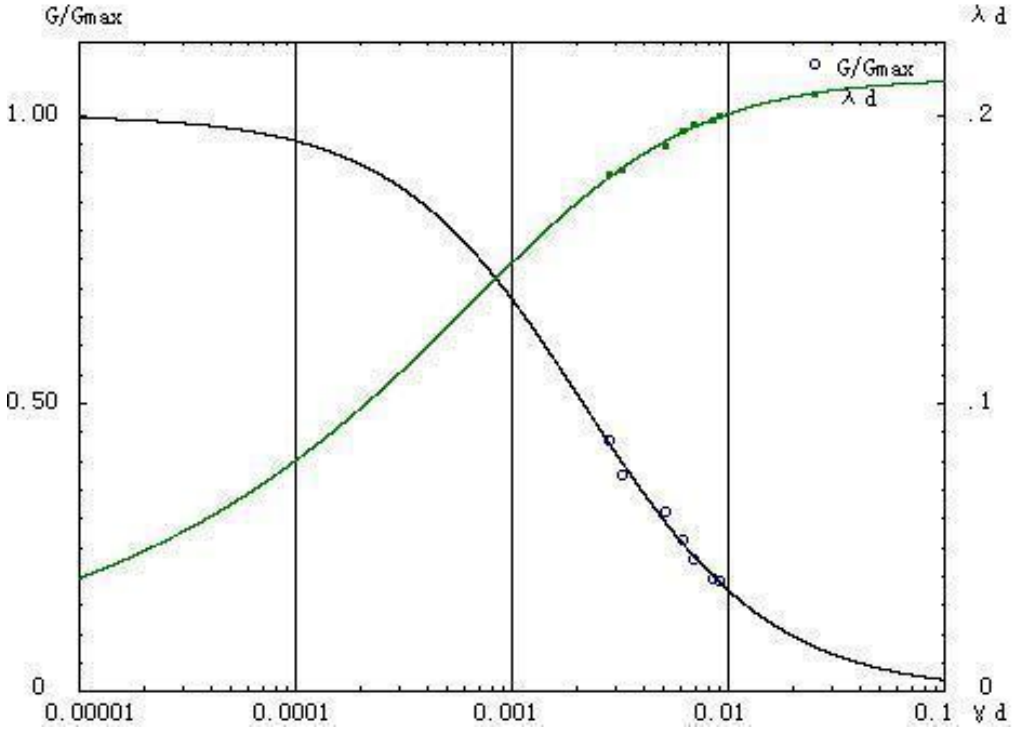


图 5.3-17 试样 16 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

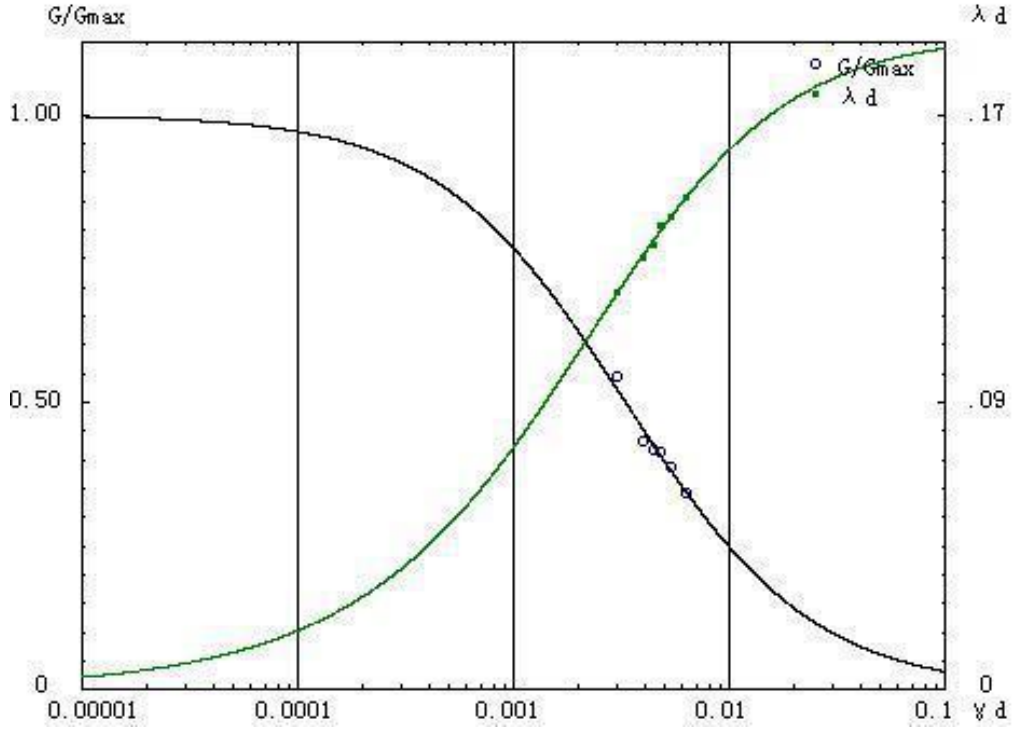


图 5.3-18 试样 17 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

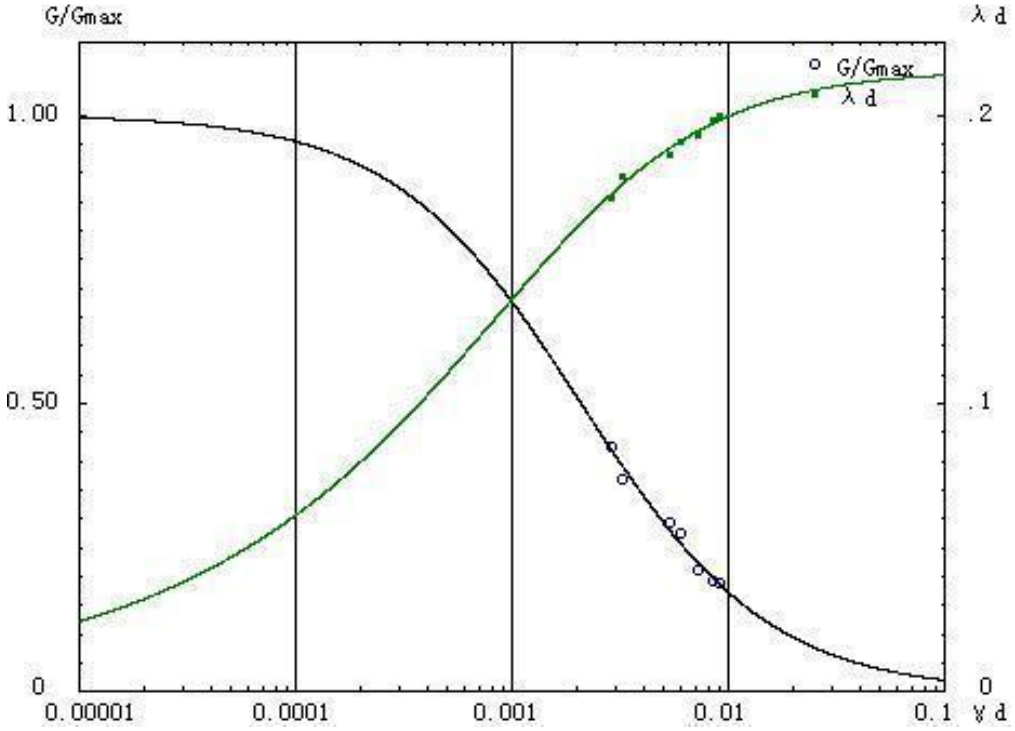


图 5.3-19 试样 18 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

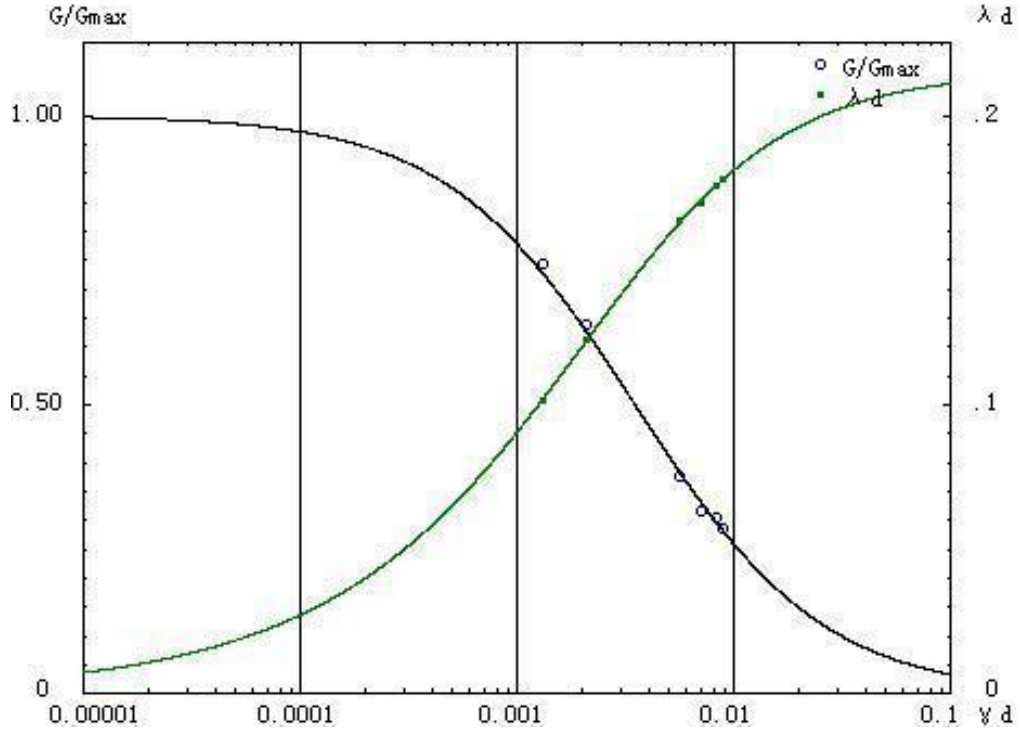


图 5.3-20 试样 19 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

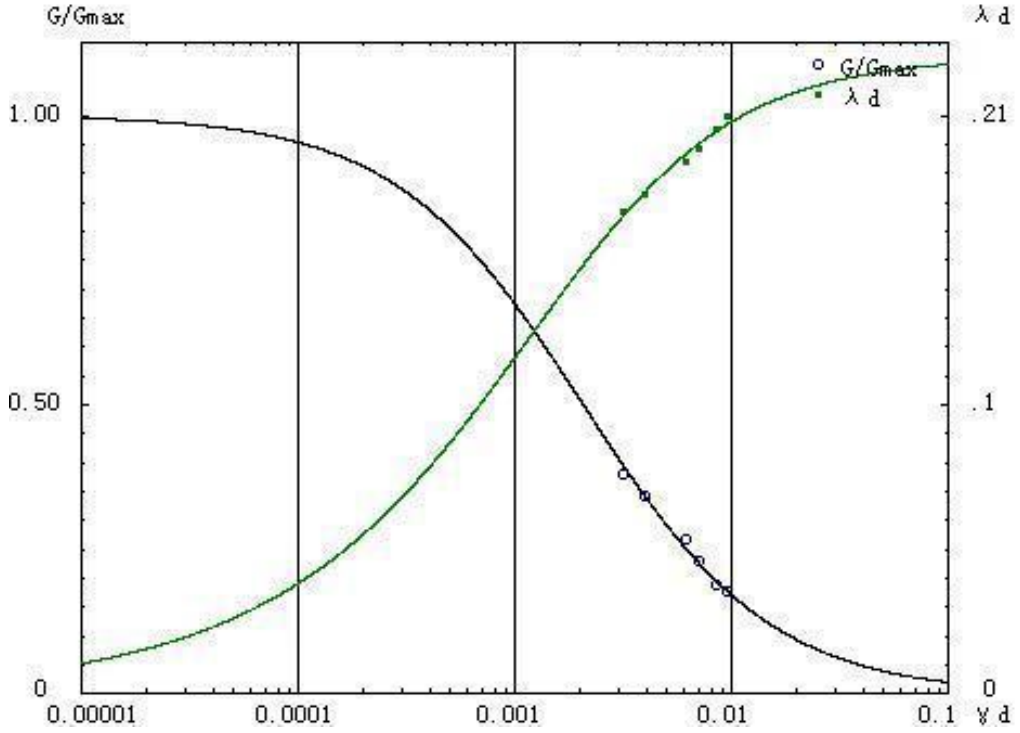


图 5.3-21 试样 20 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

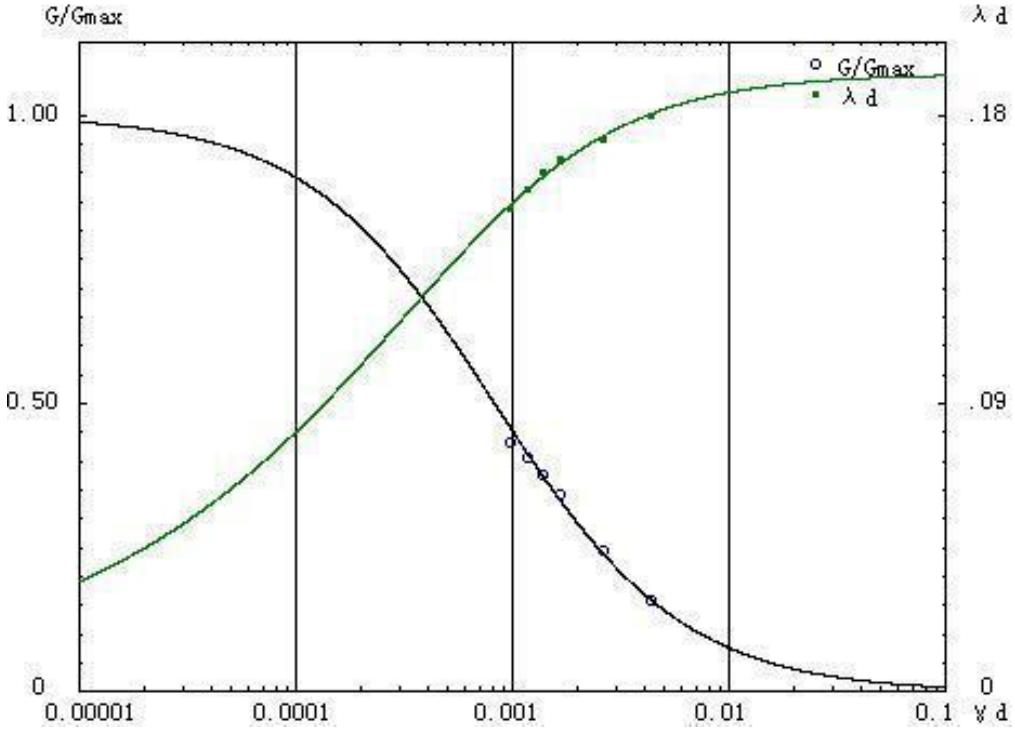


图 5.3-22 试样 21 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

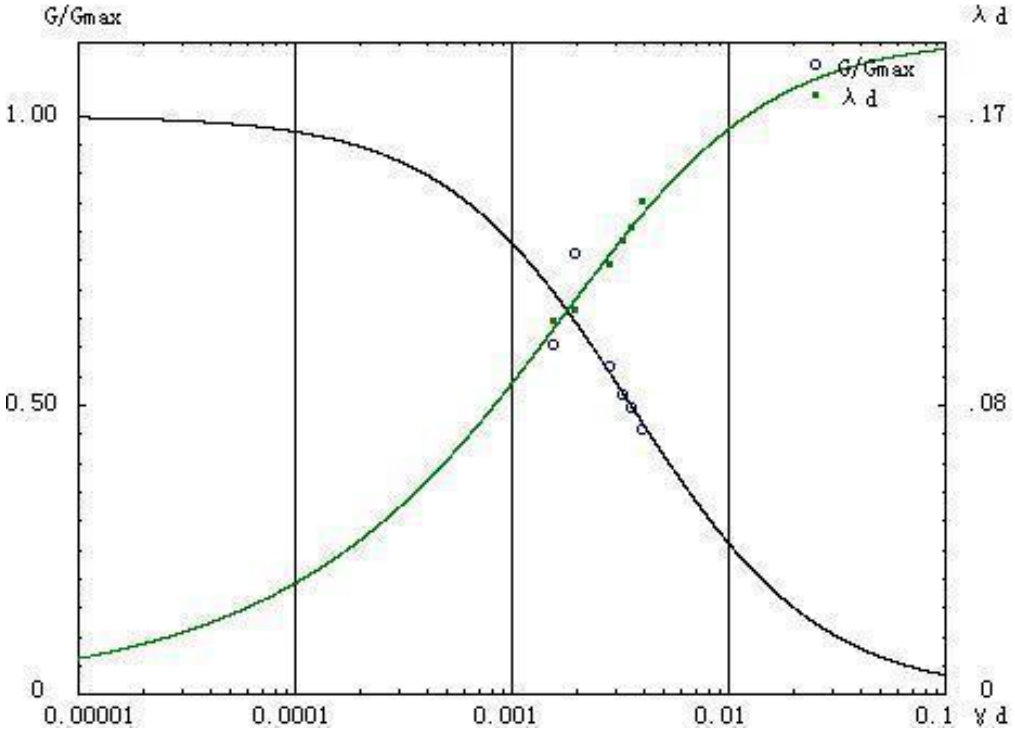


图 5.3-23 试样 22 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

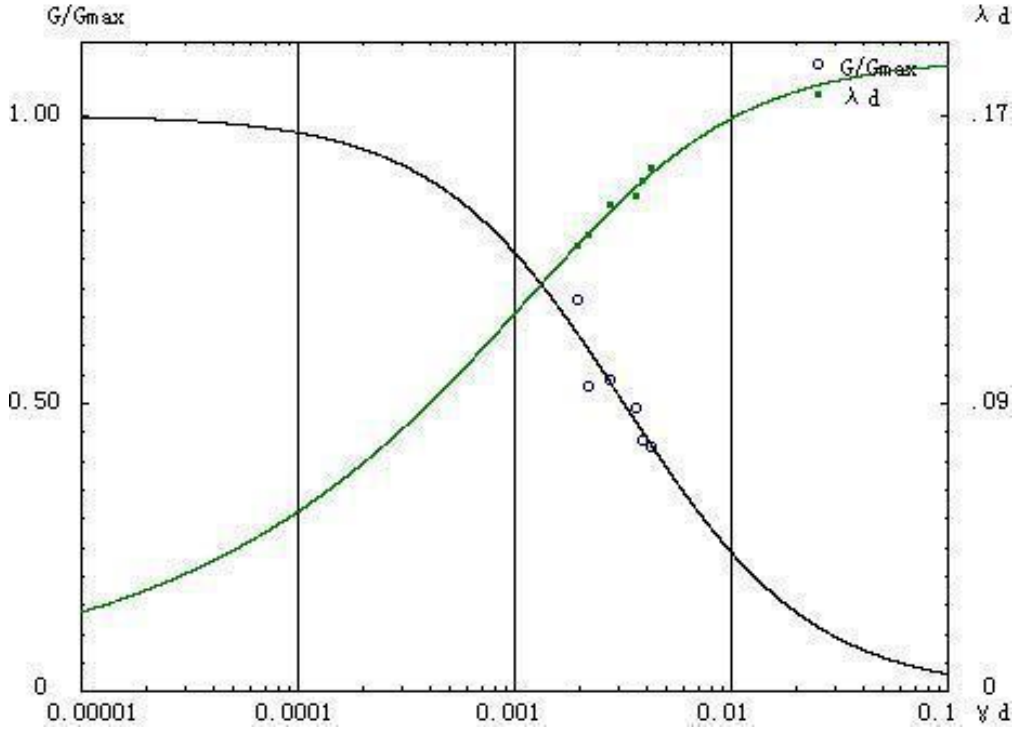


图 5.3-24　试样 23 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

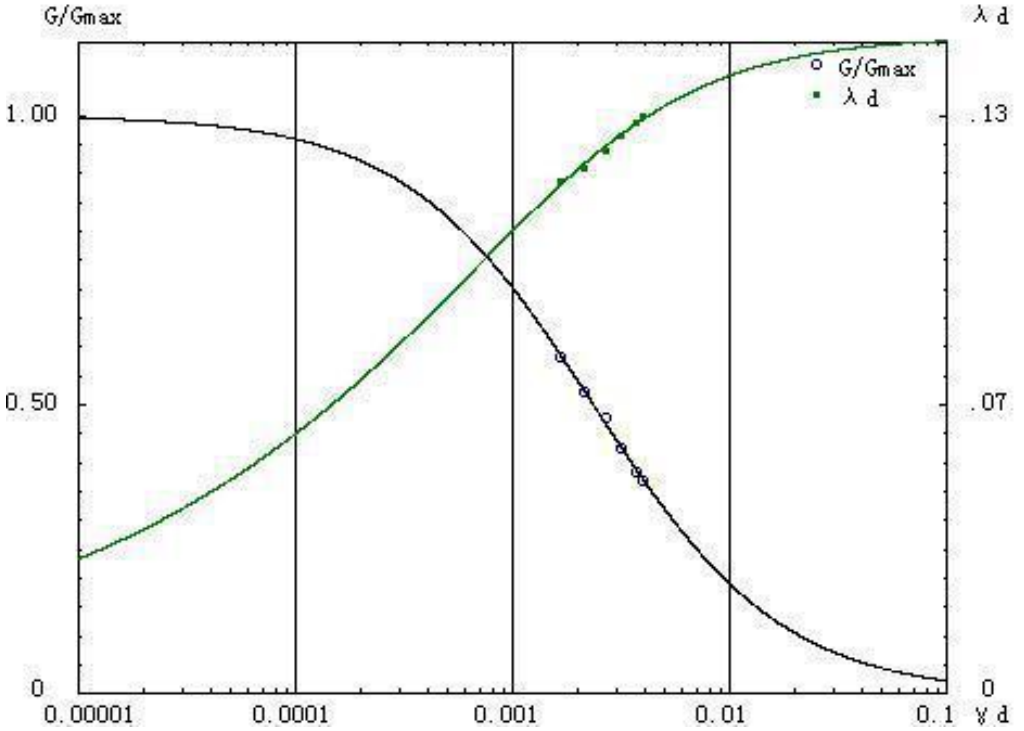


图 5.3-25　试样 24 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

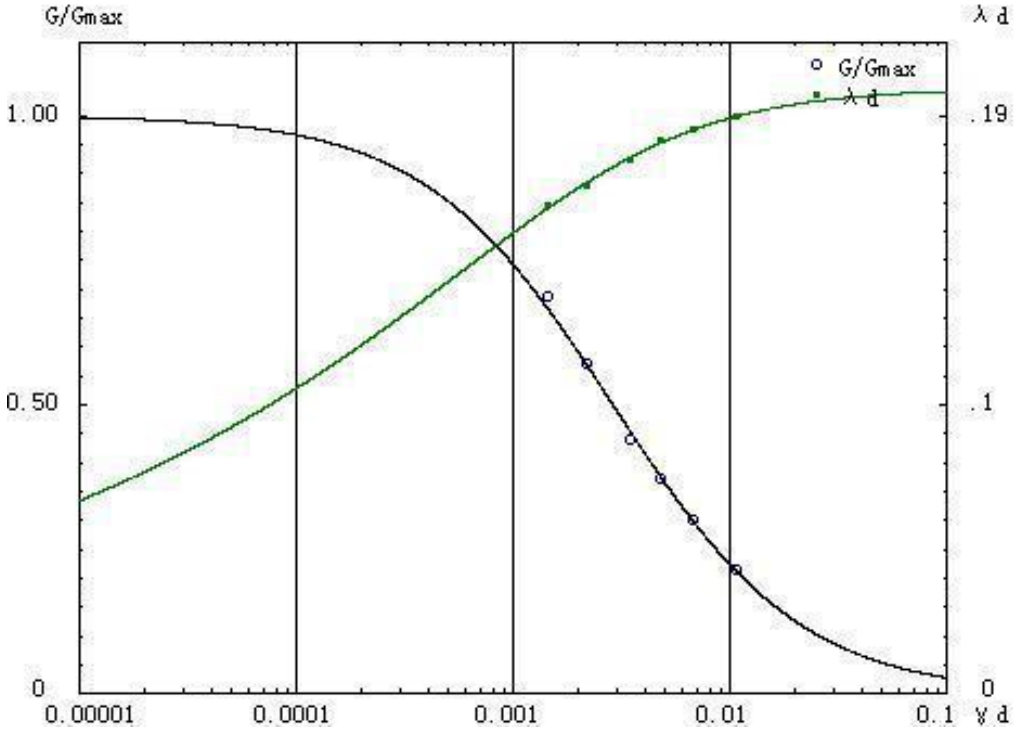


图 5.3-26 试样 25 动剪切模量比、阻尼比与剪应变关系曲线

表 5.3-2 各试样剪应变标准点的动剪切模量比和阻尼比值

序号	试验编号	剪应变γd	5×10-6	1×10-5	5×10-5	1×10-4	5×10-4	1×10-3	5×10-3	1×10-2
1	1	G/Gmax	0.9978	0.9957	0.9786	0.9582	0.8208	0.6961	0.3141	0.1863
		λd	0.0111	0.0156	0.0345	0.0482	0.0992	0.1290	0.1933	0.2104
2	2	G/Gmax	0.9986	0.9973	0.9866	0.9736	0.8805	0.7866	0.4244	0.2693
		λd	0.0039	0.0058	0.0150	0.0225	0.0553	0.0781	0.1409	0.1623
3	3	G/Gmax	0.9989	0.9977	0.9887	0.9777	0.8977	0.8144	0.4673	0.3049
		λd	0.0332	0.0394	0.0585	0.0692	0.1008	0.1168	0.1515	0.1618
4	4	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9765	0.9541	0.8062	0.6753	0.2937	0.1721
		λd	0.0284	0.0358	0.0615	0.0771	0.1258	0.1498	0.1950	0.2057
5	5	G/Gmax	0.9983	0.9966	0.9833	0.9672	0.8548	0.7465	0.3706	0.2275
		λd	0.0454	0.0538	0.0794	0.0937	0.1347	0.1543	0.1927	0.2026
6	6	G/Gmax	0.9982	0.9964	0.9824	0.9654	0.8482	0.7364	0.3585	0.2184
		λd	0.0145	0.0191	0.0365	0.0480	0.0876	0.1095	0.1571	0.1702
7	7	G/Gmax	0.9977	0.9954	0.9774	0.9558	0.8120	0.6836	0.3017	0.1776
		λd	0.0354	0.0434	0.0693	0.0844	0.1290	0.1503	0.1897	0.1990
8	8	G/Gmax	0.9981	0.9963	0.9818	0.9642	0.8436	0.7295	0.3504	0.2124
		λd	0.0279	0.0341	0.0538	0.0653	0.0998	0.1167	0.1501	0.1586
9	9	G/Gmax	0.9963	0.9926	0.9641	0.9308	0.7289	0.5735	0.2119	0.1185
		λd	0.0034	0.0055	0.0163	0.0256	0.0659	0.0902	0.1379	0.1490
10	10	G/Gmax	0.9980	0.9959	0.9799	0.9606	0.8297	0.7090	0.3276	0.1959
		λd	0.0273	0.0343	0.0579	0.0723	0.1169	0.1395	0.1837	0.1948
11	11	G/Gmax	0.9990	0.9979	0.9896	0.9794	0.9049	0.8264	0.4877	0.3225
		λd	0.0058	0.0083	0.0189	0.0267	0.0584	0.0795	0.1382	0.1594

12	12	G/Gmax	0.9978	0.9956	0.9784	0.9577	0.8190	0.6935	0.3115	0.1845
		λd	0.0203	0.0267	0.0500	0.0652	0.1159	0.1427	0.1965	0.2101
13	13	G/Gmax	0.9982	0.9964	0.9821	0.9648	0.8456	0.7325	0.3539	0.2150
		λd	0.0055	0.0082	0.0205	0.0302	0.0706	0.0968	0.1606	0.1796
14	14	G/Gmax	0.9979	0.9958	0.9795	0.9597	0.8266	0.7044	0.3228	0.1925
		λd	0.0306	0.0381	0.0632	0.0783	0.1246	0.1476	0.1921	0.2032
15	15	G/Gmax	0.9989	0.9978	0.9890	0.9783	0.9003	0.8186	0.4744	0.3110
		λd	0.0040	0.0060	0.0150	0.0223	0.0538	0.0759	0.1401	0.1638
16	16	G/Gmax	0.9976	0.9953	0.9769	0.9549	0.8090	0.6793	0.2976	0.1748
		λd	0.0323	0.0402	0.0662	0.0818	0.1287	0.1515	0.1939	0.2039
17	17	G/Gmax	0.9985	0.9970	0.9850	0.9704	0.8677	0.7664	0.3961	0.2470
		λd	0.0024	0.0038	0.0114	0.0180	0.0500	0.0737	0.1407	0.1635
18	18	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9764	0.9539	0.8055	0.6743	0.2929	0.1716
		λd	0.0188	0.0249	0.0476	0.0625	0.1125	0.1388	0.1904	0.2031
19	19	G/Gmax	0.9986	0.9971	0.9858	0.9720	0.8743	0.7767	0.4102	0.2580
		λd	0.0050	0.0074	0.0186	0.0274	0.0652	0.0908	0.1589	0.1813
20	20	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9762	0.9536	0.8043	0.6726	0.2912	0.1704
		λd	0.0074	0.0109	0.0271	0.0396	0.0898	0.1204	0.1869	0.2044
21	21	G/Gmax	0.9939	0.9880	0.9425	0.8913	0.6212	0.4506	0.1409	0.0758
		λd	0.0258	0.0337	0.0620	0.0794	0.1290	0.1491	0.1775	0.1826
22	22	G/Gmax	0.9986	0.9972	0.9860	0.9724	0.8756	0.7787	0.4130	0.2602
		λd	0.0075	0.0105	0.0231	0.0323	0.0677	0.0900	0.1455	0.1630
23	23	G/Gmax	0.9984	0.9969	0.9845	0.9694	0.8637	0.7600	0.3878	0.2405
		λd	0.0188	0.0241	0.0427	0.0545	0.0933	0.1143	0.1601	0.1730
24	24	G/Gmax	0.9979	0.9957	0.9791	0.9590	0.8238	0.7003	0.3185	0.1894
		λd	0.0249	0.0304	0.0483	0.0587	0.0894	0.1043	0.1323	0.1391
25	25	G/Gmax	0.9983	0.9965	0.9828	0.9663	0.8513	0.7412	0.3641	0.2226
		λd	0.0560	0.0644	0.0888	0.1017	0.1372	0.1534	0.1838	0.1914

5.4 目标区地震工程地质条件评价

5.4.2 场地类别

目标区场地类别边界取相邻钻孔的中间为界，目标区位于川东盆岭区，属构造剥蚀丘陵地貌，地处濑溪河西岸的山前堆积体上，地势总体上西高东低，地形较平缓，分布广阔的红色丘陵，海拔高度在310～250m之间。目标区及附近基岩出露较好，为上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩。

（1）根据17个钻孔的孔中波速测试综合计算结果（见表5.2-2），本场地卓越周期约为0.23s。

（2）在17个钻孔中，经测试该场地等效剪切波速为158～286 m/s，等效剪切波平均波速为201m/s，为中软土、中硬土，所测试范围内的场地均类别为Ⅱ类。该场地的分区如图5.4-1所示。

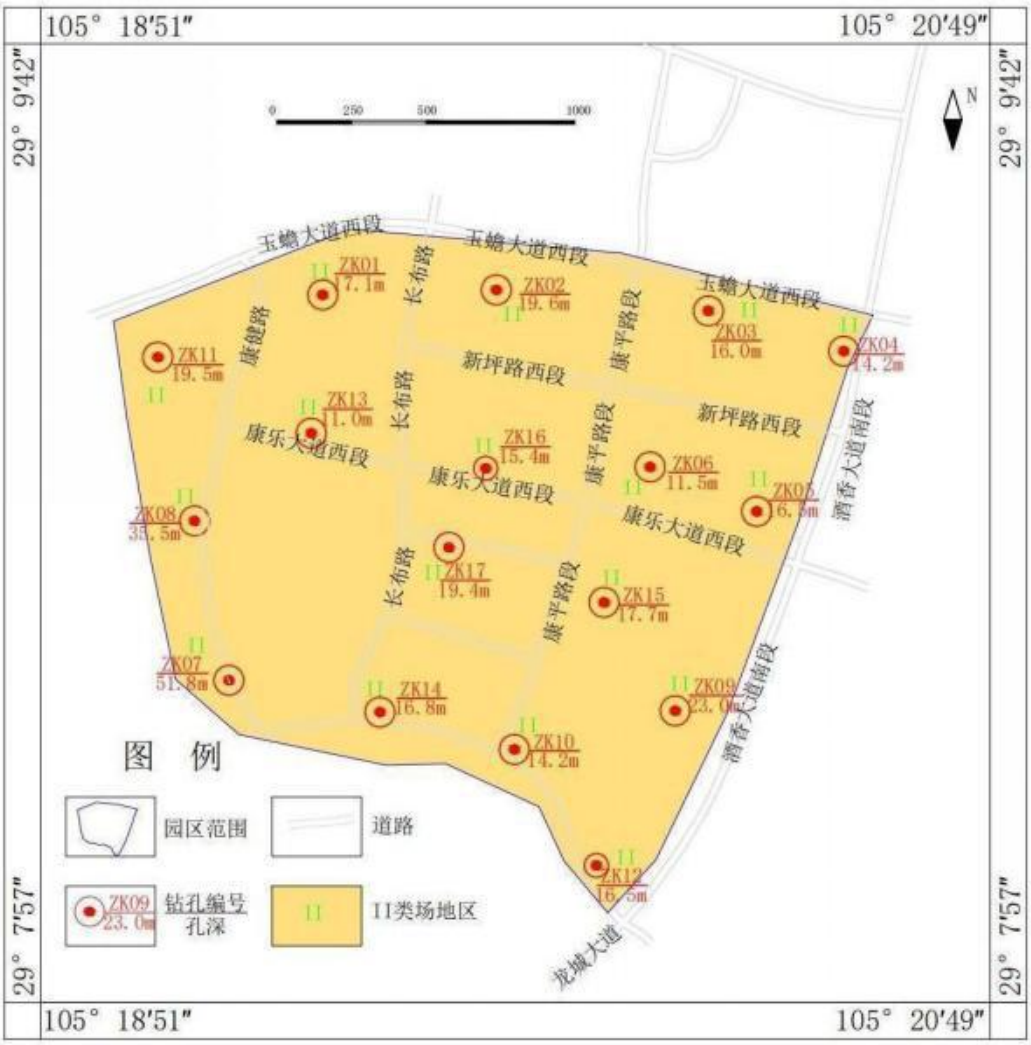


图5.4-1　工程场地类别分区图

5.4.1 场地土层结构

目标区勘探深度范围内，土层结构较简单，揭露地层主要为表层表层第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）和下伏中侏罗统上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩基岩层。

6 地震危险性概率分析

6.1 地震危险性概率分析方法概述

地震危险性分析的目的，是预测某场地未来一段时间内出现某种级别的地震动的可能性，它是工程抗震设计和决策的重要依据。本次工作采用《工程场地地震安全性评价》（GB17741-2005）规定的概率地震危险性分析方法（CPSHA）方法步骤：

第一，在地震活动性研究和构造分析基础上划分地震带，并确定地震带的地震活动性参数。以此作为考虑地震活动时间非均匀性、确定未来百年地震活动水平和地震危险性空间相对分布概率的基本单元。地震带内部地震活动在空间和时间上都是不均匀的。

第二，在地震带内划分出地震构造区，进一步在地震构造区内划分出潜在震源区，并确定地震构造区背景潜源和潜在震源区的地震活动性参数。

第三，确定合理的地震动预测方程。

第四，根据分段泊松模型计算每个地震带对场点的地震危险性贡献，综合各地震带的地震危险性贡献，求出场点的地震危险性。对于一个场点进行地震危险性分析，通常通过以下几个步骤得到：设有 NZ 个地震带对场点的地震危险性有贡献，相应于第 iZ 个地震带对场点地震动的年超越概率为 Piz，则场点总的地震动年超越概率表示为：

$$p = 1 - \prod_{iZ=1}^{NZ} (1 - p_{iZ})$$

iZ=1，2，d,NZ

地震带是地震活动性分析的统计单元，它应具有统计上的完整性和地震活动趋势的一致性。假定地震发生的时间过程符合分段泊松过程，t 年内地震年平均发生率为 vt，则：

$$P_{kt} = \frac{(v_t \cdot t)^k}{k!} \exp\left(-v_t \cdot t\right)$$

式中 P_{kt} 是地震带未来 t 年内发生 k 次地震的概率。

地震带内大小地震的比例关系符合修定的古登堡里克特震级频度关系，相应的震级概率函数为：

$$f_m(\mathrm{m}) = \frac{\beta \exp[-\beta(\mathrm{m} - M_0)]}{1 - \exp[-\beta(M_{uz} - M_0)]}$$

其中β=bln10，M_0，M_{uz} 分别是起算震级和震级上限。

在地震带中划分出若干不同震级上限的地震构造区和潜在震源区。从分段泊松模型和全概率定理可知，区内所发生的地震在场点所产生的地震动值（A）超过给定值（a）的概率为：

$$P(A \geq a) = 1 - \exp\{-v \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iiint \frac{1}{S_i} P(A \geq a \mid E_i) P(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) dx dy d\theta\}$$

式中 P(mj)为地震带发生的地震落在震级档 $m_j \pm \frac{1}{2}(\Delta m)$ 内的概率，它可表示为：

$$P(m_j) = \frac{2}{\beta} f_m(m_j) sh(\frac{1}{2}\beta\Delta m)$$

由以上两式可得知：

$$P(A \geq a) = 1 - \exp\{-\frac{2v}{\beta} \sum_{j=1}^{N_m} \sum_{i=1}^{N_s} \iiint \frac{1}{S_i} P(A \geq a \mid E_i) f_m(m_j) f_{i,m_j} f(\theta) sh(\frac{1}{2}\beta\Delta m) dx dy d\theta\}$$

式中 f（θ）为破裂方向的概率密度函数，$f_{i,mj}$ 为地震空间分布函数，v 为 4.0 级以上地震的年平均发生率，P（$A \geq a$ | E_i）为地震带内第 i 个地震构造区背景潜源或潜在震源区内发生某一特定地震事件（震中（x,y），震级 $m_j \pm \frac{1}{2}(\Delta m)$、，破裂方向确定）时场点地震动超越 a 的概率，Si 为地震带内第 i 个潜在震源区的面积。这就是某一地震带发生地震在场点产生地震动的年超越概率公式。

本报告采用的危险性分析计算程序中，采用国内外普遍使用的校正方法进行地震动衰减的不确定性校正，即认为地震动衰减离散性符合正态分布或对数正态分布，对地震动预测方程的不确定性校正公式为：

$$P(A \geq a) = \int_{-3\sigma}^{3\sigma} P(A \geq a - \varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon$$

式中，$P(A \geq a)$是经校正的地震危险性，$P(A \geqslant a-\varepsilon)$是未经校正的地震危险性，$\varepsilon$为随机误差项，$f$（$\varepsilon$）为其概率密度函数。

6.2 地震构造区和潜在震源区的划分

新一代地震区划图采用了潜在震源区三级划分的思想，分别为地震区带的划分、地震构造区的划分和潜在震源区的划分。其中地震区带是指地震活动和地震

地质条件密切相关的地区，是地震活动性参数的基本统计单元；地震构造区是指地震构造环境和发震构造模型一致的地区，是潜在震源区三级划分原则中重要的中间环节，其目的是在地震区带中细划出的地震构造区内，建立统一的发震构造模型，确定地震构造类比标志，并更加合理地确定本底地震震级；潜在震源区主要依据具体的断裂构造进行划分，反映活动较强烈的地震构造对局部地区地震危险性的控制作用。本次工作根据新一代区划图工作成果，划分时采用了三级划分方法。由于区域所在地震区带的划分方案在前述章节已经论述，下面将对相关地震带内地震构造区、潜在震源区的划分进行论述。

6.2.1 地震构造区的定义与划分原则

地震构造区是指在现今地球动力学环境下，地震构造环境和发震构造模型一致的地区。地震构造环境一致系指在统一的现今地球动力学环境、构造应力场及深部地球物理场等条件下，发震构造性质具有一致或相似性的特点，同一地震构造区内的地震活动的强度和频度相近。发震构造模型一致系指同一地震构造区内的发震构造和主要地震事件可以归纳为统一的发震构造模型来解释，而与发震构造模型不相关、随机发生的地震则确定为背景性地震，即本底地震。因此，地震构造区的划分应遵循以下几条原则：

动力学环境的一致性。即在现今区域地球动力学环境和块体运动作用下，同一地震构造区具有相同或相似的构造变形样式。

现今构造应力场的一致性。包括主压应力场的方向、仰角等。

地震构造环境的一致性。主要是指发震断层具有相同或相近的活动性质。

深部地球物理场特征的一致性。即同一地震构造区内具有相同或相似的深部构造背景，意味着发震构造的深部孕震构造背景相同或相似。

发震构造模型的一致性。即同一地震构造区内的发震构造和主要地震事件可以归纳为统一的发震构造模型。

背景地震强度（本底地震）的一致性。即同一地震构造区内与发震构造无关的随机地震具有相同的震级上限，通常是在排除了在同一发震构造模型下的可能性后确定的。

在综合应用以上几条原则的基础上，还应参考新构造运动特征和地震活动的强度与频度相同或相近的两条原则。

6.2.2 地震构造区的划分结果

根据地震构造区的定义和划分原则，在地震区带划分结果的基础上，按照基 础资料研究详略程度的不同，对各地震带内地震构造区划分结果如下：右江地震 带划分为右江地震构造区，其背景潜源震级上限为 5.0 级；龙门山地震带划分出甘东南、龙门山、成都和陇中盆地 4 个地震构造区，背景潜源震级上限分别为 6.5 级、6.5 级、6.0 级和 6.0 级；鲜水河—滇东地震带划分出羌塘北、川西和攀 西-滇中 3 个地震构造区，背景潜源震级上限分别为 6.5 级、6.5 级和 6.0 级；长江中游地震带划分出秦岭—大巴、川中、渝黔、华南北部和华南中部 5 个地震构造区，背景潜源震级上限都为 5.0 级。图 6.2- 1 给出了地震构造区划分示意图。

6.2.3 潜在震源区的划分原则

潜在震源区是指未来可能发生破坏性地震的地区，在上述地震构造区的基础上进行进一步划分。这里的“未来”没有明确的时间尺度含义，泛指几年～几千年或者更长的时间。“可能”具有概率的含义，一般地，离逝时间愈短发生地震的可能性愈小，相反则愈大；另一方面，震级愈大的地震复发的时间尺度愈长。“破坏性地震”是指 M≥5 级地震。“地区”是未来可能发生地震的范围。潜在震源区的危险程度是通过震级上限 Mu、b 值和年平均发生率υ来描述的。在同一个潜在震源区内，未来所发生的地震强度和频度的可能性处处相同。

潜在震源区的划分结果实际上是具体体现了地震活动在空间和强度上的差异，划分的方案的精度与合理性取决于该地区地震构造、地震活动性的研究水平。基于潜在震源区的含义，当某个区域内地震的强度或频度存在差异时，就应划为两个或多个潜在震源区，即应与该地区的地震构造研究的实际程度一致。

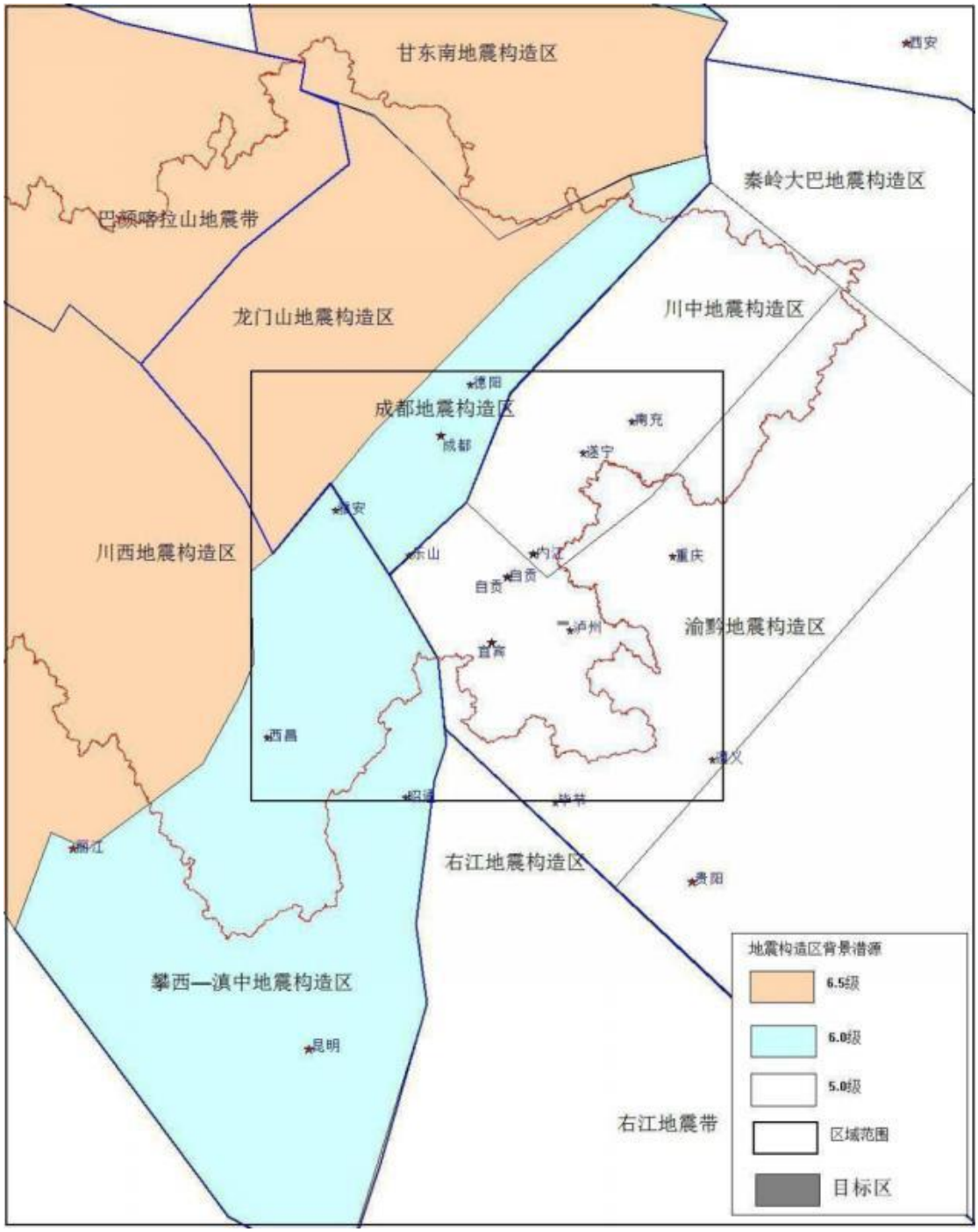


图 6.2- 1　地震构造区划分示意图

潜在震源区的划分原则（叶洪，1996）可以概述为以下两条：

（1）历史地震重复原则

是认为历史上发生过强震的地区或断裂段未来仍有可能发生类似震级的地震。历史地震资料表明，西南地区 6 级以上强震原地复发行为的比例是相当高的。因此，研究历史地震的地点和强度，结合现代强震活动及中小地震活动特点和规律，是划分潜在震源区的基础。

（2）地震构造类比原则

是指某地区或断裂（段）历史上虽未发生过历史强震或已发生的地震震级不能代表其最大潜在地震能力时，应与已发生过强震的地区或断裂（段）进行类比，如果具有相似的发震构造背景，则认为其具备发生类似强度地震的潜在能力。发震构造背景类似具体系指新构造、活动构造等的相似性，并以地球物理场地与地壳结构、地震活动水平作为参考。在考虑地震构造类比原则时，应充分注意古地震资料、地震破裂长度及同震位错量等基础资料。

6.2.4 潜在震源区的方向和范围

潜在震源区的方向和范围（即边界）直接影响着周围的地震危险性分析结果，因而具有十分重要的意义。潜在震源区的方向是指发震构造或地震断层的破裂方向，关系到地震危险性分析中的方向性函数的取值。研究区内绝大多数地震的等震线长轴走向是与活动构造的走向是一致的，因此潜在震源区的长轴方向一般代表了发震构造的走向。一些等边形式或近似等边形的潜在震源区则代表有两组发震构造或发震构造不清楚。

在本次工作中，主要遵循以下几条依据来确定潜在震源区的边界：

（1）充分考虑断裂带结构的差异及几何上的不连续性。断裂带结构的差异包括断裂的分叉、次级断裂及横向断裂交叉等；几何不连续是指断裂的弯曲、羽列等。以此为基础进行断裂分段，分段边界即为潜在震源区的边界。

（2）考虑历史地震地表破裂带的空间展布及中止位置来勾划潜在震源区，地表破裂的中止位置即为潜在震源区的边界。若地震地表破裂带在某处存在重叠时，则应进一步结合断裂带的结构差异及几何上的不连续性进行判别。

（3）对于历史上没有强震记载的地区或断裂段，可以根据古地震资料勾划潜在震源区。若无古地震资料，可以通过地震构造类比方法确定潜在震源区。

（4）通过大地震后余震分布的范围来确定潜在震源区。

（5）通过小地震密集分布的范围来确定潜在震源区。

（6）若发震构造出现分叉或一条断裂带内存在多条次级断裂，但目前尚难判定具体的发震构造时，那么潜在震源区应包括这些所有的分支断裂展布的范围。

（7）对于不同类型的断裂，潜在震源区边界确定的方法是：走滑断裂向两侧各扩展 5～10km；逆掩断裂下盘扩展 5km ，上盘扩展 20～30km；逆走滑断裂下盘扩展 5～10km，上盘扩展 10～20km；正倾滑或正走滑断裂下盘扩展 5～

10km，上盘扩展 10～20km。

（8）对于一些中强地震发生区，由于没有明确的发震构造标志，划分的潜在震源区往往较大，包括所有的中强地震分布范围。

6.2.5 潜在震源区的震级上限

潜在震源区的震级上限（Mu）是指该潜在震源区内可能发生的最大地震震级，未来发生超过这一震级地震的概率接近于 0 。震级上限是地震危险性概率分析的重要参数之一。

潜在震源区的震级上限主要是通过该潜在震源区的地震活动性和地震构造的活动程度来确定的。具体方法如下：

（1）对于已经发生过强震的潜在震源区，应对历史地震资料或仪器记录资料进行评价。通常有以下几种情况：①如一个地区的地震资料比较丰富，记载的时间超过两个或两个以上的地震活动期，则可以认为有史以来发生的最大地震震级可以代表该潜在震源区的震级上限；②如一个潜在震源区仅有一次地震（研究区内这种情况很多），通过地震构造类比，若已发生的地震震级可以代表该潜在震源区的最大地震，则以历史地震作为震级上限；如不能，则适应寻加一些，增加的量级从¼～1 级不等。

（2）若某地区或断裂段有确切的古地震遗迹，可以通过古地震资料（如地震地表破裂长度，同震位错及探槽揭示的古地震事件大小等）及经验统计关系对古地震事件的大小进行评估，并以此为参考作为潜在震源区的震级上限。

（3）应用地震构造类比法确定潜在震源区的震级上限时，可以分为几种情况：

①若某地区或断裂段没有详细的活动断裂资料，可以考虑该潜在震源区内的新构造运动的强度与方式、活动构造地貌的地表表现形式、深部构造条件等，与同一地震区、带内发生过的地区或断裂段类比，若地震构造环境相似，则以已发生过的强震震级作为该潜在震源区的震级上限；

②若该地区有详细的活动断裂资料，则可以通过地震地表破裂带的长度及最大同震位错量等与地震震级的经验统计关系估计该潜在震源区的震级上限。各震级档潜在震源区确定的依据如下：

8.0 级潜在震源区：为全新世强烈活动断裂，有极为醒目的位错标志，近代地震或古地震的地震地表破裂长度在 80km 以上，最大同震位错量在 5m 以上；

7.5 级潜在震源区：为全新世强烈活动断裂，有明显的位错标志，近代地震或古地震的地震地表破裂长度在 40～80km ，最大同震位错量在 2～5m；

7.0 级潜在震源区：为全新世活动断裂或晚更新世强活动断裂，有不甚清楚的位错标志，近代地震或古地震地表破裂长度在 30km 以内，最大同震位错量不超过 2m；

6.5 级潜在震源区：为晚更新世活动断裂，基本上没有位错标志，通常是通过上述的构造类比原则来确定的。

6.0 级及其以下潜在震源区：与活动断裂的关系不甚明确，亦是通过构造类比原则来确定震级上限。对于四川盆地而言，这类震级的潜在震源区往往与背斜构造的关系密切。

（4）综合判别方法：在潜在震源区震级上限的确定过程中，一些潜在震源区符合上述一种以上依据，此时采用各种评判方法进行综合判别，最后确定该潜在震源区的震级上限。

6.2.6 潜在震源区的划分方案

按照国家标准《工程场地地震安全性评价》（GB17741—2005）中对区域范围的要求，以目标区为中心、大于 150km 的范围作为区域研究区域。根据潜在震源区三级划分的原则，方法及其划分标志，结合地震地质条件、地震活动性特征、深部构造背景等，参考中国地震动区划图（GB18306-2015）的区带和潜源方案以及四川省活断层普查项目的最新工作成果，在区域范围相关的龙门山地震带、长江中游地震带、鲜水河-滇东地震带和右江地震带内共划分了 8 个地震构造区 34 个潜在震源区。（表 6.2-1）区域内主要潜在震源区划分图如图 6.2-2 所示。现将对目标区影响较大的潜在震源区划分分述如下：

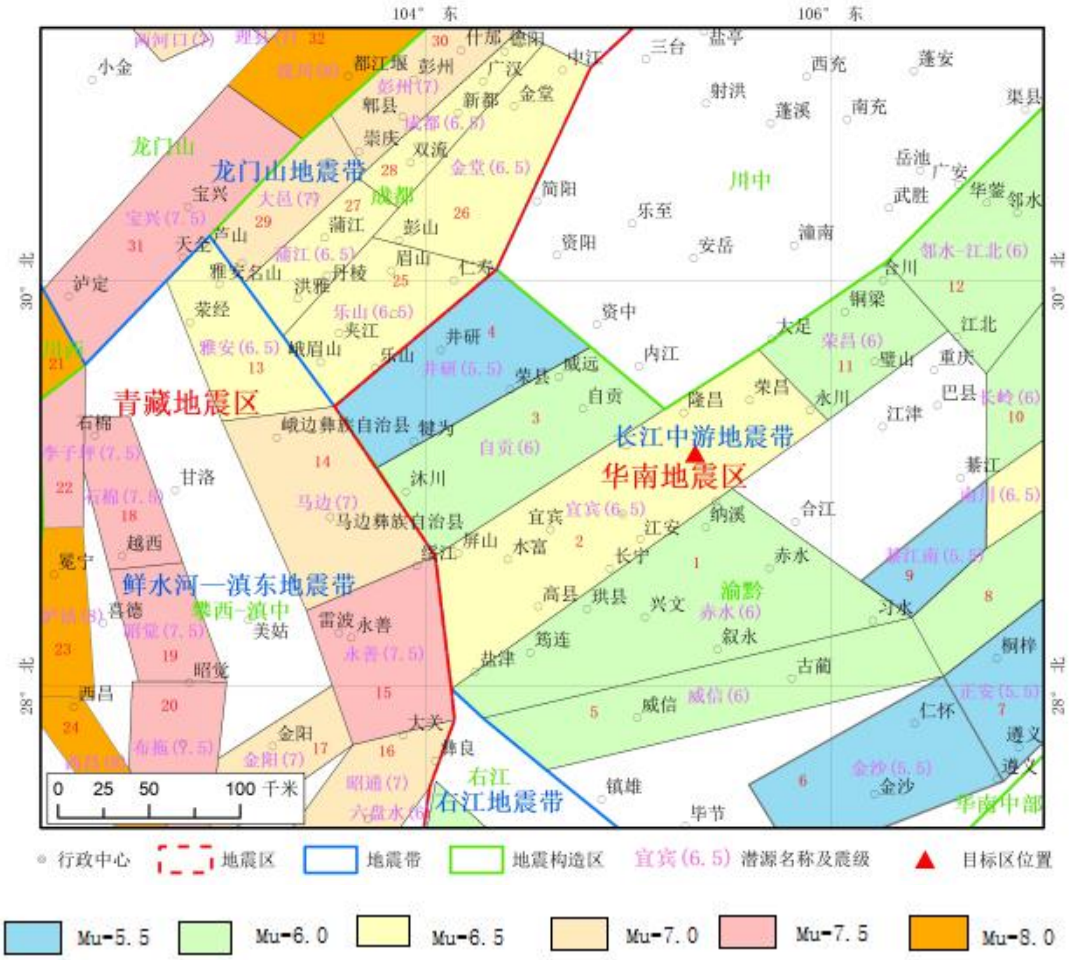


图 6.2-2　区域内主要潜在震源区划分图

1）赤水 6.0 级潜在震源区　1 号

该潜在震源区位于三级新构造分区分界线附近，五代图中震级上限为 5.5 级。该潜源涉及的区域地表虽未出现大规模的断裂构造，但中强地震发生较频繁，反映其深部构造的复杂性；尤其是 2019 年 6 月 17 日四川长宁 Ms6.0 地震发生在该潜源区内，本区存在发生中强地震的构造背景，其震级上限定修订为 6.0 级。

2）宜宾 6.5 级潜在震源区　2 号

该潜在震源区包括北东向华蓥山断裂带南段一部，华蓥山断裂带南段是由多条规模不等的断裂和与其相伴的多个褶皱呈右阶羽列组成。断裂长度多在数 km 至 30km，多分布在背斜轴部及其陡翼一侧，显压性特征，背斜端部多呈“S”弯曲。在宜宾、荣昌、高县及富顺等地沿断裂带取断层泥作热释光测龄，结果在 102200±6000-768700±61500a 之间。该潜在震源区在深部构造背景上正处在北东向华蓥山基底断裂与北西向峨眉-宜宾基底断裂的交汇部位。区内沿断裂带曾发生过多次中强地震，如公元前 26 年宜宾一带 5½级地震、1610 年高县 5½级地

震。2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震发生在该潜源内，近年来数十次 4.0-4.6 级地震发生在该潜源内，后续调整了地震空间分布函数。

综上认为，该潜在震源区具备发生中强地震的构造背景，震级上限为 6.5 级。

表 6.2-1　区域内主要潜在震源区划分一览表

编号	潜源区名称	震级上限	编号	潜源区名称	震级上限
1	赤水	6.0	17	金阳	7.0
2	宜宾	6.5	18	石棉	7.5
3	自贡	6.0	19	昭觉	7.5
4	井研	5.5	20	布拖	7.5
5	威信	6.0	21	康定	8.0
6	金沙	5.5	22	李子坪	7.5
7	正安	5.5	23	泸沽	8.0
8	双龙	6.0	24	西昌	8.0
9	綦江南	5.5	25	乐山	6.5
10	长岭	6.0	26	金堂	6.5
11	荣昌	6.0	27	蒲江	6.5
12	邻水—江北	6.0	28	成都	6.5
13	雅安	6.5	29	大邑	7.0
14	马边	7.0	30	彭州	6.5
15	永善	7.5	31	宝兴	7.5
16	昭通	6.5	32	汶川	8.0

3）自贡 6.0 级潜在震源区 3 号

该潜在震源区包括了自贡地区一组北东-北东东向和另一组北西向断裂，前者为自贡断裂，后者为墨林场断裂。该区中小地震主要发生在北东-北东东的断裂之上，沿北西向断层主要是一些弱震活动。该区历史上曾发生过多次中强地震，1896 年富顺 5¾级地震，1954 年自贡 5 级地震，1985 年自贡 4.8 级地震，1996 年宜宾永兴 5.4 级地震等。

2018 年以来，该潜源内发生了 2019 年 9 月 8 日内江市威远 5.4 级、2019 年 12 月 18 日内江市资中县 5.2 级 2 次中强地震，以多数次 4.0 至 4.9 级地震，该潜在震源区震级上限确定为 6.0 级。

近年虽然未发生突破五代图震级上限的地震，但是这些地震活动性的明显增强影响到潜源地震空间分布函数取值，直接采用五代图的地震活动性方案并不合

适，故对该潜源地震空间分布函数进行调整。

4）井研 5.5 级潜在震源区 4 号

潜在震源区包括了威远背斜的展布范围，在背斜的轴部或陡翼，发育有 2-3 条近于平行展布的逆断层，统称长山镇断裂。深部物探资料表明，该背斜是受深部滑脱构造控制的脱顶构造，具有断层扩展背斜的典型特征。该潜在震源区内虽未 4.7 级以上破坏性地震的历史记载，但小地震活动比较频繁，丛集于威远背斜轴一带，最大地震为 1979 年 4.2 级地震。与经常发生 5 级左右地震的自贡地区相比较，该背斜构造规模更大，且深部亦存在背斜核部盲冲断裂。因此根据构造类比原则，将该潜在震源区的震级上限定为 5.5 级。

5）马边 7.0 级潜在震源区 14 号

该潜在震源区包括走向呈北北西向的利店断裂、玛瑙断裂、中都断裂和近东西向的靛兰坝断裂的展布范围，沿上述断裂历史上曾发生过多次中、强震，如 1935 年 12 月马边 6 级地震，1936 年马边 6¾级群震、1971 年马边 5.9 级地震、1994 年沐川 5.7 级地震等。沿断裂带小震活动亦较频繁，形成了一条北北西向的地震密集条带。在深部构造背景上为布格重力异常由北北东向南东的转折部位及大足莫霍面隆起的西南边缘。

综上认为，该潜在震源区具备有发生强震的构造背景，其震级上限为 7.0 级。

6）永善 7.5 级潜在震源区 15 号

该潜在震源区地质构造复杂，有多组断裂在该区内交汇，主要有北北西、北东、南北向三组断裂构造。北北西向的断裂有中村-铜厂沟断裂、关村断裂，两条断裂近于平行展布，均属压性断层，断层长度分别为 38km 和 25km。根据测龄样品鉴定结果，中村-铜厂沟断裂和关村断裂最新一次活动时间分别为 75200±5900a 和 29800±2200a，均属晚更新世活动断裂。南北向断裂为猴子坝断裂，属逆走滑运动性质，长 36km，属全新世活动断裂。北东向断裂有莲峰断裂、赵家坪断裂、新田断裂等。上述三组断裂在永善以东长坪一带汇而不交，构成复杂的地质结构。

该潜在震源区除在猴子坝断裂上发生过 1216 年雷波马湖 7 级及 1974 年大关北 7.1 级两次大震外，历史上还多次发生过多次 5.0－6.9 级地震，其中 6.0－6.9 级地震 1 次，5.0－5.9 级地震 8 次。近年来，该区弱震活动亦十分频繁，形成弱震密集带。

该潜在震源区位于大足重力高西部的北西向重力梯级带上，在深部有北东向的华蓥山基底断裂及东西向的筠连-叙永深断裂在永善附近交汇。

综上认为，该潜在震源区具备有发生强震的构造背景，其震级上限为 7.5 级。

7）康定 8.0 级潜在震源区 21 号

康定潜在震源区处于鲜水河断裂带的南东段，由雅拉河断裂、色拉哈一康定断裂、折多塘断裂、磨西断裂所组成的地震断裂带，北西起于康定北西，南东止于田湾附近。该地震断裂带是在鲜水河断裂带南东段老断裂的基础上发生和发展起来的一条全新世活动断裂带，地震活动强烈，历史上曾发生过 2 次大震，即 1725 年康定 7 级地震和 1955 年康定折多塘 7.5 级地震，2 次大震沿断裂带产生了长达数十公里的地震形变带，主要由一系列张扭性地震断层斜列组合而成，直接错断了全新世早期的冰、洪积物。沿地震断裂带断错地貌特别发育，如地震断坎、边坡脊、地震槽、断塞塘等，断错水系呈明显的“肘状” 、“S”状弯曲，山脊错动也很显著，表现了明显的左旋走滑错动性质。断层平均滑动速率在 2±0.2～5.5±0.6mm/a。磨西断裂具有明显的全新世活动性，常见冲沟、洪积扇、河流阶地等断错地貌现象，全新世以来的平均水平滑动速率可达 8～10mm/a（闻学泽等，2001；周荣军等，2001），发生过 1786 年康定-泸定磨西间 7¾级地震，同震位错在跃进坪、磨西二台子、猛虎岗等地现今仍 清晰可辨，地震地表破裂覆盖了整条断裂的展布范围。二台子和猛虎岗两个探槽 亦揭示出该断裂曾发生过史前强震的地质记录，估计的强震发生间隔在 300～500a 。因此，根据历史地震重演原则将该潜在潜源区的震级上限定为 8.0 级。

8）泸沽 8.0 级潜在震源区 23 号

该潜在震源区主要包括了安宁河断层中段（冕宁—西昌段）展布范围。该断层段存在明显的全新世以来断裂活动的地质地貌证据，全新世以来平均水平滑动速率估值在 5.5mm/a 左右（闻学泽等，2000）。地球物理场在该地区表现出强烈的异常特征。历史上曾发生过 1536 年西昌北 7½级地震和 1952 年石龙 6¾级地震，其中 1536 年地震地表破裂展布于冕宁—西昌间，长约 80km ，最大同震位错达 4m（张成贵等，1998）。本次活动断层探查认为安宁河断裂南段几何结构分段位置并不在原有的泸沽 8.0 级潜源区北边界，而是向北到达干海子附近，因此本次工作认为宜将已有的泸沽 8.0 级潜在震源区北边界北扩至干海子。

9）西昌 8.0 级潜在震源区 24 号

该潜在震源区主要包括了则木河断裂北西段展布范围。则木河断裂第四纪以来以明显的水平走滑运动为主，存在明显的断错地貌现象，全新世以来的平均水平滑动速率在 5.8～8.6mm/a 左右（杜平山等，2000，He Honglin，1999）。该断裂历史上曾发生过多次 6 级以上地震，最大一次地震为 1850 年西昌、普格间 7½级地震，形成有长约 85km 的地震地表破裂带，最大同震位错量可达 8m（冯元保等，2000）。此外，该断裂带全新世以来还发生过多次古地震事件（杜平山等，2000）。因此，综合判定该潜在震源区的震级上限为 8.0 级。

10）乐山 6.5 级潜在震源区 25 号

该潜在震源区位于成都断陷区的东部边缘，系龙泉山断裂带的南段展布范围，其断裂特征和新活动性以及深部构造位置及地壳形变特征均与断裂中北段相同。该区内 1913 年 7 月 16 日于乐山附近曾发生过 1 次 5 级地震，近代小震活动亦十分频繁，形成一小震密集区。该潜在震源区与金堂潜在震源区构造上的主要差别在于西坡断裂已进入基岩山坡，未控制成都第四纪盆地边界，因而活动相对北段稍弱，但考虑到与北段具有类似的发震构造背景，因此综合判定该潜在震源区的震级上限为 6.5 级。

11）金堂 6.5 级潜在震源区 26 号

该潜在震源区位于成都断陷区的东部边缘，系龙泉山断裂带的中北段展布范围。龙泉山断裂带由东坡断裂和西坡断裂组成，为中更新世活动断裂，平面上此段呈北北东向斜列式展布。东坡断裂倾向北西，西坡断裂主要倾向南东，均具压扭性特征。深部地球物理特征表明，本区处在莫霍面彭山隆起的东部边缘；同时位于重力梯级带的转向部位以及航磁高异常值和梯级带上。

该潜在震源区内历史上曾发生过中强地震，如 1967 年 1 月 24 日仁寿大林场 5.5 级地震，近期小震活动亦较频繁。做为区域性断裂和新构造单元划分的边界，龙泉山断裂应具备发生中强地震的构造条件。

综上所述，本区具备发生中、强地震的地质构造背景，其震级上限确定为 6.5 级。

12）大邑 7.0 级潜在震源区 29 号

该潜在震源区主要包括了龙门山山前断裂隐伏于成都平原之下的段落，即大邑断裂展布的范围，该断裂控制了成都断陷的北西边界，具有比较明显的差异性活动。晚第四纪以来的活动亦有地质地貌的证据，如错切晚更新世地层等。近年

来中强地震比较频繁，如 1986 年邛崃 4.2 级震群、1989 年芦山、名山间 4.8 级地震等，小震活动亦很频繁。物探资料表明断裂切割深度影响到岩石圈，且倾角较陡，属于深大断裂。根据地震构造类比原则，将潜在震源区的震级上限确定为 7.0 级。

13）宝兴 7.5 级潜在震源区 31 号

该潜在震源区包括了北川— 映秀断裂、彭县—灌县断裂和茂汶—汶川断裂的中南段。该断裂段在大邑双河一带形成有坡中槽与断塞塘现象，估计断裂的水平和垂直滑动速率均在 1mm/a 左右。在宝兴五龙、灵关一带则在晚更新世河湖相地层中形成有新断层。历史上曾发生过 1327 年天全≥6 级和 1970 年大邑 6.2 级地震，小震亦沿断层密集成带分布。因此该断裂段具有发生强震的构造背景，确定其震级上限为 7.5 级。

2013 年 4 月 20 日芦山 7.0 级强烈地震即发生在该潜在震源区内部的前山断裂附近，主震震中距离潜源的东边界约 3km。如前所述，重新定位后的余震分布为北东方向，与龙门山断裂带本段走向一致，地震当天的余震几乎全部分布在宝兴 7.5 级潜在震源区内，截止 4 月 24 日 1 点的余震分布显示，余震主要分布在该潜在震源区内。余震深度剖面显示，主要位于 10km 以下，深度剖面显示为向西北倾斜的条带，与龙门山断裂带断层倾向西北相同，结合震区物探剖面解译结果，其发震构造应为龙门山断裂带的前山断裂上。因此，从这次 7 级地震震中位置与发震构造特点等方面分析， 目前该潜源的划分方案仍然是合适的。

14）汶川 8.0 级潜在震源区 32 号

该潜在震源区包括了茂汶-汶川断裂、北川-映秀断裂和彭县-灌县断裂北中段以及洛水-都江堰断裂的展布范围。这些断裂落在航卫片上线形影像清晰，多处可见断裂新活动形成断错冲沟、山脊、河流阶地及断塞塘等断错地貌现象，具有明显的全新世活动性，其中尤以北川-映秀断裂的新活动现象更为显著。 2008 年 5 月 12 日汶川 8.0 级大地震的主要发震断裂即为北川-映秀断裂，地震地表破裂从映秀南西始，向北东方向扩展至南坝东的石坎子，全长约 240km，最大同震垂直和水平位错分别达 6.5m 、4.9m 左右。此外，彭县-灌县断裂的向峨-桑枣段也同时发生了长约 90km 的同震破裂，最大垂直位错量在 3m 左右。因此，根据历史地震复演原则，将该潜在震源区的震级上限定为 8.0 级。

6.3 地震活动性参数的确定

我国自 1990 年以来开始采用 CPSHA 方法进行概率地震危险性分析，本次工作也采用 CPSHA 方法。假设地震活动符合泊松模型，地震活动的震级分布满足截断的指数分布（G-R 关系）。要求地震活动性参数反映地震活动在空间及时间上的规律性，更加细致地刻画地震活动时空不均匀性。

6.3.1 地震带地震活动性参数的确定

区域涉及青藏地震区的龙门山地震带与鲜水河—滇东地震带；华南地震区的右江地震带与长江中游地震带。根据地震危险性分析的技术思路，需要确定地震带的地震活动性参数，包括地震带的震级上限、起算震级、震级～频度关系中的 b 值、地震年平均发生率等。各地震带地震活动性参数的确定如下：

（1）震级上限 M_{UZ} 和起算震级 M_0 的确定

地震带震级上限 Muz 为发生概率趋于零的震级上限值。一般情况下，可用历史地震的最大震级，或者最大震级提高 0.5 级左右作为地震带的震级上限；也可以用构造规模类比确定震级上限。

龙门山地震带自公元前 193 年起就有地震记载，至 2023 年共记到 M≥4.7 级地震 241 次（已删除余震，震群型地震只取最大的 1～2 次），其中 8 级大震 3 次，7.0～7.9 级强震 10 次，6.0～6.9 级地震 35 次；带内目前的最大地震是 1654 年甘肃天水南 8 级地震、1879 年甘肃武都南 8 级地震和 2008 年四川汶川 8.0 级地震。

鲜水河—滇东地震带自公元 624 年起有地震史料记载，至 2023 年共记到≥4.7 级地震 761 次（已删除余震，震群型地震只取最大的 1～2 次），其中 8 级大震 1 次；7.0～7.9 级地震 30 次；6.0～6.9 级地震 99 次。本带目前的最大地震是 1833 年 9 月 6 日发生在云南嵩明的 8 级地震。

右江地震带自公元 1526 年贵州晴隆 5 级地震记载以来，至 2023 年共记到 6.0～6.9 级地震 1 次、5.0～5.9 级地震 28 次，带内目前的最大地震是 1875 年广西凌云北 6½级地震。该带地震活动相对较弱，综合确定其震级上限为 7.0 级。

长江中游地震带地震活动相对较弱，记载最早的一次地震是公元前 143 年湖北竹山西南的 5 级地震，至 2023 年已记到 M≥4.7 级地震 123 次（已删除余震，震群型地震只取最大的 1～2 次），其中 6.0～6.9 级地震 5 次，5.0～5.9 级地震

71 次；带内目前的最大地震是 1631 年发生在湖南常德的 6¾级地震。

起算震级 M0 系指对工程场地有破坏性影响的最小震级。由于区域范围内地震属浅源地震，一些 4.0 级地震也可能产生一定程度的破坏，故本报告将 M0 取为 4.0 级。

（2）b 值和地震年平均发生率 v4 的确定

b 值代表地震带内大小地震频数的比例关系，可由古登堡—里克特震级—频度关系确定：

$$\log10\ N = a-bM$$

式中，N 是大于等于 M 级地震的累计频次，a、b 是统计常数。从统计角度，相关系数、标准离差反映了 log10N 与 M 的相关性。

在地震危险性概率分析中，需要对地震带未来的地震活动水平进行预测，这种活动水平通常用地震带内 4 级以上地震的年平均发生率 v4 来表示。

GB18306-2015 中，在地震统计区地震资料和地震活动性特征分析的基础上，对地震统计区地震活动性参数进行统计计算。经过多方案结果分布特征的分析，以及统计结果对可靠地震样本点的控制情况，最终确定了地震统计区地震活动性参数。

考虑到五代图编制所使用的资料截止时间为 2010 年，项目组补充了 2010 年～2023 各地震带的地震目录，参照五代图的方法进行了 v4 与 b 值的计算，结果表明（图 6.3-1～图 6.3-4），五代图所确定的v4 与 b 值仍然保守，考虑到v4 与 b 值的重要性，本项目仍选用五代图确定的各地震带 v4 与 b 值的结果。见表 6.3-1。

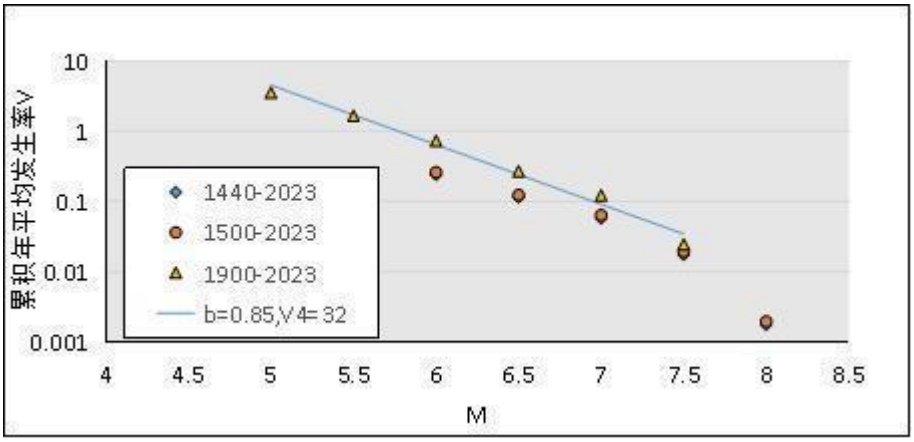


图 6.3-1　鲜水河－滇东地震带新增资料后各时段实际统计与理论结果对比

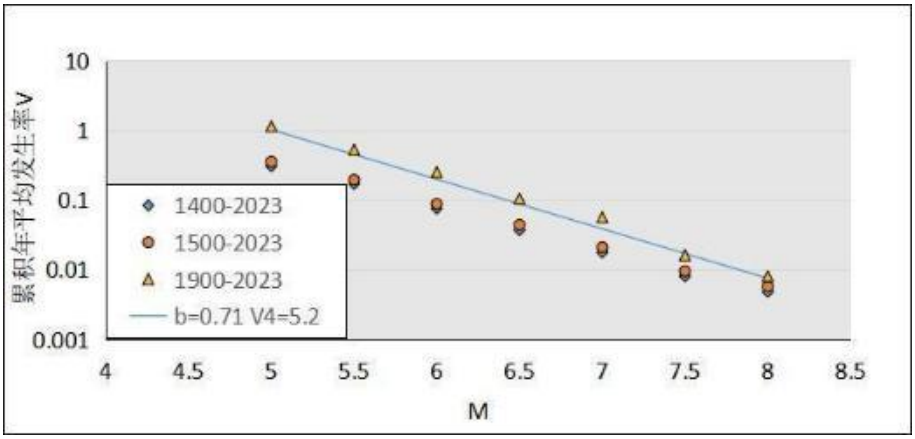


图 6.3-2　龙门山地震带新增资料后各时段实际统计与理论结果对比

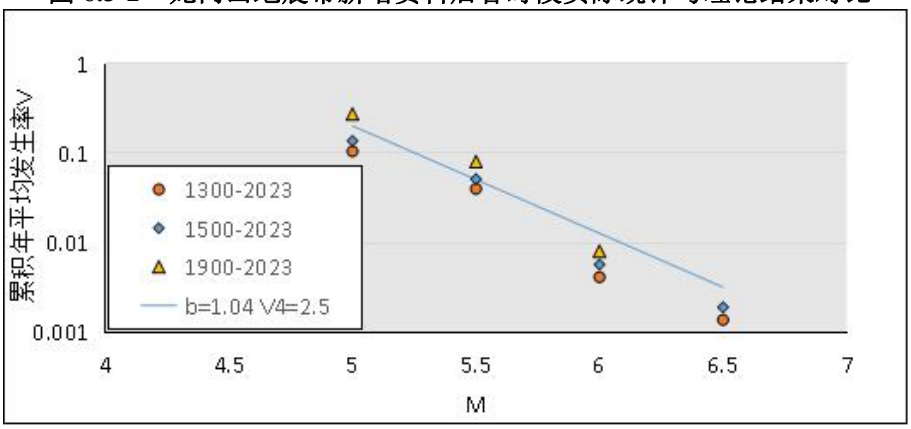


图 6.3-3　长江中游地震带新增资料后各时段实际统计与理论结果对比

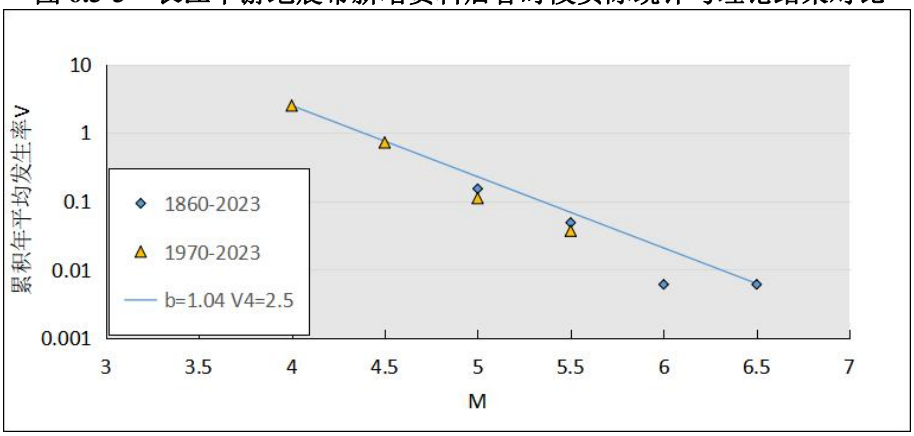


图 6.3-4　右江地震带新增资料后各时段实际统计与理论结果对比

表 6.3-1　地震统计区地震活动性参数表

地震区	地震统计区	编号	Mu	*b*	v_4
华南地震区	长江中游地震统计区	II-1	7.0	1.20	3.2
	右江地震统计区	II-3	7.0	1.04	2.5
青藏地震区	龙门山地震统计区	V2-1	8.0	0.71	5.2
	鲜水河—滇东地震统计区	V3-2	8.0	0.85	32

6.3.2 地震构造区背景潜源和潜在震源区地震活动性参数的确定

地震构造区背景潜源或潜在震源区地震活动性参数包括震级上限 Mu、地震破裂方向概率分布函数、空间分布函数 fi,mj。其中震级上限已在划分地震构造区、潜在震源区时依据地震活动性及地震构造特征确定。下面讨论其余参数的确定。

（1）地震破裂方向概率分布函数

引进该函数的目的，在于描述破裂方向或等震线长短轴取向的不确定性。我国大陆地震的等烈度线多呈椭圆形，地震烈度在长轴和短轴方向衰减特征不同，在不同地区地震主破裂有不同的优势方向。因此计算潜在地震对场地的影响时，必须确定其可能发生的破裂方向，并统计其发生概率。即需确定可能的长轴走向θ和相应的概率值 P。

通过对潜在震源区内等震线长短轴走向分布特征的研究，发现绝大多数等震线长轴走向与区域活动构造的走向一致。因此，潜在震源区的方向性函数主要根据活动构造的走向确定；对于某些具有共轭断层的潜在震源区，依照两个方向作用的大小，给予不同的概率值；对于活动构造走向不明确的地区，则采用等权分配的方法确定方向性函数，对于地震构造区背景源本报告采用等权分配的方法确定方向性函数。

（2）地震空间分布函数 fi ,mj

在地震危险性分析中，需要将地震带的地震年平均发生率分配给各潜在震源区和背景潜源，也就是确定各潜在震源区和背景潜源的各震级档的地震年平均发生率。在一个地震带中，第 i 个潜在震源区发生第 mj 档震级地震的年平均发生率 vi ,mj 可表示为：

$$V_{i,mj}=\frac{2V\times e^{-\beta(M_i-M_0)}\times sh(\frac{1}{2}\beta\Delta M)}{1-e^{-\beta(M_{uz}-M_0)}}\cdot f_{i,mj}\quad (M_0\leqslant M_j\leqslant M_u)$$

式中 v 为地震带的地震年平均发生率，β=b.ln10，M0，Muz 分别为起算震级和震级上限，Δm 为震级分档间隔，本报告取Δm=0.5 ，mj 是分档间隔中心所对应的震级，f i,mj 即为空间分布函数。潜在震源区和地震构造区背景潜源的地震空间分布函数的确定方法如下：

a)潜在震源区的空间分布函数

为了刻画地震活动与时间和空间的关系，反映当前对地震趋势的估计，对于

潜在震源区的空间分布函数采用多因子综合判定的方法，参考 GB18306-2015 中国地震动参数区划图的地震空间分布函数结果和四川省活断层普查项目的最新研究成果；考虑到近年来工程场地近场区中小地震频发和发生过多次 5 级左右地震的情况，对工程场地相关的井研、自贡、宜宾和赤水潜源的空间分布函数 4.0-4.9、5.0-5.4 档进行了调整，结果高于五代图；最终确定了区域主要潜在震源区的空间分布函数。

对于目标区所在的赤水 6.0 级潜在震源区，对于 4.0-5.4 低震级档空间分布函数则重点考虑潜源面积和近年中小地震发生频次，并考虑到整个长江地震带的低震级档空间分布函数协调，且不低估目标区低震级档地震发生风险来确定相应的地震空间分布函数。对于该潜源在震级区间 5.5-5.9 的空间分布函数的确定，采用构造类比原则，参考同一地震带内、震级上限相同的相邻的、威信 6.0 潜在震源区的 5.5-5.9 的空间分布函数（0.03114），确定赤水 6.0 级潜在震源区在震级区间 5.5-5.9 的空间分布函数为 0.03。

GB18306-2015 中国地震动参数区划图编制过程中，考虑了“抗倒塌”编图的需要，应用了多种地质方法估算断裂的大震级发生概率，并反映到了空间分布函数中。

潜在震源区的空间分布函数中高震级档复发间隔的估计对潜源所在及周边地区的地震危险性影响大。采用如下 4 种方法来确定：

（1）若某潜在震源区已经发生过多次（3 次及其以上）相似震级的历史地震，则以历史地震的实际复发间隔的平均值作为潜在震源区的高震级段复发间隔。西部地区由于有可靠记载的历史地震资料时段仅几百年，而大地震的复发间隔较长，多达数千年不等，因此基本上未采用该方法。

（2）若某潜在震源区仅有两次相似震级的历史地震，但古地震研究资料丰富，确定的古地震复发间隔可靠性较好，且古地震复发间隔与历史地震复发间隔基本一致，则以用历史地震和古地震复发间隔的平均值作为该潜在震源区高震级段的复发间隔。

（3）若某潜在震源区仅有一次或没有历史地震，但有古地震复发间隔数据，此时应利用断层滑动速率和经验关系式对发震断层的强震复发间隔进行估计，若评估结果与古地震研究结果基本一致，则用古地震复发间隔的平均值作为该潜在震源区高震级档的复发间隔；若两者相差较大，则取其值小者作为潜在震源区的

复发间隔，避免低估地震危险性。

（4）若某潜在震源区既无历史地震，又无古地震资料，则利用发震断层的滑动速率和经验关系式来估计潜在震源区的高震级段的复发间隔。

b)地震构造区背景潜源的空间分布函数

地震构造区背景潜源的地震活动性参数确定是否合理，对危险性分析计算有一定影响。本报告统计了对各工程场地地震危险性有一定影响的成都地震构造区、渝黔地震构造区、川中地震构造区和攀西—滇中地震构造区背景潜源空间分布函数，与潜在震源区空间分布函数一起参与地震危险性分析计算。对各工程场地地震危险性影响较大的潜在震源区空间分布函数和地震构造区背景潜源空间分布函数见下表 6.3-2。

表 6.3-2 主要潜在震源区 Mu、fi ,mj 和方向性函数

潜源编号	名称	4.0-4.9	5.0-5.4	5.5-5.9	6.0-6.4	6.5-6.9	7.0-7.4	≥7.5	Mu	θ1 (°)	P1	θ2 (°)	P2
1	赤水	0.0200	0.0400	0.03	0	0	0	0	6.0	20	1	0	0
2	宜宾	0.0200	0.0300	0.06385	0.16397	0	0	0	6.5	40	1	0	0
3	自贡	0.0150	0.0300	0.04946	0	0	0	0	6.0	30	1	0	0
5	威信	0.0049	0.0122	0.03114	0	0	0	0	6.0	15	1	0	0
14	马边	0.00725	0.00851	0.00847	0.00559	0.02345	0	0	7.0	120	1	0	0
15	永善	0.00763	0.00612	0.00641	0.00836	0.01341	0.01886	0	7.5	120	1	0	0
23	泸沽	0.01122	0.00825	0.00939	0.01224	0.01547	0.04753	0.15665	8.0	90	1	0	0
24	西昌	0.00855	0.00628	0.00871	0.00604	0.01263	0.036	0.1136	8.0	125	1	0	0
32	汶川	0.02523	0.01708	0.0163	0.02926	0.05302	0.0813	0.4055	8.0	45	1	0	0
渝黔地震构造区		0.1899	0	0	0	0	0	0	5.0	0	0.5	90	0.5

注：Mu 为潜在震源区的震级上限；θ1、θ2 为等震线长轴取向角度，P1 、P2 为相应分布概率。

6.4 地震动预测方程

本报告涉及的地震动预测方程，包括场地基岩水平峰值加速度预测方程和加速度反应谱预测方程。对于我国的大多数地区，根据已有的历史地震资料，其烈度预测方程一般不难取得，而由于强震观测记录的缺乏或数量有限，目前尚难由直接统计给出本地区基岩峰值加速度预测方程。因而，一般采用胡聿贤等人得出的转换方法（胡聿贤等，1984），利用工作区烈度预测方程和参考区的烈度、峰值加速度、反应谱预测方程，转换得到工作区的基岩峰值加速度和加速度反应谱预测方程。

本报告采用了《区域性地震安全性评价工作大纲（试行）》(中震防函〔2019〕21 号)推荐的的适用于中强区的地震动预测方程。该套预测方程采用中线映射原

则的转换方法，选择美国西部作为参考区，利用新近资料补充重新回归得到的我国分区地震烈度预测方程，以新回归的美国西部基岩场地自由地表水平向地震动参数、加速度反应谱预测方程作为参考区预测方程，得到了适合我国使用的分区地震动参数、加速度反应谱预测方程。

本项目基岩地震动水平向峰值加速度和反应谱预测方程采用分段线性模型，其形式为：

当$M \leq M_c$ 时，

$$\lg Y(M, R) = A1 + B1M - C\lg(R + D\exp(E*M)) + \varepsilon$$

当$M \geq M_c$ 时，

$$\lg Y(M, R) = A2 + B2M - C\lg(R + D\exp(E*M)) + \varepsilon$$

式中的参数如表 6.4-1~表 6.4-3 所示，ε为预测方程各周期的标准差。图 6.4-1 为水平向基岩峰值加速度衰减曲线。

该套地震动参数预测方程作为第五代区划部分最新研究成果，使用了美国 NGA 数据库的强震资料，采用能较好反映地震动饱和特性的分段线性模型，适用范围 Ms 5.0-7.0，距离 0-200km ，反应谱周期 T=0.04-10.0s。

目标区位于长江中游地震带内，适用中强区地震动衰减模型系数。且该套模型系数已应用于同处川东地区的《泸州泸天化化工园区区域性地震安全评价项目》工作中，同时结合目标区区域的地震环境，认为中强区地震预测方程对本项目是适用的。图 6.4-2 为 R 分别取 20km,100km 时，不同震级情况下中强区基岩水平向地震动反应谱衰减曲线图（长轴），图 6.4-3 为 R 分别取 20km,100km 时，不同震级情况下中强区基岩水平向地震动反应谱衰减曲线图（短轴）。

表 6.4-1　基岩地震动水平向峰值加速度 PGA（ gal）预测方程参数（椭圆模型）

地区	6.5 级以下		6.5 级以上		系 数			标准差
	A1	B1	A2	B2	C	D	E	ε
中 强 区 长 轴	2.452	0.499	3.808	0.290	2.092	2.802	0.295	0.245
中 强 区 短 轴	1.738	0.475	2.807	0.310	1.734	1.295	0.331	0.245

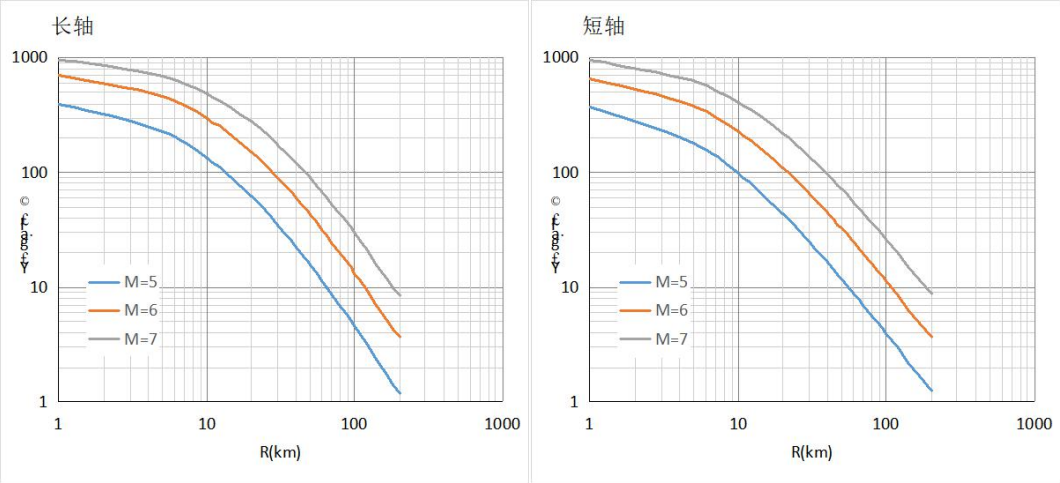


图 6.4-1　中强区基岩水平向加速度峰值衰减曲线

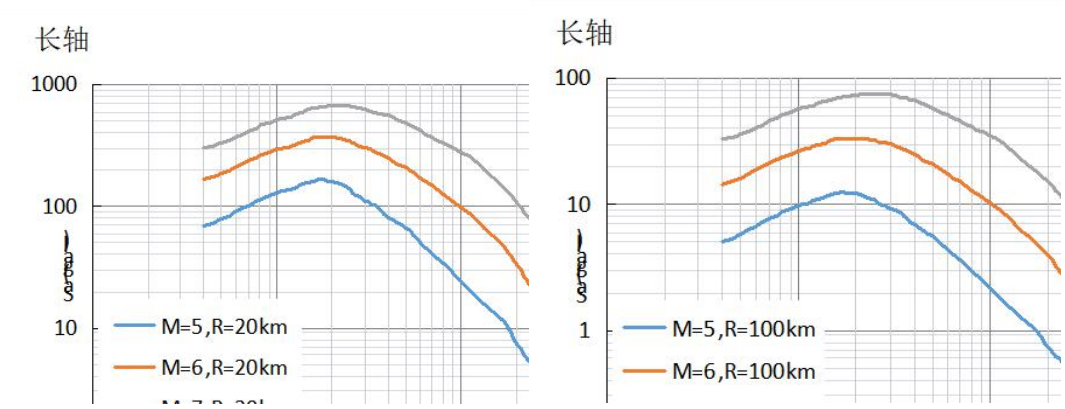


图 6.4-2 中强区基岩水平向地震动反应谱衰减曲线图（长轴，R=20km 左，R=100km 右）

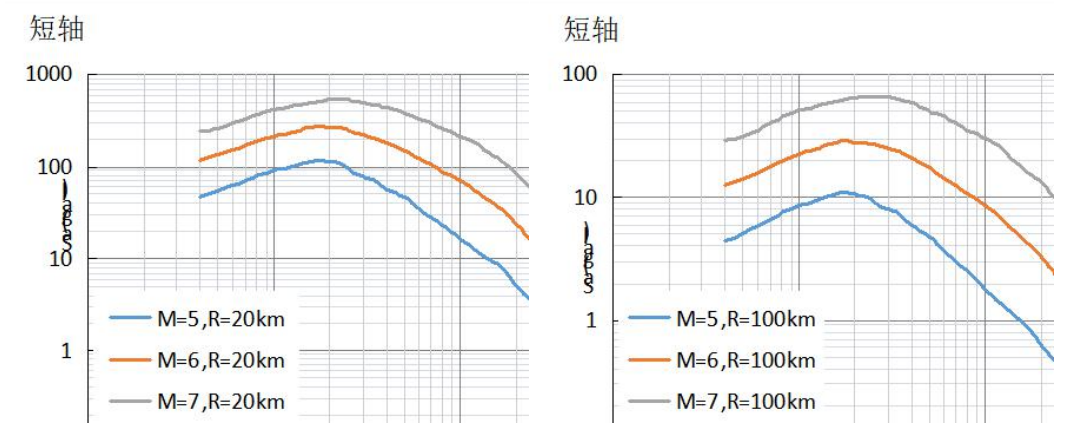


图 6.4-3　中强区基岩水平向地震动反应谱衰减曲线图（短轴，R=20km 左，R=100km 右）

表 6.4-1　基岩地震动反应谱的预测方程(长轴)

T	A_1	B_1	A_2	B_2	C	D	E	ε
0.04	2.482	0.499	3.792	0.298	2.086	2.802	0.295	0.261
0.05	2.626	0.482	3.948	0.279	2.083	2.802	0.295	0.266
0.07	2.738	0.479	4.004	0.283	2.072	2.802	0.295	0.265

0.10	2.877	0.469	4.087	0.283	2.063	2.802	0.295	0.261
0.12	2.917	0.466	4.058	0.290	2.060	2.802	0.295	0.261
0.16	3.032	0.461	4.244	0.275	2.071	2.802	0.295	0.261
0.20	2.992	0.468	3.969	0.318	2.072	2.802	0.295	0.261
0.24	2.760	0.500	3.883	0.327	2.056	2.802	0.295	0.264
0.26	2.535	0.523	3.772	0.332	2.020	2.802	0.295	0.270
0.30	2.320	0.544	3.632	0.341	1.985	2.802	0.295	0.274
0.34	2.298	0.542	3.523	0.353	1.986	2.802	0.295	0.273
0.40	1.958	0.591	3.430	0.364	1.989	2.802	0.295	0.274
0.50	1.822	0.600	3.240	0.382	1.988	2.802	0.295	0.276
0.60	1.478	0.638	3.009	0.401	1.965	2.802	0.295	0.283
0.80	1.135	0.669	2.771	0.417	1.953	2.802	0.295	0.291
1.00	0.720	0.716	2.525	0.438	1.938	2.802	0.295	0.300
1.20	0.515	0.735	2.305	0.459	1.940	2.802	0.295	0.315
1.50	0.416	0.727	2.055	0.475	1.935	2.802	0.295	0.330
1.70	0.318	0.727	1.838	0.492	1.924	2.802	0.295	0.338
2.00	-0.147	0.756	1.434	0.512	1.838	2.802	0.295	0.342
2.40	-0.255	0.737	0.987	0.546	1.804	2.802	0.295	0.343
3.00	-0.483	0.741	0.611	0.572	1.769	2.802	0.295	0.340
4.00	-0.704	0.729	0.087	0.607	1.735	2.802	0.295	0.336
5.00	-0.871	0.720	-0.349	0.640	1.706	2.802	0.295	0.333
6.00	-0.836	0.673	-0.836	0.673	1.660	2.802	0.295	0.333

表 6.4-2　基岩地震动加速度反应谱的预测方程(短轴)

T	A1	B1	A2	B2	C	D	E	ε
0.04	1.782	0.473	2.769	0.321	1.729	1.295	0.331	0.261
0.05	1.919	0.458	2.954	0.298	1.727	1.295	0.331	0.266
0.07	2.039	0.453	3.019	0.302	1.718	1.295	0.331	0.265
0.10	2.189	0.443	3.101	0.303	1.711	1.295	0.331	0.261
0.12	2.234	0.439	3.085	0.308	1.708	1.295	0.331	0.261
0.16	2.308	0.441	3.325	0.283	1.717	1.295	0.331	0.261
0.20	2.303	0.442	3.027	0.330	1.718	1.295	0.331	0.261
0.24	2.071	0.474	2.916	0.343	1.703	1.295	0.331	0.264
0.26	1.846	0.498	2.788	0.353	1.672	1.295	0.331	0.270

0.30	1.640	0.519	2.645	0.364	1.643	1.295	0.331	0.274
0.34	1.616	0.518	2.558	0.373	1.643	1.295	0.331	0.273
0.40	1.263	0.568	2.423	0.389	1.643	1.295	0.331	0.274
0.50	1.126	0.577	2.234	0.406	1.642	1.295	0.331	0.276
0.60	0.791	0.613	1.975	0.431	1.622	1.295	0.331	0.283
0.80	0.433	0.647	1.734	0.446	1.610	1.295	0.331	0.291
1.00	0.016	0.695	1.465	0.471	1.596	1.295	0.331	0.300
1.20	-0.183	0.712	1.221	0.495	1.597	1.295	0.331	0.315
1.50	-0.290	0.706	1.020	0.503	1.592	1.295	0.331	0.330
1.70	-0.375	0.704	0.819	0.519	1.583	1.295	0.331	0.338
2.00	-0.826	0.736	0.445	0.540	1.510	1.295	0.331	0.342
2.40	-0.915	0.716	0.069	0.564	1.481	1.295	0.331	0.343
3.00	-1.128	0.719	-0.276	0.587	1.451	1.295	0.331	0.340
4.00	-1.334	0.706	-0.739	0.614	1.423	1.295	0.331	0.336
5.00	-1.482	0.697	-1.121	0.641	1.398	1.295	0.331	0.333
6.00	-1.422	0.649	-1.422	0.649	1.361	1.295	0.331	0.333

6.5 地震危险性分析结果

根据前述章节的研究，在目标区周围大于 150km 的区域划分出龙门山地震带、鲜水河地震、右江地震带和长江中游地震带，包括 7 个地震构造区、32 个潜在震源区，分别统计求出了相应的地震活动性参数，采用适合于本地区的地震动预测方程，用中国地震学会推荐的地震危险性分析程序包和部分自编程序，计算得到了 17 个控制钻孔所在工程场地在不同超越概率水平下的基岩水平峰值加速度及基岩水平加速度反应谱。控制孔所在工程场地不同超越概率水平的基岩地震动峰值加速度结果见表 6.5-1，并用图 6.5-1～图 6.5-7 来表示。

表 6.5-1　控制孔所在工程场地不同超越概率水平的基岩地震动峰值加速度（gal）

孔号	50 年超越概率			100 年超越概率			
	63%	10%	2%	63%	10%	2%	1%
ZK1	18.8	66.1	137.9	28.6	91.6	178.7	226.1
ZK2	18.7	66.0	137.9	28.6	91.6	178.9	226.3
ZK3	18.7	66.0	137.9	28.5	91.6	179.0	226.5
ZK4	18.7	65.9	137.7	28.5	91.4	178.7	226.2
ZK5	18.7	65.9	137.7	28.5	91.5	178.6	226.0

ZK6	18.7	66.0	137.9	28.5	91.5	178.9	226.4
ZK7	18.8	66.0	137.9	28.6	91.6	179.0	226.5
ZK8	18.8	66.1	137.9	28.6	91.6	178.9	226.3
ZK9	18.8	66.0	137.7	28.6	91.5	178.5	225.9
ZK10	18.8	66.0	137.7	28.6	91.5	178.6	226.0
ZK11	18.8	66.1	137.9	28.7	91.7	178.7	226.0
ZK12	18.8	66.0	137.7	28.6	91.5	178.5	225.9
ZK13	18.8	66.0	137.9	28.6	91.6	178.9	226.3
ZK14	18.8	66.0	137.8	28.6	91.6	178.8	226.3
ZK15	18.7	65.9	137.7	28.6	91.5	178.7	226.2
ZK16	18.7	66.0	137.9	28.6	91.6	179.0	226.5
ZK17	18.8	66.1	137.9	28.7	91.6	178.9	226.3

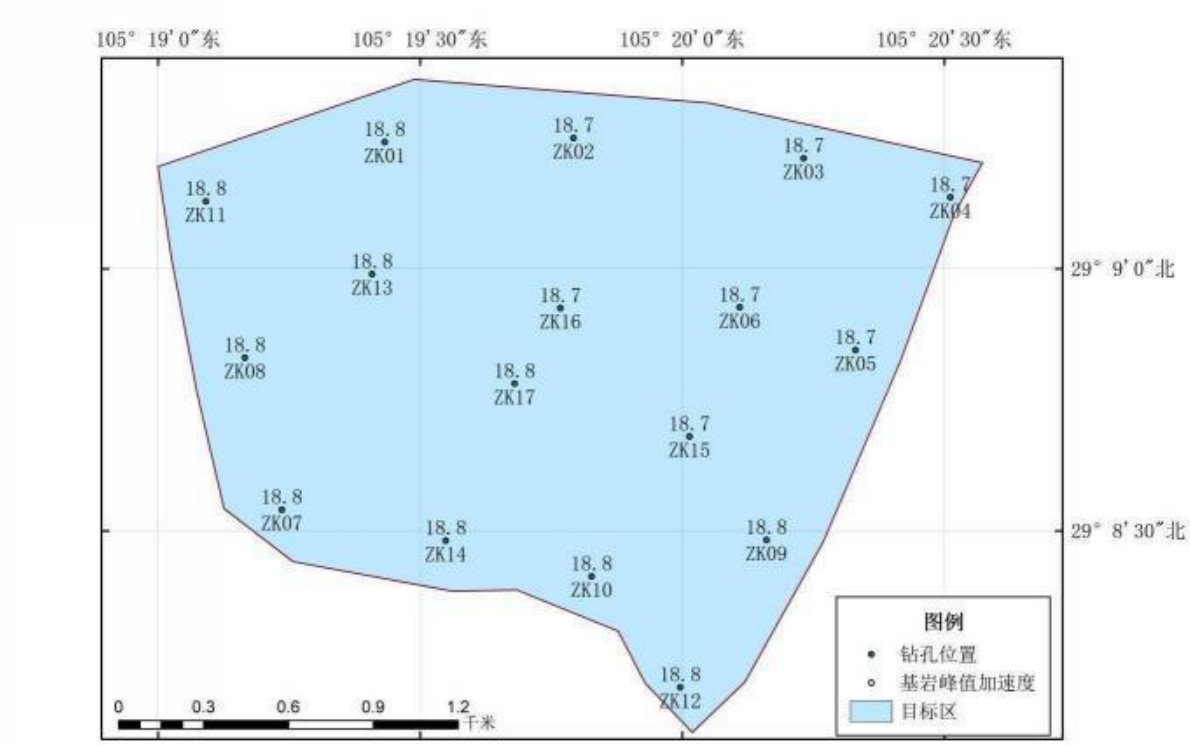


图 6.5- 1　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(50 年 63%)

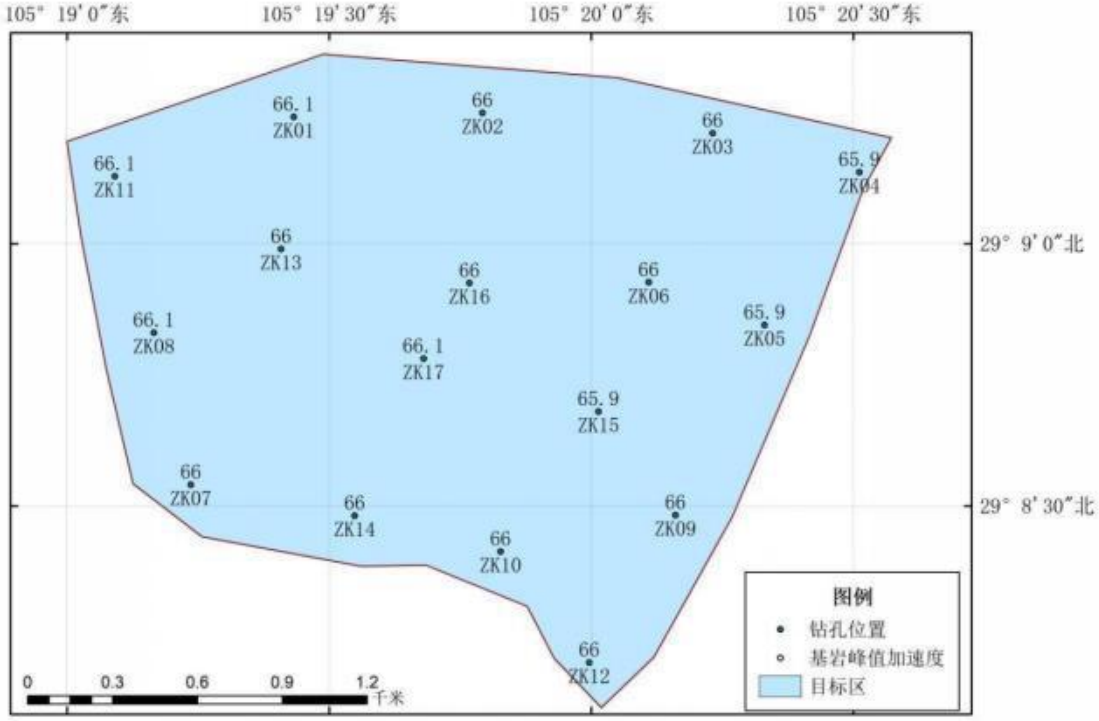


图 6.5- 2　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(50 年 10%)

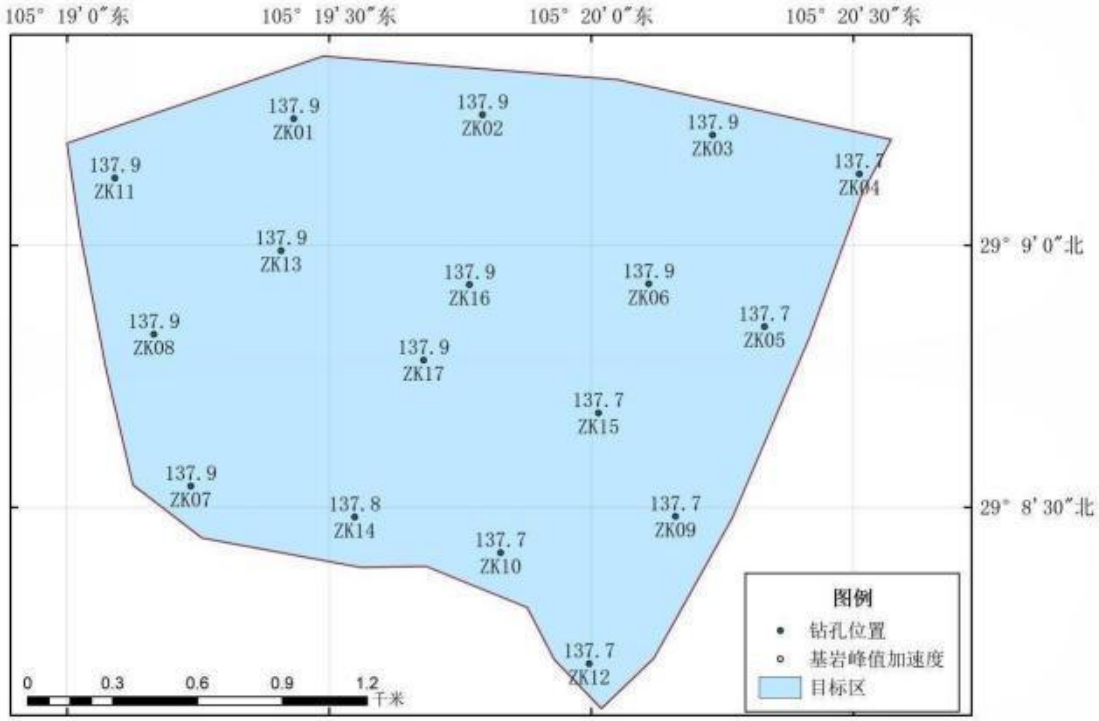


图 6.5- 3　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(50 年 2%)

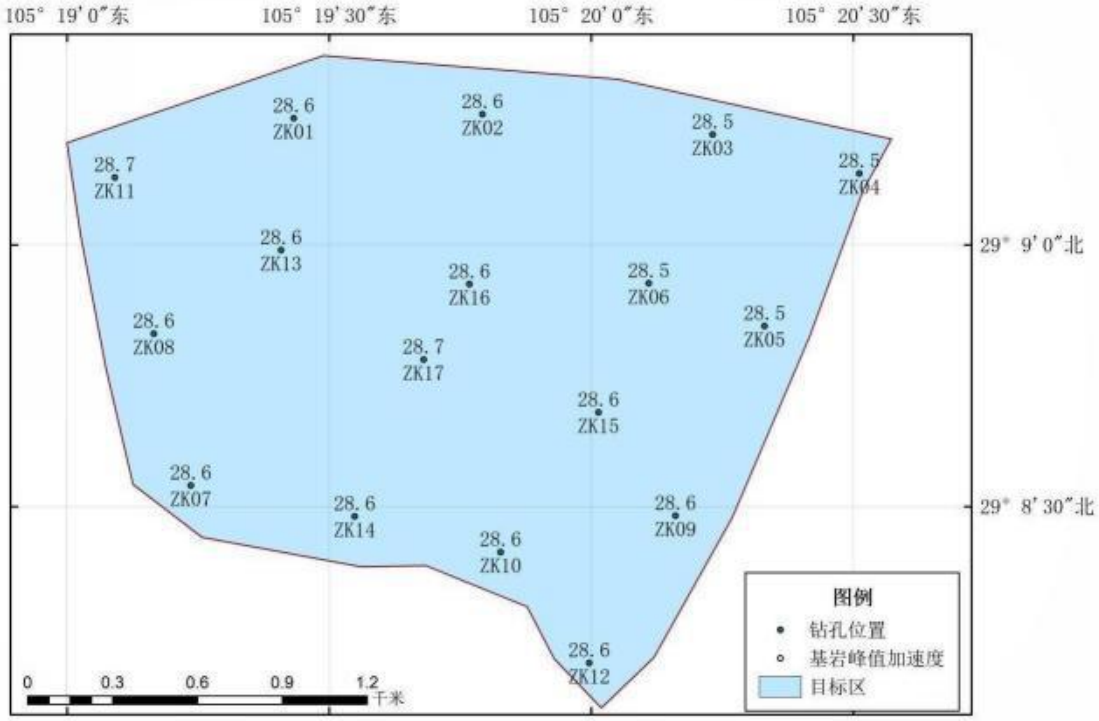


图 6.5- 4　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(100 年 63%)

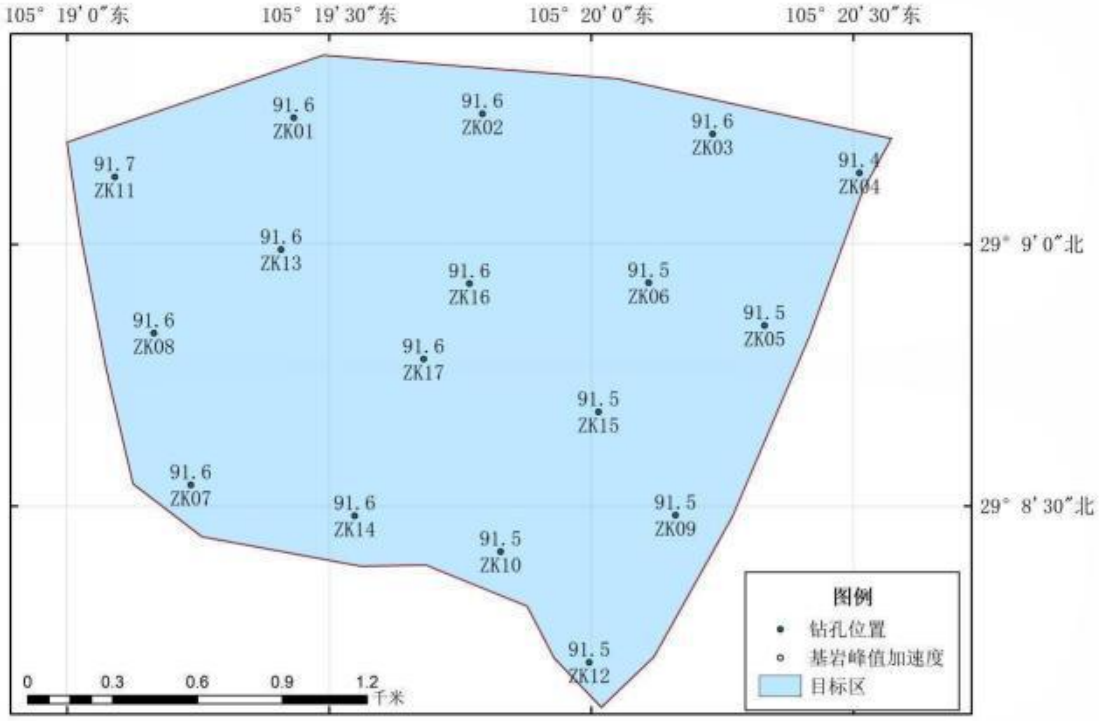


图 6.5- 5　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(100 年 10%)

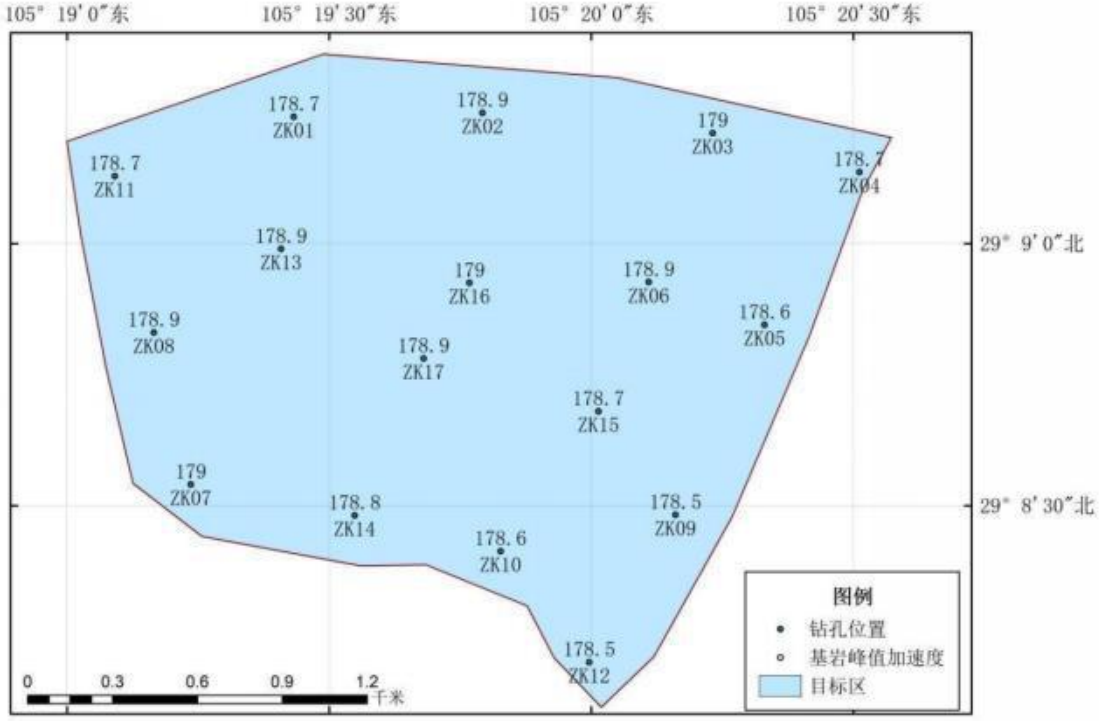


图 6.5- 6　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(100 年 2%)

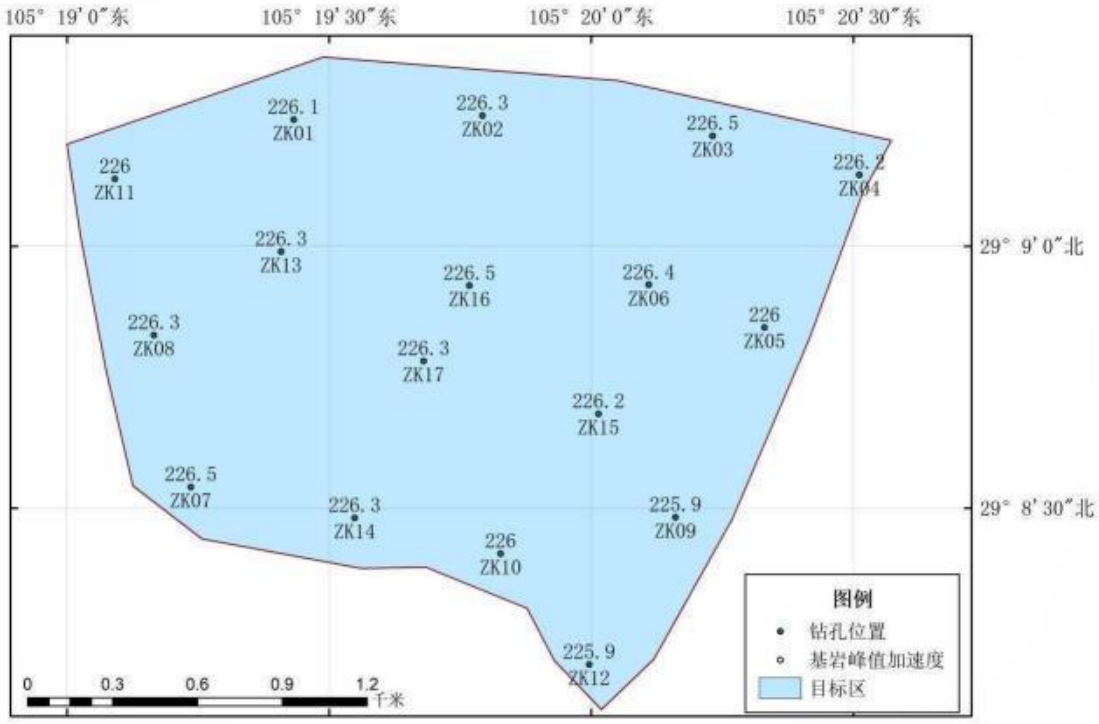


图 6.5- 7　目标区基岩地震动峰值加速度分布图(100 年 1%)

目标区 17 个控制性钻孔计算点的基岩加速度反应谱、基岩地震动峰加速度

值的超越概率见表 6.5-2～表 6.5-35 和工程场地超越概率、基岩水平加速度反应谱图见图 6.5-8～图 6.5-41。

表 6.5-2 ZK1 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.15e-03	3.64e-03	8.66e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.75e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.24e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.30e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.74e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-3 ZK1 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.77	66.07	137.85	28.61	91.62	178.71	226.06
0.02	18.77	66.07	137.85	28.61	91.62	178.71	226.06
0.04	21.37	75.47	158.30	32.50	104.95	205.87	261.93
0.05	24.77	87.29	181.44	37.73	120.64	236.09	300.01
0.07	31.81	112.56	232.73	48.89	155.11	301.12	380.36
0.10	40.57	142.71	291.26	62.50	195.92	375.91	471.79
0.12	43.61	152.31	308.54	67.12	208.59	399.06	497.88
0.16	51.05	179.47	364.12	78.75	245.59	469.10	589.42
0.20	51.27	178.26	362.79	78.41	244.07	468.23	589.13
0.24	47.10	162.24	342.34	71.09	225.78	447.94	570.52
0.26	44.03	146.73	318.88	65.17	206.39	421.72	538.72
0.30	41.28	133.52	294.05	60.27	188.37	391.31	499.65
0.34	38.37	123.12	272.57	55.81	173.84	363.35	468.68
0.40	32.82	103.99	237.19	47.37	148.09	319.47	412.82
0.50	27.20	85.90	197.64	39.12	122.54	266.55	346.89
0.60	23.02	72.24	164.89	33.28	102.33	225.30	297.76
0.80	16.72	52.25	121.40	24.04	74.59	166.57	220.87
1.00	13.83	42.93	98.37	20.10	60.50	136.02	181.19
1.20	11.61	36.66	81.94	17.30	50.92	113.74	152.22
1.50	9.37	30.80	64.57	14.38	42.00	87.75	117.31
1.70	8.19	27.42	57.00	12.44	37.42	76.38	101.03
2.00	6.86	22.84	44.93	10.28	30.82	58.01	71.86
2.40	5.34	18.11	35.37	7.89	24.32	45.36	57.18
3.00	3.89	12.05	23.43	5.80	16.38	29.97	37.85
4.00	2.65	7.28	13.34	3.81	9.37	16.59	20.02
5.00	2.27	6.28	11.14	3.21	7.98	14.15	17.06
6.00	2.00	4.58	7.16	3.00	5.53	8.61	10.37

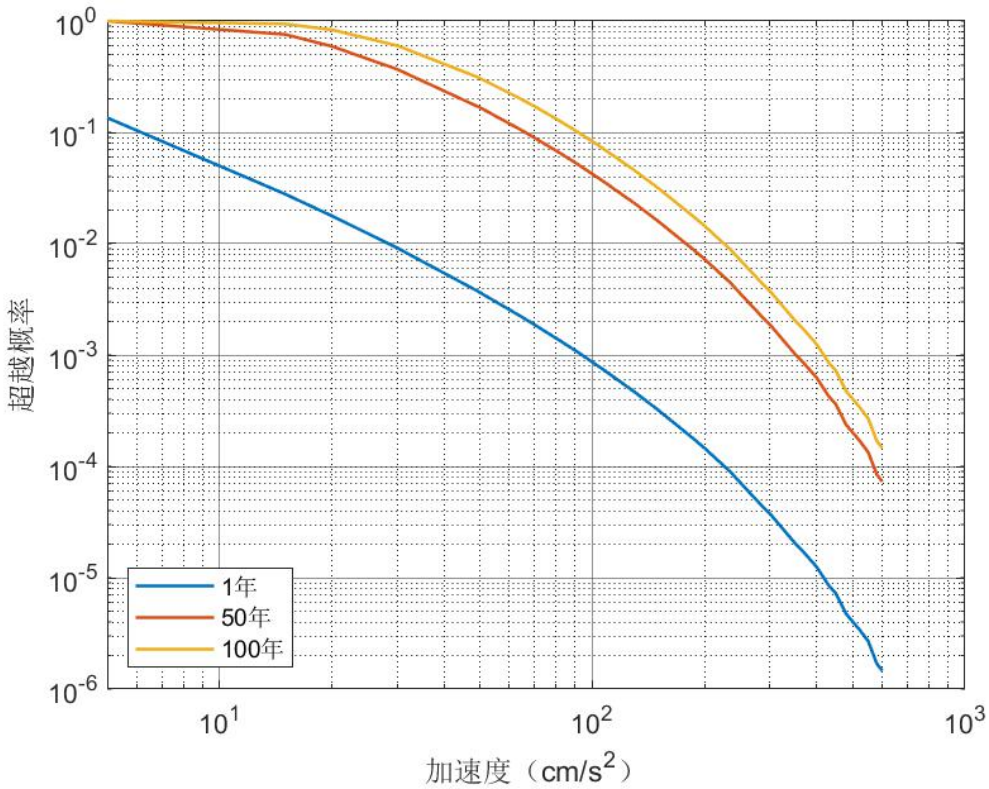


图 6.5-8 ZK1 基岩加速度峰值超越概率曲线

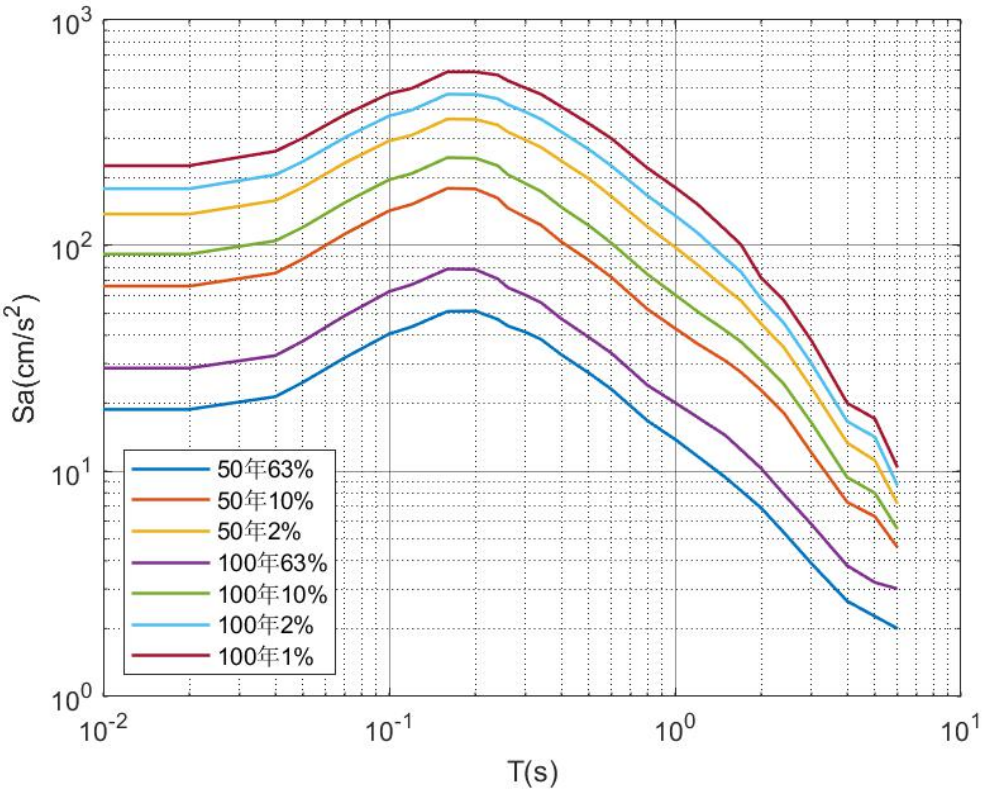


图 6.5-9 ZK1 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-4 ZK2 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.12e-03	3.63e-03	8.65e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.66e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.05e-01	8.29e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.27e-03

表 6.5-5 ZK2 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.73	65.98	137.88	28.56	91.55	178.89	226.35
0.02	18.73	65.98	137.88	28.56	91.55	178.89	226.35
0.04	21.32	75.38	158.28	32.44	104.89	205.89	261.87
0.05	24.73	87.21	181.29	37.68	120.54	235.95	299.97
0.07	31.75	112.46	232.49	48.81	154.99	300.85	379.95
0.10	40.50	142.68	291.19	62.43	195.91	375.66	471.64
0.12	43.54	152.31	308.53	67.08	208.57	398.87	497.76
0.16	50.97	179.47	364.38	78.66	245.59	469.53	589.93
0.20	51.18	178.29	363.20	78.34	244.25	468.80	589.70
0.24	47.00	162.12	342.57	70.97	225.74	448.11	570.82
0.26	43.91	146.56	318.79	65.01	206.26	421.68	538.74
0.30	41.20	133.42	293.80	60.19	188.25	391.12	499.49
0.34	38.20	122.92	272.29	55.61	173.67	362.88	468.59
0.40	32.77	103.91	237.08	47.30	147.99	319.32	412.55
0.50	27.14	85.79	196.56	39.04	122.43	266.56	346.92
0.60	22.95	72.05	164.65	33.19	102.11	224.95	297.26
0.80	16.69	52.16	121.32	23.98	74.49	166.44	220.65
1.00	13.81	42.88	98.30	20.07	60.43	135.94	181.05
1.20	11.58	36.56	81.79	17.25	50.79	113.62	152.12
1.50	9.35	30.74	64.42	14.35	41.90	86.59	117.13
1.70	8.17	27.39	56.97	12.42	37.39	76.34	100.96
2.00	6.84	22.81	44.90	10.26	30.79	57.98	71.84
2.40	5.33	18.08	35.33	7.87	24.28	45.34	57.18
3.00	3.87	12.02	23.40	5.78	16.35	29.93	37.82
4.00	2.65	7.28	13.34	3.80	9.37	16.59	20.01
5.00	2.27	6.28	11.12	3.20	7.97	14.12	17.04
6.00	2.00	4.58	7.15	3.00	5.52	8.61	10.36

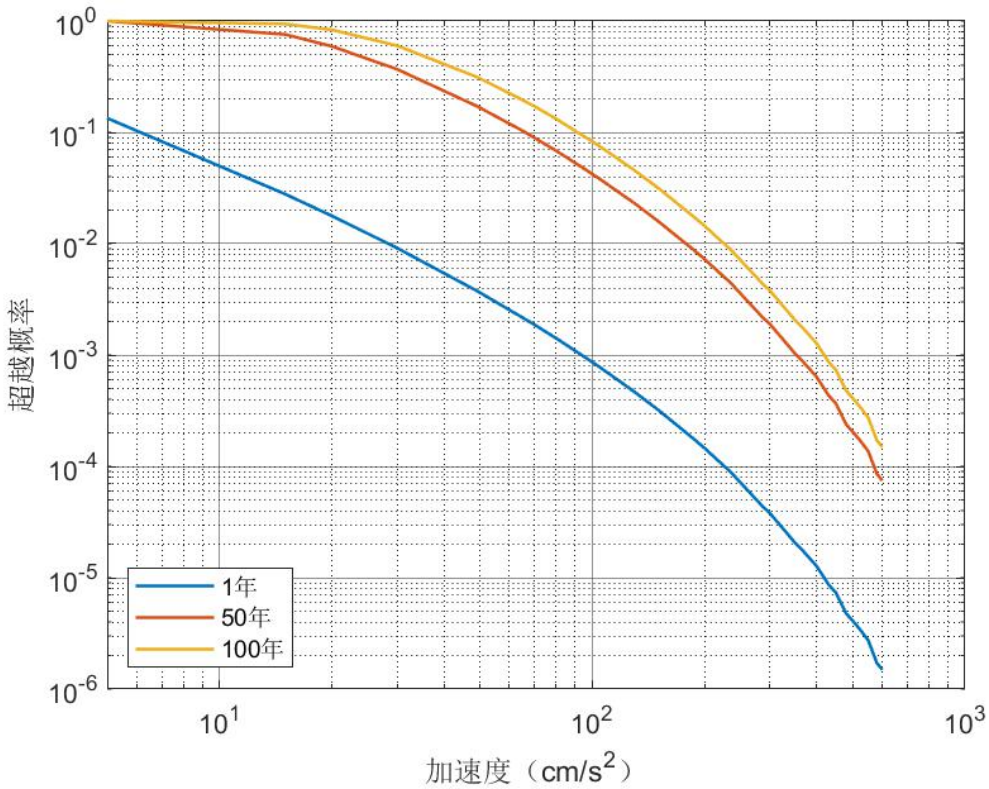


图 6.5-10 ZK2 基岩加速度峰值超越概率曲线

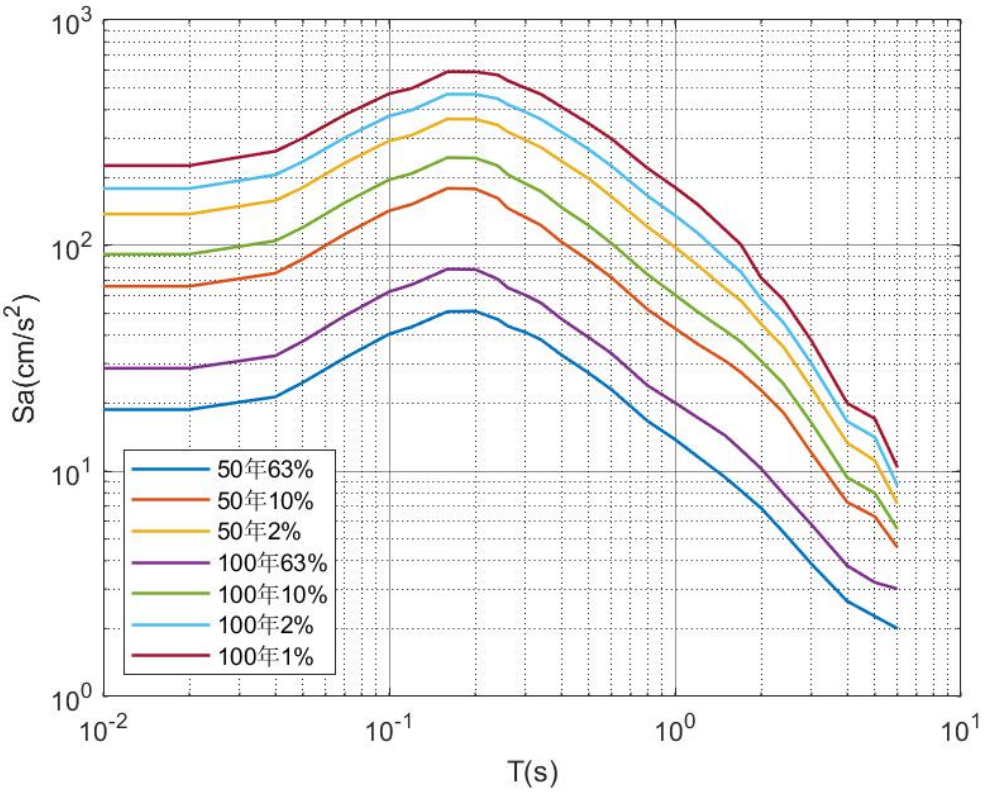


图 6.5-11 ZK2 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-6 ZK3 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.11e-03	3.63e-03	8.65e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.80e-05	2.07e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.67e-01	1.66e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.90e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.05e-01	8.29e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.79e-03	2.07e-03	1.27e-03

表 6.5-7 ZK3 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.70	65.97	137.93	28.53	91.55	179.01	226.47
0.02	18.70	65.97	137.93	28.53	91.55	179.01	226.47
0.04	21.27	75.38	158.30	32.39	104.90	205.91	261.89
0.05	24.68	87.19	181.36	37.63	120.54	236.12	300.28
0.07	31.69	112.38	232.39	48.75	154.88	300.58	379.69
0.10	40.42	142.59	290.83	62.35	195.72	375.23	470.86
0.12	43.44	152.17	308.28	66.96	208.40	398.78	497.27
0.16	50.86	179.39	364.45	78.55	245.56	469.51	589.97
0.20	51.08	178.25	363.29	78.25	244.24	468.81	589.72
0.24	46.91	162.11	342.69	70.89	225.77	448.31	571.08
0.26	43.78	146.41	318.58	64.87	206.13	421.36	538.59
0.30	41.09	133.22	293.47	60.03	188.00	390.66	499.04
0.34	38.07	122.74	271.83	55.46	173.43	362.29	467.88
0.40	32.70	103.76	236.96	47.21	147.83	319.24	412.34
0.50	27.08	85.68	196.54	38.96	122.33	266.64	347.03
0.60	22.89	71.84	164.44	33.09	101.89	224.76	296.74
0.80	16.65	52.05	121.23	23.93	74.36	166.26	220.28
1.00	13.78	42.81	98.21	20.04	60.34	135.88	180.89
1.20	11.52	36.31	81.44	17.16	50.45	113.35	151.89
1.50	9.33	30.66	64.27	14.31	41.80	87.47	116.96
1.70	8.16	27.35	56.91	12.39	37.35	76.27	100.85
2.00	6.83	22.76	44.83	10.23	30.73	57.93	71.79
2.40	5.32	18.04	35.27	7.86	24.23	45.27	57.12
3.00	3.86	12.01	23.39	5.78	16.33	29.92	37.83
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.37	16.58	20.01
5.00	2.27	6.27	11.11	3.20	7.96	14.11	17.03
6.00	2.00	4.58	7.14	3.01	5.51	8.59	10.33

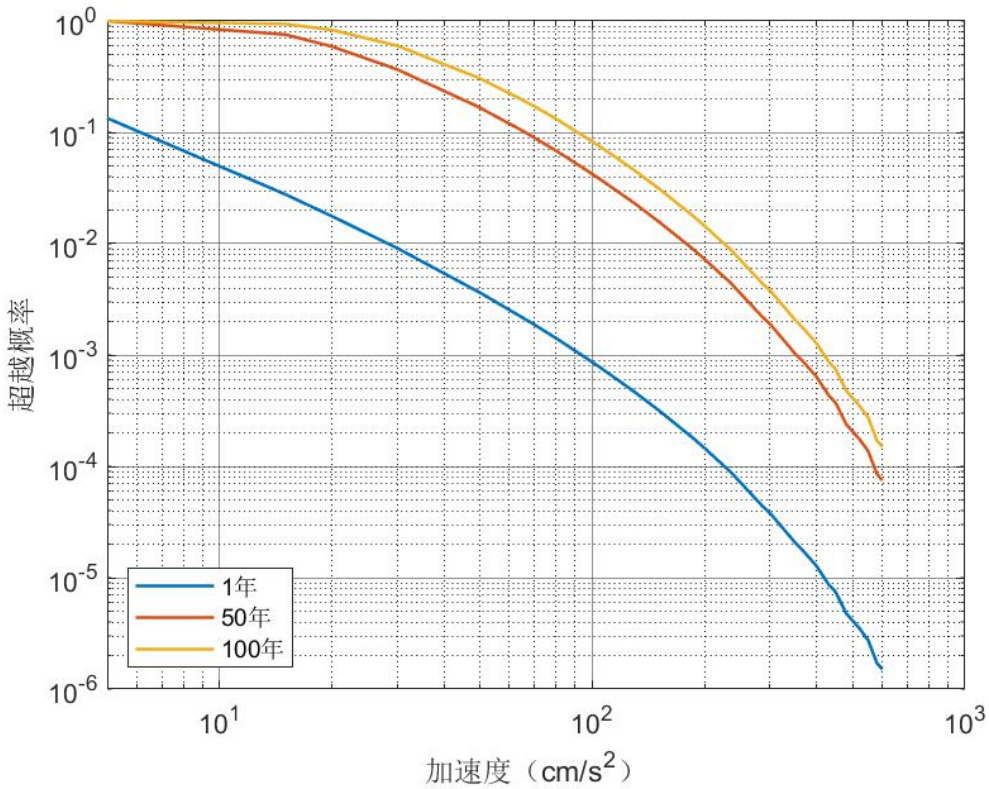


图 6.5-12 ZK3 基岩加速度峰值超越概率曲线

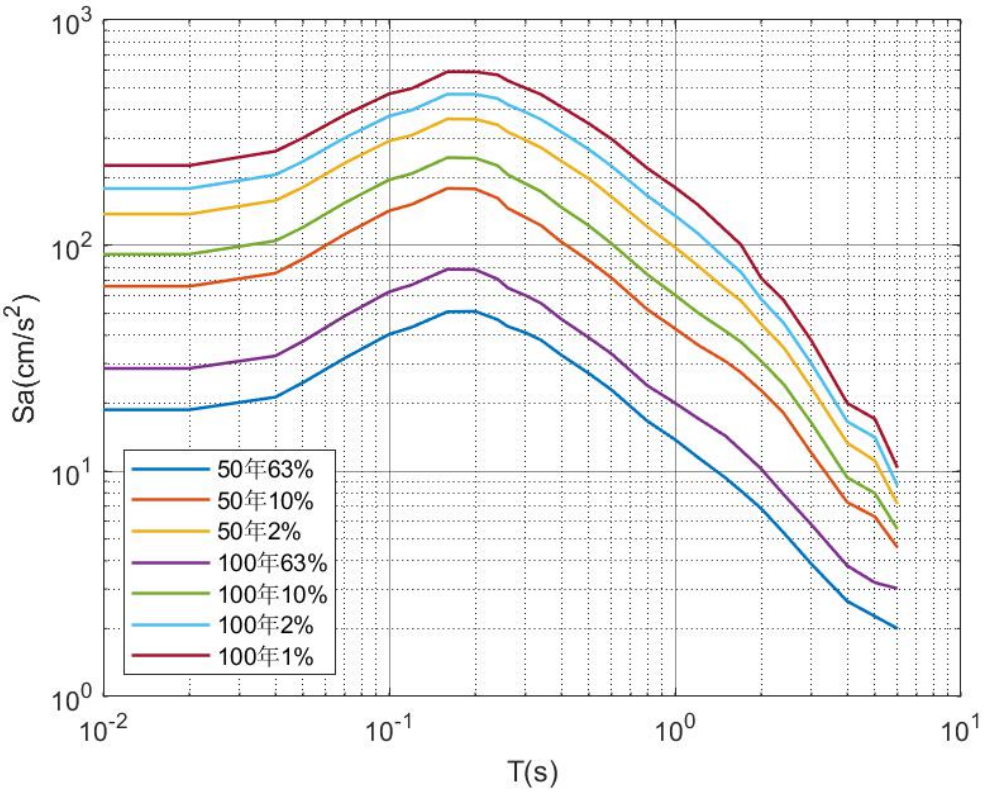


图 6.5-13 ZK3 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-8 ZK4 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.33e-01	9.09e-03	3.62e-03	8.62e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.26e-05
50 年	9.99e-01	3.67e-01	1.66e-01	4.22e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.30e-04
100 年	1.00e+00	5.99e-01	3.04e-01	8.26e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.26e-03

表 6.5-9 ZK4 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.68	65.87	137.72	28.50	91.42	178.72	226.19
0.02	18.68	65.87	137.72	28.50	91.42	178.72	226.19
0.04	21.25	75.29	158.20	32.36	104.80	205.81	261.81
0.05	24.64	87.11	181.21	36.58	120.45	235.87	299.94
0.07	31.65	112.32	232.36	48.69	154.87	300.83	379.94
0.10	40.36	142.50	291.04	62.28	195.74	375.59	471.58
0.12	43.40	152.19	308.42	66.94	208.44	398.81	497.73
0.16	50.77	179.22	364.10	78.45	245.34	469.29	589.80
0.20	51.00	178.04	362.86	78.13	243.96	468.51	589.55
0.24	46.85	161.94	342.35	70.81	225.54	447.93	570.60
0.26	43.73	146.35	318.58	64.80	206.06	421.48	538.58
0.30	40.86	133.12	293.60	59.80	187.99	390.94	499.38
0.34	37.85	122.58	272.11	55.21	173.41	362.77	468.49
0.40	32.65	103.66	236.77	47.14	147.72	319.05	412.25
0.50	26.89	85.53	197.41	38.76	122.23	266.44	346.83
0.60	22.83	71.69	164.39	33.00	101.76	224.80	297.24
0.80	16.62	51.98	121.19	23.88	74.30	166.34	220.58
1.00	13.76	42.73	98.11	20.01	60.24	135.79	180.94
1.20	11.50	36.29	81.47	17.14	50.44	113.40	152.00
1.50	9.32	30.63	64.24	14.30	41.77	87.42	117.01
1.70	8.15	27.31	56.86	12.37	37.30	76.23	100.83
2.00	6.82	22.75	44.82	10.22	30.72	57.91	71.76
2.40	5.31	18.00	35.22	7.84	24.18	45.20	57.06
3.00	3.86	11.99	23.34	5.77	16.31	29.86	37.74
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.36	16.58	20.00
5.00	2.27	6.26	11.10	3.20	7.95	14.10	17.02
6.00	2.00	4.58	7.12	3.03	5.51	8.56	10.29

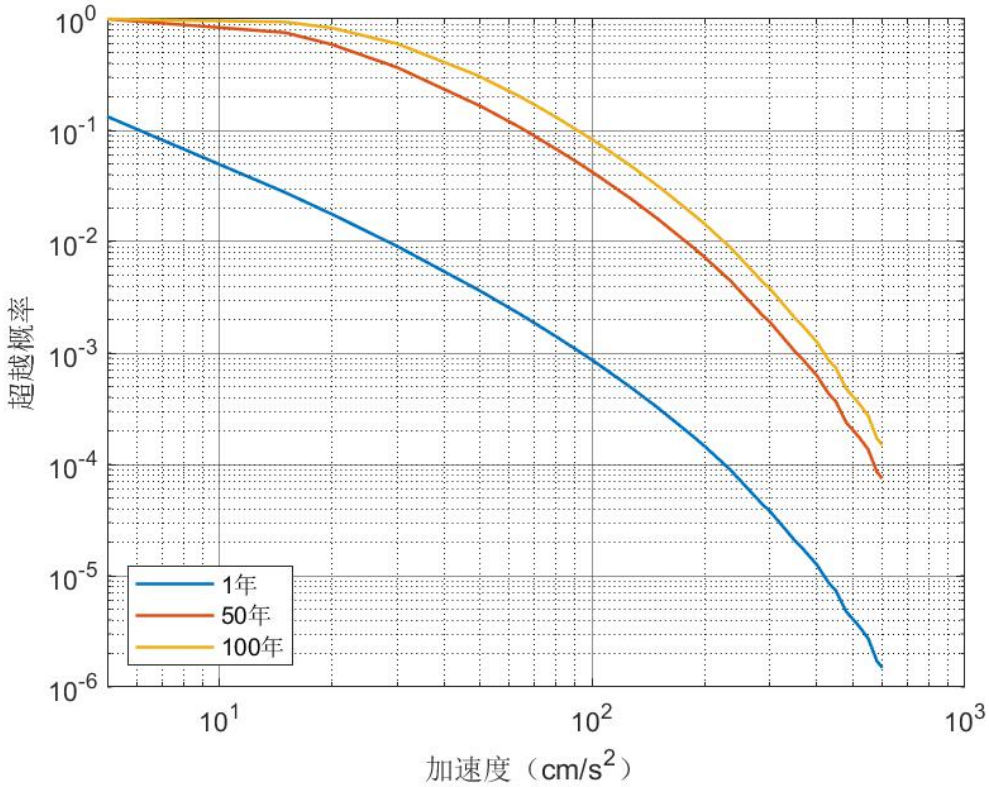


图 6.5-14 ZK4 基岩加速度峰值超越概率曲线

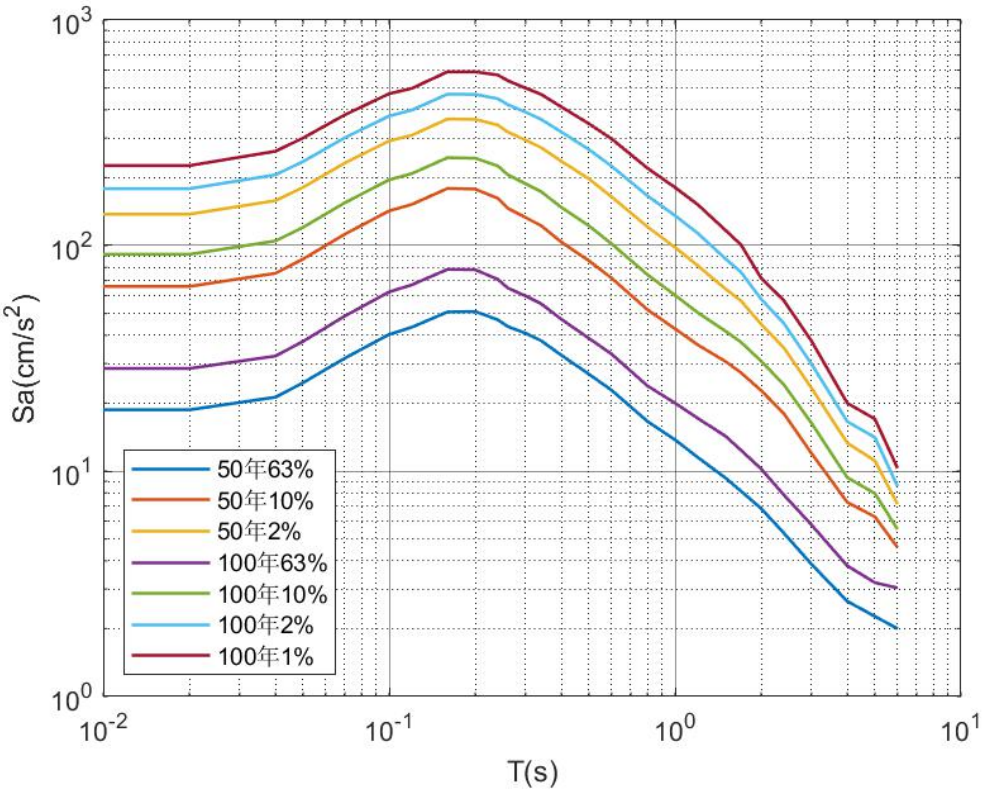


图 6.5-15 ZK4 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-10 ZK5 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.12e-03	3.63e-03	8.63e-04	3.21e-04	1.46e-04	3.75e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.66e-01	4.23e-02	1.59e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.05e-01	8.27e-02	3.16e-02	1.45e-02	3.74e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-11 ZK5 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.72	65.95	137.70	28.55	91.48	178.57	225.98
0.02	18.72	65.95	137.70	28.55	91.48	178.57	225.98
0.04	21.29	75.36	158.18	32.41	104.83	205.74	261.79
0.05	24.68	87.18	181.28	37.63	120.52	235.94	299.90
0.07	31.69	112.40	232.50	48.75	154.94	300.95	380.17
0.10	40.41	142.53	291.07	62.33	195.74	375.71	471.65
0.12	43.45	152.15	308.33	66.96	208.39	398.81	497.67
0.16	50.85	179.26	363.94	78.54	245.39	468.93	589.38
0.20	51.06	178.06	362.63	78.19	243.89	468.11	589.13
0.24	46.93	162.09	342.18	70.93	225.62	447.78	570.28
0.26	43.80	146.46	318.58	64.90	206.14	421.43	538.50
0.30	40.93	133.22	293.80	59.89	188.10	391.08	499.47
0.34	37.92	122.73	272.31	55.31	173.56	363.09	468.61
0.40	32.51	103.60	236.84	46.97	147.77	319.16	412.42
0.50	26.92	85.63	197.47	38.81	122.33	266.40	346.76
0.60	22.89	71.89	164.56	33.10	101.94	224.99	297.49
0.80	16.65	52.05	121.24	23.92	74.38	166.43	220.72
1.00	13.77	42.77	98.14	20.03	60.29	135.81	180.98
1.20	11.52	36.33	81.51	17.16	50.48	113.43	152.01
1.50	9.33	30.66	64.31	14.31	41.80	86.51	117.11
1.70	8.15	27.33	56.89	12.38	37.33	76.25	100.85
2.00	6.82	22.75	44.81	10.22	30.71	57.90	71.73
2.40	5.32	18.02	35.23	7.85	24.20	45.20	57.04
3.00	3.86	11.98	23.33	5.77	16.30	29.84	37.72
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.36	16.58	20.00
5.00	2.27	6.27	11.10	3.20	7.96	14.10	17.02
6.00	2.00	4.58	7.13	3.02	5.51	8.57	10.30

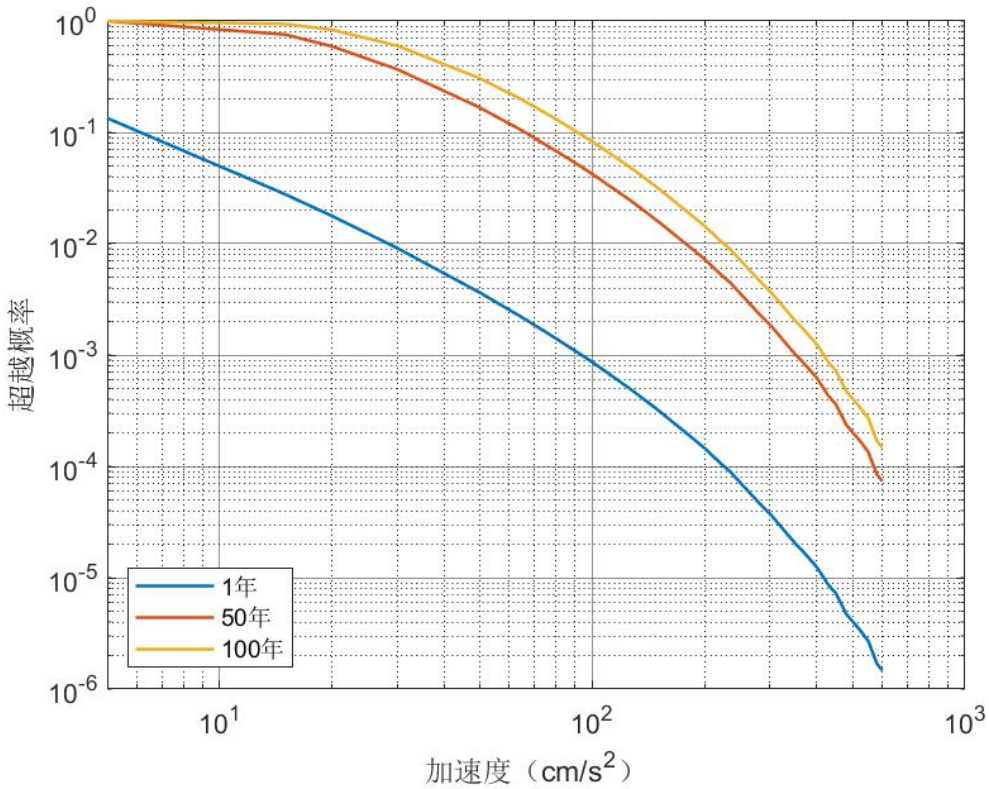


图 6.5-16 ZK5 基岩加速度峰值超越概率曲线

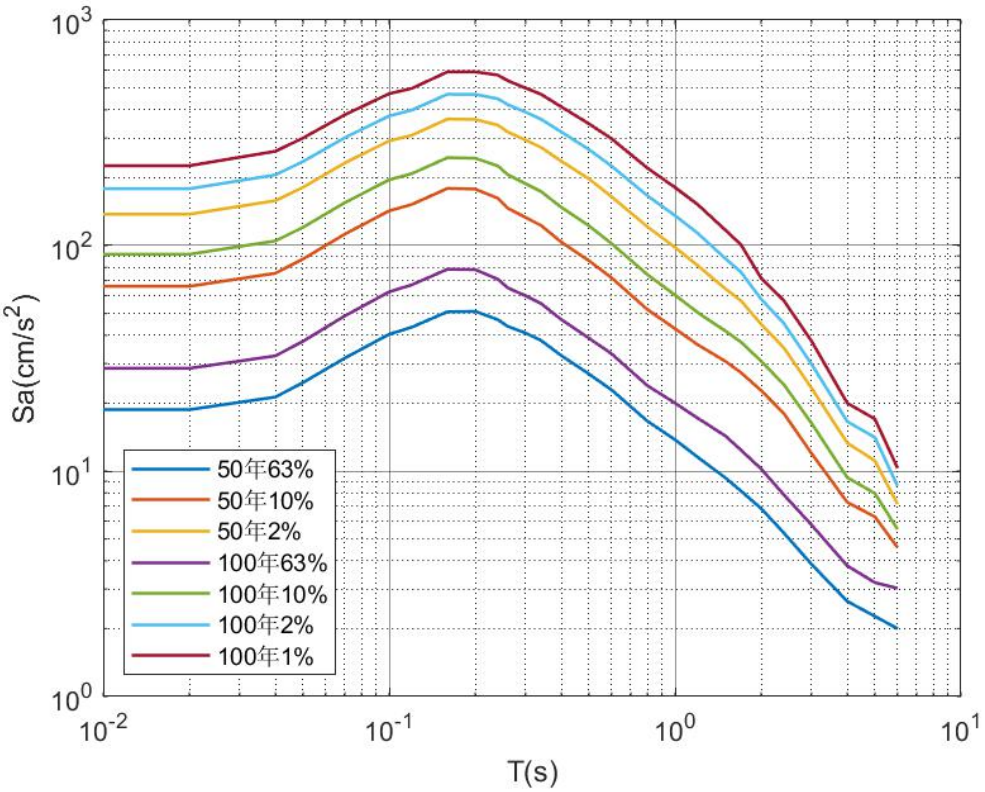


图 6.5-17 ZK5 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-12 ZK6 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.12e-03	3.63e-03	8.64e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.79e-05	2.06e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.66e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.05e-01	8.28e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.78e-03	2.06e-03	1.27e-03

表 6.5-13 ZK6 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.72	65.96	137.86	28.55	91.52	178.90	226.37
0.02	18.72	65.96	137.86	28.55	91.52	178.90	226.37
0.04	21.31	75.37	158.26	32.42	104.87	205.86	261.81
0.05	24.69	87.19	181.25	37.65	120.51	235.93	300.06
0.07	31.71	112.39	232.37	48.77	154.90	300.65	379.75
0.10	40.46	142.64	291.08	62.40	195.85	375.48	471.43
0.12	43.50	152.27	308.44	67.05	208.51	398.75	497.62
0.16	50.91	179.44	364.35	78.61	245.56	469.38	589.78
0.20	51.12	178.31	363.28	78.31	244.31	468.72	589.55
0.24	46.95	162.13	342.59	70.93	225.75	448.11	570.85
0.26	43.85	146.46	318.64	64.95	206.15	421.49	538.59
0.30	40.98	133.33	293.68	59.96	188.18	390.95	499.31
0.34	37.97	122.77	272.11	55.36	173.55	362.64	468.35
0.40	32.74	103.86	236.94	47.26	147.92	319.17	412.19
0.50	27.10	85.73	196.51	39.00	122.37	266.54	346.87
0.60	22.92	71.97	164.53	33.14	102.02	224.79	296.84
0.80	16.67	52.10	121.28	23.95	74.42	166.37	220.51
1.00	13.79	42.83	98.24	20.05	60.37	135.89	180.99
1.20	11.53	36.34	81.50	17.17	50.49	113.42	151.99
1.50	9.34	30.68	64.31	14.32	41.82	87.48	117.03
1.70	8.16	27.36	56.93	12.40	37.36	76.29	100.88
2.00	6.83	22.76	44.84	10.23	30.74	57.93	71.78
2.40	5.32	18.05	35.29	7.86	24.25	45.29	57.13
3.00	3.87	12.00	23.38	5.78	16.32	29.90	37.80
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.37	16.58	20.01
5.00	2.27	6.27	11.11	3.20	7.96	14.11	17.03
6.00	2.00	4.58	7.14	3.01	5.52	8.59	10.34

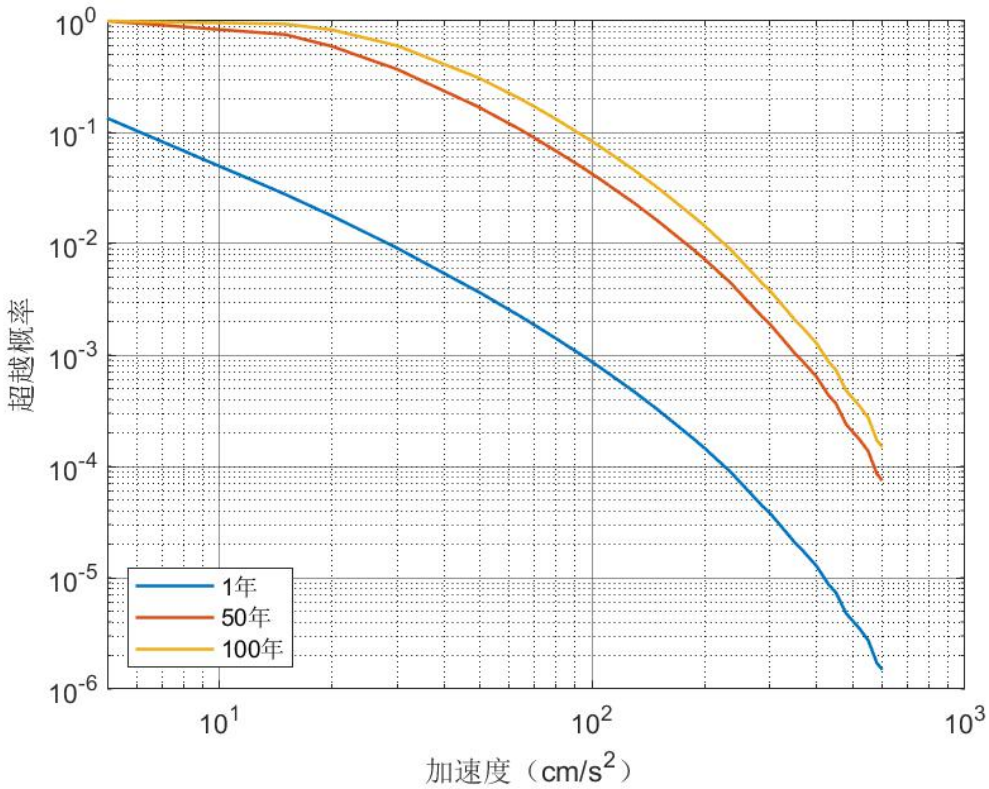


图 6.5-18 ZK6 基岩加速度峰值超越概率曲线

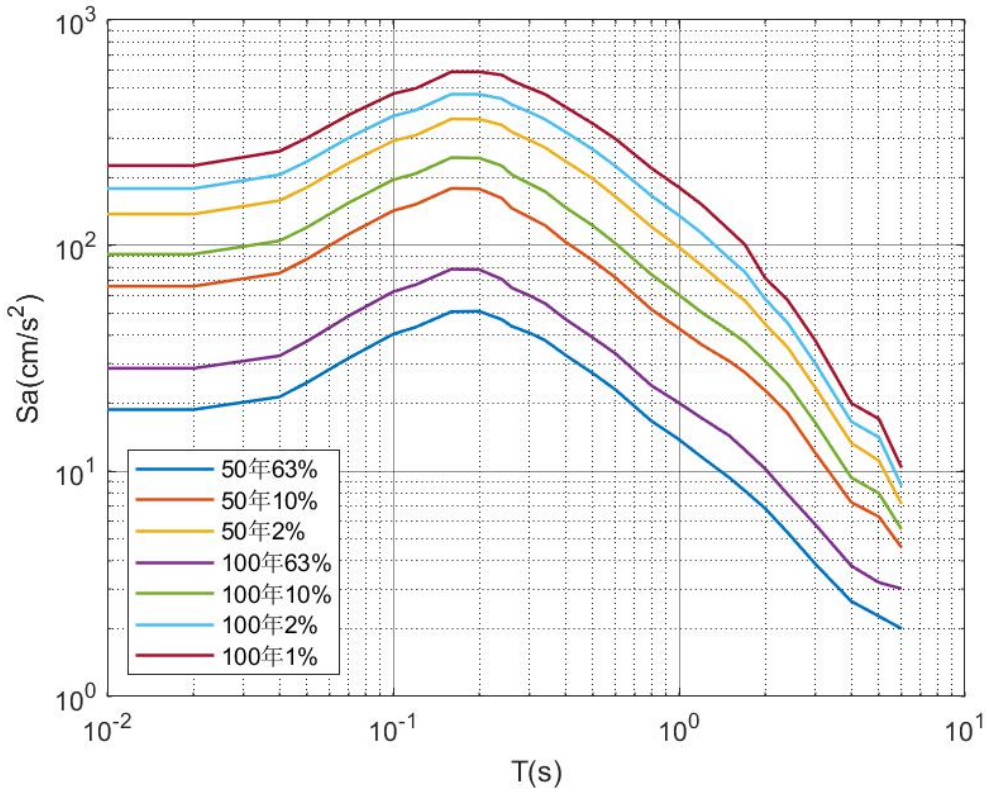


图 6.5-19 ZK6 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-14 ZK7 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.16e-03	3.64e-03	8.66e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.80e-05	2.07e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.69e-01	1.67e-01	4.24e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.90e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.02e-01	3.06e-01	8.30e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.79e-03	2.07e-03	1.27e-03

表 6.5-15ZK7 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.81	66.04	137.95	28.63	91.60	179.01	226.46
0.02	18.81	66.04	137.95	28.63	91.60	179.01	226.46
0.04	21.40	75.52	158.38	32.53	105.02	205.96	261.93
0.05	24.82	87.32	181.42	37.78	120.64	236.15	300.29
0.07	31.86	112.55	232.47	48.95	155.02	300.62	379.68
0.10	40.66	142.85	291.02	62.64	195.96	375.37	470.98
0.12	43.72	152.46	308.45	67.26	208.65	398.92	497.34
0.16	51.17	179.67	364.63	78.88	245.78	469.60	590.00
0.20	51.37	178.56	363.53	78.58	244.52	468.93	589.77
0.24	47.17	162.45	342.97	71.20	226.10	448.52	571.23
0.26	44.16	146.86	318.83	65.34	206.49	421.53	538.66
0.30	41.38	133.71	293.79	60.42	188.44	390.88	499.14
0.34	38.49	123.27	272.08	55.99	173.83	362.45	467.93
0.40	32.90	104.22	237.20	46.51	148.24	319.36	412.36
0.50	27.25	86.00	197.77	39.18	122.65	266.78	347.10
0.60	23.05	72.30	164.77	33.32	102.36	224.94	296.82
0.80	16.75	52.32	121.41	24.07	74.63	166.38	220.36
1.00	13.84	42.97	98.40	20.11	60.55	136.01	180.98
1.20	11.57	36.43	81.58	17.22	50.59	113.46	151.96
1.50	9.38	30.83	64.53	14.40	42.01	87.71	117.13
1.70	8.19	27.45	57.03	12.45	37.46	76.38	100.95
2.00	6.86	22.85	44.95	10.28	30.84	58.02	71.89
2.40	5.35	18.15	35.43	7.91	24.37	45.44	57.26
3.00	3.88	12.04	23.42	5.80	16.36	29.95	37.85
4.00	2.65	7.29	13.36	3.81	9.38	16.60	20.02
5.00	2.27	6.29	11.14	3.21	7.98	14.15	17.06
6.00	2.00	4.59	7.16	3.02	5.53	8.61	10.36

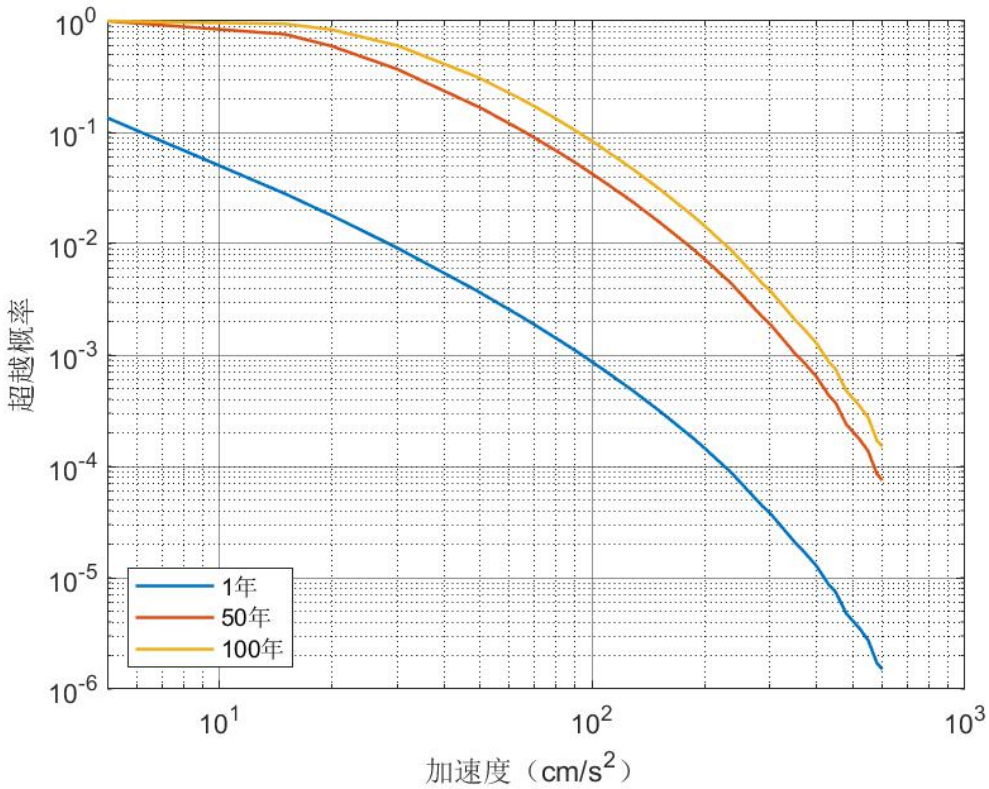


图 6.5-20 ZK7 基岩加速度峰值超越概率曲线

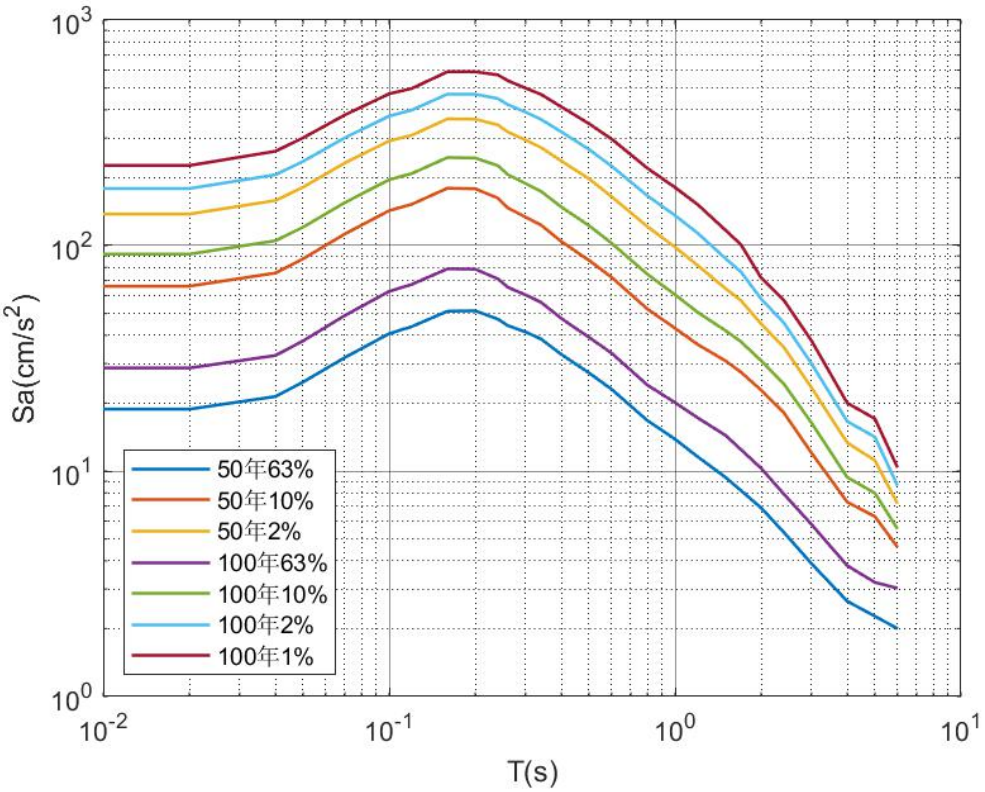


图 6.5-21 ZK7 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-16 ZK8 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.16e-03	3.64e-03	8.66e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.26e-05
50 年	9.99e-01	3.69e-01	1.67e-01	4.24e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.30e-04
100 年	1.00e+00	6.02e-01	3.06e-01	8.30e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.26e-03

表 6.5-17 ZK8 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.81	66.06	137.92	28.64	91.62	178.88	226.32
0.02	18.81	66.06	137.92	28.64	91.62	178.88	226.32
0.04	21.40	75.51	158.34	32.53	105.00	205.92	261.91
0.05	24.82	87.30	181.37	37.78	120.63	235.99	299.98
0.07	31.88	112.59	232.60	48.96	155.12	300.93	380.05
0.10	40.67	142.83	291.26	62.62	196.02	375.80	471.73
0.12	43.72	152.48	308.66	67.27	208.73	399.04	497.89
0.16	51.18	179.62	364.38	78.88	245.69	469.49	589.88
0.20	51.38	178.43	363.11	78.55	244.28	468.68	589.65
0.24	47.19	162.38	342.67	71.20	225.96	448.15	570.65
0.26	44.16	146.88	318.95	65.33	206.51	421.78	538.75
0.30	41.37	133.71	294.06	60.41	188.52	391.29	499.61
0.34	38.49	123.29	272.49	55.98	173.95	363.06	468.70
0.40	32.90	104.19	237.27	46.50	148.25	319.46	412.71
0.50	27.27	86.01	197.69	39.19	122.64	266.62	346.92
0.60	23.06	72.33	164.91	33.34	102.41	225.21	296.55
0.80	16.75	52.34	121.44	24.08	74.67	166.52	220.72
1.00	13.85	42.98	98.45	20.12	60.57	136.08	181.19
1.20	11.62	36.66	81.92	17.30	50.92	113.70	152.18
1.50	9.39	30.83	64.57	14.41	42.02	87.72	117.23
1.70	8.20	27.45	57.03	12.45	37.45	76.39	101.01
2.00	6.87	22.87	44.97	10.29	30.86	58.05	71.91
2.40	5.35	18.16	35.44	7.91	24.38	45.45	57.28
3.00	3.89	12.05	23.43	5.80	16.37	29.95	37.84
4.00	2.65	7.29	13.36	3.81	9.38	16.61	20.03
5.00	2.27	6.29	11.14	3.21	7.98	14.15	17.07
6.00	2.00	4.59	7.16	3.01	5.53	8.62	10.37

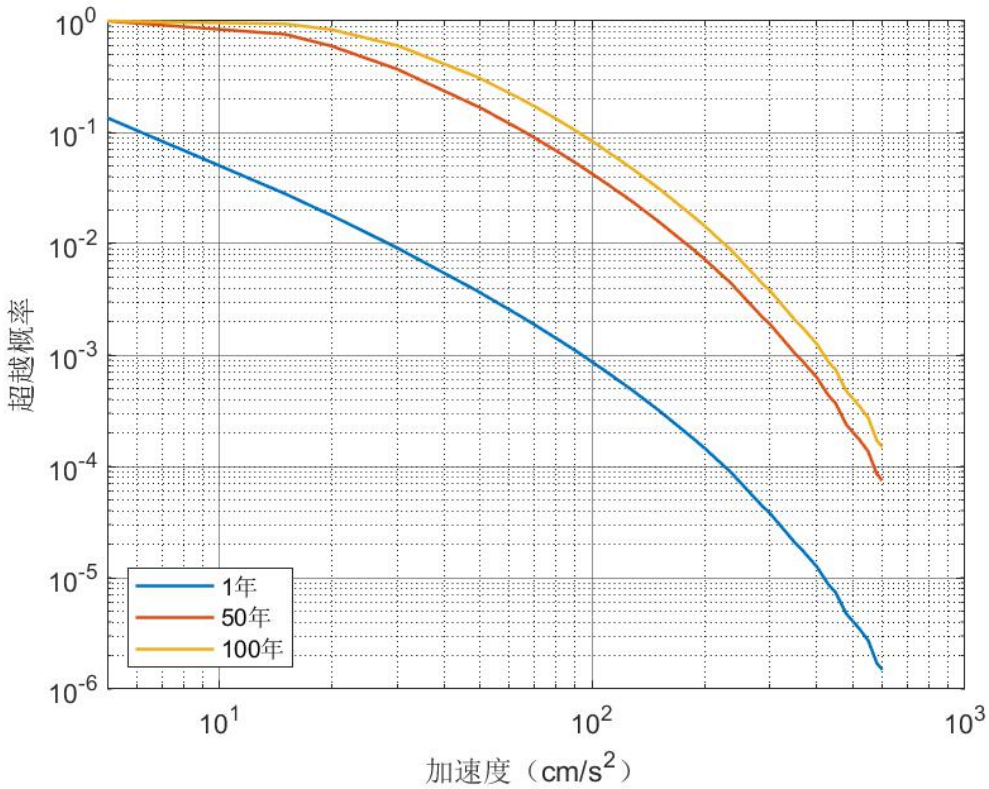


图 6.5-22 ZK8 基岩加速度峰值超越概率曲线

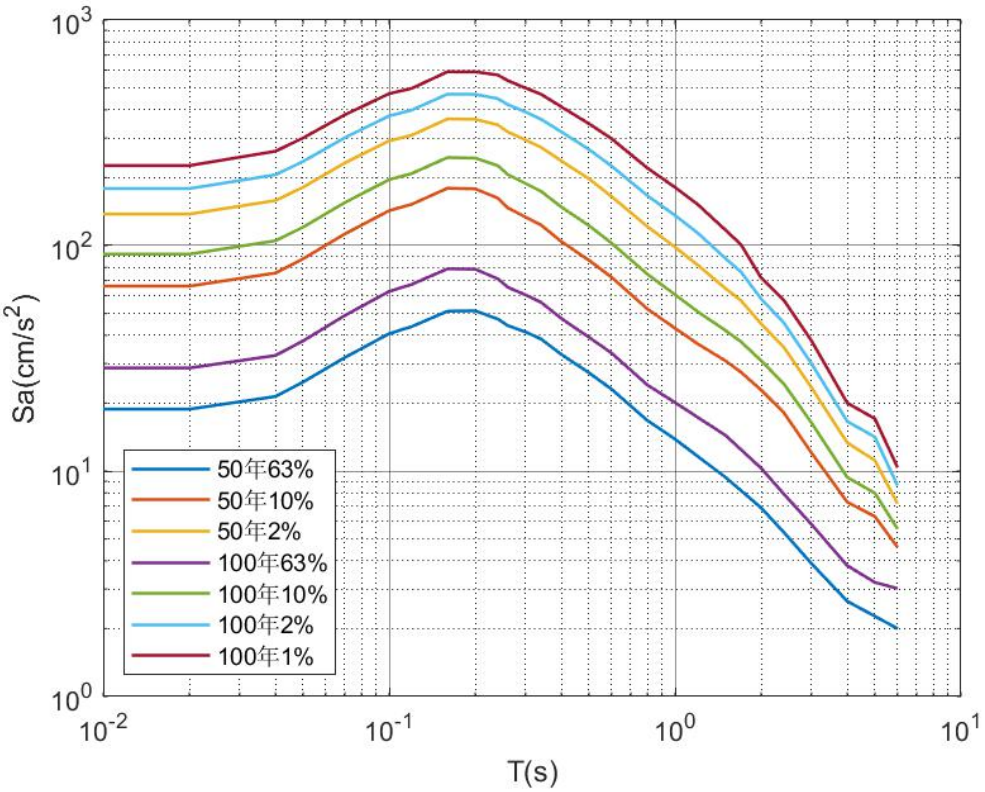


图 6.5-23 ZK8 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-18 ZK9 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.14e-03	3.64e-03	8.64e-04	3.21e-04	1.46e-04	3.74e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.59e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.28e-02	3.16e-02	1.45e-02	3.73e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-19 ZK9 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.75	66.02	137.70	28.60	91.53	178.54	225.87
0.02	18.75	66.02	137.70	28.60	91.53	178.54	225.87
0.04	21.34	75.39	158.15	32.46	104.84	205.70	261.76
0.05	24.70	87.23	181.37	37.66	120.58	236.04	299.93
0.07	31.74	112.46	232.58	48.82	155.00	300.98	380.20
0.10	40.47	142.54	291.05	62.38	195.74	375.65	471.54
0.12	43.50	152.13	308.22	67.01	208.35	398.75	496.53
0.16	50.92	179.25	363.76	78.61	245.38	468.55	588.92
0.20	51.11	177.98	362.19	78.23	243.66	466.57	588.55
0.24	47.01	162.16	341.99	71.03	225.62	447.43	570.26
0.26	43.92	146.59	318.57	65.06	206.20	421.36	538.44
0.30	40.99	133.25	293.77	59.95	188.10	391.01	499.30
0.34	38.04	122.90	272.38	55.47	173.67	363.16	468.41
0.40	32.54	103.67	236.83	47.02	147.83	319.09	412.30
0.50	26.96	85.72	196.50	38.86	122.41	266.40	346.75
0.60	22.94	72.06	164.66	33.18	102.13	225.02	297.40
0.80	16.67	52.11	121.23	23.95	74.43	166.42	220.72
1.00	13.79	42.81	98.14	20.04	60.33	135.75	180.91
1.20	11.54	36.36	81.50	17.18	50.51	113.38	151.90
1.50	9.35	30.75	64.48	14.35	41.93	87.67	117.24
1.70	8.16	27.34	56.89	12.39	37.33	76.25	100.85
2.00	6.83	22.77	44.84	10.24	30.74	57.93	71.76
2.40	5.32	18.03	35.22	7.86	24.21	45.17	56.96
3.00	3.86	11.98	23.32	5.77	16.29	29.83	37.71
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.36	16.58	20.00
5.00	2.27	6.27	11.12	3.20	7.96	14.12	17.04
6.00	2.00	4.59	7.13	3.03	5.52	8.57	10.29

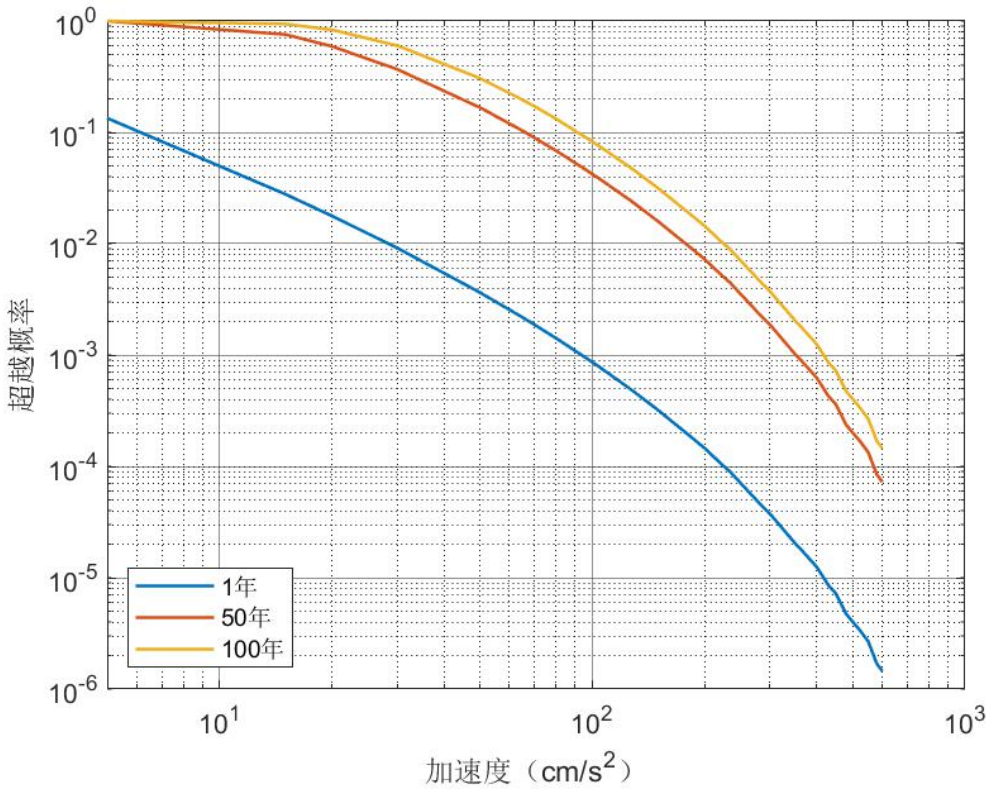


图 6.5-24 ZK9 基岩加速度峰值超越概率曲线

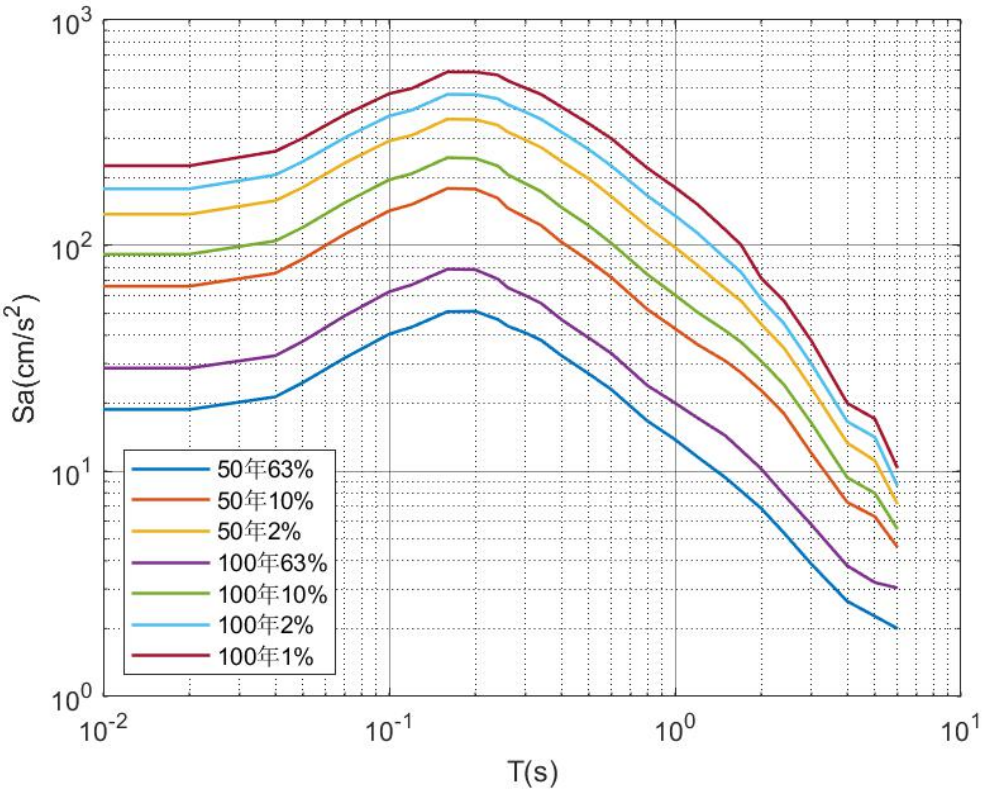


图 6.5-25 ZK9 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-20 ZK10 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.15e-03	3.64e-03	8.64e-04	3.21e-04	1.46e-04	3.75e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.59e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.28e-02	3.16e-02	1.45e-02	3.74e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-21 ZK10 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.78	66.02	137.72	28.62	91.53	178.57	225.95
0.02	18.78	66.02	137.72	28.62	91.53	178.57	225.95
0.04	21.37	75.43	158.21	32.50	104.89	205.75	261.79
0.05	24.75	87.26	181.34	37.71	120.59	235.98	299.92
0.07	31.80	112.50	232.60	48.87	155.04	301.05	380.24
0.10	40.55	142.66	291.16	62.49	195.86	375.76	471.65
0.12	43.60	152.28	308.40	67.13	208.50	398.86	497.67
0.16	51.01	179.39	363.98	78.71	245.50	468.94	589.35
0.20	51.22	178.19	362.63	78.37	243.97	468.07	589.05
0.24	47.08	162.26	342.24	71.11	225.76	447.79	570.26
0.26	44.03	146.72	318.69	65.19	206.32	421.47	538.50
0.30	41.09	133.45	293.95	60.09	188.30	391.18	499.50
0.34	38.19	123.07	272.48	55.64	173.81	363.20	468.59
0.40	32.61	103.84	237.00	47.13	148.00	319.25	412.47
0.50	27.02	85.81	196.58	38.93	122.50	266.47	346.80
0.60	22.99	72.18	164.78	33.25	102.25	225.13	296.56
0.80	16.70	52.20	121.33	24.00	74.53	166.49	220.77
1.00	13.81	42.87	98.25	20.07	60.42	135.88	181.03
1.20	11.55	36.40	81.59	17.20	50.56	113.48	152.04
1.50	9.36	30.79	64.53	14.37	41.98	87.72	117.27
1.70	8.17	27.39	56.95	12.41	37.38	76.30	100.89
2.00	6.84	22.80	44.88	10.26	30.78	57.96	71.80
2.40	5.33	18.09	35.32	7.88	24.28	45.30	57.11
3.00	3.88	12.01	23.36	5.79	16.32	29.86	37.74
4.00	2.65	7.28	13.34	3.80	9.37	16.59	20.01
5.00	2.27	6.28	11.13	3.21	7.97	14.13	17.05
6.00	2.00	4.59	7.14	3.03	5.53	8.59	10.32

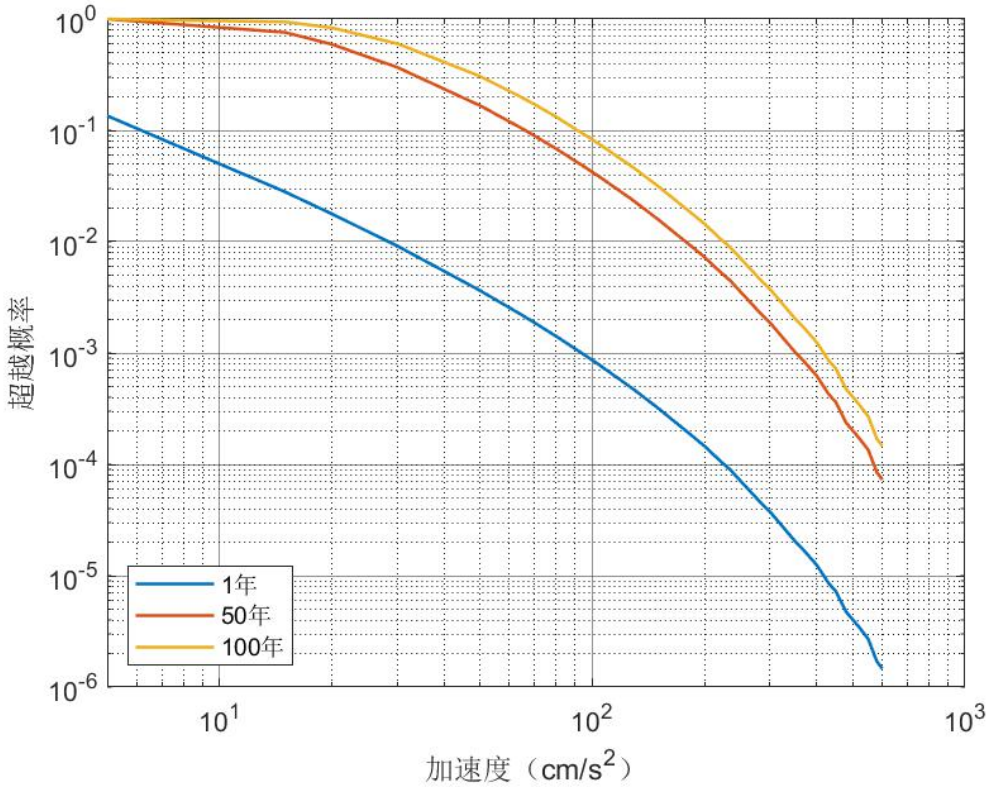


图 6.5-26 ZK10 基岩加速度峰值超越概率曲线

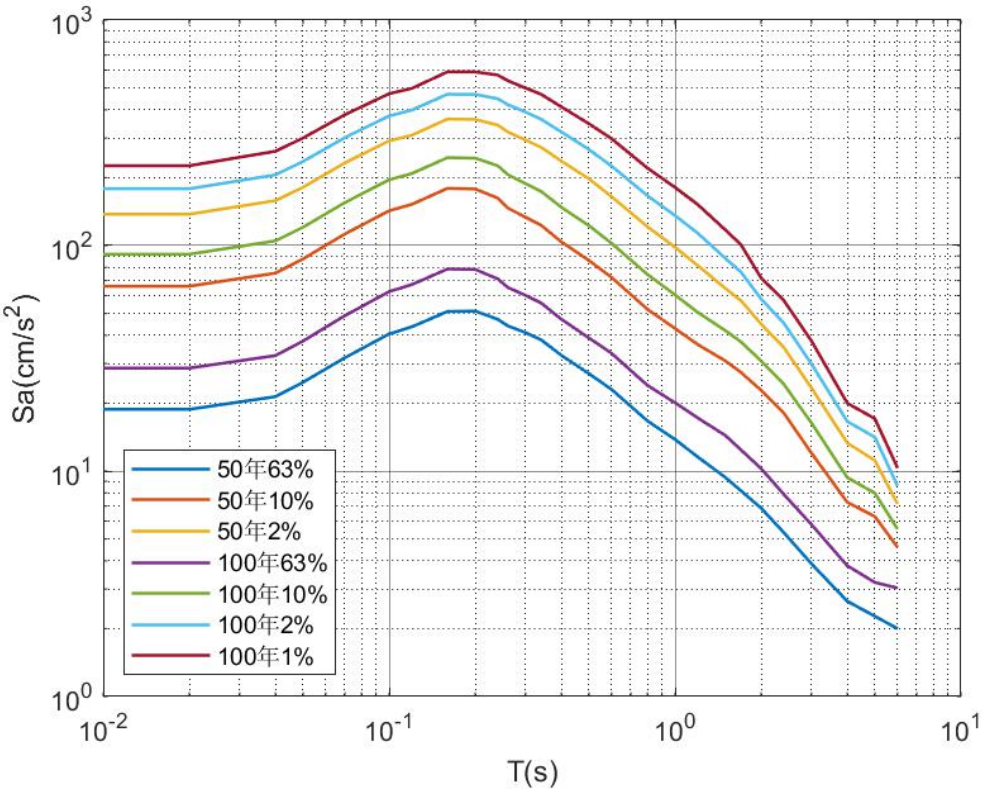


图 6.5-27 ZK10 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-22 ZK11 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.17e-03	3.65e-03	8.67e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.75e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.69e-01	1.67e-01	4.24e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.02e-01	3.06e-01	8.31e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.74e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-23 ZK11 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.81	66.12	137.86	28.66	91.67	178.71	226.02
0.02	18.81	66.12	137.86	28.66	91.67	178.71	226.02
0.04	21.41	75.51	158.29	32.55	104.97	205.87	261.94
0.05	24.82	87.33	181.51	37.78	120.69	236.15	299.99
0.07	31.89	112.65	232.82	48.99	155.21	301.19	380.40
0.10	40.65	142.76	291.26	62.59	195.96	375.88	471.71
0.12	43.70	152.37	308.50	67.21	208.62	399.06	497.79
0.16	51.17	179.54	364.13	78.88	245.66	468.90	589.13
0.20	51.37	178.30	362.66	78.52	244.03	468.00	588.82
0.24	47.19	162.34	342.32	71.21	225.86	447.80	570.65
0.26	44.15	146.88	319.00	65.33	206.52	421.81	538.80
0.30	41.34	133.58	294.04	60.34	188.40	391.25	499.47
0.34	38.49	123.27	272.67	55.97	173.96	363.46	468.65
0.40	32.88	104.10	237.25	47.45	148.19	319.47	412.81
0.50	27.26	86.03	197.78	39.19	122.68	266.66	347.01
0.60	23.07	72.36	164.96	33.35	102.45	225.34	297.71
0.80	16.75	52.35	121.44	24.09	74.68	166.61	220.91
1.00	13.85	42.98	98.42	20.12	60.56	136.02	181.17
1.20	11.63	36.71	82.01	17.32	50.99	113.79	152.19
1.50	9.38	30.83	64.61	14.40	42.03	87.80	117.35
1.70	8.20	27.45	57.05	12.46	37.46	76.42	101.08
2.00	6.87	22.87	44.97	10.30	30.86	58.05	71.90
2.40	5.35	18.15	35.42	7.91	24.37	45.41	57.20
3.00	3.89	12.05	23.44	5.80	16.38	29.98	37.87
4.00	2.65	7.29	13.36	3.81	9.38	16.61	20.03
5.00	2.27	6.29	11.15	3.21	7.98	14.16	17.07
6.00	2.00	4.59	7.16	3.01	5.53	8.61	10.36

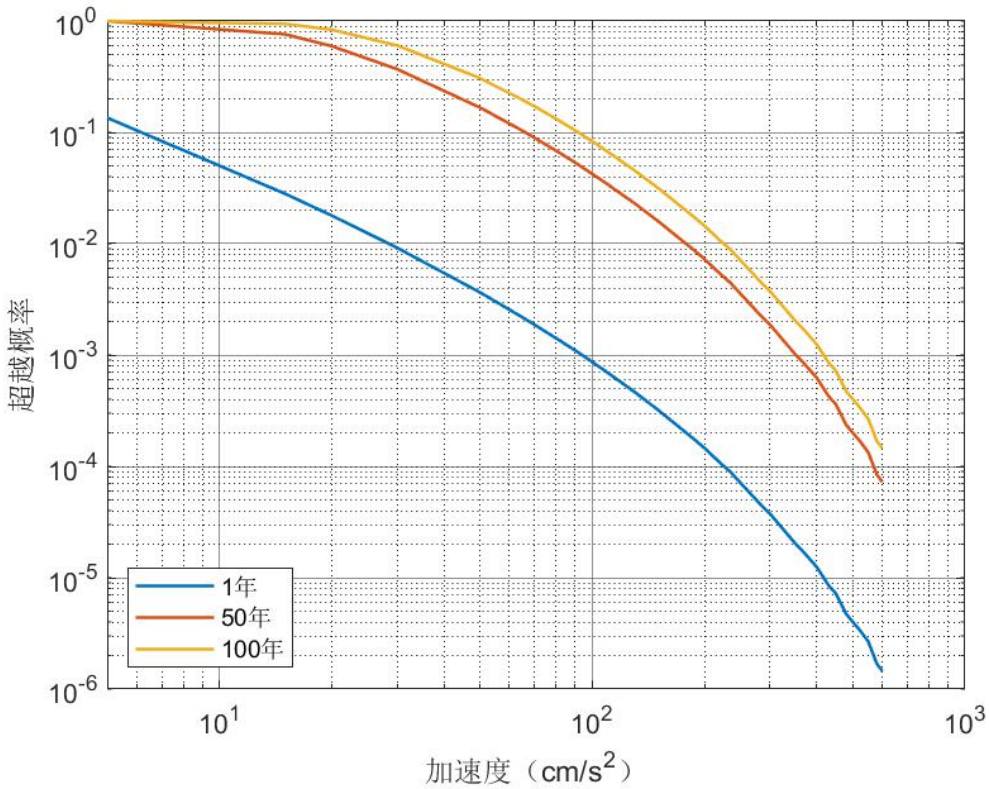


图 6.5-28 ZK11 基岩加速度峰值超越概率曲线

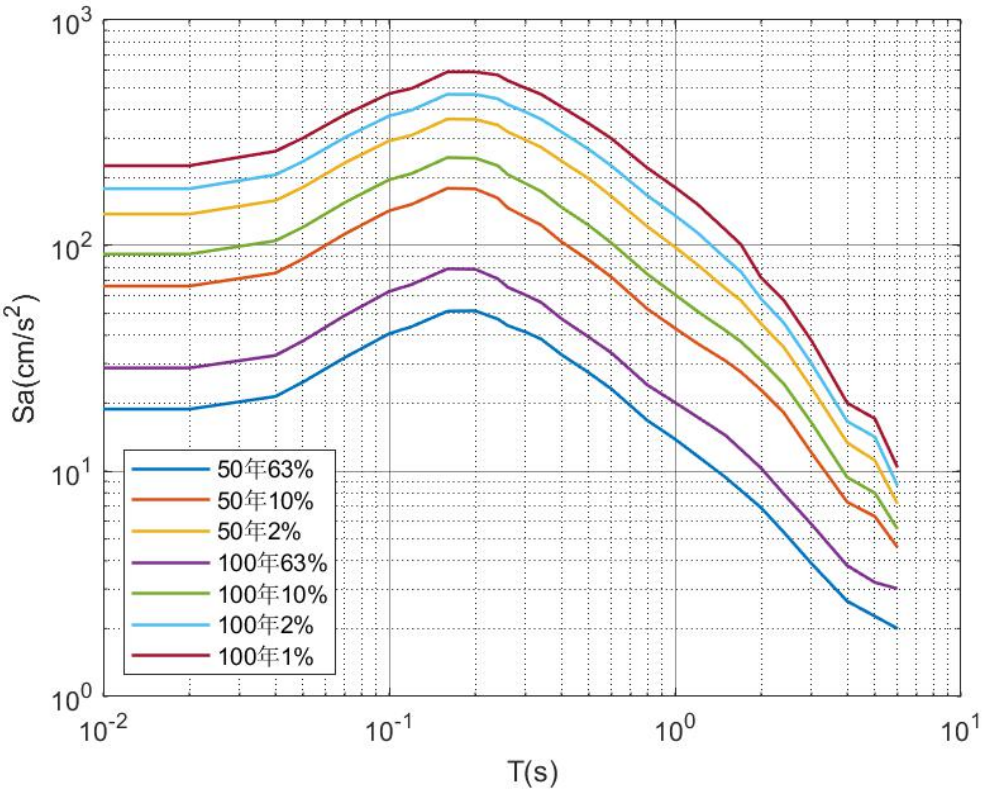


图 6.5-29 ZK11 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-24 ZK12 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.15e-03	3.64e-03	8.64e-04	3.21e-04	1.46e-04	3.75e-05	2.04e-05	1.25e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.59e-02	7.27e-03	1.87e-03	1.02e-03	6.25e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.28e-02	3.16e-02	1.45e-02	3.74e-03	2.04e-03	1.25e-03

表 6.5-25 ZK12 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.77	66.01	137.70	28.61	91.52	178.54	225.89
0.02	18.77	66.01	137.70	28.61	91.52	178.54	225.89
0.04	21.36	75.42	158.17	32.49	104.87	205.70	261.74
0.05	24.73	87.24	181.32	37.70	120.57	235.98	299.93
0.07	31.77	112.47	232.54	48.84	154.99	300.97	380.17
0.10	40.53	142.62	291.08	62.47	195.79	375.68	471.57
0.12	43.57	152.22	308.31	67.09	208.43	398.80	497.60
0.16	50.97	179.28	363.75	78.65	245.36	468.71	589.14
0.20	51.15	178.05	362.32	78.28	243.76	467.79	588.85
0.24	47.06	162.21	342.08	71.08	225.66	446.53	570.09
0.26	44.01	146.69	318.57	65.17	206.26	421.33	538.38
0.30	41.06	133.40	293.85	60.06	188.24	391.10	499.44
0.34	38.12	123.01	272.41	55.58	173.75	363.13	468.47
0.40	32.59	103.79	236.89	47.10	147.93	319.13	412.30
0.50	27.00	85.75	197.45	38.90	122.43	266.32	346.62
0.60	22.97	72.12	164.69	33.22	102.19	225.02	297.42
0.80	16.68	52.16	121.26	23.98	74.48	166.42	220.69
1.00	13.80	42.84	98.20	20.06	60.38	135.82	180.97
1.20	11.55	36.38	81.52	17.20	50.54	113.39	151.94
1.50	9.36	30.78	64.52	14.37	41.97	87.70	117.25
1.70	8.16	27.35	56.90	12.40	37.34	76.24	100.82
2.00	6.84	22.79	44.86	10.25	30.76	57.94	71.77
2.40	5.33	18.06	35.27	7.87	24.25	45.23	57.03
3.00	3.86	11.98	23.32	5.77	16.29	29.82	37.70
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.37	16.58	20.01
5.00	2.27	6.28	11.13	3.20	7.97	14.13	17.05
6.00	2.00	4.59	7.14	3.04	5.52	8.57	10.30

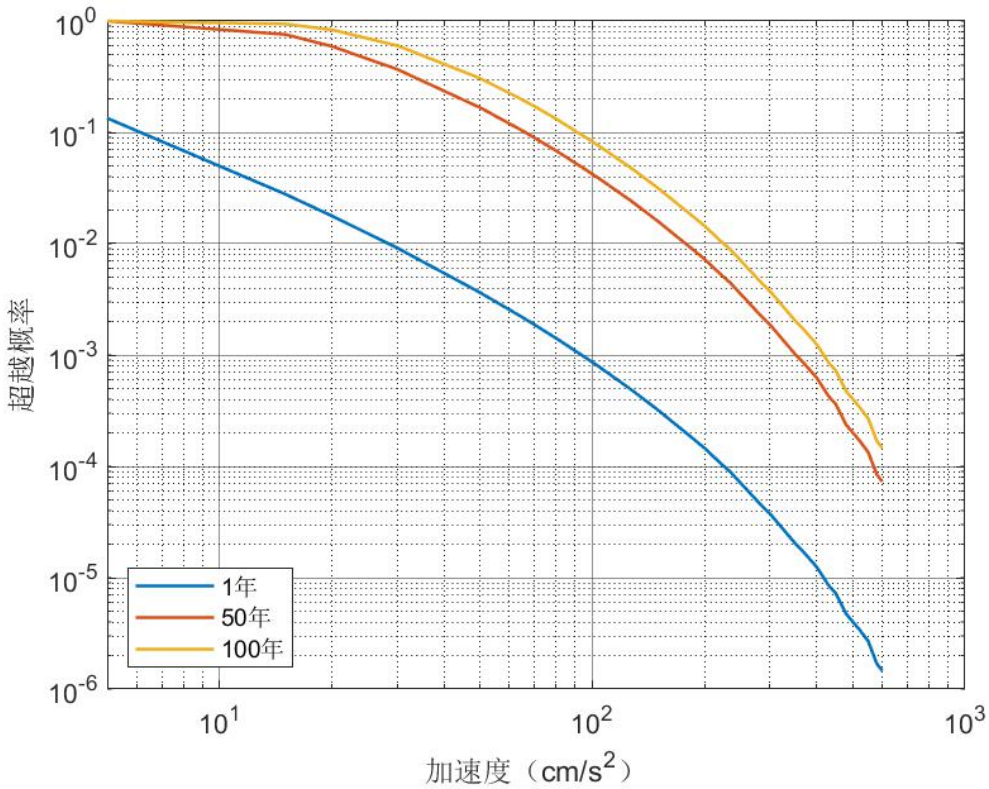


图 6.5-30 ZK12 基岩加速度峰值超越概率曲线

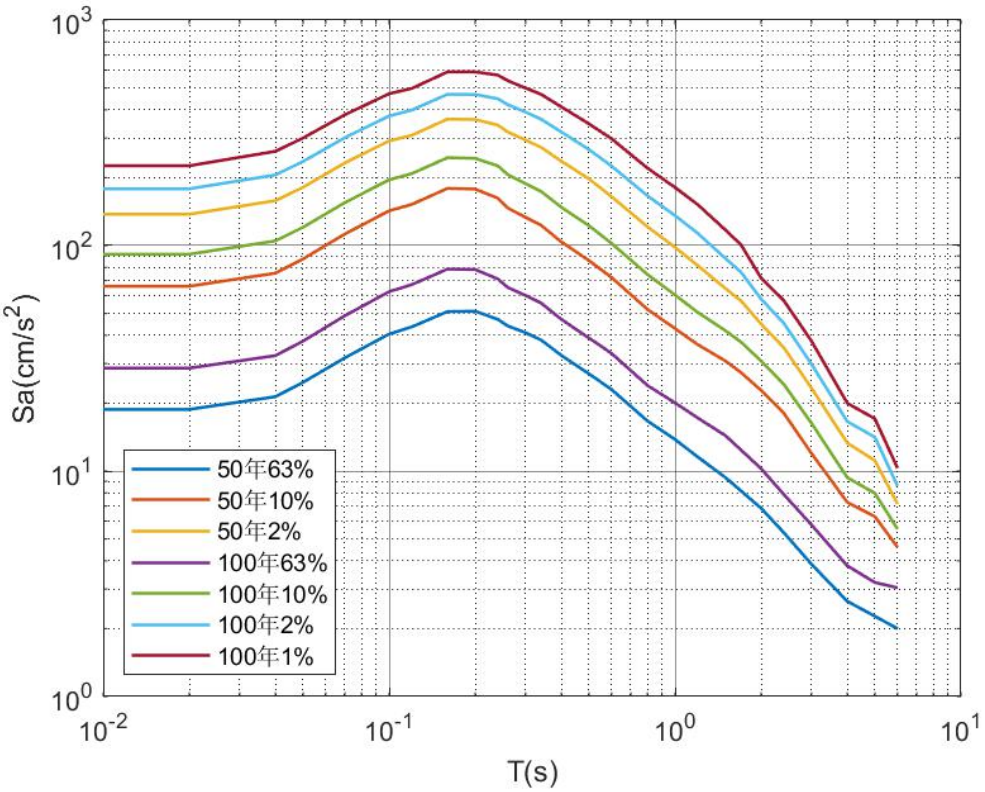


图 6.5-31 ZK12 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-26 ZK13 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.14e-03	3.64e-03	8.65e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.26e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.30e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.29e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.26e-03

表 6.5-27 ZK13 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.77	66.02	137.88	28.60	91.58	178.85	226.30
0.02	18.77	66.02	137.88	28.60	91.58	178.85	226.30
0.04	21.37	75.47	158.33	32.50	104.96	205.92	261.92
0.05	24.78	87.26	181.32	37.74	120.58	235.94	299.93
0.07	31.82	112.53	232.55	48.89	155.06	300.90	380.02
0.10	40.60	142.80	291.26	62.56	196.01	375.82	471.73
0.12	43.66	152.45	308.67	67.21	208.72	399.05	497.93
0.16	51.10	179.57	364.38	78.79	245.66	469.51	589.91
0.20	51.30	178.40	363.18	78.47	244.31	468.74	589.66
0.24	47.11	162.26	342.60	71.10	225.86	448.14	570.67
0.26	44.06	146.75	318.88	65.21	206.40	421.73	538.73
0.30	41.31	133.61	293.99	60.32	188.43	391.22	499.58
0.34	38.41	123.16	272.43	55.87	173.85	363.02	468.67
0.40	32.85	104.10	237.20	47.43	148.16	319.42	412.69
0.50	27.21	85.91	197.61	39.13	122.54	266.57	346.89
0.60	23.02	72.22	164.83	33.28	102.30	225.16	296.52
0.80	16.73	52.27	121.39	24.04	74.60	166.49	220.70
1.00	13.84	42.95	98.42	20.10	60.53	136.05	181.17
1.20	11.61	36.63	81.89	17.29	50.89	113.69	152.17
1.50	9.37	30.81	64.54	14.39	41.99	87.69	117.21
1.70	8.19	27.43	57.01	12.44	37.43	76.37	100.99
2.00	6.86	22.85	44.95	10.28	30.84	58.03	71.89
2.40	5.34	18.13	35.40	7.90	24.34	45.41	57.24
3.00	3.89	12.05	23.42	5.80	16.37	29.95	37.84
4.00	2.65	7.28	13.35	3.81	9.37	16.59	20.02
5.00	2.27	6.28	11.14	3.21	7.98	14.14	17.06
6.00	2.00	4.59	7.16	3.01	5.53	8.62	10.37

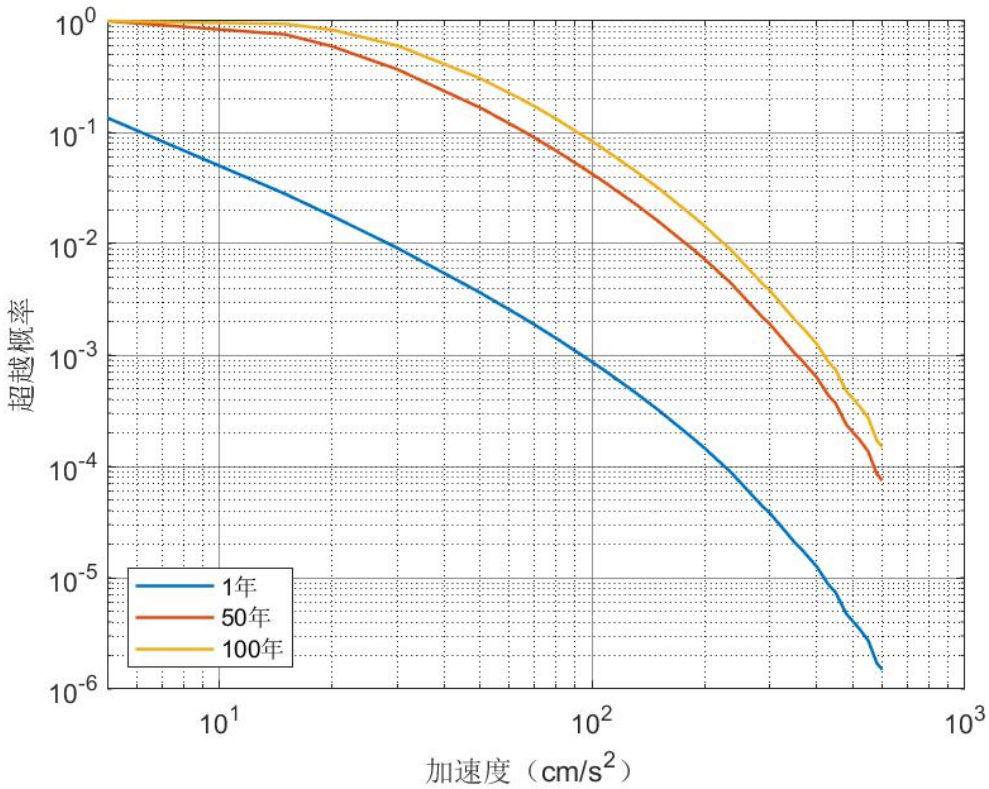


图 6.5-32 ZK13 基岩加速度峰值超越概率曲线

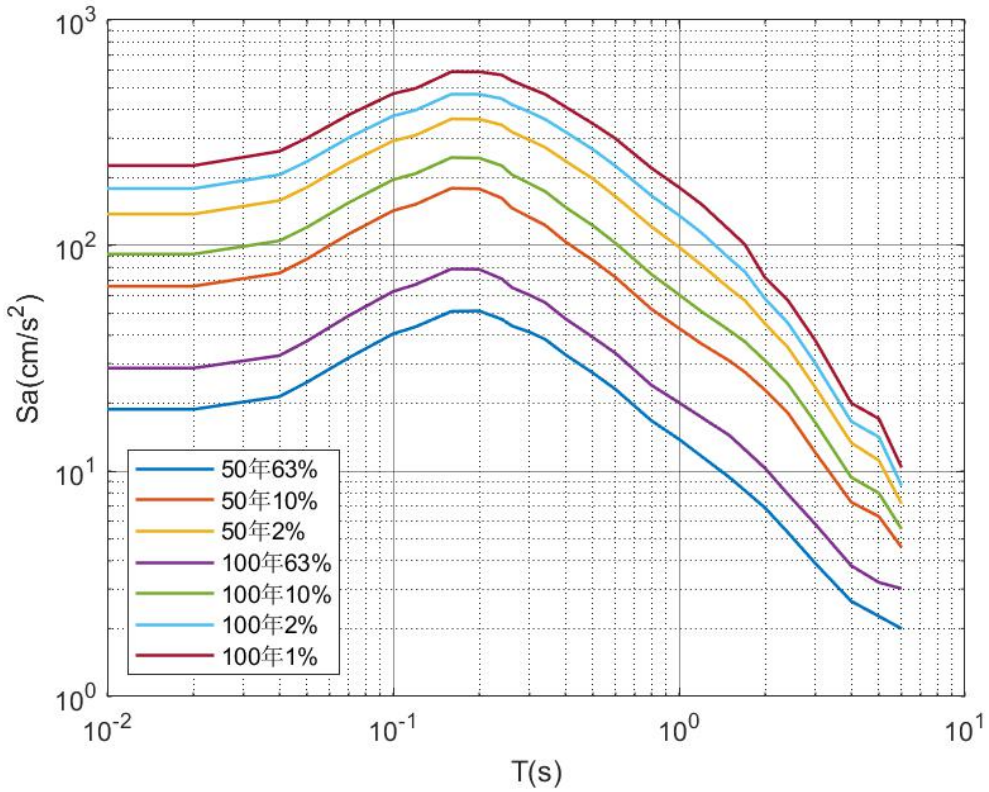


图 6.5-33 ZK13 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-28 ZK14 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.35e-01	9.15e-03	3.64e-03	8.65e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.01e-01	3.06e-01	8.29e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.27e-03

表 6.5-29 ZK14 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.79	66.01	137.84	28.62	91.55	178.83	226.29
0.02	18.79	66.01	137.84	28.62	91.55	178.83	226.29
0.04	21.38	75.45	158.28	32.50	104.93	205.83	261.79
0.05	24.78	87.28	181.30	37.74	120.59	235.94	299.97
0.07	31.82	112.51	232.45	48.90	155.01	300.76	379.85
0.10	40.61	142.78	291.17	62.57	195.96	375.59	471.55
0.12	43.66	152.41	308.52	67.21	208.62	398.80	497.67
0.16	51.08	179.56	364.37	78.78	245.66	469.43	589.85
0.20	51.29	178.42	363.24	78.48	244.36	468.73	589.62
0.24	47.12	162.32	342.63	71.14	225.90	448.12	570.76
0.26	44.08	146.77	318.80	65.25	206.39	421.63	538.66
0.30	41.14	133.55	293.91	60.16	188.39	391.15	499.45
0.34	38.25	123.13	272.34	55.72	173.84	362.87	468.54
0.40	32.84	104.10	237.08	47.42	148.14	319.26	412.37
0.50	27.19	85.91	197.63	39.11	122.55	266.59	346.90
0.60	23.01	72.20	164.72	33.27	102.26	224.96	297.21
0.80	16.72	52.25	121.37	24.03	74.58	166.46	220.63
1.00	13.82	42.91	98.33	20.09	60.48	135.93	181.02
1.20	11.56	36.41	81.61	17.21	50.59	113.51	152.06
1.50	9.37	30.80	64.52	14.38	41.98	87.67	117.19
1.70	8.18	27.42	57.01	12.43	37.42	76.36	100.96
2.00	6.85	22.83	44.91	10.27	30.81	57.99	71.85
2.40	5.34	18.12	35.38	7.89	24.33	45.38	57.21
3.00	3.88	12.02	23.38	5.79	16.34	29.89	37.78
4.00	2.65	7.28	13.35	3.81	9.38	16.60	20.02
5.00	2.27	6.28	11.13	3.21	7.98	14.14	17.06
6.00	2.00	4.59	7.15	3.02	5.53	8.60	10.34

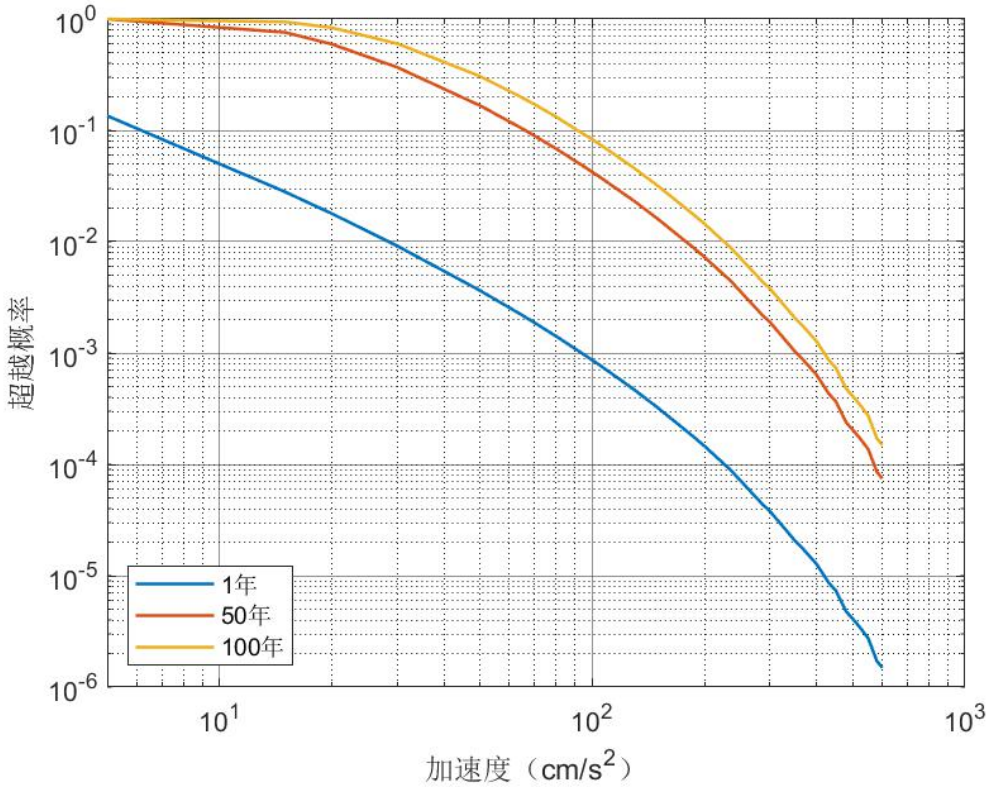


图 6.5-34 ZK14 基岩加速度峰值超越概率曲线

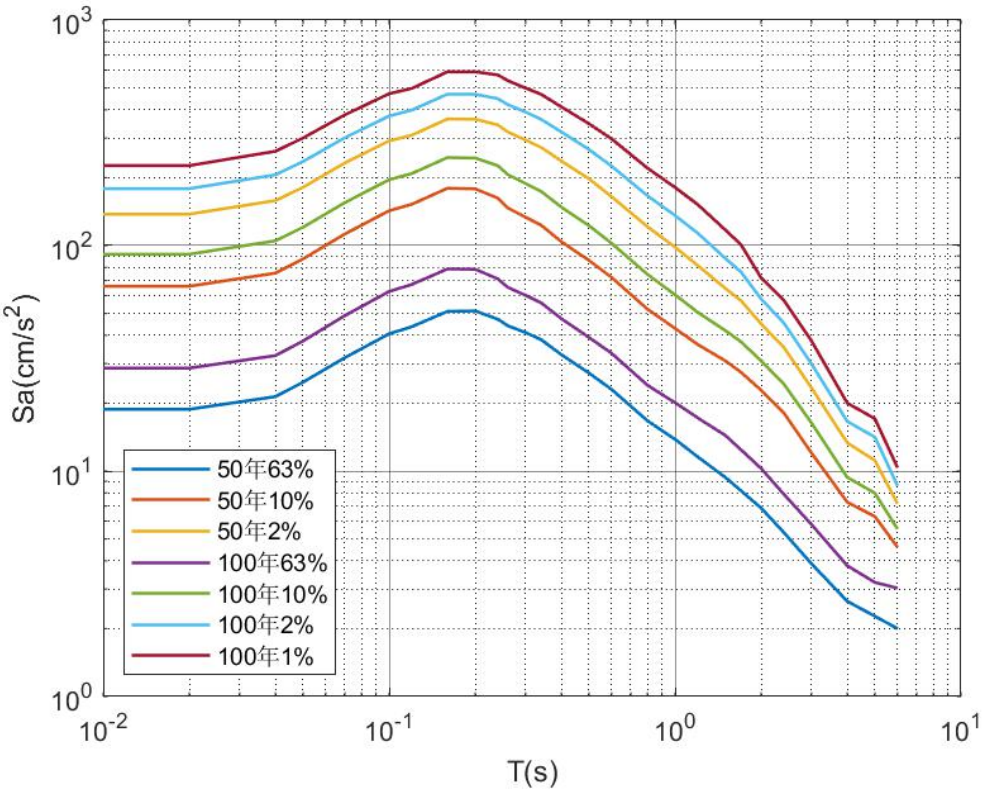


图 6.5-35 ZK14 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-30 ZK15 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.12e-03	3.63e-03	8.63e-04	3.22e-04	1.46e-04	3.77e-05	2.05e-05	1.26e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.66e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.88e-03	1.02e-03	6.30e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.05e-01	8.27e-02	3.17e-02	1.45e-02	3.76e-03	2.05e-03	1.26e-03

表 6.5-31 ZK15 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.74	65.94	137.75	28.56	91.47	178.70	226.15
0.02	18.74	65.94	137.75	28.56	91.47	178.70	226.15
0.04	21.33	75.38	158.22	32.45	104.86	205.80	261.81
0.05	24.71	87.19	181.24	37.66	120.52	235.87	299.84
0.07	31.74	112.42	232.44	48.80	154.95	300.87	380.00
0.10	40.48	142.62	291.13	62.41	195.84	375.71	471.65
0.12	43.53	152.26	308.41	67.06	208.49	398.81	497.67
0.16	50.93	179.34	364.05	78.61	245.43	469.14	589.66
0.20	51.14	178.14	362.78	78.28	243.99	468.32	589.42
0.24	47.00	162.17	342.41	71.00	225.74	447.96	570.42
0.26	43.91	146.59	318.66	65.04	206.24	421.48	538.47
0.30	41.02	133.36	293.80	60.02	188.21	391.04	499.43
0.34	38.04	122.90	272.33	55.46	173.68	363.03	468.67
0.40	32.75	103.88	236.93	47.28	147.93	319.19	412.40
0.50	26.97	85.72	196.50	38.87	122.42	266.44	346.75
0.60	22.94	72.04	164.66	33.18	102.10	225.01	297.43
0.80	16.67	52.12	121.27	23.96	74.45	166.41	220.65
1.00	13.79	42.83	98.23	20.05	60.37	135.88	181.04
1.20	11.54	36.36	81.54	17.18	50.52	113.45	152.01
1.50	9.35	30.75	64.44	14.35	41.92	87.61	117.16
1.70	8.17	27.36	56.94	12.40	37.36	76.30	100.90
2.00	6.84	22.78	44.86	10.24	30.76	57.95	71.80
2.40	5.33	18.05	35.29	7.87	24.25	45.27	57.11
3.00	3.86	11.99	23.35	5.78	16.31	29.86	37.74
4.00	2.65	7.27	13.33	3.80	9.37	16.58	20.01
5.00	2.27	6.27	11.12	3.20	7.96	14.12	17.04
6.00	2.00	4.59	7.14	3.02	5.52	8.59	10.33

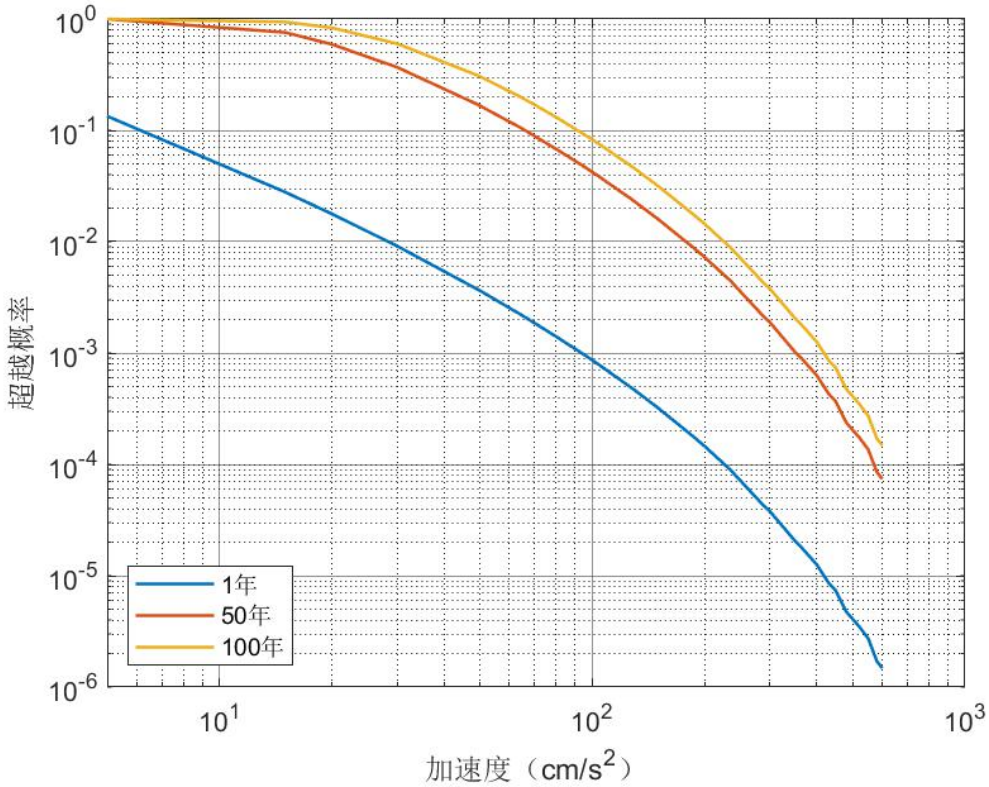


图 6.5-36 ZK15 基岩加速度峰值超越概率曲线

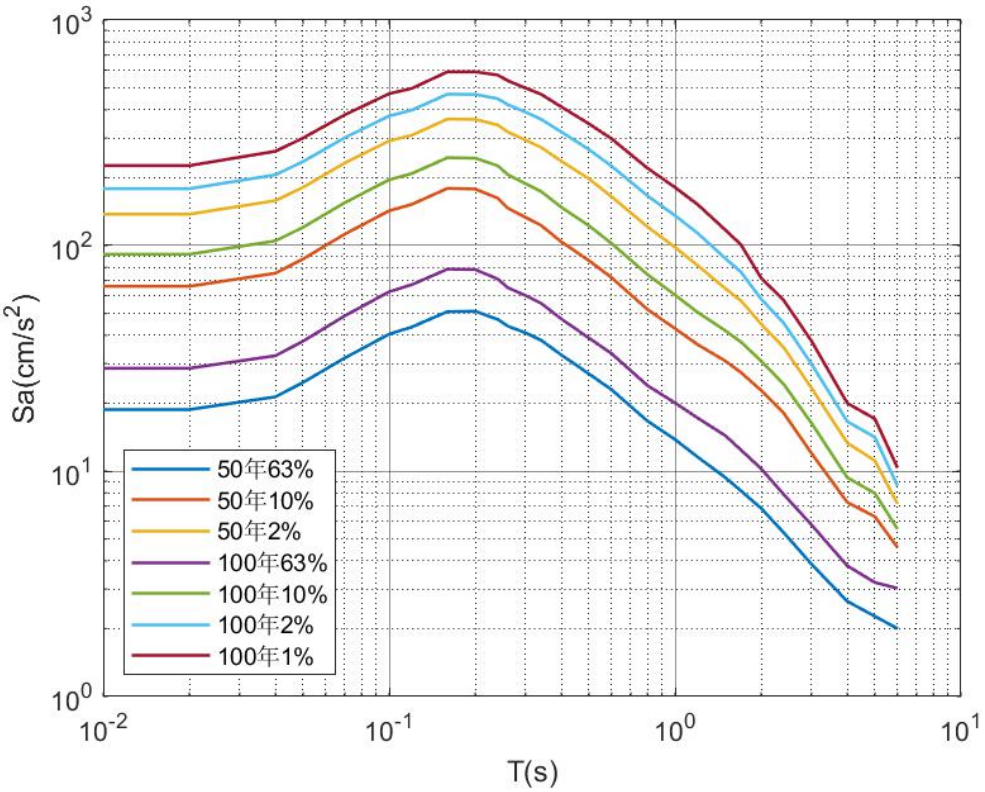


图 6.5-37 ZK15 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-32 ZK16 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.34e-01	9.13e-03	3.64e-03	8.65e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.80e-05	2.07e-05	1.27e-05
50 年	9.99e-01	3.68e-01	1.67e-01	4.23e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.90e-03	1.03e-03	6.35e-04
100 年	1.00e+00	6.00e-01	3.06e-01	8.29e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.79e-03	2.07e-03	1.27e-03

表 6.5-33 ZK16 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.74	66.00	137.95	28.57	91.58	179.02	226.49
0.02	18.74	66.00	137.95	28.57	91.58	179.02	226.49
0.04	21.33	75.45	158.37	32.45	104.97	205.97	261.95
0.05	24.74	87.25	181.36	37.70	120.58	236.09	300.21
0.07	31.77	112.44	232.39	48.83	154.92	300.46	379.59
0.10	40.55	142.77	290.97	62.52	195.89	375.34	470.99
0.12	43.58	152.38	308.49	67.13	208.62	398.94	497.46
0.16	51.01	179.63	364.68	78.72	245.76	469.63	590.02
0.20	51.22	178.56	363.74	78.45	244.66	469.07	589.79
0.24	47.03	162.26	342.88	71.03	225.94	448.51	571.28
0.26	43.96	146.59	318.71	65.09	206.27	421.49	538.66
0.30	41.23	133.52	293.73	60.23	188.29	390.82	499.16
0.34	38.29	123.02	271.99	55.74	173.65	362.40	467.93
0.40	32.81	104.03	237.10	47.38	148.08	319.32	412.36
0.50	27.15	85.81	197.60	39.05	122.44	266.66	347.00
0.60	22.96	72.11	164.66	33.21	102.18	224.88	296.82
0.80	16.70	52.19	121.32	24.00	74.50	166.32	220.32
1.00	13.82	42.91	98.33	20.08	60.47	135.97	180.97
1.20	11.54	36.37	81.51	17.19	50.52	113.41	151.93
1.50	9.36	30.78	64.48	14.37	41.96	87.66	117.10
1.70	8.18	27.41	56.98	12.42	37.41	76.33	100.91
2.00	6.84	22.81	44.90	10.26	30.79	57.98	71.85
2.40	5.33	18.09	35.35	7.88	24.30	45.35	57.19
3.00	3.87	12.02	23.41	5.78	16.34	29.94	37.85
4.00	2.65	7.28	13.34	3.80	9.37	16.59	20.01
5.00	2.27	6.28	11.13	3.20	7.97	14.14	17.05
6.00	2.00	4.58	7.15	3.01	5.53	8.61	10.36

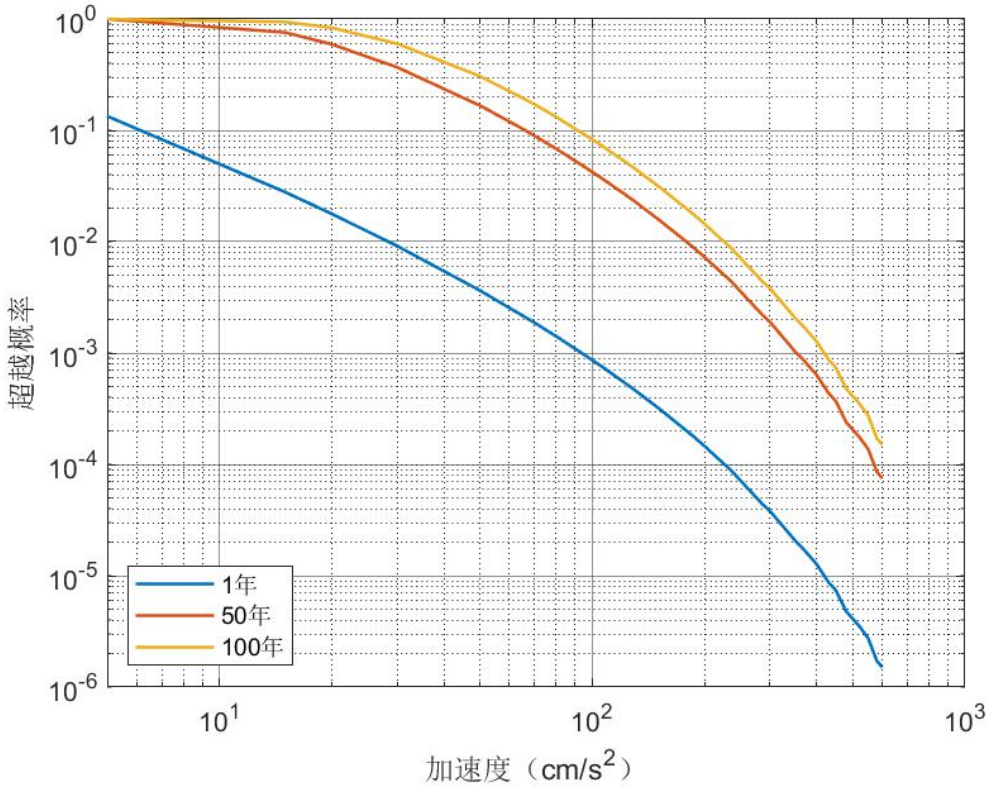


图 6.5-38 ZK16 基岩加速度峰值超越概率曲线

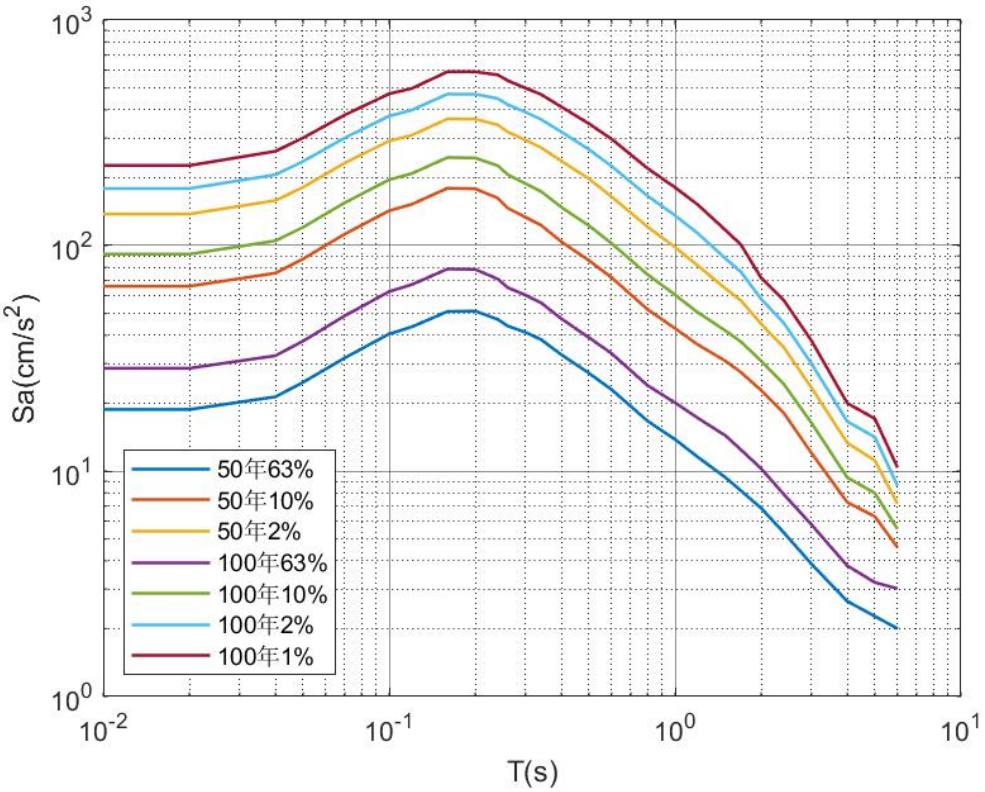


图 6.5-39 ZK16 七种概率基岩加速度反应谱

表 6.5-34 ZK17 T 年内基岩地震动峰加速度值的超越概率

Amax(cm/s^2)	5	30	50	100	150	200	300	350	400
1 年	1.36e-01	9.17e-03	3.65e-03	8.66e-04	3.23e-04	1.46e-04	3.78e-05	2.06e-05	1.26e-05
50 年	9.99e-01	3.69e-01	1.67e-01	4.24e-02	1.60e-02	7.27e-03	1.89e-03	1.03e-03	6.30e-04
100 年	1.00e+00	6.02e-01	3.06e-01	8.30e-02	3.18e-02	1.45e-02	3.77e-03	2.06e-03	1.26e-03

表 6.5-35 ZK17 基岩地震动反应谱值

谱值(cm/s^2)	超越概率						
周期(sec)	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
0.01	18.82	66.08	137.91	28.66	91.63	178.86	226.28
0.02	18.82	66.08	137.91	28.66	91.63	178.86	226.28
0.04	21.41	75.53	158.34	32.55	105.01	205.92	261.92
0.05	24.83	87.32	181.37	37.80	120.64	235.96	299.91
0.07	31.89	112.62	232.65	48.98	155.15	300.98	380.10
0.10	40.69	142.85	291.27	62.65	196.03	375.83	471.73
0.12	43.76	152.49	308.65	67.30	208.73	399.01	497.85
0.16	51.22	179.64	364.34	78.92	245.71	469.44	589.85
0.20	51.41	178.44	363.05	78.58	244.26	468.58	589.57
0.24	47.20	162.41	342.64	71.22	225.98	448.12	570.55
0.26	44.20	146.93	318.98	65.38	206.55	421.79	538.71
0.30	41.40	133.75	294.10	60.44	188.55	391.29	499.63
0.34	38.53	123.35	272.59	56.03	174.02	363.21	468.81
0.40	32.92	104.22	237.31	46.53	148.28	319.51	412.79
0.50	27.30	86.06	197.71	39.24	122.69	266.62	346.89
0.60	23.08	72.39	164.96	33.37	102.47	225.28	297.63
0.80	16.76	52.37	121.46	24.10	74.71	166.54	220.74
1.00	13.85	43.00	98.48	20.12	60.59	136.11	181.24
1.20	11.62	36.67	81.94	17.31	50.94	113.72	152.19
1.50	9.39	30.85	64.59	14.42	42.04	87.74	117.25
1.70	8.20	27.46	57.05	12.46	37.47	76.41	101.03
2.00	6.87	22.88	44.98	10.30	30.87	58.05	71.92
2.40	5.35	18.17	35.45	7.92	24.39	45.46	57.28
3.00	3.89	12.05	23.43	5.80	16.37	29.95	37.84
4.00	2.65	7.29	13.36	3.81	9.38	16.61	20.03
5.00	2.27	6.29	11.14	3.21	7.98	14.15	17.07
6.00	2.00	4.59	7.16	3.02	5.53	8.62	10.37

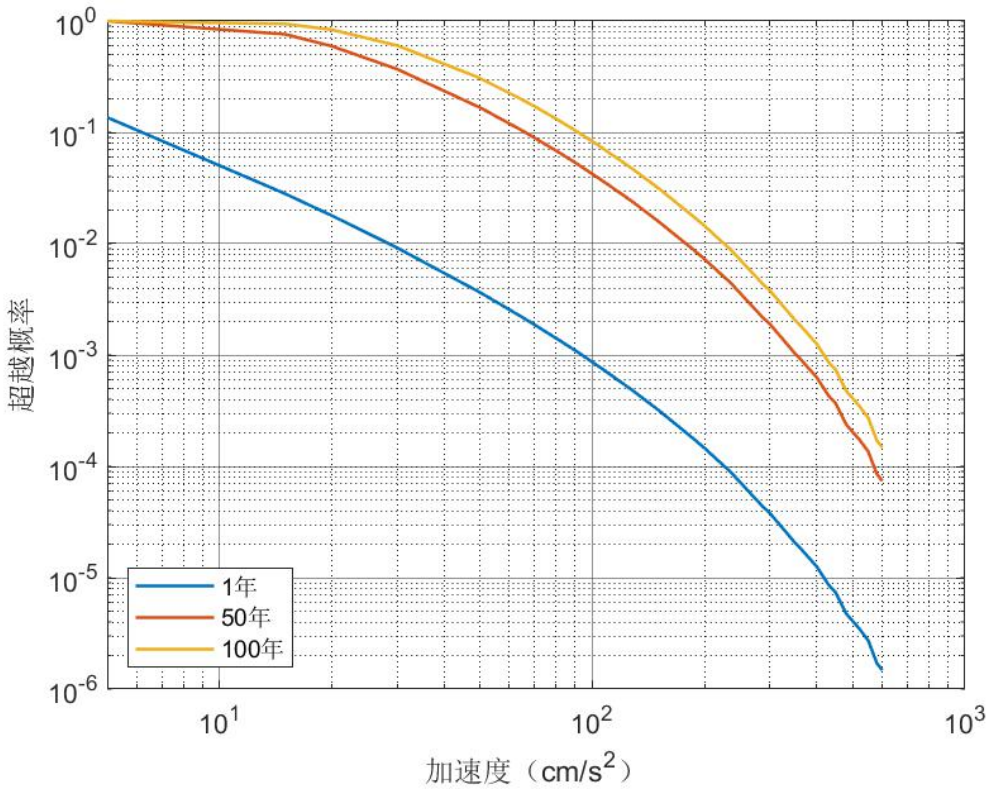


图 6.5-40 ZK17 基岩加速度峰值超越概率曲线

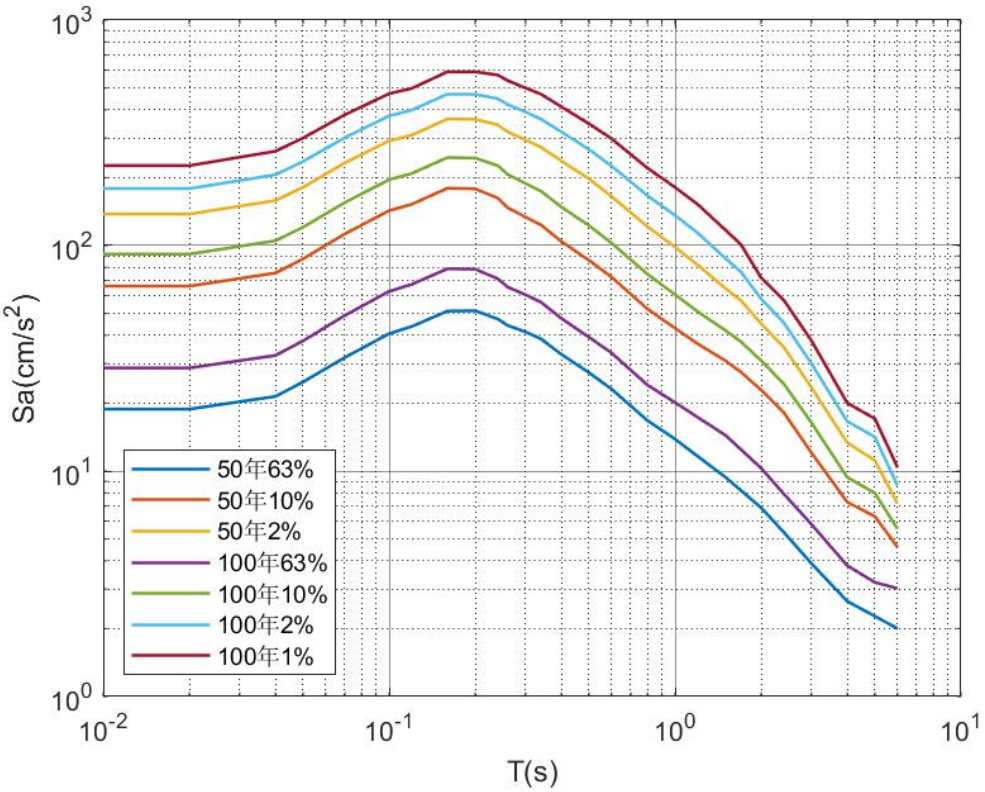


图 6.5-41 ZK17 七种概率基岩加速度反应谱

根据地震危险性分析计算的结果可见，各概率档值接近，故在目标区取代表性钻孔 ZK16 做贡献分析。主要潜在震源区和地震构造区背景潜源对 ZK16 地震危险性的贡献如表 6.5-36 所示，对场地基岩峰值加速度的贡献主要来自工程场地所在的宜宾 6.5 级潜在震源区和最近的荣昌 6.0 级潜在震源区，且随着峰值的增大贡献增加；工程场地位于渝黔地震构造区内，该源对场地有一定贡献，趋势为随着峰值增加而减小；贡献表反映的情况与场地所处的地震环境相符，结果主要受工程场地所在及附近的潜源和背景潜源控制。

表 6.5-36　主要潜在震源区和背景潜源对 ZK16 工程场地基岩水平峰值加速度的贡献

潜源/地震构造区背景源		震级上限	各概率档						
			50a63%	**50a10%**	**50a2%**	**100a63%**	**100a10%**	**100a2%**	**100a1%**
2	宜宾	6.5	51.9	75.2	89.4	60.2	82.3	94.5	96.2
11	荣昌	6.0	31.3	21.5	10.0	30.1	16.0	5.4	3.8
3	自贡	6.0	5.2	1.8	0.3	4.0	0.9	0.1	
1	赤水	6.0	4.2	1.3	0.3	3.0	0.7	0.1	
	渝黔地震构造区	5.5	2.0	0.1		0.9			
15	永善	7.5	1.6	0.1		0.8			

主要潜在震源区对目标区代表性控制点(ZK17)基岩地震动反应谱 0.2s 的贡献见表 6.5-37，场地反应谱 0.2s 地震动值主要来自工程场地所在的宜宾 6.5 级潜在震源区和荣昌 6.0 级潜在震源区的趋势不变；渝黔地震构造区对各控制点的贡献相比峰值略有增加，趋势仍为随着峰值增加而减小。

表 6.5-37 主要潜在震源区和背景潜源对 ZK17 工程场地基岩反应谱（0.2s）的贡献

潜源/地震构造区背景源		震级上限	各概率档						
			50a63%	50a10%	50a2%	100a63%	100a10%	100a2%	100a1%
2	宜宾	6.5	47.3	74.2	87.2	57.5	79.9	92.0	94.4
11	荣昌	6.0	30.1	22.6	12.0	30.4	18.2	7.6	5.4
3	自贡	6.0	5.2	1.7	0.4	4.0	1.1	0.2	0.1
1	赤水	6.0	4.5	1.2	0.3	3.1	0.8	0.2	0.1
	渝黔地震构造区	5.5	3.2	0.2		1.5			
15	永善	7.5	2.0	0.1		0.9			

主要潜在震源区对目标区代表性控制点(ZK18)基岩地震动反应谱 2s 的贡献见表 6.5-38，场地反应谱 2s 地震动峰值的贡献主要来自工程场地所在的宜宾 6.5 级潜在震源区,且且随着峰值的增大贡献增加。与短周期处不同的是远场高震级潜源的贡献增加。

表 6.5-38　主要潜在震源区和背景潜源对 ZK18 工程场地基岩反应谱（2s）的贡献

潜源/地震构造区背景源		震级上限	各概率档						
			50a63%	50a10%	50a2%	100a63%	100a10%	100a2%	100a1%
1	宜宾	6.5	14.7	50.2	100.0	39.5	75.2	100.0	100.0
2	永善	7.5	11.5	10.0		11.3	5.3		
3	康定	8.0	10.0	9.1		10.1	4.8		
14	西昌	8.0	6.7	4.9		5.8	2.5		
15	泸沽	8.0	6.3	4.0		5.0	2.0		
23	荣昌	8.0	5.3	3.8		4.2	2.0		
24	汶川	8.0	4.5	3.2		3.9	1.6		

7 工程场地地震动参数的确定

影响地震动的主要因素包括震源机制、地震波传播路径和工程场地条件等。在前面对区域地震活动性、地震地质背景研究的基础上，用相应的基岩地震动加速度峰值衰减关系和反应谱衰减关系，计算的基岩地震动加速度峰值与反应谱值包含了震源和地震波传播路径对工程场地地震动的影响，本章将考虑工程场地土层条件的影响，进行工程场地地震反应分析，并确定工程场地地震动参数。

7.1 地震输入界面的确定

强震地面运动实际上是基岩输入波经土层滤波作用的结果。从土动力学的观点，土层的滤波作用主要由三个因素决定，即覆盖层厚度或基岩埋深；岩土阻抗比和覆盖层深度范围内剪切波随深度的变化特征。

基岩面以上的土层厚度即为严格意义上的覆盖层厚度。这一意义普遍超出了工程上允许考虑的尺度，另外，对建筑物的破坏作用主要是地震波中的中短周期成分，深层介质对这些成分的影响并不显著，故覆盖层厚度不必考虑得很大。理论研究表明，当下层波速远大于上层波速时，由上而下传播的 SH 波到达岩土界面时，只有很小一部分能量向下透射，即可把下卧土层当做地震输入界面。而这样理解的覆盖层厚度可能会很大，实际应用中困难不少。还有学者建议，当相邻两土层剪切波速 VS 下 / VS 上≥2 (相对标准)，且下面无更软弱层时，这样的土层界面深度定为覆盖层厚度，在工程实际应用中，相对标准很难掌握。

据勘察资料，取剪切波速大于 500m/s 的强风化或中风化岩层的顶面作为工程场地土层地震反应计算的地震输入界面。

7.2 工程场地基岩地震动时程

以基岩加速度反应谱和峰值为目标，用数值模拟的方法合成基岩地震动时程，作为工程场地地震反应分析的地震动输入波。

7.2.1 方法简介

目前，我国工程地震界常用的地震动合成方法有以下几个步骤：

1.用反应谱与功率谱的近似转换关系，将目标反应谱转换成相应的功率谱，转换关系为：

$$S(\omega)=\frac{\varepsilon}{\pi\omega}S_a^2(\omega)/\left(-\ln\left(-\frac{\pi}{\omega T}\ln(1-r)\right)\right) \tag{7.1}$$

其中：

ε ：阻尼比；S (ω)：功率谱；

Sa(ω)：目标反应谱；

T：持续时间；

r：超过目标反应谱值的概率。

2.用三角级数迭加法，生成零均值的平稳高斯过程

$$X(t)=\sum_{i=0}^{n}A_i\cos(\omega_i t+\phi_i) \tag{7.2}$$

其中：Ai=[4S(ωi)△ω]0.5，初相位ϕi 为[0－2π]均匀分布的随机变量。

3.将平稳时程乘以非平稳强度包线，得到非平稳的加速度时程

a(t)＝φ(t)·x(t) (7.3)

非平稳包线函数为如下形式：

$$\varphi(t)=\begin{cases}(t/t_1)^2 & 0\le t<t_1\\ 1 & t_1\le t\le t_2\\ e^{-c(t-t_2)} & t_2<t\le T\end{cases} \tag{7.4}$$

其中：

t1：峰值的上升段；

t2-t1：峰值的平稳段；

T：持续时间；

c：峰值的衰减系数；

t1、t2-t1 和 C 由统计计算得出。

由于式(8.1)表示的反应谱与功率谱的关系是近似关系,所以按初始时程 a (t)计算出来的反应谱一般只近似于目标谱，符合的程度也是概率平均的。为了提高拟合精度，还需要进行迭代调整。通用的方法是按下式调整式(8.2)中的傅氏幅值谱。

$$A^{i+1}(\omega_k)=\frac{S_a^T(\omega_j)}{S_a(\omega_j)}A^i(\omega_k) \qquad N_{1j}<k\le N_{2j} \tag{7.5}$$

式中 Ai(ωk)和 Ai+1(ωk)分别为第 i 和 i+1 次迭代的结果，$S_a^T(\omega_j)$和$S_a(\omega_j)$为第 j 个控制点的目标谱和计算反应谱。采用上述方式对幅值谱调整仅局限在控制

频率ωj 附近的 N1j－N2j 个傅里叶分量。通常ω1j 和ω2j 按下述方法选取：

$$\omega_{1j} = \frac{1}{2}(\omega_{j-1} + \omega_j) \tag{7.6}$$

$$\omega_{2j} = \frac{1}{2}(\omega_j + \omega_{j+1}) \tag{7.7}$$

将频段ω1j－ω2j 称为ωj 的主控频段。对于目标谱控制点ωj，迭代运算时只改变主控频段的幅值谱，这是因为在整个频段中，由于共振原理主控频段频率分量的改变对ωj 反应谱的变化最为敏感，另一方面调整幅值谱时还应尽量将幅值谱变化的影响局限在特定的控制频率ωj 附近，以避免在拟合ωj 频率处的目标反应谱时对其邻近控制频率处的反应谱带来过大影响。对幅值谱进行多次迭代修正，即可使反应谱向目标谱逼近。在对幅值谱进行迭代修正的同时，还对相位谱进行迭代修正。

7.2.2 持时参数的确定

本报告的地震动持续时间的选取参考了霍俊荣的研究成果。

LgY=a1+a2M+a3Lg(R+R0)　　（7.8）

其中：Y：持时参数，可以是 t1，Ts，c；Ts：峰值平稳段的持时，即 t2－t1；M：震级；R：震中距。

将地震危险性分析结果所得到的与各超越概率相应的等效震级和等效距离代入（7.8 式），同时采用《地震安全性评价技术教程》P312 的表 19.7.2 中的系数，计算得到包络线参数 t1，ts 和 c（表 7.2-2）。

表 7.2-1　各超越概率峰值对应的等效震级和等效距离

参数	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
等效距离	31.7	20.1	17.1	26.2	18.7	17.2	16.5
等效震级	4.0	4.67	5.52	4.0	5.05	5.8	6.1

表 7.2-2　各超越概率相应的持时参数

参数 Y	工程场地	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
t_1	基岩	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
T_2	基岩	14	16	23	15	18	25	27
c	基岩	0.12	0.10	0.08	0.11	0.09	0.08	0.07

7.2.3 基岩地震动时程的合成结果

在合成基岩地震动时，50 年 63%、10%和 2%、100 年超越概率 63%、10%、2%和 1%所对应的目标加速度峰值和反应谱取地震危险性分析得到的结果。为了考虑相位随机的影响，每个概率水准都合成 5 个不同随机相位的地震动时程样本。合成的时程均以 0.02 秒为间隔，其离散点数为 4096。在合成过程中，利用逐步逼近目标谱的方法，使合成的加速度时程谱近似满足目标谱，拟合相对误差小于 5%。

本项目使用 SEC 软件进行人工地震动合成，考虑到报告的可读和实用性，报告中仅编排钻孔 ZK1 的加速度、速度和位移时程（图 7.2-1.1～图 7.2-6.5），如图所示合成地震动的加速度时程所对应的速度和位移时程无基线漂移。

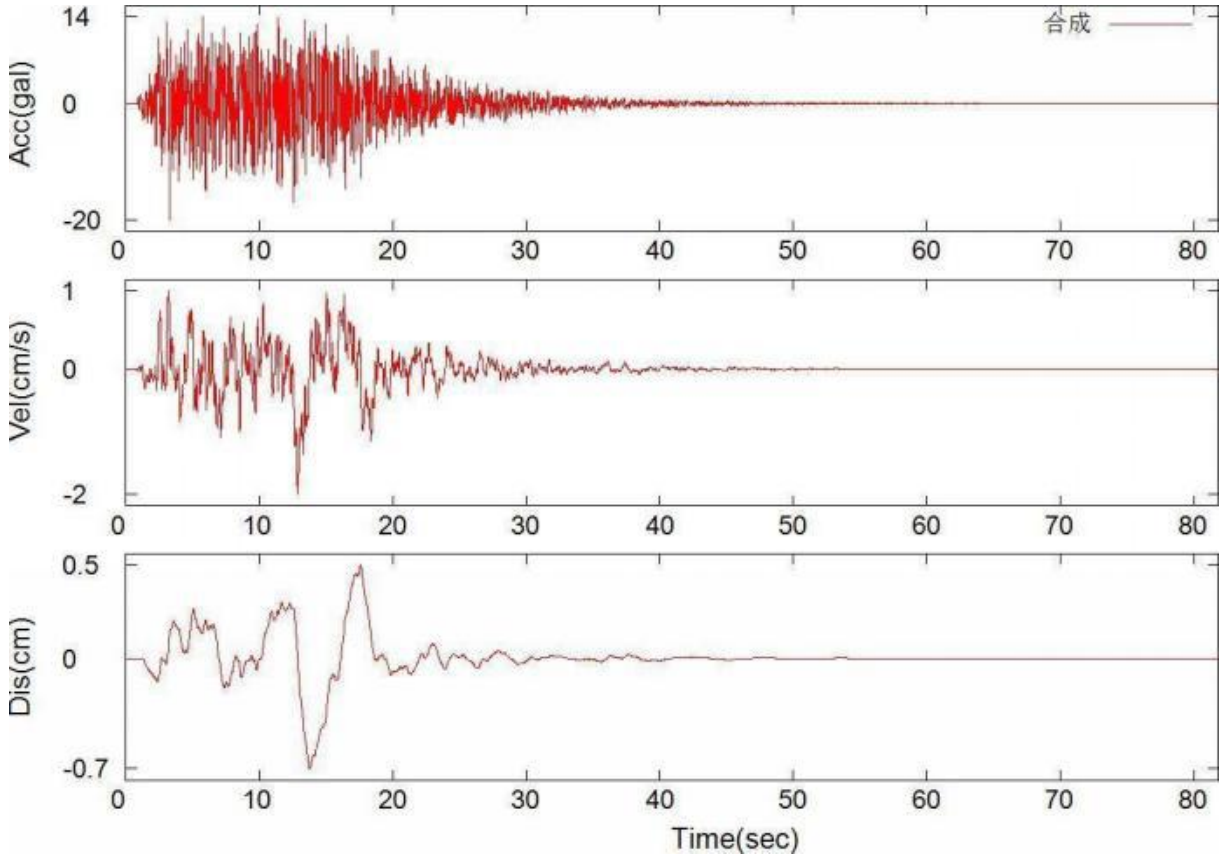


图 7.2-1.1　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

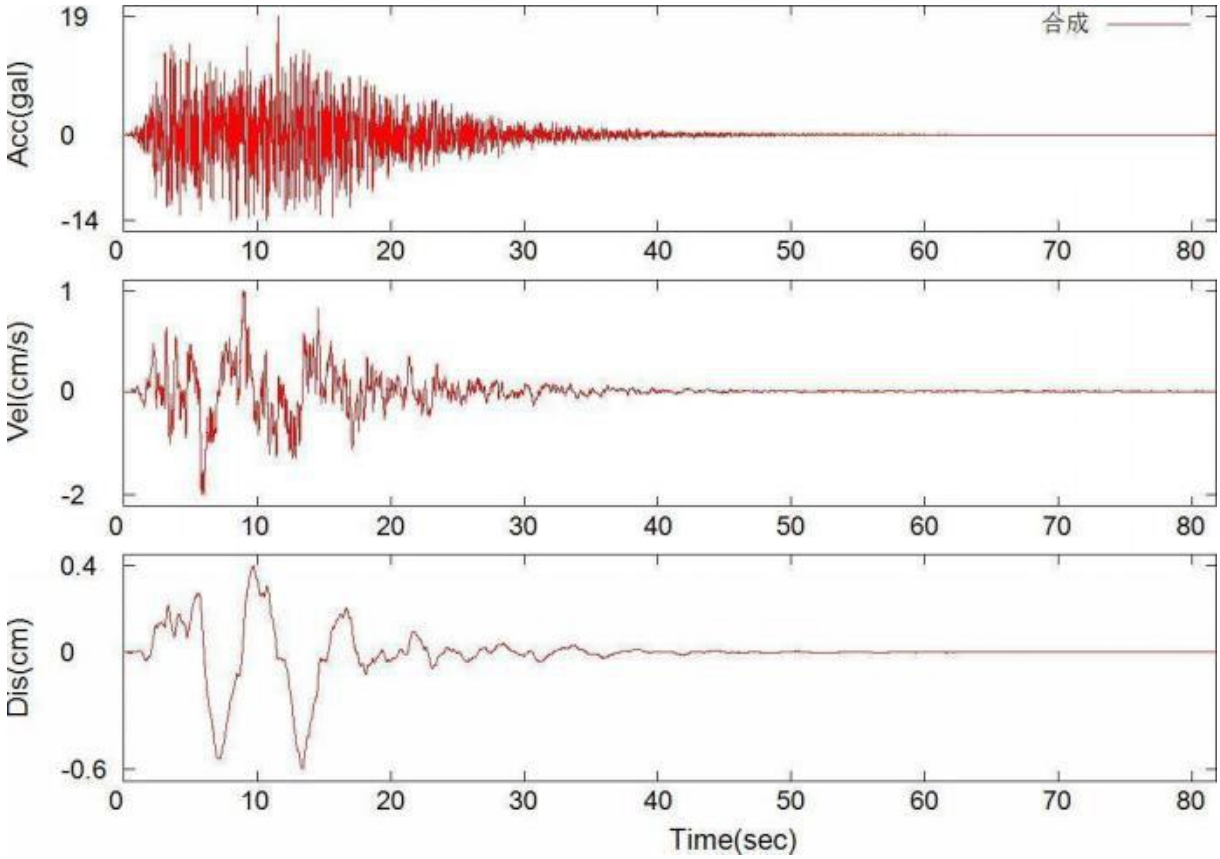


图 7.2-1.2　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

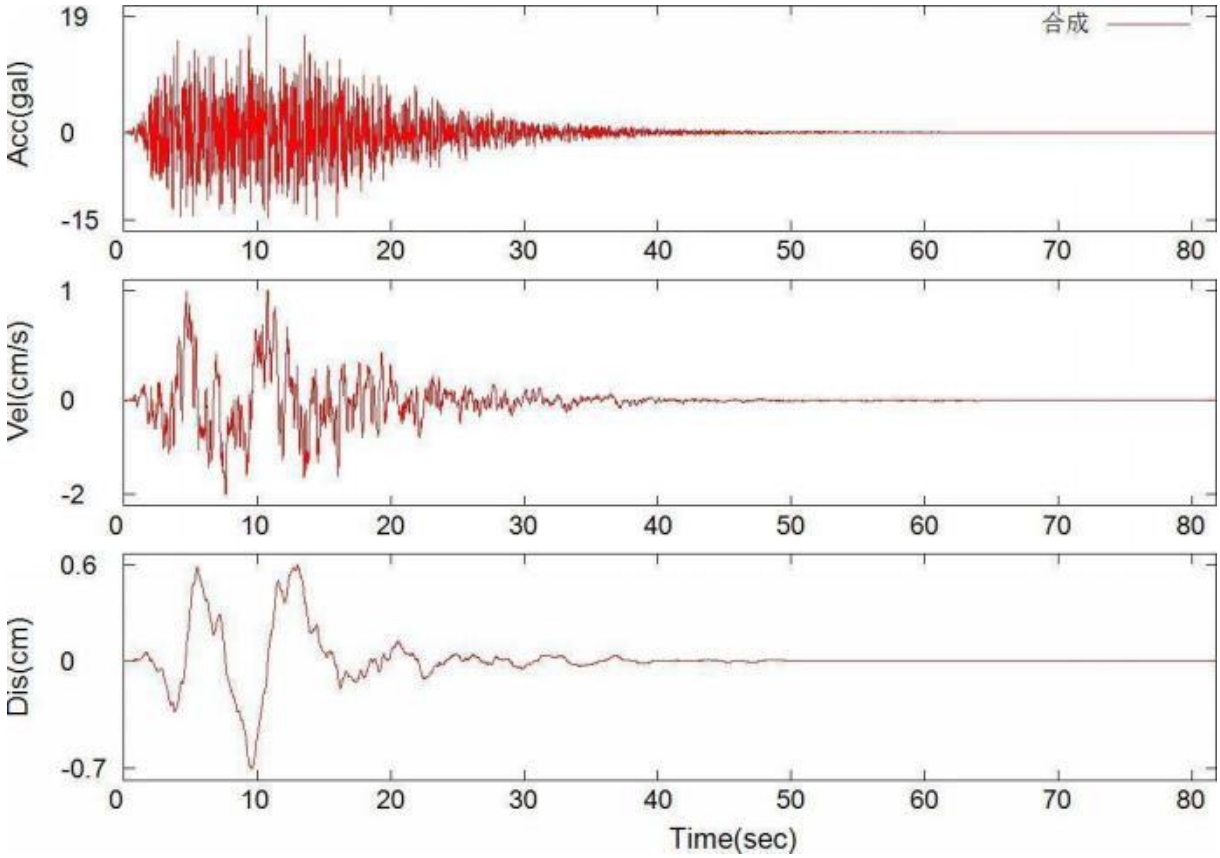


图 7.2-1.3　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

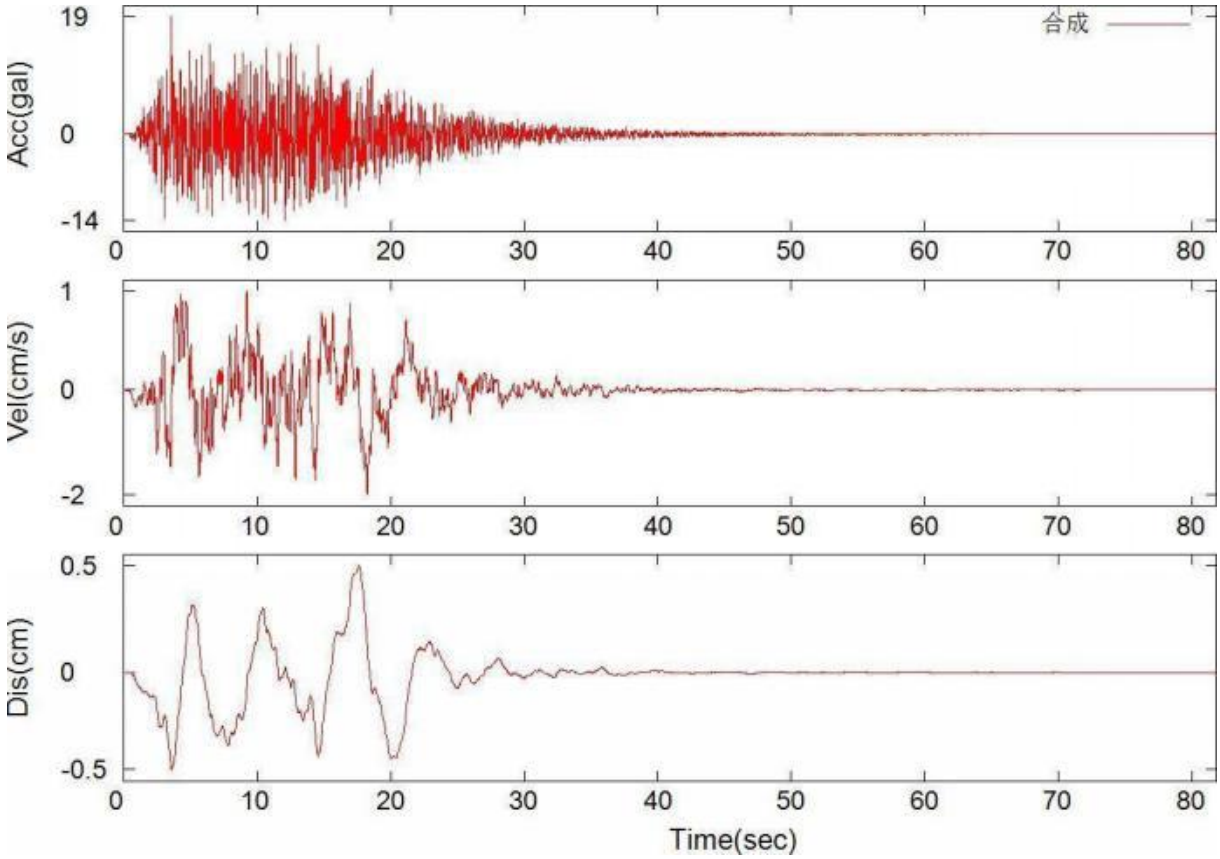


图 7.2-1.4　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

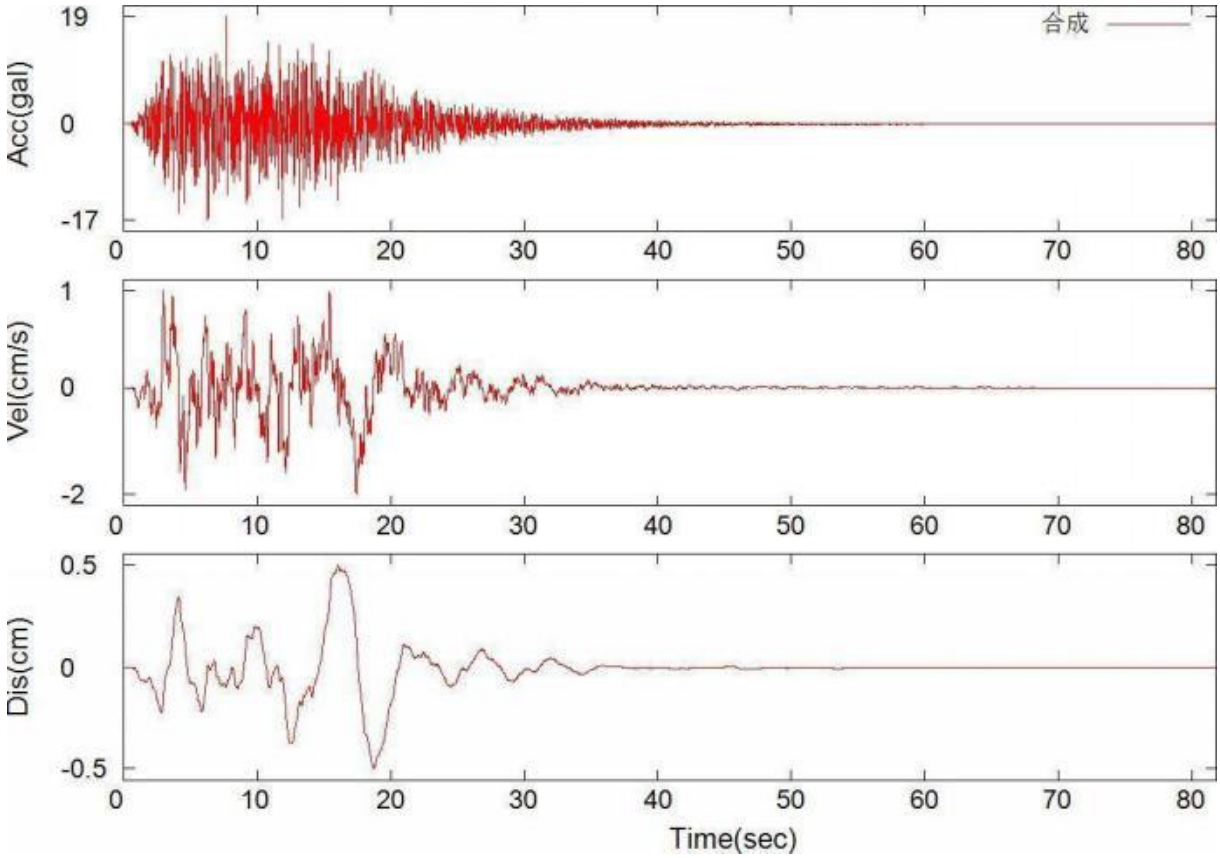


图 7.2-1.5　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

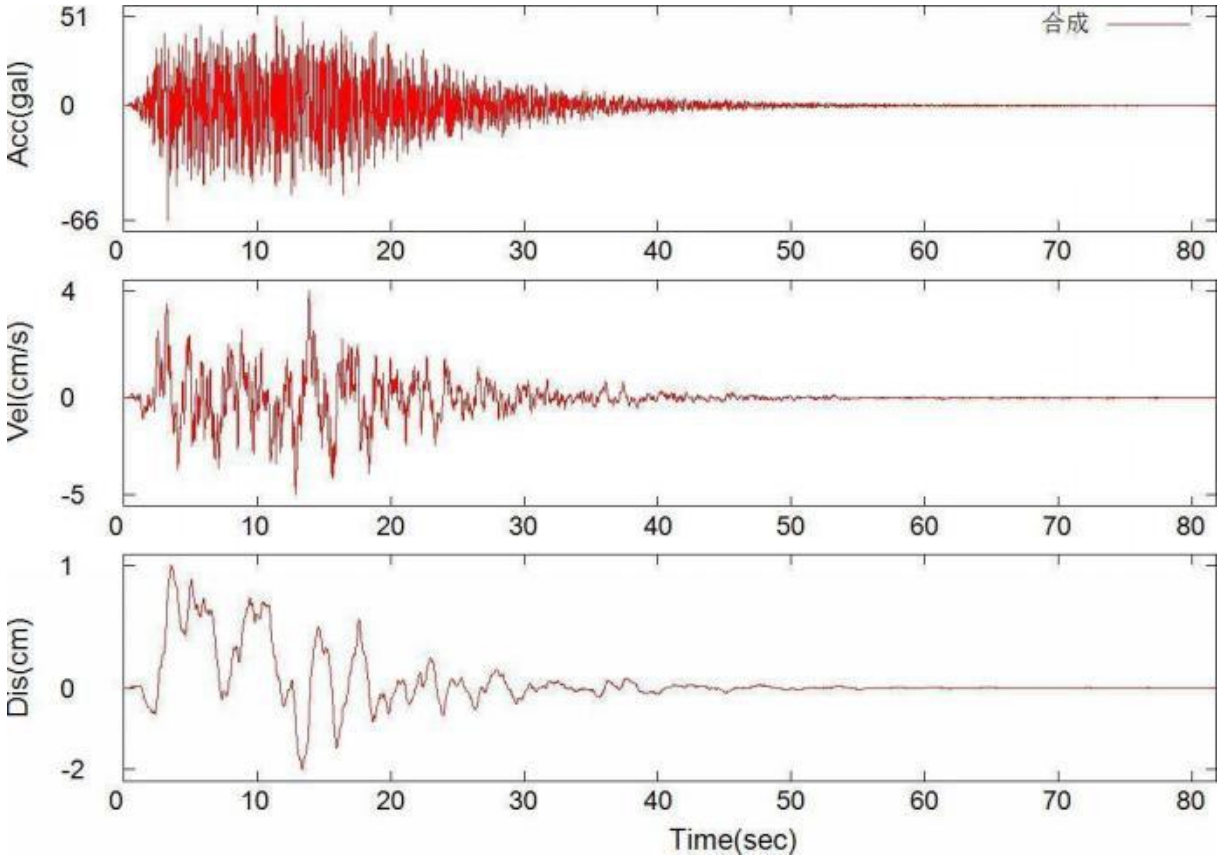


图 7.2-2.1　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

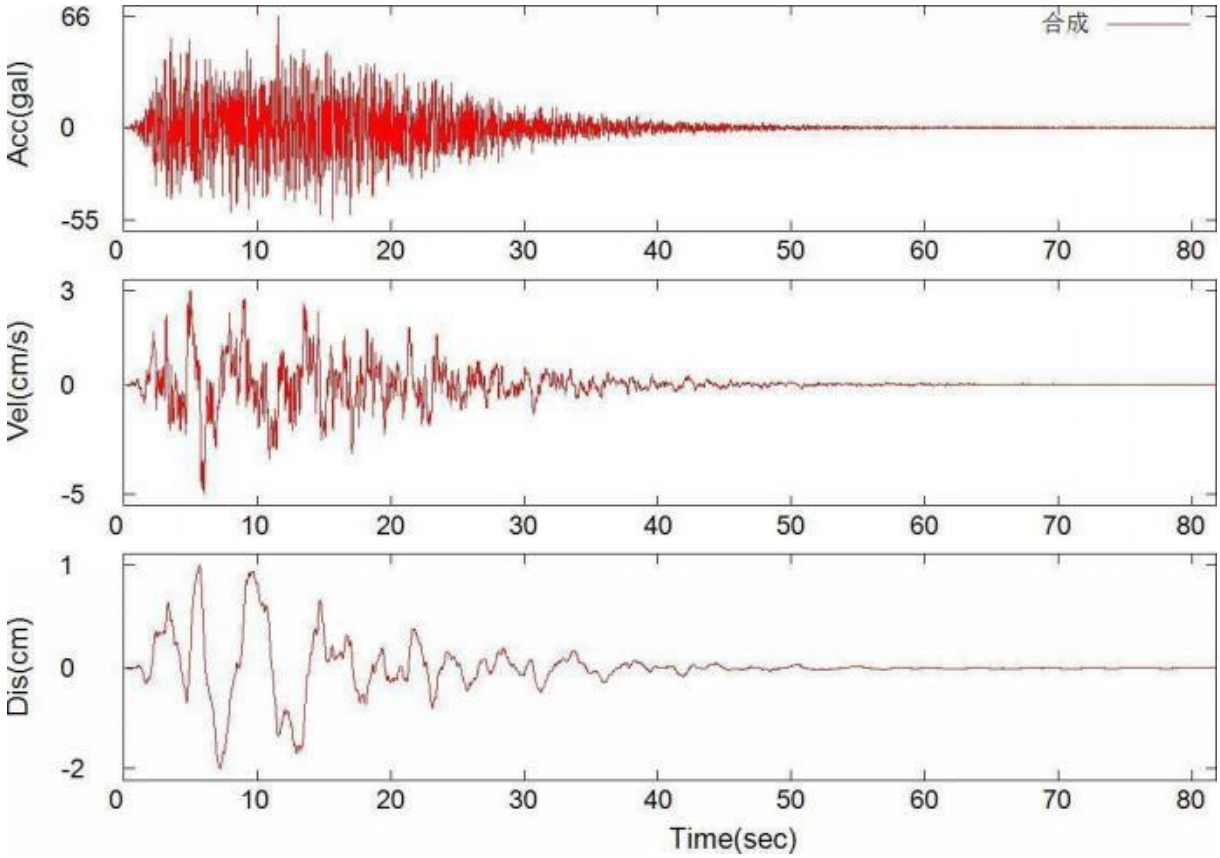


图 7.2-2.2　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

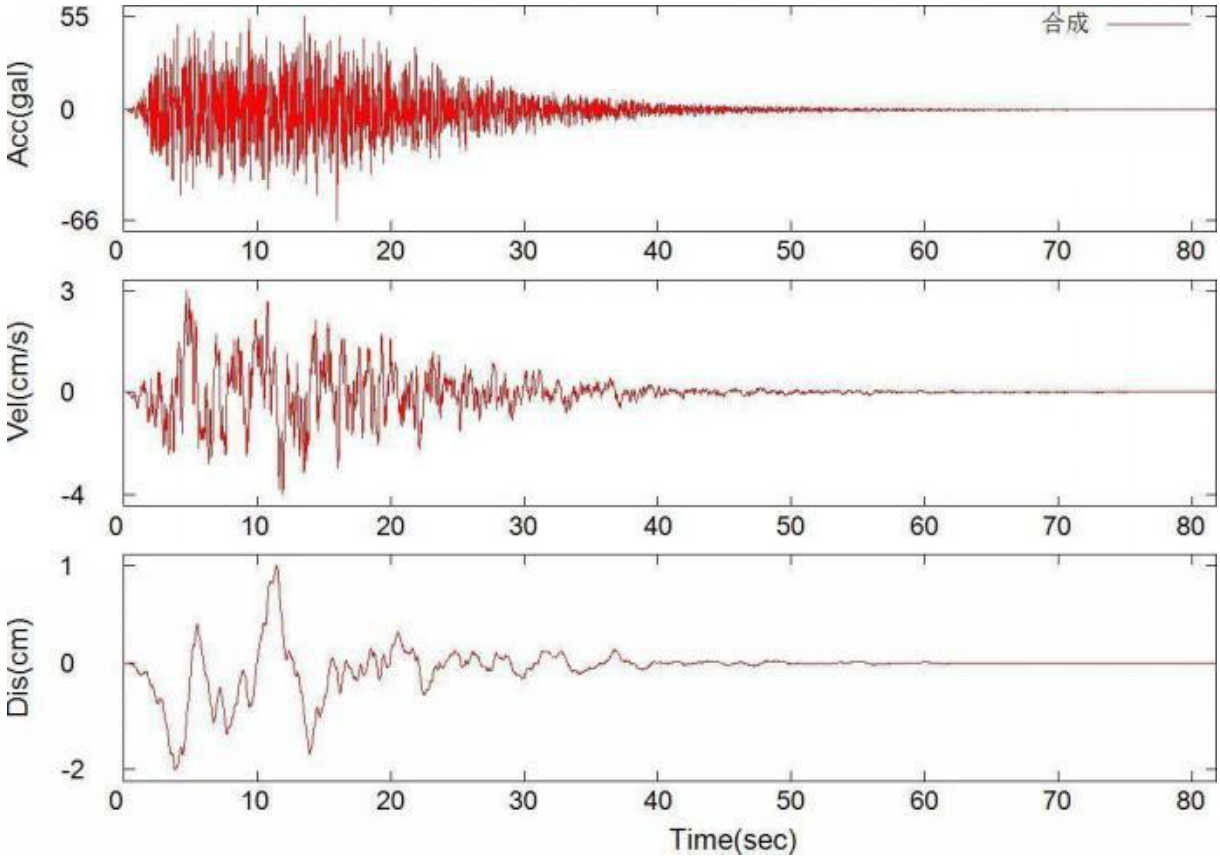


图 7.2-2.3　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

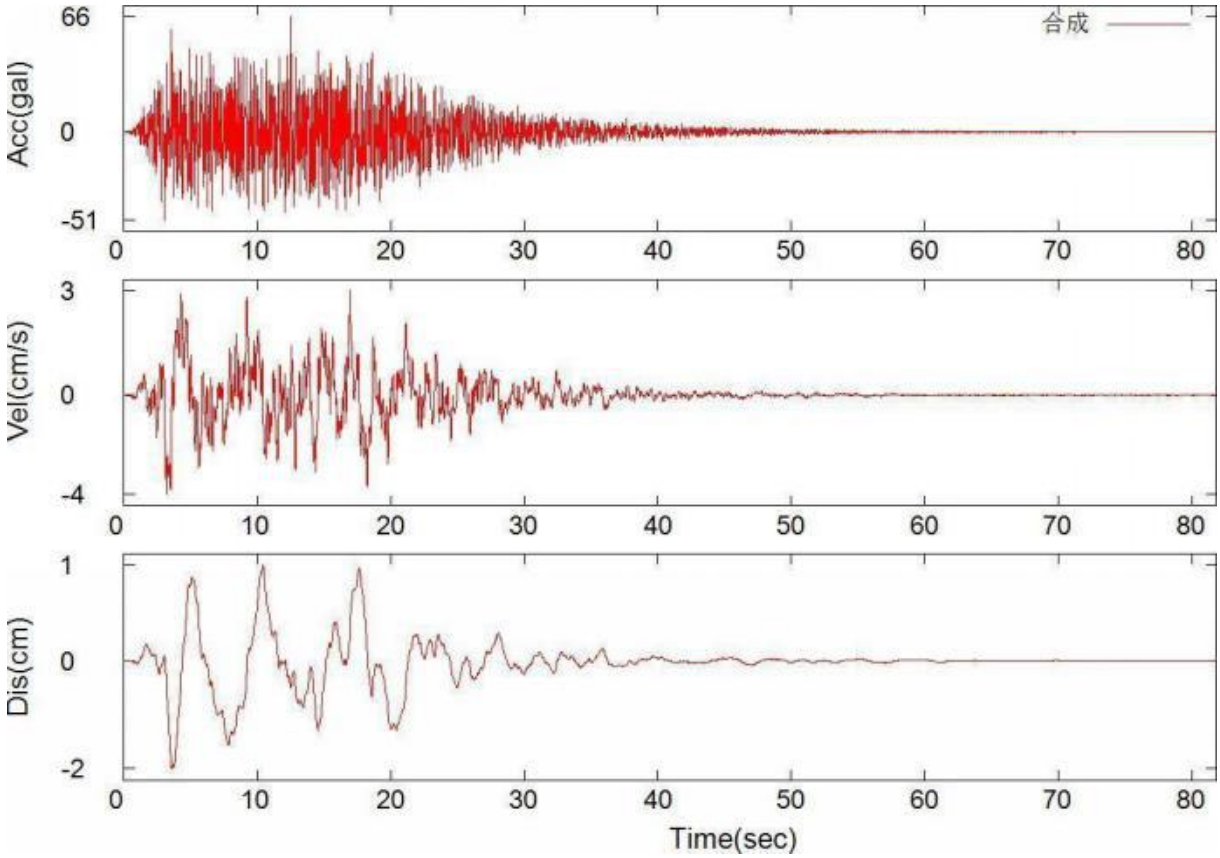


图 7.2-2.4　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

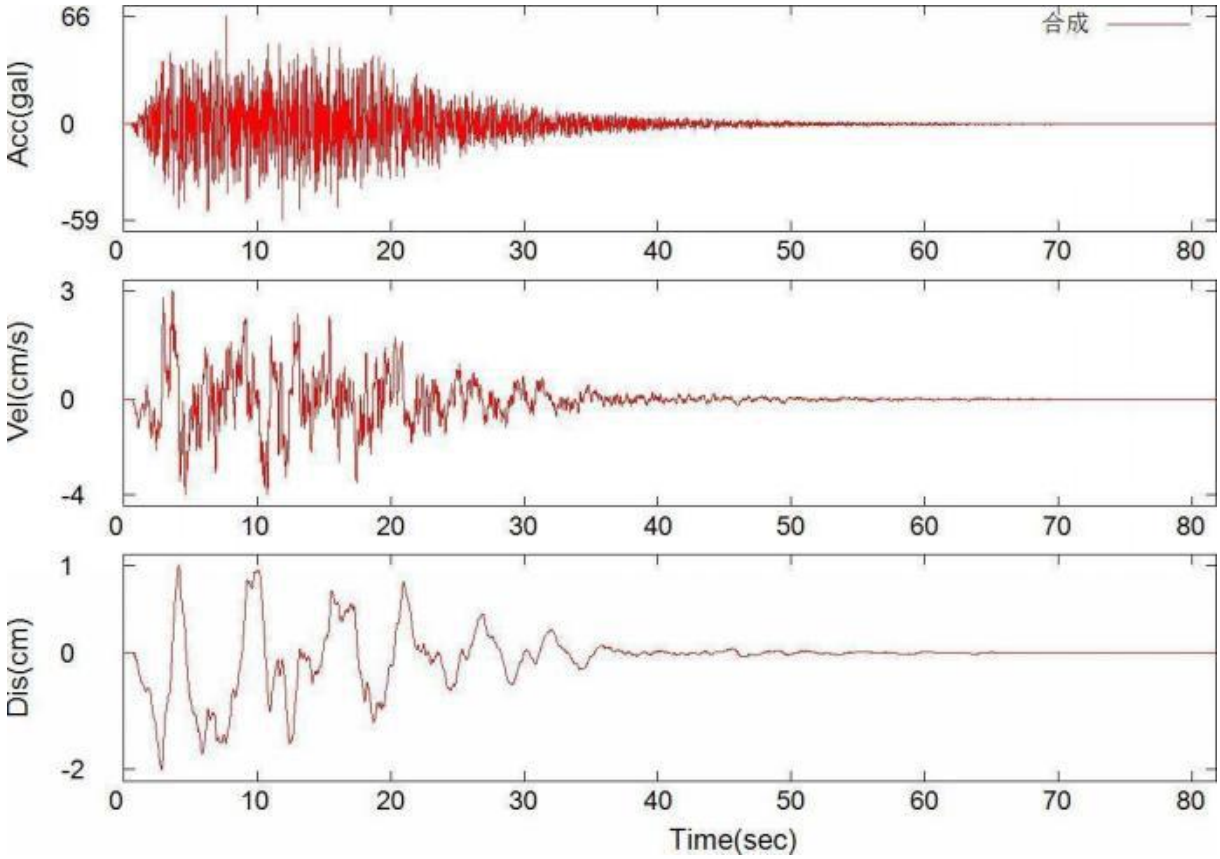


图 7.2-2.5　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

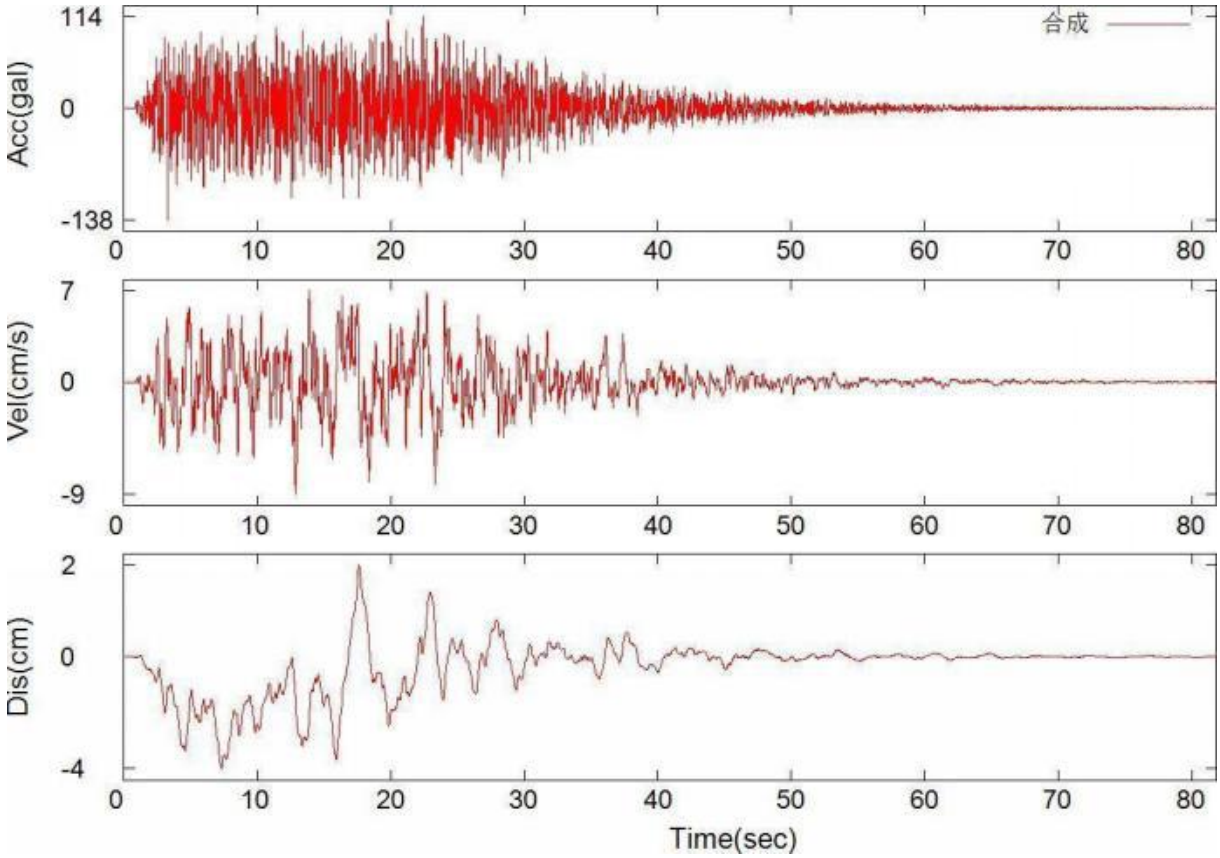


图 7.2-3.1　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

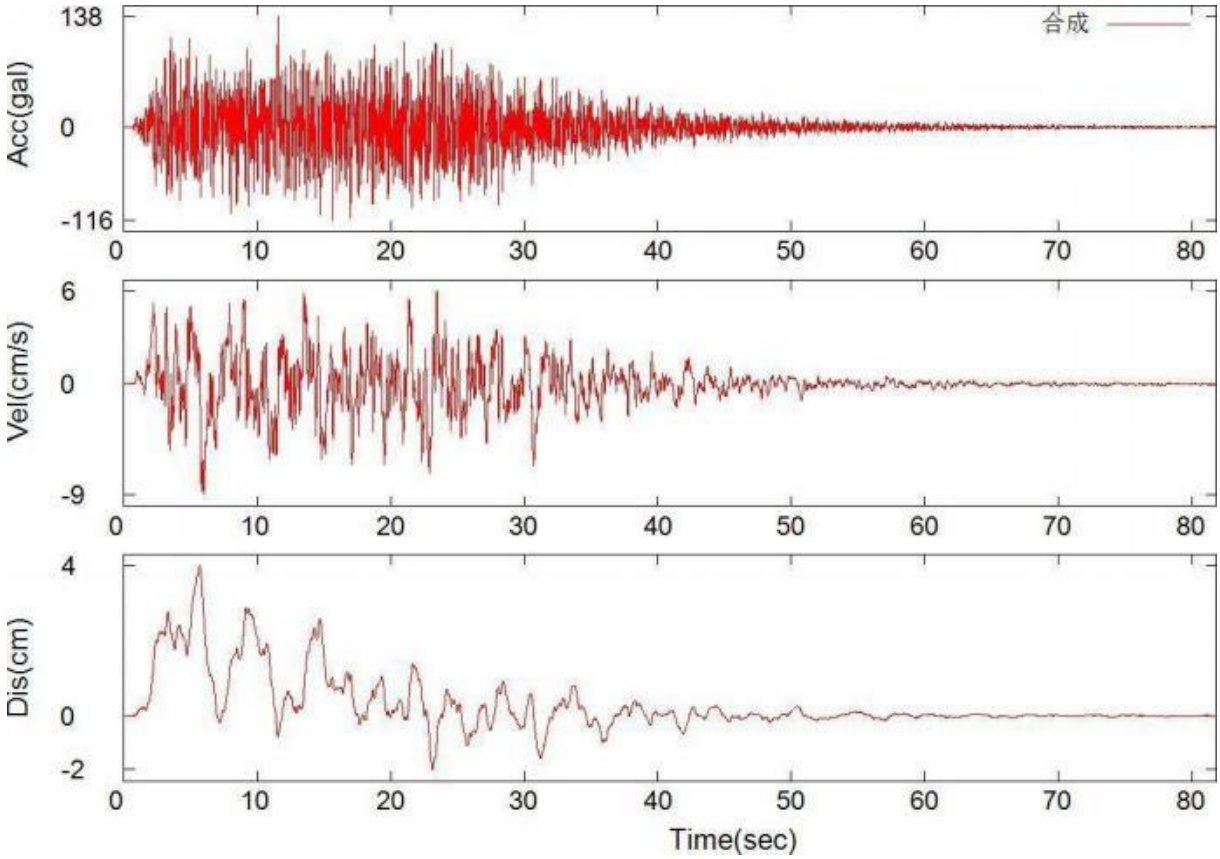


图 7.2-3.2　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

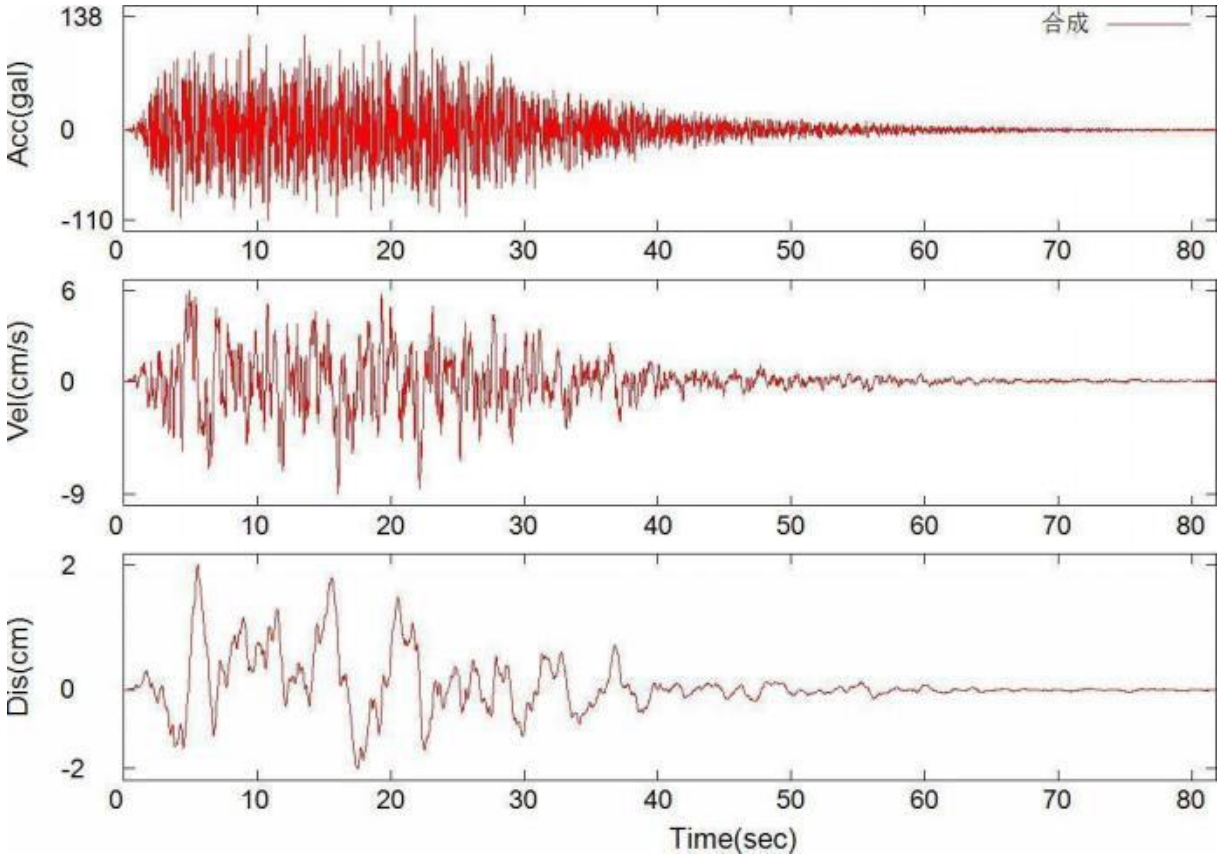


图 7.2-3.3　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

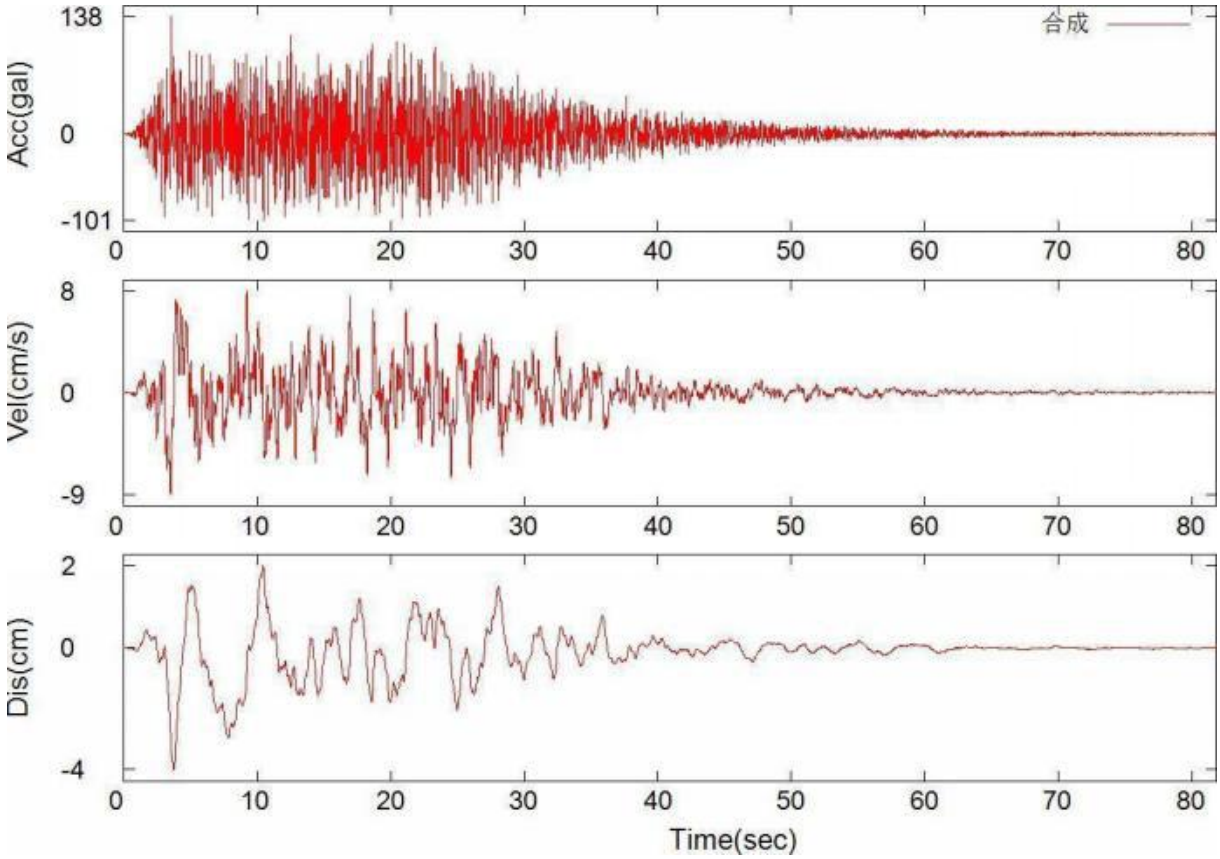


图 7.2-3.4　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

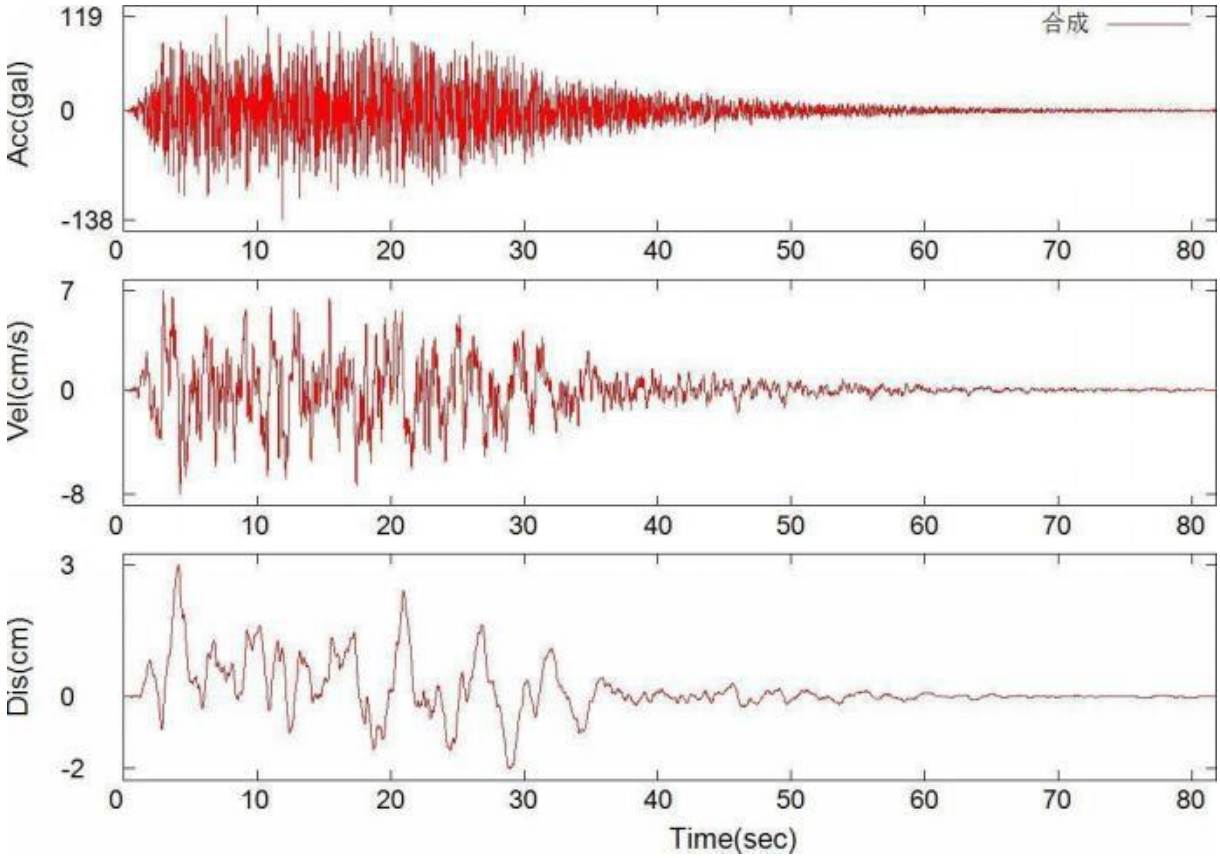


图 7.2-3.5　场地 ZK1 钻孔基岩 50 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

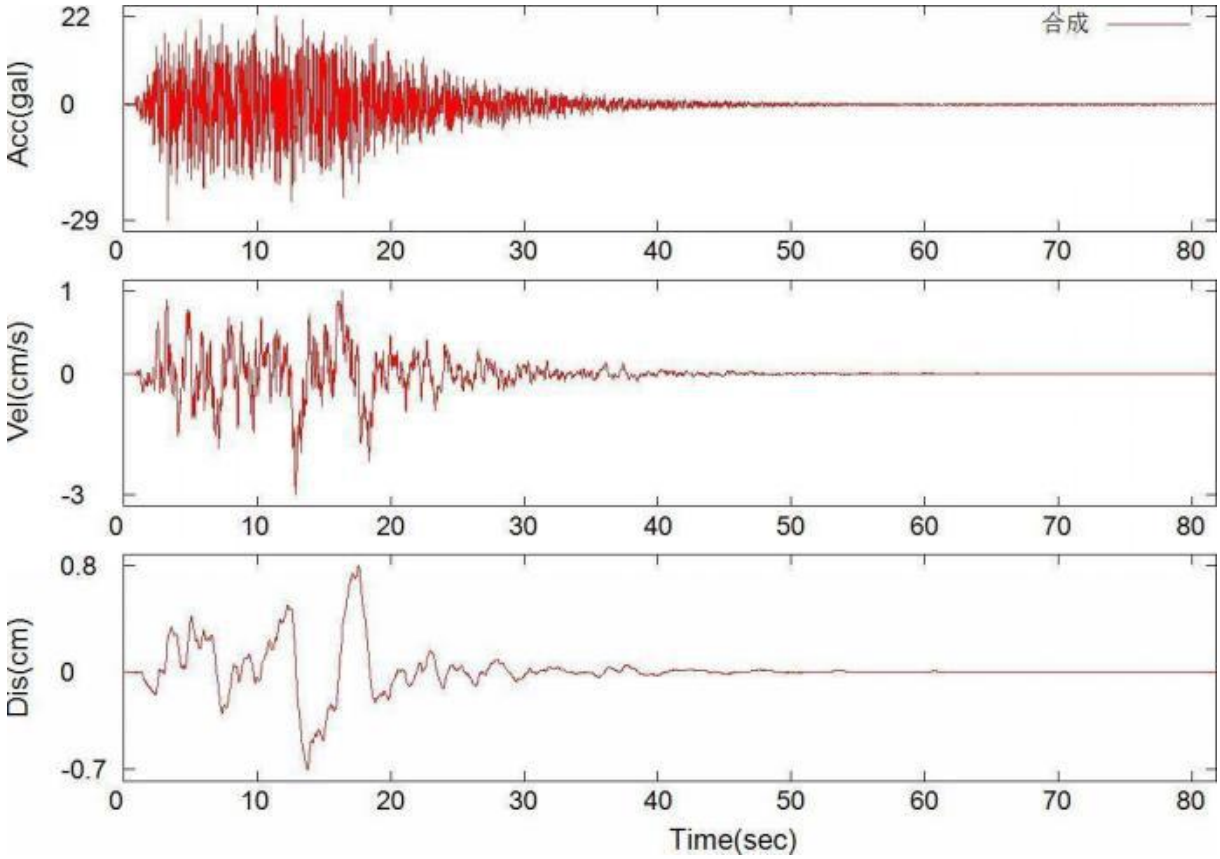


图 7.2-4.1　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

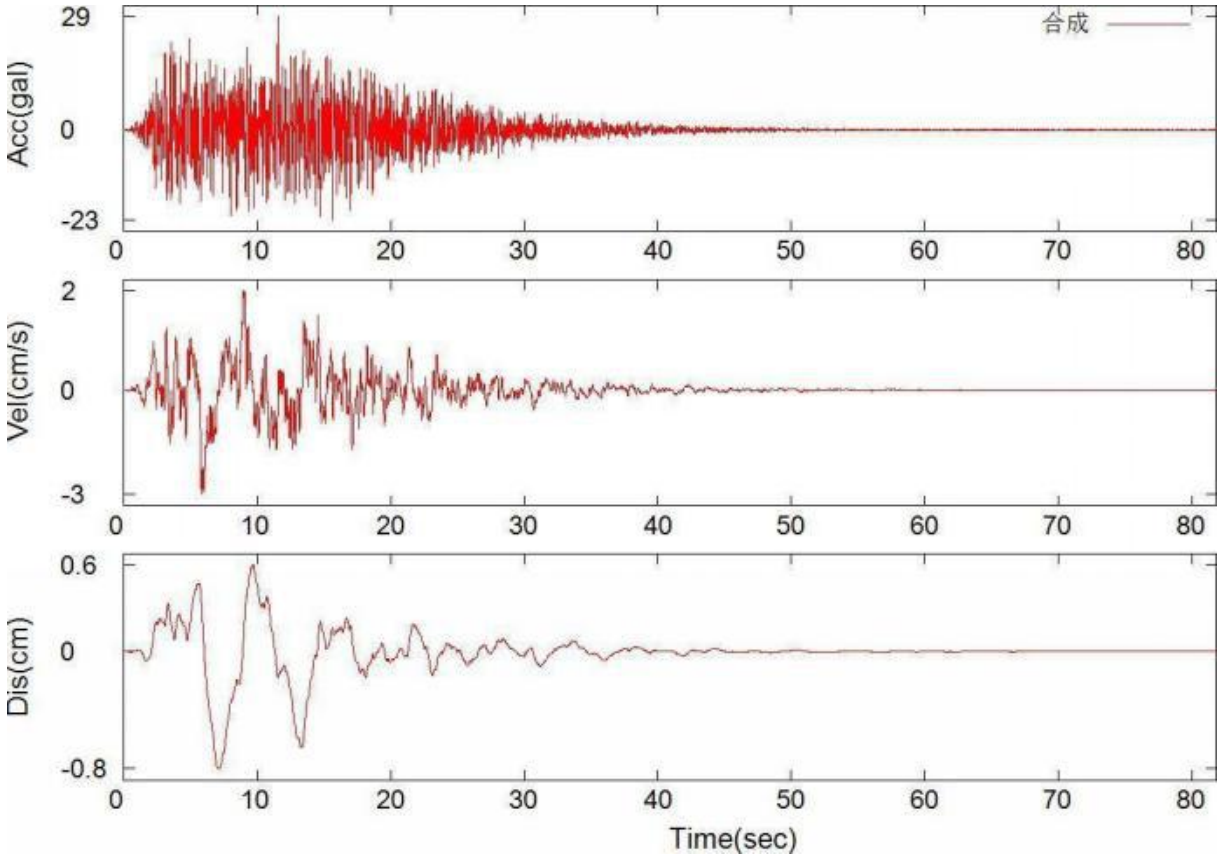


图 7.2-4.2　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

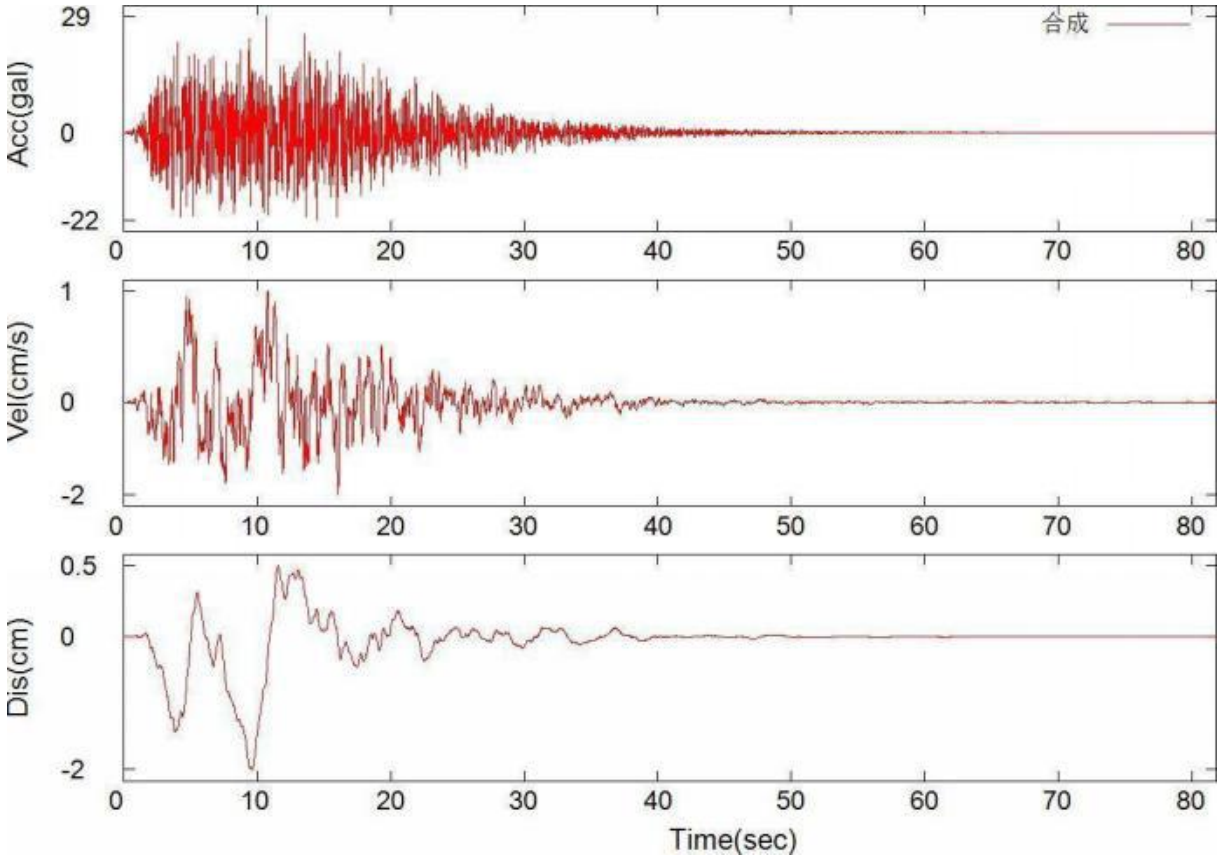


图 7.2-4.3　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

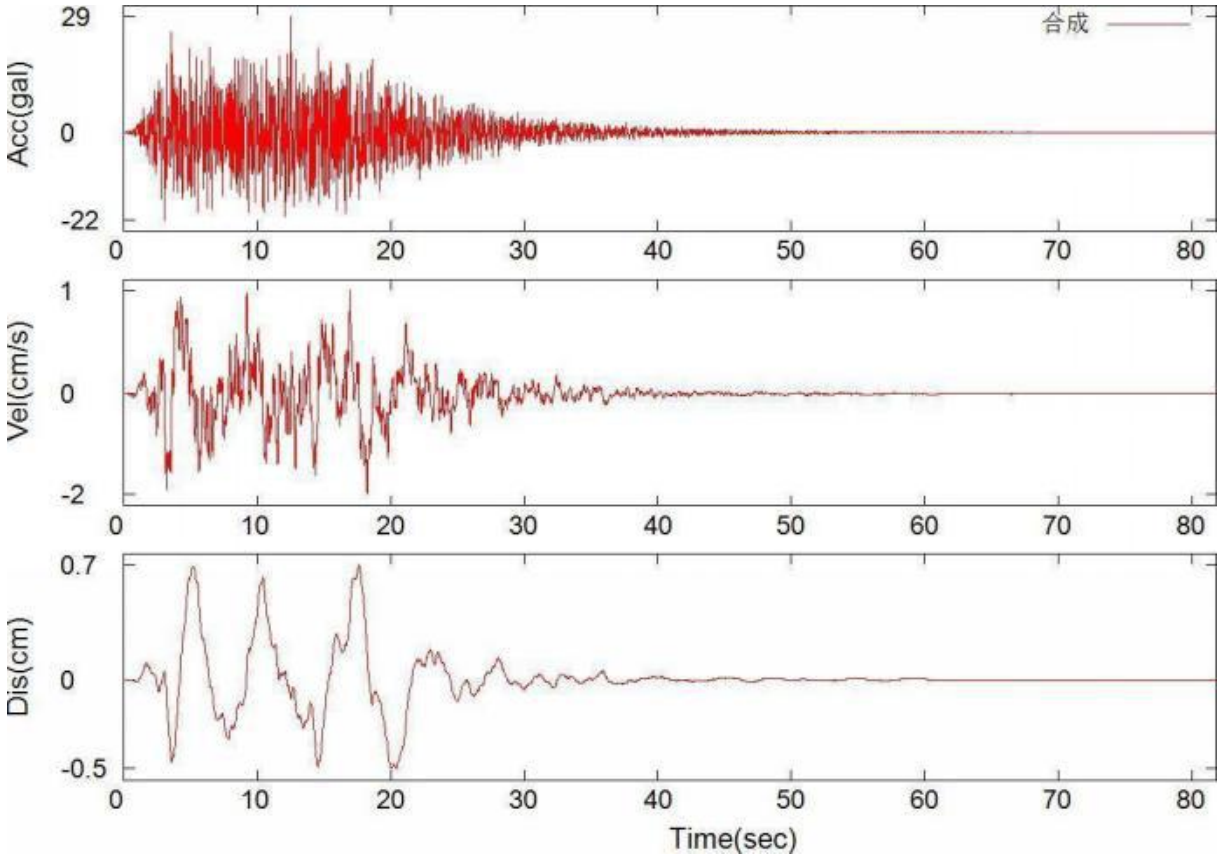


图 7.2-4.4　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

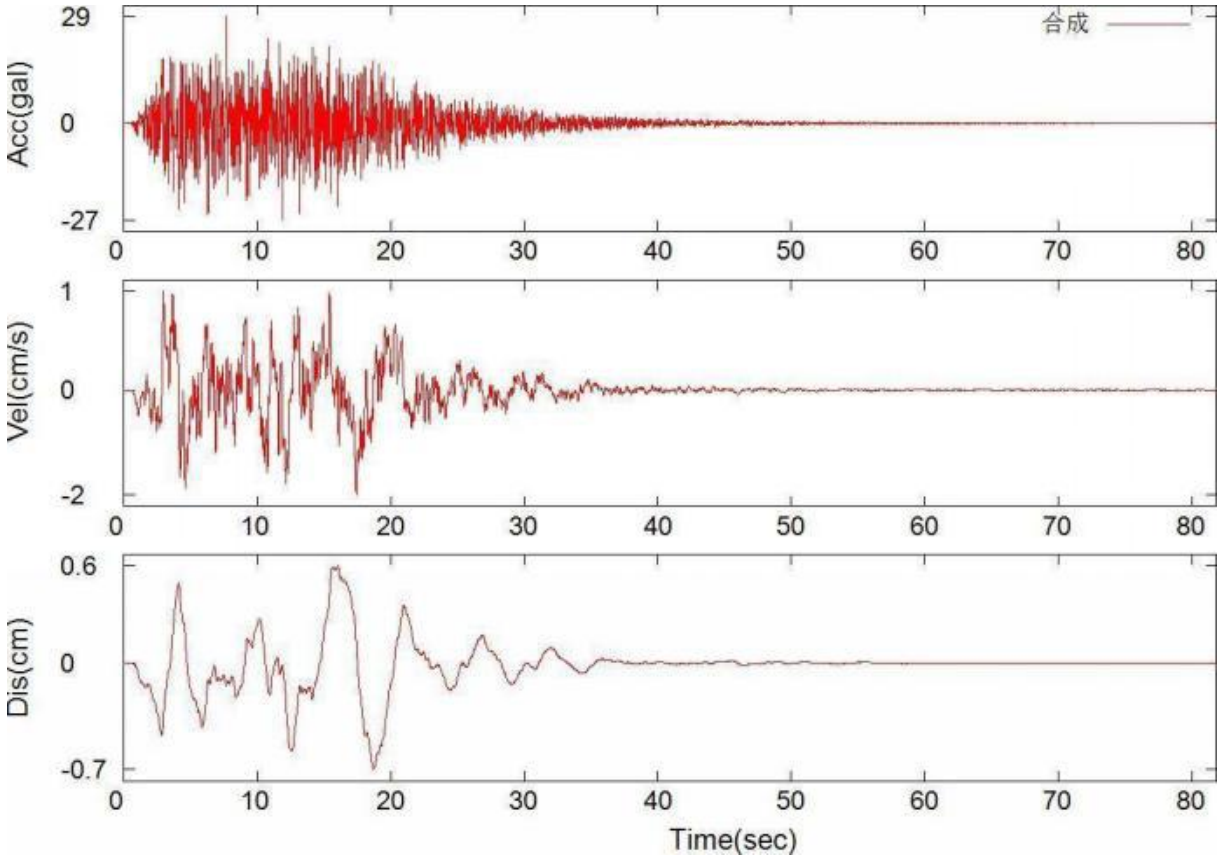


图 7.2-4.5　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 63%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

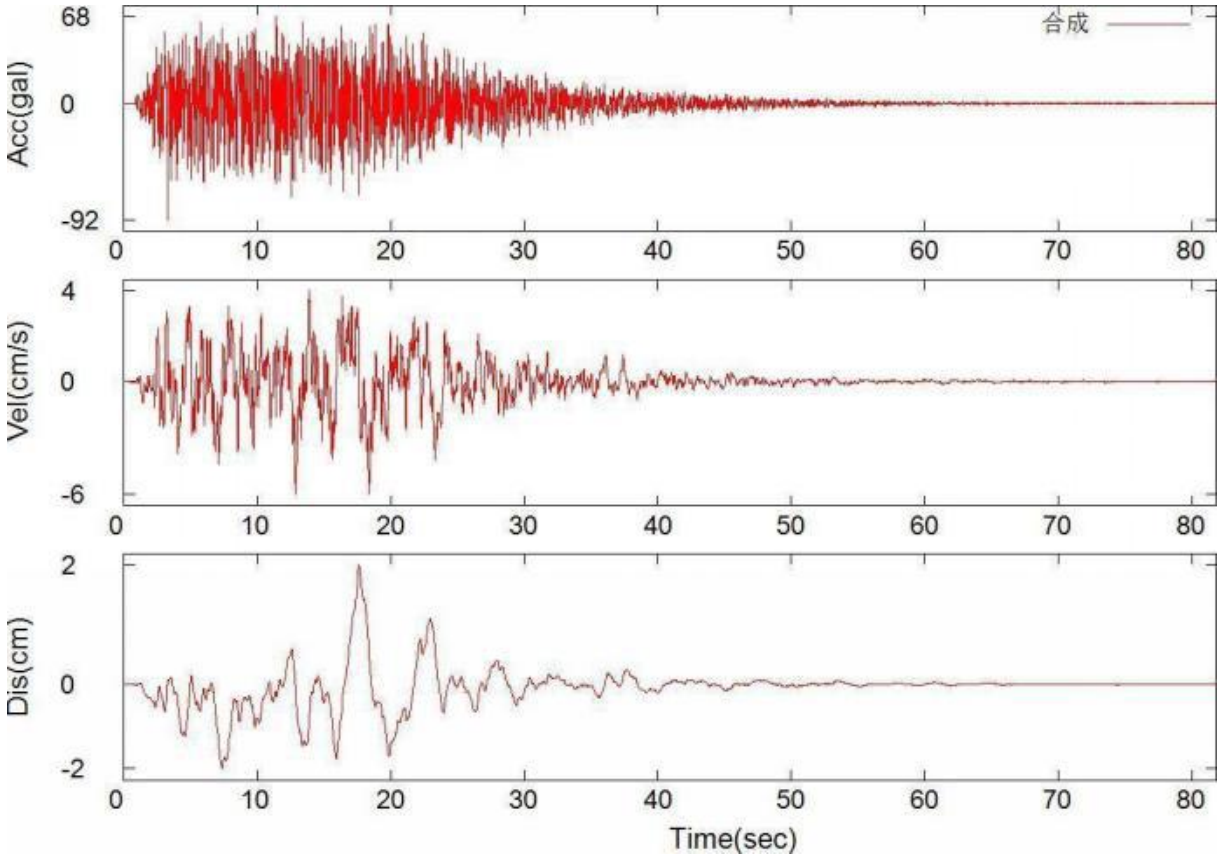


图 7.2-5.1　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

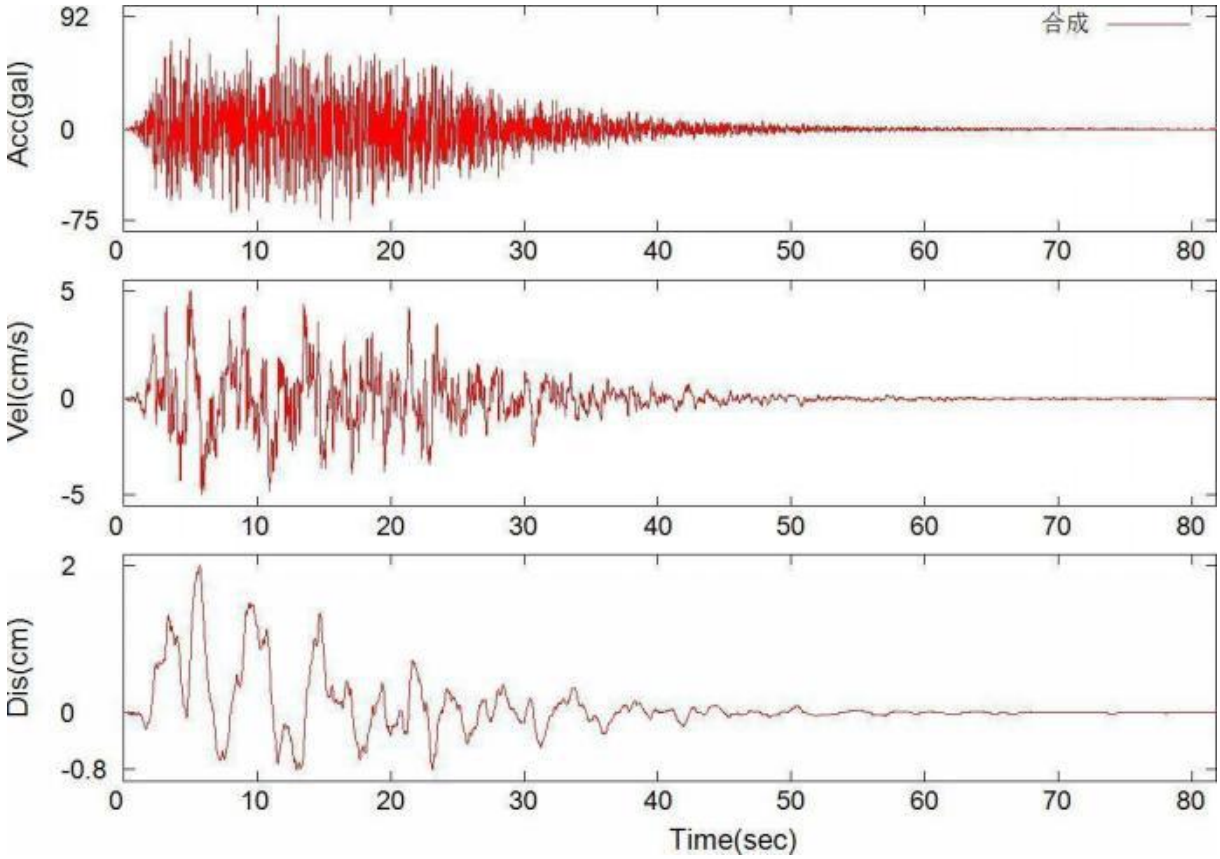


图 7.2-5.2　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

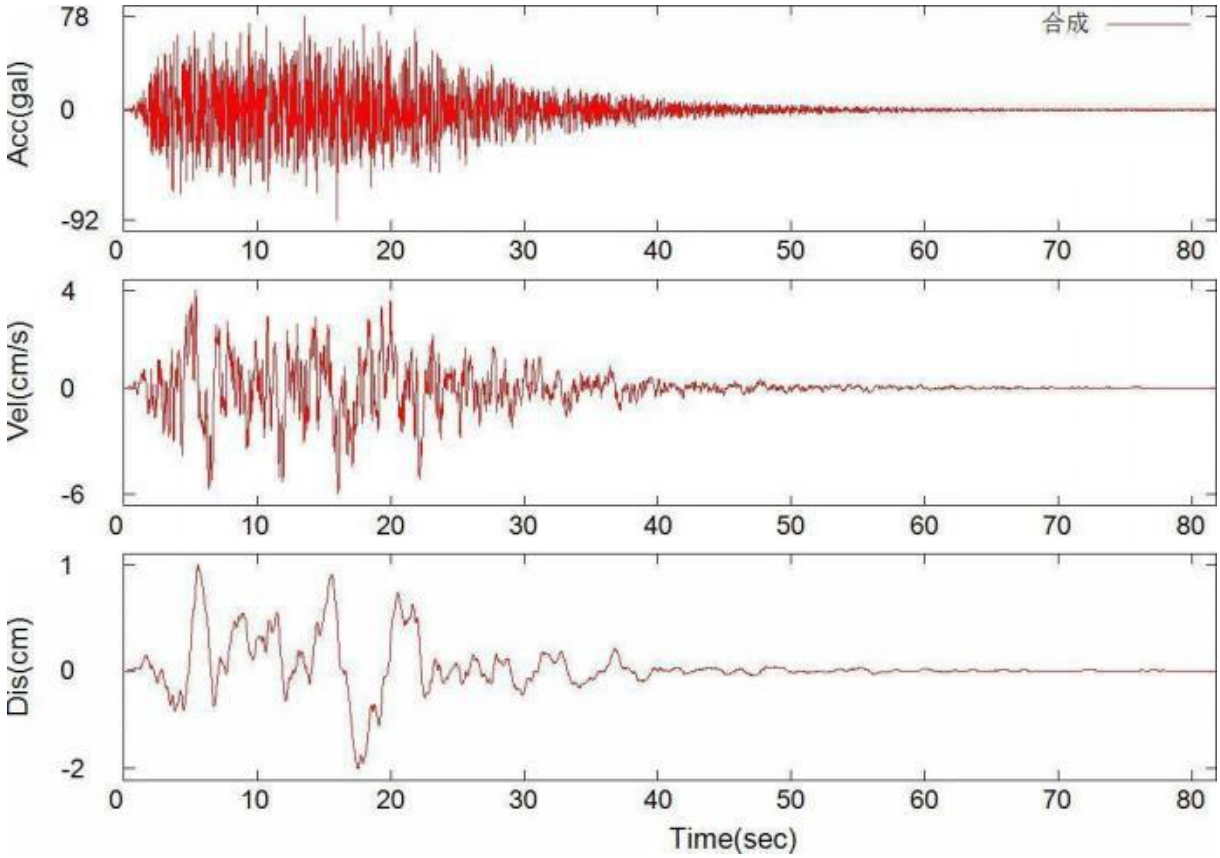


图 7.2-5.3　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

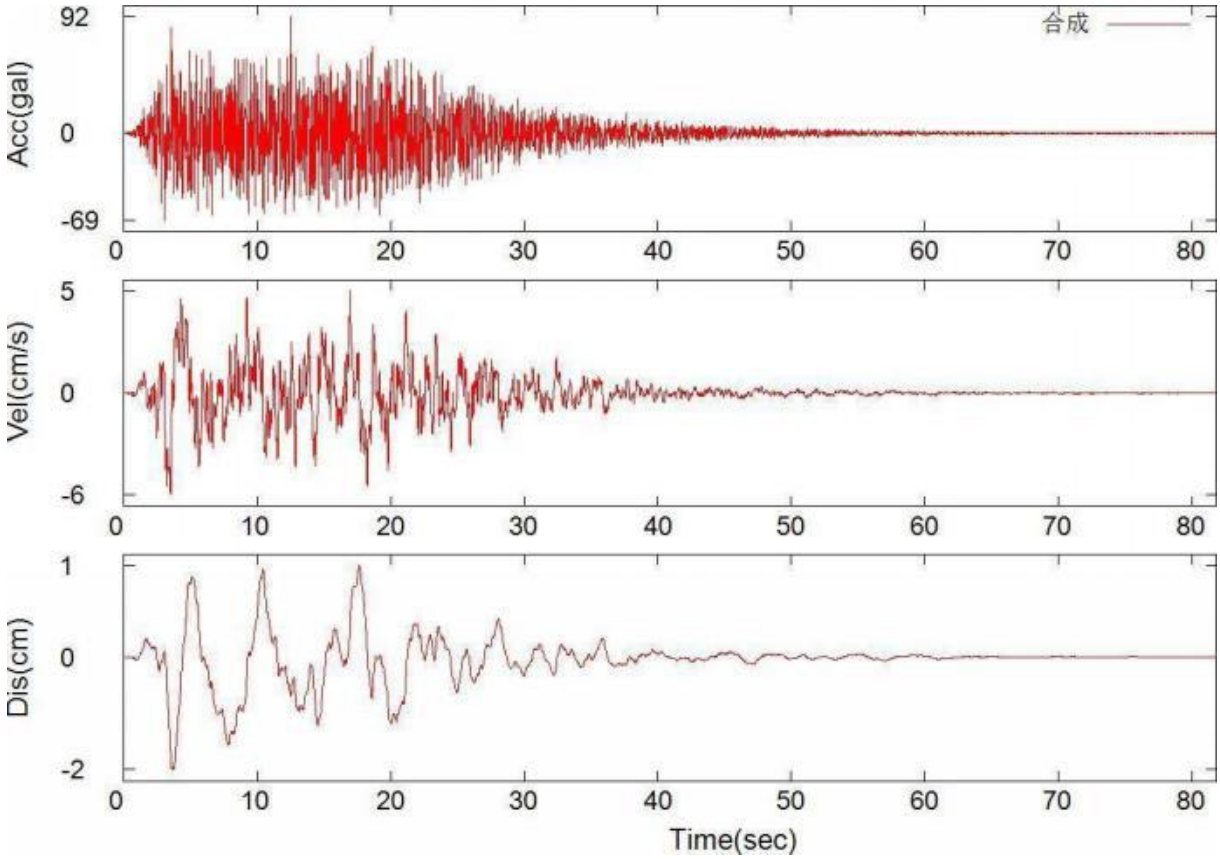


图 7.2-5.4　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

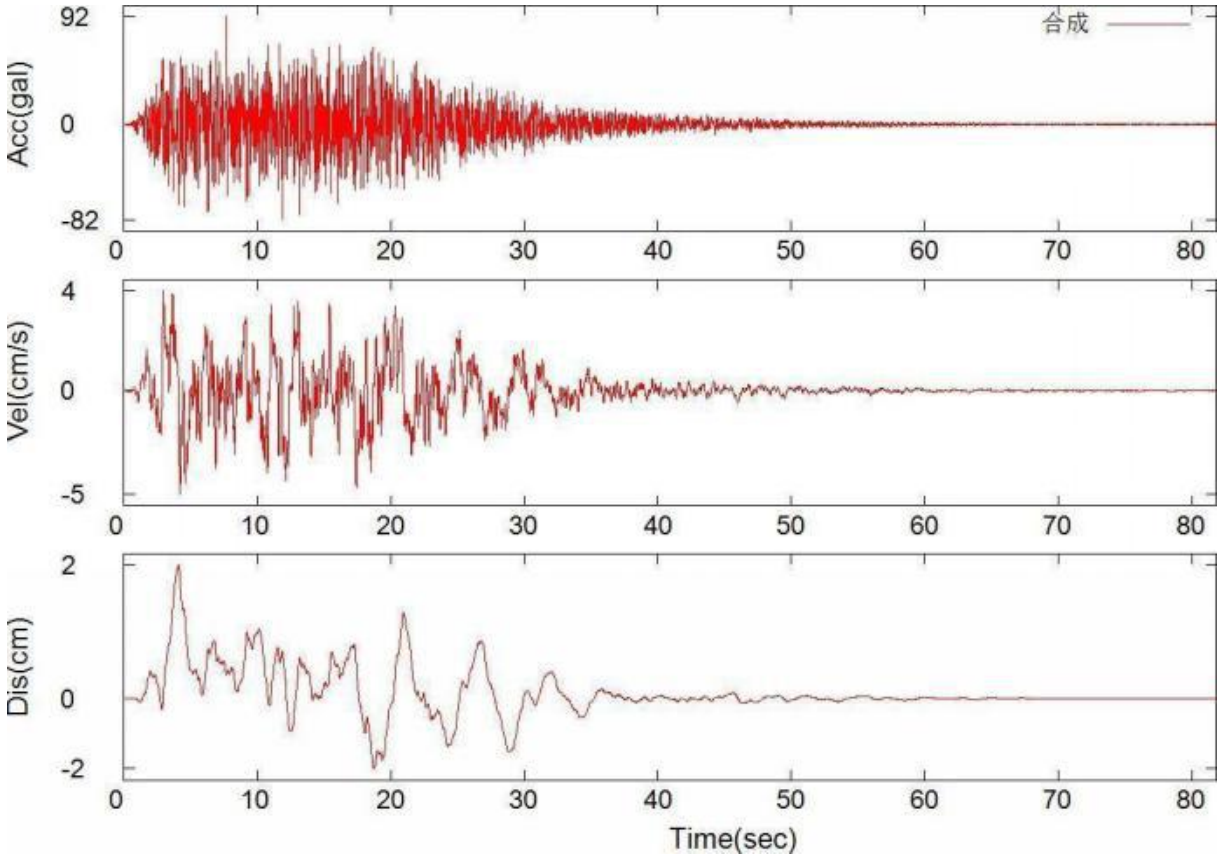


图 7.2-5.5　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 10%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

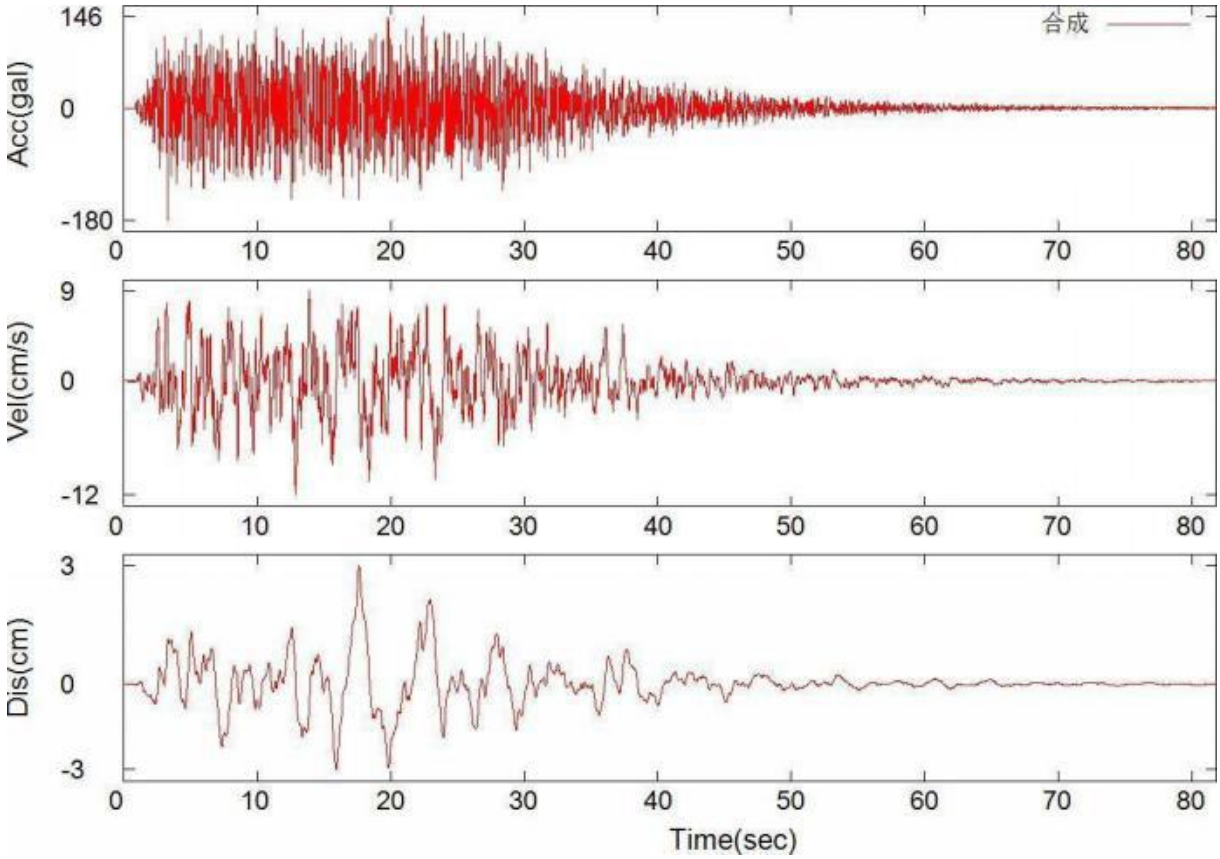


图 7.2-6.1　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

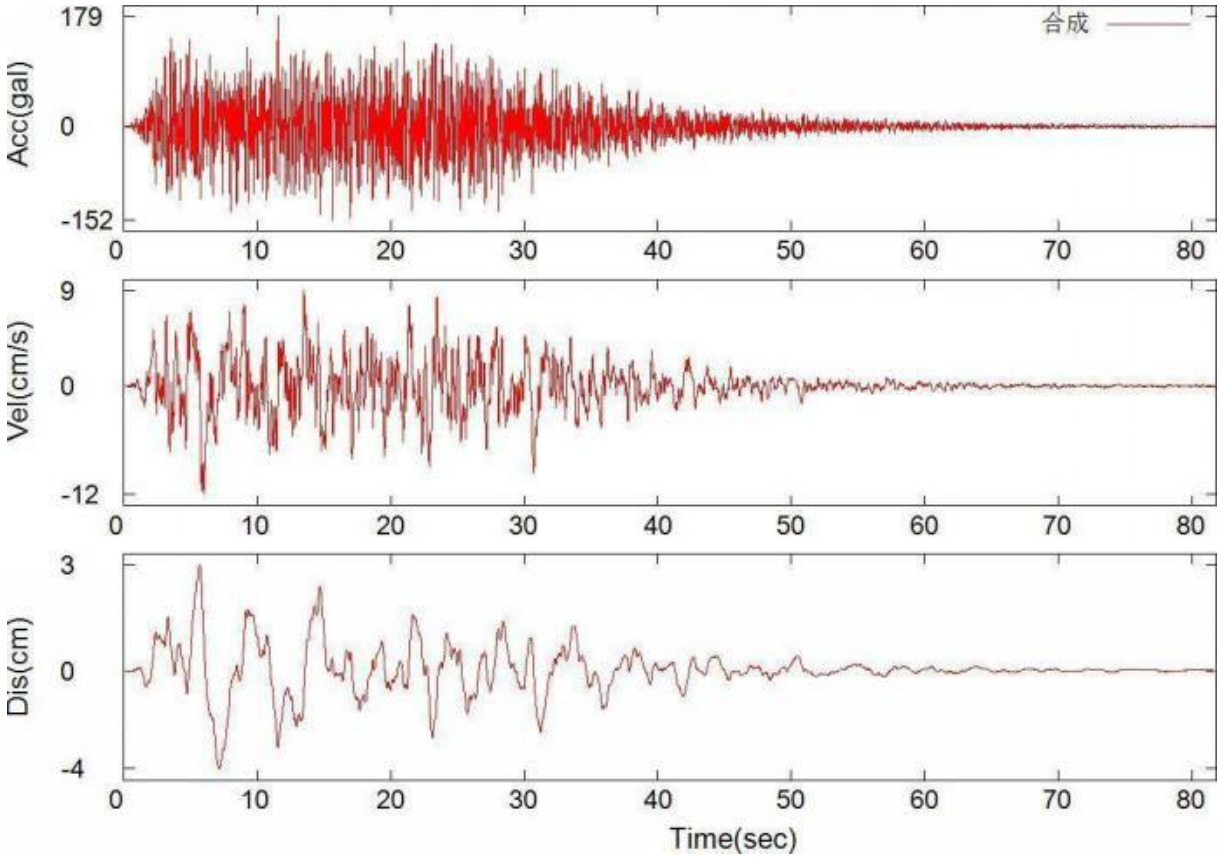


图 7.2-6.2　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

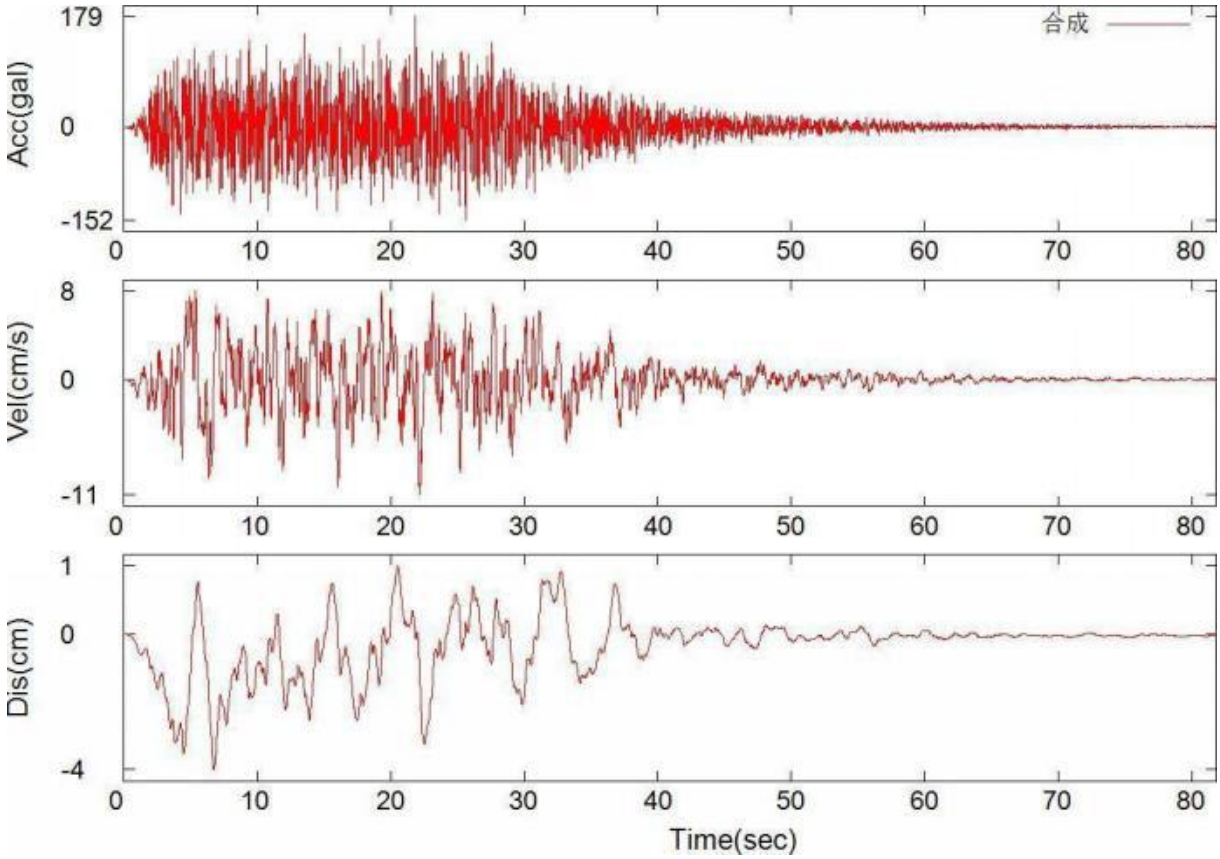


图 7.2-6.3　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

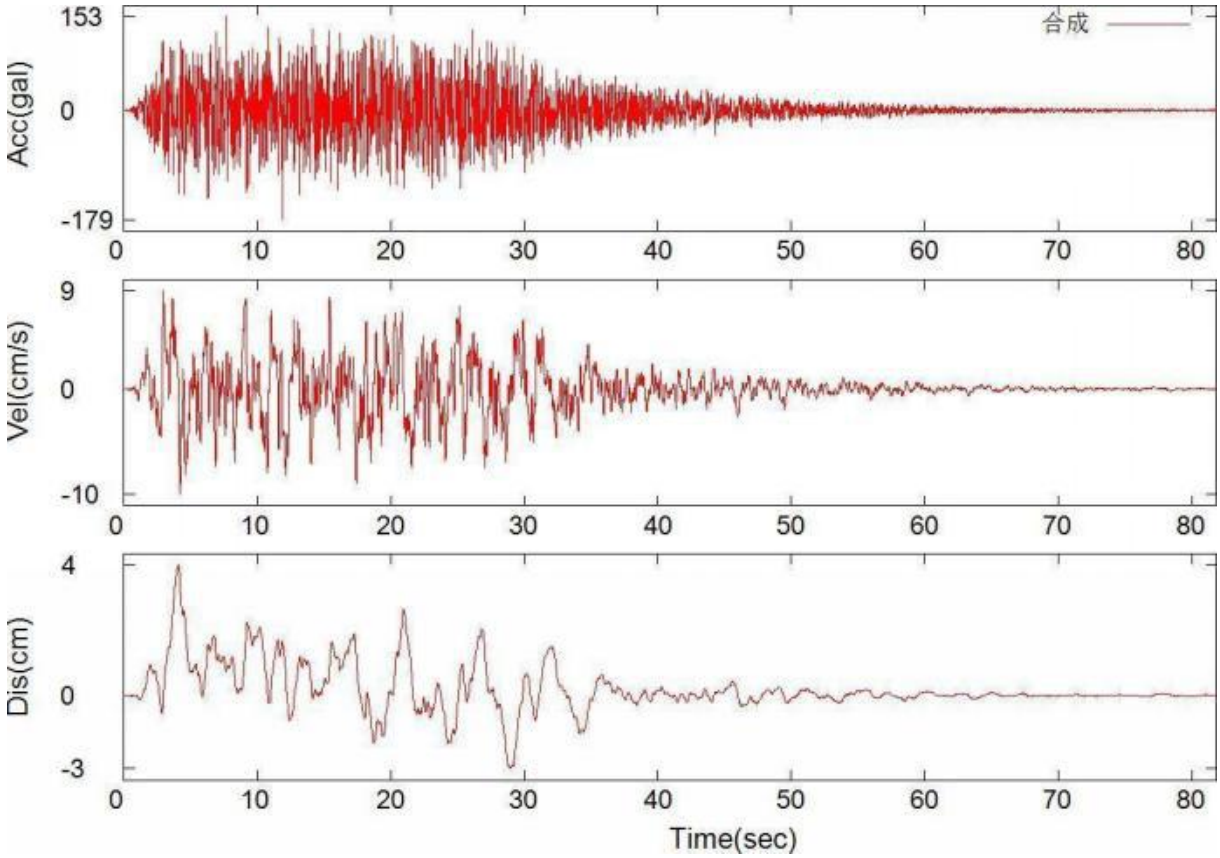


图 7.2-6.4　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

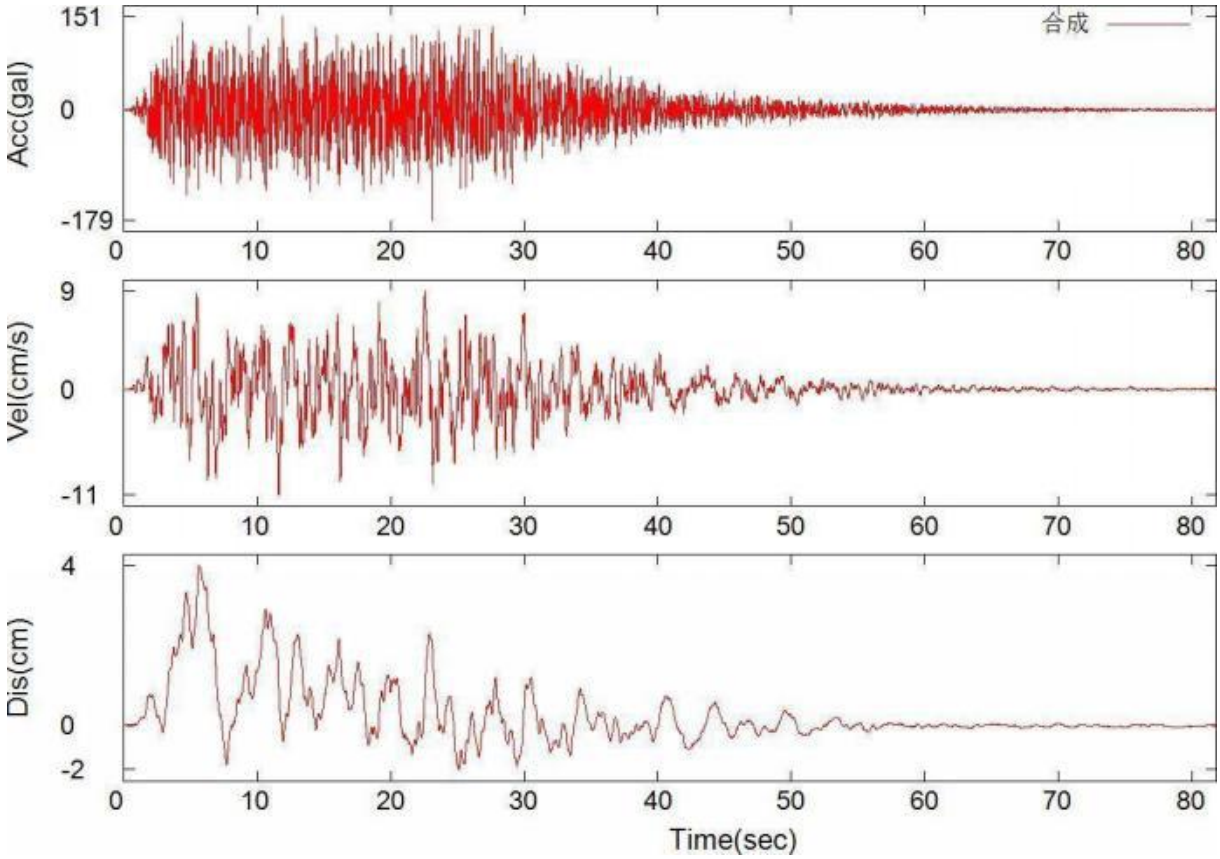


图 7.2-6.5　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 2%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

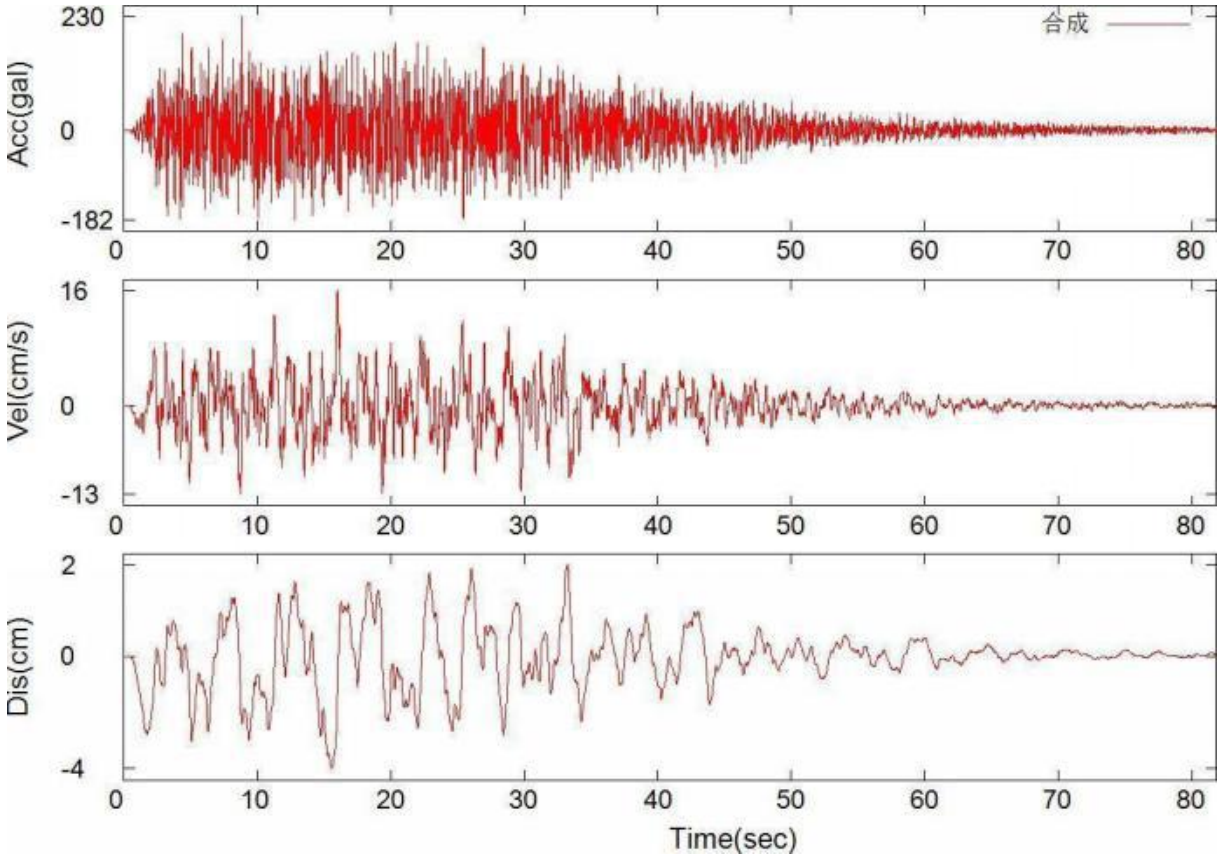


图 7.2-7.1　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 1%加速度、速度、位移时程（第 1 条）

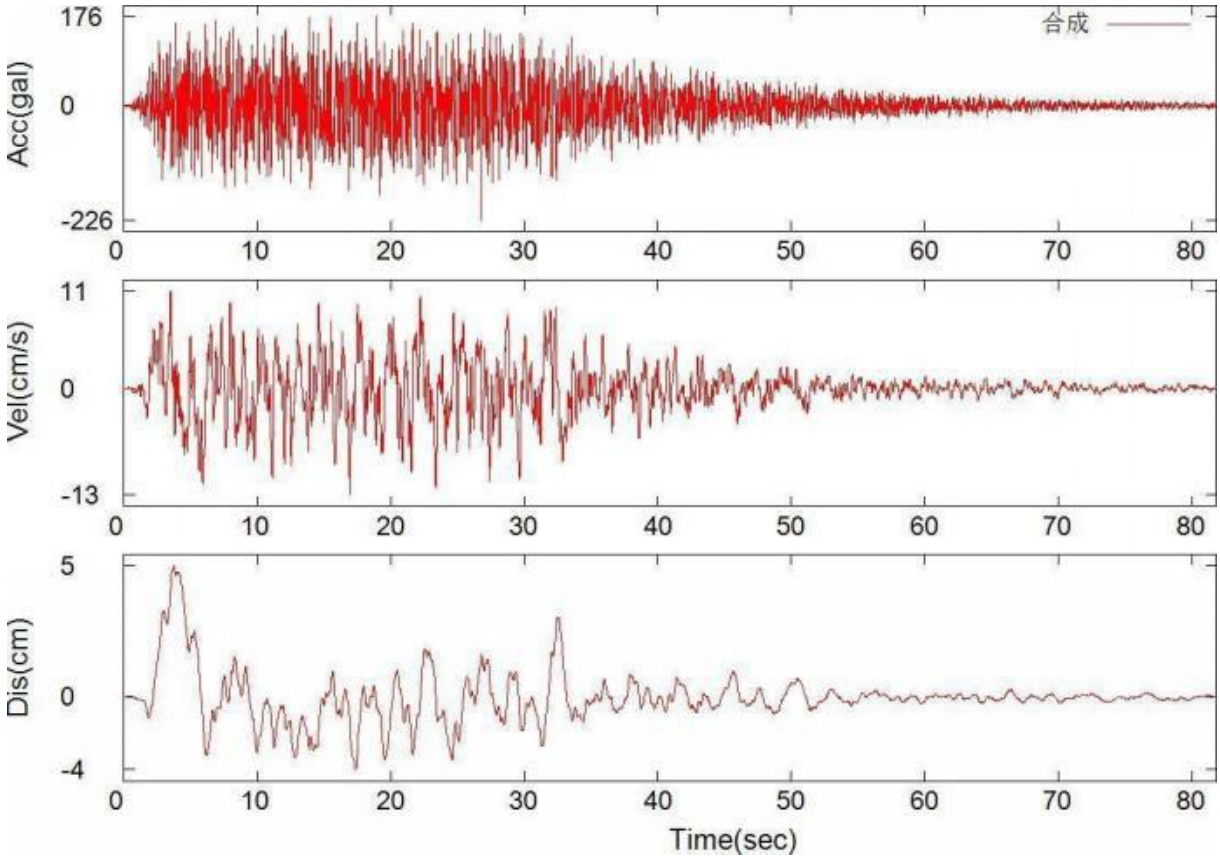


图 7.2-7.2　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 1%加速度、速度、位移时程（第 2 条）

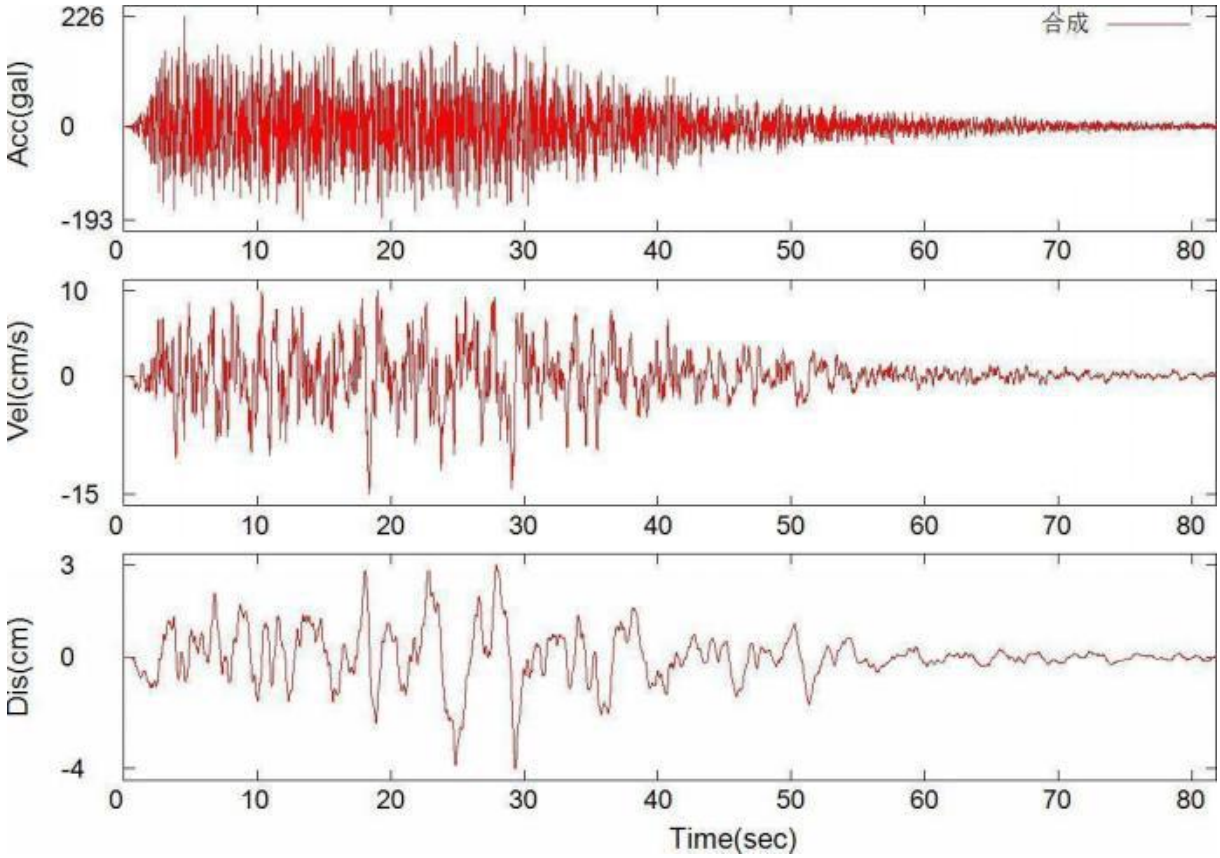


图 7.2-7.3　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 1%加速度、速度、位移时程（第 3 条）

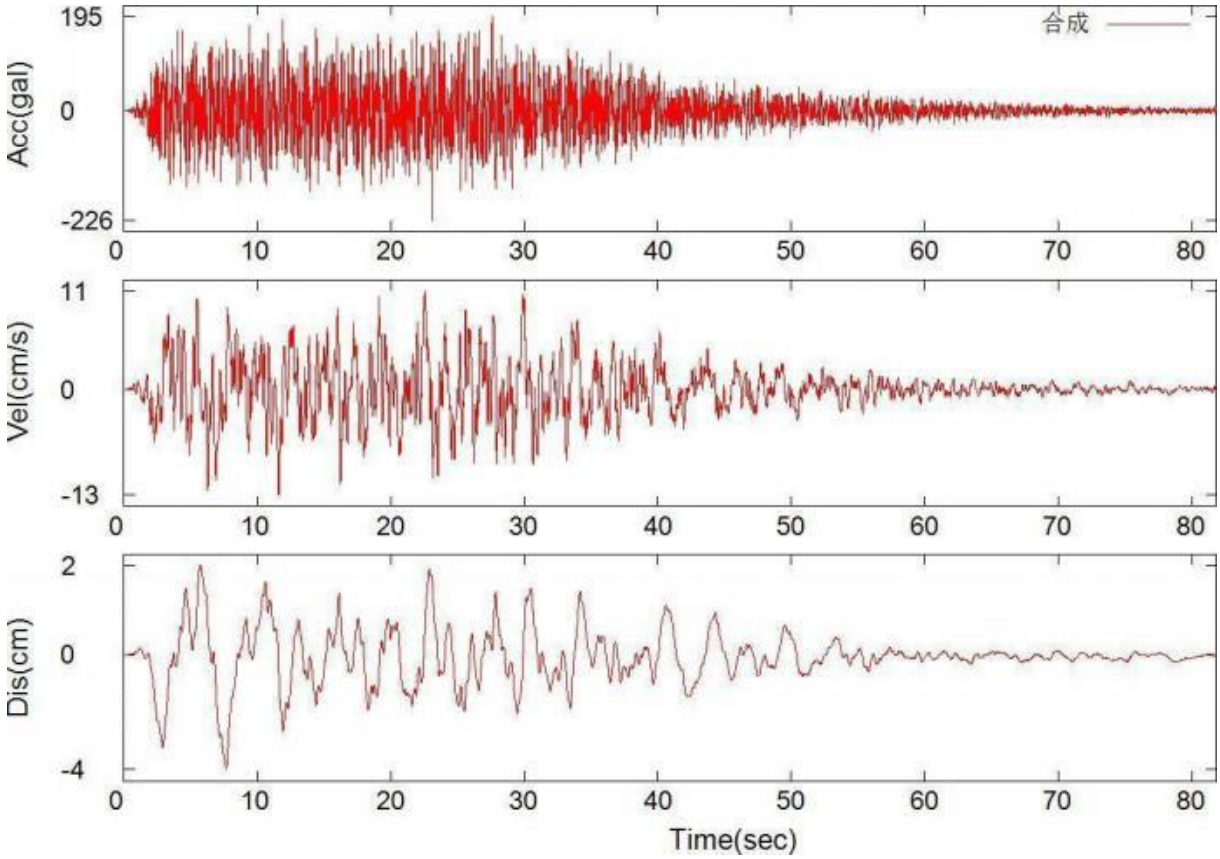


图 7.2-7.4　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 1%加速度、速度、位移时程（第 4 条）

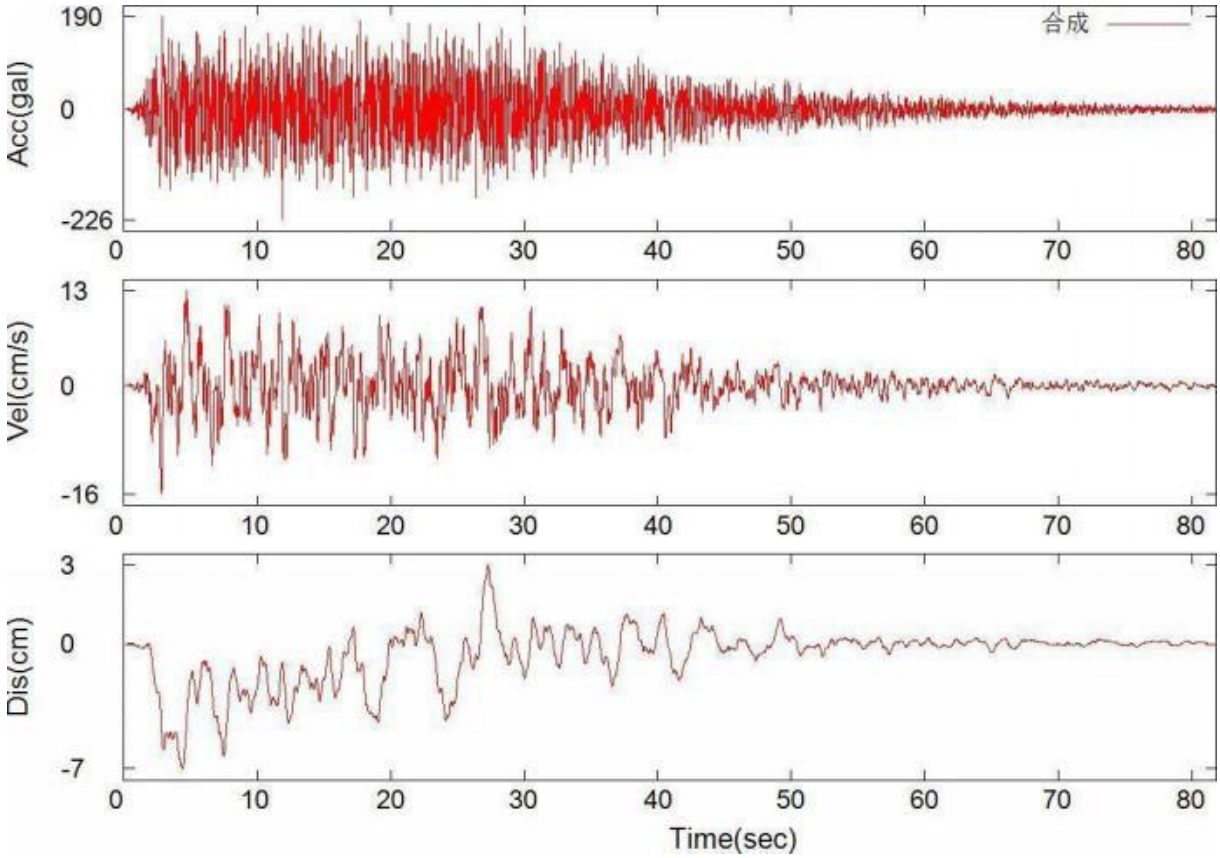


图 7.2-7.5　场地 ZK1 钻孔基岩 100 年超越概率 1%加速度、速度、位移时程（第 5 条）

为了检查基岩时程的相关系数，挑选了 ZK1 的 6 个概率基岩时程进行相关性检验（表 7.2-3、表 7.2-4），从表和图中可见，时程之间的相关系数均满足小于 0.16 的要求。考虑到篇幅限制，其他钻孔时程分析的结果不再编排到报告之中。

表 7.2-3　ZK1　50 年 63%、10%、2%概率 15 条基岩时程相关系数

概率	50 年 63%				50 年 10%				50 年 2%			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	0.03251				0.02799				0.07613			
3	0.01327	0.02207			0.01088	0.01666			0.03058	-0.02649		
4	-0.01555	-0.07667	0.03826		-0.02127	-0.07957	0.0509		0.00434	-0.0192	0.01544	
5	-0.03443	-0.04009	-0.01635	0.03405	-0.03755	-0.04783	-0.0133	0.03978	0.02871	-0.0163	0.03601	0.05295

表 7.2-4　ZK1　100 年 63%、10%、2%概率 15 条基岩时程相关系数

概率	50 年 63%				50 年 10%				50 年 2%			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
2	-0.04151				-0.03699				0.08513			
3	0.02227	0.03107			0.07988	-0.02566			0.03958	0.01749		
4	0.06585	0.09767	-0.04726		0.01227	0.08057	0.0599		-0.01334	-0.0102	0.02444	
5	0.02543	0.03109	-0.00735	-0.04305	0.02855	-0.03883	-0.0043	-0.04878	0.03771	0.0737	0.04501	0.06195

7.3 地震反应计算和工程场地地震动参数

7.3.1 一维等效线性波动法

工程场地的地震反应用一维等效线性波动法求解，基本步骤为：①确定地震输入面，并对土层进行分层；②确定各层的初始剪切模量 Gj 和阻尼比ζj (j=1，2，…n)，并由边界条件计算剪切应变传递函数；③对输入地震动α(t)进行富氏变换得υ(ω，Zm)，m 为地震动输入层号，Zm 为该层内深度；④根据剪应变传递函数和输入地震动υ(ω，Zm)，确定土层中各点的剪切应变的频域表示Γ(iω，Zm)，经富氏逆变换得到其时域过程γj (t，Zj)，并根据简谐振动概念，将其等效为平均应变振幅 $\overline{\gamma}$ j＝Cγj,max，C 通常取 0.65；⑤对比计算得到的 $\overline{\gamma}$ j 与假设的等效模量 Gj 与阻尼比ζj 是否相符，若不相符，则由计算结果重新假定 Gj 与ζj ，迭代求解，直至 Gj 与ζj 全部满足给定的精度要求为止。

7.3.2 工程场地土层动力学特性确定和土层地震反应计算模型

各类土动力学参数如表 7.3-1。其中基底的动力学参数采用中国地震局行业标准中的推荐值[1]。各类土的密度参照动三轴实验结果。

表 7.3-1 各类土动力学参数表

土类号	土类 取样深度 （m）	剪应变	5×10^{-6}	1×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}	5×10^{-4}	1×10^{-3}	5×10^{-3}	1×10^{-2}
1	全风化泥质粉砂岩 6.3-6.5	G/Gmax	0.9978	0.9957	0.9786	0.9582	0.8208	0.6961	0.3141	0.1863
		λd	0.0111	0.0156	0.0345	0.0482	0.0992	0.1290	0.1933	0.2104
2	强风化泥质粉砂岩 10.6-10.8	G/Gmax	0.9986	0.9973	0.9866	0.9736	0.8805	0.7866	0.4244	0.2693
		λd	0.0039	0.0058	0.0150	0.0225	0.0553	0.0781	0.1409	0.1623
3	强风化粉砂岩 12.1-12.3	G/Gmax	0.9989	0.9977	0.9887	0.9777	0.8977	0.8144	0.4673	0.3049
		λd	0.0332	0.0394	0.0585	0.0692	0.1008	0.1168	0.1515	0.1618
4	全风化泥质粉砂岩 3.2-3.4	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9765	0.9541	0.8062	0.6753	0.2937	0.1721
		λd	0.0284	0.0358	0.0615	0.0771	0.1258	0.1498	0.1950	0.2057
5	强风化泥质粉砂岩 7.4-7.6	G/Gmax	0.9983	0.9966	0.9833	0.9672	0.8548	0.7465	0.3706	0.2275
		λd	0.0454	0.0538	0.0794	0.0937	0.1347	0.1543	0.1927	0.2026
6	强风化泥质粉砂岩 5.3-5.5	G/Gmax	0.9982	0.9964	0.9824	0.9654	0.8482	0.7364	0.3585	0.2184
		λd	0.0145	0.0191	0.0365	0.0480	0.0876	0.1095	0.1571	0.1702
7	全风化泥质粉砂岩 5.6-5.8	G/Gmax	0.9977	0.9954	0.9774	0.9558	0.8120	0.6836	0.3017	0.1776
		λd	0.0354	0.0434	0.0693	0.0844	0.1290	0.1503	0.1897	0.1990
8	强风化泥质粉砂岩 2.4-2.6	G/Gmax	0.9981	0.9963	0.9818	0.9642	0.8436	0.7295	0.3504	0.2124
		λd	0.0279	0.0341	0.0538	0.0653	0.0998	0.1167	0.1501	0.1586
9	素填土 17.2-18.4	G/Gmax	0.9963	0.9926	0.9641	0.9308	0.7289	0.5735	0.2119	0.1185
		λd	0.0034	0.0055	0.0163	0.0256	0.0659	0.0902	0.1379	0.1490
10	全风化泥质粉砂岩 21.6-21.8	G/Gmax	0.9980	0.9959	0.9799	0.9606	0.8297	0.7090	0.3276	0.1959
		λd	0.0273	0.0343	0.0579	0.0723	0.1169	0.1395	0.1837	0.1948
11	强风化粉砂岩 22.7-22.9	G/Gmax	0.9990	0.9979	0.9896	0.9794	0.9049	0.8264	0.4877	0.3225
		λd	0.0058	0.0083	0.0189	0.0267	0.0584	0.0795	0.1382	0.1594
12	强风化粉砂岩 4.4-4.6	G/Gmax	0.9978	0.9956	0.9784	0.9577	0.8190	0.6935	0.3115	0.1845
		λd	0.0203	0.0267	0.0500	0.0652	0.1159	0.1427	0.1965	0.2101
13	全风化粉砂岩 5.8-6	G/Gmax	0.9982	0.9964	0.9821	0.9648	0.8456	0.7325	0.3539	0.2150
		λd	0.0055	0.0082	0.0205	0.0302	0.0706	0.0968	0.1606	0.1796
14	全风化泥质粉砂岩 10.6-10.8	G/Gmax	0.9979	0.9958	0.9795	0.9597	0.8266	0.7044	0.3228	0.1925
		λd	0.0306	0.0381	0.0632	0.0783	0.1246	0.1476	0.1921	0.2032
15	强风化泥质粉砂岩 12.3-12.5	G/Gmax	0.9989	0.9978	0.9890	0.9783	0.9003	0.8186	0.4744	0.3110
		λd	0.0040	0.0060	0.0150	0.0223	0.0538	0.0759	0.1401	0.1638
16	全风化泥质粉砂岩 3.3-3.5	G/Gmax	0.9976	0.9953	0.9769	0.9549	0.8090	0.6793	0.2976	0.1748
		λd	0.0323	0.0402	0.0662	0.0818	0.1287	0.1515	0.1939	0.2039
17	强风化泥质粉砂岩 7.7-7.9	G/Gmax	0.9985	0.9970	0.9850	0.9704	0.8677	0.7664	0.3961	0.2470
		λd	0.0024	0.0038	0.0114	0.0180	0.0500	0.0737	0.1407	0.1635
18	全风化泥质	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9764	0.9539	0.8055	0.6743	0.2929	0.1716

	粉砂岩 2.4-2.6	λd	0.0188	0.0249	0.0476	0.0625	0.1125	0.1388	0.1904	0.2031
19	强风化泥质粉砂岩 7.8-8.0	G/Gmax	0.9986	0.9971	0.9858	0.9720	0.8743	0.7767	0.4102	0.2580
		λd	0.0050	0.0074	0.0186	0.0274	0.0652	0.0908	0.1589	0.1813
20	全风化泥质粉砂岩 1.85-2.05	G/Gmax	0.9976	0.9952	0.9762	0.9536	0.8043	0.6726	0.2912	0.1704
		λd	0.0074	0.0109	0.0271	0.0396	0.0898	0.1204	0.1869	0.2044
21	淤泥 7.5-7.7	G/Gmax	0.9939	0.9880	0.9425	0.8913	0.6212	0.4506	0.1409	0.0758
		λd	0.0258	0.0337	0.0620	0.0794	0.1290	0.1491	0.1775	0.1826
22	强风化泥质粉砂岩 9.8-10.0	G/Gmax	0.9986	0.9972	0.9860	0.9724	0.8756	0.7787	0.4130	0.2602
		λd	0.0075	0.0105	0.0231	0.0323	0.0677	0.0900	0.1455	0.1630
23	强风化泥质粉砂岩 7.6-7.8	G/Gmax	0.9984	0.9969	0.9845	0.9694	0.8637	0.7600	0.3878	0.2405
		λd	0.0188	0.0241	0.0427	0.0545	0.0933	0.1143	0.1601	0.1730
24	全风化泥质粉砂岩 6.7-6.9	G/Gmax	0.9979	0.9957	0.9791	0.9590	0.8238	0.7003	0.3185	0.1894
		λd	0.0249	0.0304	0.0483	0.0587	0.0894	0.1043	0.1323	0.1391
25	强风化泥质粉砂岩 7.1-7.3	G/Gmax	0.9983	0.9965	0.9828	0.9663	0.8513	0.7412	0.3641	0.2226
		λd	0.0560	0.0644	0.0888	0.1017	0.1372	0.1534	0.1838	0.1914
26	基底	G/Gmax	1	1	1	1	1	1	1	1
		λd	0.004	0.008	0.01	0.015	0.021	0.03	0.036	0.046

本项目在建立工程场地地震反应分析模型时，根据表 7.3-1 选取土样的土动力学参数。考虑到钻孔两两之间距离较近，同一层位的土样土动力性能相近，于是在选取土样进行土动力学实验时，优先选取本钻孔土动力学参数值，该钻孔土样未取样试验的，选取邻近钻孔相应层位土动力学参数值。

根据目标区各钻孔钻探和波速结果，选取土动力学参数，建立工程场地反应计算模型。各钻孔的地震反应计算模型资料见表 7.3-2～表 7.3-18。

表 7.3-2　ZK1 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂植土	9	2	2	135	1.7
2	杂植土	9	4.8	2.8	163	1.7
3	全风化泥质粉砂岩	1	6.6	1.8	255	1.8
4	强风化泥质粉砂岩	2	8.6	2	392	1.8
5	强风化泥质粉砂岩	2	12.1	2.5	432	1.8
6	中风化泥质粉砂岩	26			521	2.2

表 7.3-3　ZK2 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	2	2	136	1.7
2	杂填土	9	5	3	145	1.7

3	杂填土	9	7.5	2.5	199	1.7
4	强风化粉砂岩	3	9.5	2	226	2.2
5	强风化粉砂岩	3	12.8	3.3	340	2.2
6	强风化泥质粉砂岩	3	14.1	1.3	382	2.2
7	中风化泥质粉砂岩	26			566	2.4

表 7.3-4　ZK3 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	素填土	9	1.8	1.8	130	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	4	4.8	3	182	1.8
3	全风化泥质粉砂岩	4	7.45	2.65	245	1.8
4	强风化泥质粉砂岩	5	10.25	2.8	334	2.2
5	中风化泥质粉砂岩	26			677	2.4

表 7.3-5　ZK4 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	素填土	9	0.4	0.4	137	1.7
2	强风化泥质粉砂岩	6	2.3	1.9	269	1.8
3	强风化泥质粉砂岩	6	5.3	3	351	1.8
4	强风化泥质粉砂岩	6	7.3	3	458	1.8
5	中风化泥质粉砂岩	26			577	2.2

表 7.3-6　ZK5 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	0.4	0.4	117	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	7	3.4	3	163	1.81
3	全风化泥质粉砂岩	7	6.4	3	223	1.81
4	全风化泥质粉砂岩	7	7.6	1.2	266	1.81
5	强风化泥质粉砂岩	5	10.1	2.5	366	2.2
6	中风化泥质粉砂岩	26			664	2.4

表 7.3-7　ZK6 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	强风化泥质粉砂岩	8	2	2	386	2.2
2	强风化泥质粉砂岩	8	4	2	391	2.2
3	强风化泥质粉砂岩	8	6	2	419	2.2
4	中风化泥质粉砂岩	26			635	2.4

表 7.3-8　ZK7 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称		层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	3	3	163	1.7
2	杂填土	9	6	3	173	1.7
3	杂填土	9	9	3	179	1.7
4	杂填土	9	12	3	210	1.7
5	杂填土	9	15	3	205	1.7
6	杂填土	9	18	3	260	1.7
7	杂填土	9	20.3	2.3	285	1.7
8	全风化粉砂岩	10	22.2	1.9	357	2
9	强风化粉砂岩	11	25.2	3.0	400	2.2
10	强风化粉砂岩	11	27.3	2.1	450	2.2
11	强风化泥质粉砂岩	11	29.8	2.5	477	2.2
12	中风化泥质粉砂岩	26			669	2.4

表 7.3-9　ZK8 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	3.2	3.2	151	1.7
2	全风化粉砂岩	12	5	1.8	191	1.8
3	强风化粉砂岩	13	8	3	251	2.2
4	强风化泥质粉砂岩	13	10.8	2.8	379	2.2
5	中风化泥质粉砂岩	26			649	2.4

表 7.3-10　ZK9 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	1	1	150	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	14	2.7	2	189	1.8
3	全风化泥质粉砂岩	14	4.7	2	205	1.8
4	全风化泥质粉砂岩	14	7.7	3	318	1.8
5	全风化泥质粉砂岩	14	12.35	3.95	335	1.8
6	强风化泥质粉砂岩	15	15.35	3	404	2.2
7	强风化泥质粉砂岩	15	18.5	3.15	444	2.2
8	中风化泥质粉砂岩	26			617	2.4

表 7.3-11　ZK10 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	2.4	2.4	131	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	16	3.5	1.1	240	2
3	强风化泥质粉砂岩	17	6.5	3	344	2.2
4	强风化泥质粉砂岩	17	9.1	2.6	397	2.2
5	中风化泥质粉砂岩	26			662	2.4

表 7.3-12　ZK11 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂植土	9	0.5	0.5	124	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	16	2.5	2	186	2
3	全风化泥质粉砂岩	16	4.5	2	185	2
4	全风化泥质粉砂岩	16	6.5	2	251	2
5	全风化泥质粉砂岩	16	8.6	2.1	324	2
6	强风化泥质粉砂岩	17	11.6	3	396	2.2
7	强风化泥质粉砂岩	17	14.3	2.7	405	2.2
8	中风化泥质粉砂岩	26			577	2.4

表 7.3-13　ZK12 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂植土	9	0.6	0.6	188	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	18	2.6	2	235	2
3	强风化泥质粉砂岩	19	4.6	2	385	2.2
4	强风化泥质粉砂岩	19	7.6	3	410	2.2
5	强风化泥质粉砂岩	19	10	2.4	384	2.2
6	中风化泥质粉砂岩	26			714	2.4

表 7.3-14　ZK13 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂植土	9	0.5	0.5	203	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	20	2.3	1.8	378	2
3	强风化泥质粉砂岩	19	4.1	1.8	436	2.2
4	中风化泥质粉砂岩	26			572	2.4

表 7.3-15　ZK14 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	3	3	121	1.7
2	杂填土	9	5	2	108	1.7
3	杂填土	9	6.9	1.9	173	1.7
4	淤泥	21	7.7	0.8	168	1.8
5	全风化泥质粉砂岩	20	9.5	1.8	346	1.8
6	强风化泥质粉砂岩	22	11.5	2	408	2.2
7	中风化泥质粉砂岩	26			677	2.4

表 7.3-16　ZK15 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	0.3	0.3	134	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	24	2.3	2	196	2
3	全风化泥质粉砂岩	24	4.6	2.3	264	2
4	强风化泥质粉砂岩	23	7.9	3.3	386	2.2
5	中风化泥质粉砂岩	26			519	2.4

表 7.3-17　ZK16 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	0.6	0.6	166	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	24	3.6	3	239	2
3	全风化泥质粉砂岩	24	6.6	3	244	2
4	全风化泥质粉砂岩	24	8.6	2	313	2
5	强风化泥质粉砂岩	25	10.5	1.9	351	2.2
6	中风化泥质粉砂岩	26			607	2.4

表 7.3-18　ZK17 钻孔土层分析计算模型

序号	土层名称	土类号	层底深度(m)	层厚(m)	Vs(m/s)	密度(g/cm^3)
1	杂填土	9	1.5	1.5	147	1.7
2	全风化泥质粉砂岩	24	5.1	3.6	256	2
3	强风化泥质粉砂岩	25	8.1	3	351	2.2
4	强风化泥质粉砂岩	25	10.1	2	325	2.2
5	强风化泥质粉砂岩	25	12.1	2	375	2.2
6	强风化泥质粉砂岩	25	15.1	3	435	2.2
7	中风化泥质粉砂岩	26			624	2.4

7.3.3 工程场地地震动参数计算结果

根据 7.2.1 节给出的钻孔模型，用一维等效线性波动法对拟建场地内各钻孔进行土层地震反应计算，计算得到的各钻孔不同概率水准各 5 条随机波输入下的地震动峰值加速度如表 7.3-19。由于每个孔在同一概率水准下有 5 条地震动输入波，所以每个孔有 5 组地面运动参数，取平均值作为每个典型孔位的地面峰值加速度和加速度反应谱。

表 7.3-19　目标区各钻孔不同概率水准地表加速度反应最大值(cm/s2)

钻孔编号	超越概率	第 1 条	第 2 条	第 3 条	第 4 条	第 5 条	平均值
ZK1	50 年 63%	21.5	26.8	22.8	25.2	25.1	24.3
	50 年 10%	73.7	86.0	76.0	82.9	82.9	80.3
	50 年 2%	161.2	171.1	173.5	150.0	159.7	163.1
	100 年 63%	34.2	39.8	34.9	37.1	38.1	36.8
	100 年 10%	99.3	125.7	111.3	112.9	117.8	113.4
	100 年 2%	220.9	229.5	203.6	222.0	197.4	214.7
	100 年 1%	257.1	267.0	234.7	259.8	235.2	250.8
ZK2	50 年 63%	27.9	32.2	29.3	28.7	28.1	29.2
	50 年 10%	83.9	95.8	90.1	83.5	86.1	87.9
	50 年 2%	175.8	179.8	175.4	153.2	163.9	169.6
	100 年 63%	37.7	44.0	39.9	36.3	39.0	39.4
	100 年 10%	113.1	130.3	122.9	109.1	120.9	119.3
	100 年 2%	233.7	229.9	214.8	227.1	195.0	220.1
	100 年 1%	278.6	276.4	248.8	266.3	239.5	261.9
ZK3	50 年 63%	23.5	29.0	24.0	26.6	25.9	25.8
	50 年 10%	77.4	89.6	78.8	85.2	86.9	83.6
	50 年 2%	170.6	177.2	182.9	155.8	166.4	170.6
	100 年 63%	36.3	42.6	36.5	38.8	39.4	38.7
	100 年 10%	100.5	127.2	115.0	115.5	120.9	115.8
	100 年 2%	224.8	232.5	211.4	223.6	199.5	218.4
	100 年 1%	260.3	263.1	239.3	258.0	227.8	249.7
ZK4	50 年 63%	23.7	28.5	24.3	25.9	27.9	26.1
	50 年 10%	74.0	84.8	71.4	83.6	77.9	78.3
	50 年 2%	156.2	167.0	152.4	145.8	156.0	155.5
	100 年 63%	35.1	41.2	35.3	39.3	40.7	38.3
	100 年 10%	104.3	111.4	97.9	115.9	105.7	107.0
	100 年 2%	223.5	201.1	201.8	191.8	195.4	202.7
	100 年 1%	264.6	239.9	244.7	243.4	238.2	246.1
ZK5	50 年 63%	21.3	26.8	22.3	24.1	24.1	23.7

	50 年 10%	70.4	83.2	72.8	80.6	80.8	77.6
	50 年 2%	156.8	164.2	168.2	141.8	155.8	157.4
	100 年 63%	32.9	39.5	33.7	35.7	36.5	35.7
	100 年 10%	95.7	116.8	104.9	109.2	112.8	107.9
	100 年 2%	214.7	215.4	197.4	211.0	185.2	204.8
	100 年 1%	248.0	245.9	223.7	241.9	215.2	234.9
ZK6	50 年 63%	22.6	26.4	22.2	24.1	25.1	24.1
	50 年 10%	69.2	79.9	66.8	78.4	70.9	73.0
	50 年 2%	150.1	154.7	134.4	134.6	143.9	143.5
	100 年 63%	33.0	38.3	32.6	36.6	36.7	35.5
	100 年 10%	99.8	104.3	89.9	108.5	97.2	99.9
	100 年 2%	206.9	177.0	189.2	173.3	184.9	186.3
	100 年 1%	244.8	211.4	229.6	230.9	225.9	228.5
ZK7	50 年 63%	32.1	30.9	28.7	28.7	37.1	31.5
	50 年 10%	91.9	96.4	87.3	93.8	111.0	96.1
	50 年 2%	195.1	187.0	192.9	180.2	214.2	193.9
	100 年 63%	44.9	44.6	40.9	40.1	54.1	44.9
	100 年 10%	130.8	130.1	127.9	131.1	147.1	133.4
	100 年 2%	293.5	252.9	270.9	261.7	248.5	265.5
	100 年 1%	323.1	293.5	308.2	305.0	299.9	306.0
ZK8	50 年 63%	23.6	29.2	24.3	26.8	26.0	26.0
	50 年 10%	78.7	93.1	80.0	87.7	89.1	85.7
	50 年 2%	175.1	182.5	192.3	161.7	172.2	176.8
	100 年 63%	36.5	43.3	36.7	39.3	39.6	39.1
	100 年 10%	104.1	131.4	118.0	119.4	125.0	119.6
	100 年 2%	231.4	237.0	225.0	237.9	210.1	228.3
	100 年 1%	265.8	275.8	252.0	269.4	239.3	260.5
ZK9	50 年 63%	23.6	28.2	24.8	25.3	26.5	25.7
	50 年 10%	77.3	87.9	80.0	81.8	86.1	82.6
	50 年 2%	167.5	170.1	171.5	147.6	164.6	164.3
	100 年 63%	36.6	41.5	37.0	37.2	40.4	38.5
	100 年 10%	104.1	121.9	114.5	111.3	119.7	114.3
	100 年 2%	234.2	226.2	206.0	217.7	199.6	216.7
	100 年 1%	272.9	261.9	235.8	252.2	231.1	250.8
ZK10	50 年 63%	19.6	23.0	20.2	21.4	23.2	21.5
	50 年 10%	66.8	75.0	66.7	77.3	72.2	71.6
	50 年 2%	141.3	152.0	149.6	132.3	145.2	144.1
	100 年 63%	29.6	34.1	30.2	33.3	34.6	32.4
	100 年 10%	94.2	105.7	94.6	107.0	101.7	100.7
	100 年 2%	200.7	194.3	184.2	181.5	175.5	187.3
	100 年 1%	244.1	238.4	228.6	228.5	221.3	232.2
ZK11	50 年 63%	20.7	25.9	21.8	22.9	24.1	23.1

	50 年 10%	68.0	80.6	69.9	78.4	78.3	75.0
	50 年 2%	152.8	157.0	162.7	133.5	152.7	151.7
	100 年 63%	31.2	38.2	32.3	34.6	36.3	34.5
	100 年 10%	91.9	109.6	97.9	107.1	109.7	103.3
	100 年 2%	213.7	213.3	192.8	194.3	180.9	199.0
	100 年 1%	248.5	245.7	218.4	224.9	213.7	230.2
ZK12	50 年 63%	24.0	28.2	24.5	26.3	28.3	26.3
	50 年 10%	75.9	85.7	73.8	86.8	80.4	80.5
	50 年 2%	163.6	172.6	165.2	151.6	163.5	163.3
	100 年 63%	34.5	39.9	34.9	39.0	40.3	37.7
	100 年 10%	107.8	116.8	103.5	121.5	112.6	112.4
	100 年 2%	233.1	217.9	213.1	204.5	205.4	214.8
	100 年 1%	272.1	255.5	253.8	253.7	247.0	256.4
ZK13	50 年 63%	22.6	26.6	22.3	24.1	25.3	24.2
	50 年 10%	69.0	80.2	66.9	78.3	71.4	73.2
	50 年 2%	150.2	155.6	133.7	134.3	144.6	143.7
	100 年 63%	33.0	38.5	32.7	36.5	37.0	35.5
	100 年 10%	99.9	104.6	90.2	108.3	97.7	100.1
	100 年 2%	208.1	176.0	189.0	174.4	184.8	186.5
	100 年 1%	246.2	210.3	229.4	231.0	225.9	228.5
ZK14	50 年 63%	34.2	39.0	36.2	33.5	36.1	35.8
	50 年 10%	97.2	108.2	105.6	94.3	102.4	101.6
	50 年 2%	183.7	191.8	185.5	185.4	178.2	184.9
	100 年 63%	45.0	51.5	48.2	43.8	48.1	47.3
	100 年 10%	133.7	145.2	135.5	126.7	141.7	136.6
	100 年 2%	250.2	224.2	224.5	239.8	211.1	230.0
	100 年 1%	302.7	264.8	265.8	276.8	261.9	274.4
ZK15	50 年 63%	23.3	27.5	23.7	25.5	27.4	25.5
	50 年 10%	73.9	83.5	71.0	84.2	77.6	78.1
	50 年 2%	159.7	167.8	158.6	147.9	158.2	158.5
	100 年 63%	33.5	38.8	33.7	37.9	38.9	36.6
	100 年 10%	105.0	112.2	99.5	118.0	108.2	108.6
	100 年 2%	226.3	209.3	207.3	196.5	200.2	207.9
	100 年 1%	263.2	244.9	246.6	246.2	240.2	248.2
ZK16	50 年 63%	21.5	26.3	22.5	23.8	24.8	23.8
	50 年 10%	72.6	83.1	74.5	84.9	81.6	79.3
	50 年 2%	161.4	171.4	171.3	146.1	165.1	163.1
	100 年 63%	32.1	38.7	34.0	36.7	37.4	35.8
	100 年 10%	103.6	119.0	104.1	117.0	116.4	112.0
	100 年 2%	217.0	207.4	187.4	203.8	186.3	200.4
	100 年 1%	264.1	252.8	233.8	245.9	233.1	245.9
ZK17	50 年 63%	21.9	26.1	22.4	23.5	25.5	23.9

	50 年 10%	72.7	82.7	73.6	82.9	79.6	78.3
	50 年 2%	156.2	165.2	165.7	143.1	160.3	158.1
	100 年 63%	33.0	38.3	33.6	36.1	38.2	35.8
	100 年 10%	99.3	115.8	101.1	114.7	113.1	108.8
	100 年 2%	216.1	208.1	186.8	194.2	183.0	197.7
	100 年 1%	263.7	253.4	231.9	237.0	228.3	242.9

计算得到各钻孔的地表地震动参数值见表 7.3-20，表中设计地震动加速度反应谱及地震影响系数最大值由以下形状参数给出：

$$Sa(T)= Amax\,\beta(T) \qquad (8.1)$$

$$\alpha\,max=(Amax\,\beta\,m)/g \qquad (8.2)$$

且有

$$\beta(T) = \begin{cases} 1 + (\beta_m - 1.0)T/T_0 & 0.0 < T <= T_0 \\ \beta_m & T_0 < T <= Tg \\ \beta_m (Tg/T)^{\gamma} & Tg < T <= T_m \end{cases}$$

其中 Sa(T)为设计反应谱值，αmax 为水平地震影响系数最大值，β(T)为设计反应谱动力放大系数，βm 为动力放大系数最大值，T0 为设计反应谱第一拐点周期，T2（Tg）为设计反应谱第二拐点周期，γ为设计反应谱下降段衰减指数，取 0.9。Amax 为地震动峰值加速度。

图 7.3-1 至图 7.3-119 为目标区各钻孔 7 个概率水准地表加速度反应谱及设计谱（图中粗实线为规准谱）（阻尼比 0.05）。

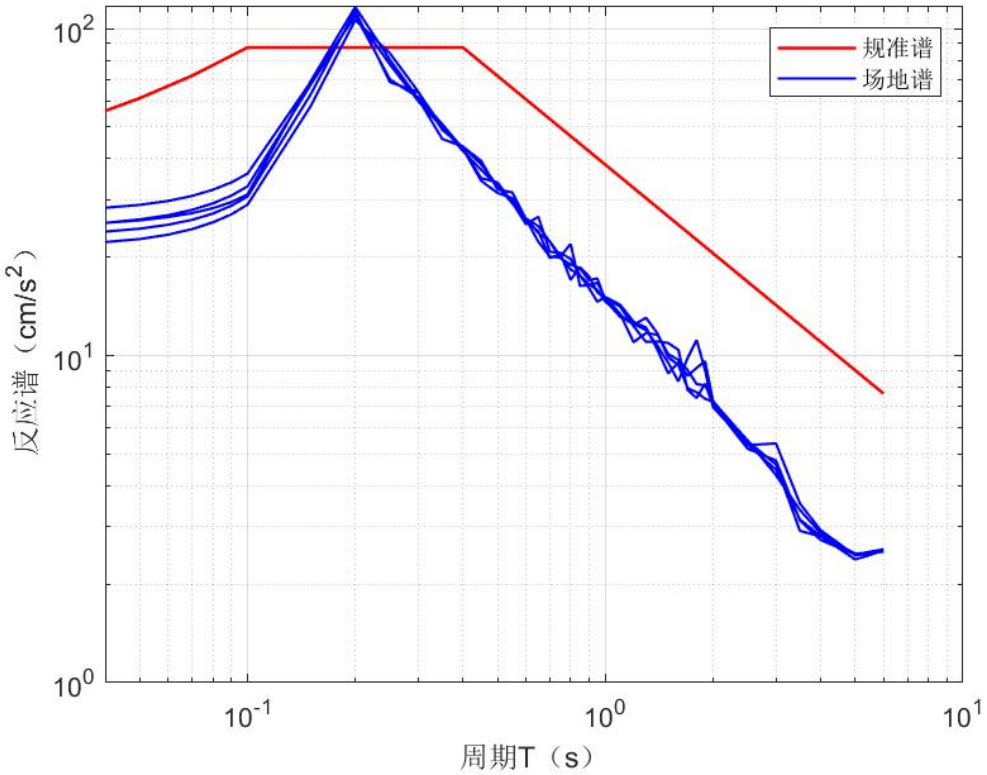


图 7.3-1　ZK1 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

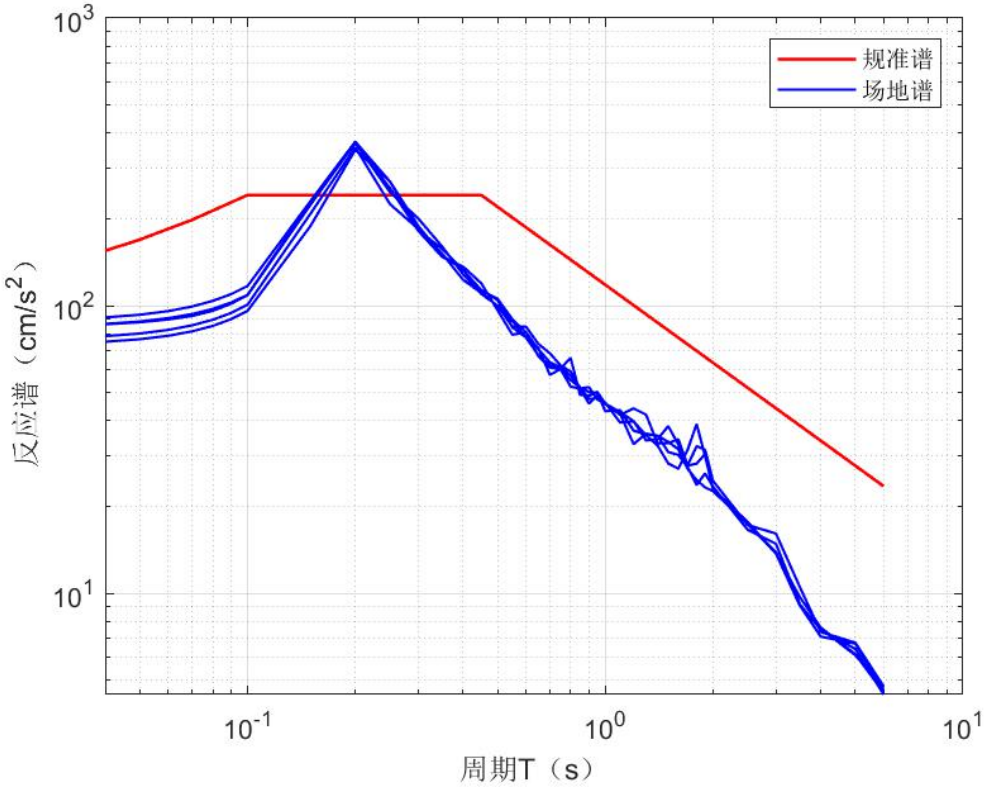


图 7.3 -2　ZK1 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

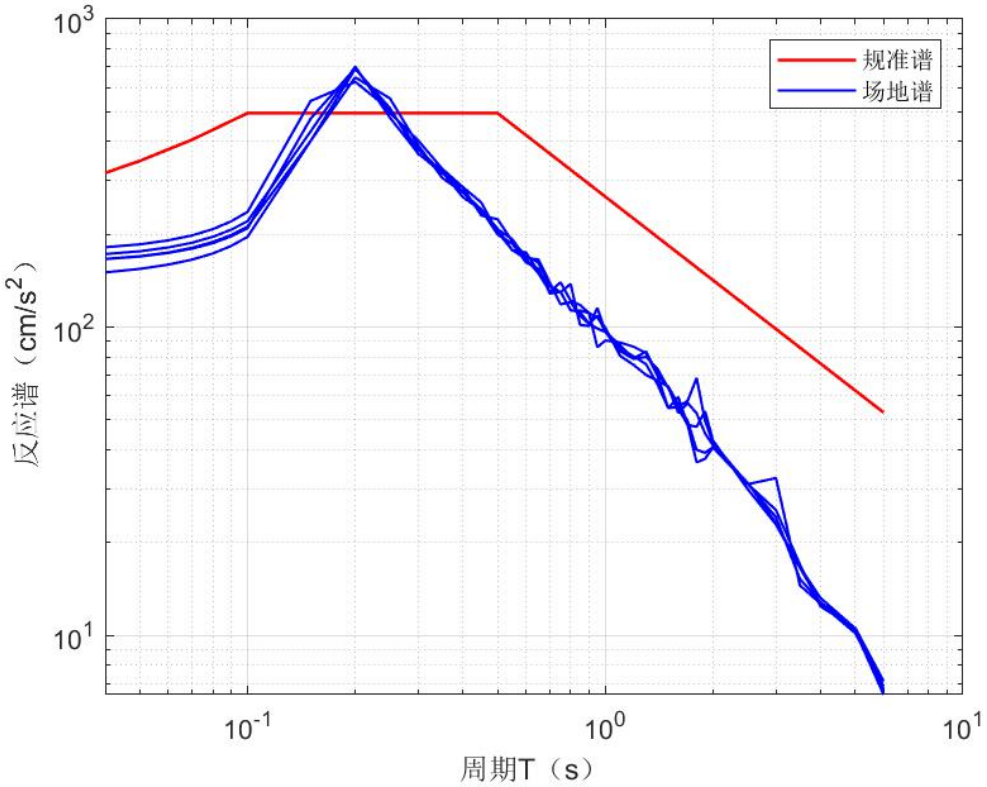


图 7.3 -3　ZK1 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

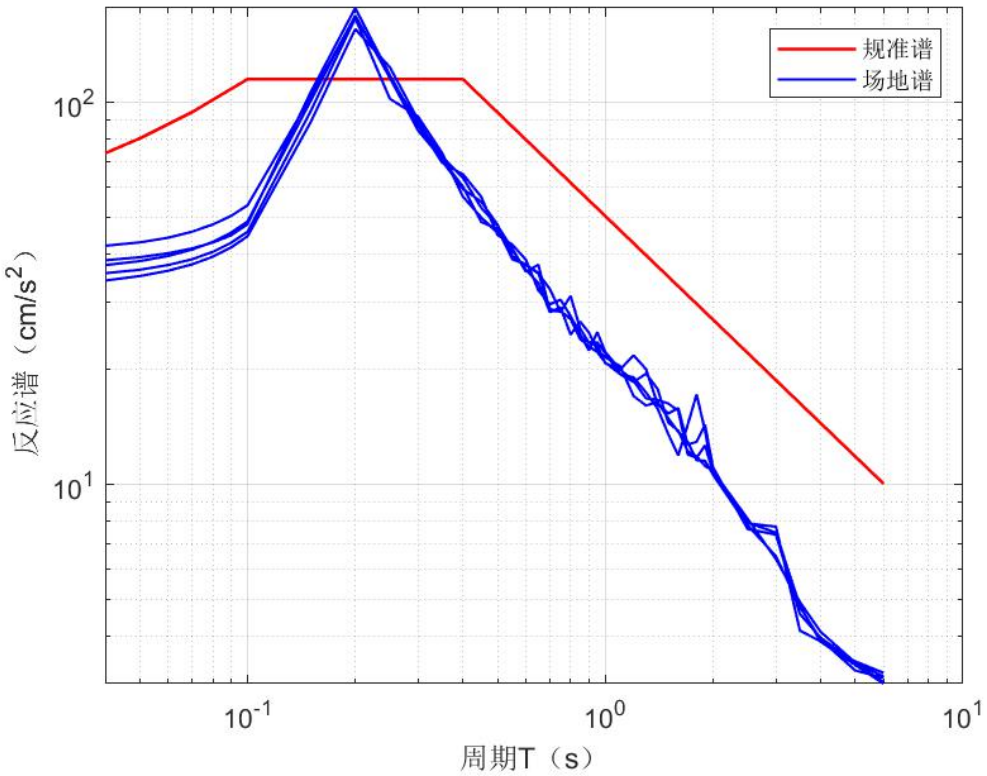


图 7.3 -4　ZK1 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

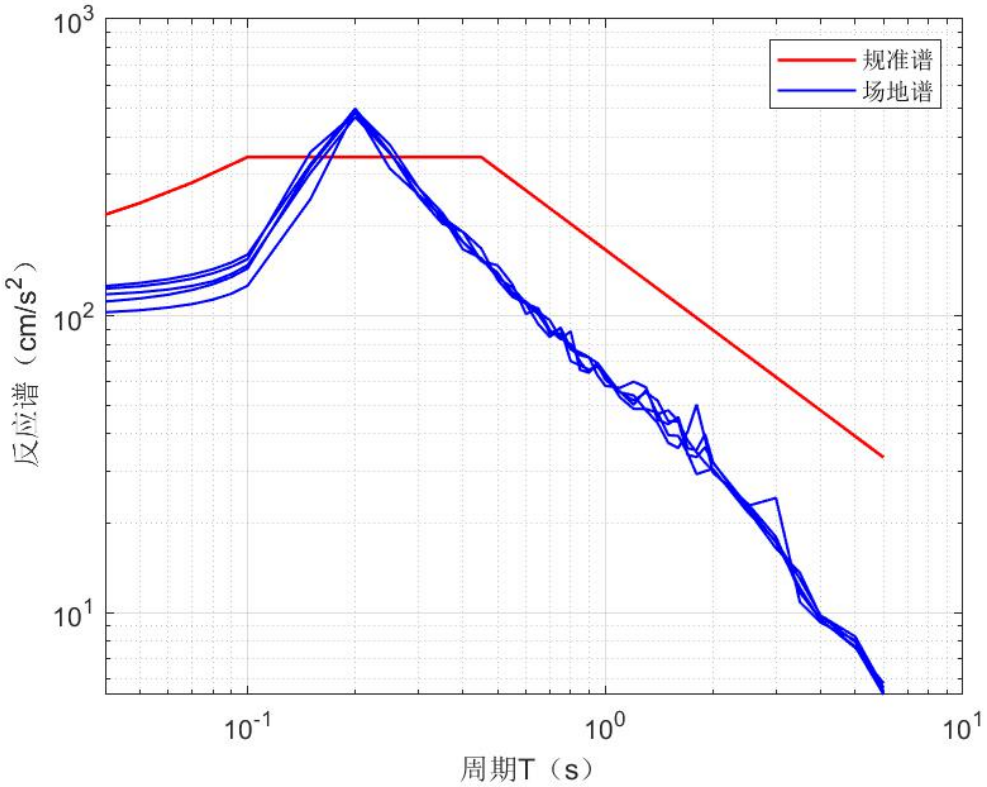


图 7.3 -5　ZK1 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

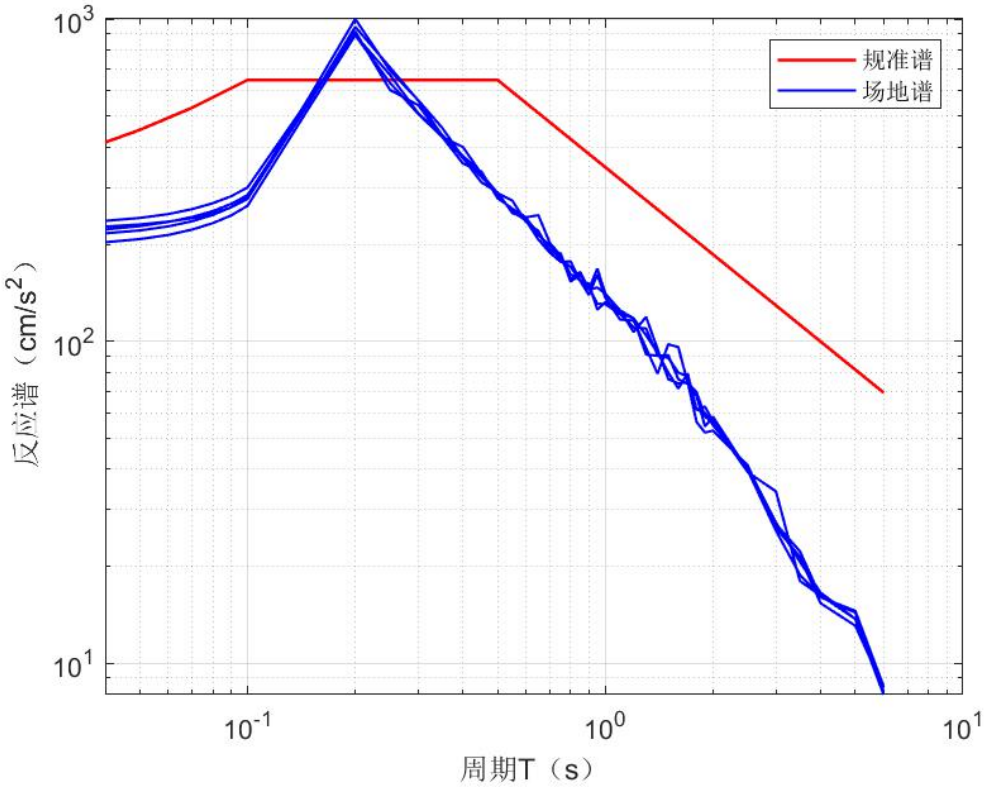


图 7.3 -6　ZK1 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

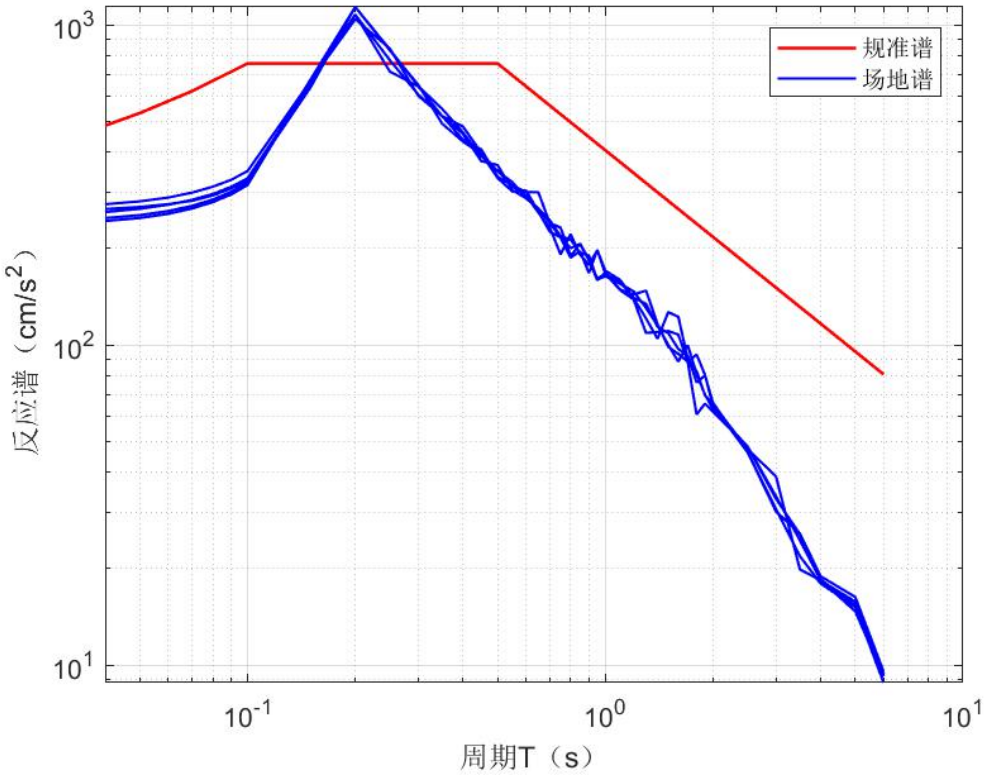


图 7.3 -7　ZK1 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

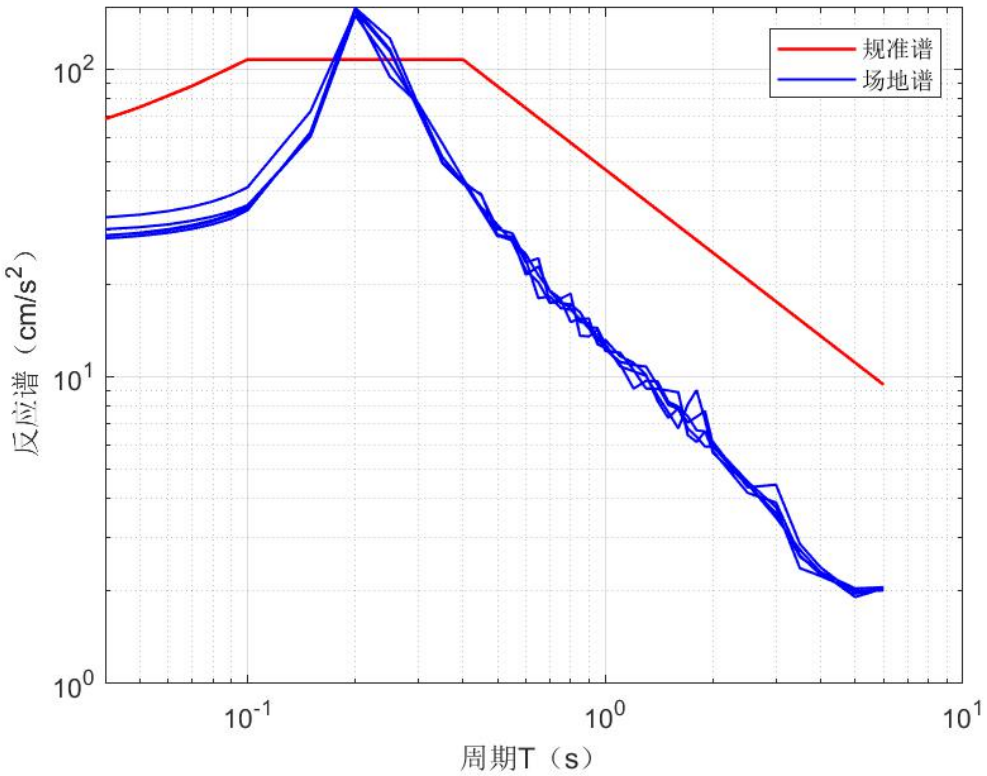


图 7.3 -8　ZK2 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

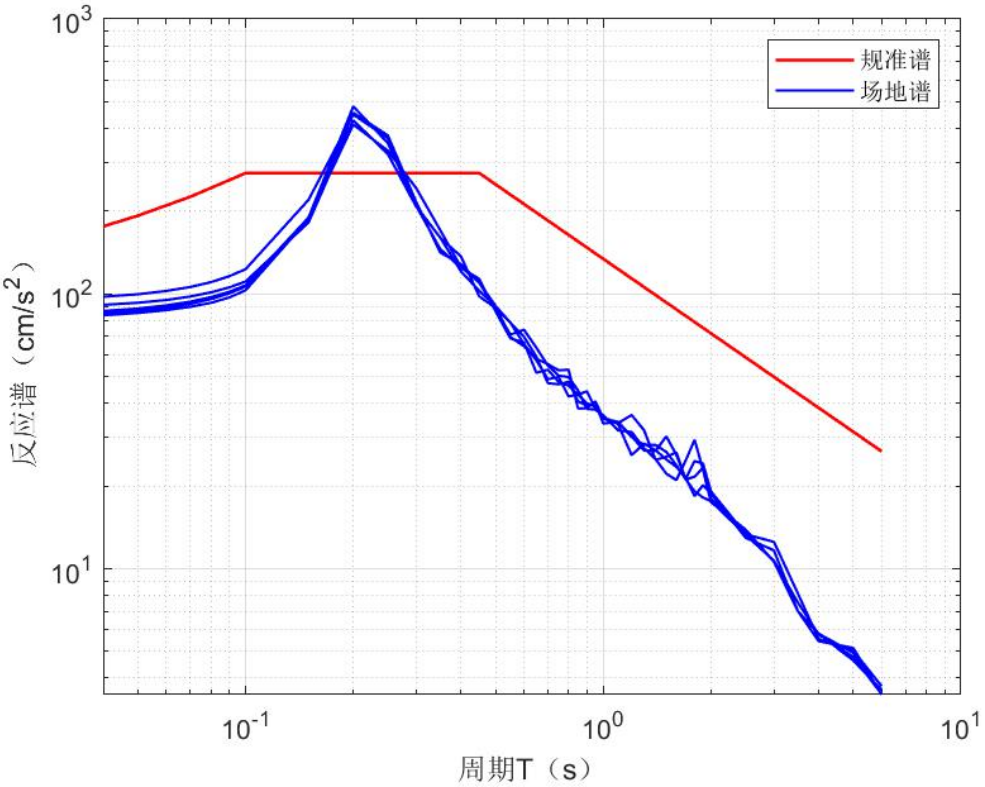


图 7.3 -9　ZK2 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

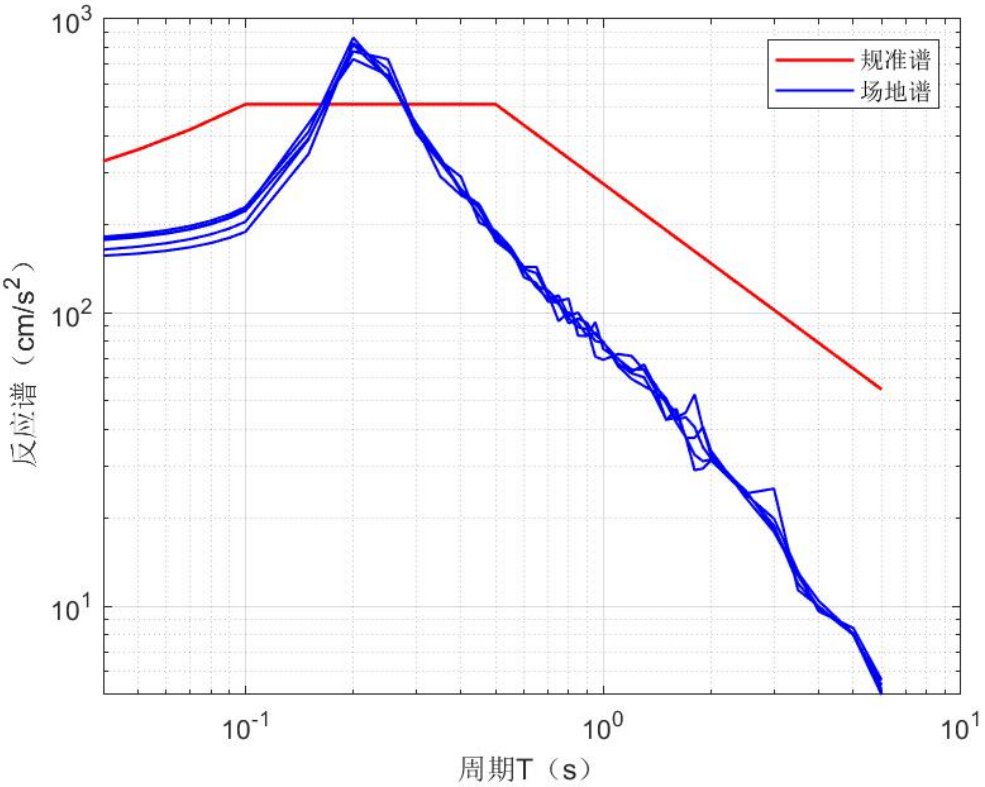


图 7.3 -10　ZK2 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

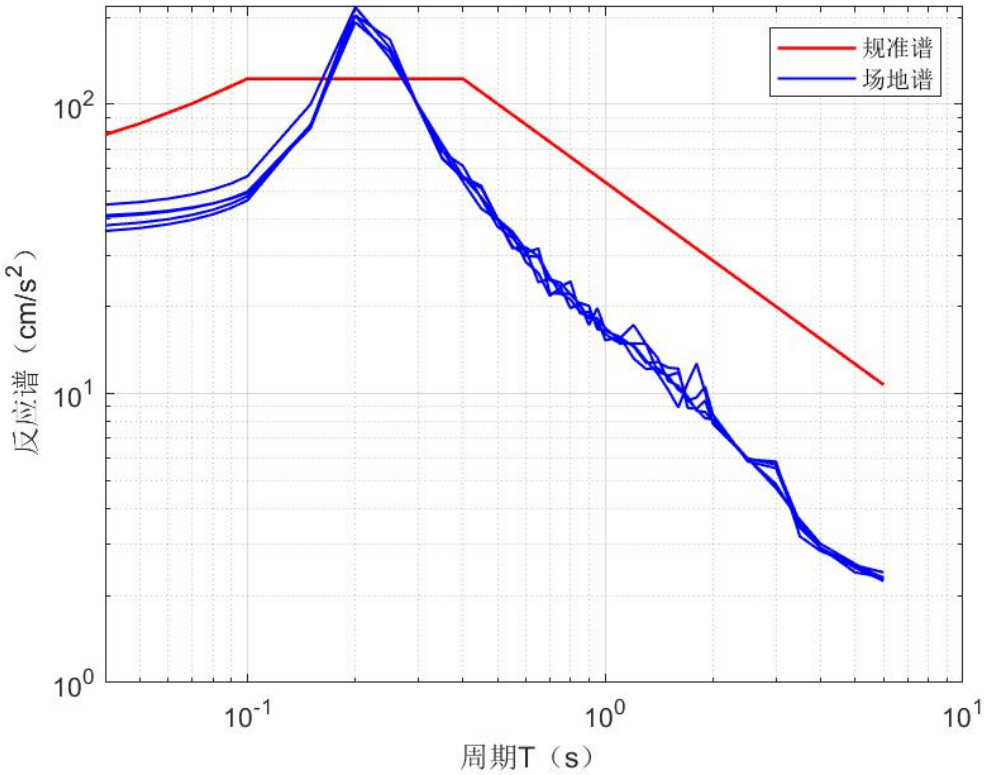


图 7.3 -11　ZK2 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

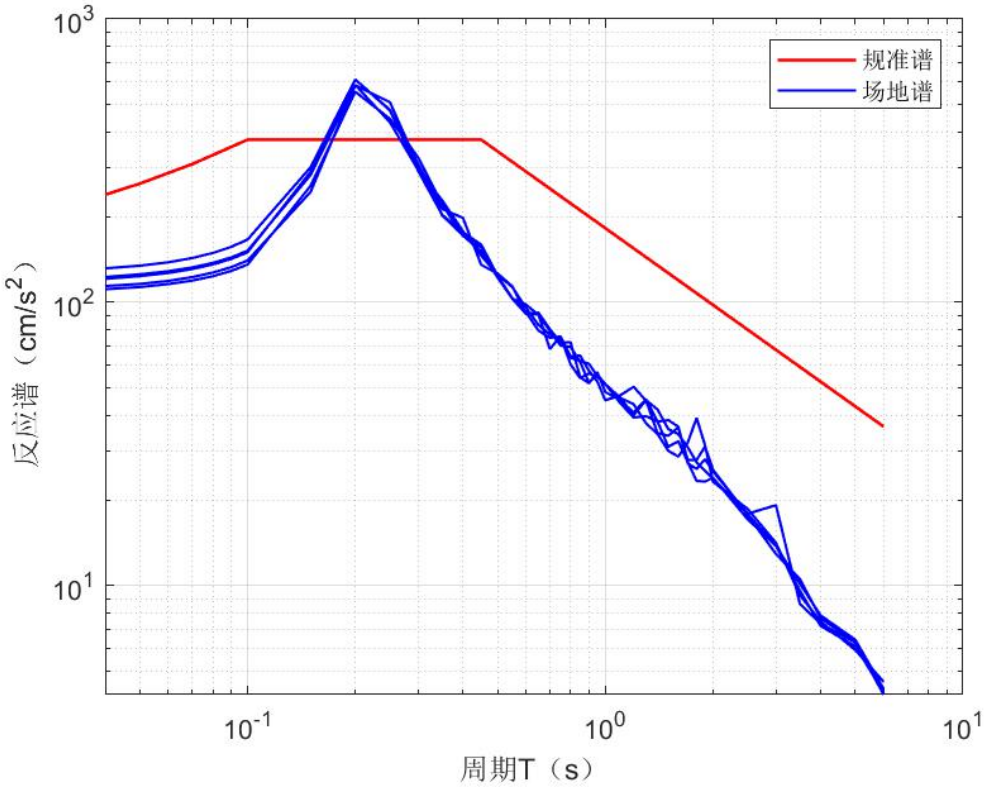


图 7.3 -12　ZK2 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

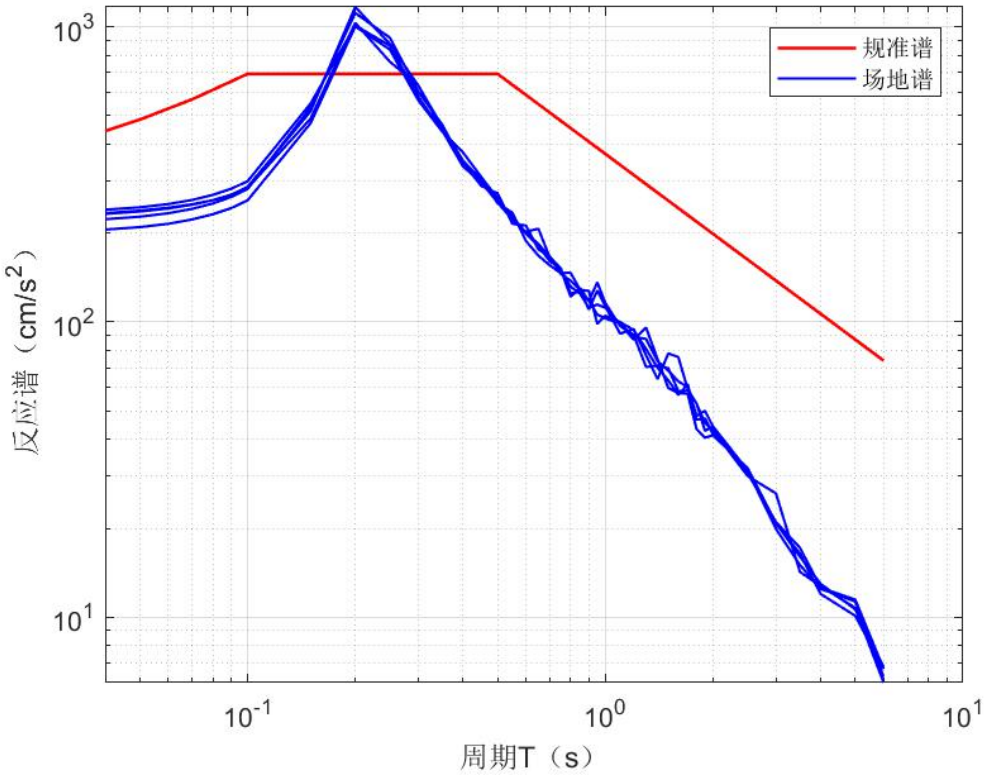


图 7.3 -13　ZK2 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

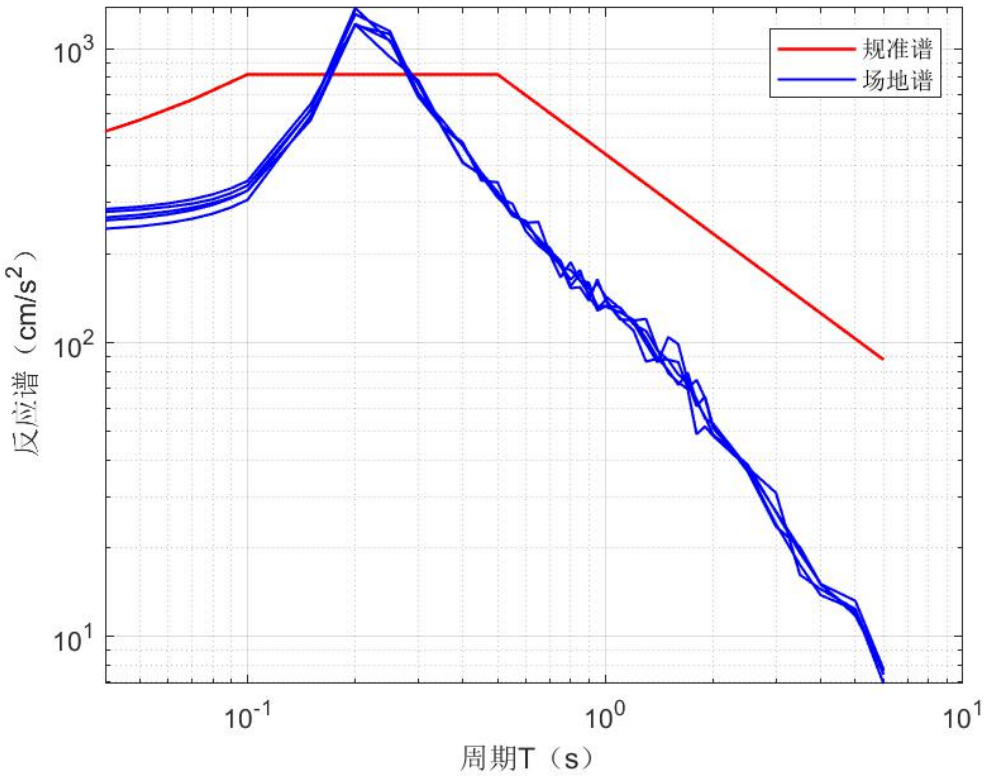


图 7.3 -14　ZK2 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

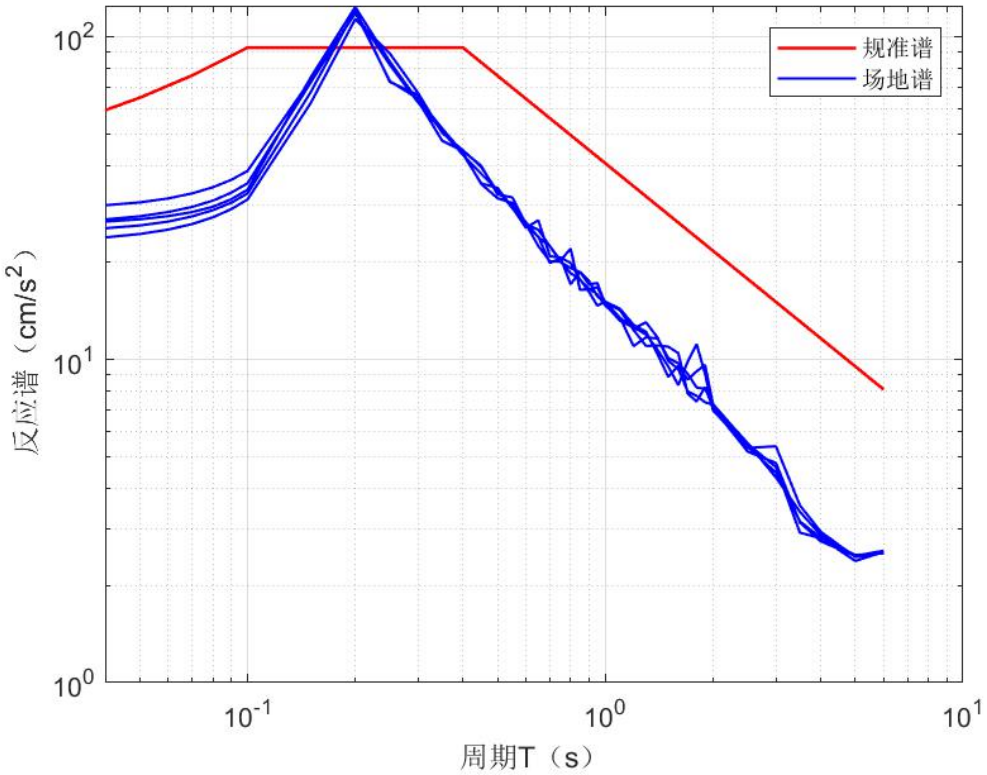


图 7.3 -15　ZK3 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

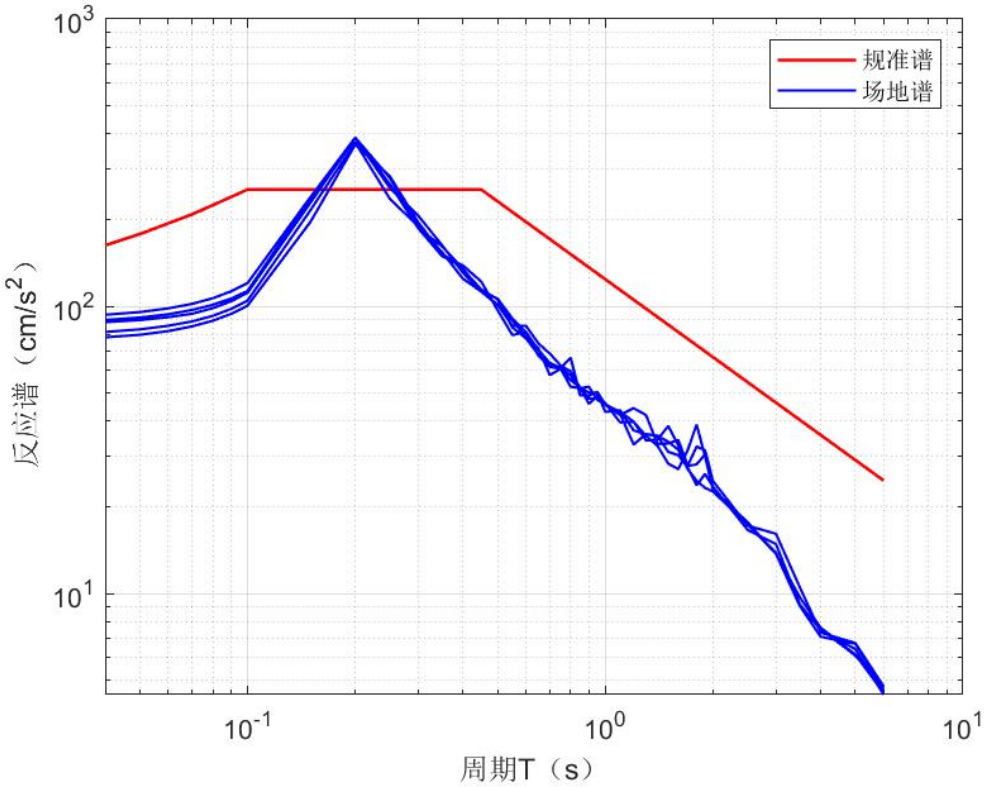


图 7.3 -16　ZK3 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

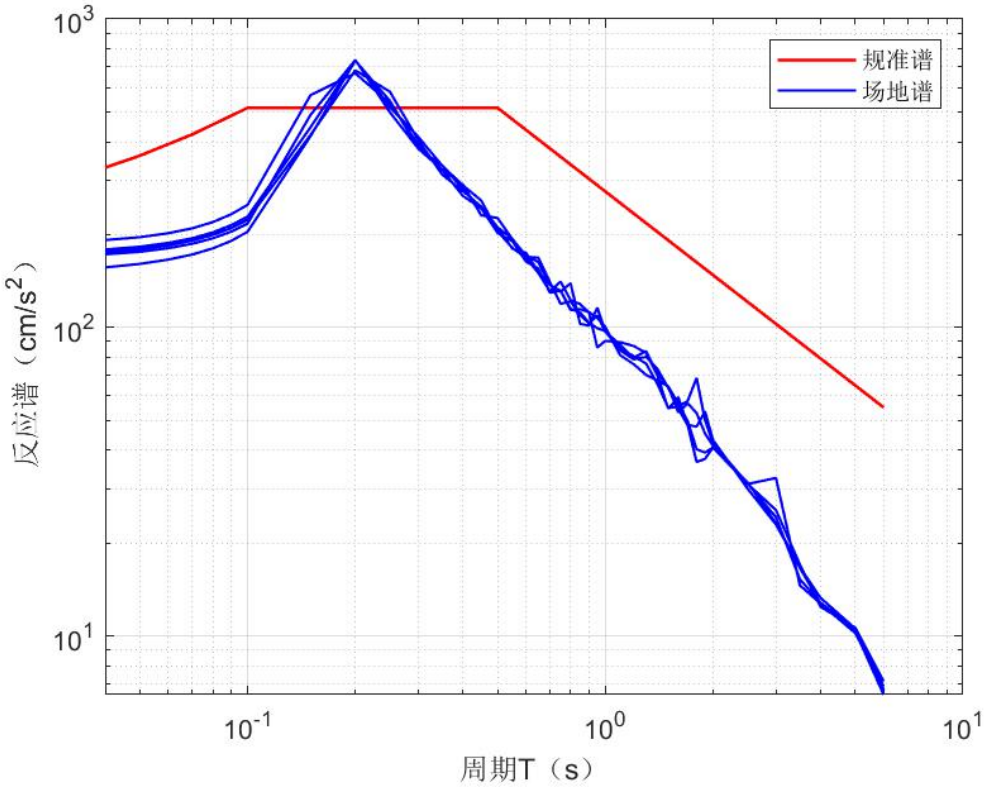


图 7.3 -17　ZK3 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

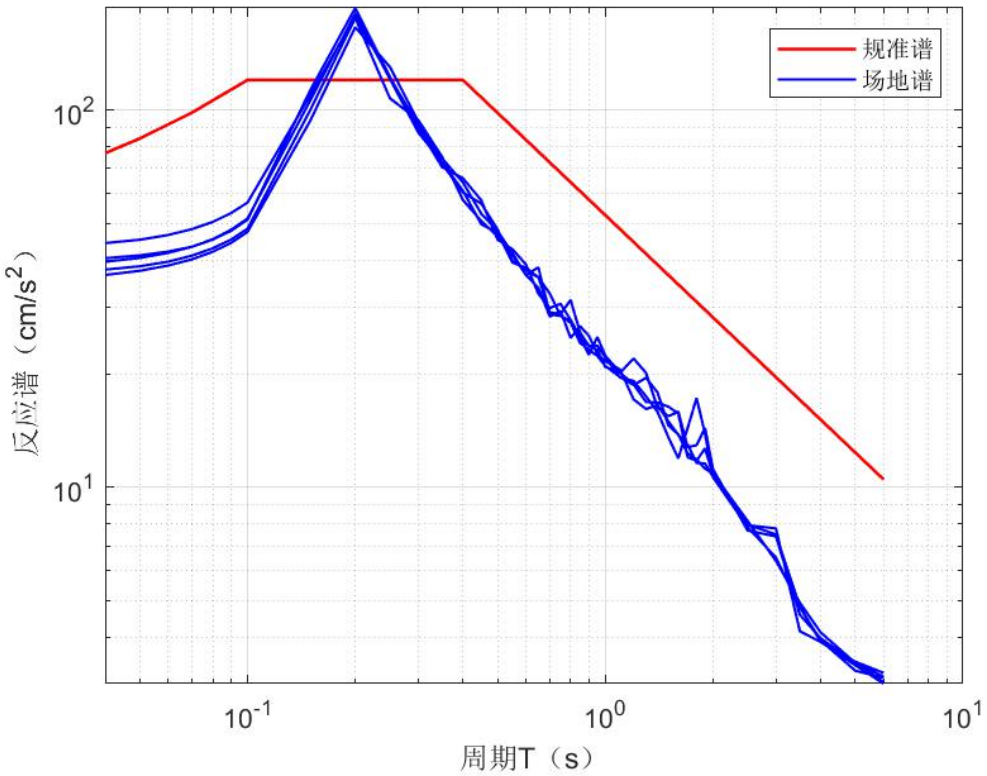


图 7.3 -18　ZK3 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

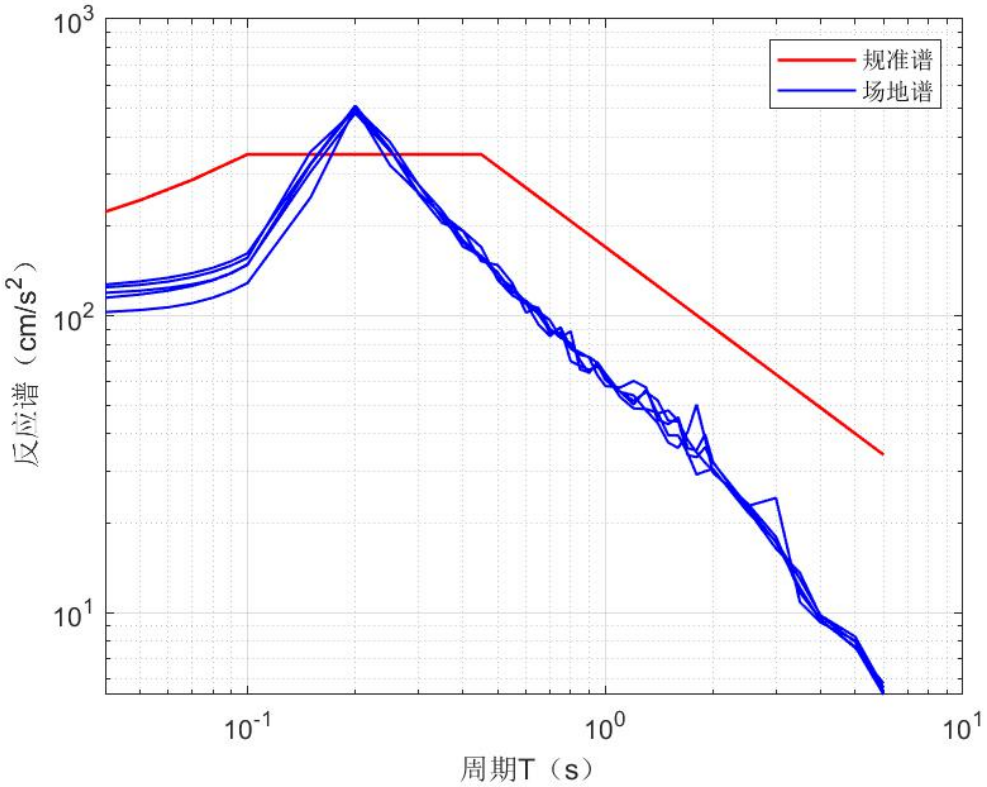


图 7.3 -19　ZK3 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

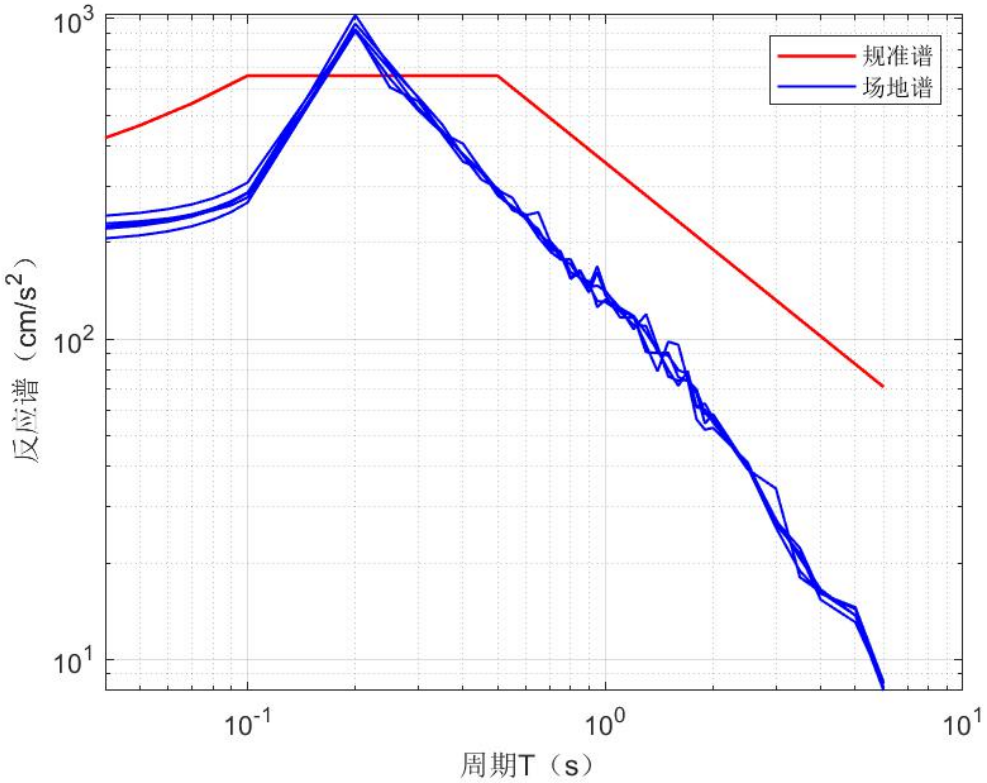


图 7.3 -20　ZK3 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

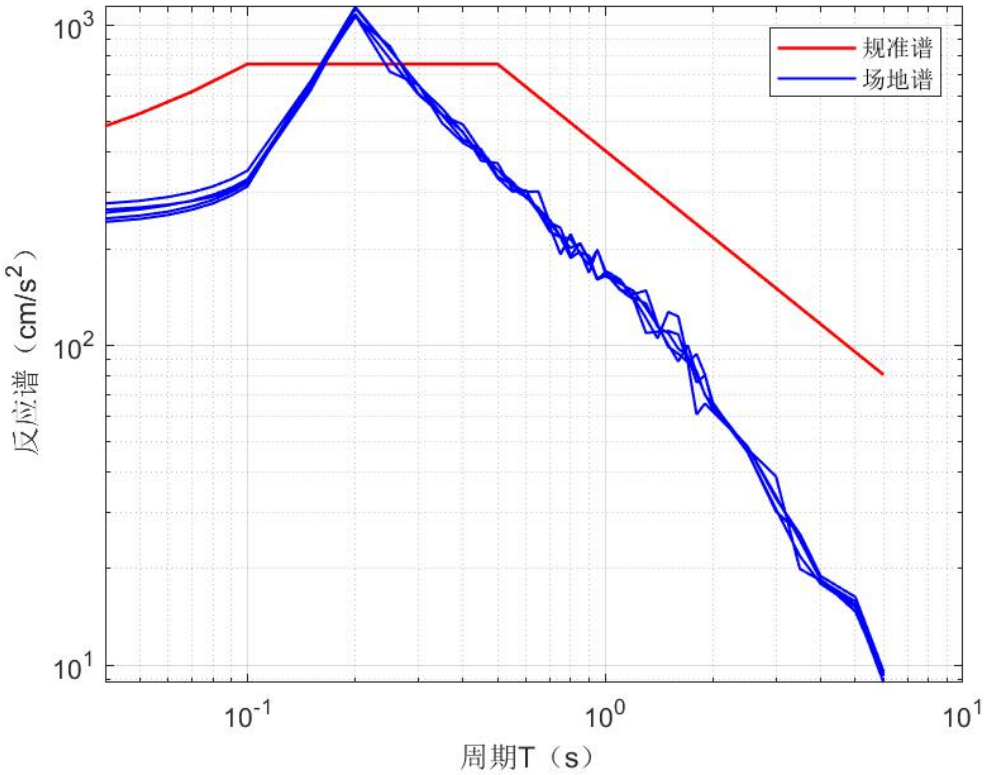


图 7.3 -21　ZK3 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

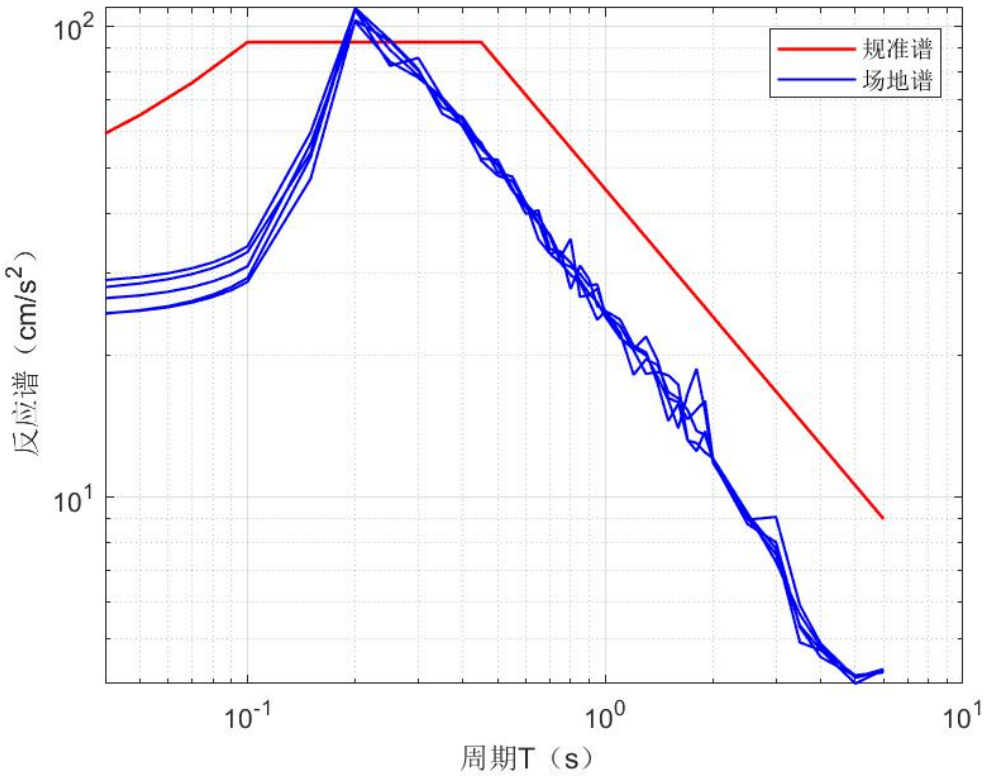


图 7.3 -22　ZK4 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

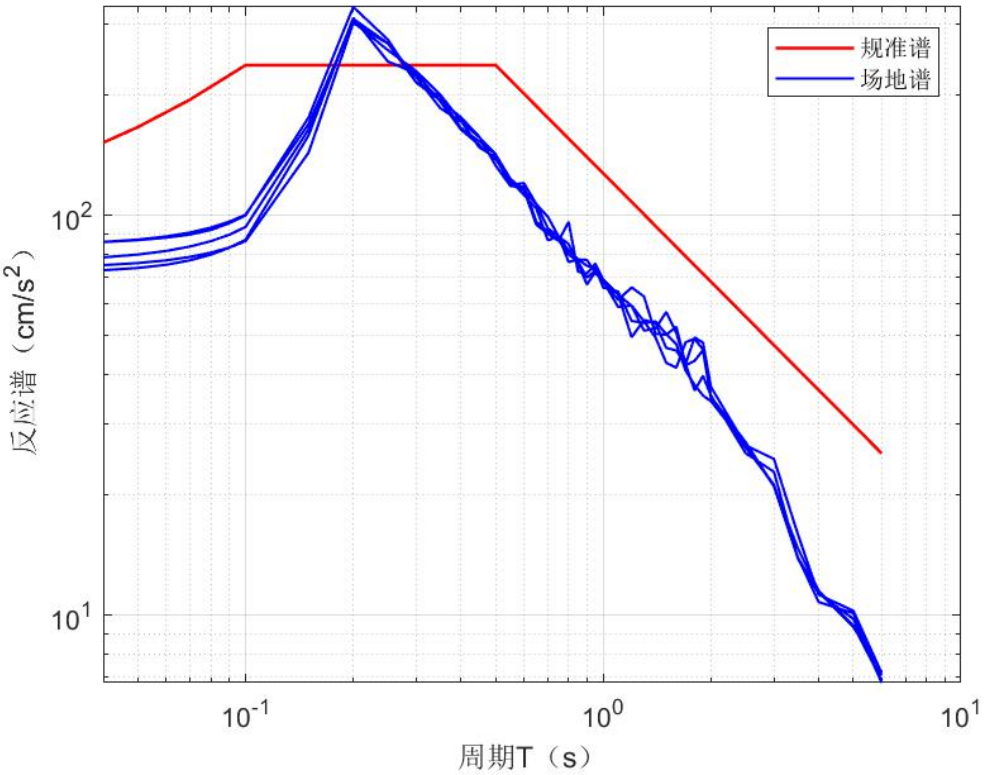


图 7.3 -23　ZK4 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

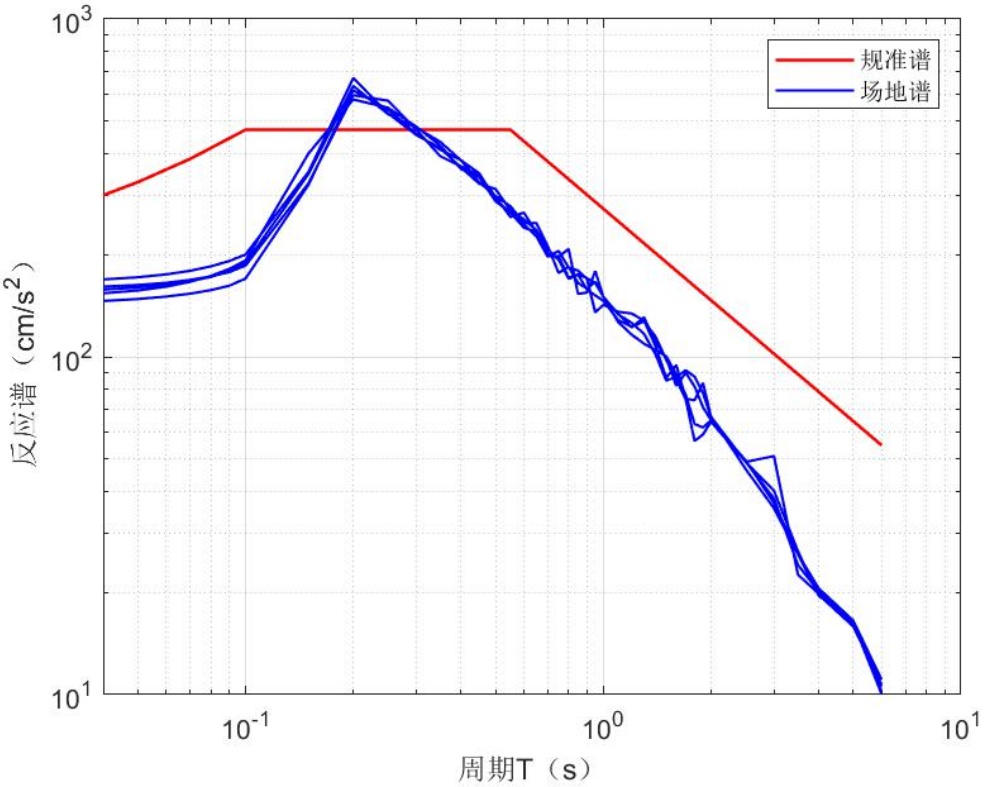


图 7.3 -24　ZK4 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

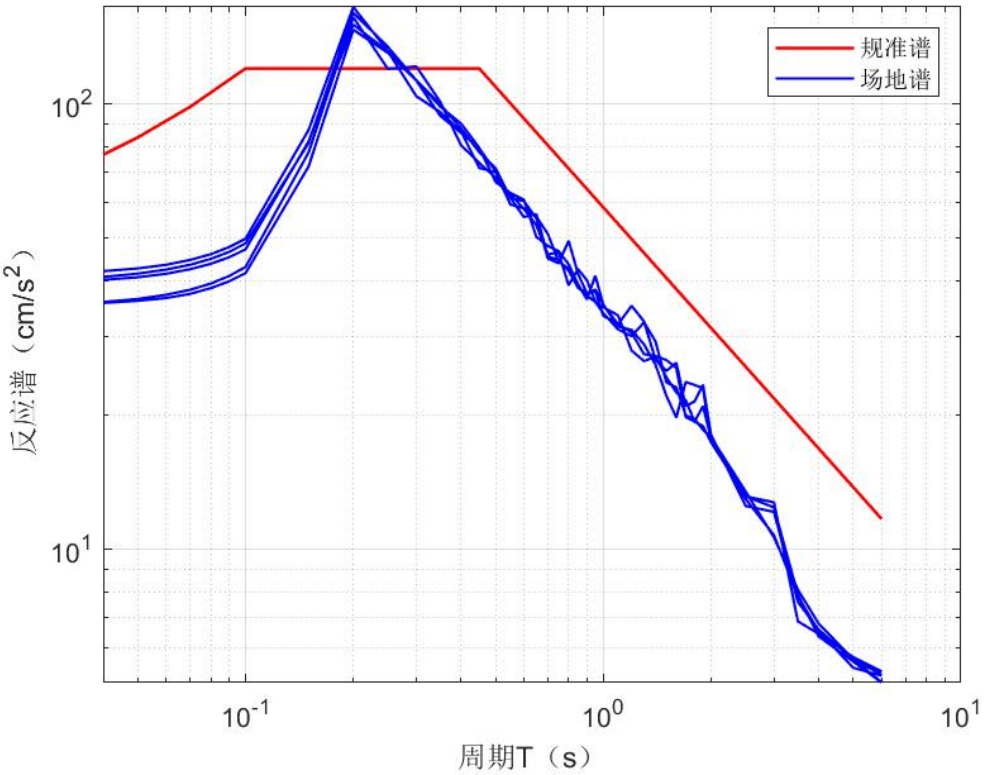


图 7.3 -25　ZK4 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

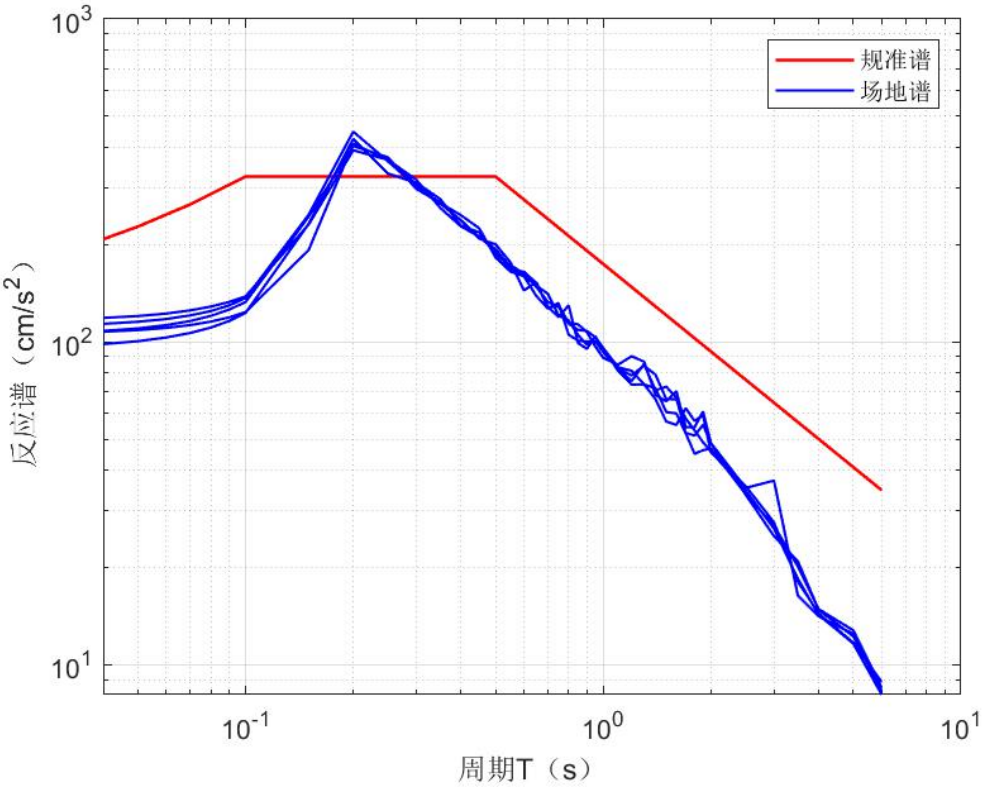


图 7.3 -26　ZK4 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

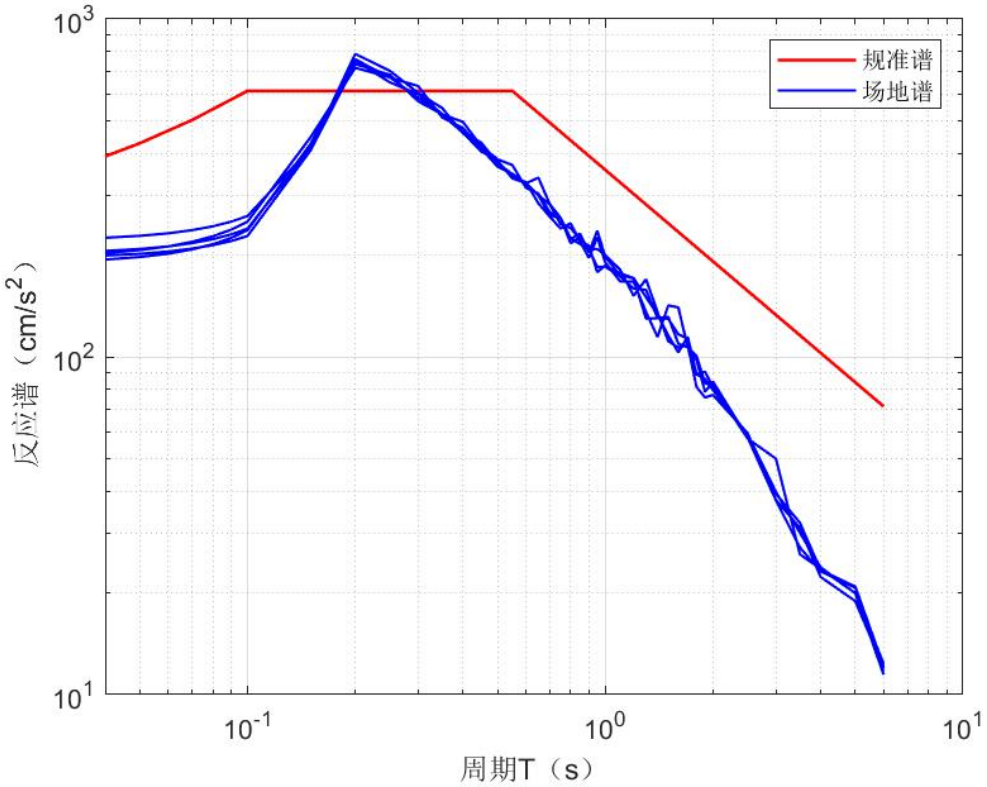


图 7.3 -27　ZK4 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

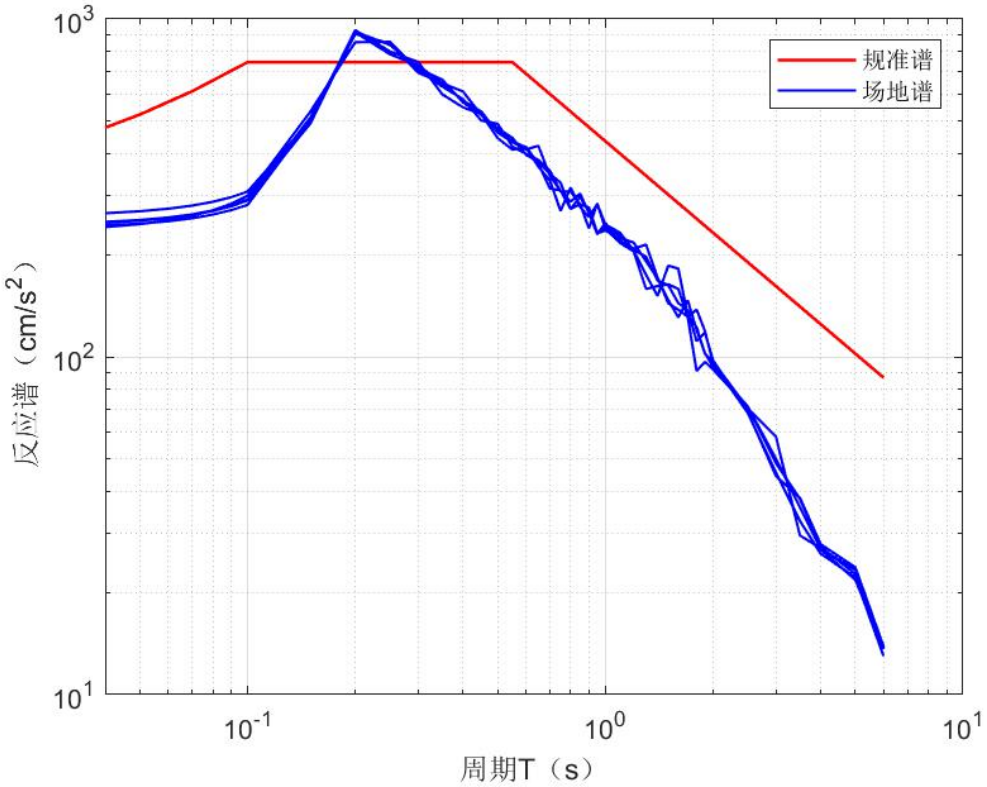


图 7.3 -28　ZK4 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

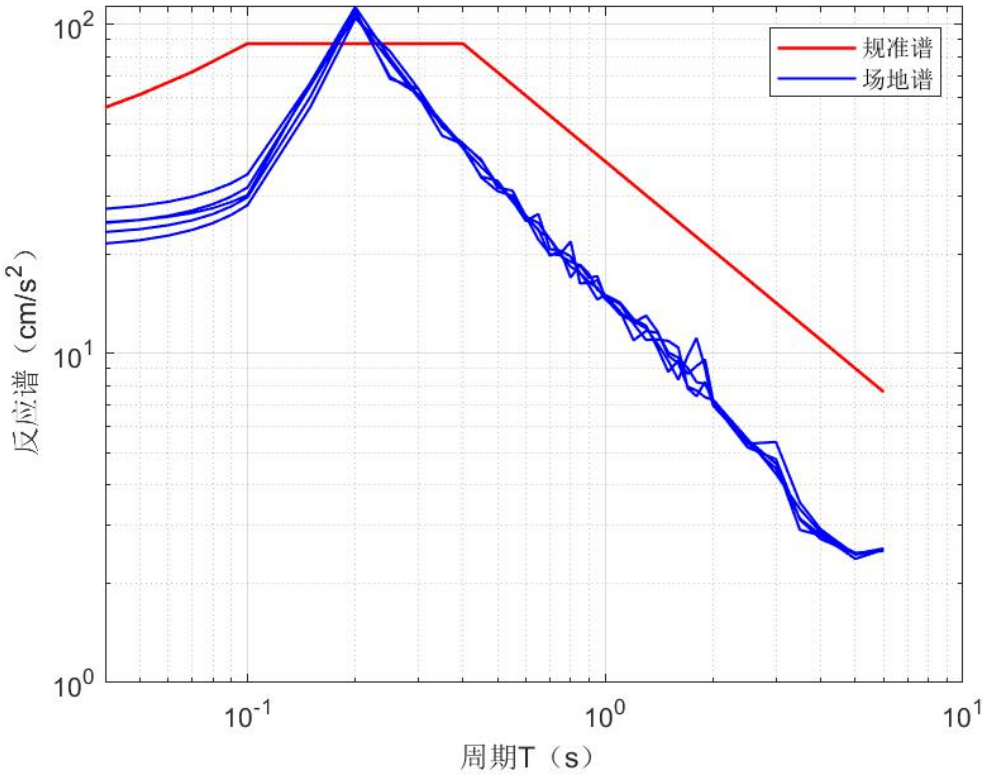


图 7.3 -29　ZK5 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

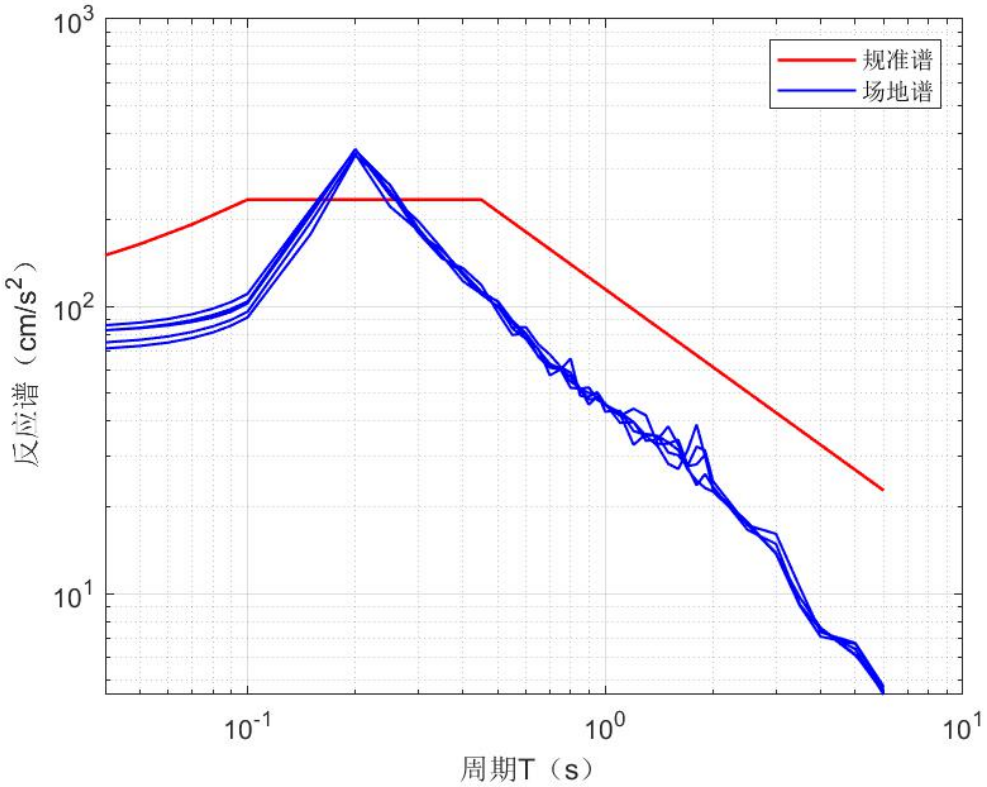


图 7.3 -30　ZK5 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

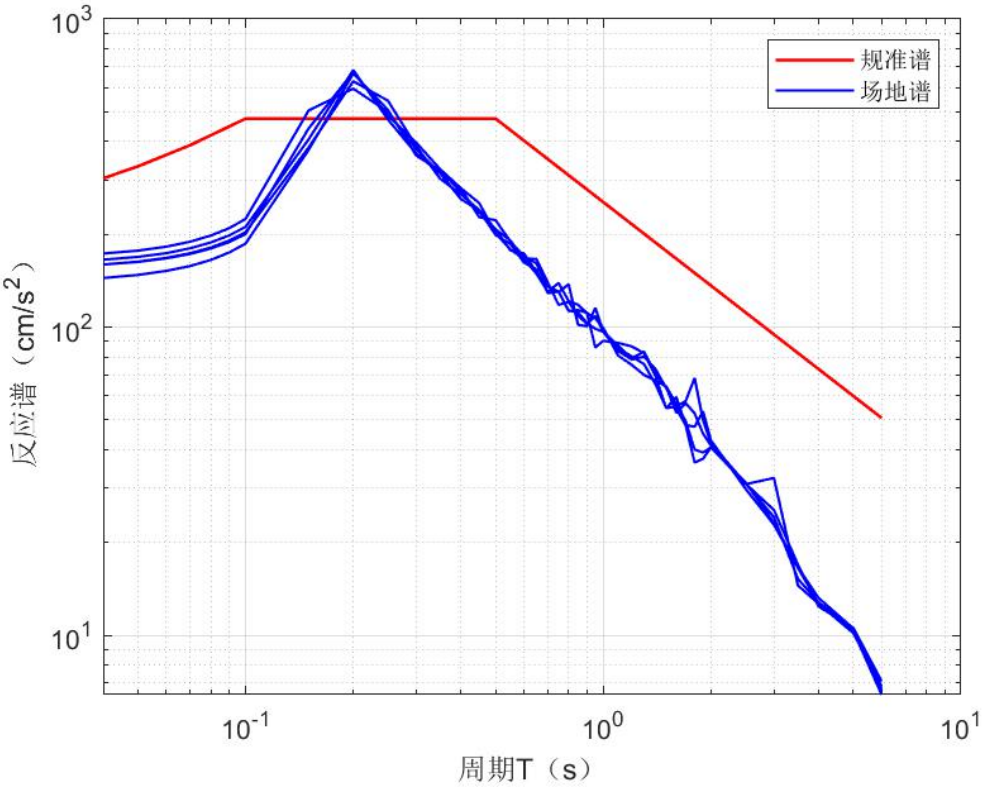


图 7.3 -31　ZK5 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

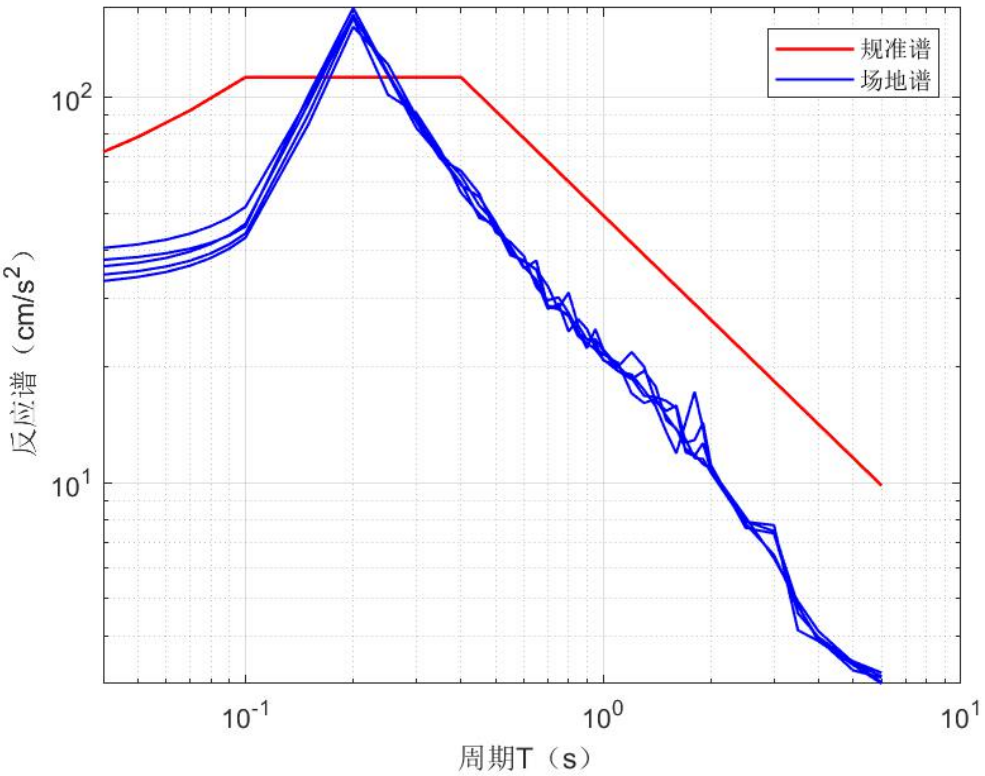


图 7.3 -32　ZK5 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

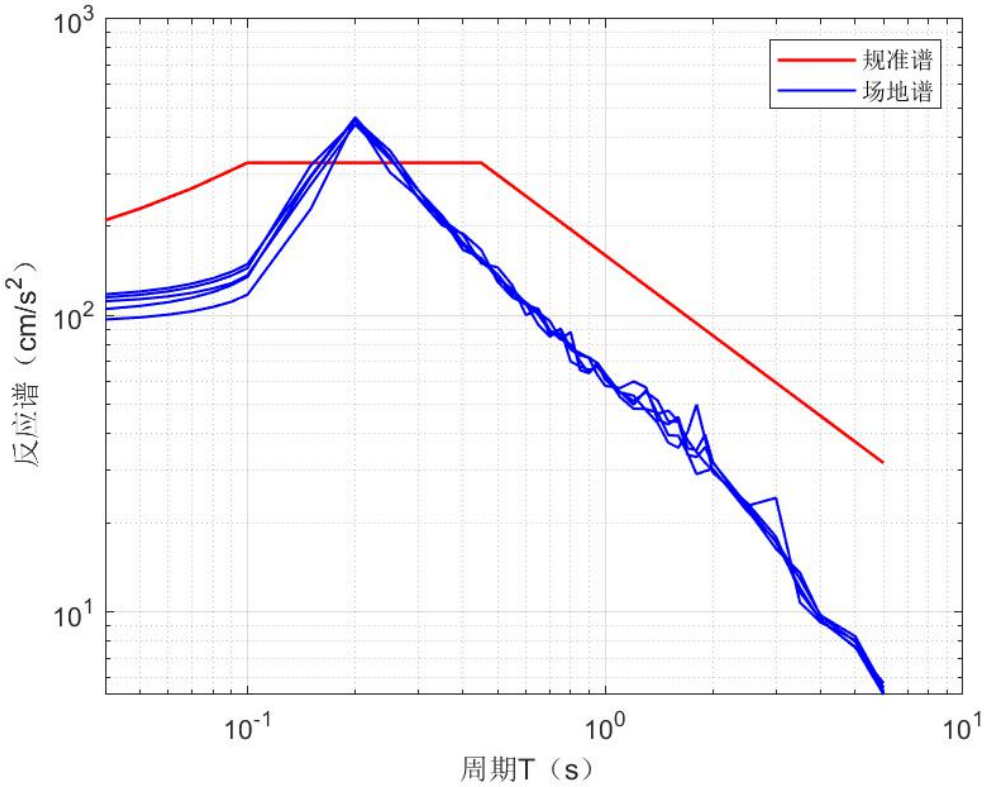


图 7.3 -33　ZK5 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

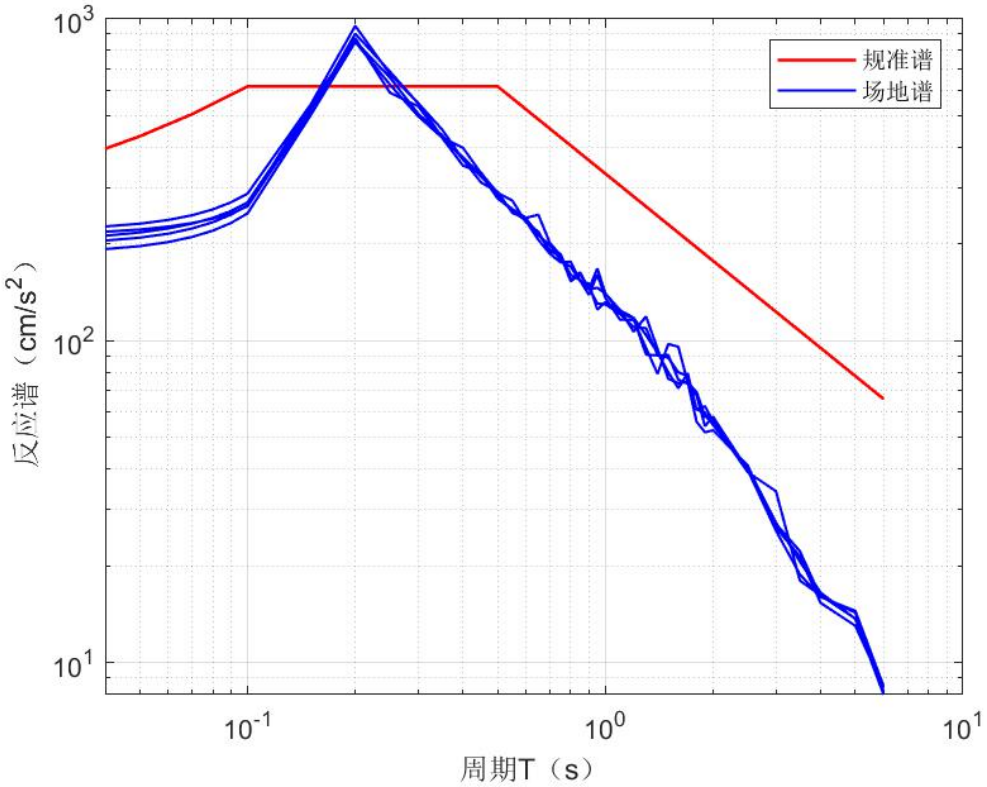


图 7.3 -34　ZK5 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

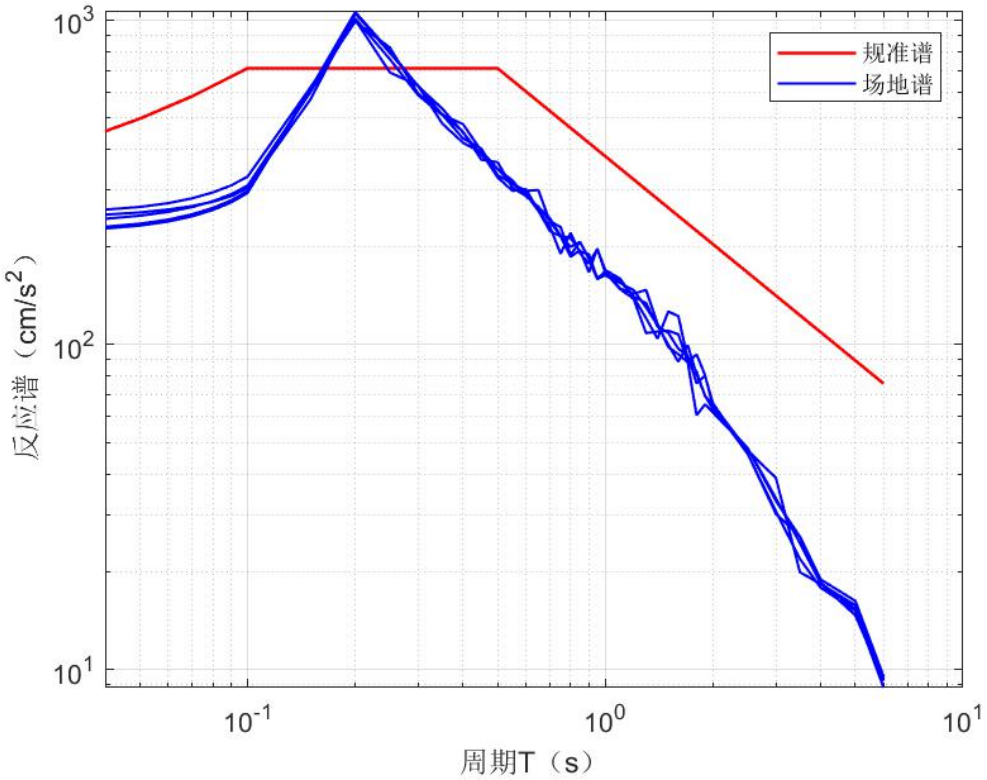


图 7.3 -35　ZK5 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

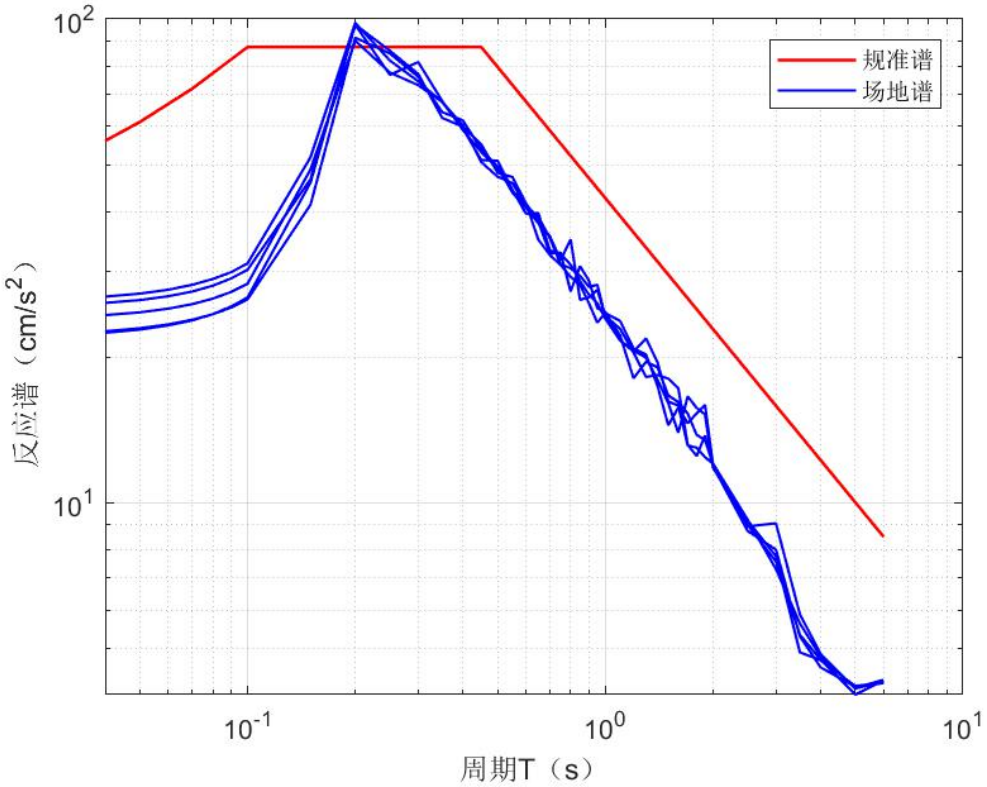


图 7.3 -36　ZK6 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

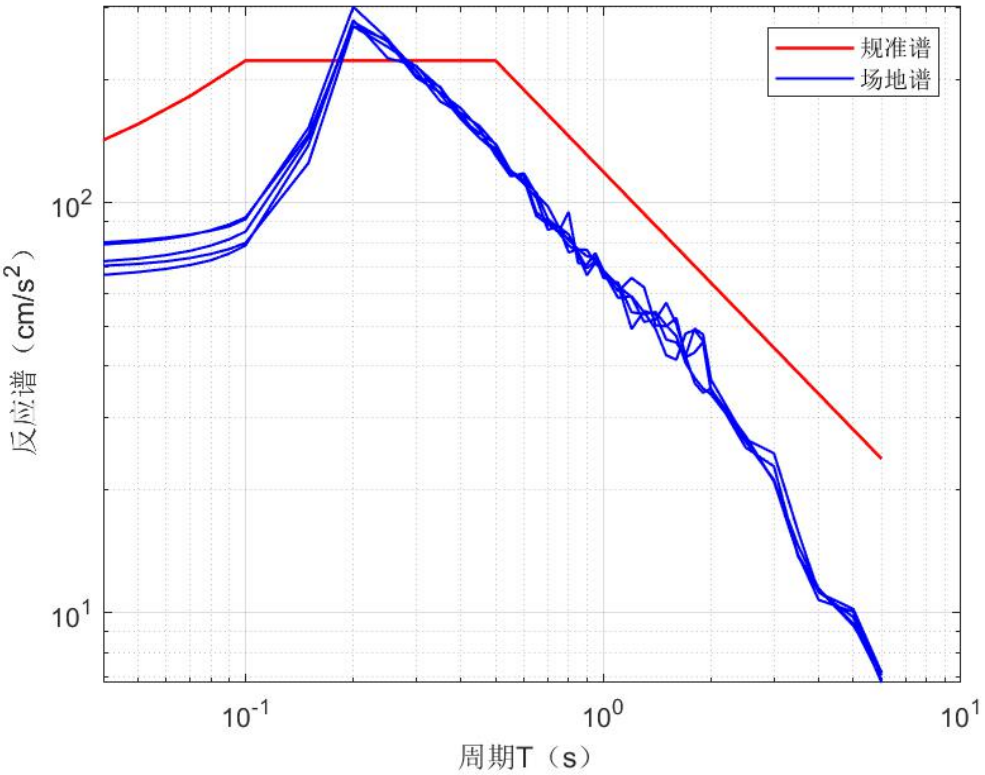


图 7.3 -37　ZK6 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

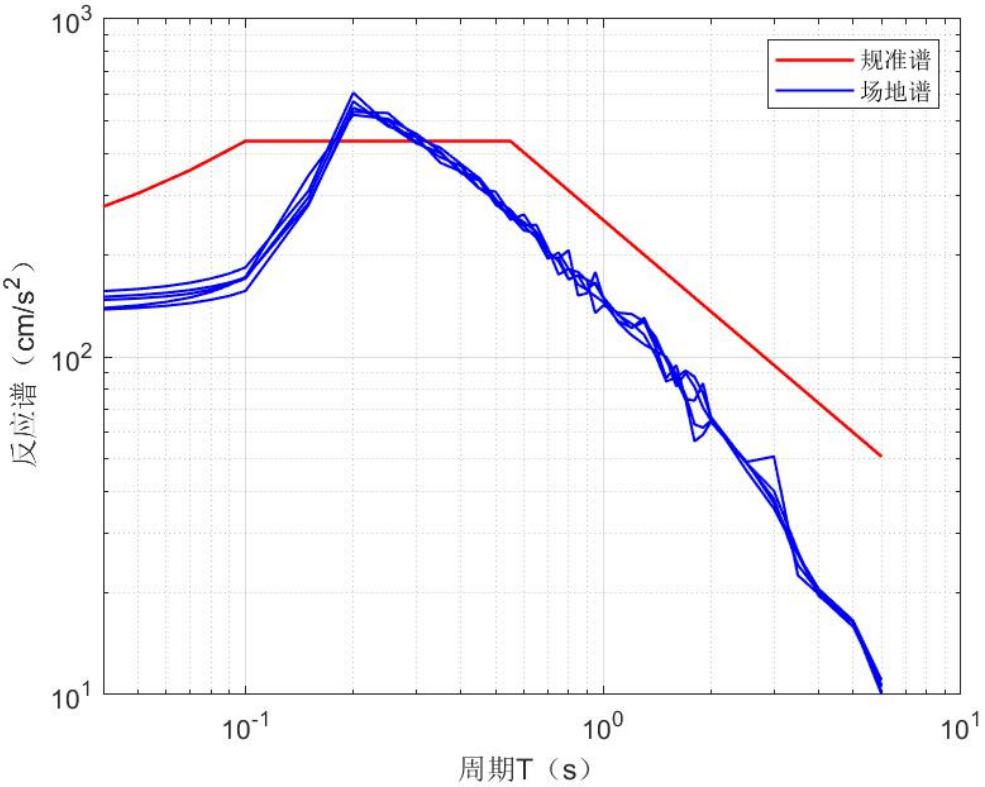


图 7.3 -38　ZK6 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

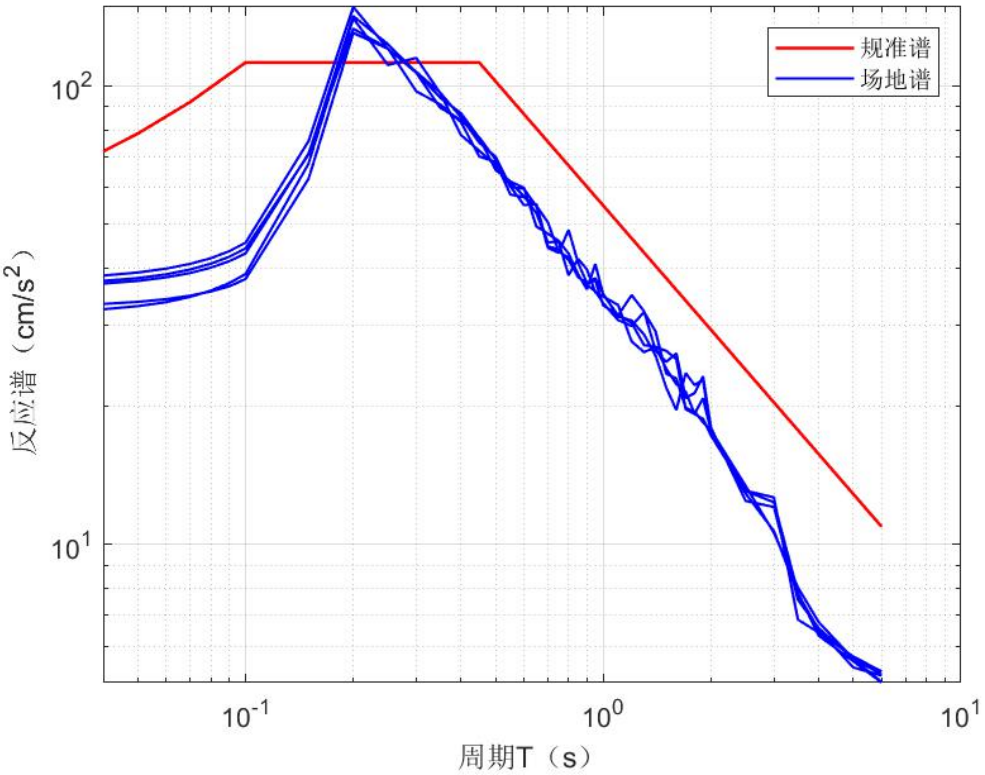


图 7.3 -39　ZK6 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

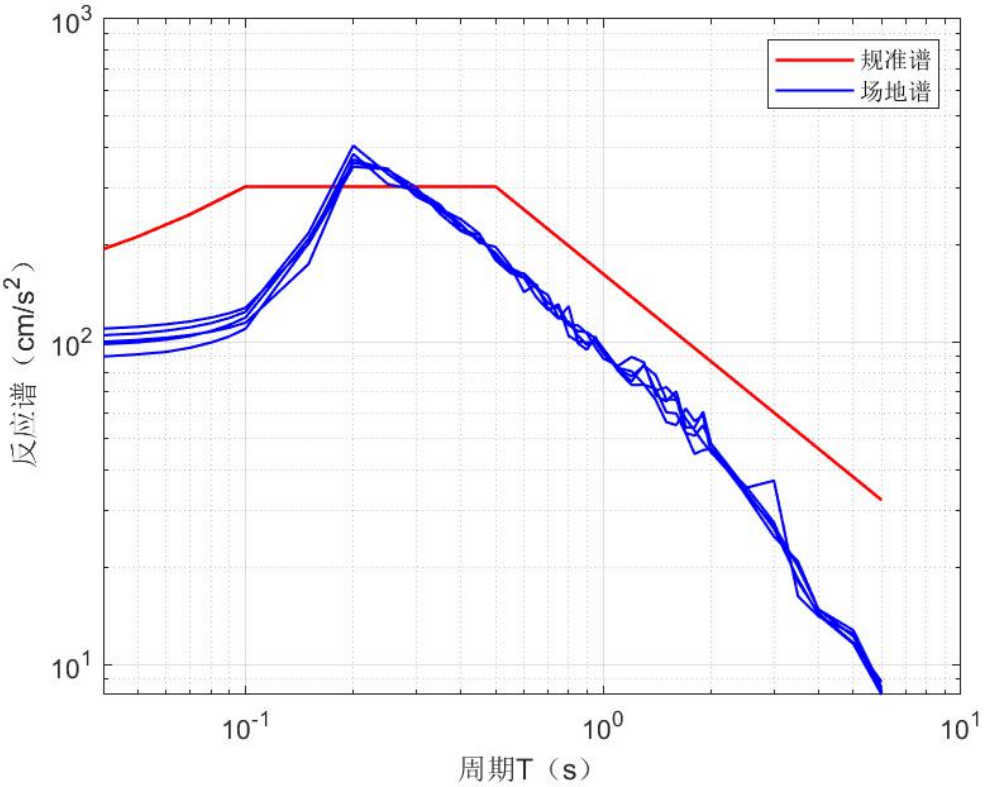


图 7.3 -40　ZK6 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

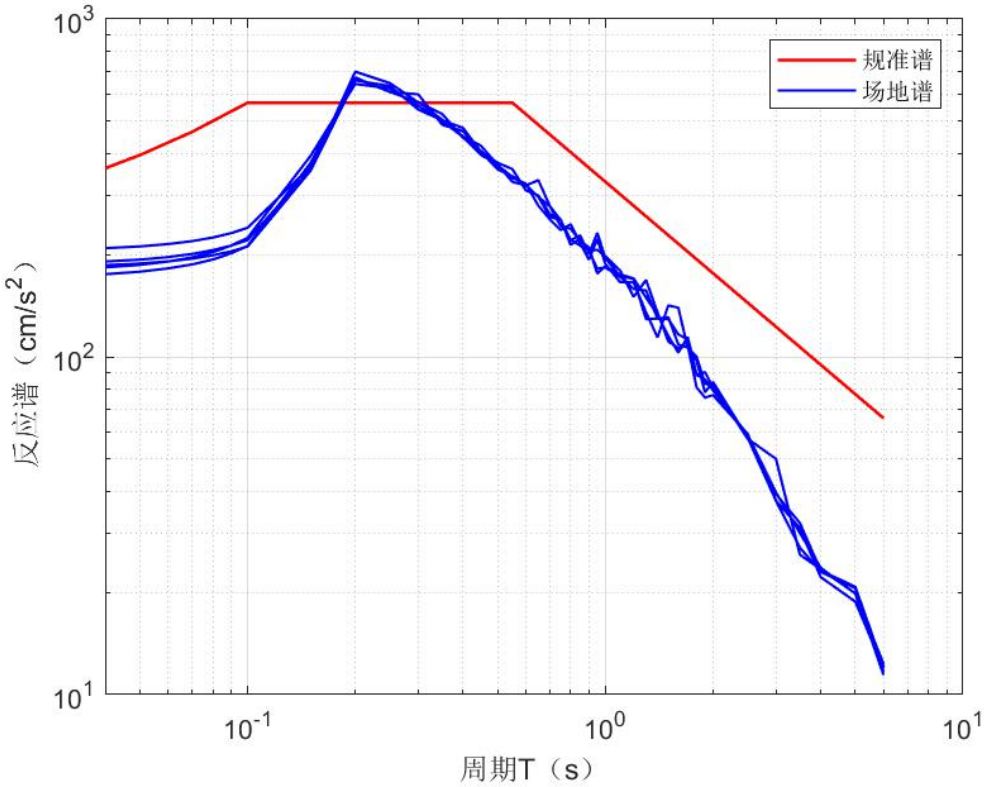


图 7.3 -41　ZK6 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

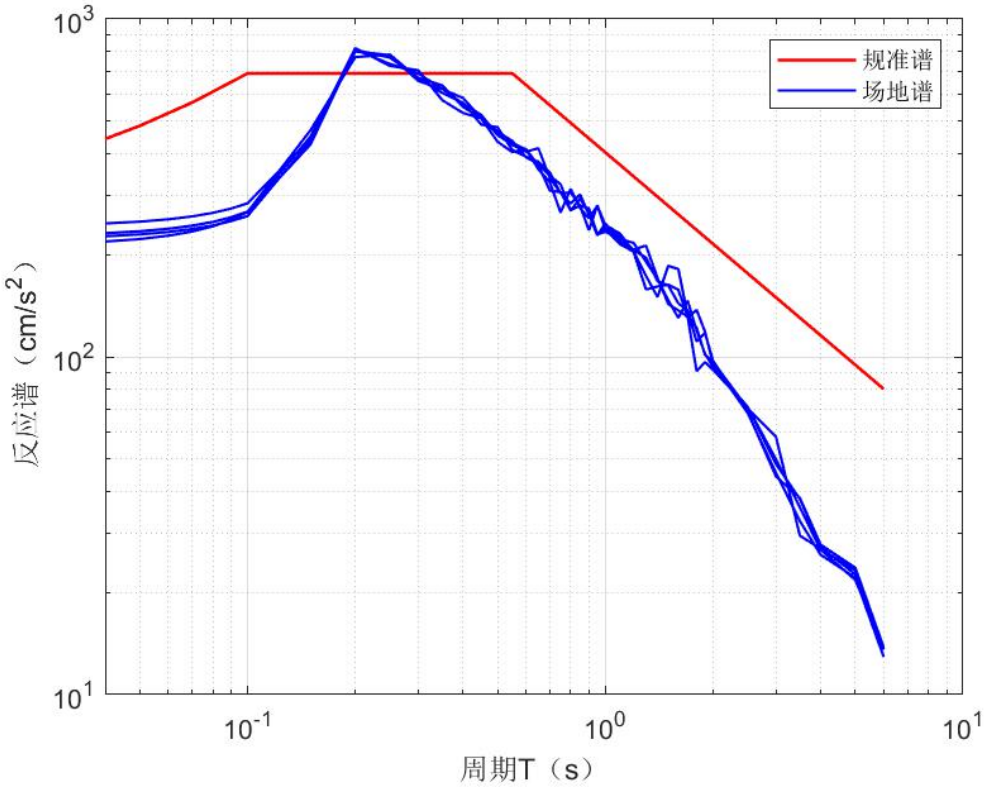


图 7.3 -42　ZK6 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

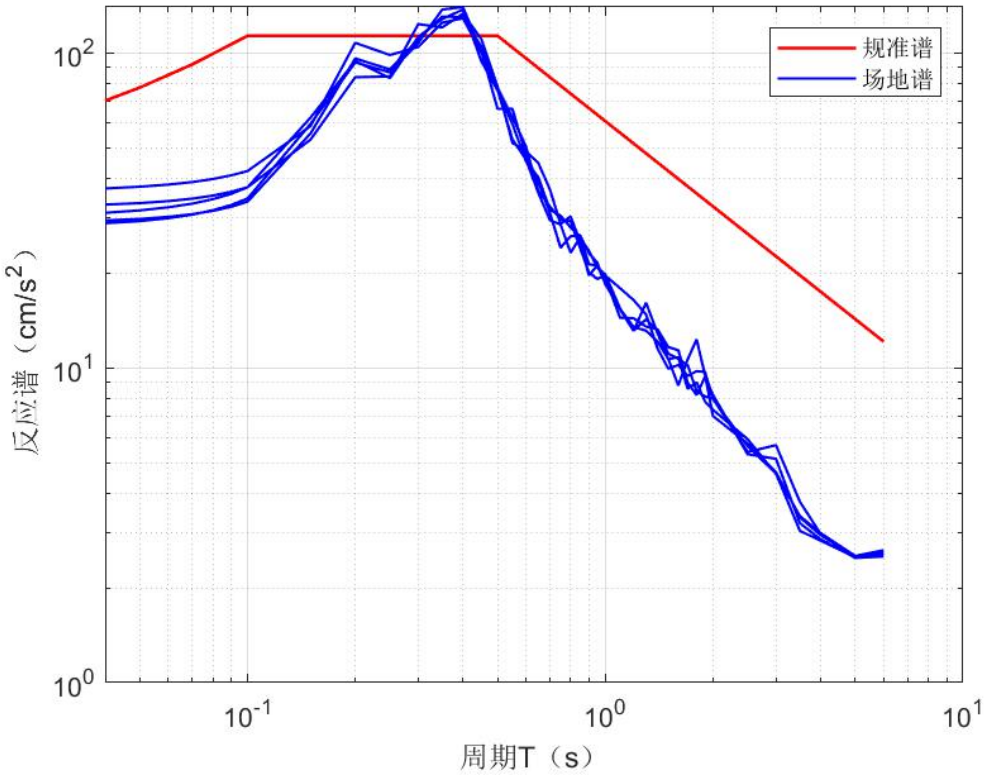


图 7.3 -43　ZK7 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

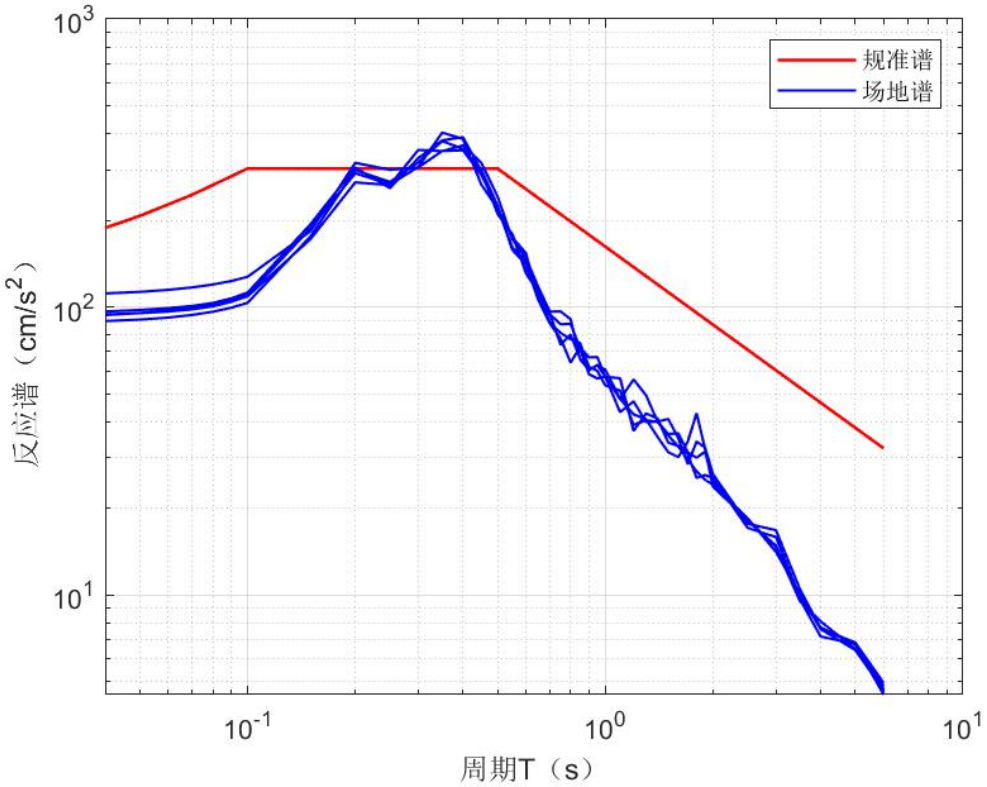


图 7.3 -44　ZK7 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

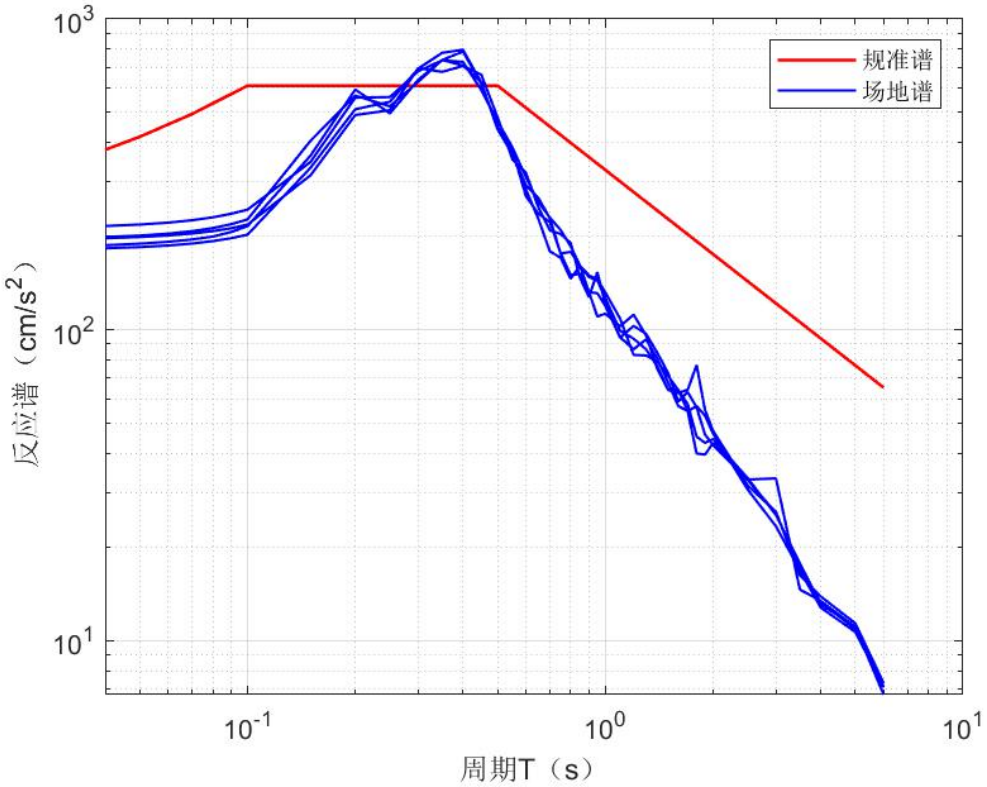


图 7.3 -45　ZK7 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

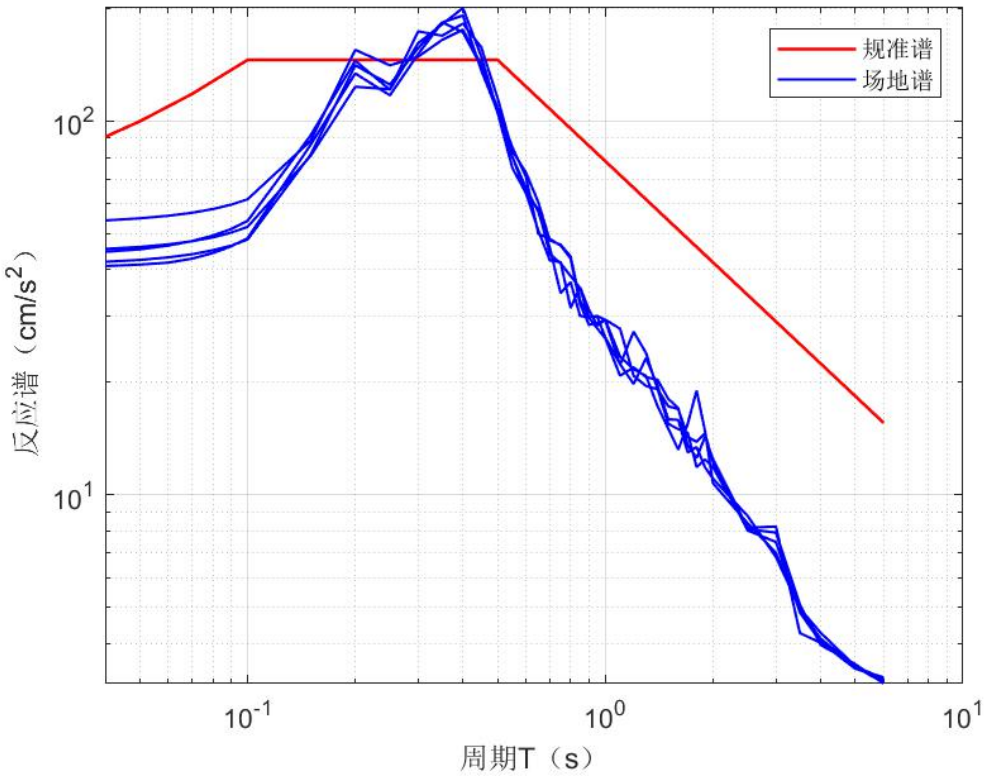


图 7.3 -46　ZK7 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

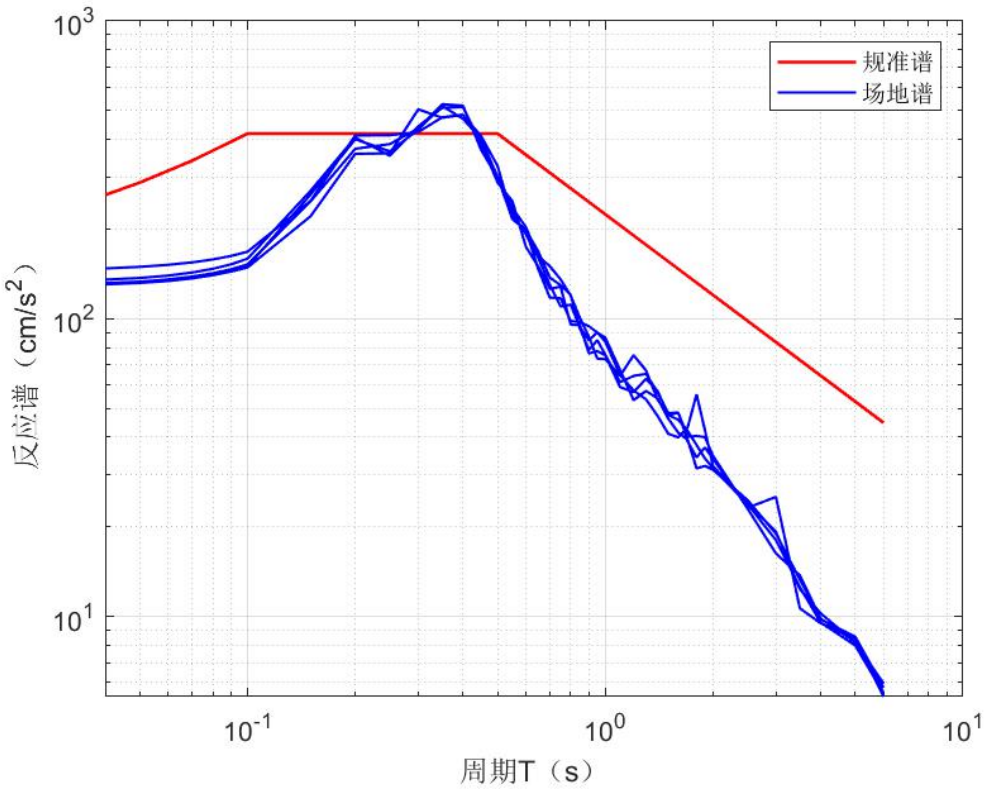


图 7.3 -47　ZK7 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

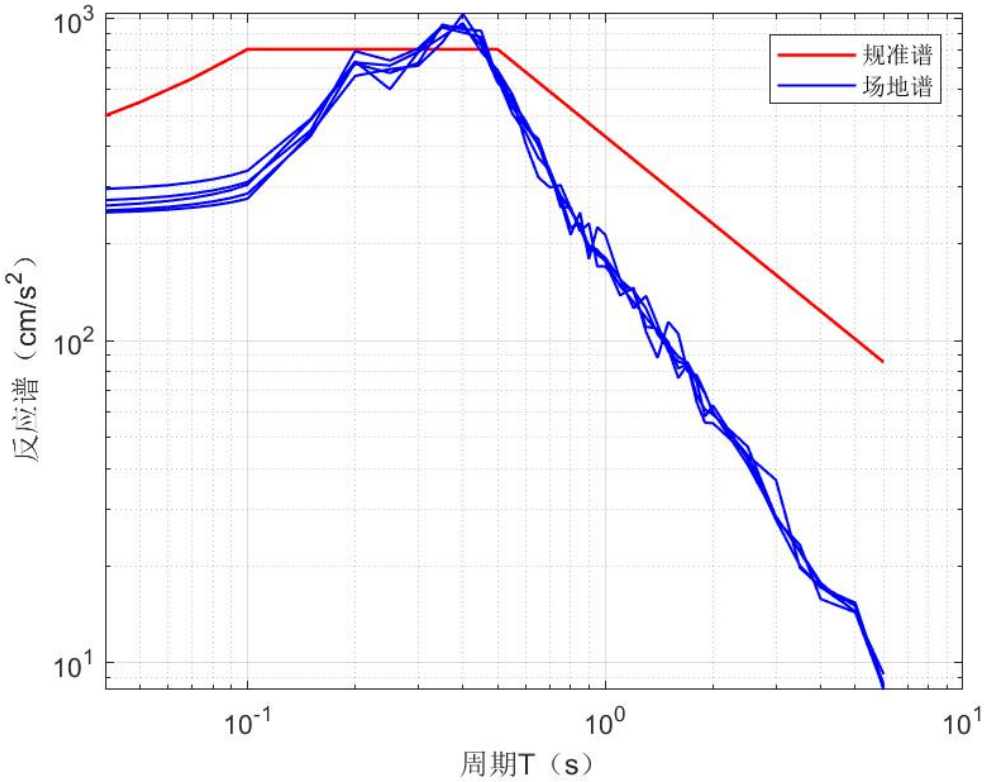


图 7.3 -48　ZK7 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

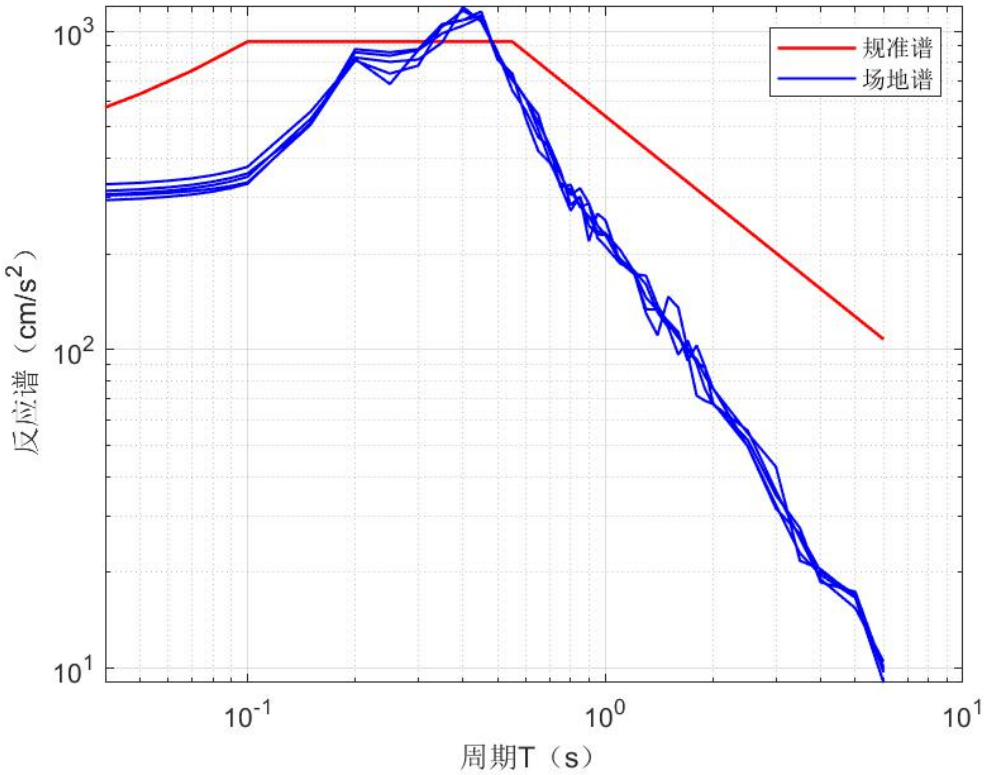


图 7.3 -49　ZK7 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

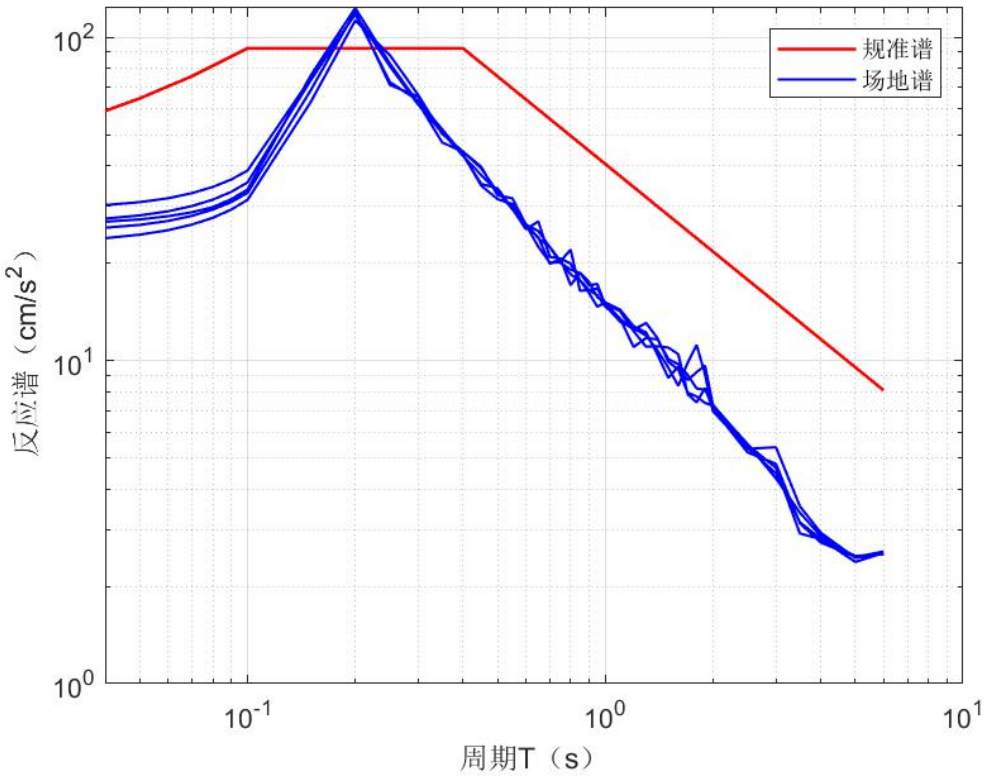


图 7.3 -50　ZK8 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

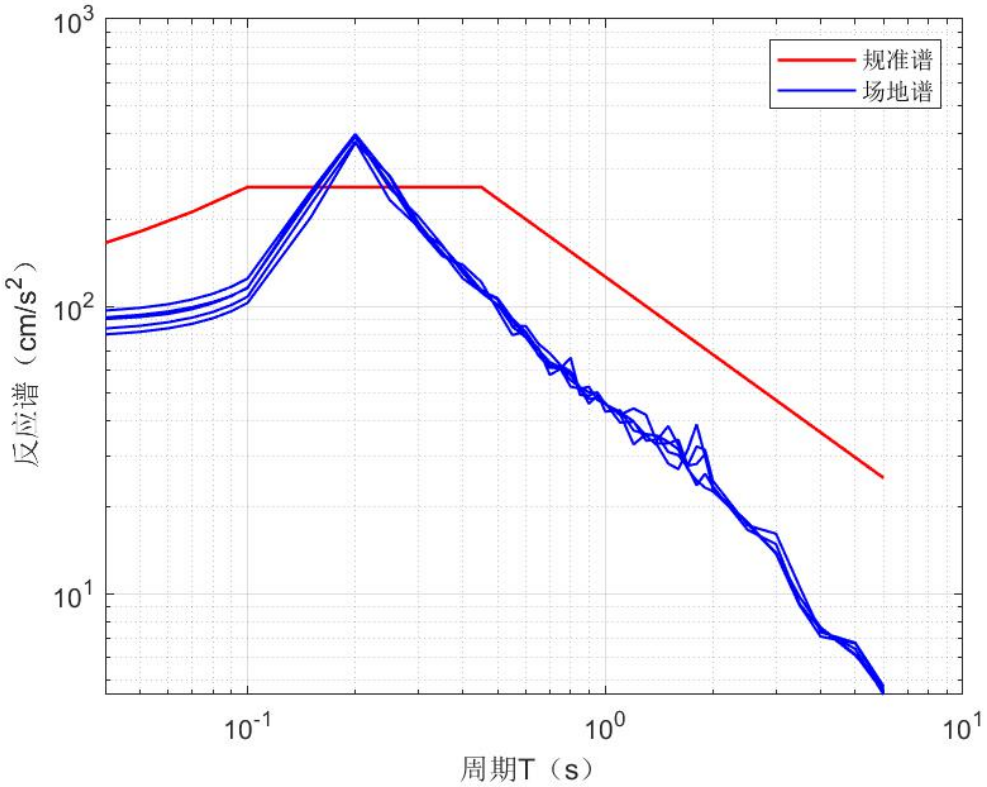


图 7.3 -51　ZK8 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

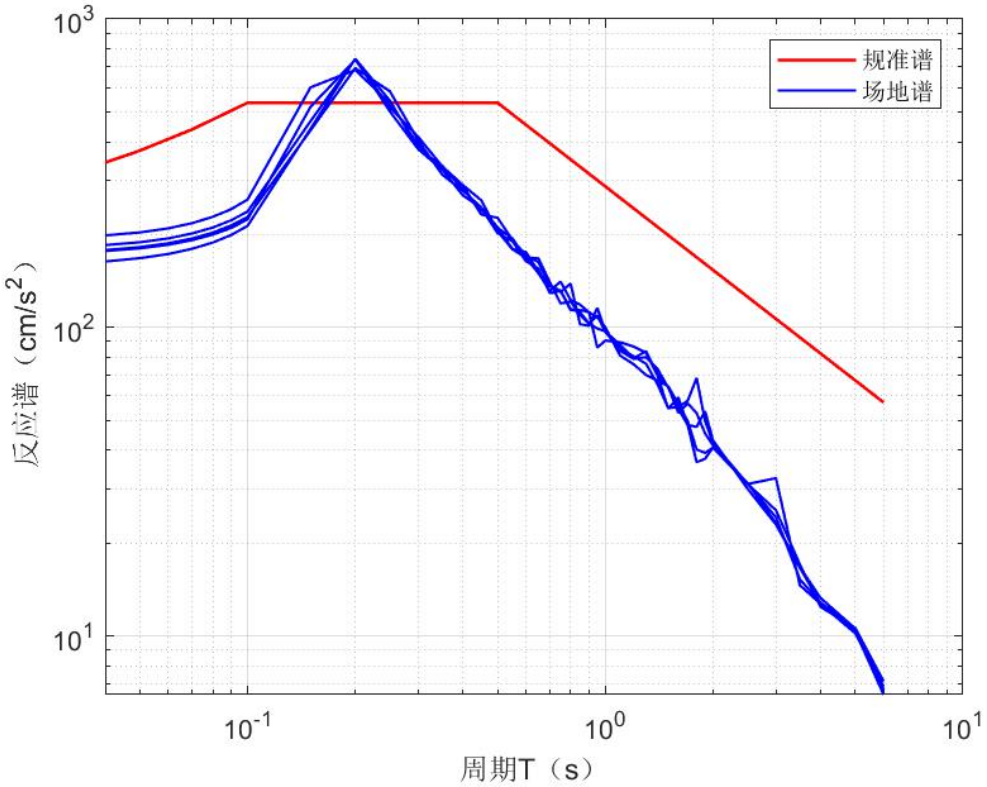


图 7.3 -52　ZK8 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

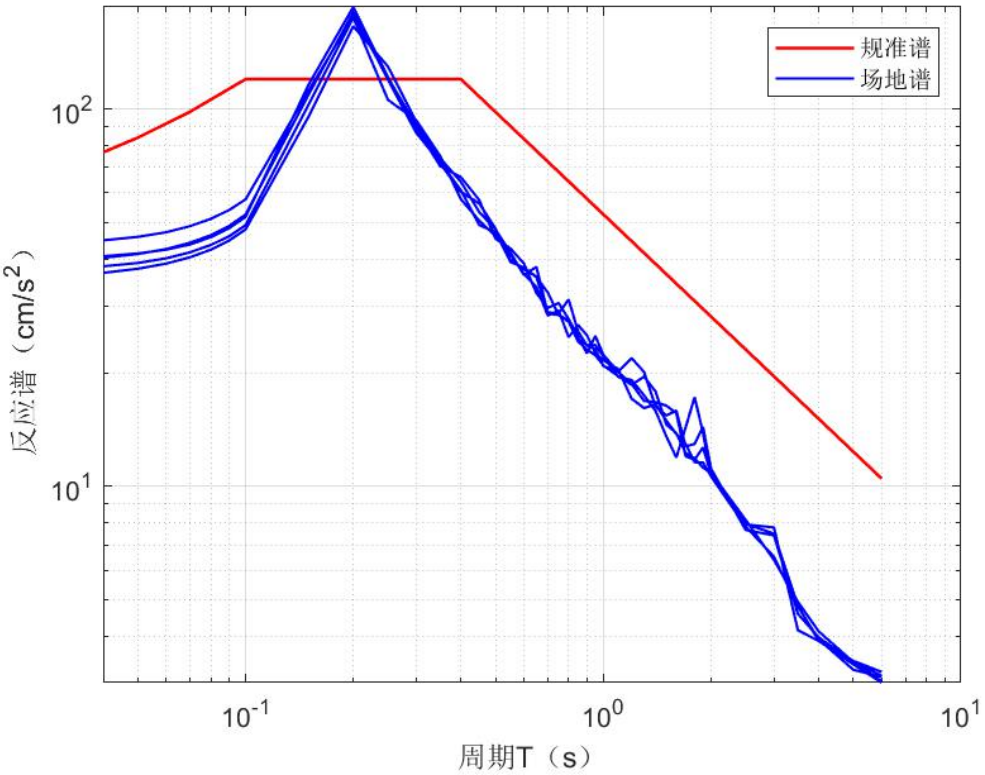


图 7.3 -53　ZK8 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

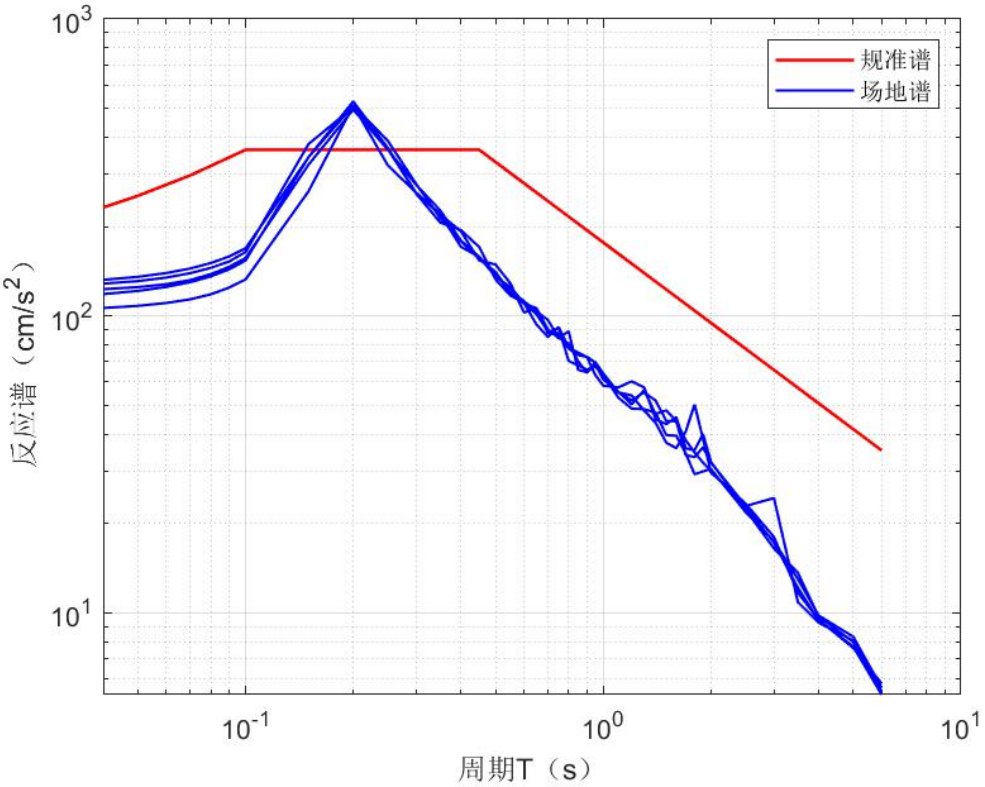


图 7.3 -54　ZK8 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

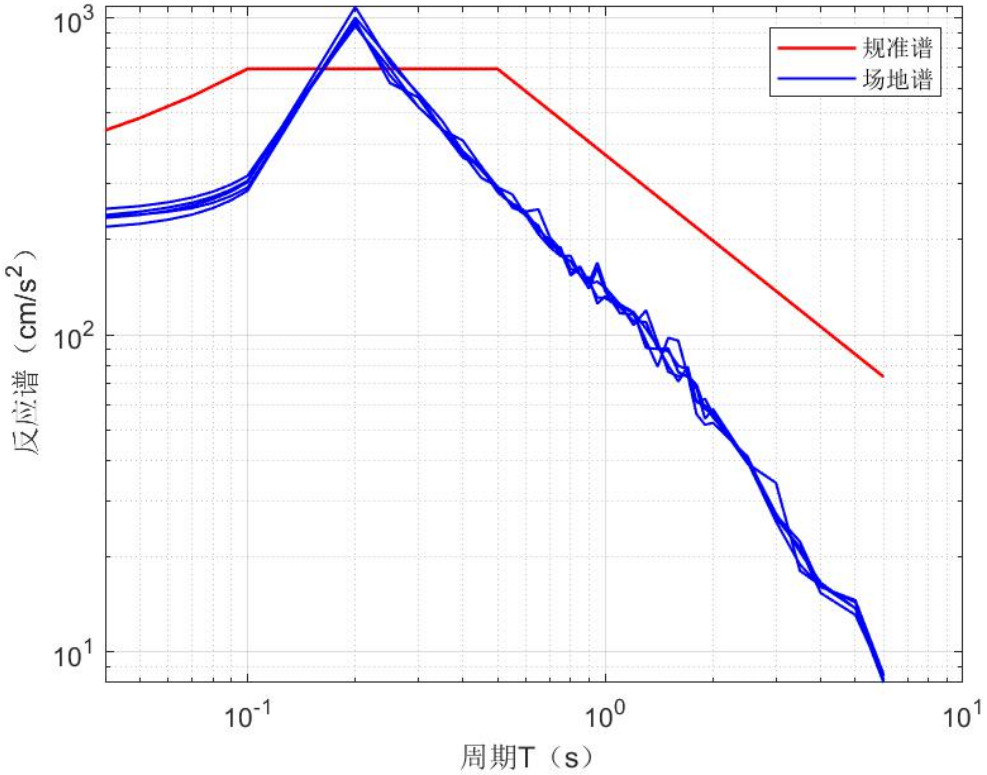


图 7.3 -55　ZK8 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

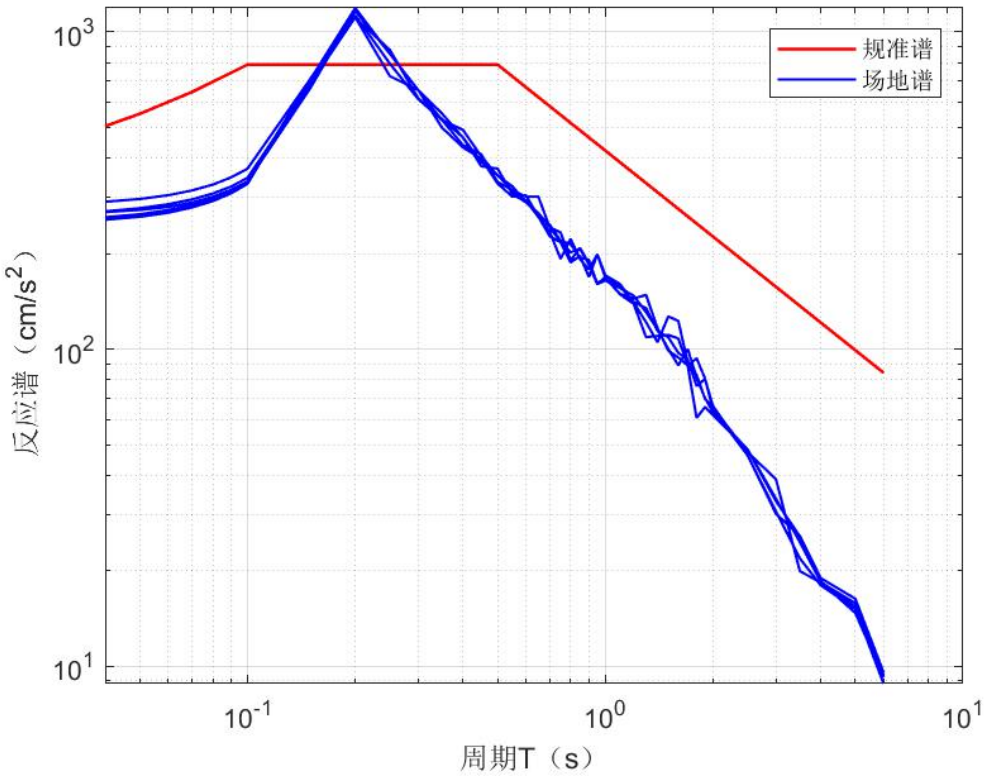


图 7.3 -56　ZK8 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

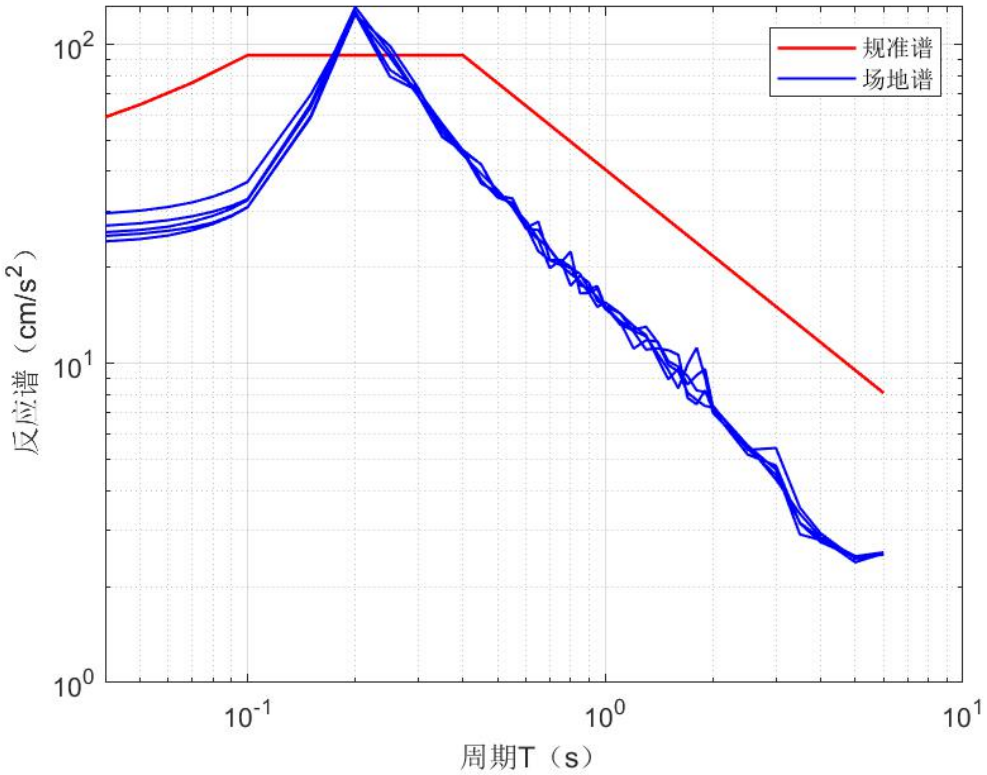


图 7.3 -57　ZK9 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

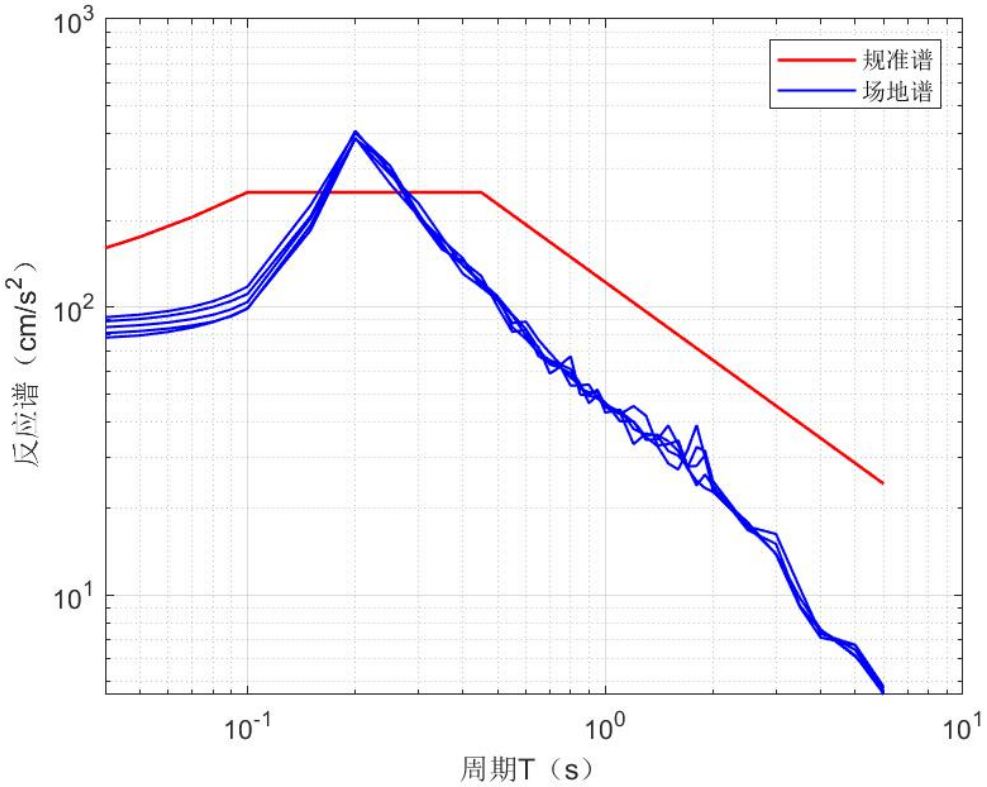


图 7.3 -58　ZK9 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

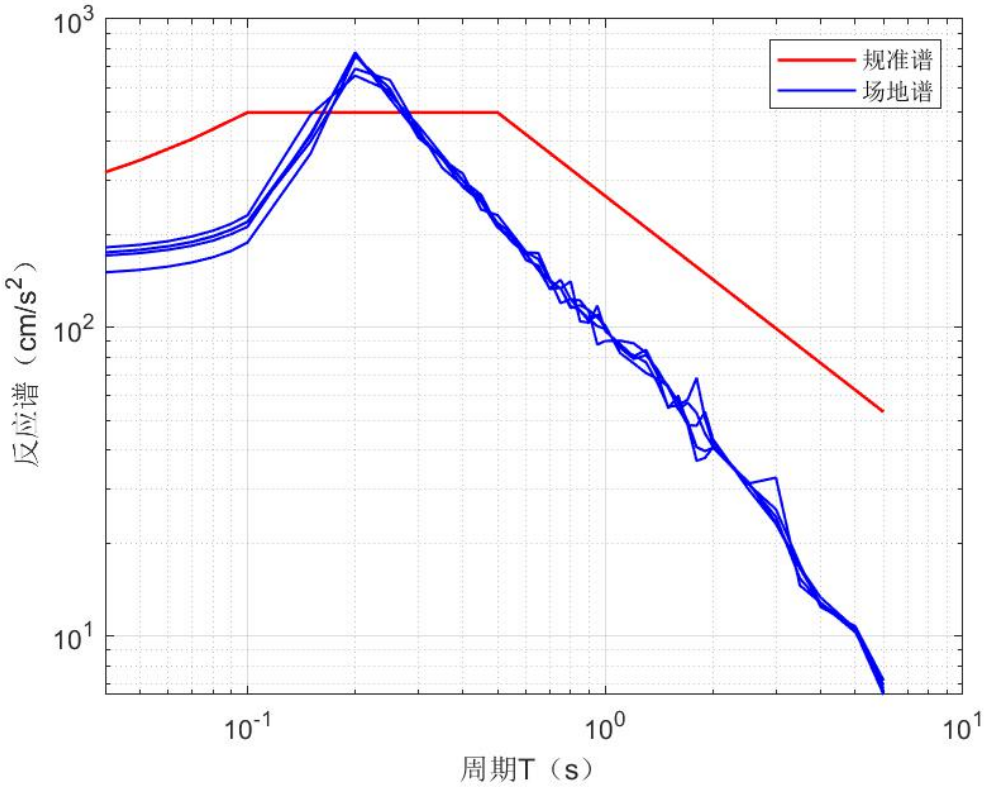


图 7.3 -59　ZK9 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

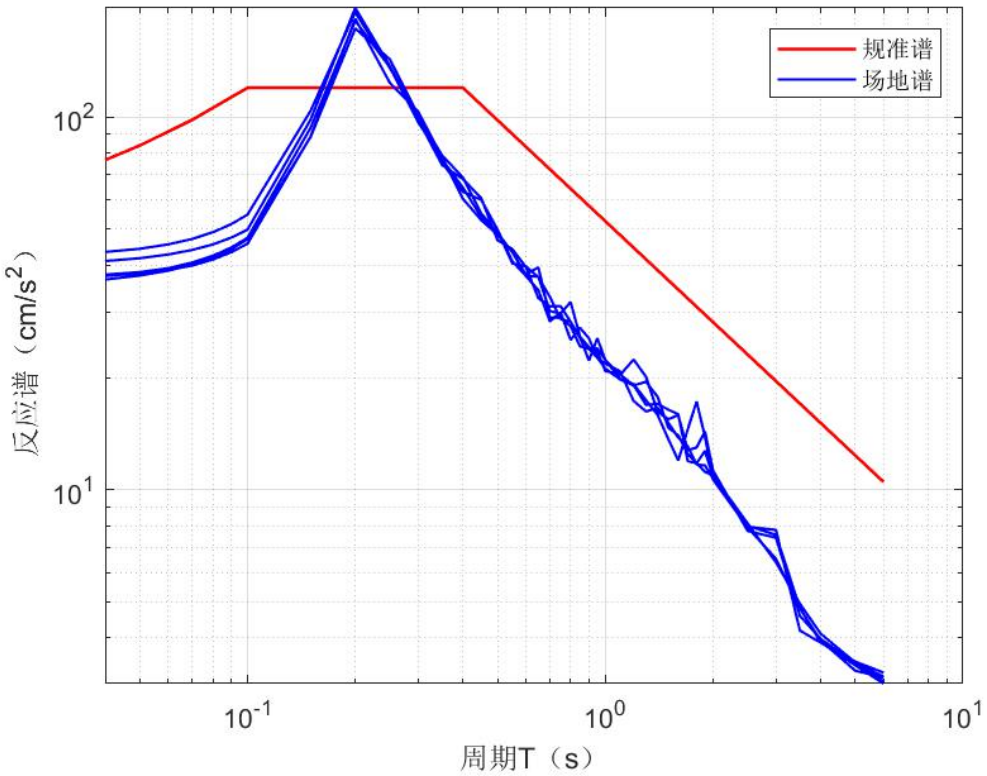


图 7.3 -60　ZK9 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

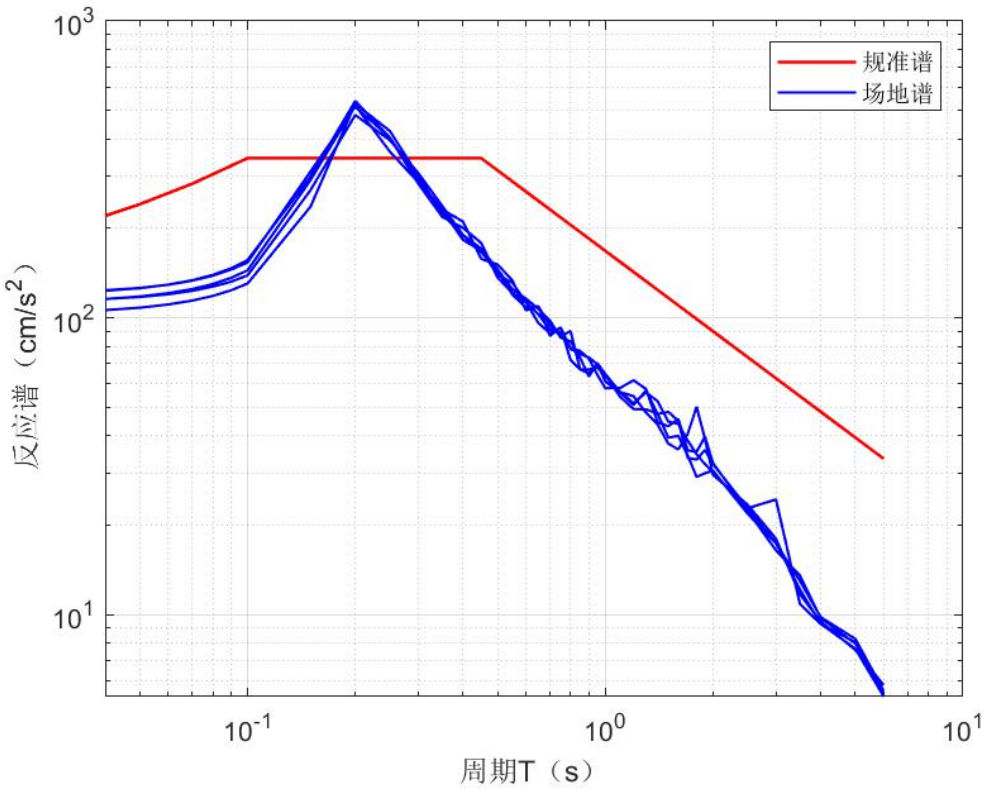


图 7.3 -61　ZK9 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

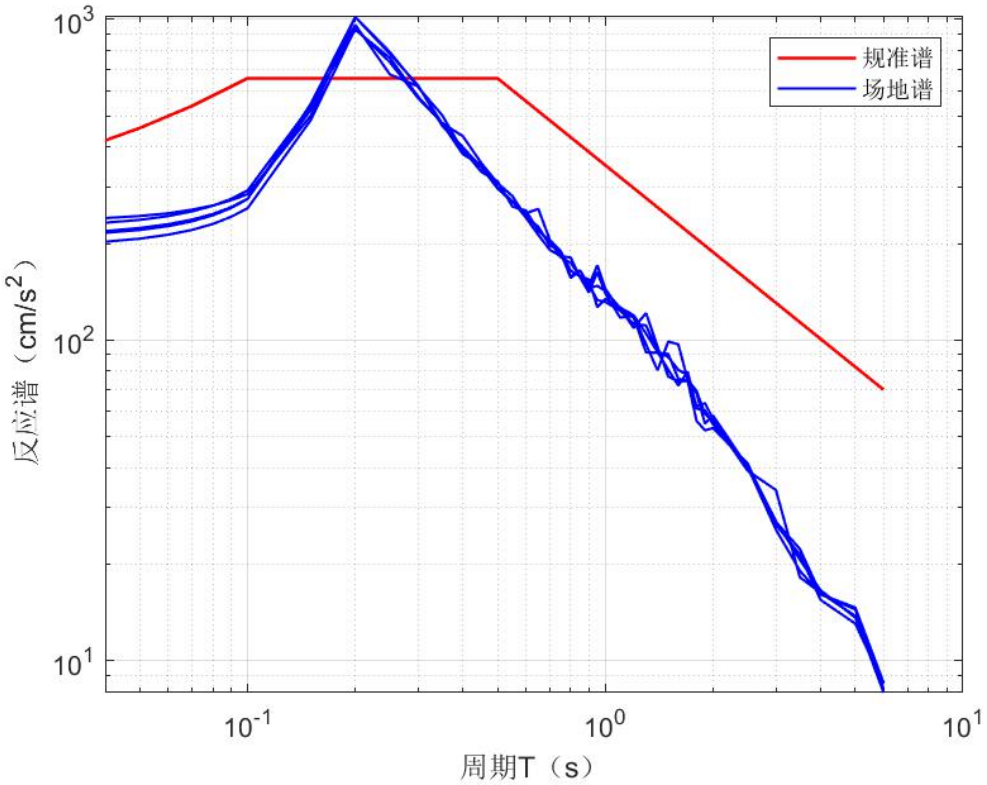


图 7.3 -62　ZK9 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

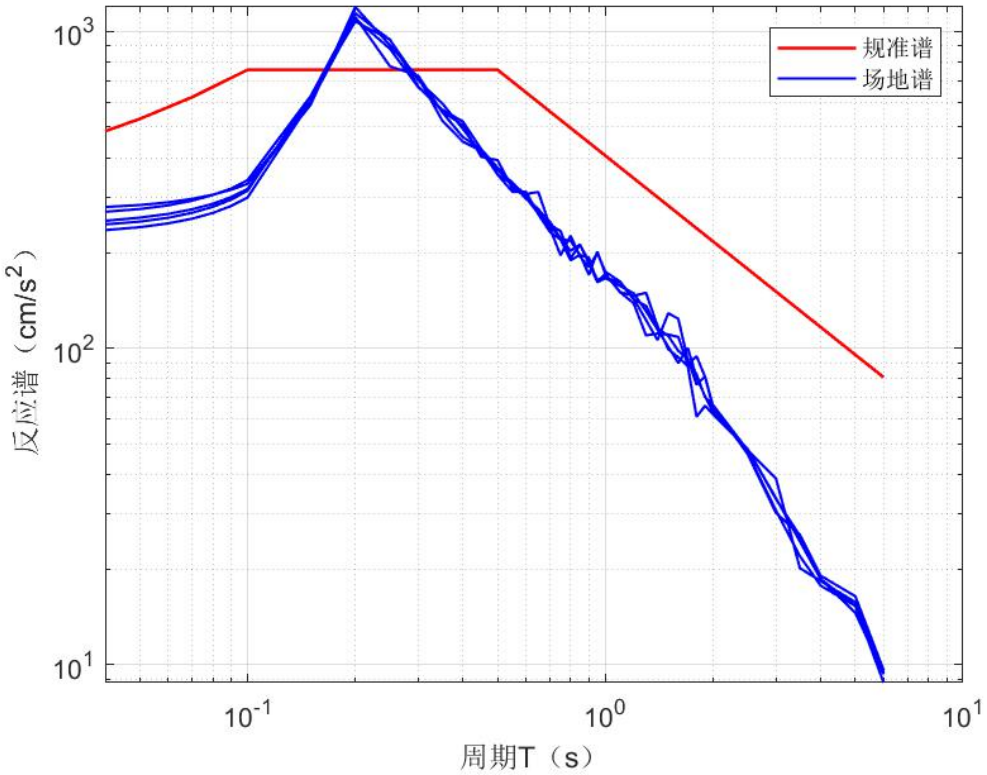


图 7.3 -63　ZK9 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

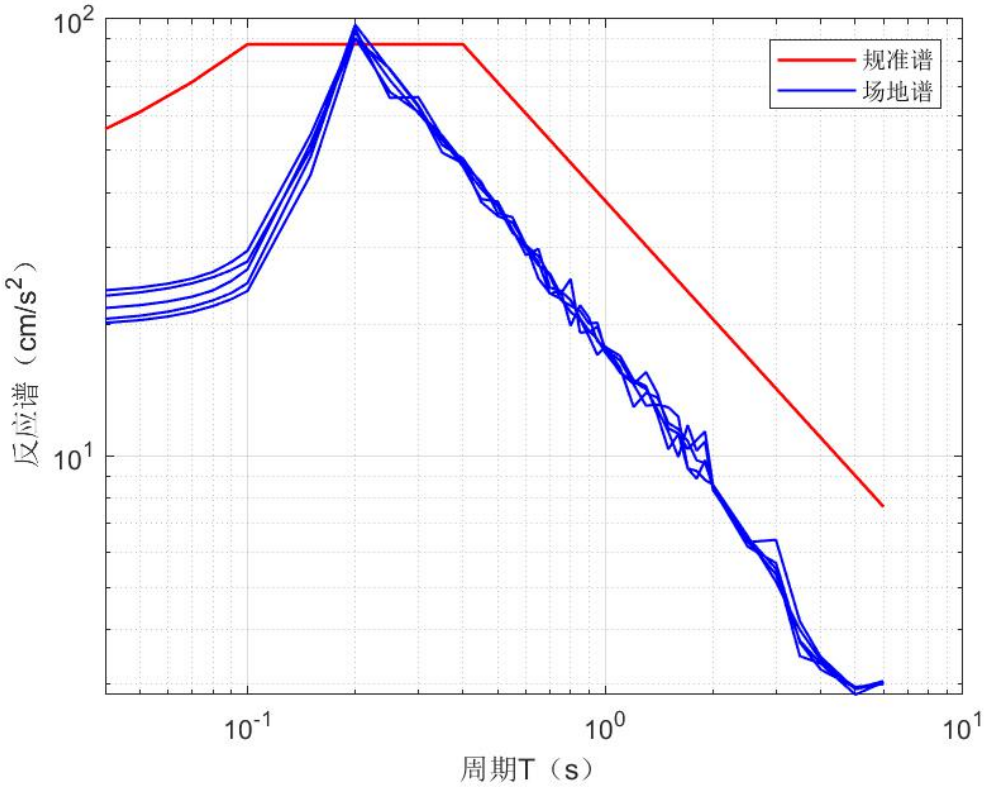


图 7.3 -64　ZK10 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

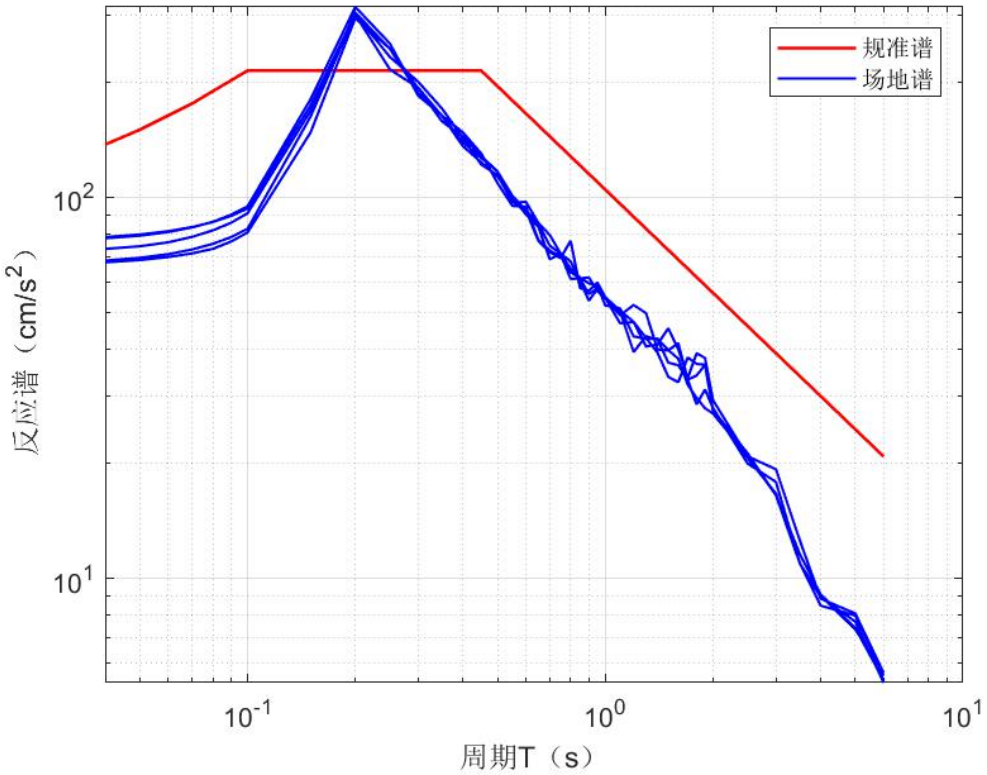


图 7.3 -65　ZK10 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

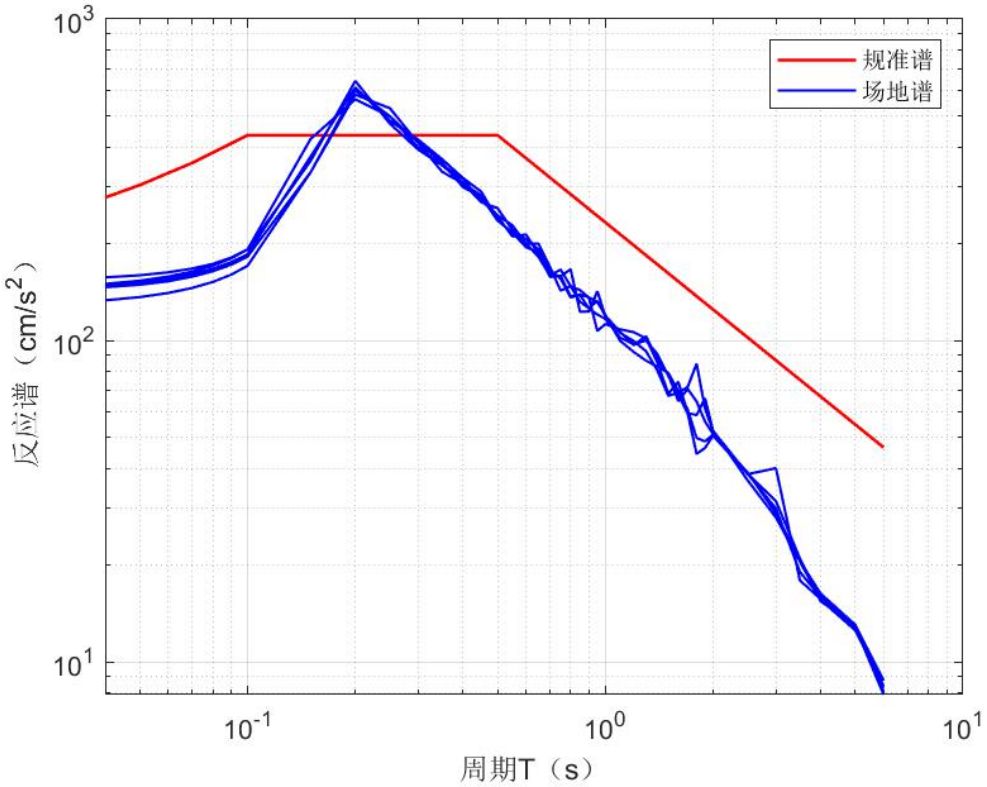


图 7.3 -66　ZK10 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

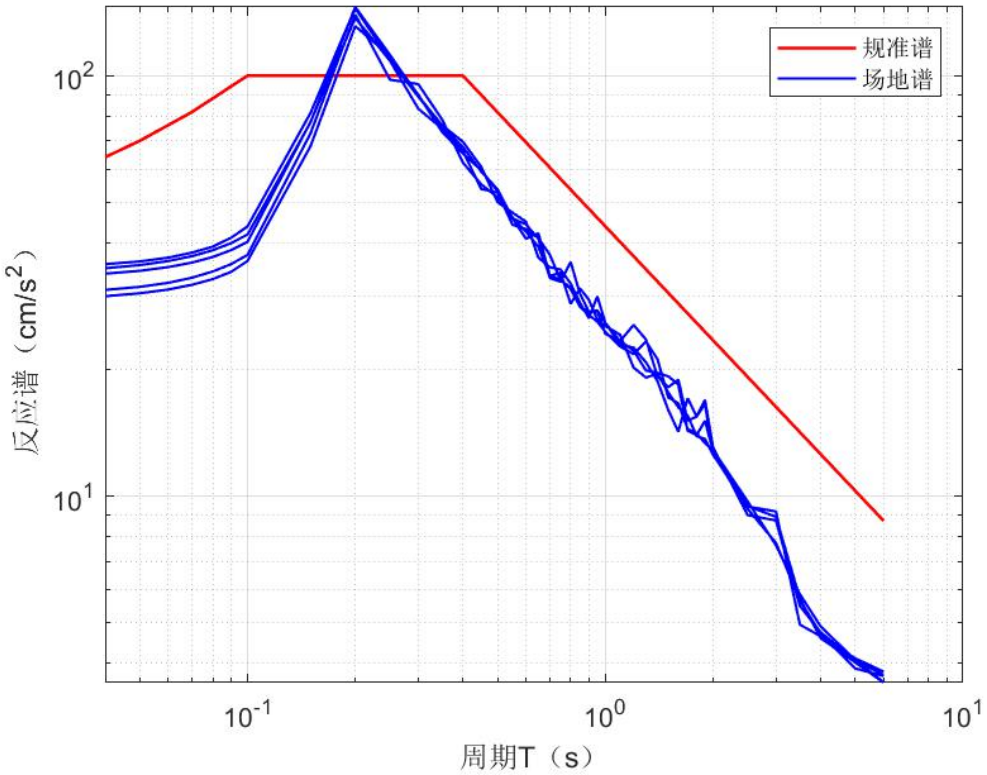


图 7.3 -67　ZK10 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

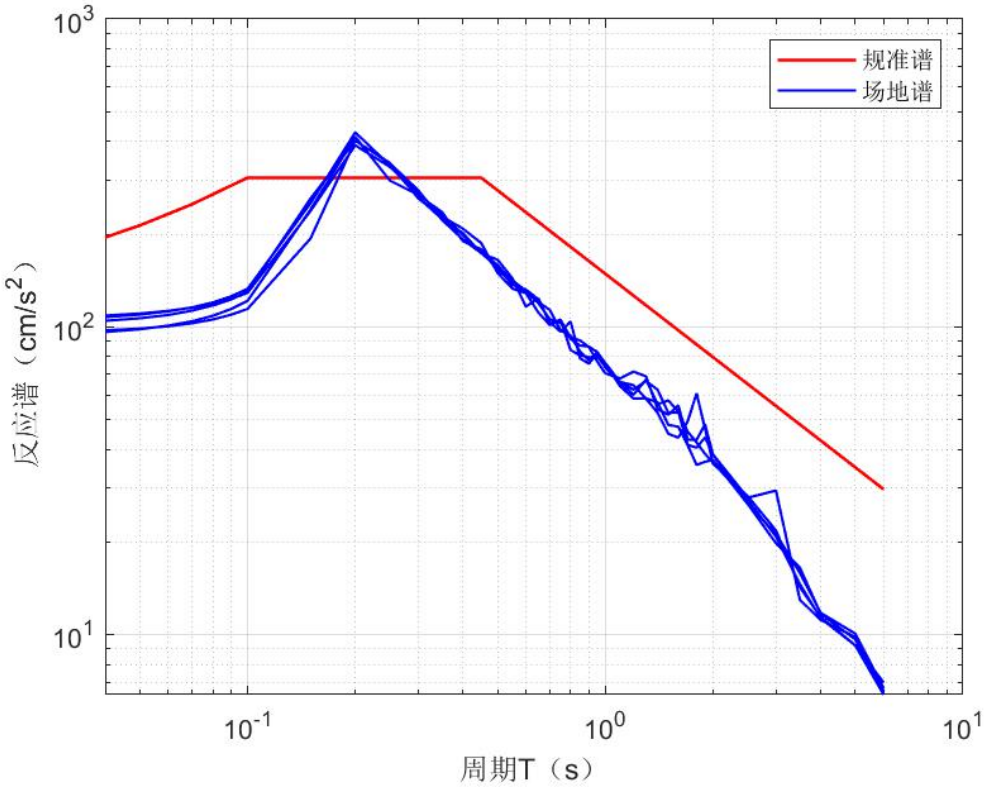


图 7.3 -68　ZK10 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

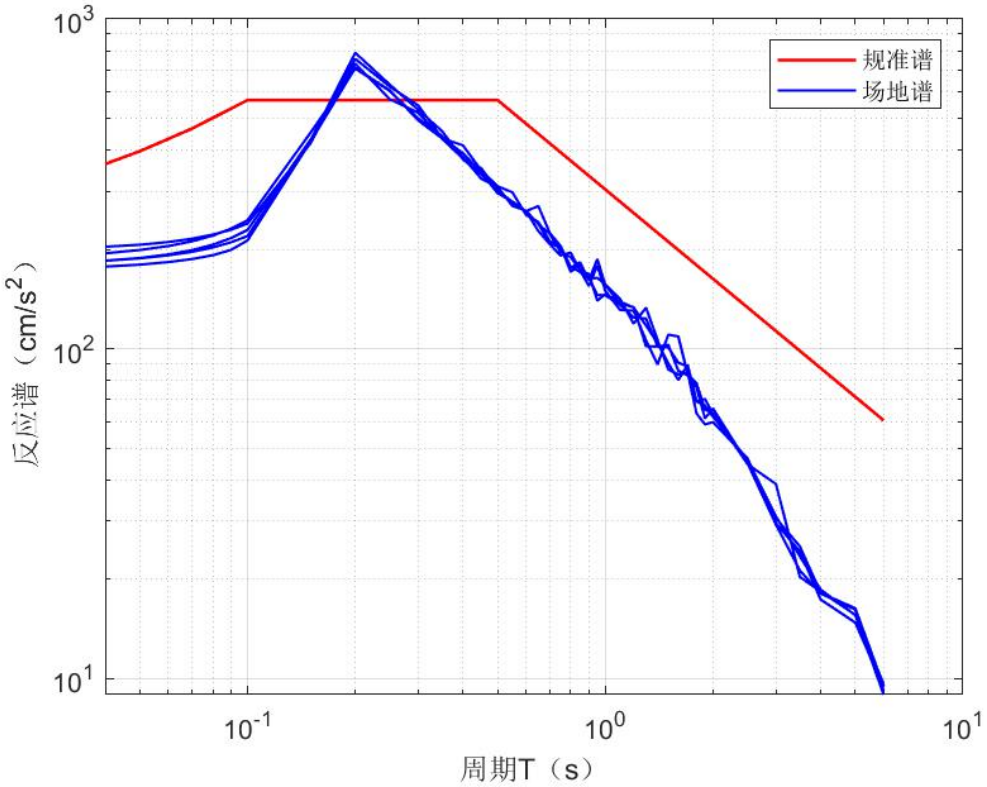


图 7.3 -69　ZK10 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

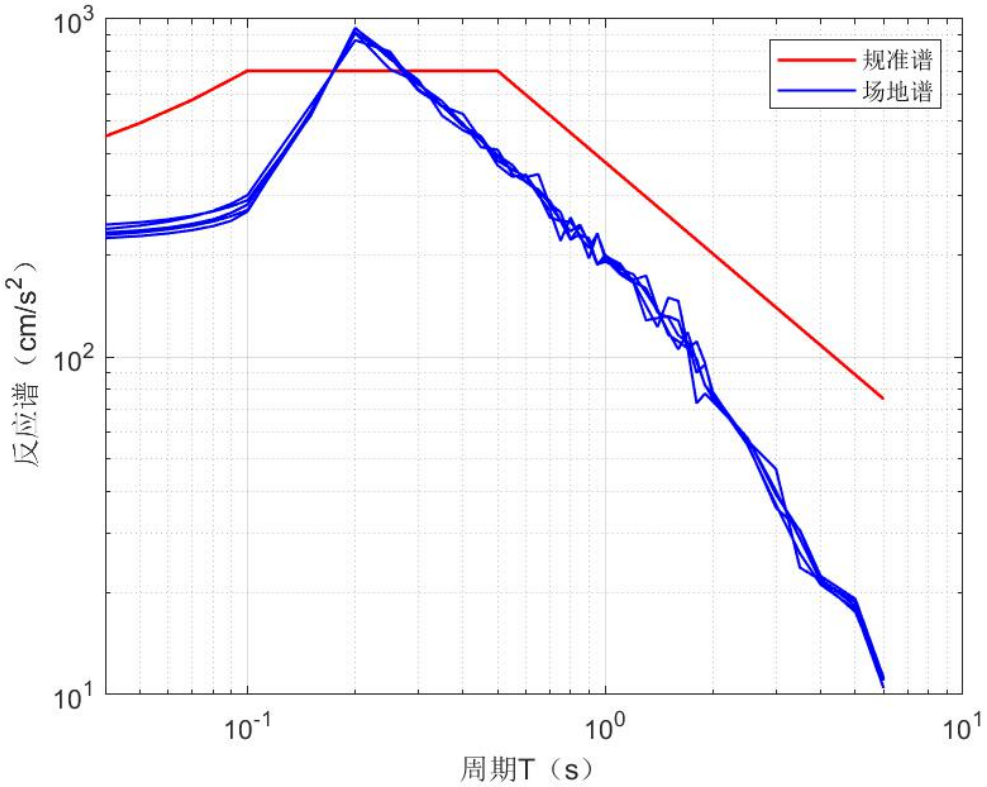


图 7.3 -70　ZK10 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

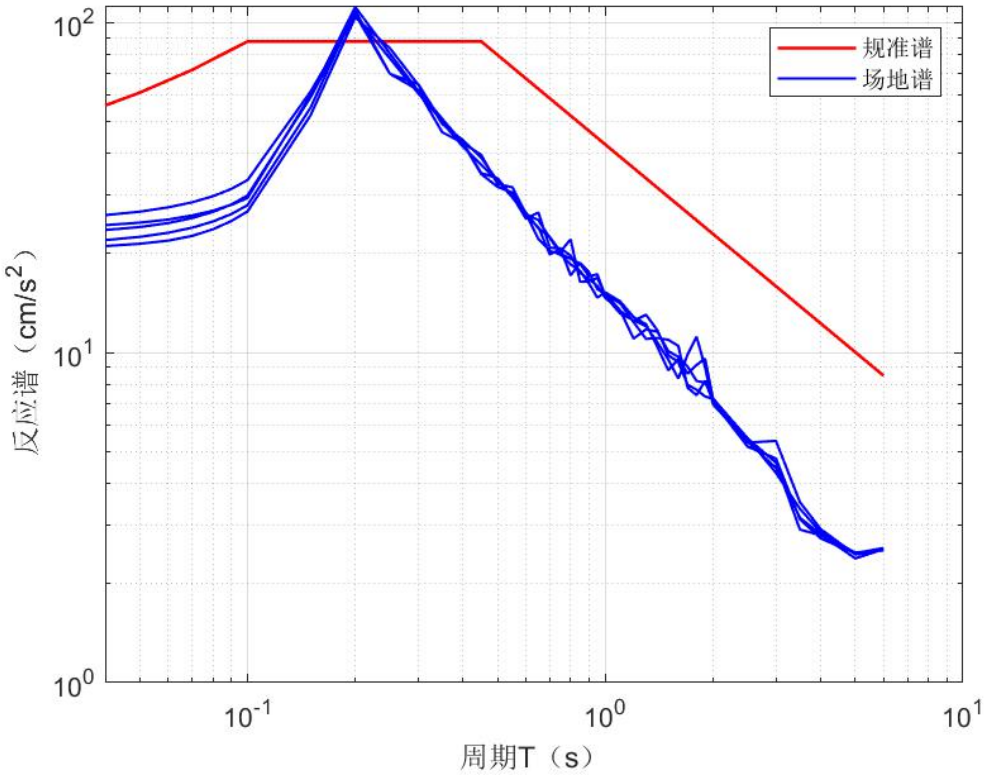


图 7.3 -71　ZK11 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

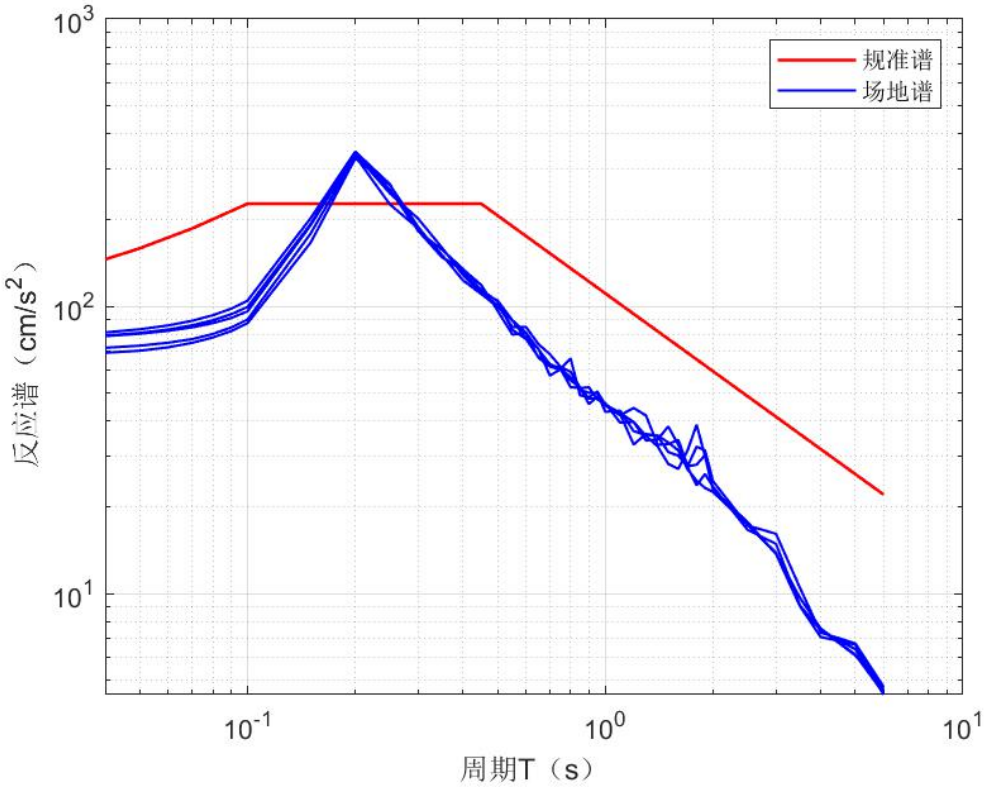


图 7.3 -72　ZK11 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

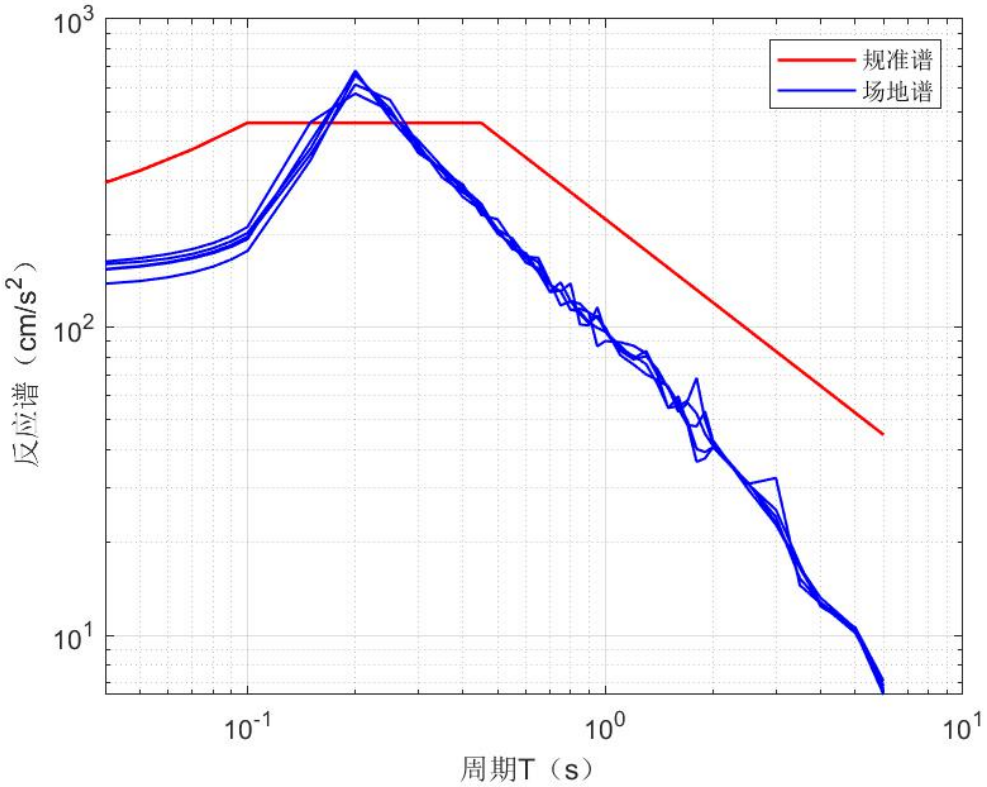


图 7.3 -73　ZK11 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

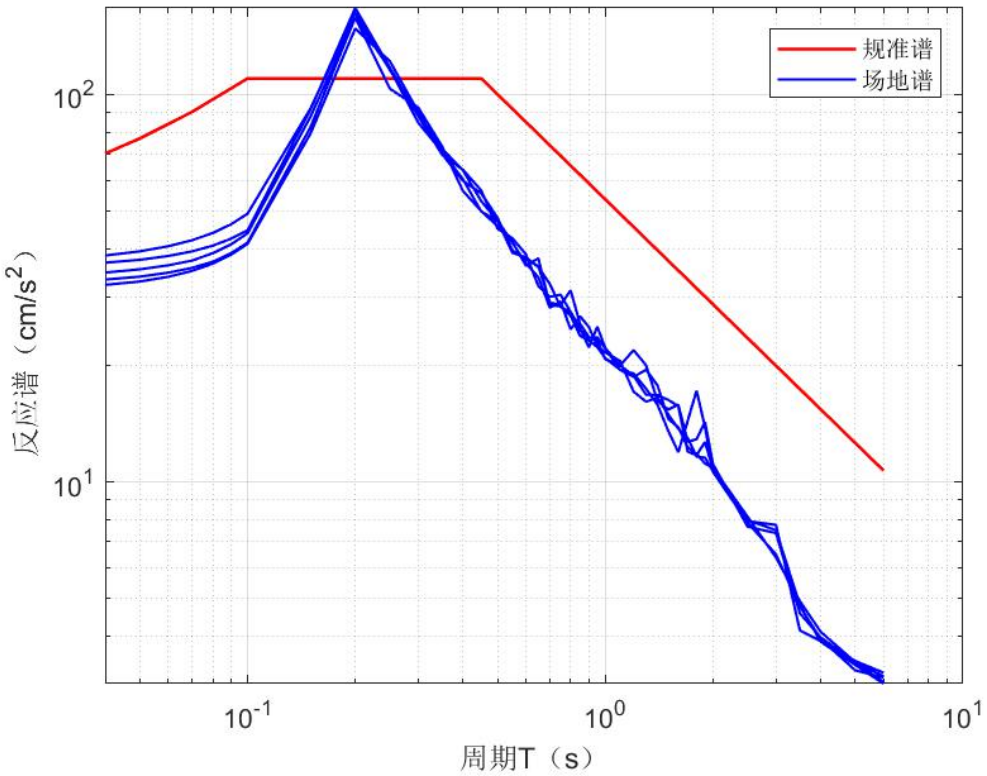


图 7.3 -74　ZK11 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

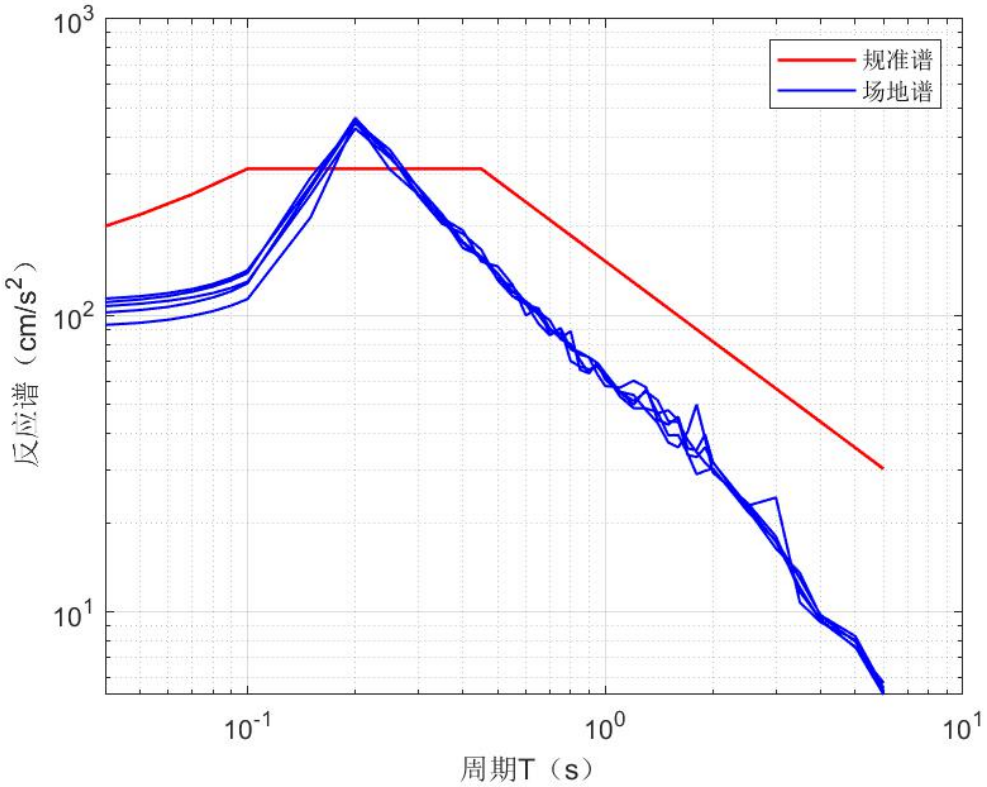


图 7.3 -75　ZK11 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

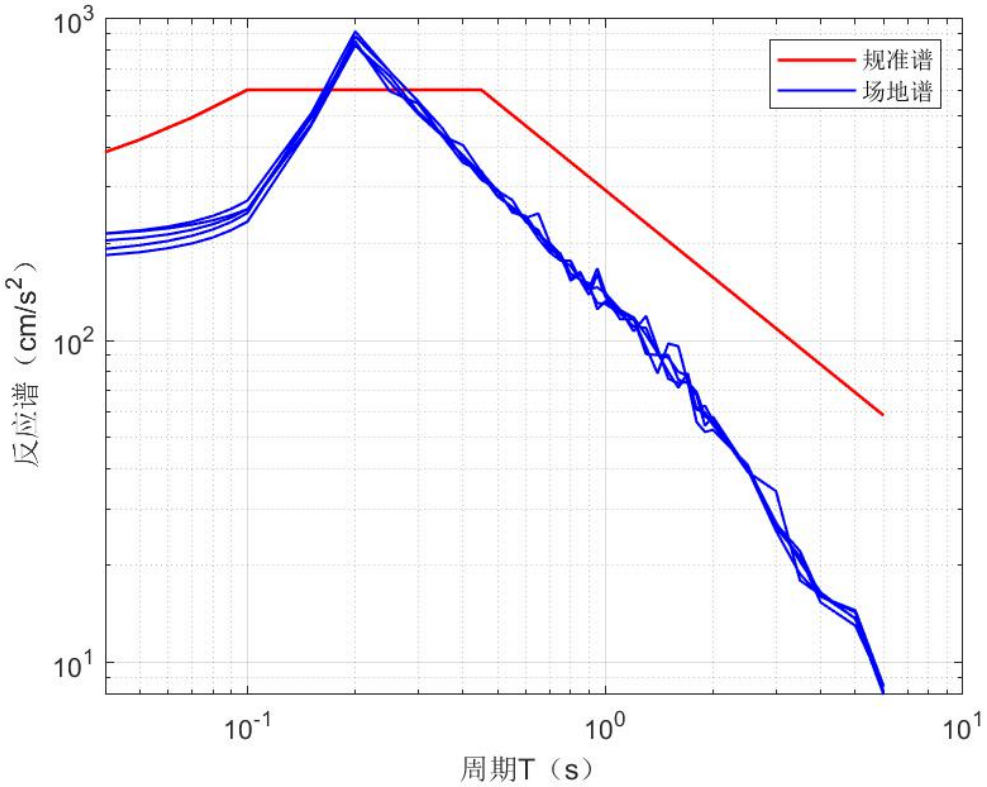


图 7.3 -76　ZK11 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

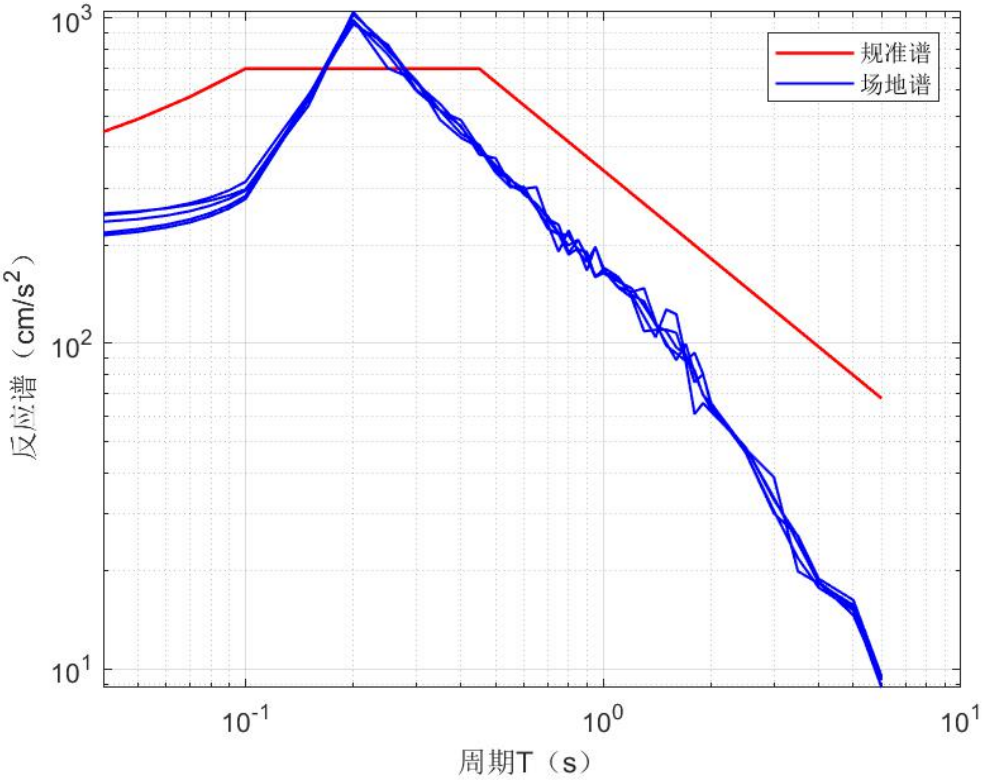


图 7.3 -77　ZK11 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

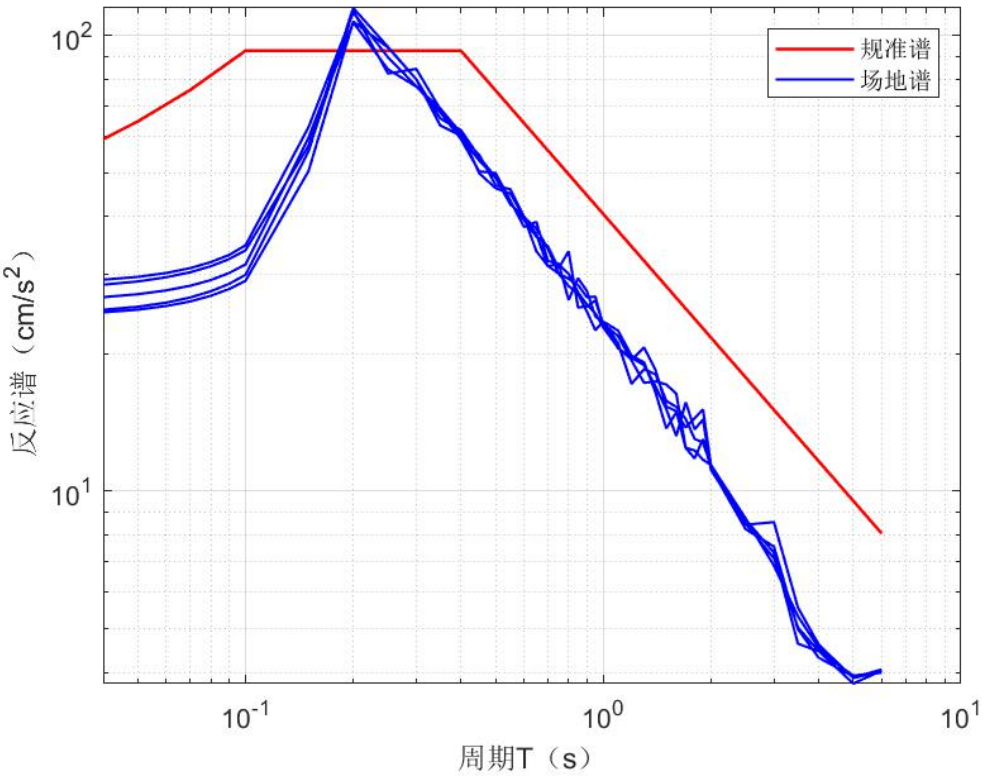


图 7.3 -78　ZK12 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

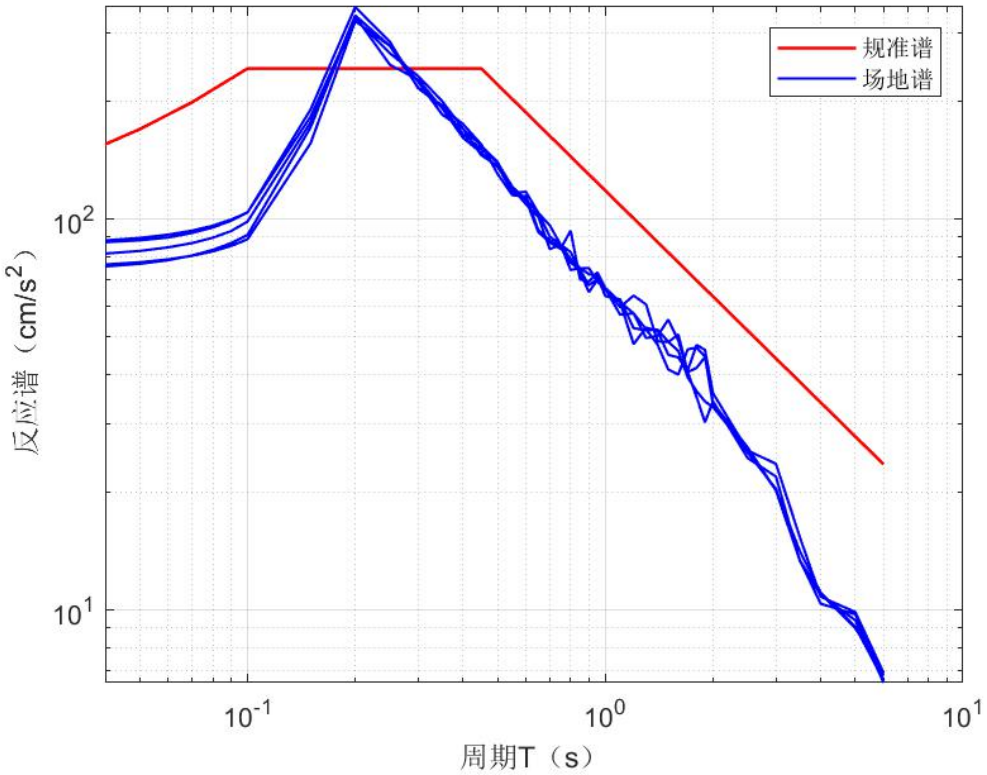


图 7.3 -79　ZK12 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

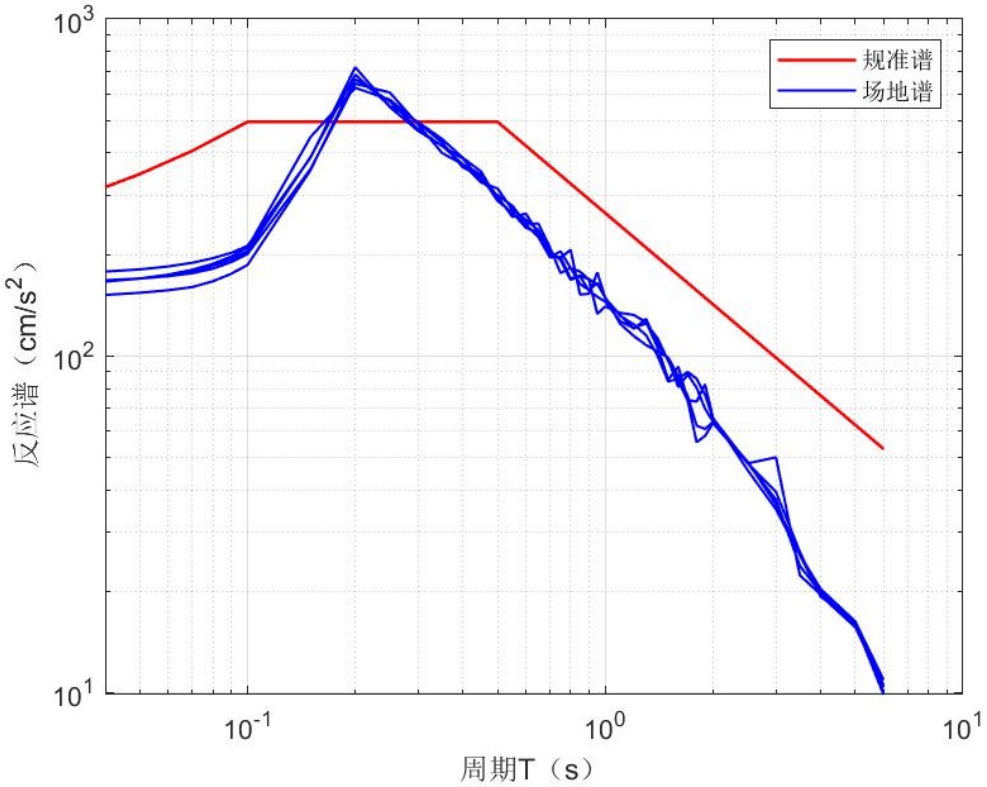


图 7.3 -80　ZK12 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

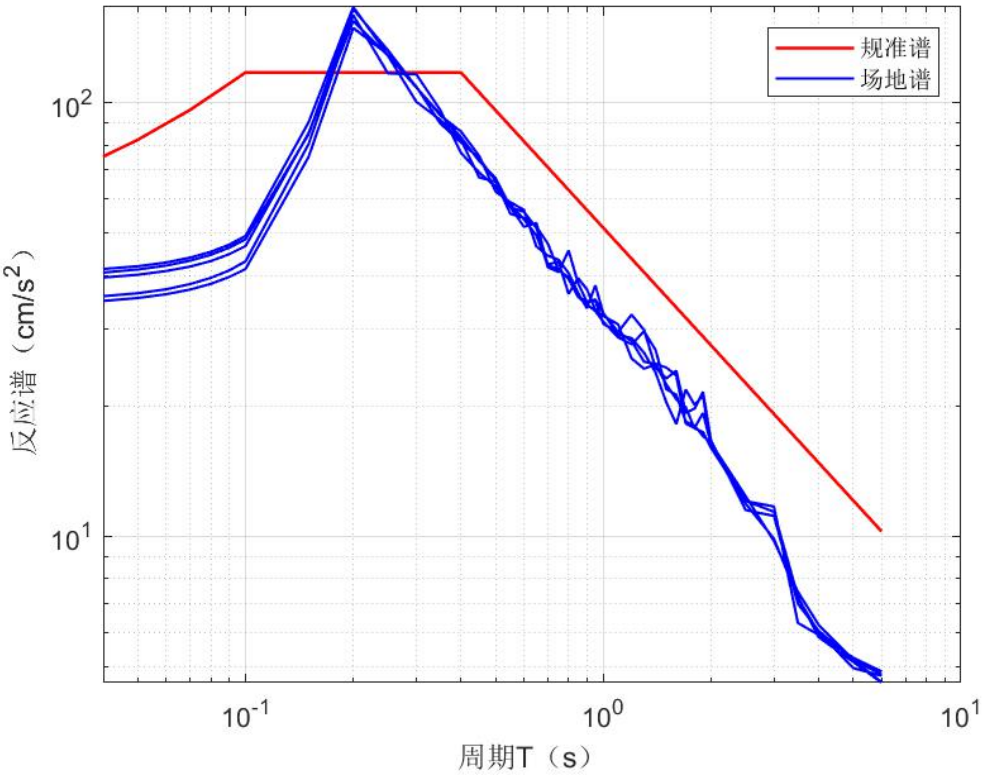


图 7.3 -81　ZK12 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

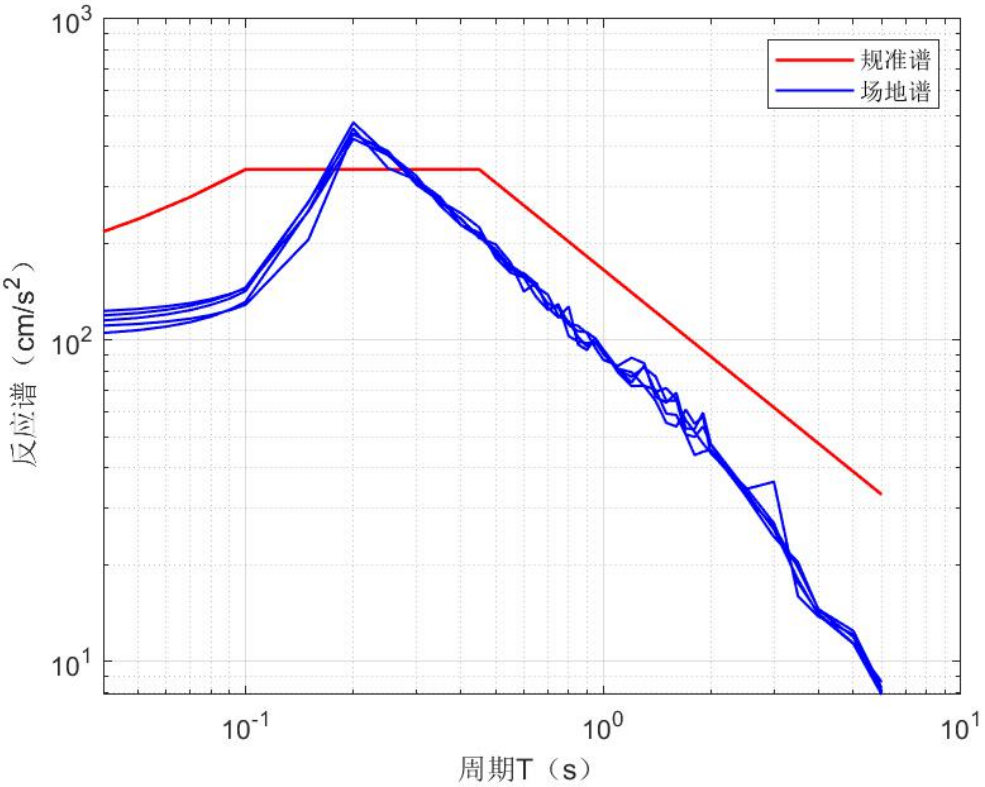


图 7.3 -82　ZK12 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

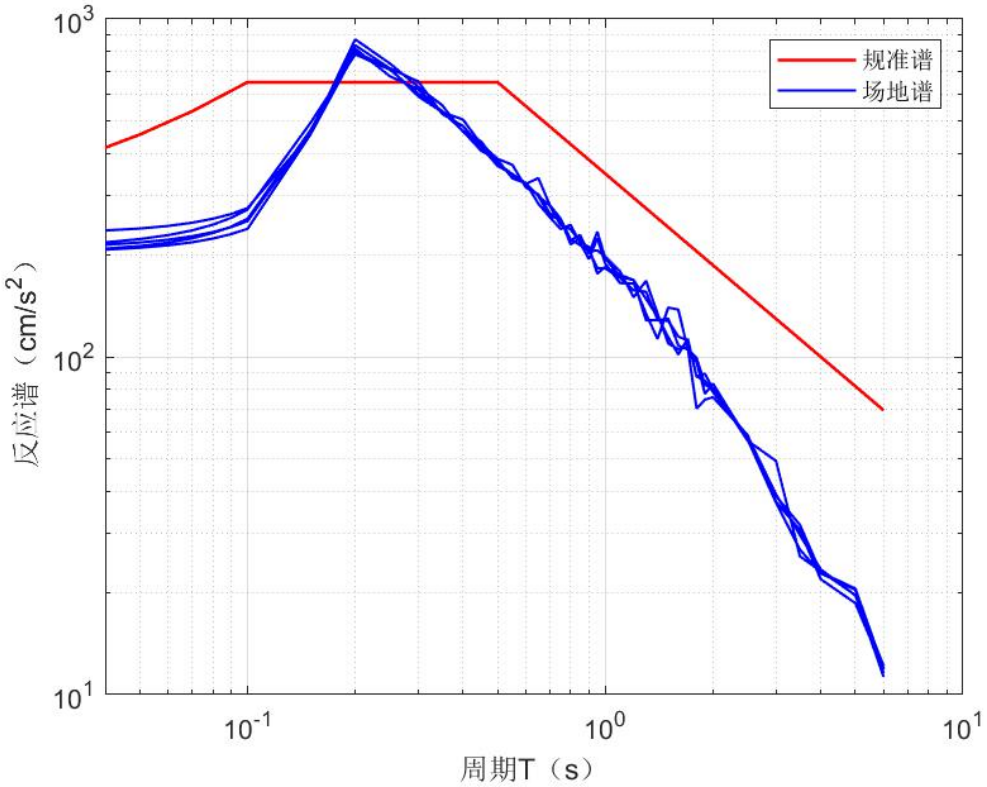


图 7.3 -83　ZK12 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

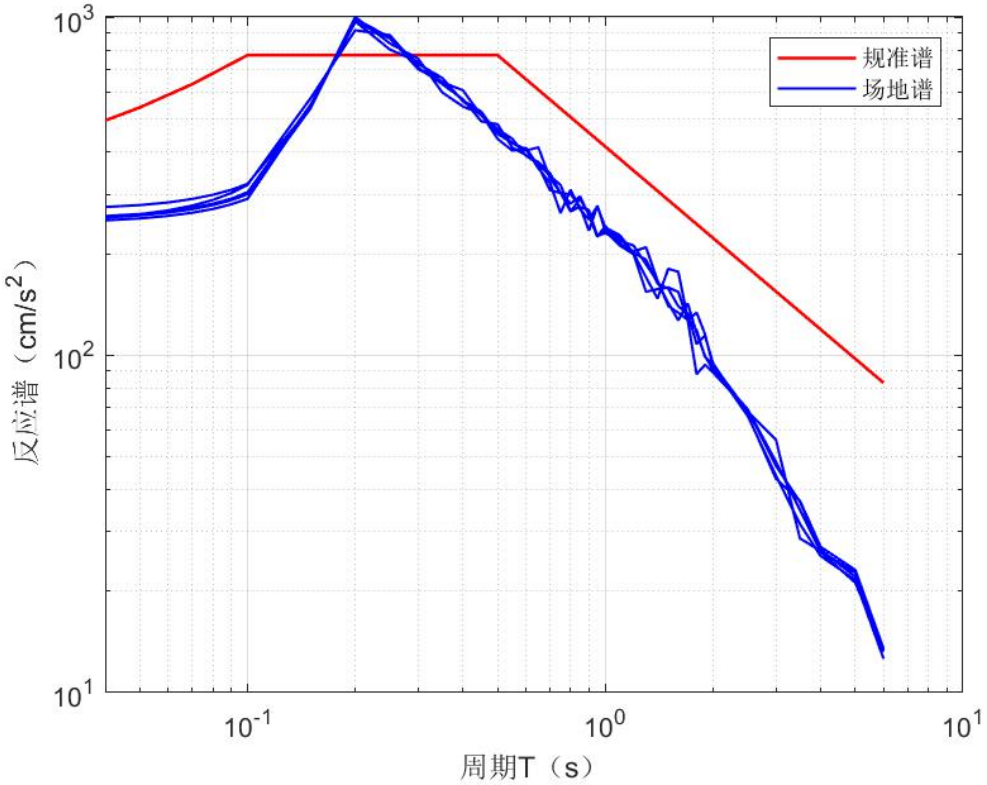


图 7.3 -84　ZK12 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

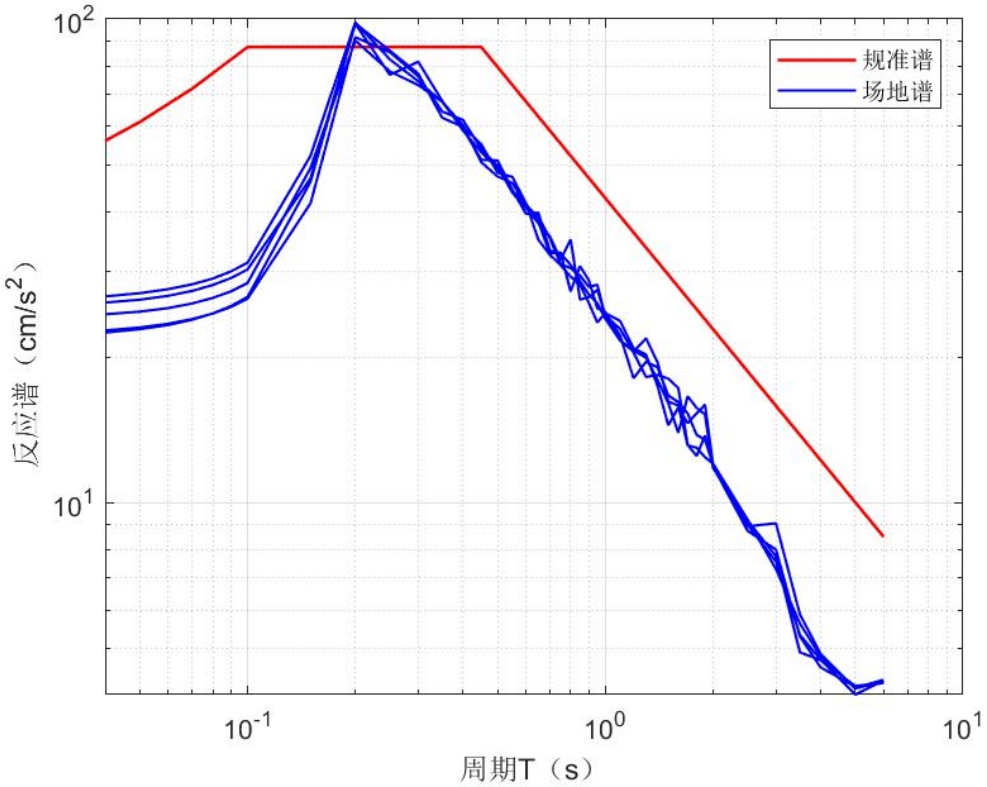


图 7.3 -85　ZK13 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

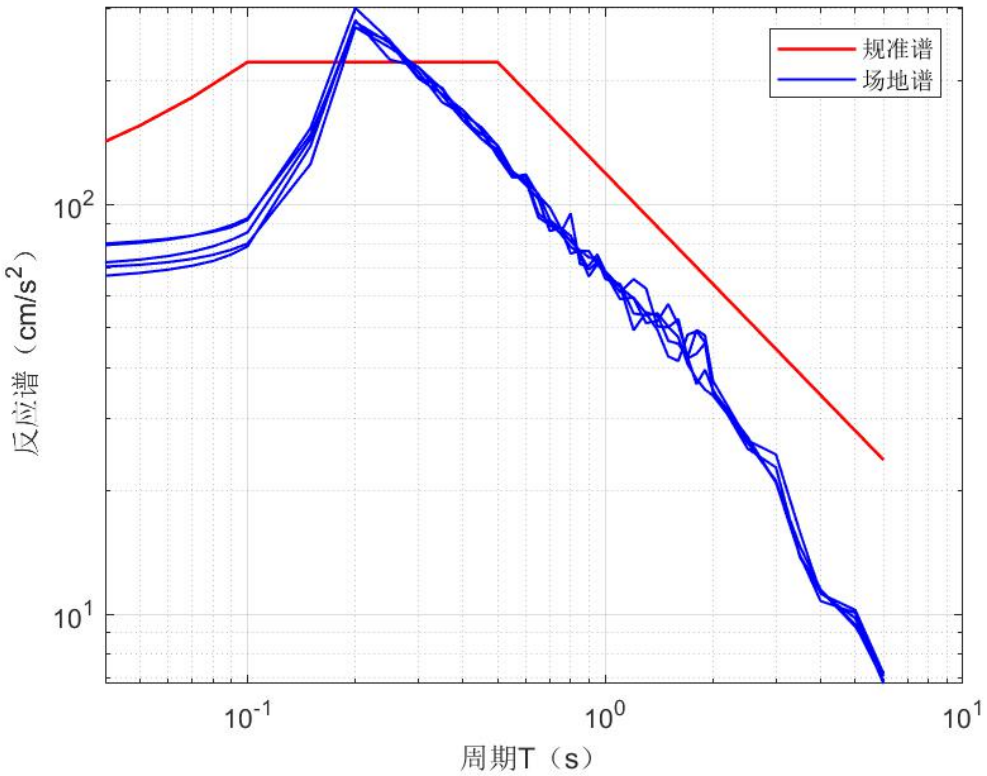


图 7.3 -86　ZK13 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

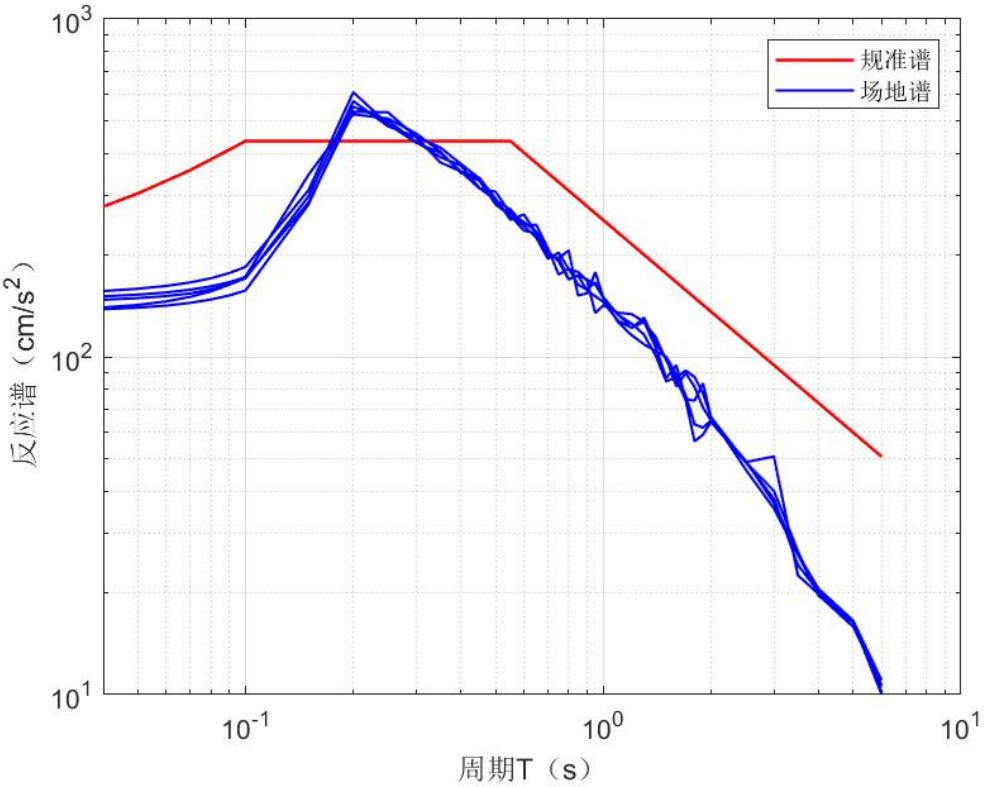


图 7.3 -87　ZK13 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

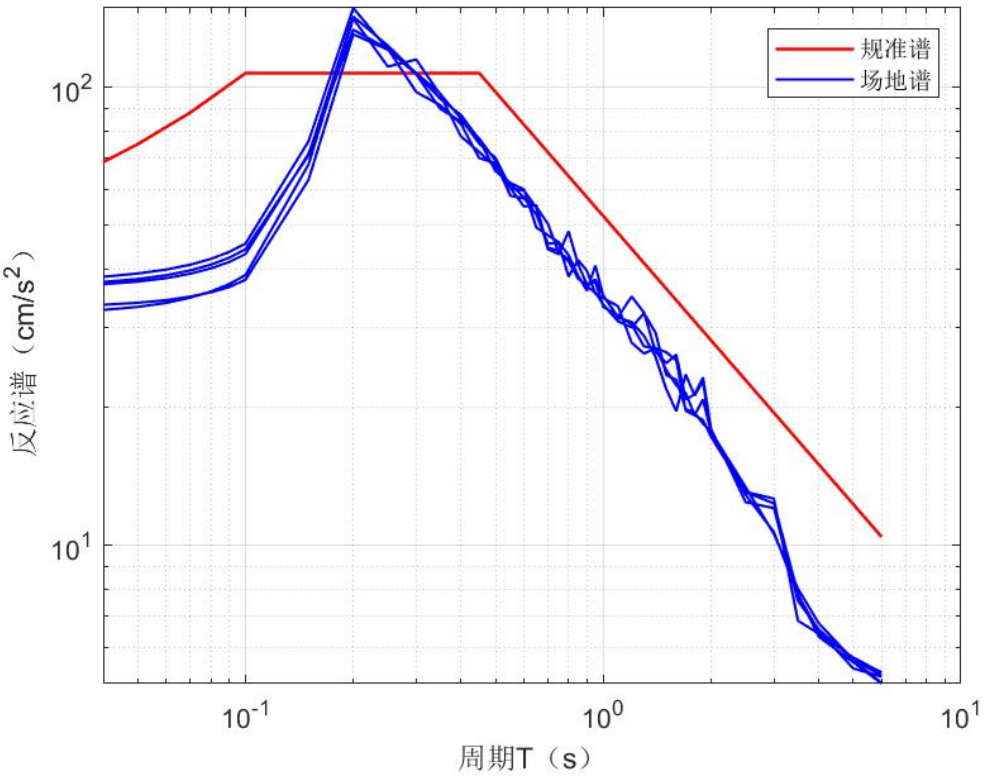


图 7.3 -88　ZK13 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

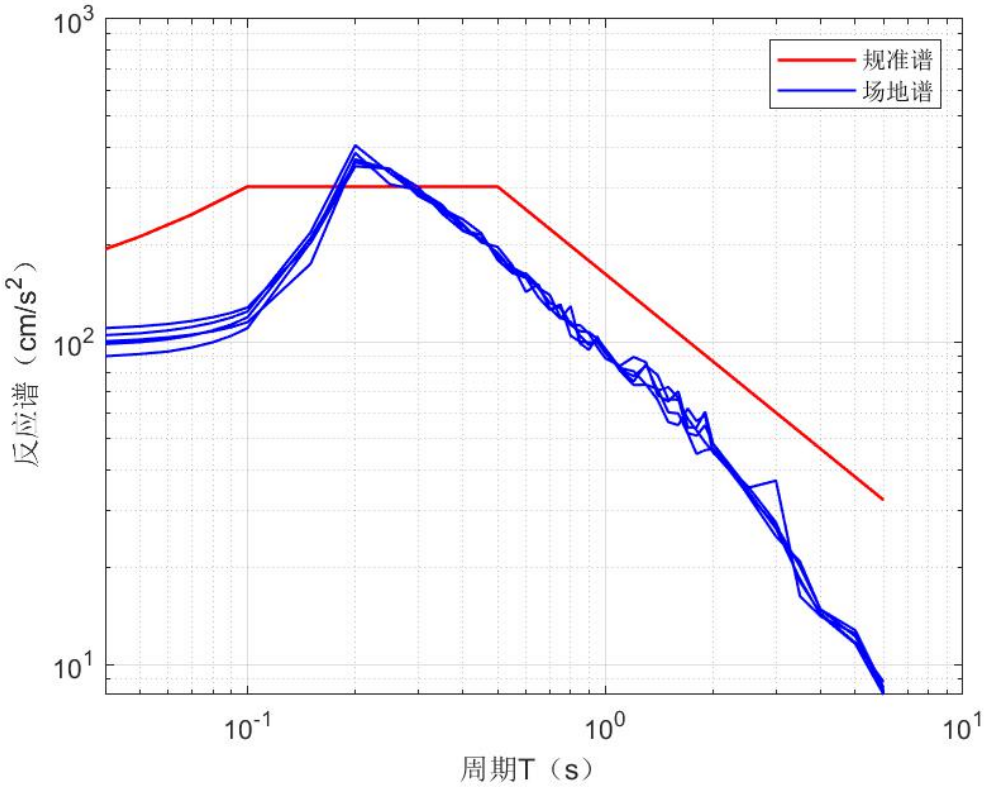


图 7.3 -89　ZK13 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

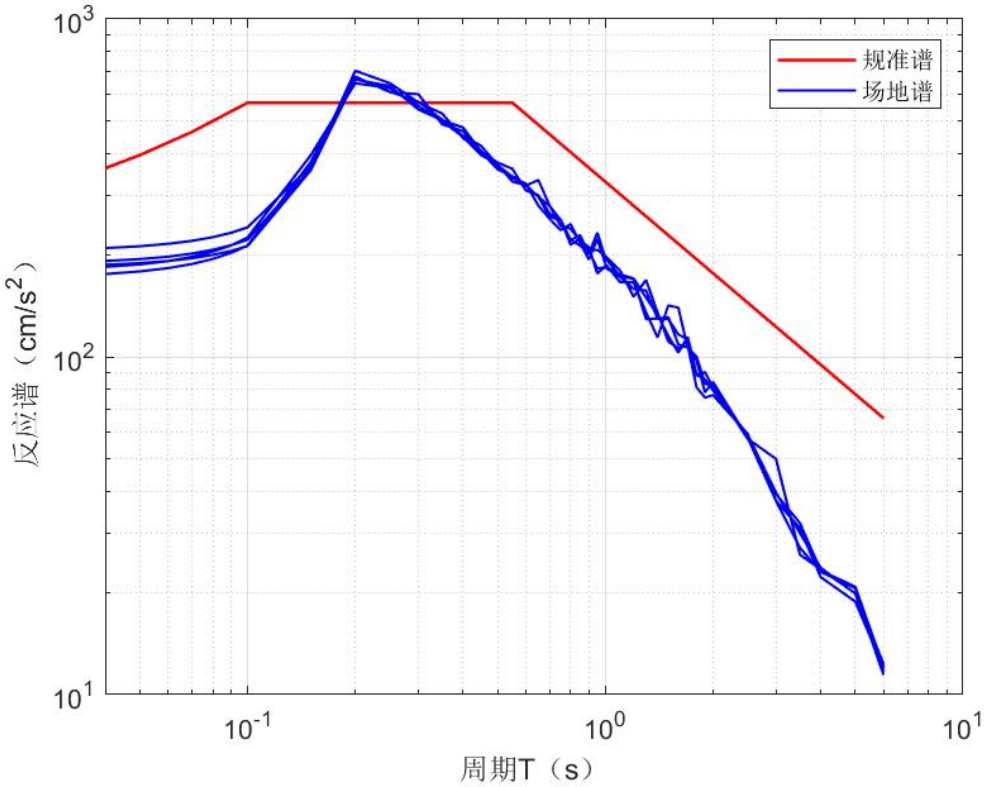


图 7.3 -90　ZK13 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

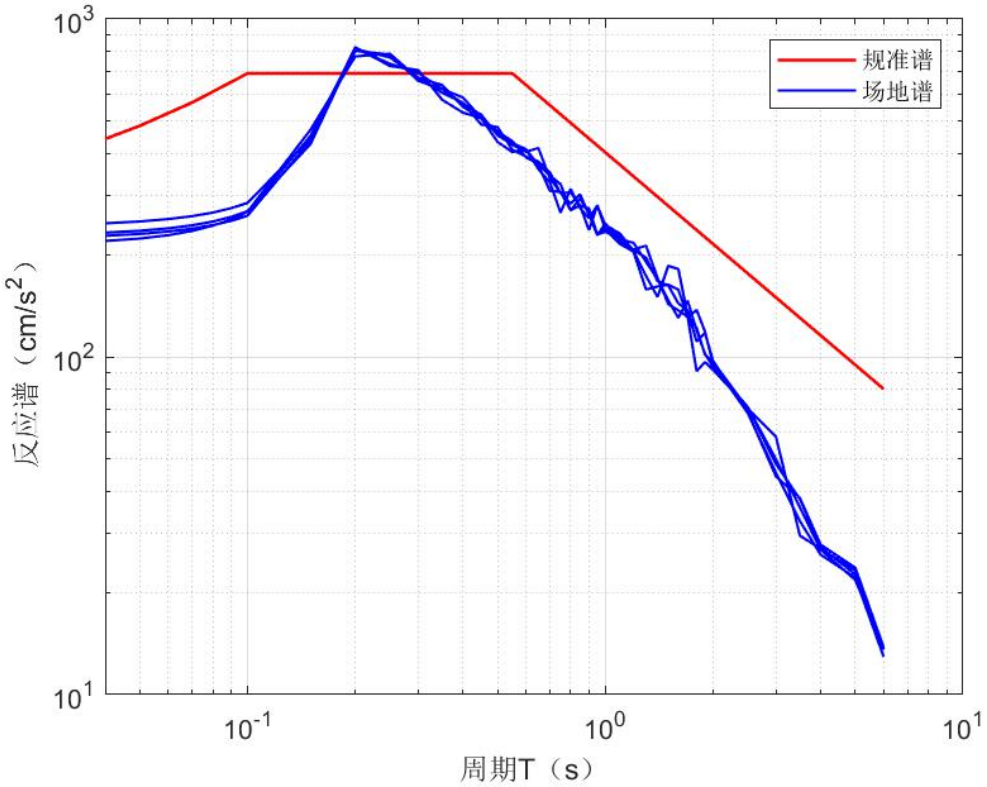


图 7.3 -91　ZK13 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

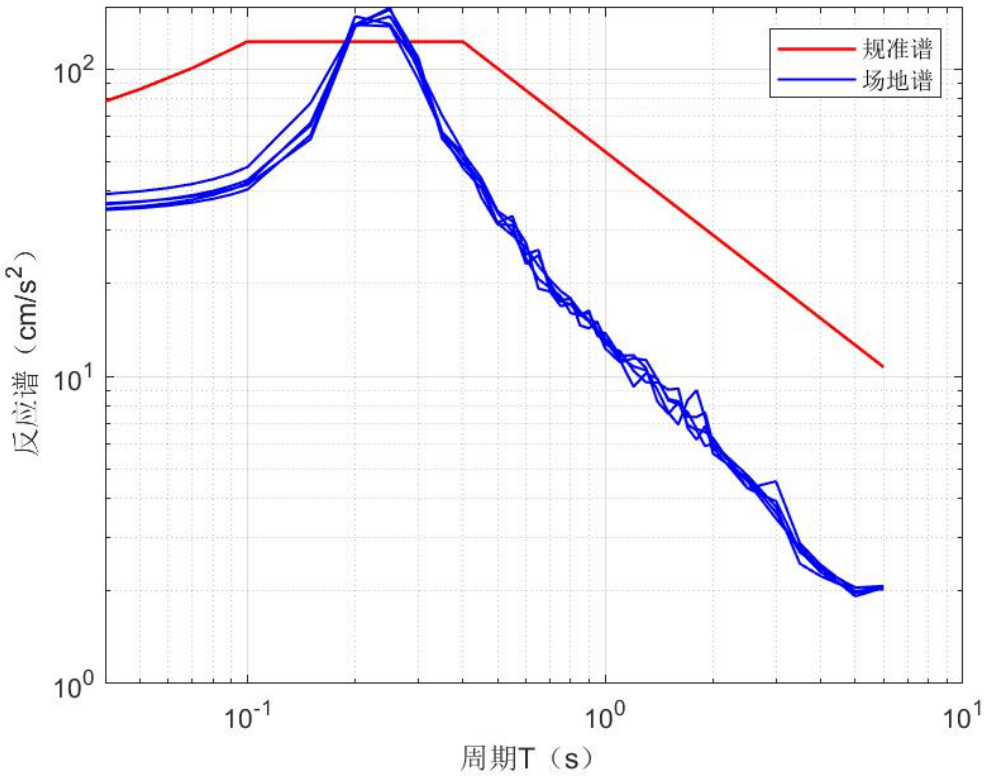


图 7.3 -92　ZK14 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

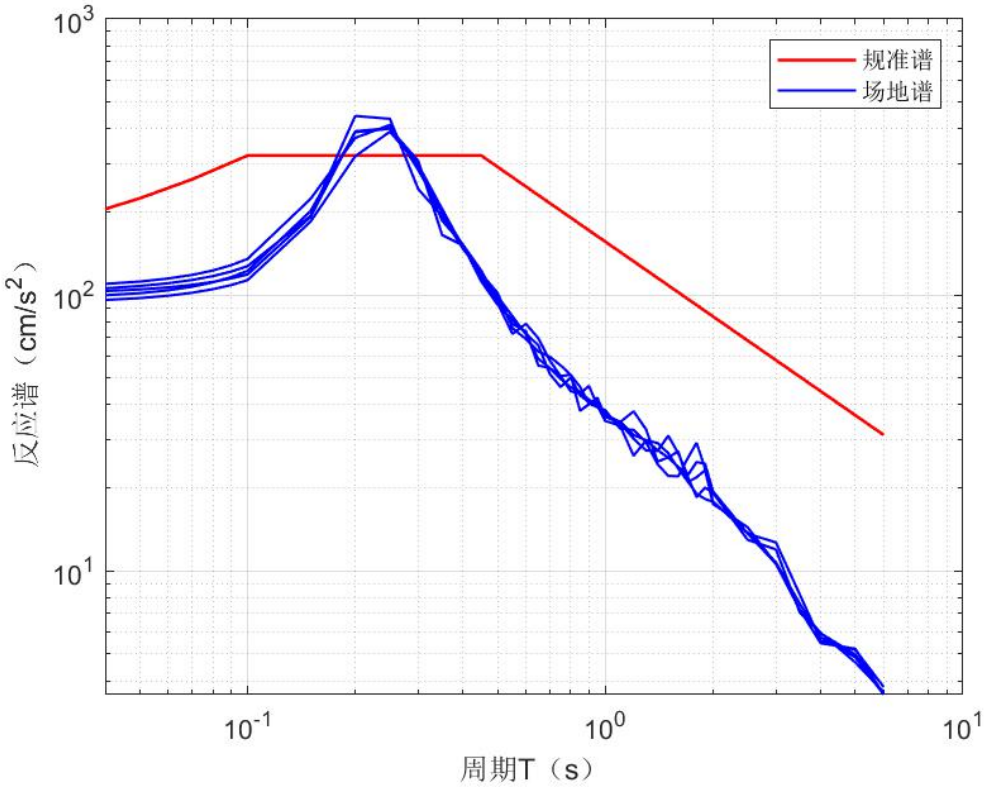


图 7.3 -93　ZK14 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

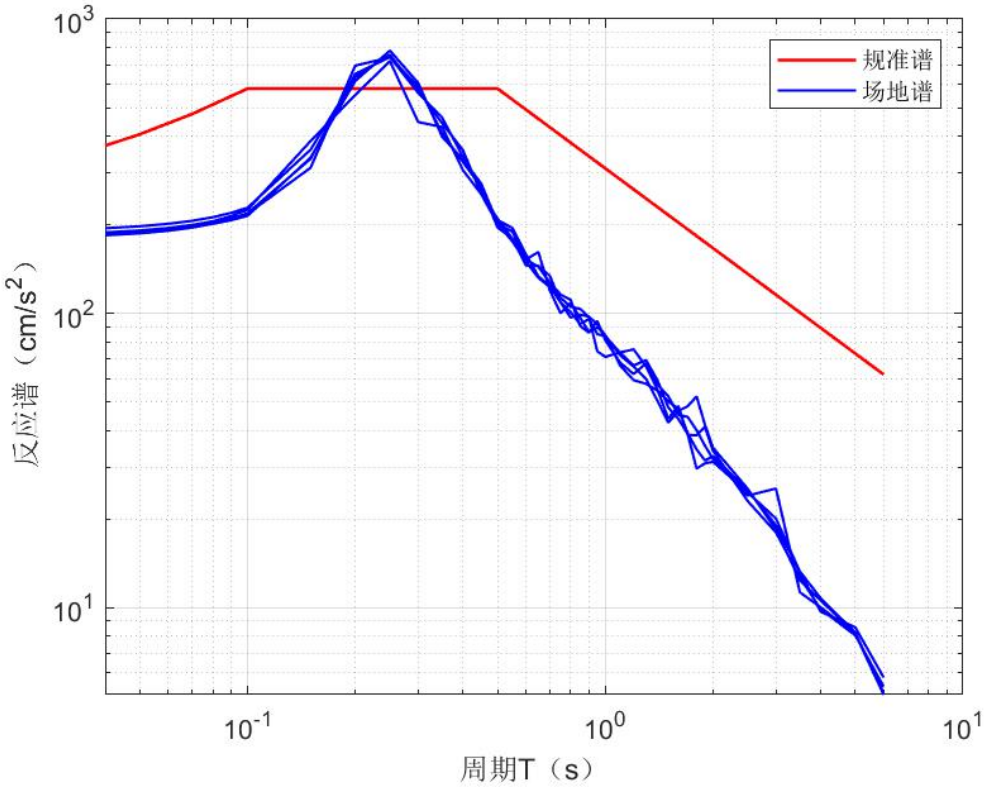


图 7.3 -94　ZK14 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

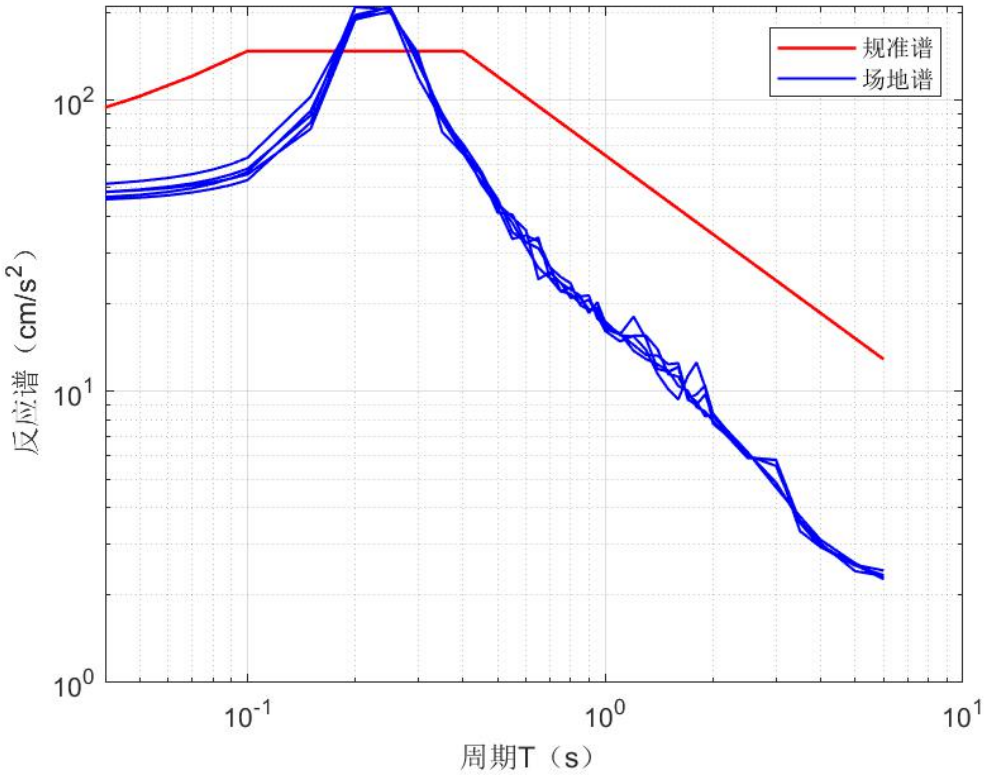


图 7.3 -95　ZK14 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

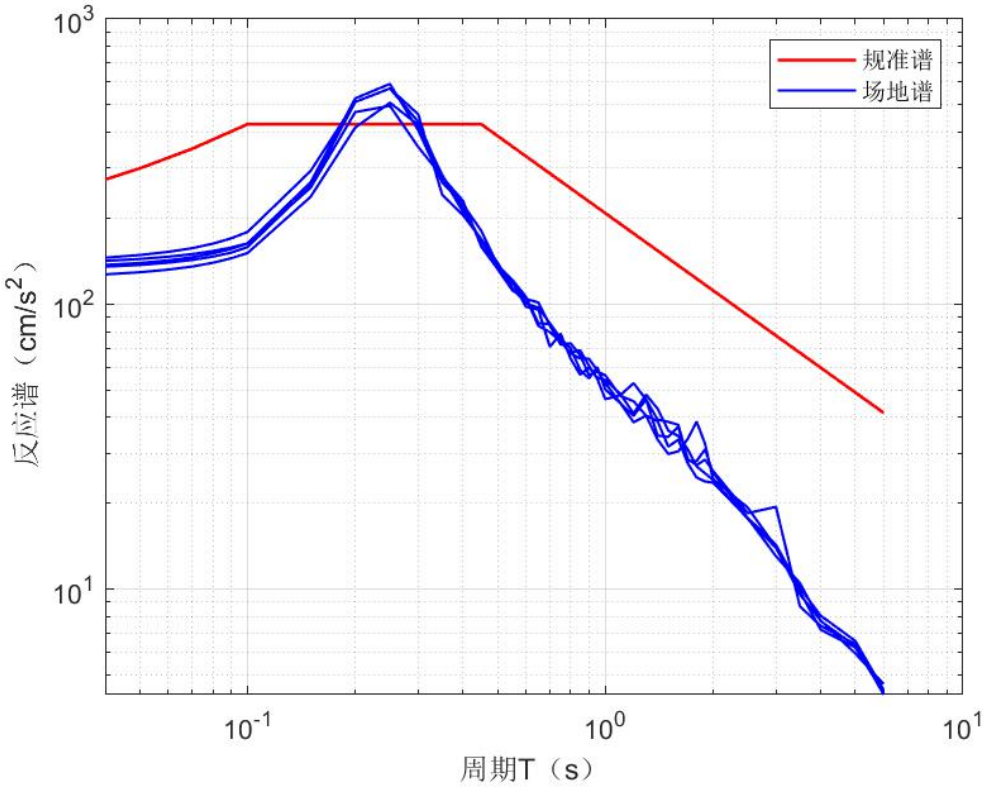


图 7.3 -96　ZK14 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

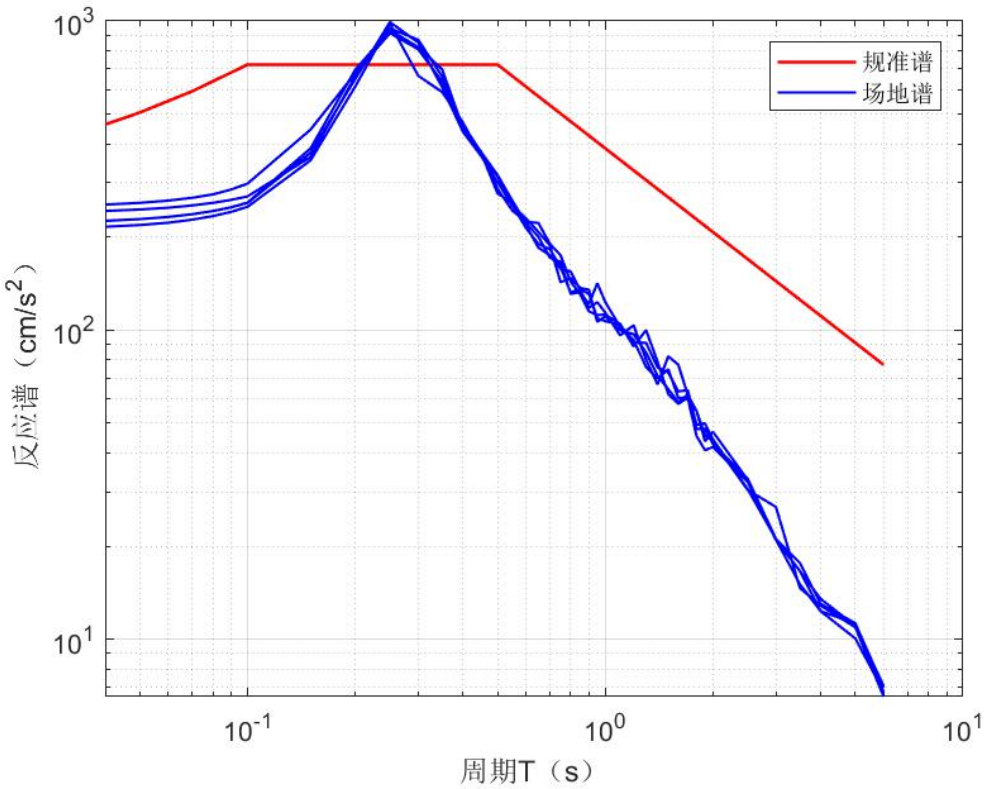


图 7.3 -97　ZK14 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

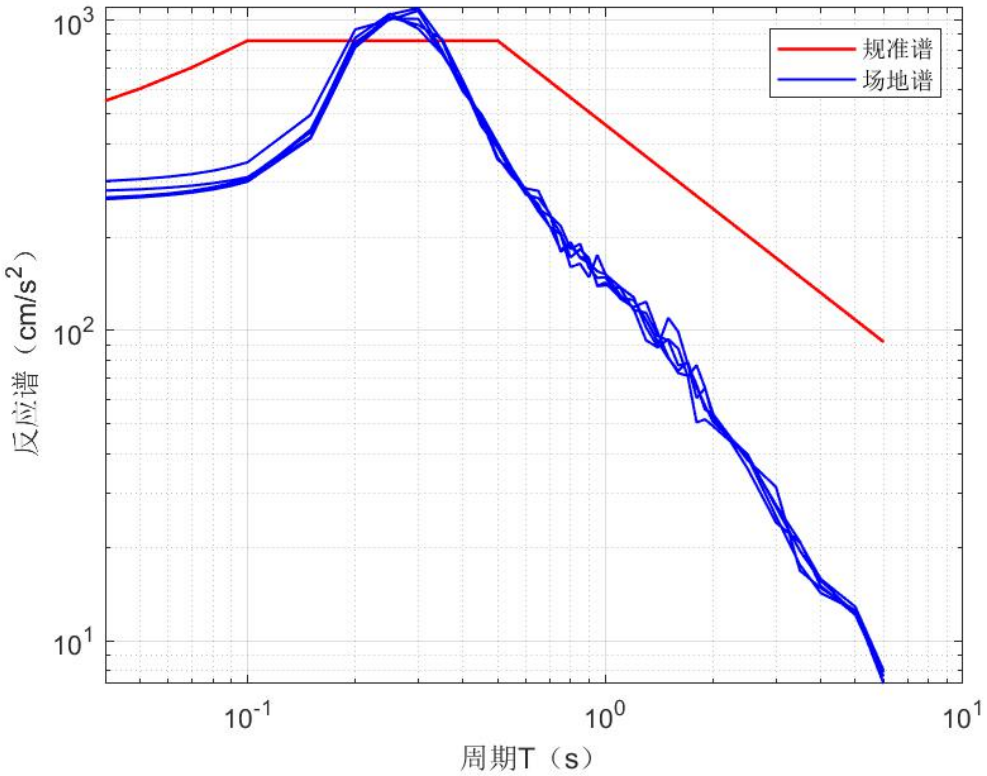


图 7.3 -98　ZK14 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

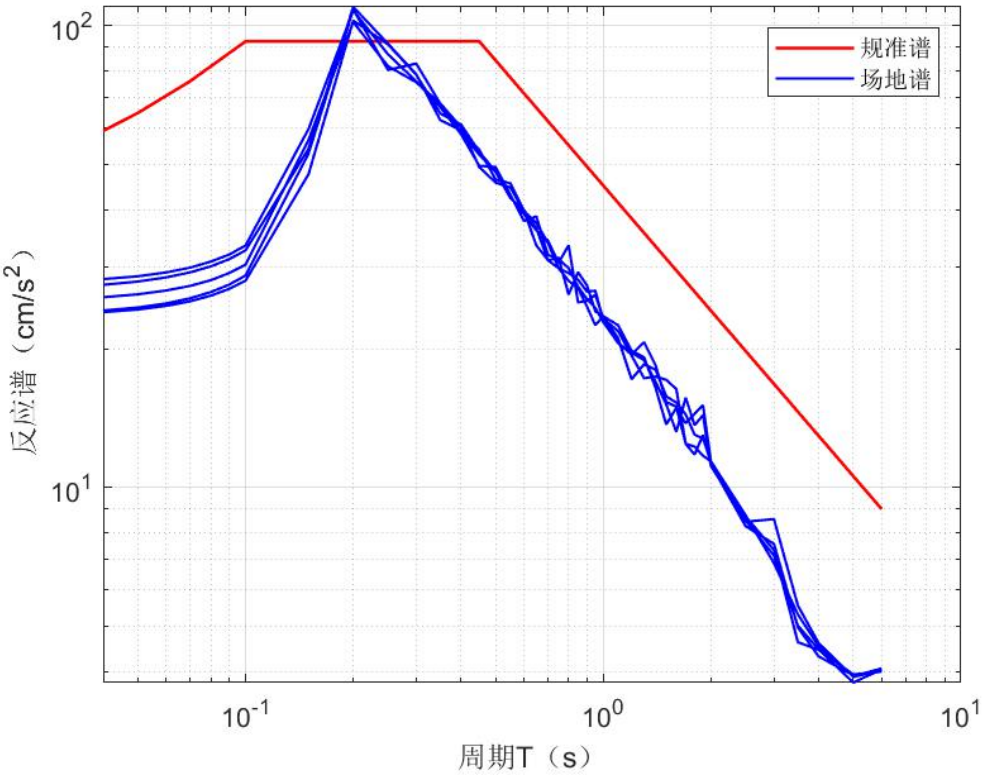


图 7.3 -99　ZK15 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

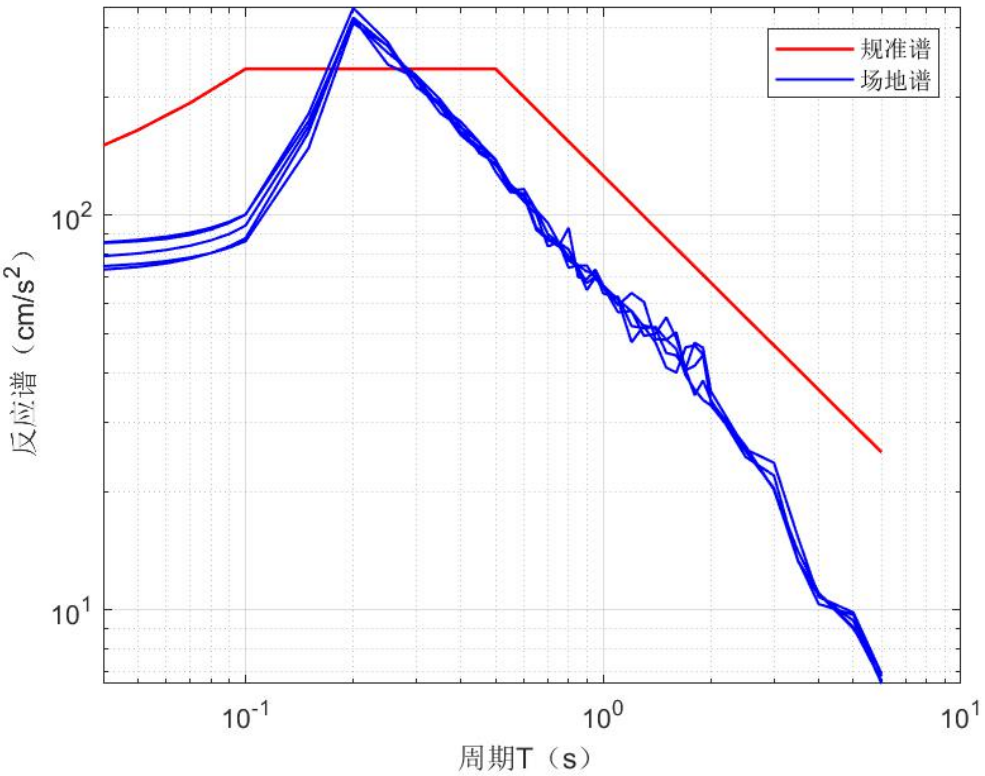


图 7.3 -100　ZK15 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

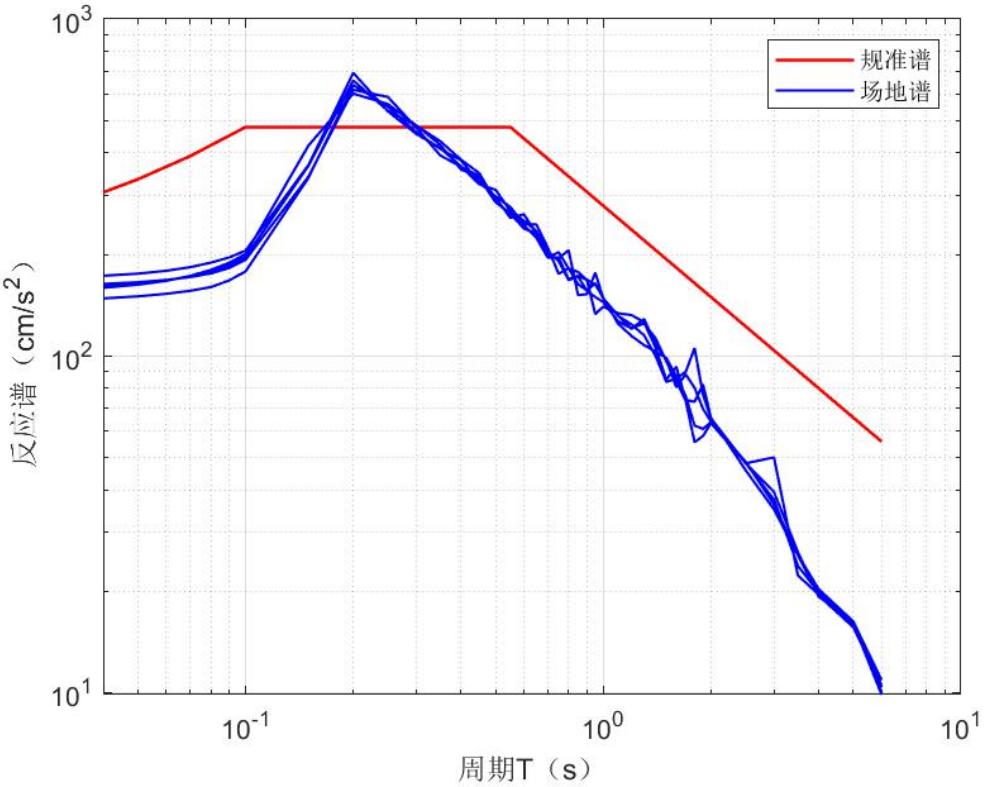


图 7.3 -101　ZK15 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

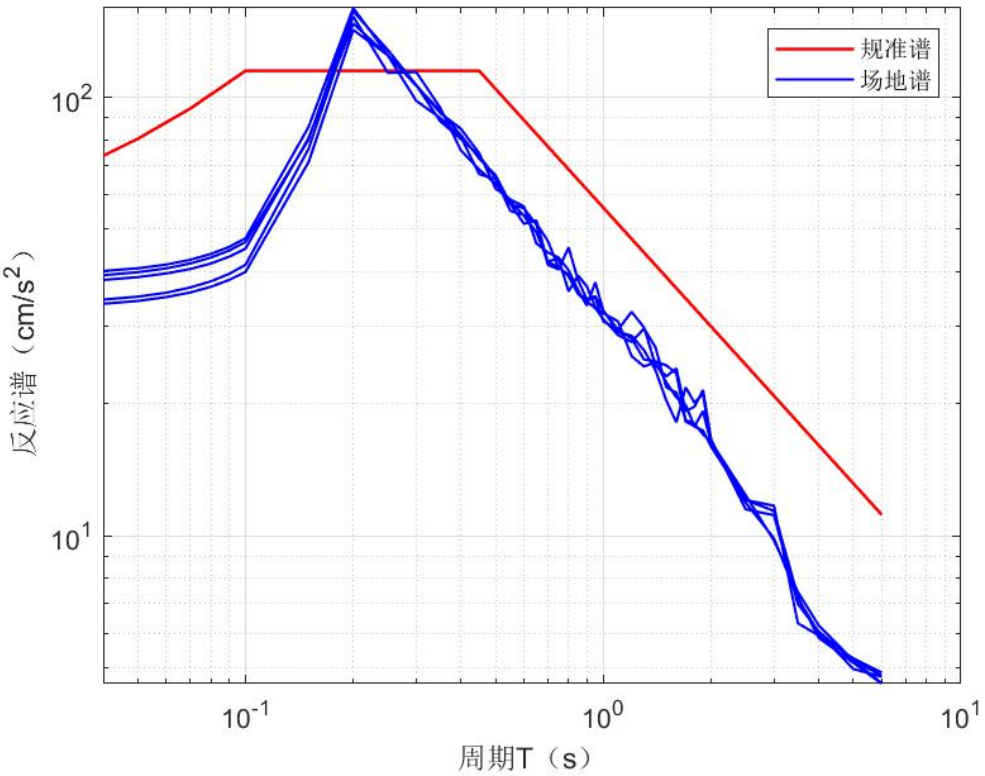


图 7.3 -102　ZK15 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

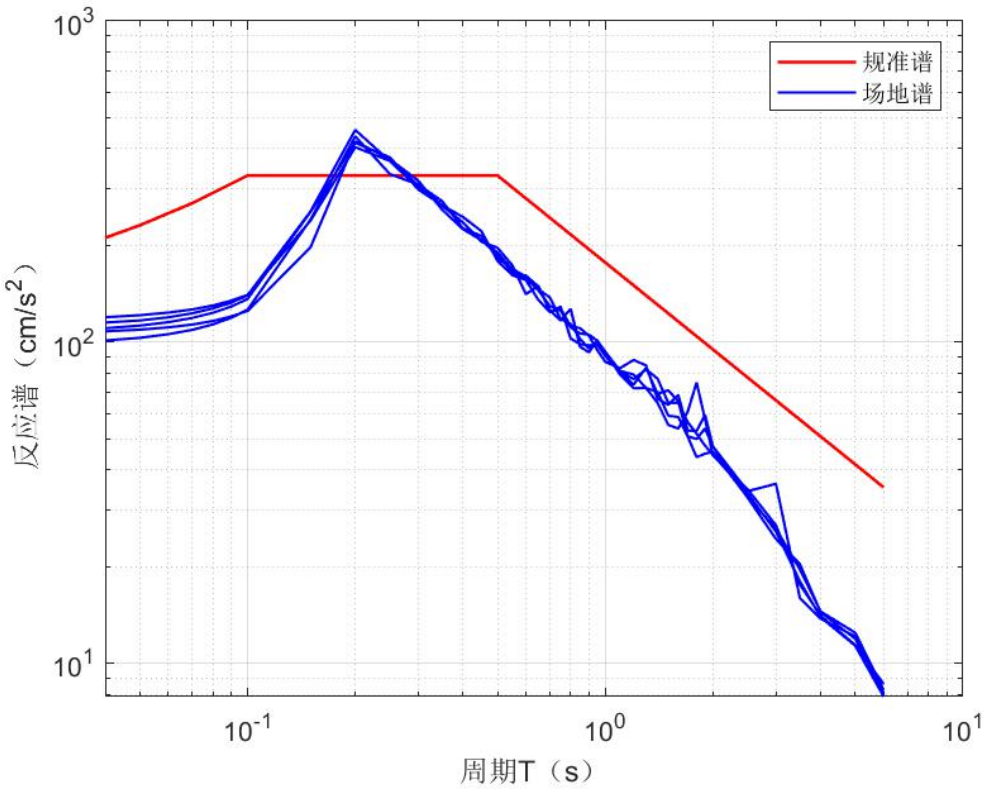


图 7.3 -103　ZK15 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

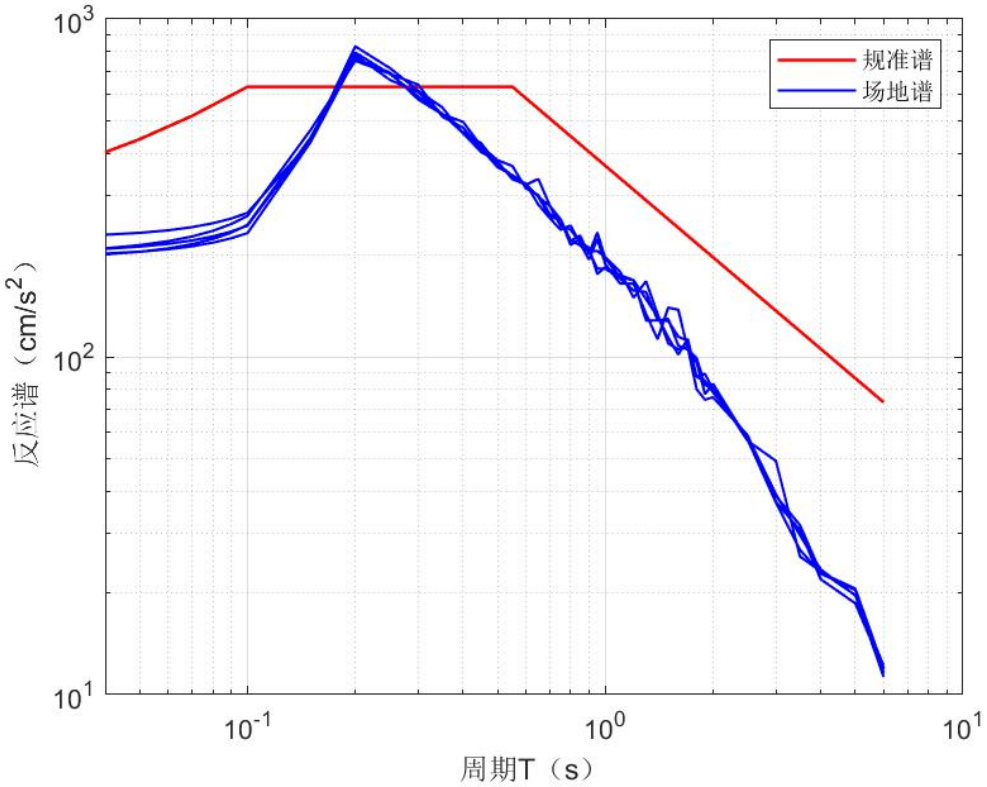


图 7.3 -104　ZK15 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

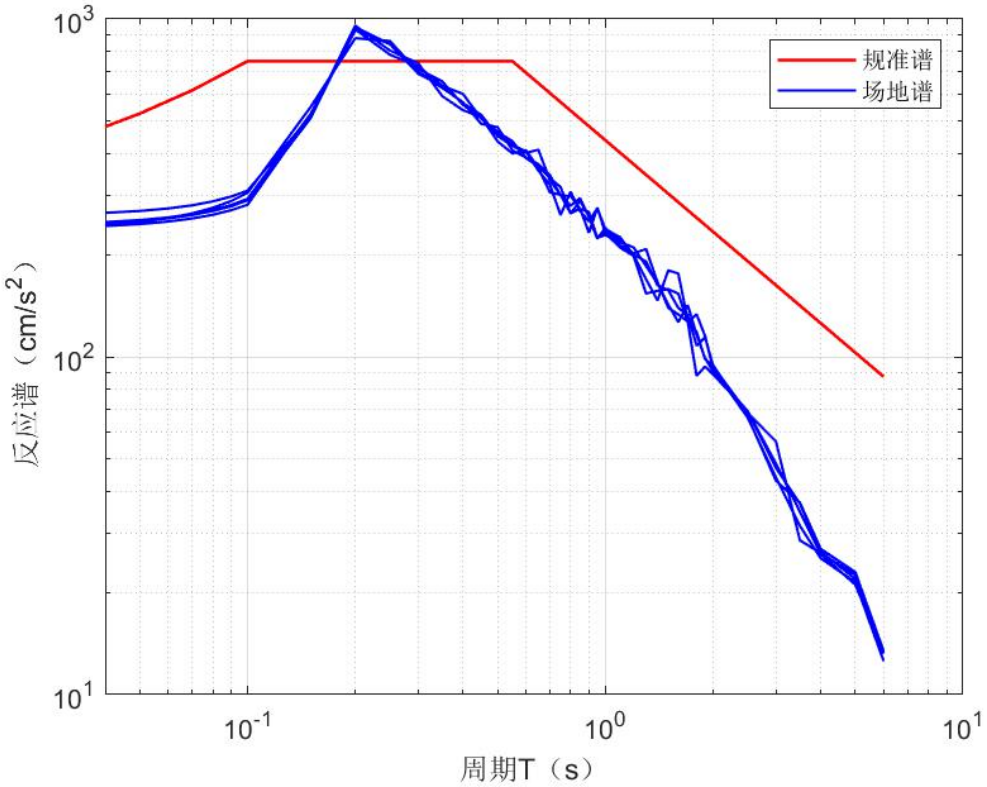


图 7.3 -105　ZK15 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

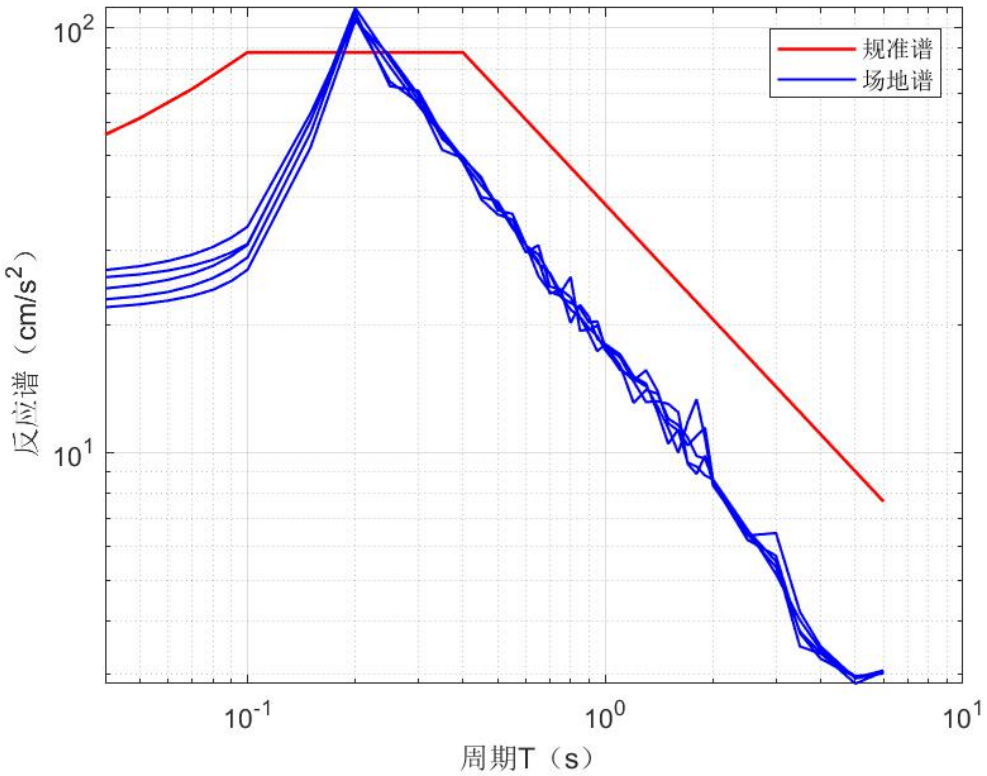


图 7.3 -106　ZK16 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

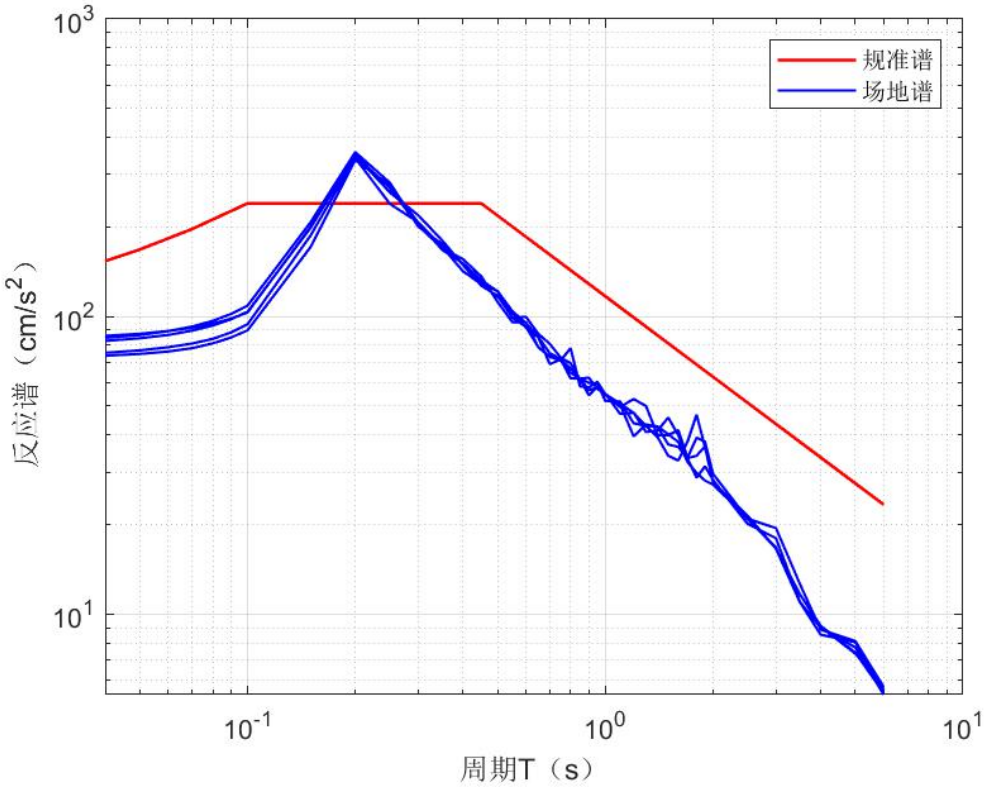


图 7.3 -107　ZK16 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

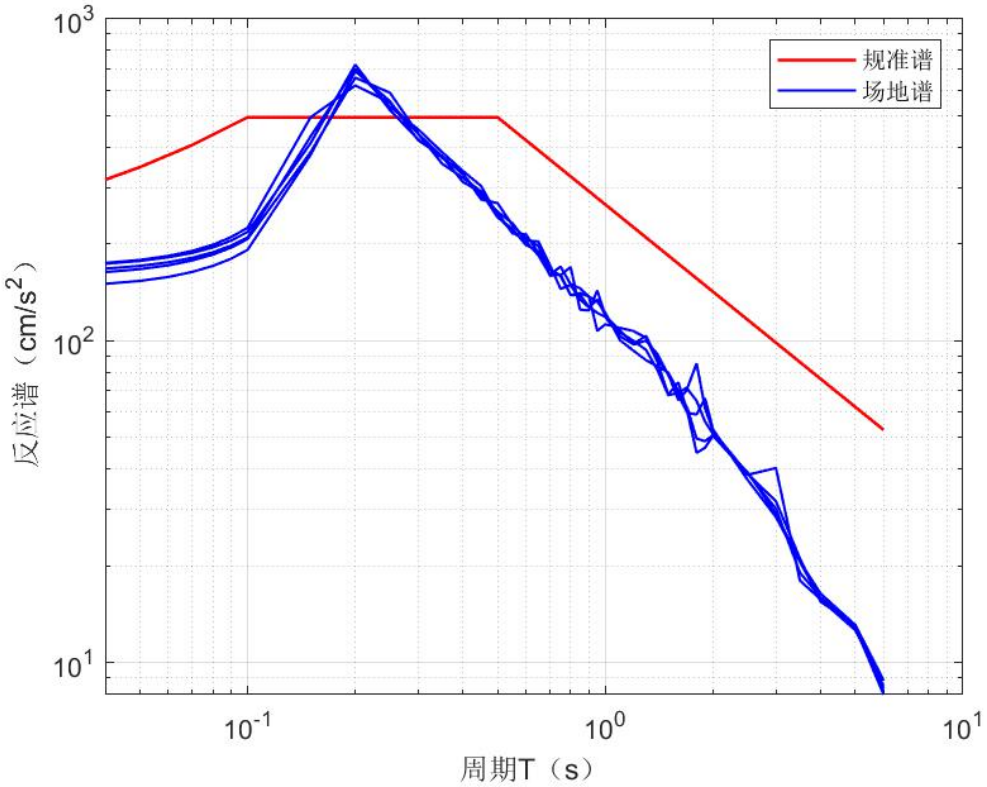


图 7.3 -108　ZK16 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

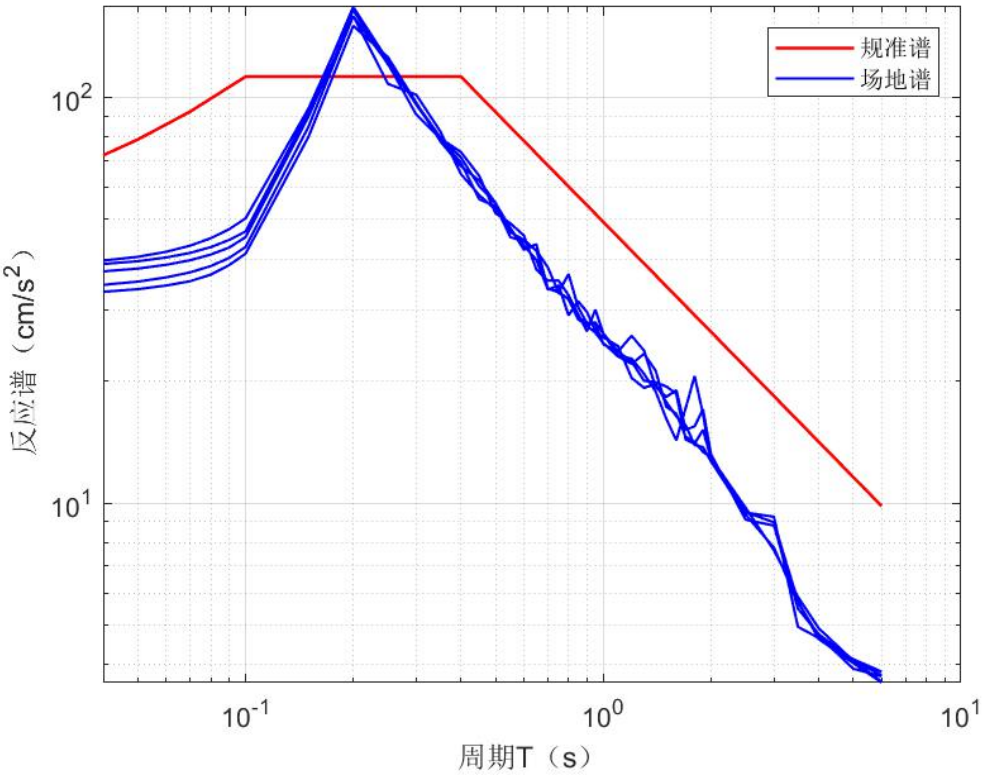


图 7.3 -109　ZK16 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

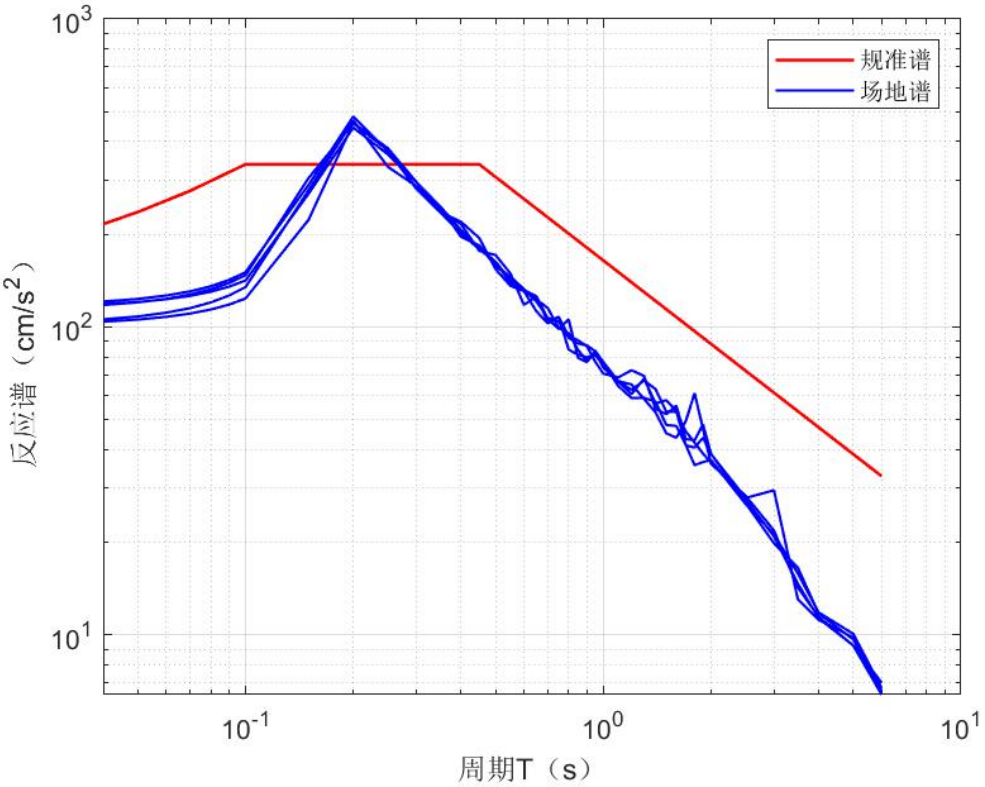


图 7.3 -110　ZK16 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

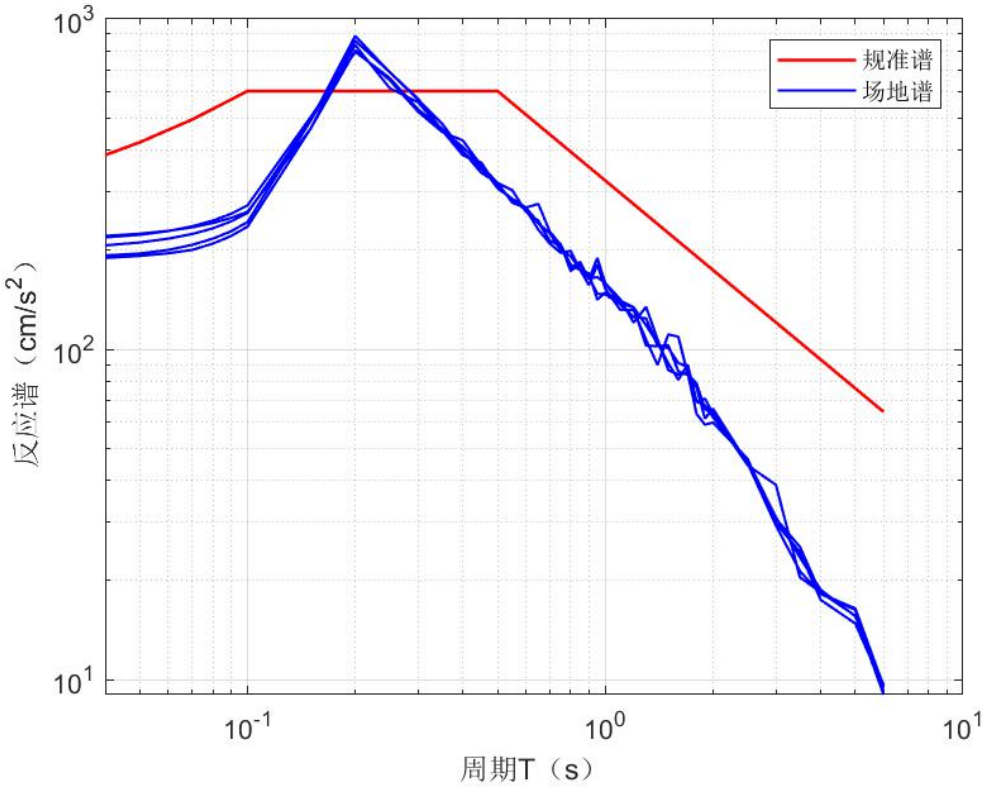


图 7.3 -111　ZK16 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

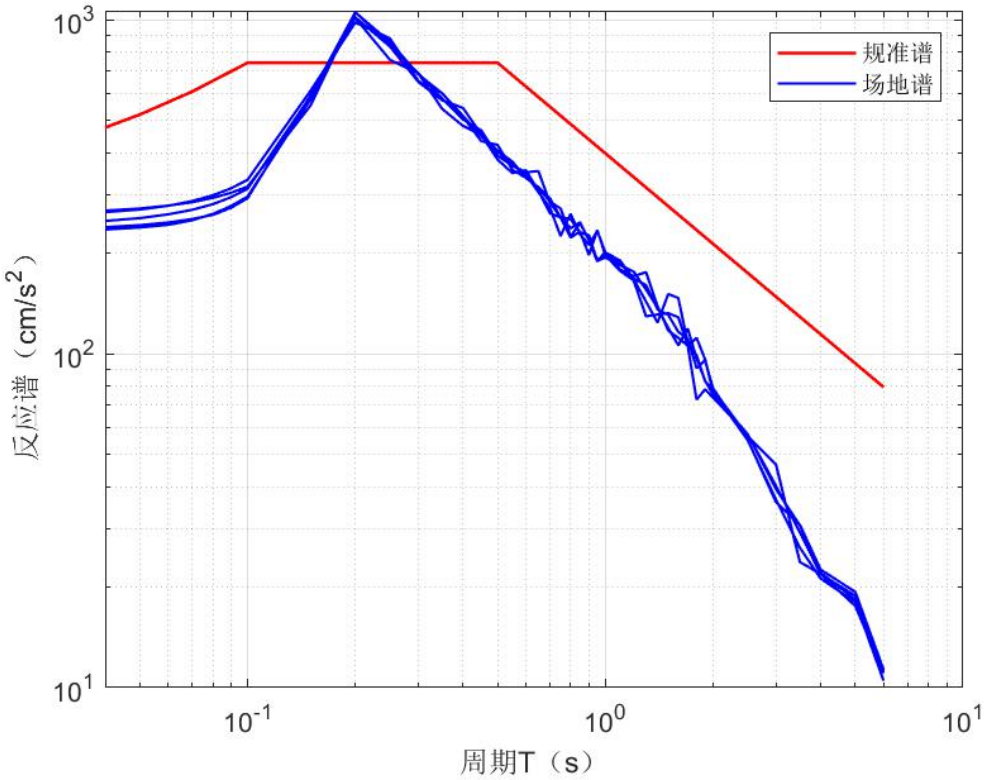


图 7.3 -112　ZK16 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

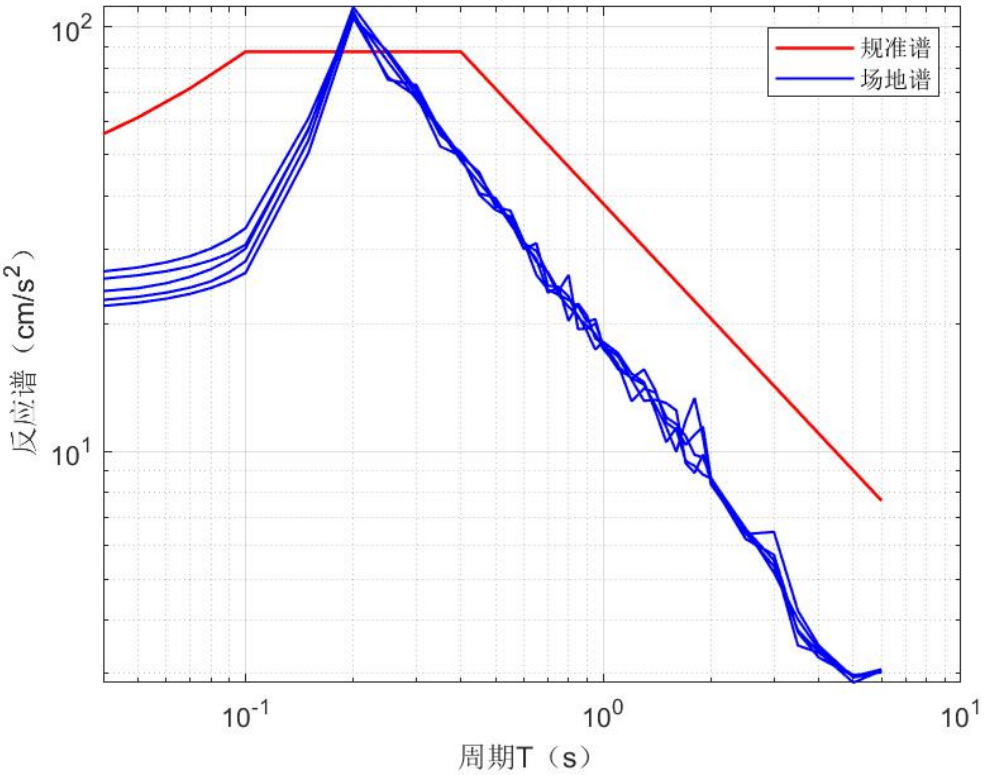


图 7.3 -113　ZK17 钻孔 50 年 63%超越概率综合反应谱

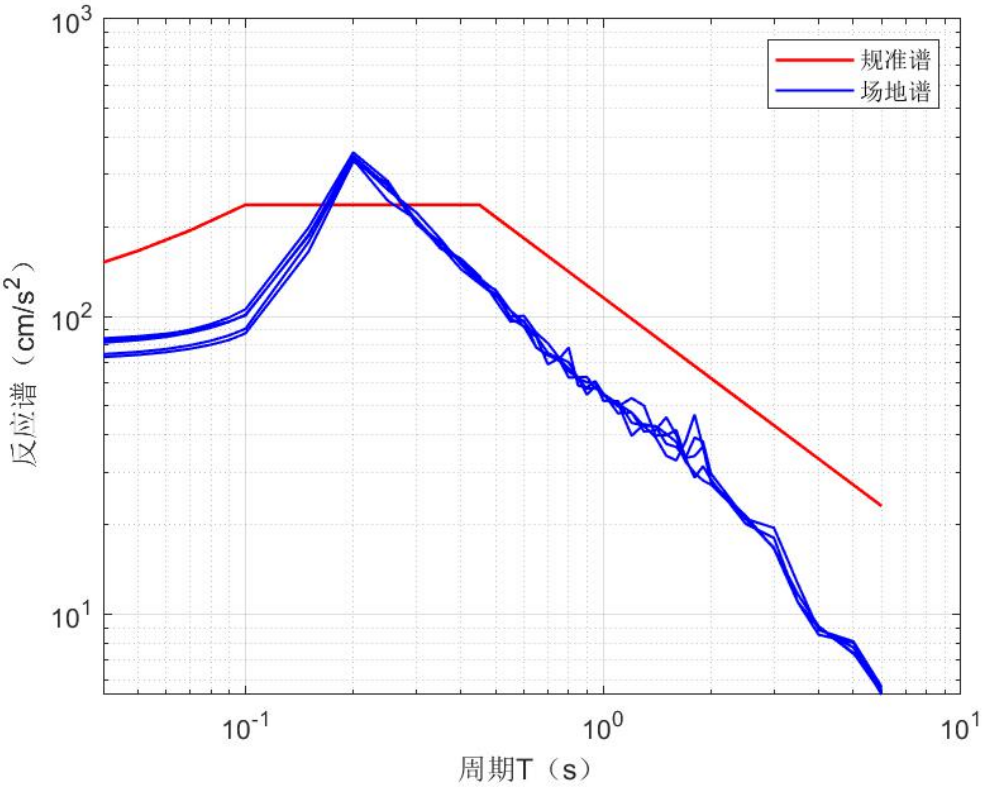


图 7.3 -114　ZK17 钻孔 50 年 10%超越概率综合反应谱

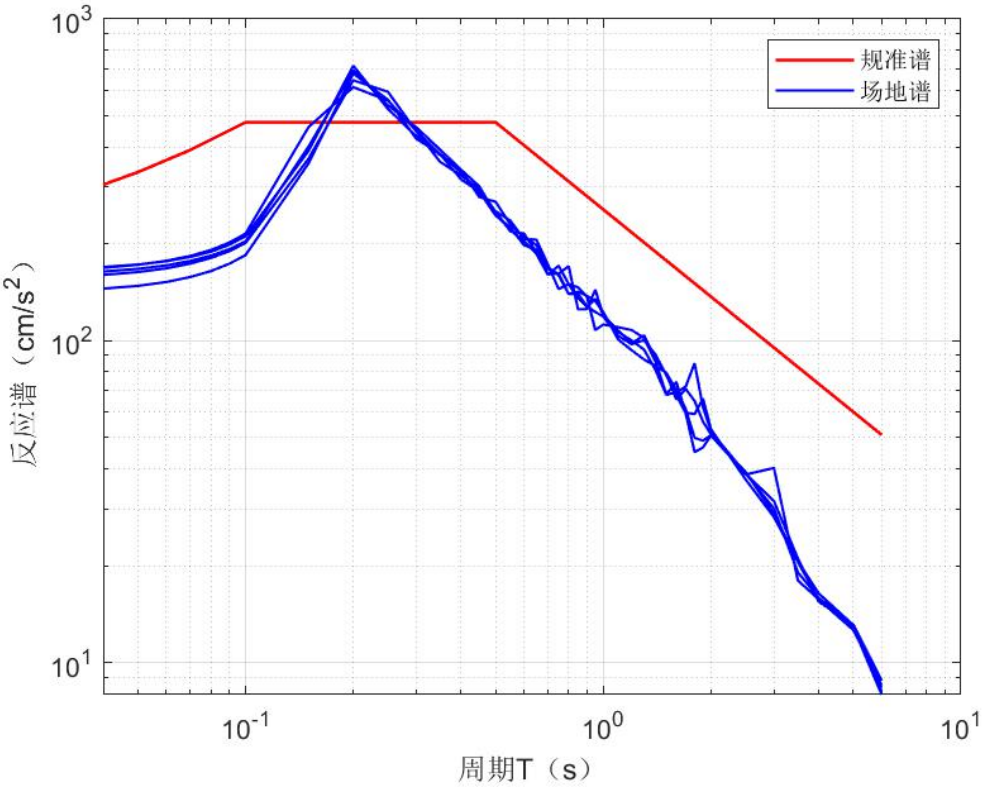


图 7.3 -115　ZK17 钻孔 50 年 2%超越概率综合反应谱

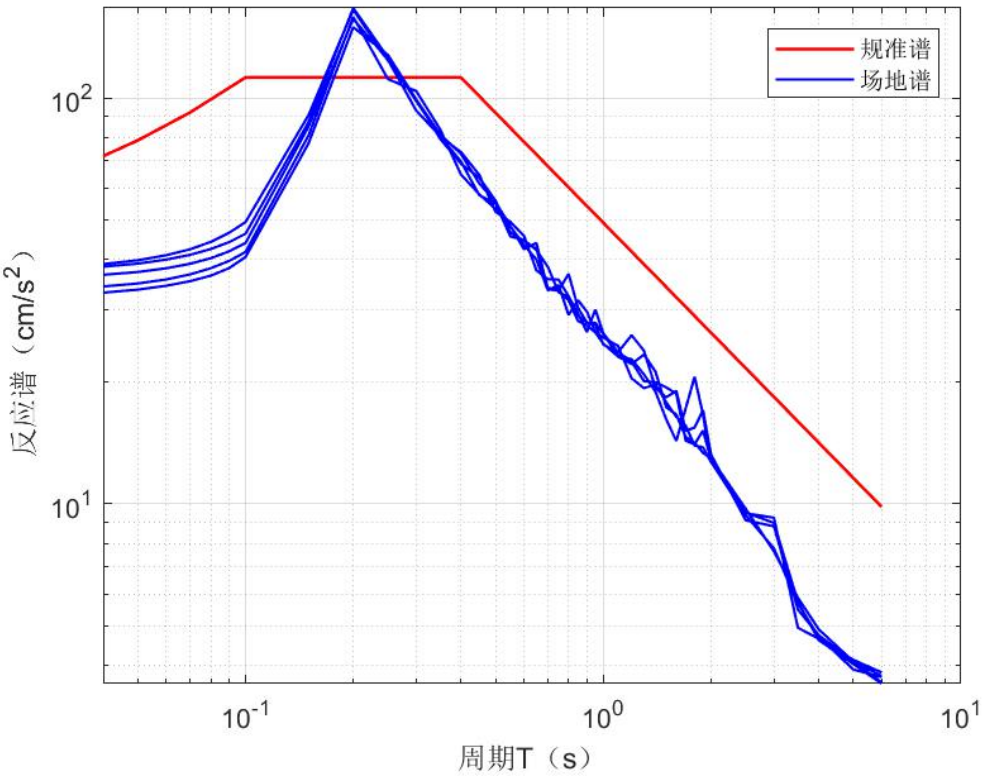


图 7.3 -116　ZK17 钻孔 100 年 63%超越概率综合反应谱

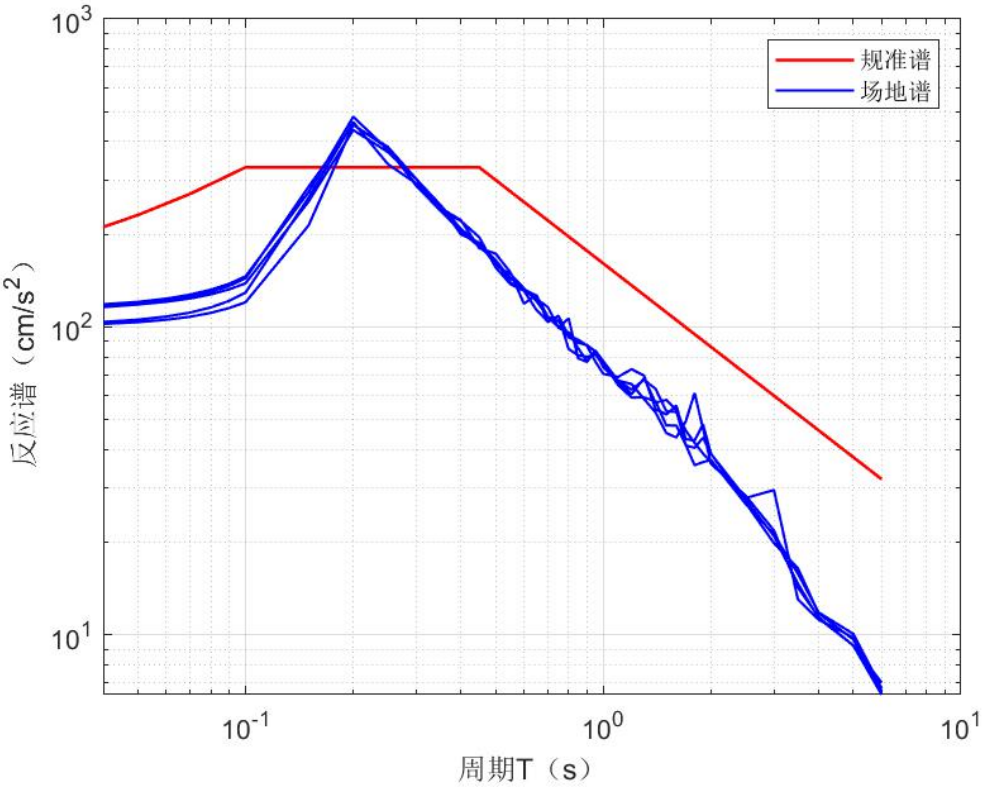


图 7.3 -117　ZK17 钻孔 100 年 10%超越概率综合反应谱

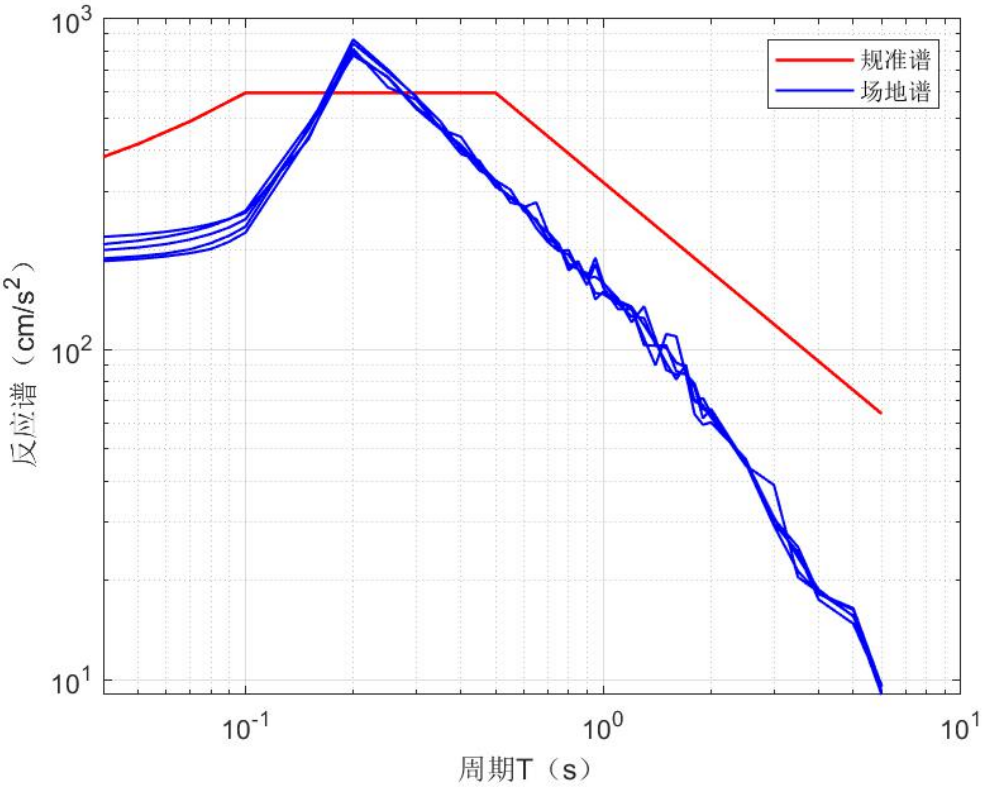


图 7.3 -118　ZK17 钻孔 100 年 2%超越概率综合反应谱

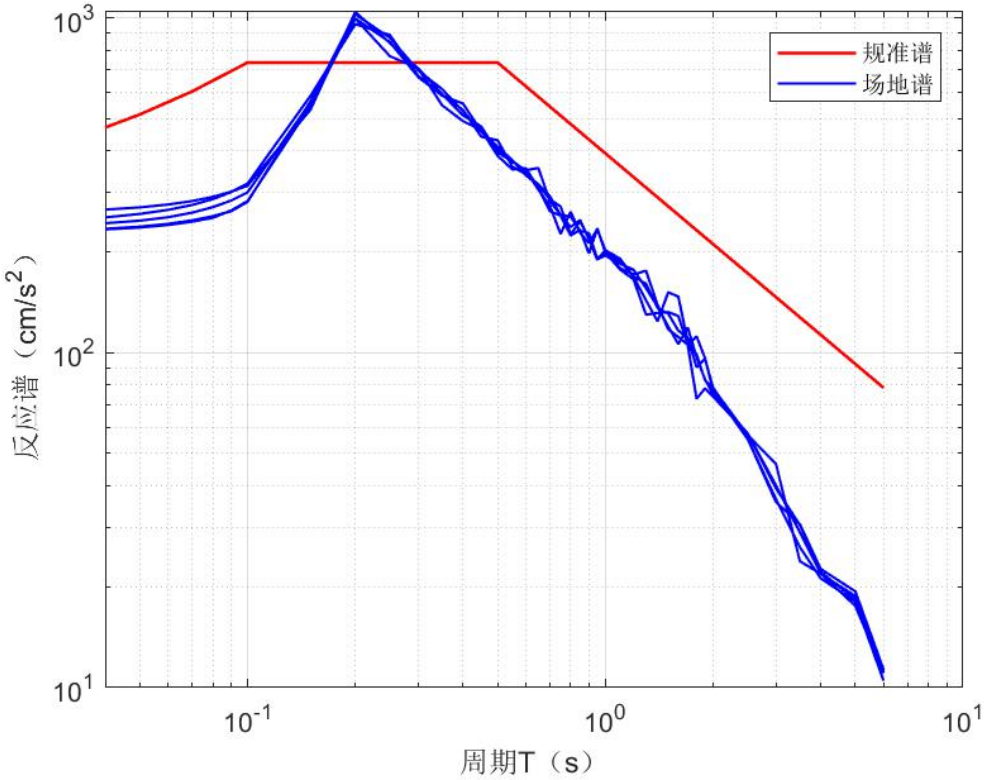


图 7.3-119　ZK17 钻孔 100 年 1%超越概率综合反应谱

表 7.3-20　目标区各钻孔地表设计地震动参数值（阻尼比 0.05）

钻孔编号	超越概率	Amax（gal）	α max	T_0	T_g(s)	β m	γ
ZK1	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	97	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	46	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	137	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	259	0.66	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	303	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK2	50 年 63%	43	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	110	0.28	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	205	0.52	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	49	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	150	0.38	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	277	0.71	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	328	0.84	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK3	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	102	0.26	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	206	0.52	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	140	0.36	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	265	0.68	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	302	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK4	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	95	0.24	0.1	0.5	2.5	0.9

	50 年 2%	188	0.48	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	130	0.33	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	245	0.62	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	298	0.76	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK5	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	94	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	190	0.48	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	131	0.33	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	247	0.63	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	284	0.72	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK6	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	89	0.23	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	121	0.31	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	226	0.58	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	276	0.70	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK7	50 年 63%	42	0.11	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 10%	112	0.29	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	226	0.58	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	54	0.14	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 10%	155	0.40	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	297	0.76	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	343	0.87	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK8	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	104	0.27	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	214	0.55	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	145	0.37	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	276	0.70	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	315	0.80	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK9	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	100	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	199	0.51	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	138	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	262	0.67	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	303	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK10	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	86	0.22	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	40	0.10	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	122	0.31	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	227	0.58	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	281	0.72	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK11	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9

	50 年 10%	91	0.23	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	184	0.47	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 63%	44	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	125	0.32	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	241	0.61	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 1%	279	0.71	0.1	0.45	2.5	0.9
ZK12	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	97	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	47	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	136	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	260	0.66	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	310	0.79	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK13	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	89	0.23	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	43	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	121	0.31	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	226	0.58	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	276	0.70	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK14	50 年 63%	49	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	128	0.33	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	232	0.59	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	59	0.15	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	171	0.44	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	289	0.74	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	344	0.88	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK15	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	94	0.24	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	191	0.49	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	46	0.12	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	132	0.34	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	252	0.64	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	300	0.76	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK16	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	96	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	135	0.34	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	242	0.62	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	297	0.76	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK17	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	95	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	191	0.49	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	132	0.34	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	239	0.61	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	294	0.75	0.1	0.5	2.5	0.9

图 7.3-120～图 7.3-126 为目标区各钻孔地表 7 个超越概率的峰值加速度分布图，图 7.3-127～7.3-133 为目标区各钻孔地表 7 个超越概率的特征周期分布图。图 7.3.134～7.3-140 为目标区 7 个超越概率的地震动峰值加速度等值线图。

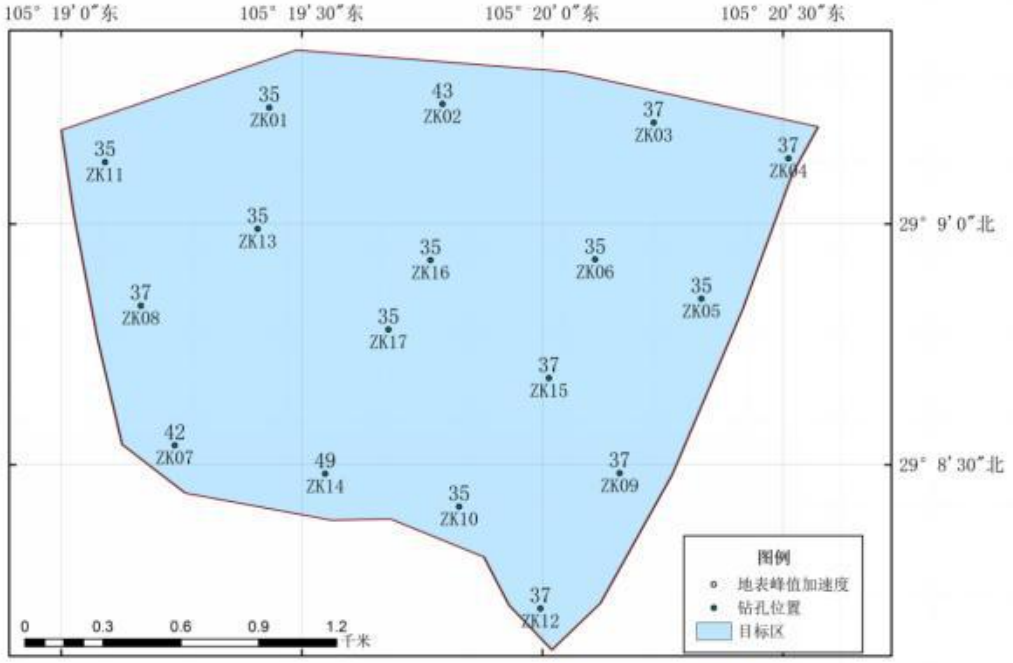


图 7.3-120　目标区各钻孔 50 年超越概率 63%峰值加速度分布图（gal）

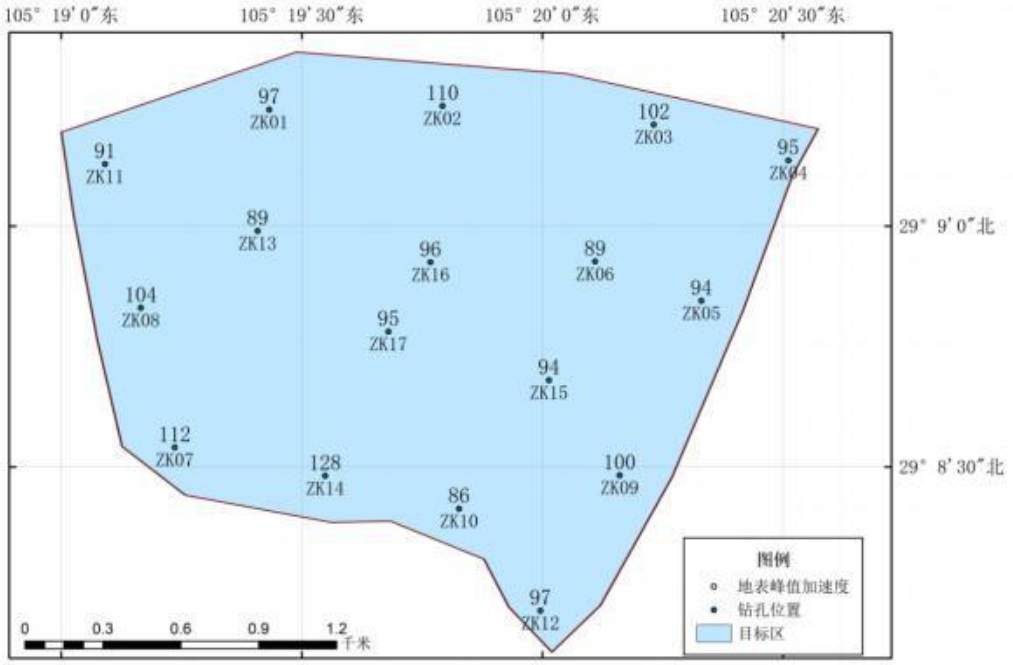


图 7.3-121　目标区各钻孔 50 年超越概率 10%峰值加速度分布图（gal）

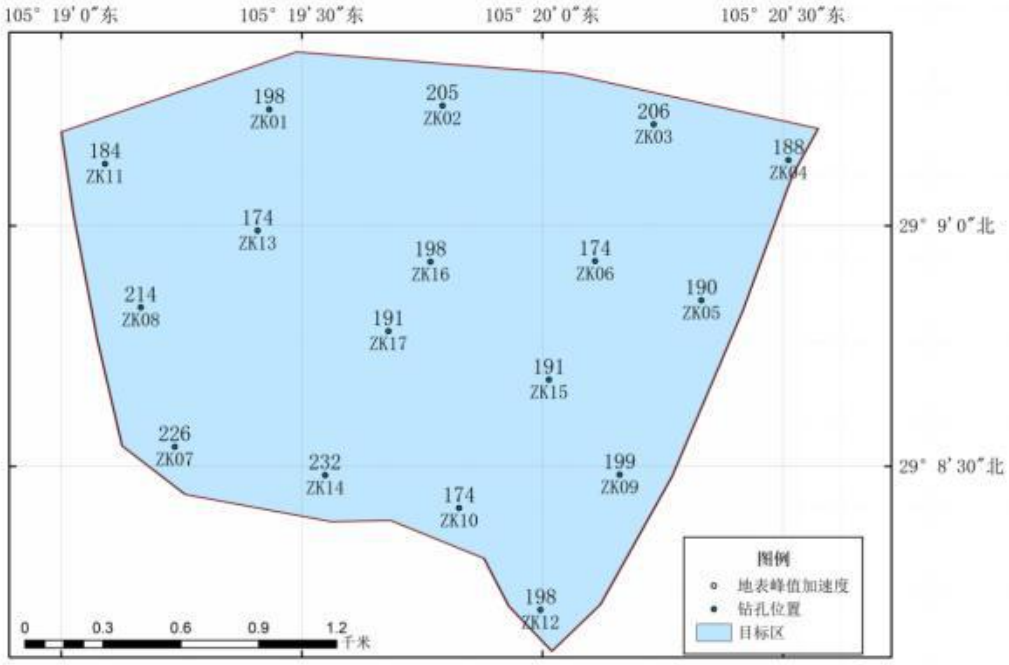


图 7.3-122　目标区各钻孔 50 年超越概率 2%峰值加速度分布图（gal）

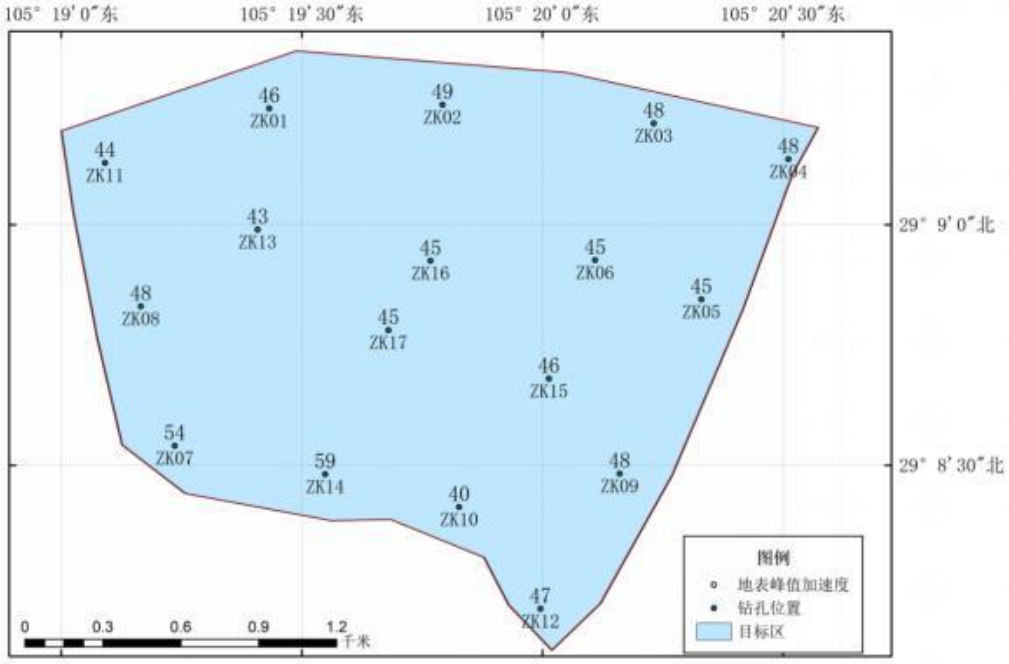


图 7.3-123　目标区各钻孔 100 年超越概率 63%峰值加速度分布图（gal）

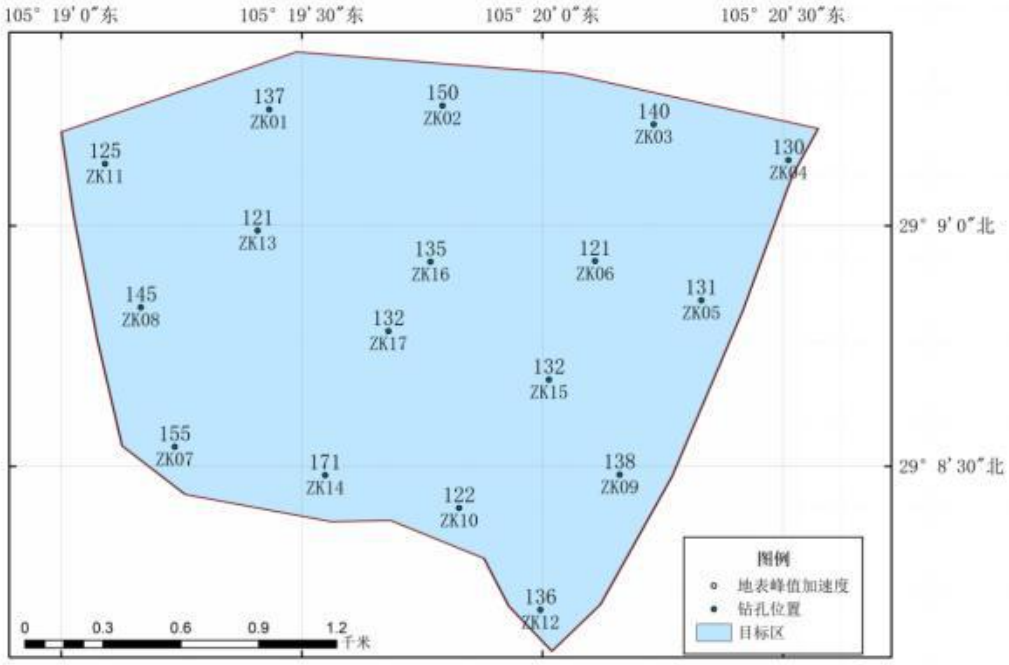


图 7.3-124　目标区各钻孔 100 年超越概率 10%峰值加速度分布图（gal）

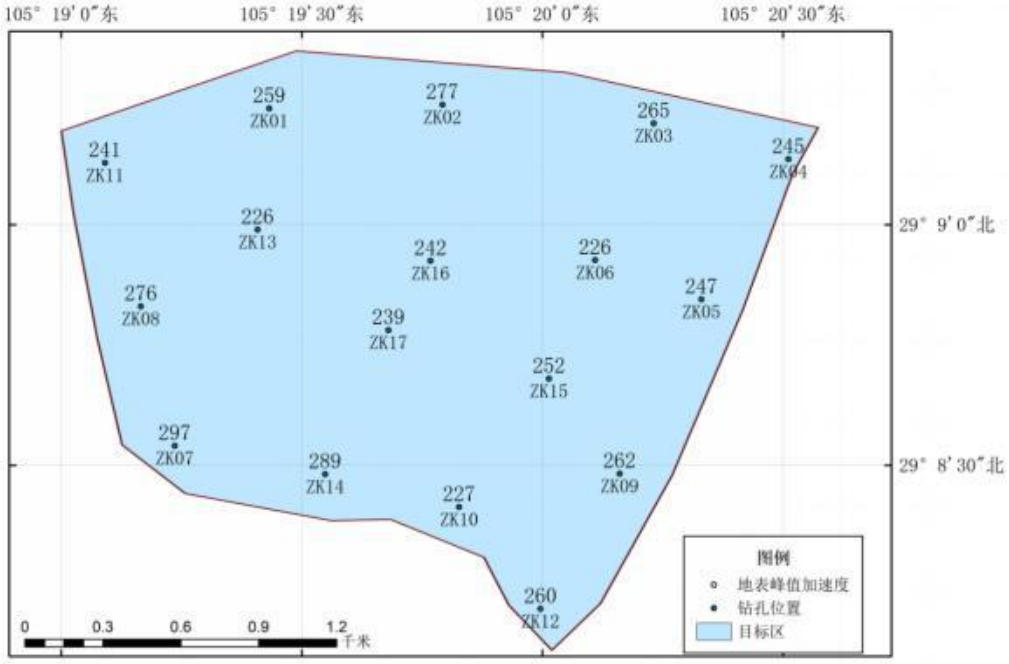


图 7.3-125　目标区各钻孔 100 年超越概率 2%峰值加速度分布图（gal）

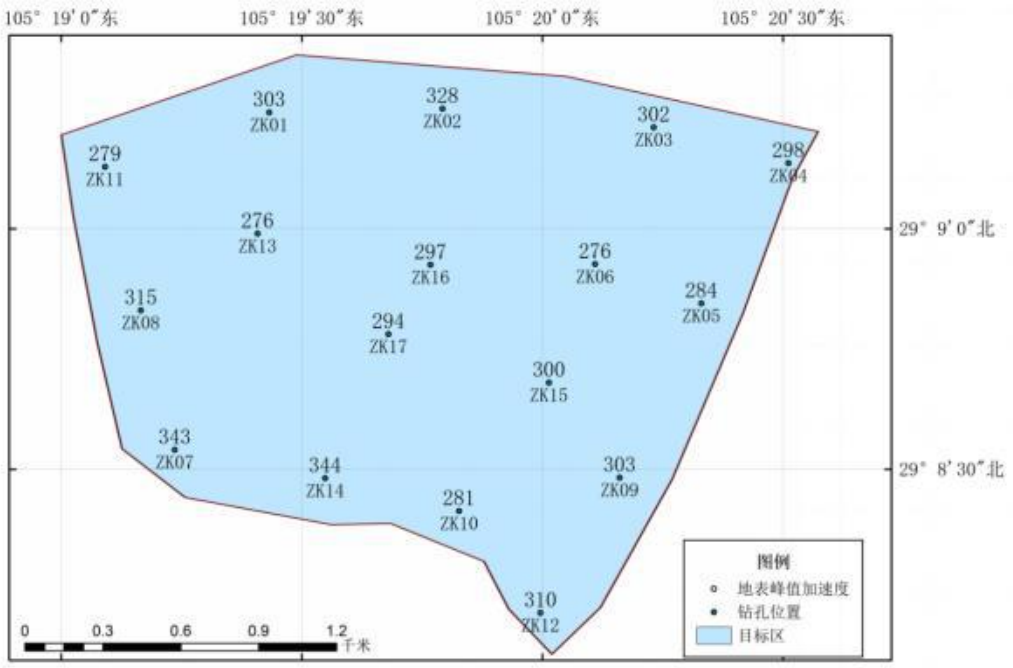


图 7.3-126　目标区各钻孔 100 年超越概率 1%峰值加速度分布图（gal）

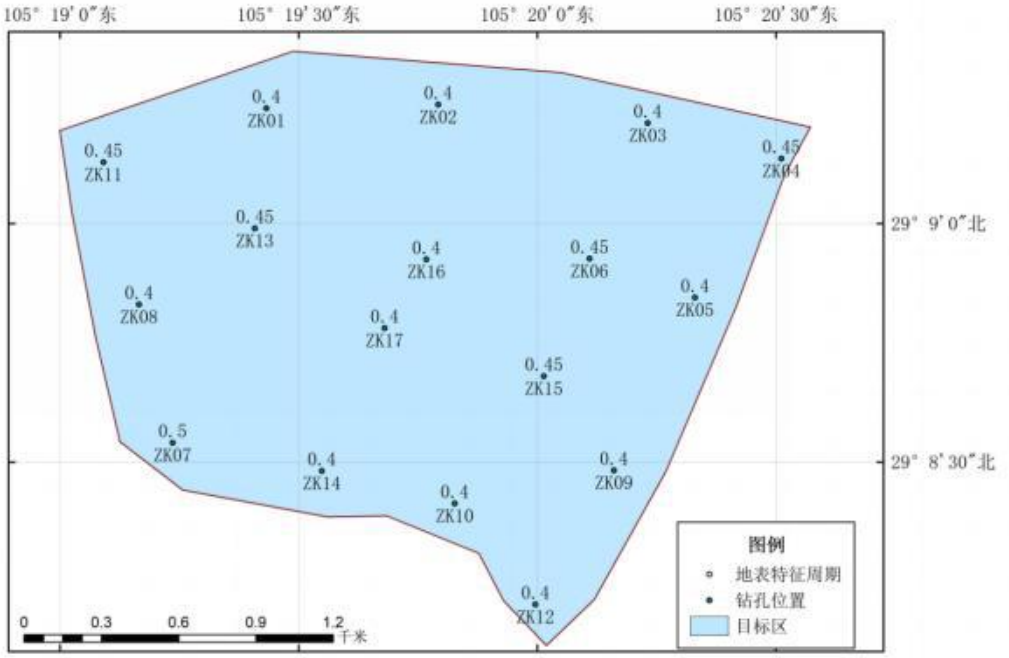


图 7.3-127　目标区各钻孔 50 年超越概率 63%特征周期 Tg 分布图（s）

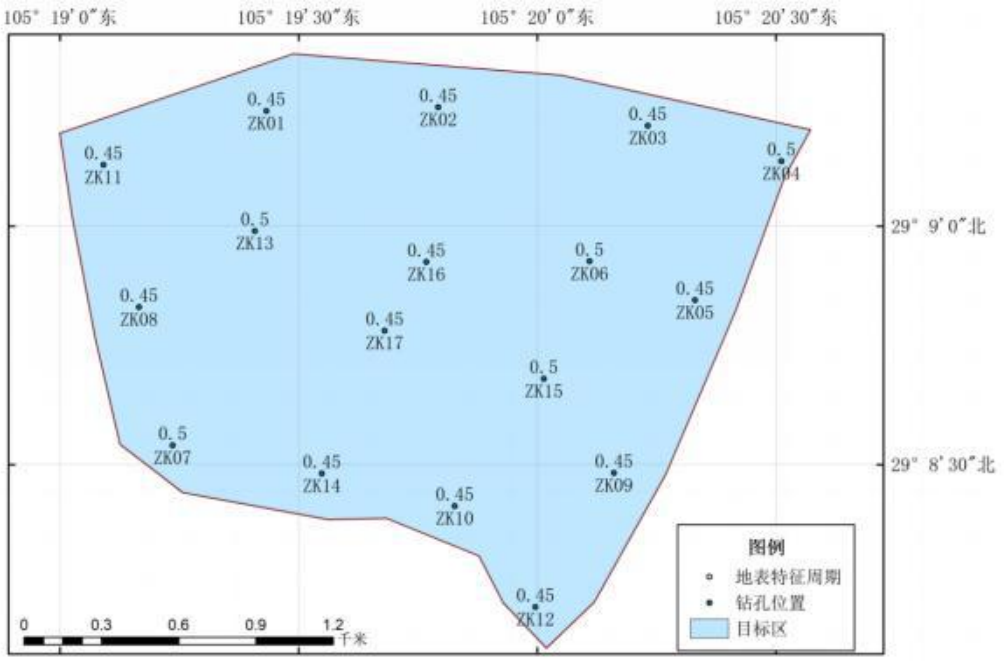


图 7.3-128　目标区各钻孔 50 年超越概率 10%特征周期 Tg 分布图（s）

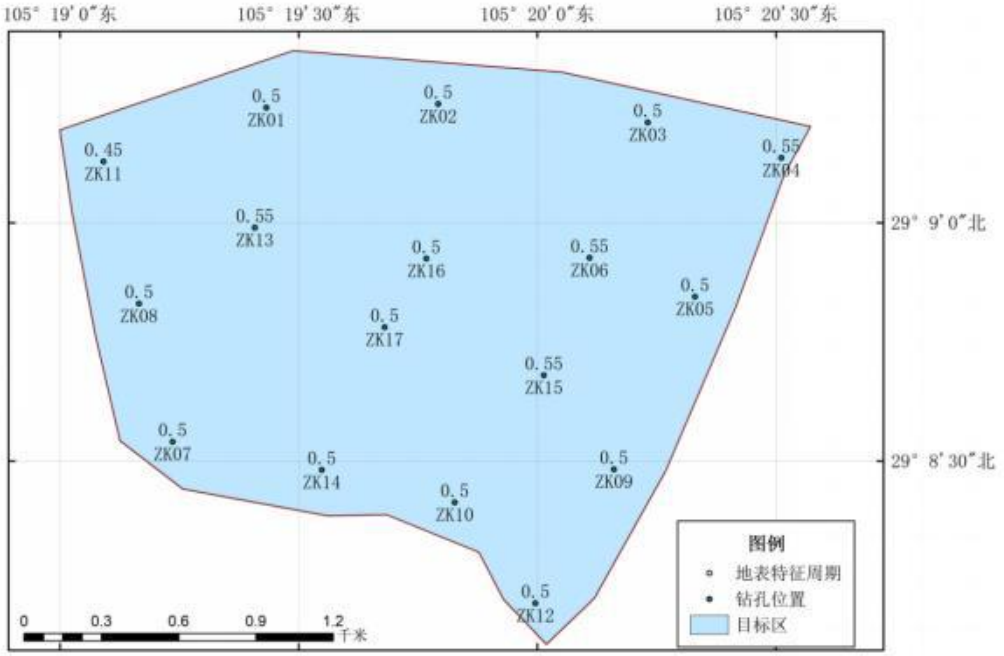


图 7.3-129　目标区各钻孔 50 年超越概率 2%特征周期 Tg 分布图(s)

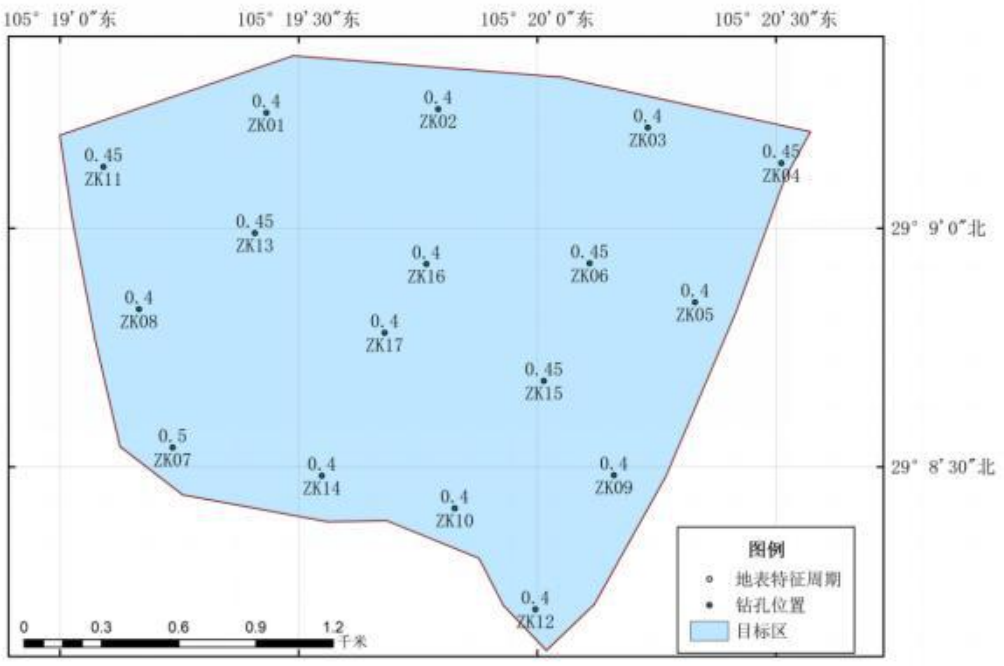


图 7.3-130　目标区各钻孔 100 年超越概率 63%特征周期 Tg 分布图(s)

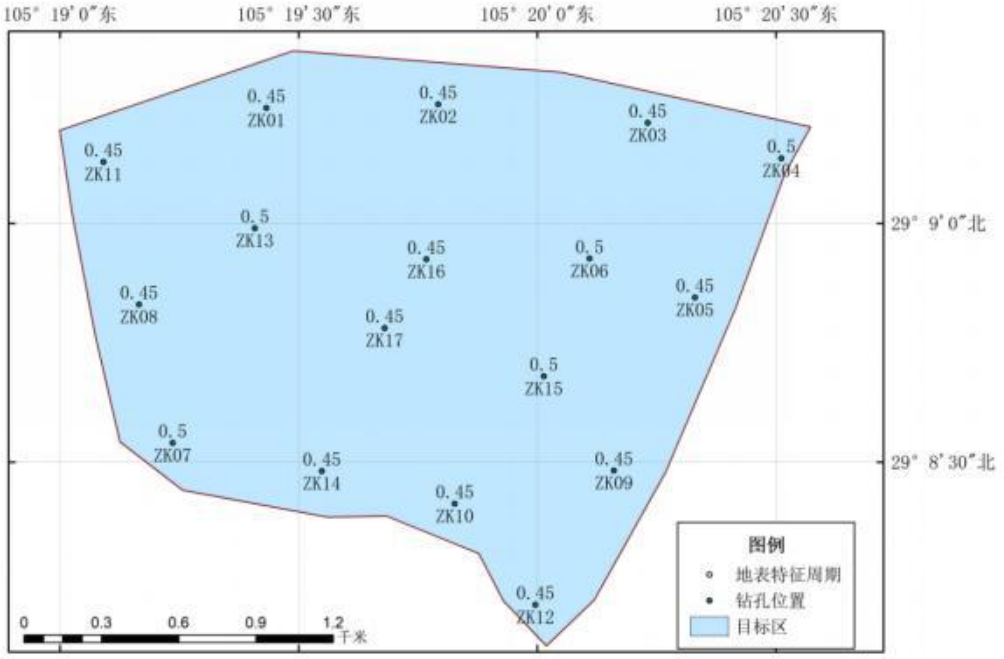


图 7.3-131 目标区各钻孔 100 年超越概率 10%特征周期 Tg 分布图(s)

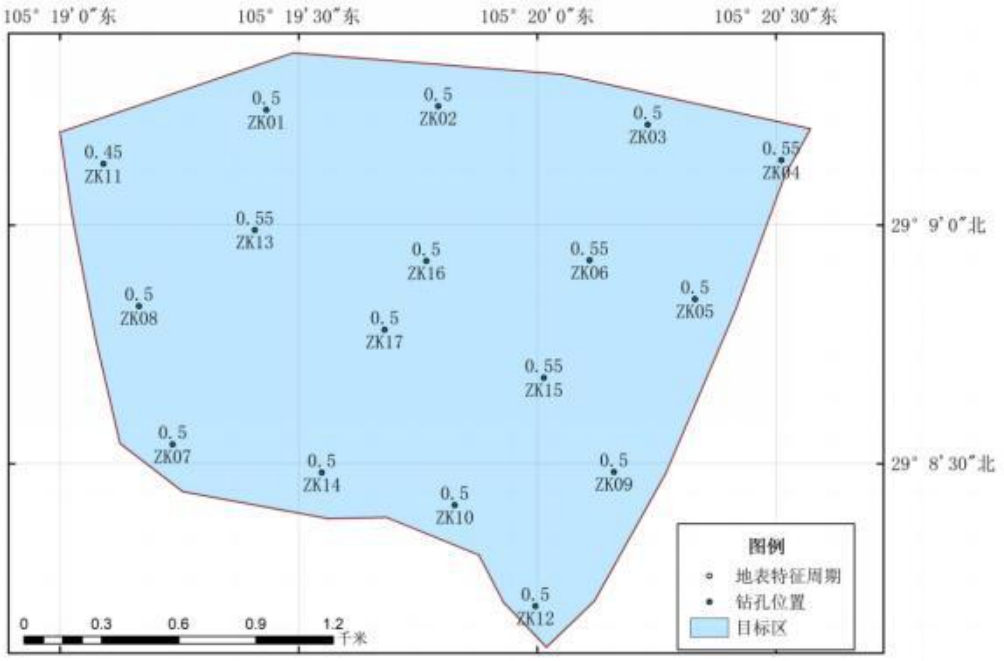


图 7.3-132　目标区各钻孔 100 年超越概率 2%特征周期 Tg 分布图(s)

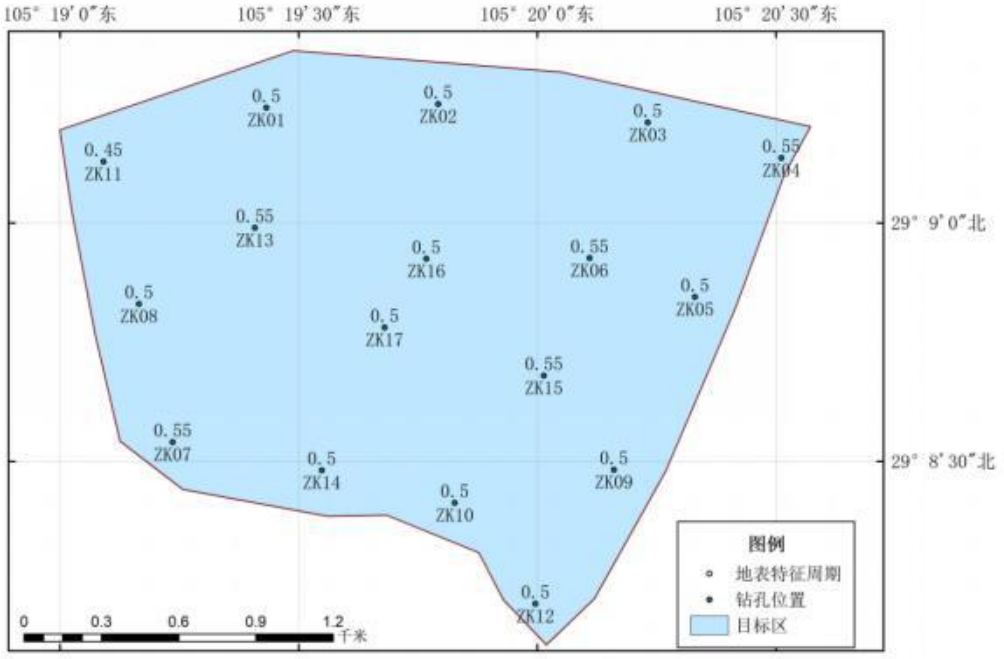


图 7.3-133　目标区各钻孔 100 年超越概率 1%特征周期 Tg 分布图(s)

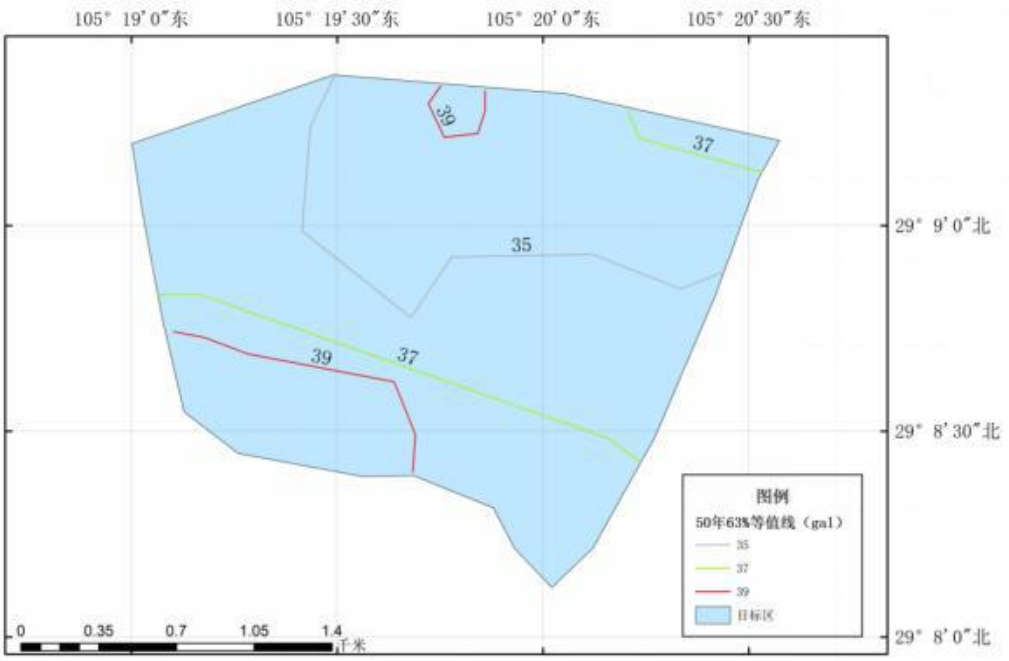


图 7.3-134　目标区 50 年超越概率 63%峰值加速度等值线图

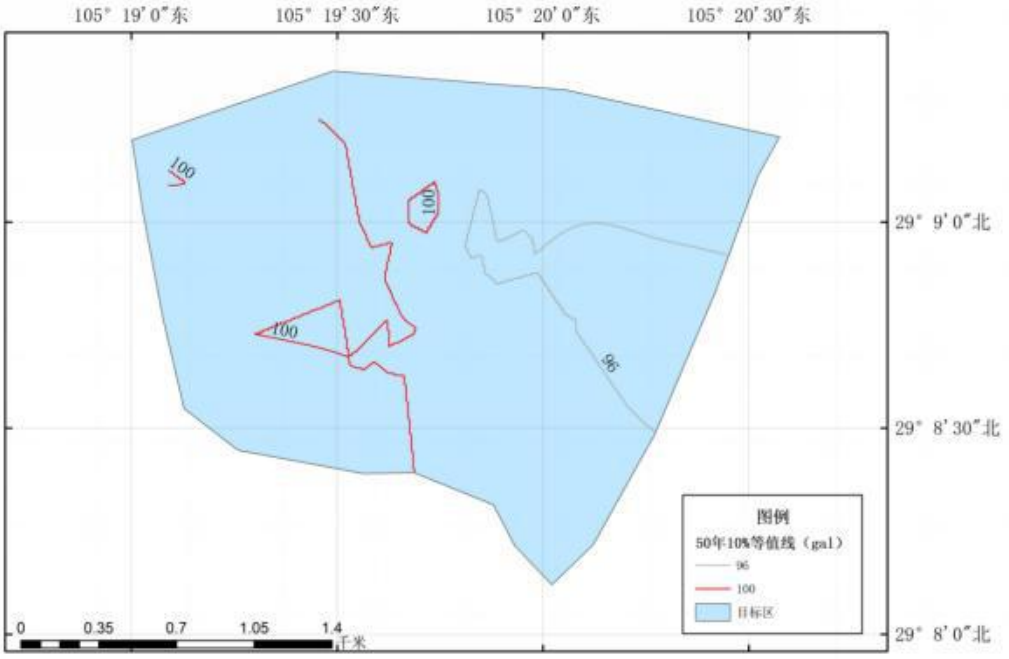


图 7.3-135　目标区 50 年超越概率 10%峰值加速度等值线图

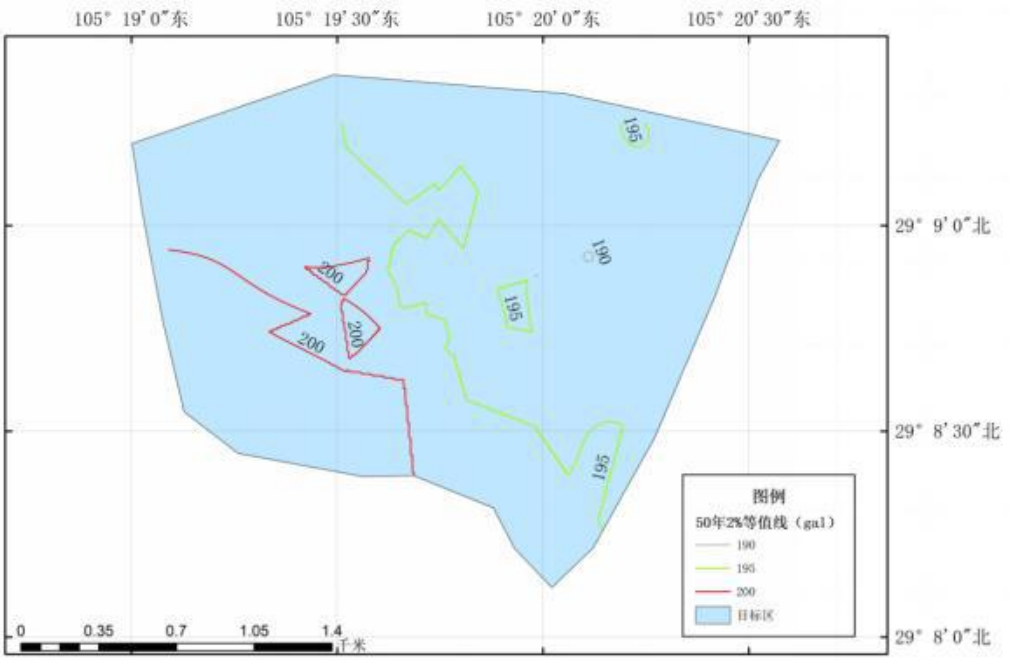


图 7.3-136　目标区 50 年超越概率 2%峰值加速度等值线图

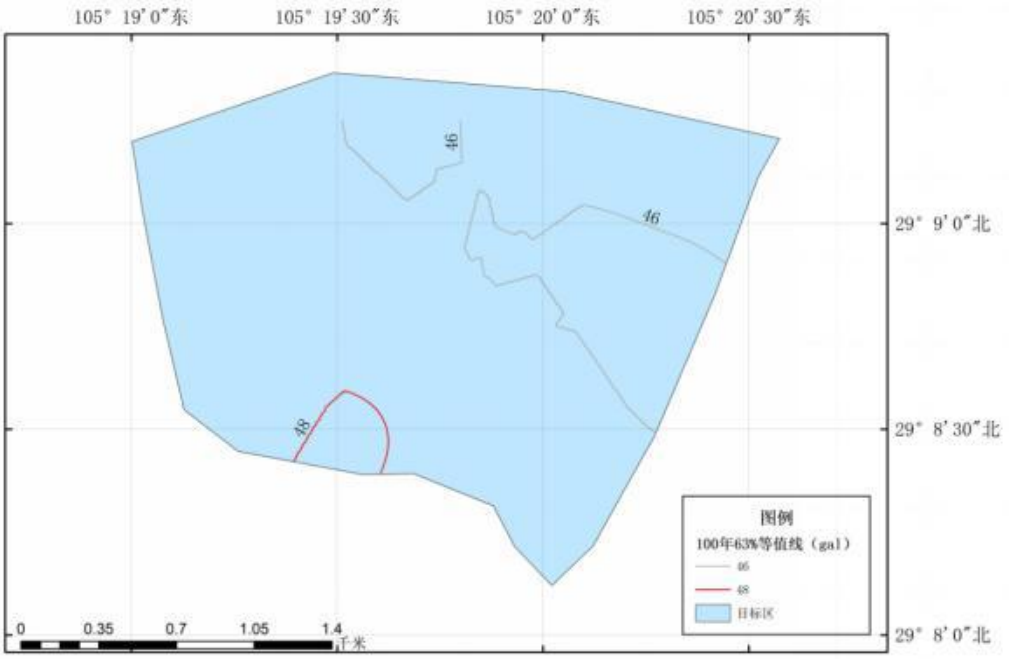


图 7.3-137　目标区 100 年超越概率 63%峰值加速度等值线图

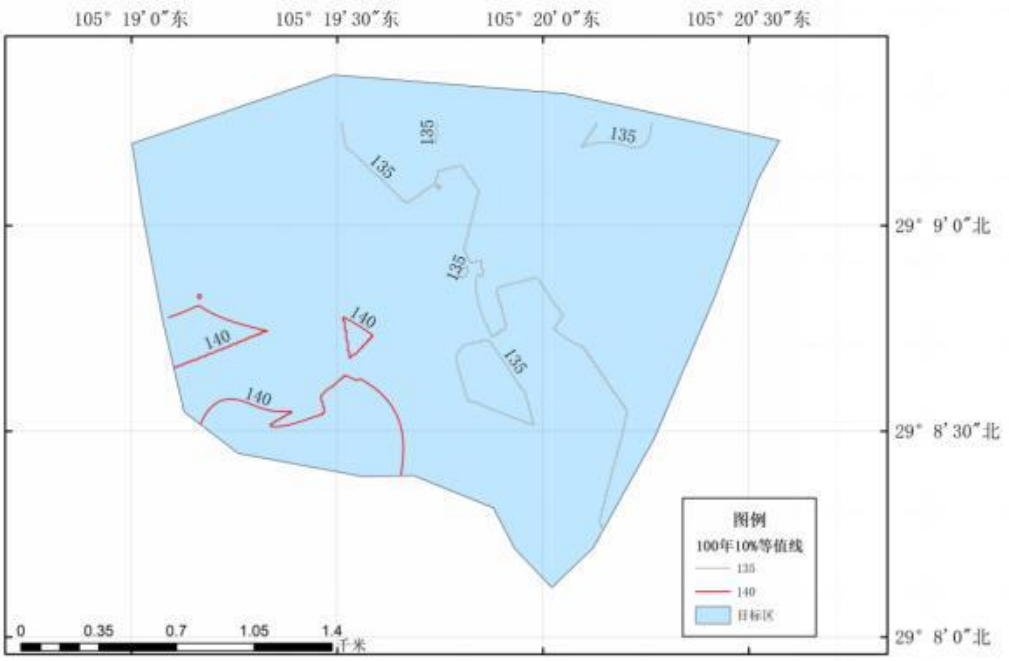


图 7.3-138　目标区 100 年超越概率 10%峰值加速度等值线图

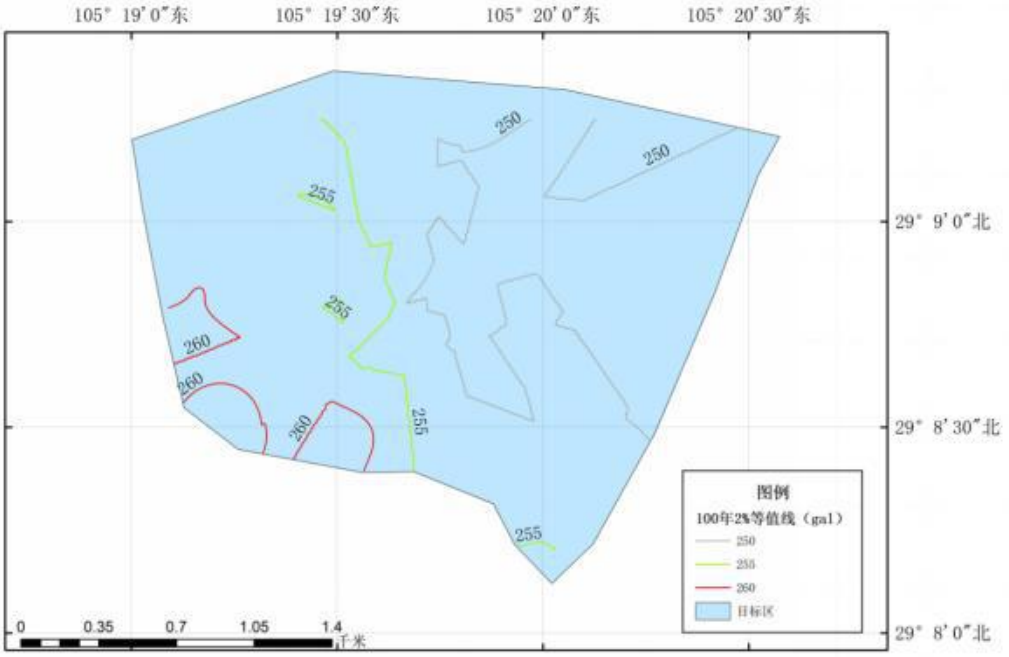


图 7.3-139　目标区 100 年超越概率 2%峰值加速度等值线图

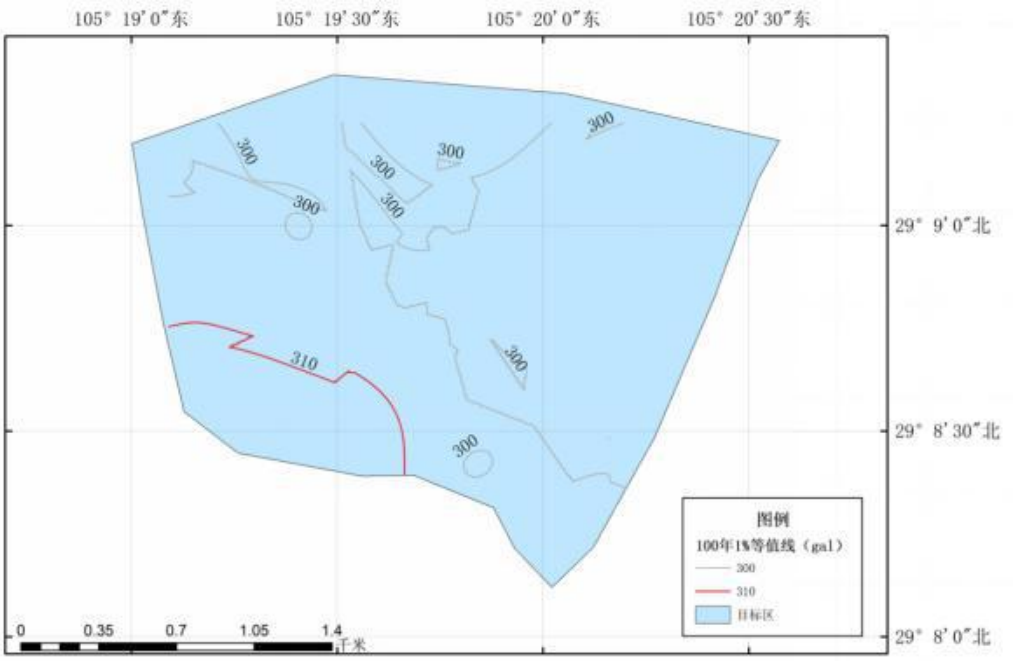


图 7.3-140　目标区 100 年超越概率 1%峰值加速度等值线图

7.4 各控制点设计地震动时程

为满足目标区抗震设计中采用时程法进行验算的需要，本报告以表 7.3-20 的水平向场地相关设计反应谱参数作为目标谱参数，强度包络函数公式采用霍俊荣公式：

$$Log_{10}t_1 = -1.065 + 1.084Log_{10}(R + 10) \quad (7.4\text{-}1)$$

$$Log_{10}T_s = -2.281 + 0.3324M + 0.6311Log_{10}(R + 10) \quad (7.4\text{-}5)$$

$$Log_{10}c = 1.858 - 0.2796M + 0.5874Log_{10}(R + 10) \quad (7.4\text{-}3)$$

根据地震危险性分析结果，综合考虑场址周围潜在震源区的分布及对场址的贡献由此得到II类场地地面强度包络函数 f(t)的参数为表 7.4.1，根据《工程场地地震安全性评价》(GB17741-2005)和区评工作大纲的要求，合成每个场地抗震设计所需的人工合成地震动时程。对于不同超越概率的工况各合成 5 条不同随机相位的时程，以供设计验算使用，同一超越概率的人工时程相关性均小于 0.16。合成地震动的采样间隔为 0.02 秒。

表 7.4-1　地面加速度时程合成参数

参数 Y	工程场 地	50 年 63%	50 年 10%	50 年 2%	100 年 63%	100 年 10%	100 年 2%	100 年 1%
t_1	基岩	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0
T_2	基岩	16	18	25	18	25	27	30
c	基岩	0.11	0.09	0.08	0.10	0.09	0.07	0.07

鉴于篇幅和实用性考虑，绘制了 ZK1 各概率水准的合成地震动时程（图 7.4-1～图 7.4-35），其他控制孔位的人工时程以数据文件的形式提供。

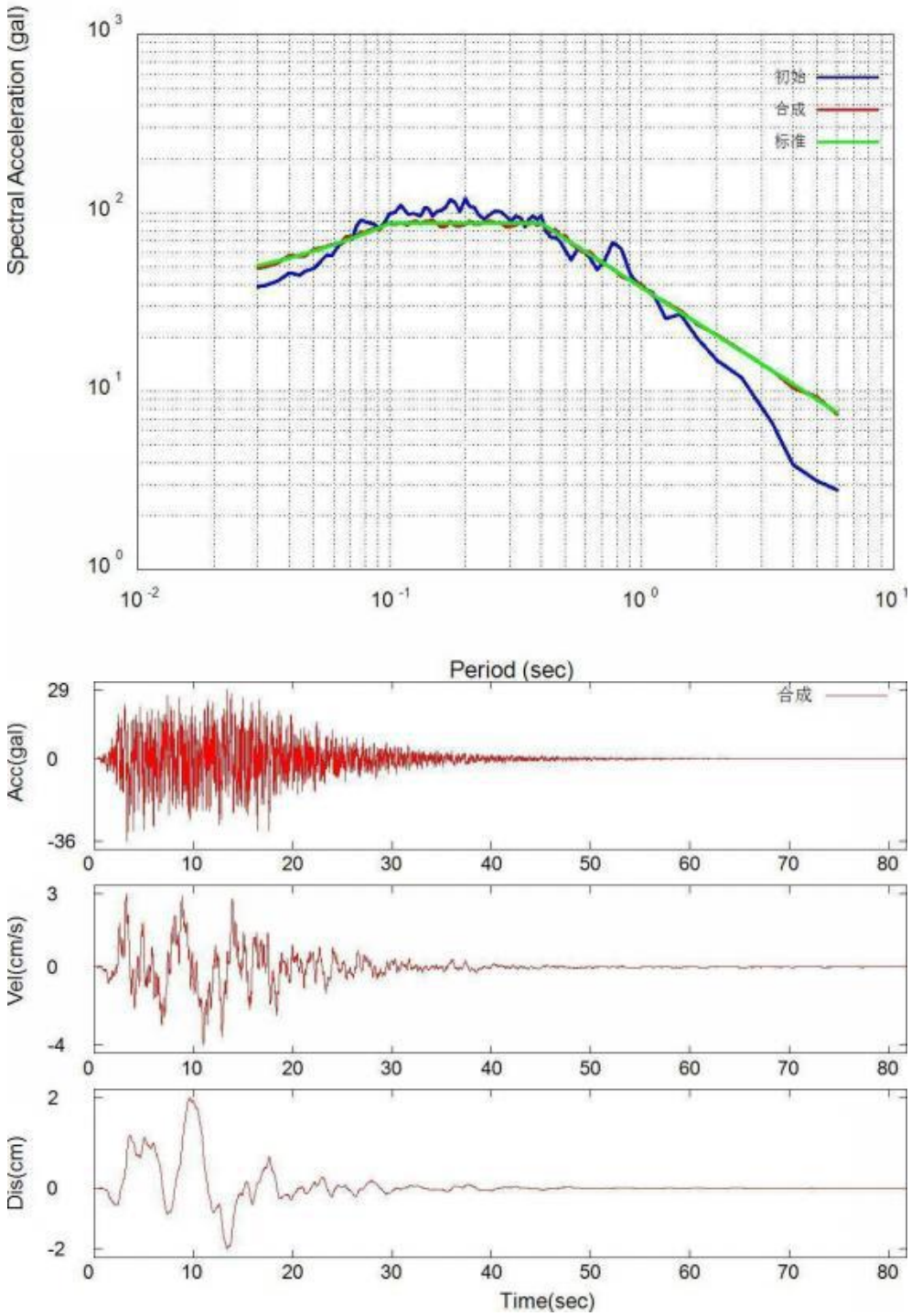


图 7.4-1　ZK1 控制孔 50 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

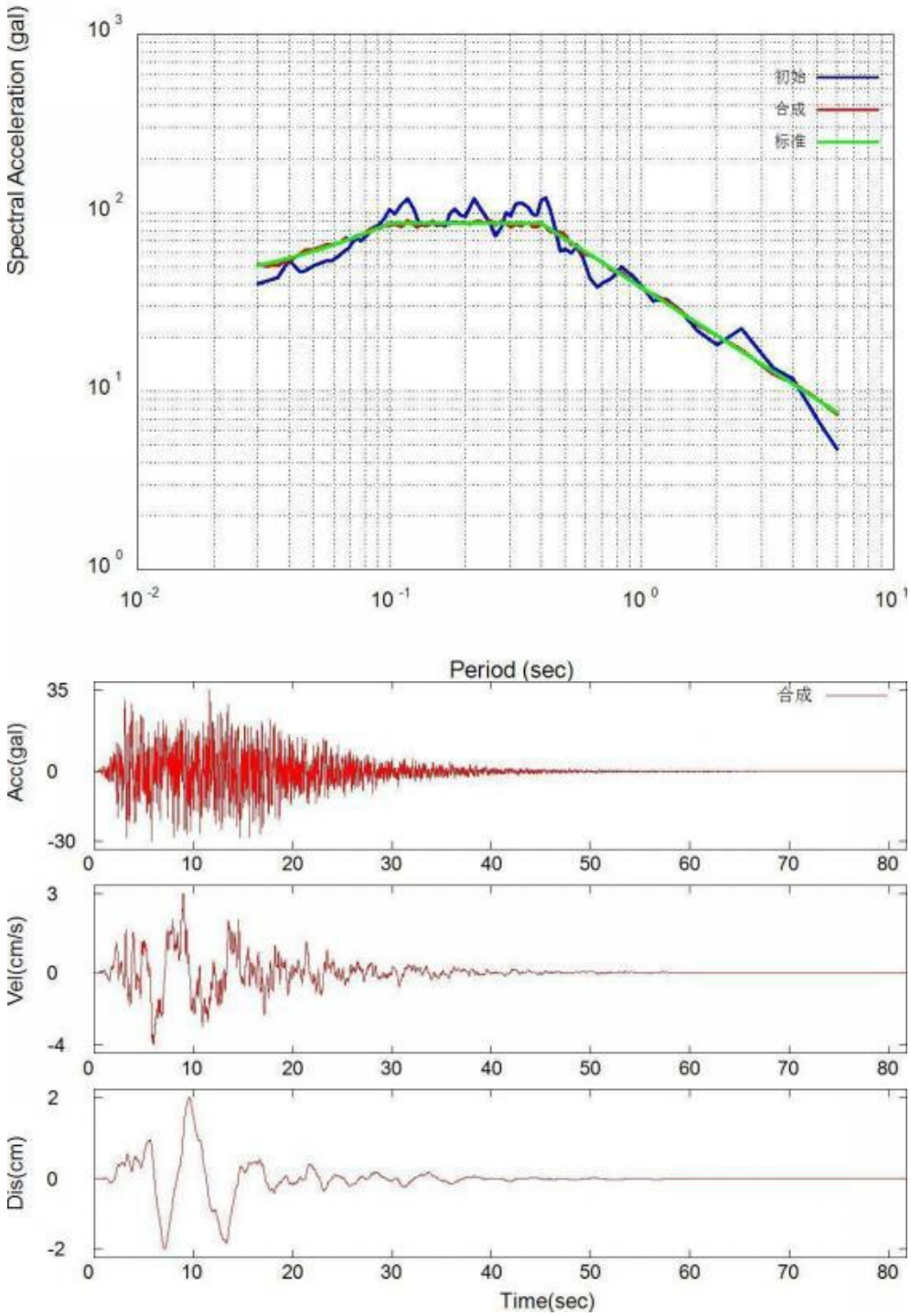


图 7.4-2　ZK1 控制孔 50 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

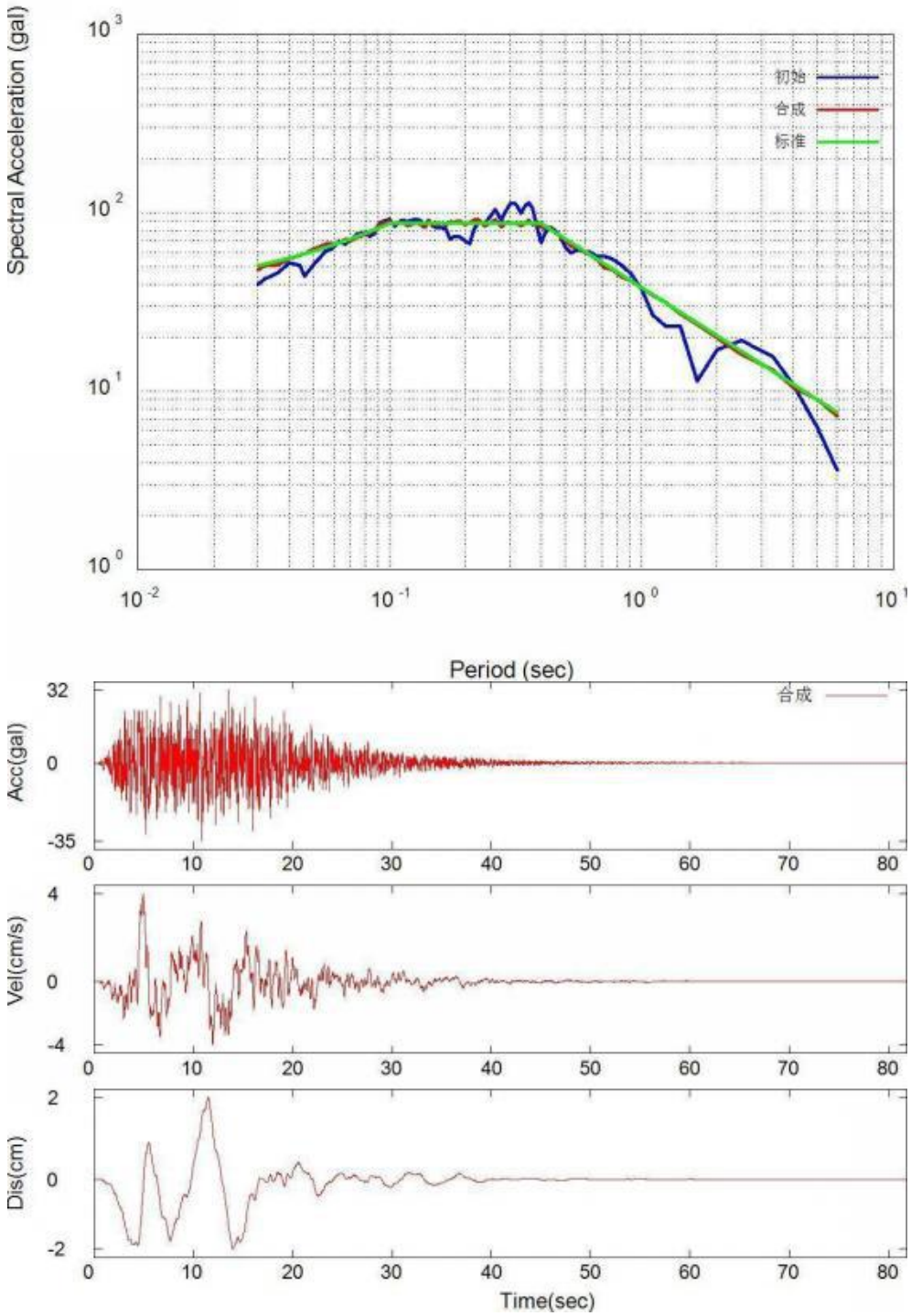


图 7.4-3　ZK1 控制孔 50 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

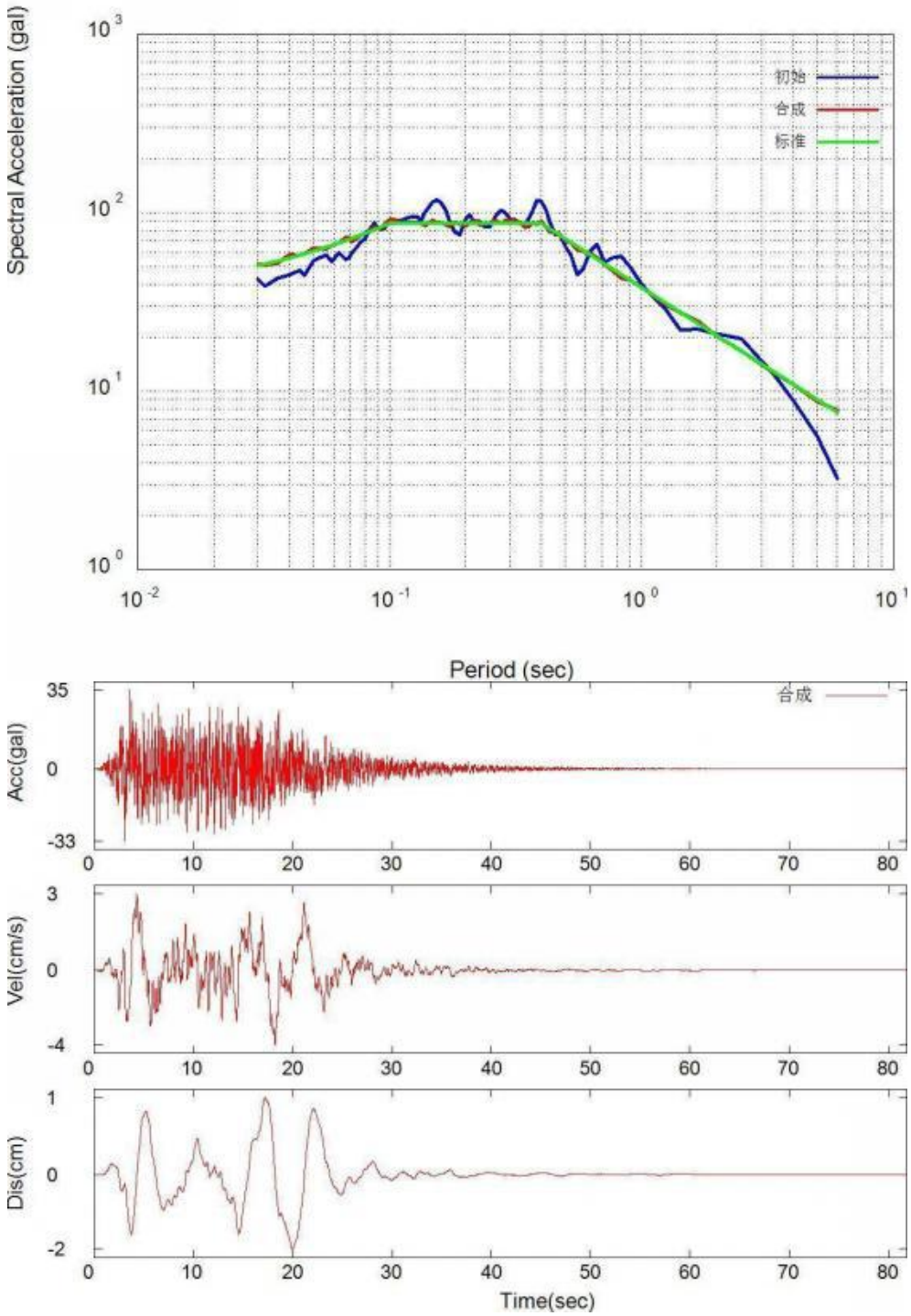


图 7.4-4　ZK1 控制孔 50 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

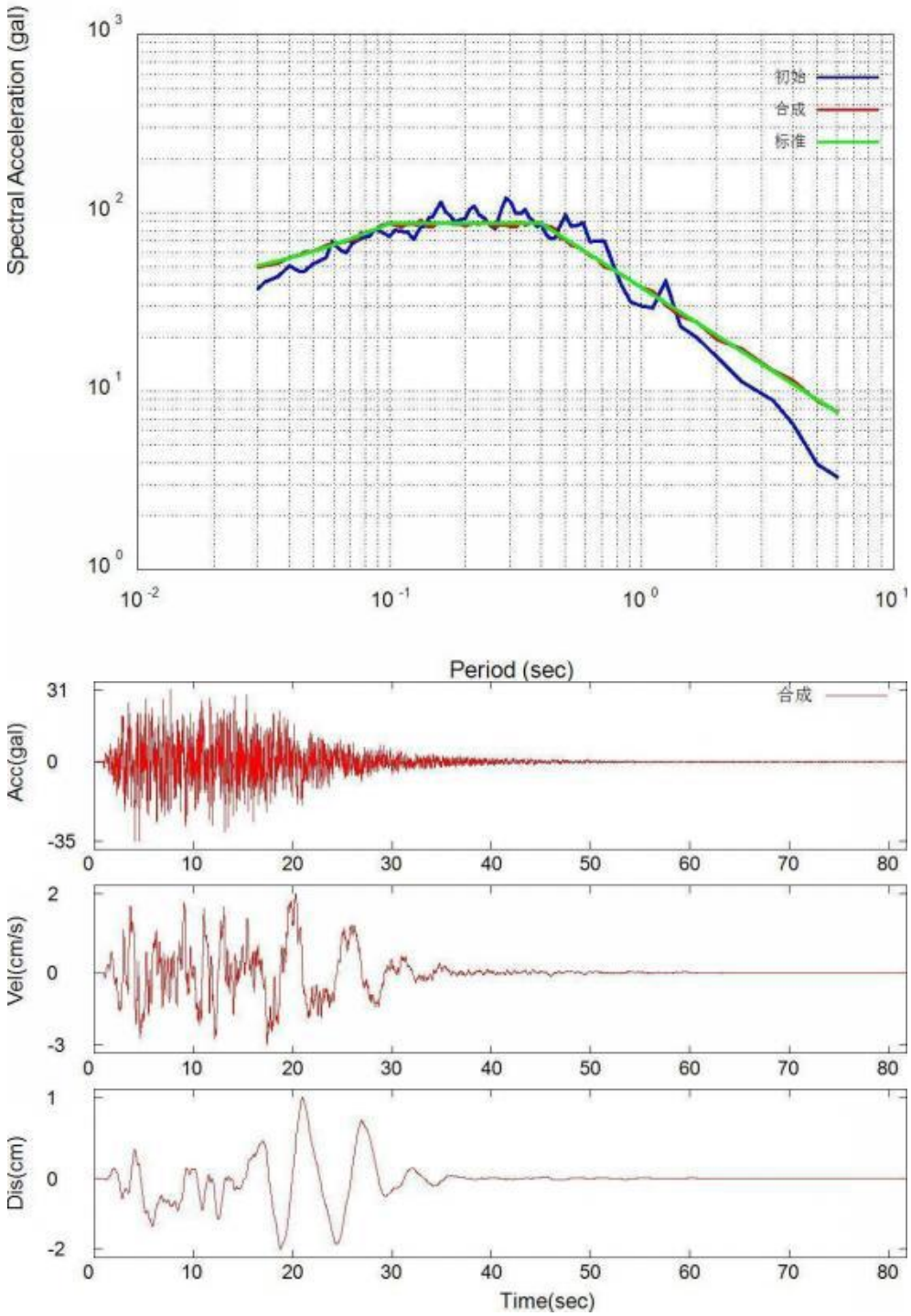


图 7.4-5　ZK1 控制孔 50 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

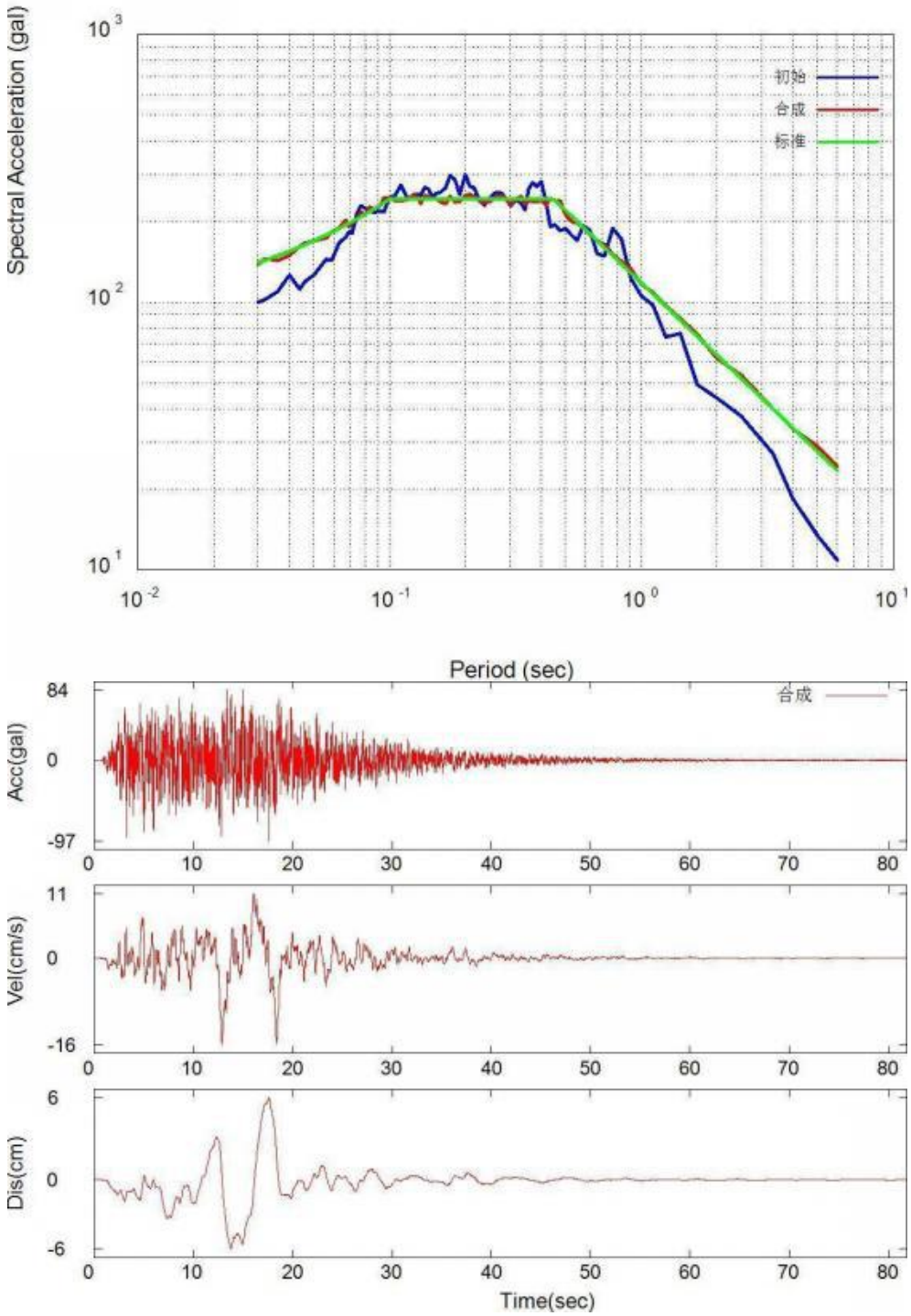


图 7.4-6　ZK1 控制孔 50 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

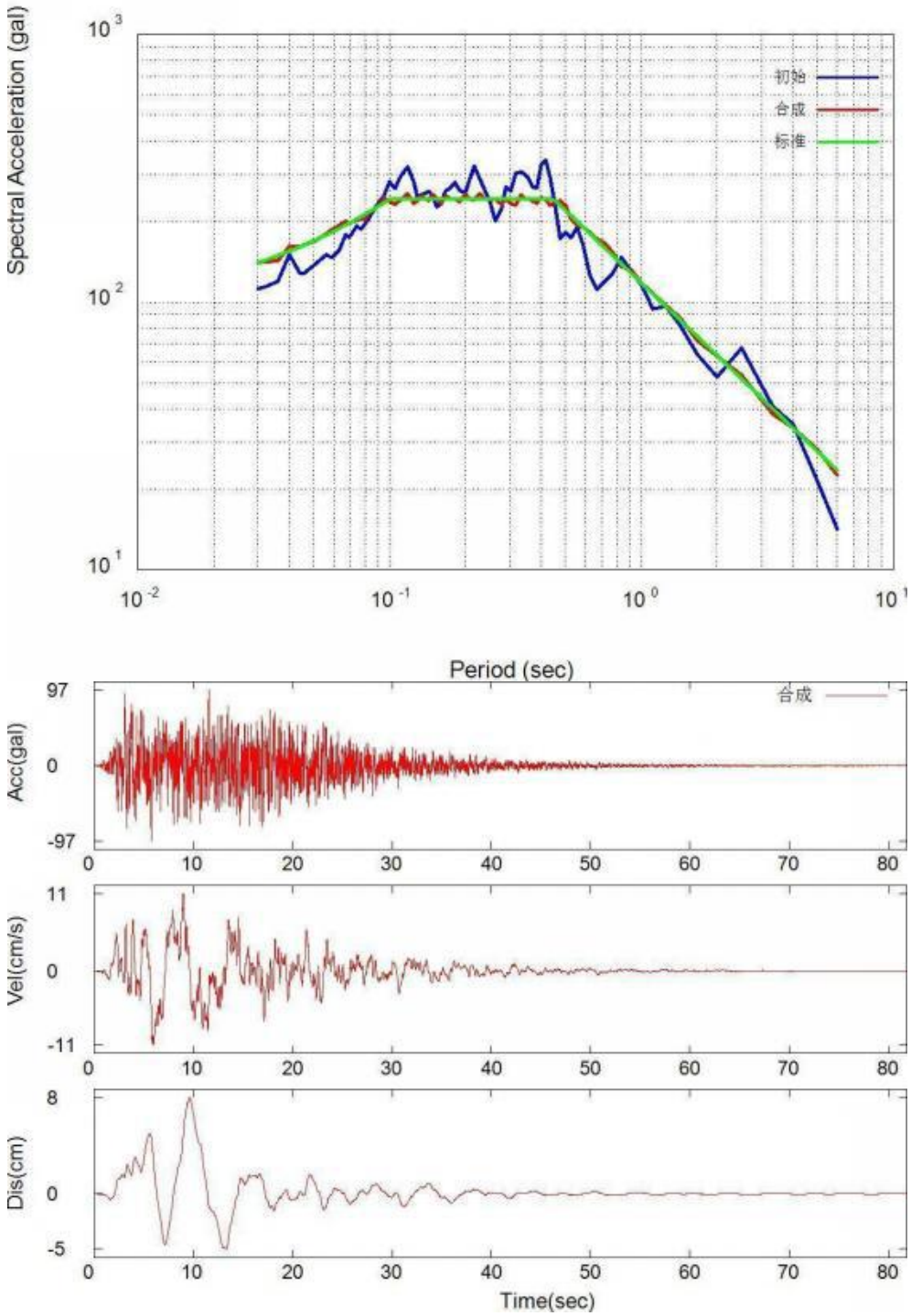


图 7.4-7　ZK1 控制孔 50 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

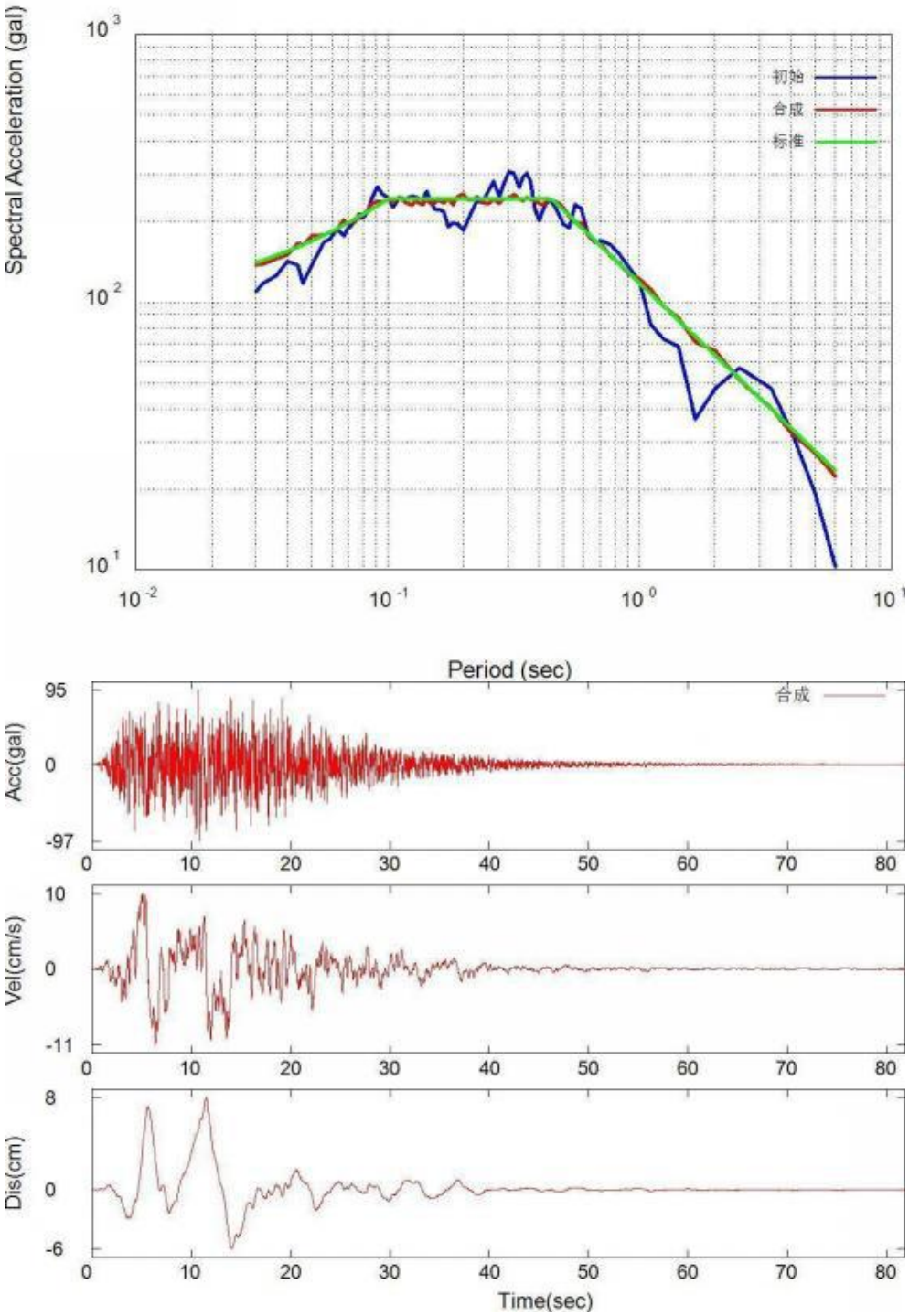


图 7.4-8　ZK1 控制孔 50 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

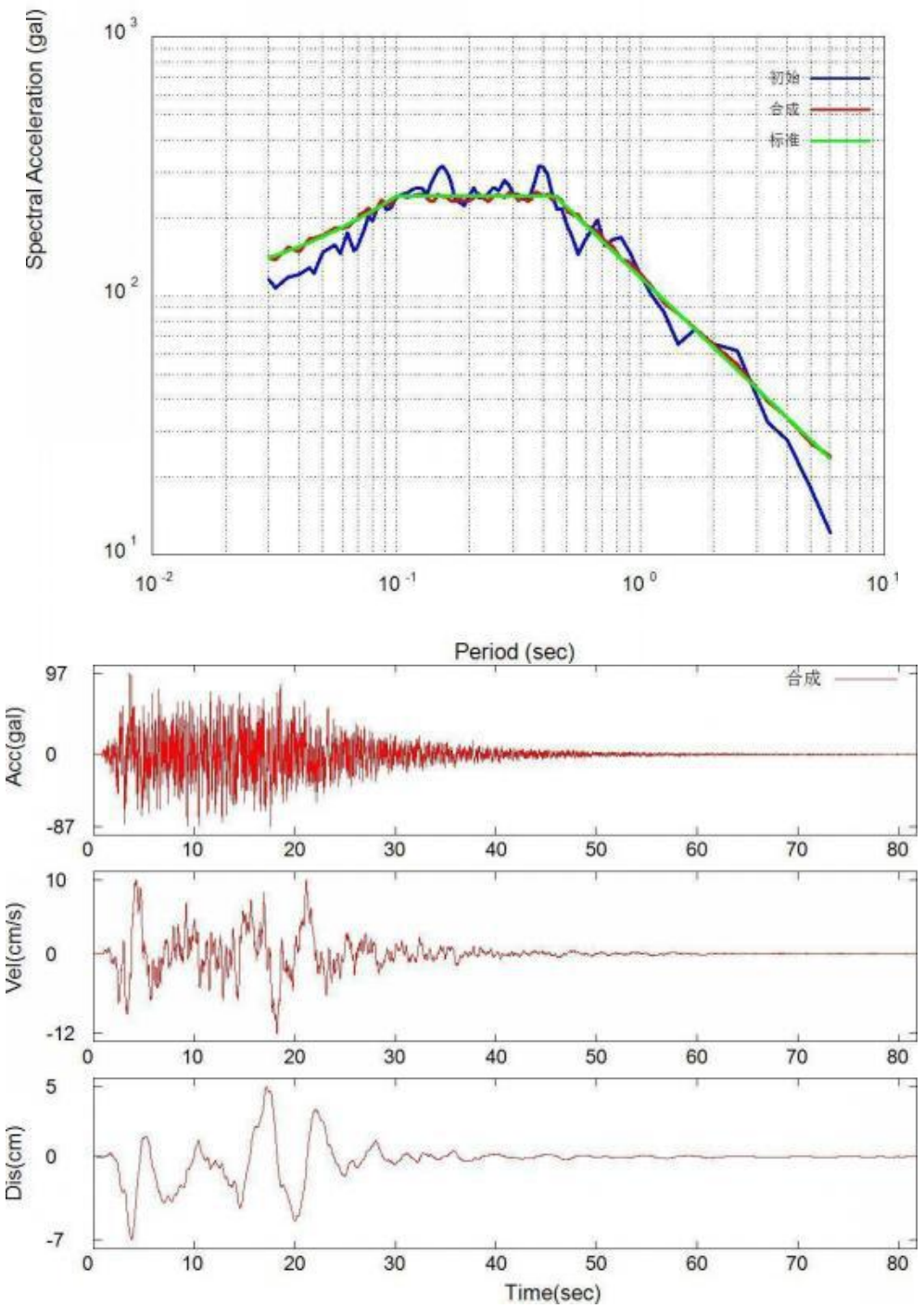


图 7.4-9　ZK1 控制孔 50 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

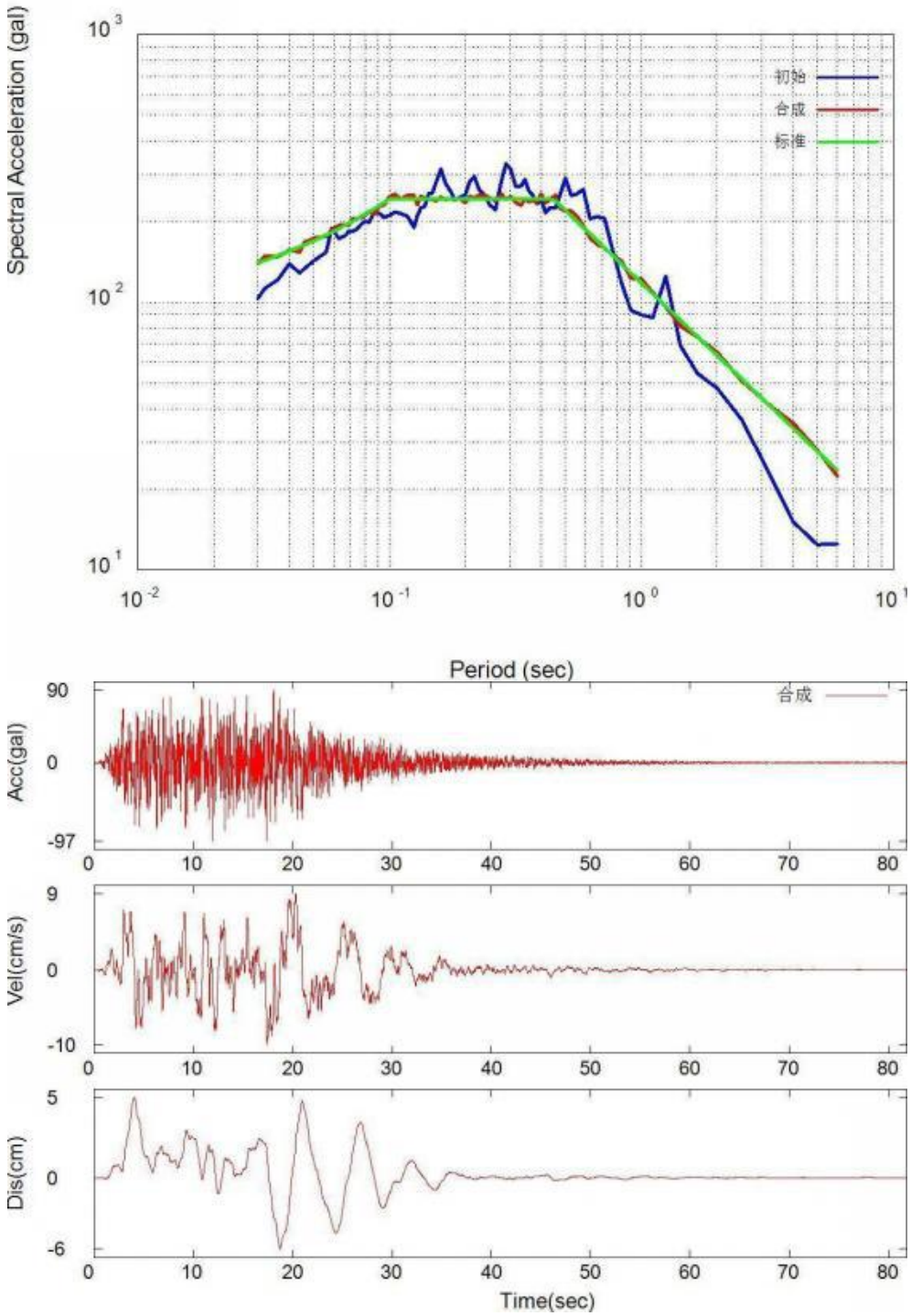


图 7.4-10　ZK1 控制孔 50 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

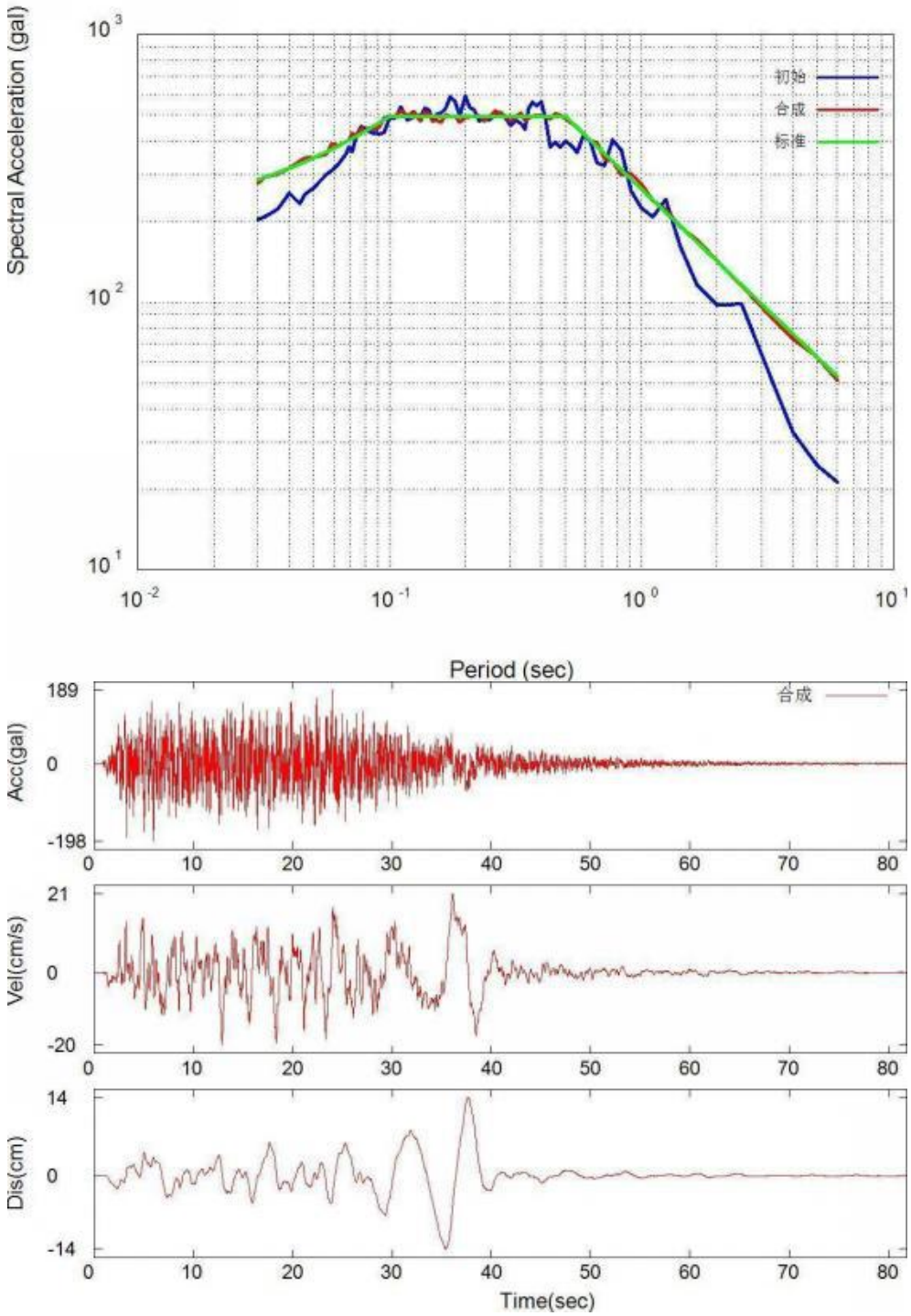


图 7.4-11　ZK1 控制孔 50 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

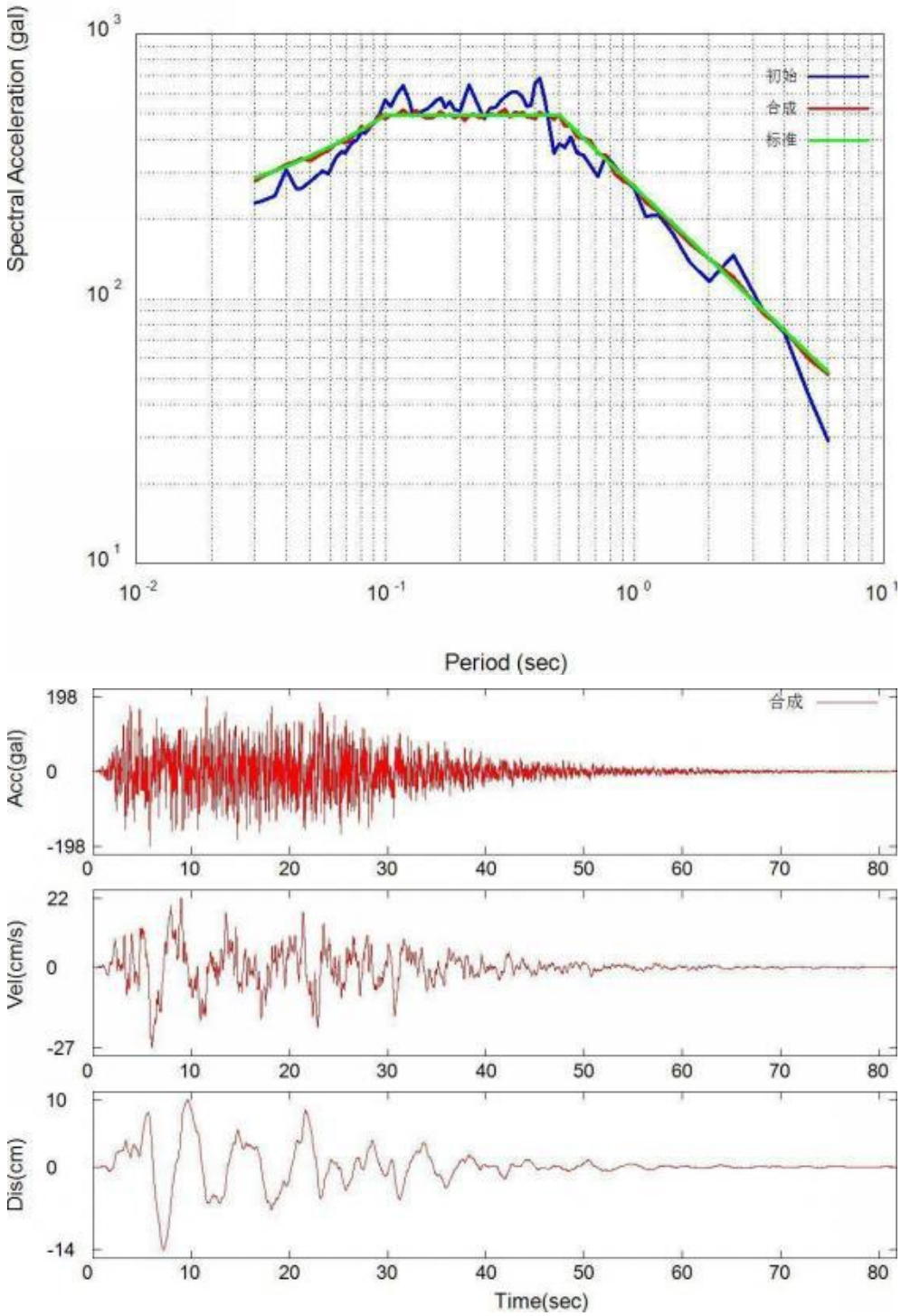


图 7.4-12　ZK1 控制孔 50 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

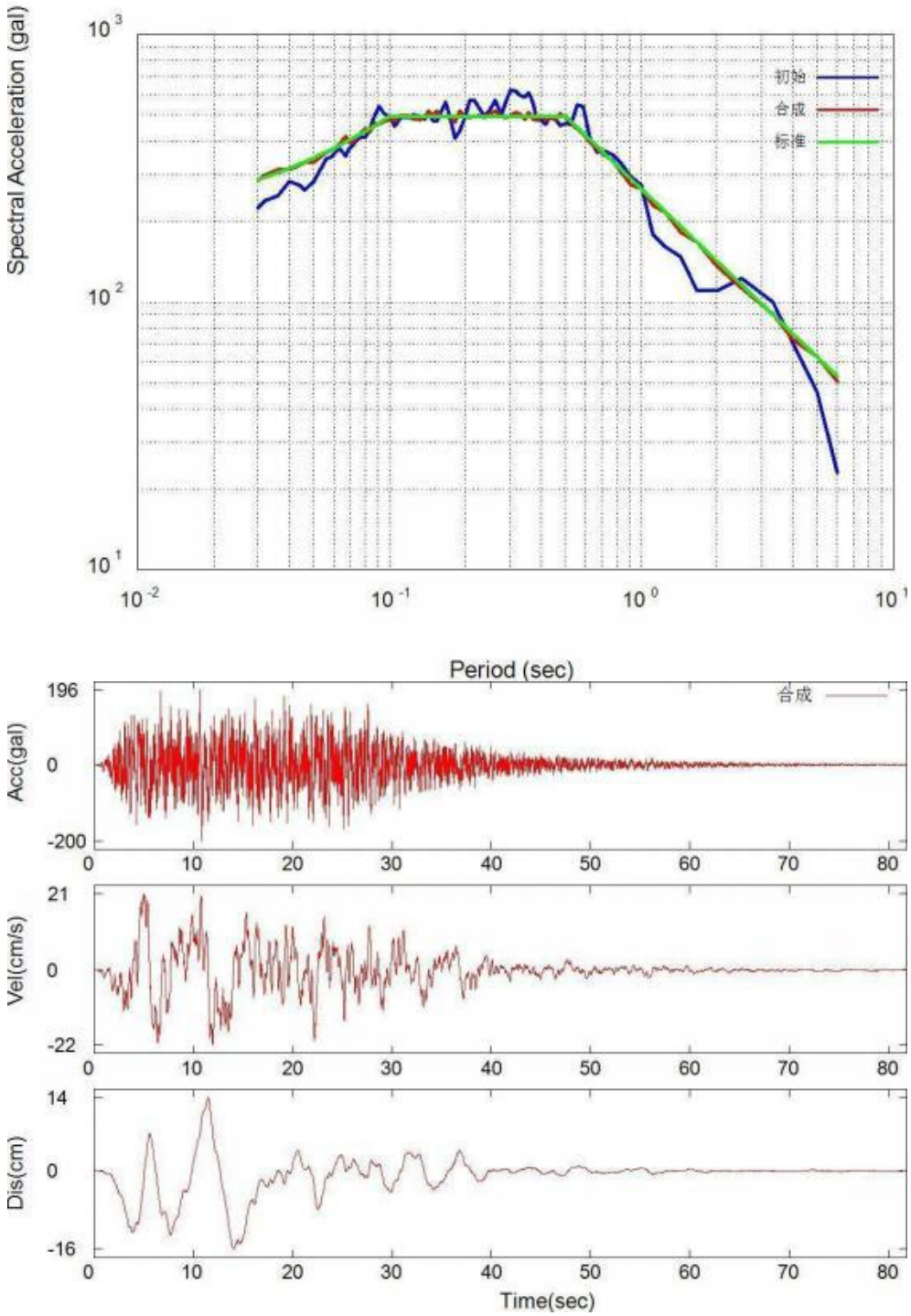


图 7.4-13 ZK1 控制孔 50 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

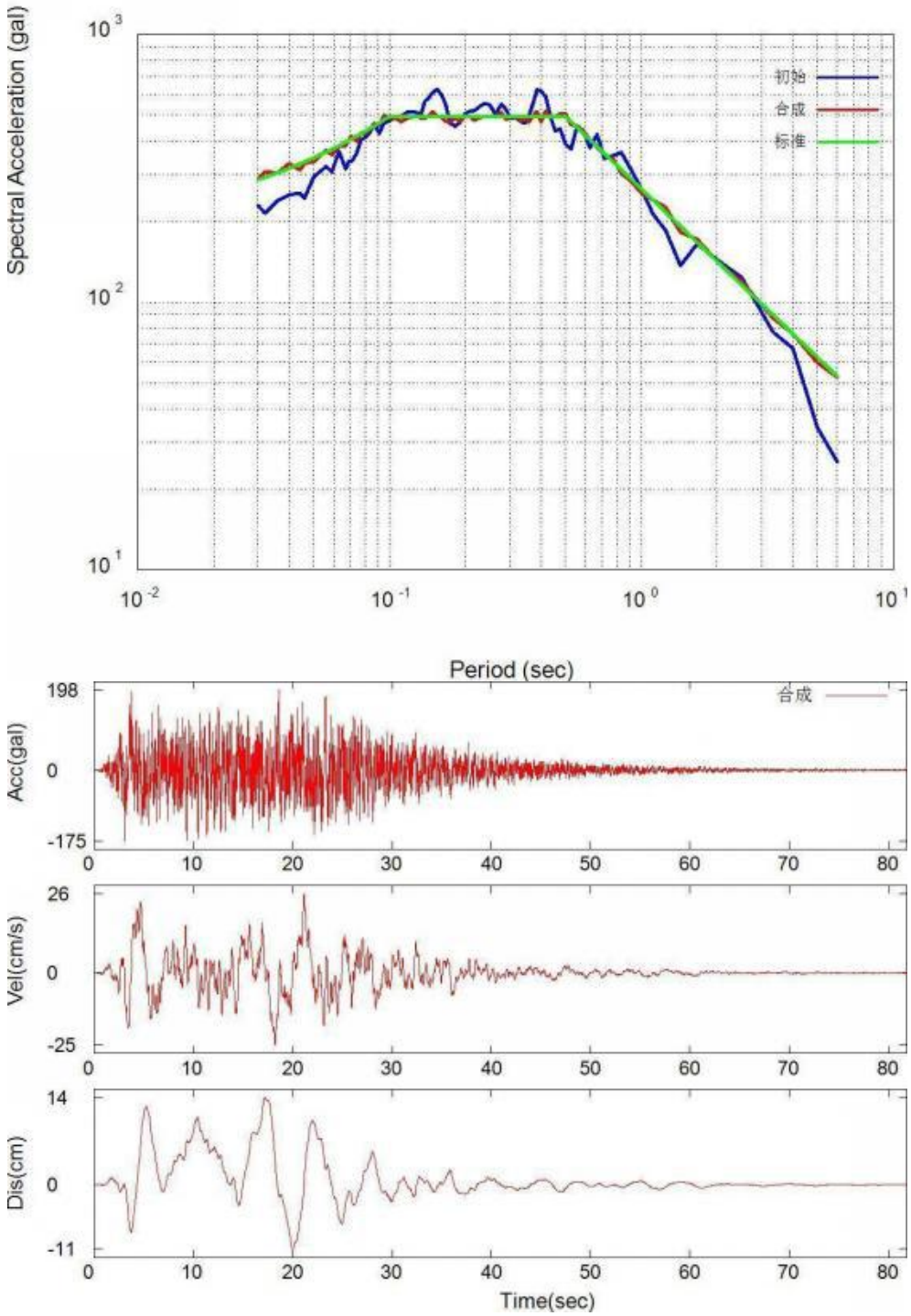


图 7.4-14 ZK1 控制孔 50 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

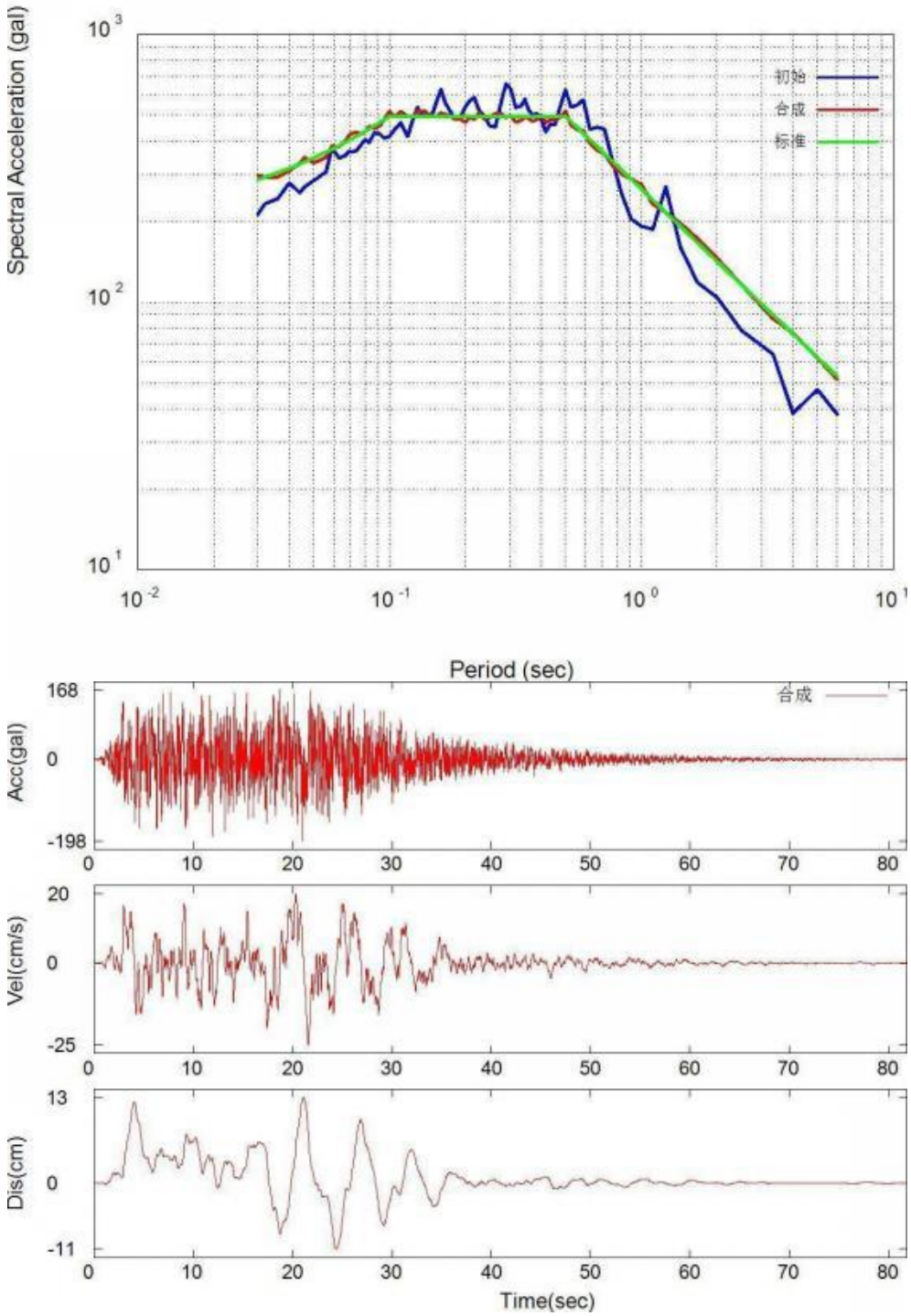


图 7.4-15　ZK1 控制孔 50 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

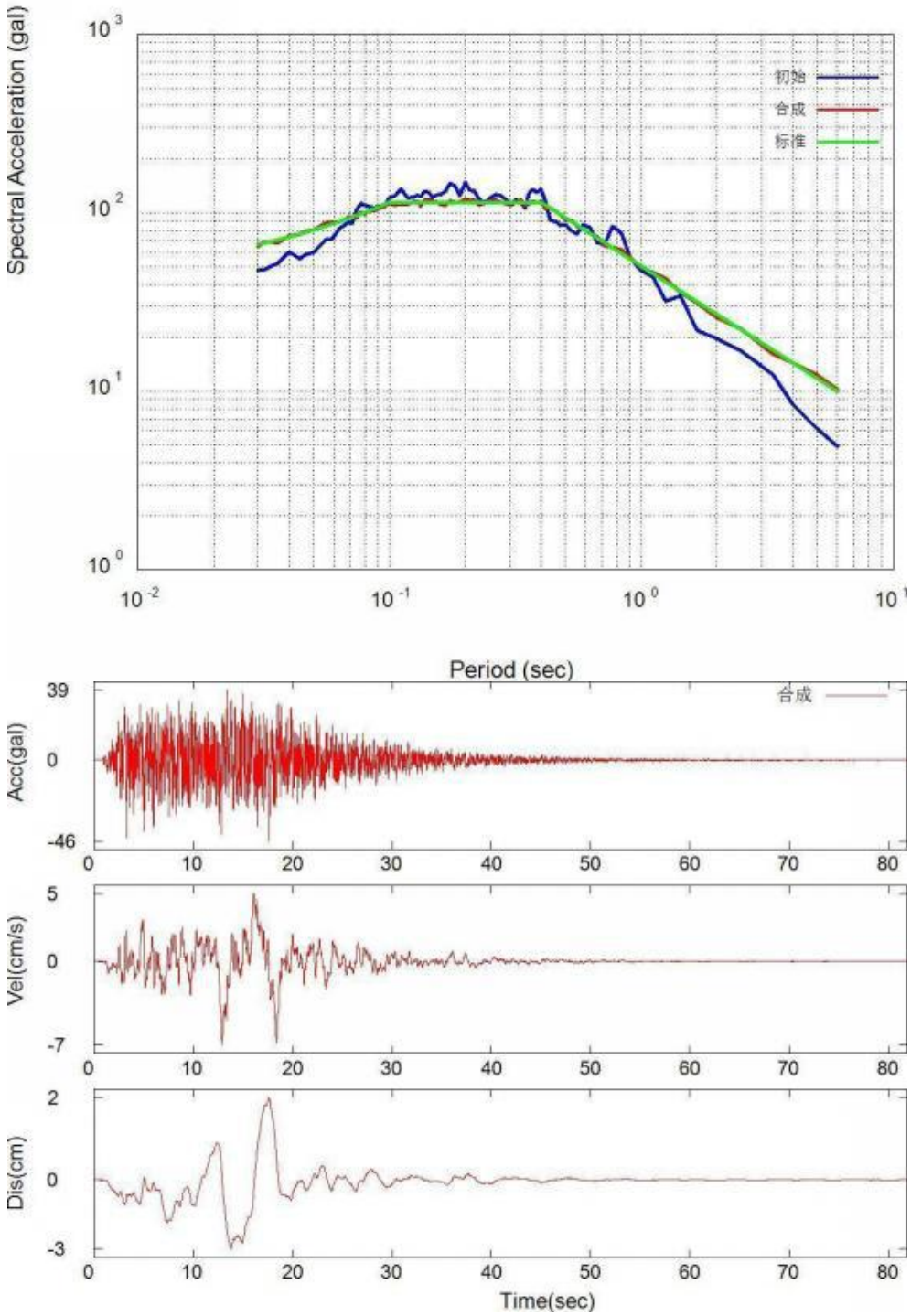


图 7.4-16　ZK1 控制孔 100 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

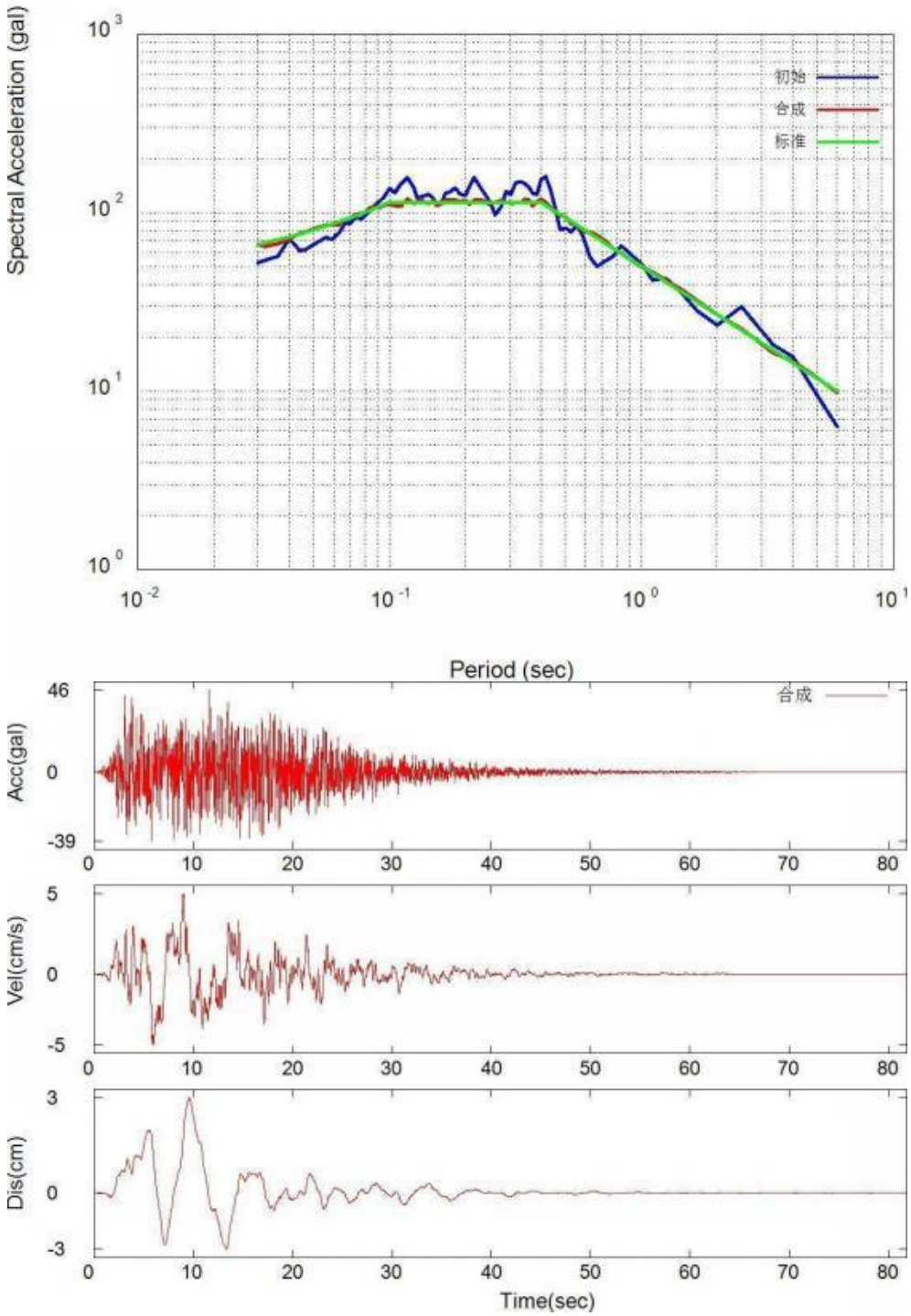


图 7.4-17　ZK1 控制孔 100 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

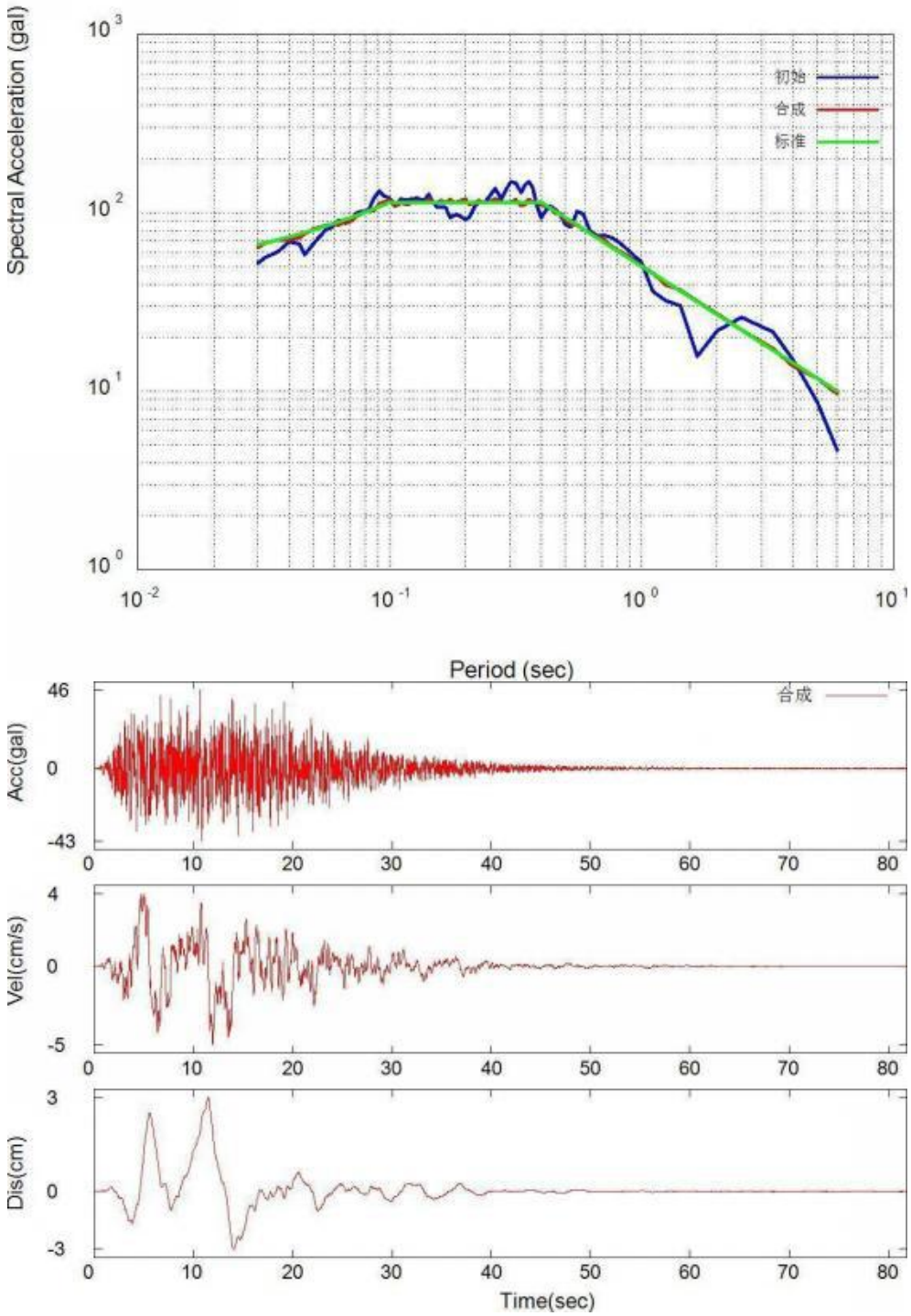


图 7.4-18　ZK1 控制孔 100 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

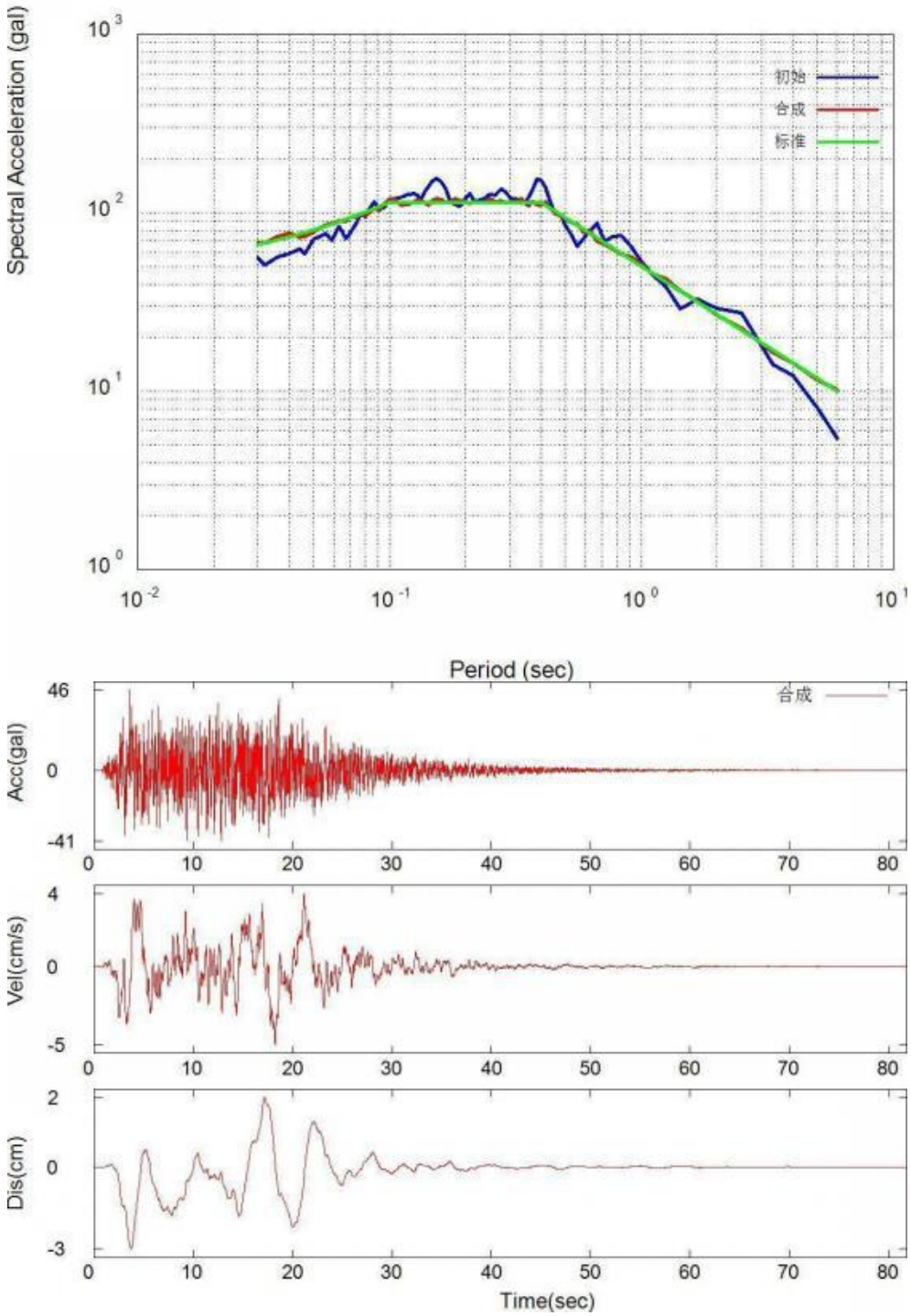


图 7.4-19　ZK1 控制孔 100 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

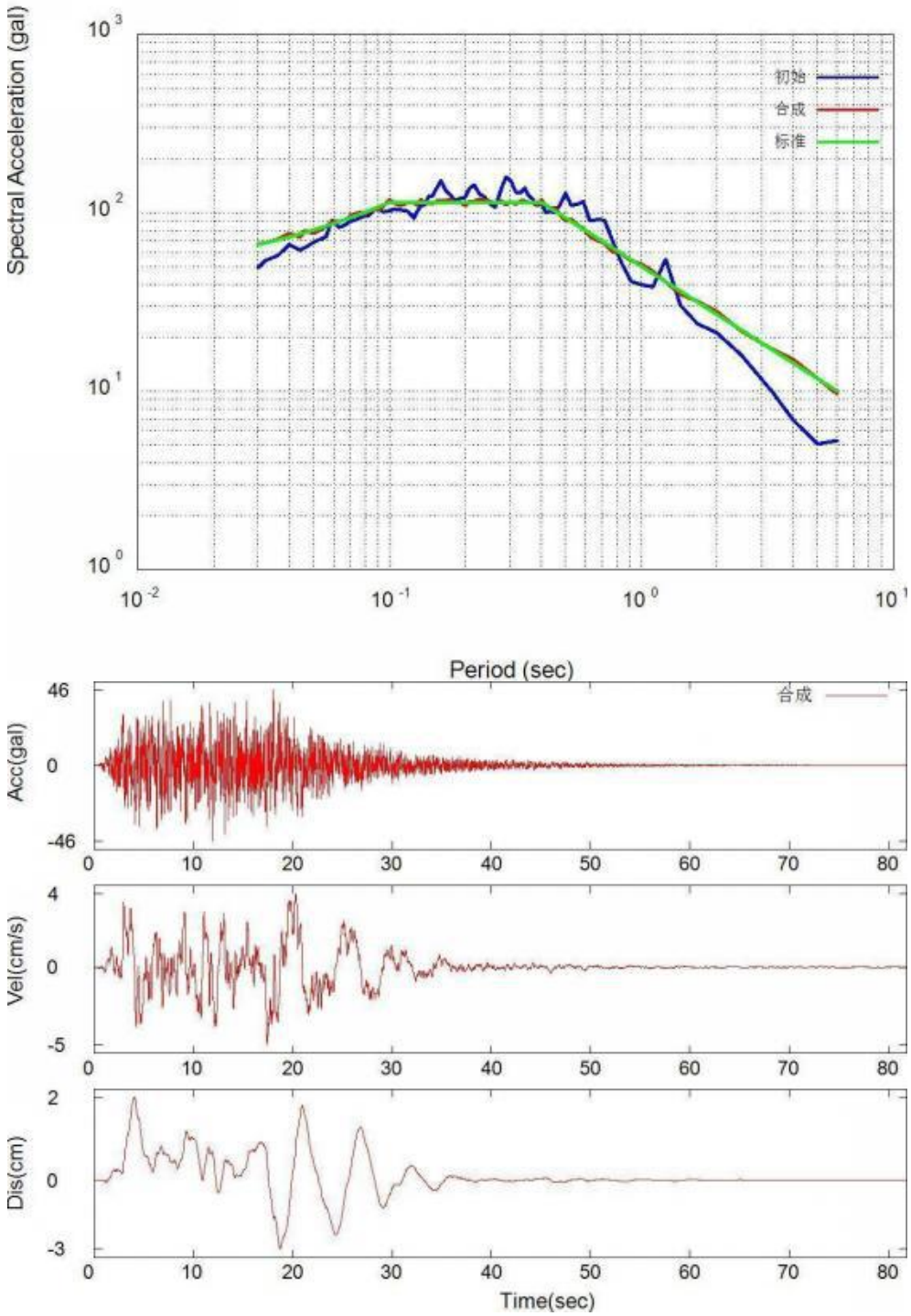


图 7.4-20　ZK1 控制孔 100 年 63%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

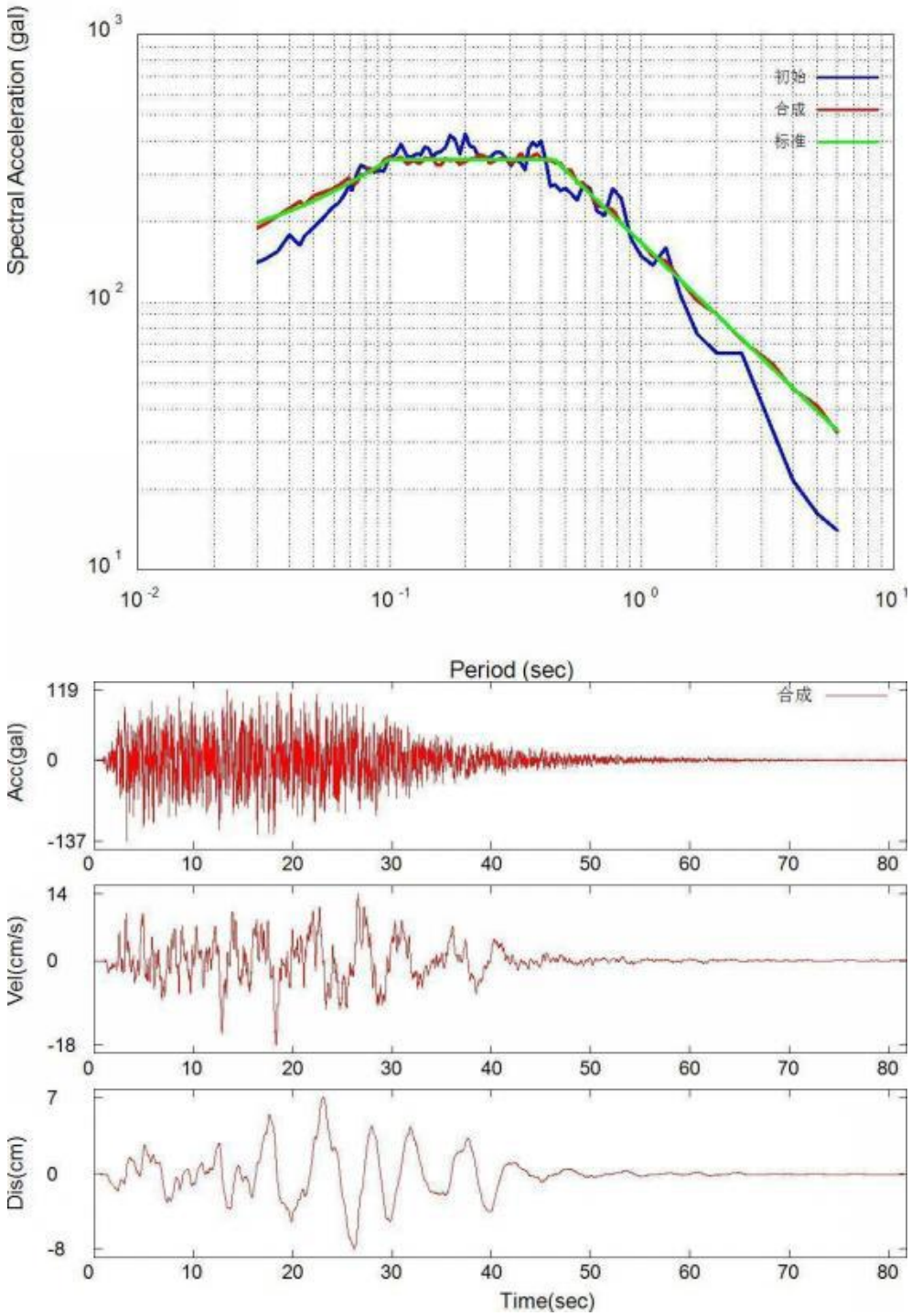


图 7.4-21　ZK1 控制孔 100 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

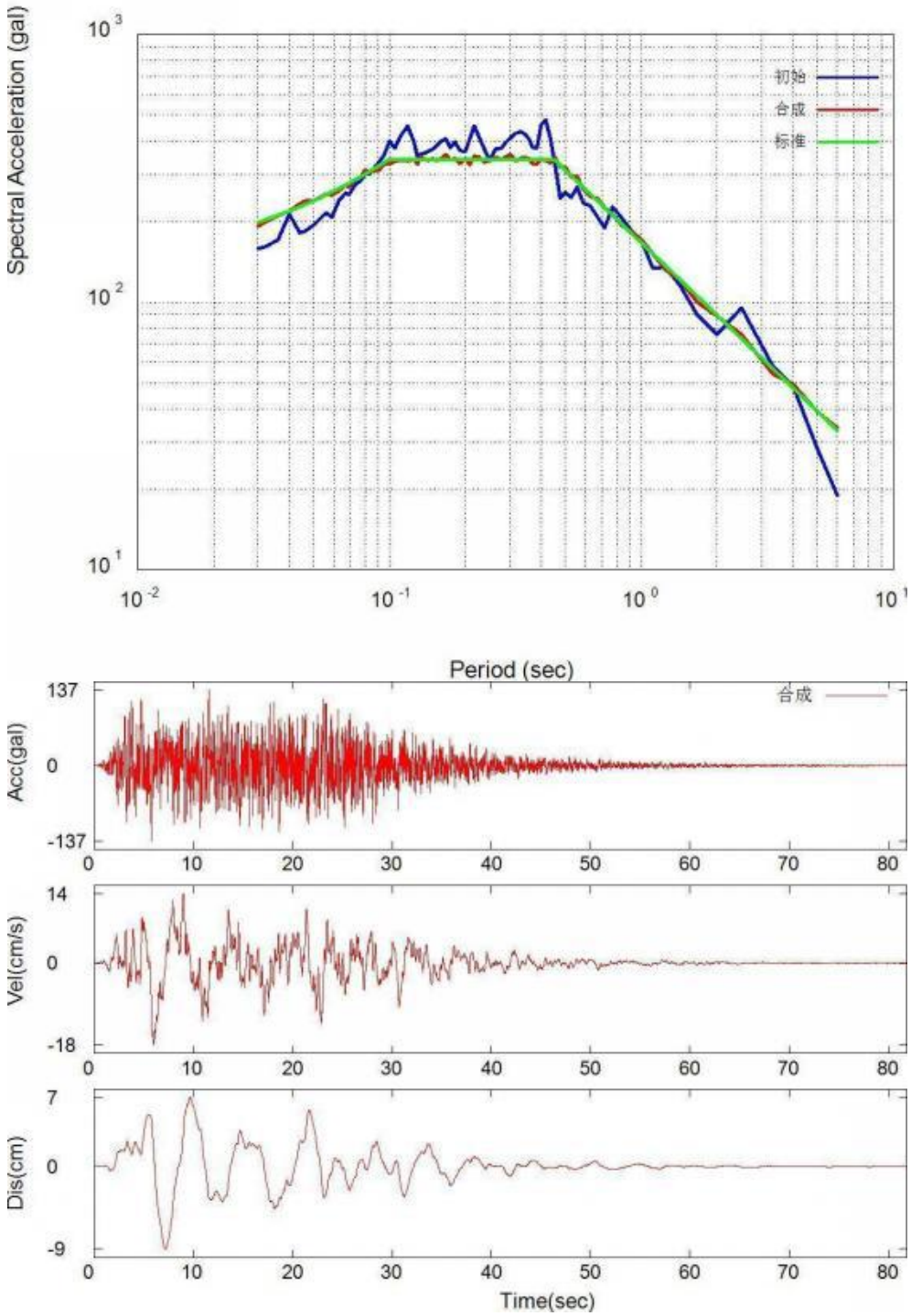


图 7.4-22　ZK1 控制孔 100 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

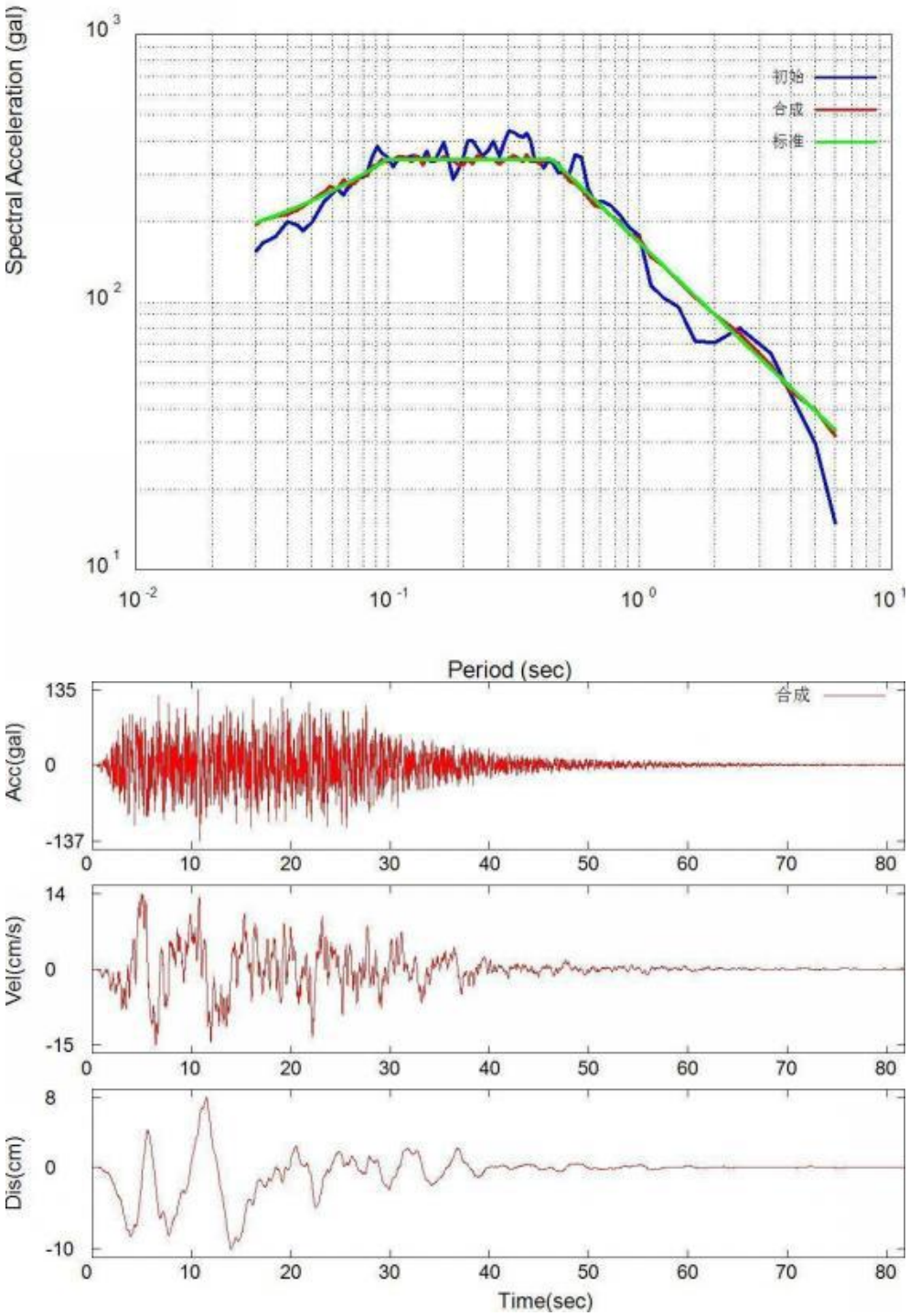


图 7.4-23　ZK1 控制孔 100 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

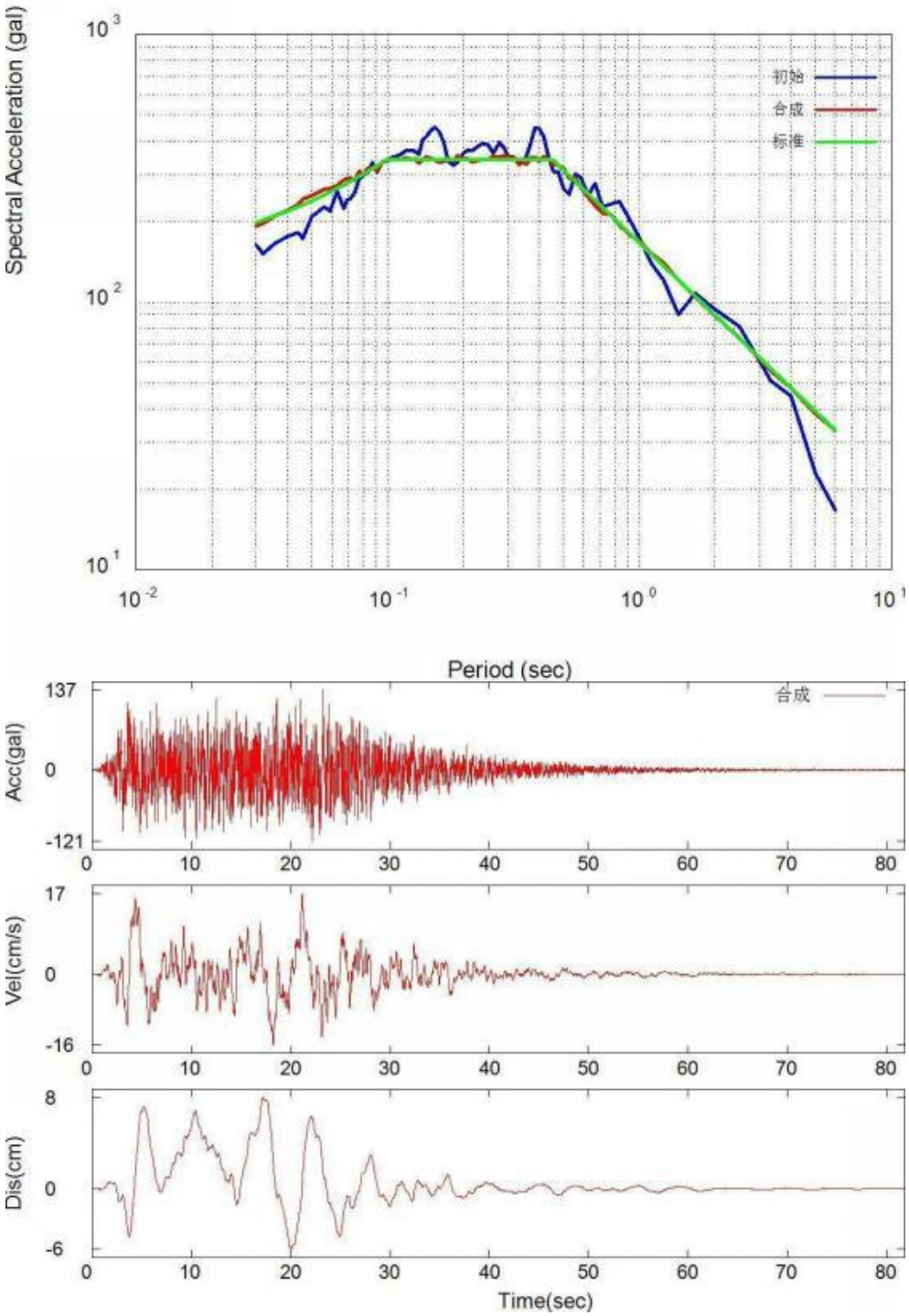


图 7.4-24　ZK1 控制孔 100 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

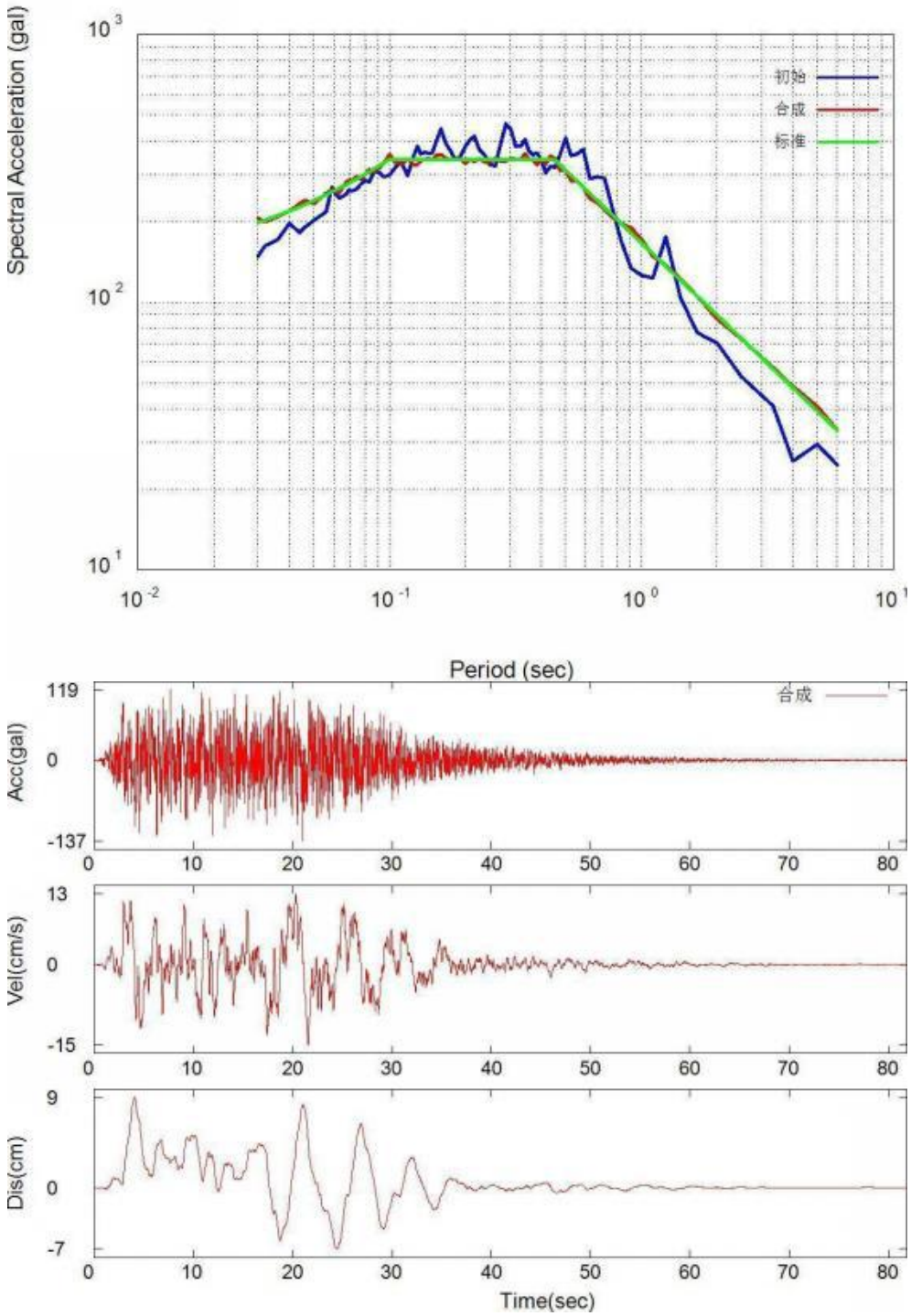


图 7.4-25　ZK1 控制孔 100 年 10%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

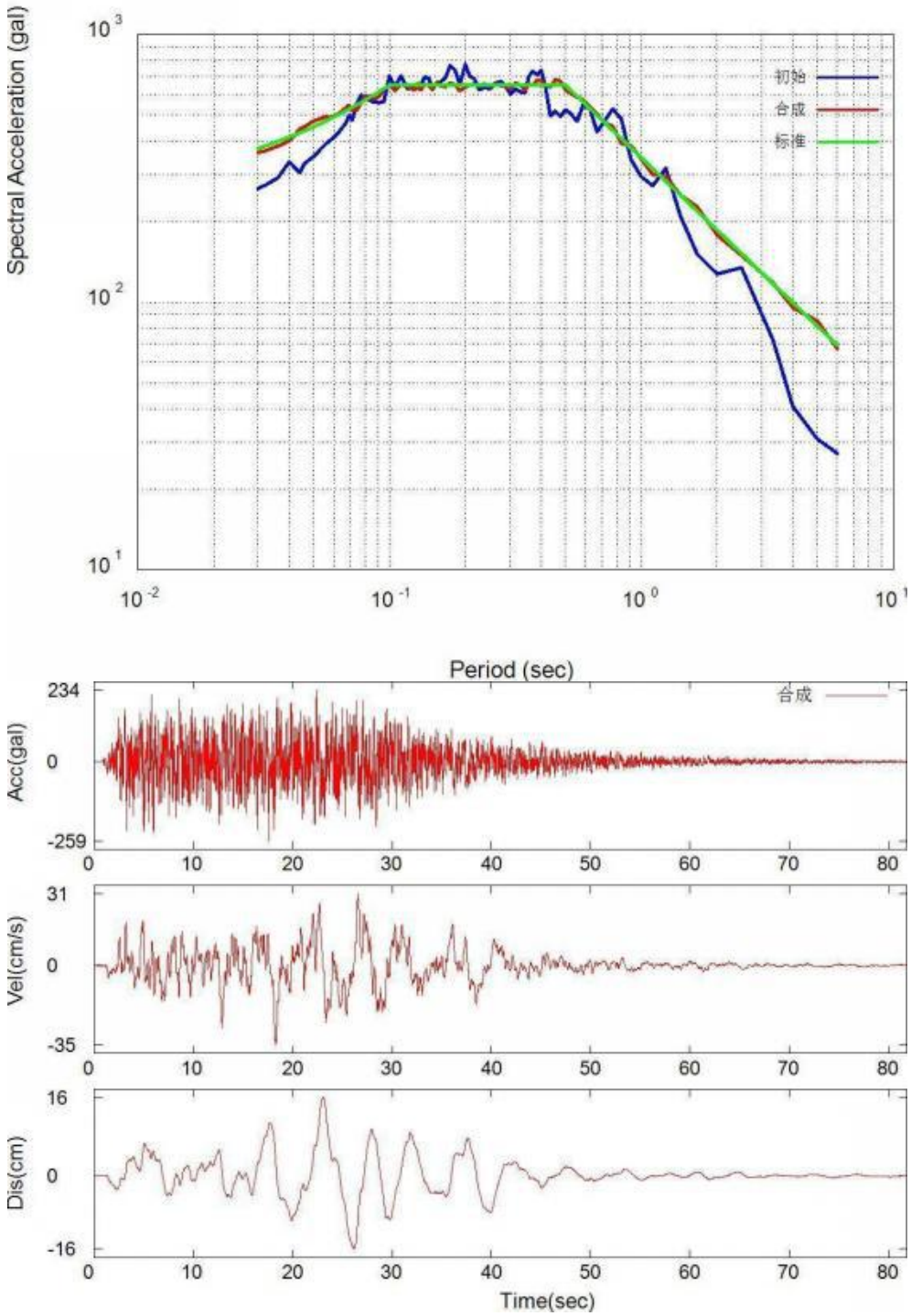


图 7.4-26　ZK1 控制孔 100 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

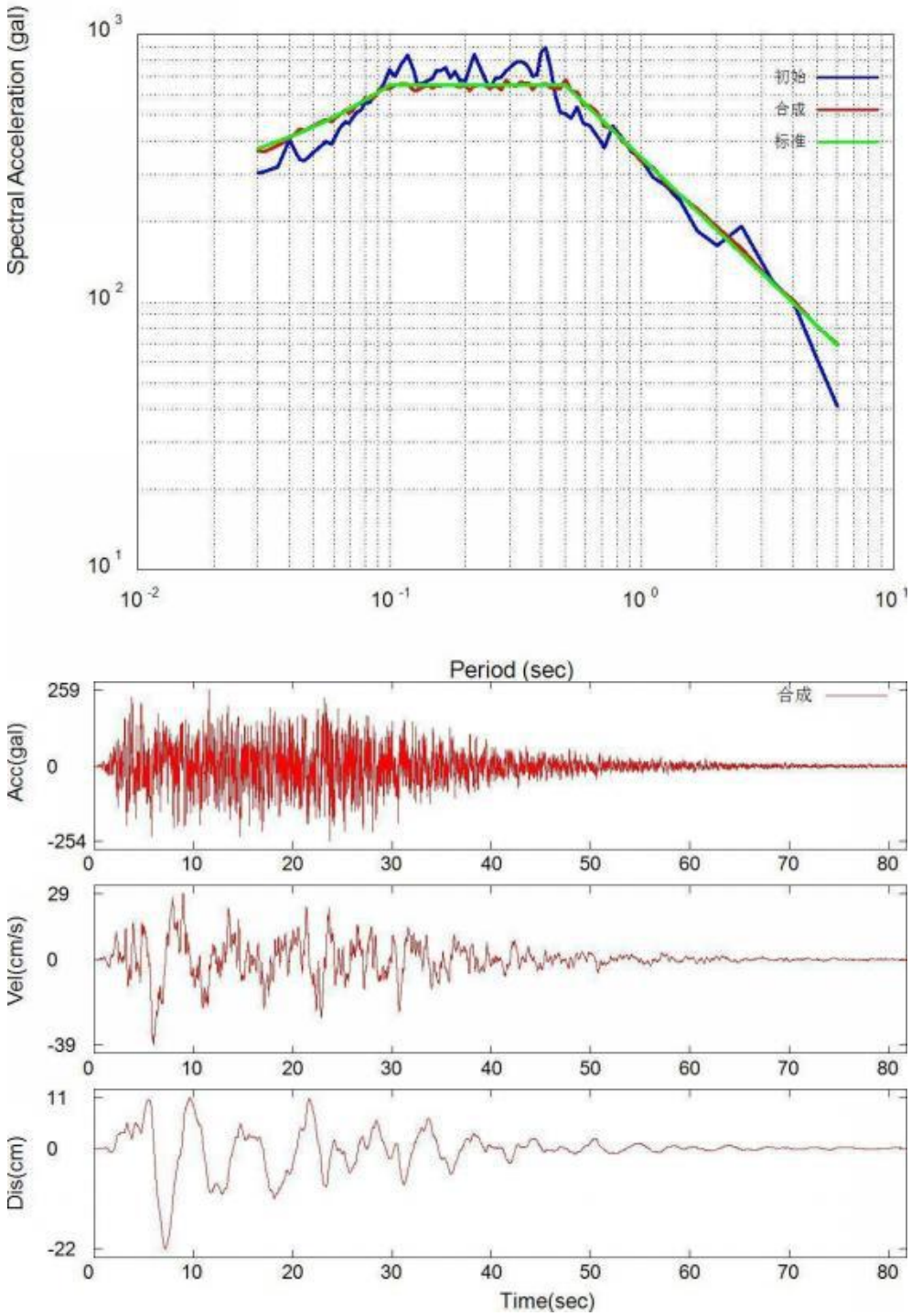


图 7.4-27　ZK1 控制孔 100 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

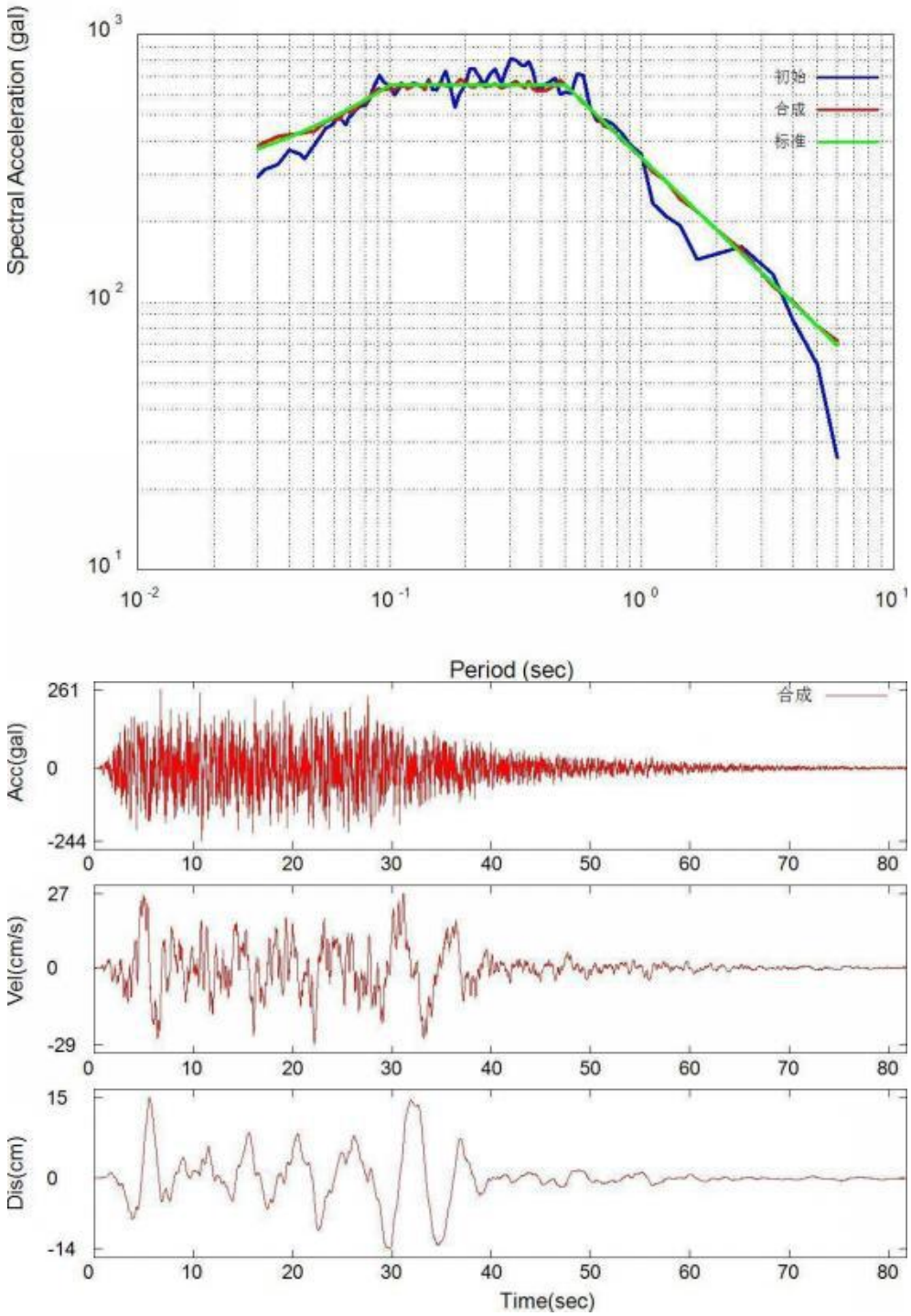


图 7.4-28　ZK1 控制孔 100 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

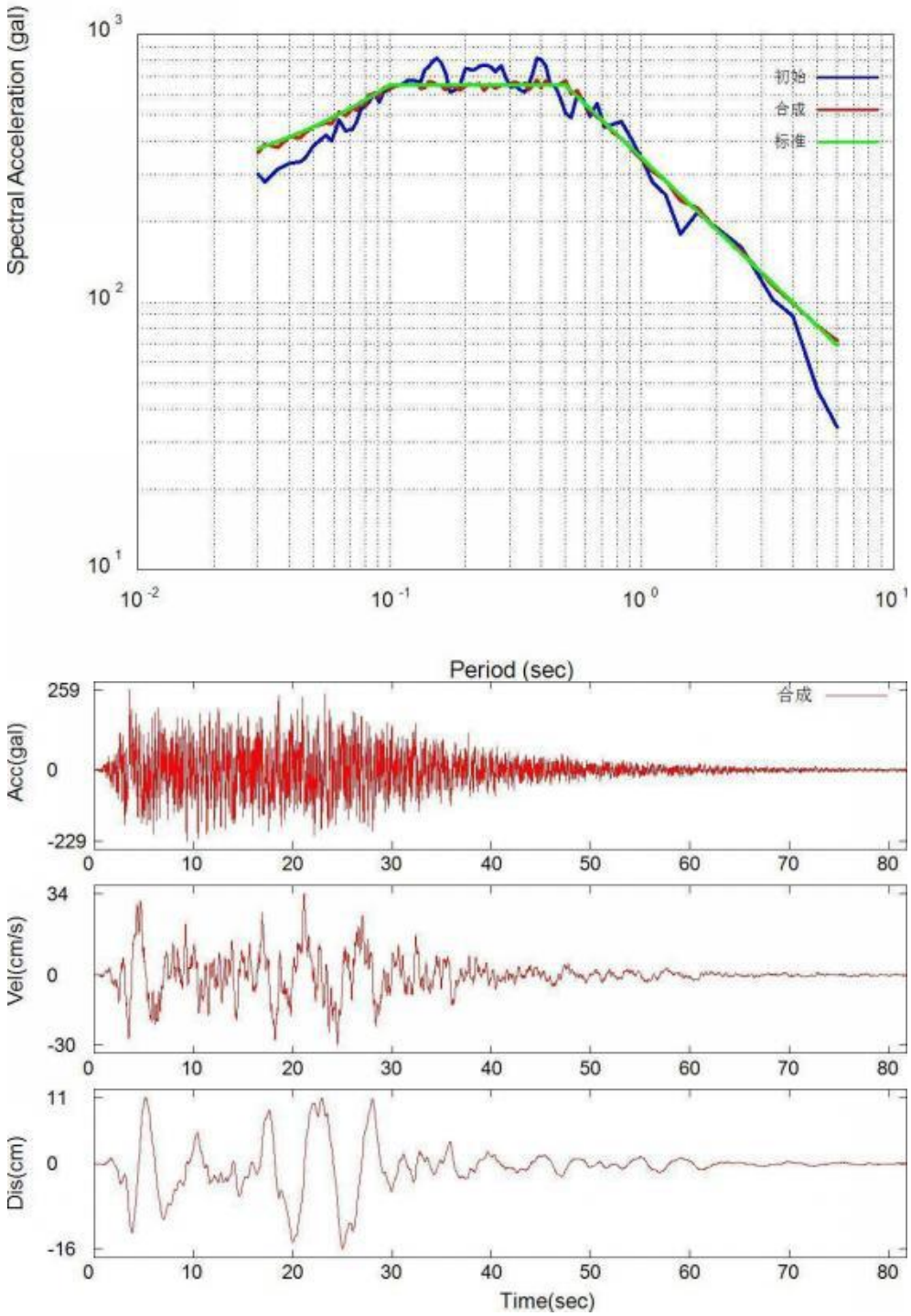


图 7.4-29 ZK1 控制孔 100 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

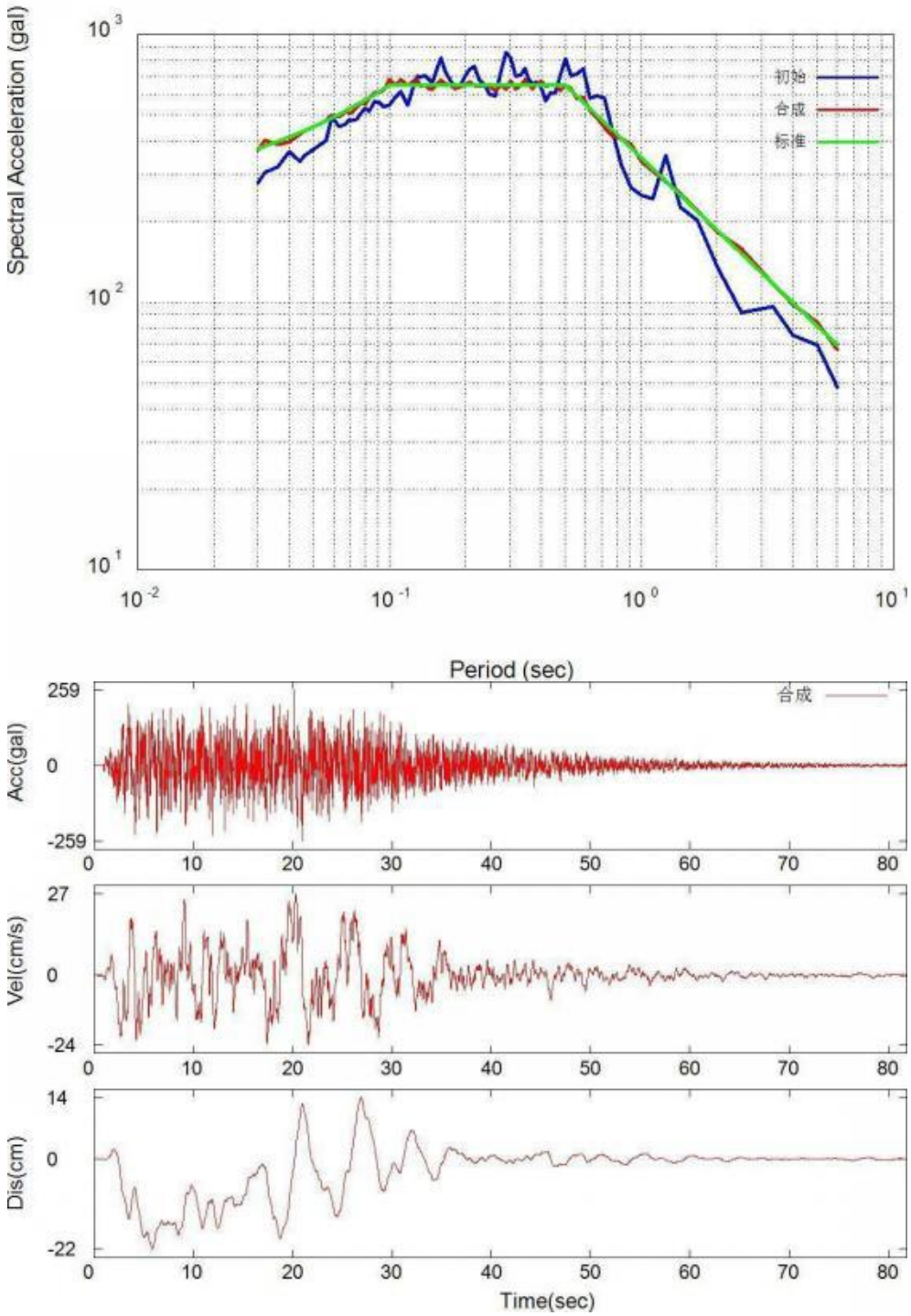


图 7.4-30 ZK1 控制孔 100 年 2%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

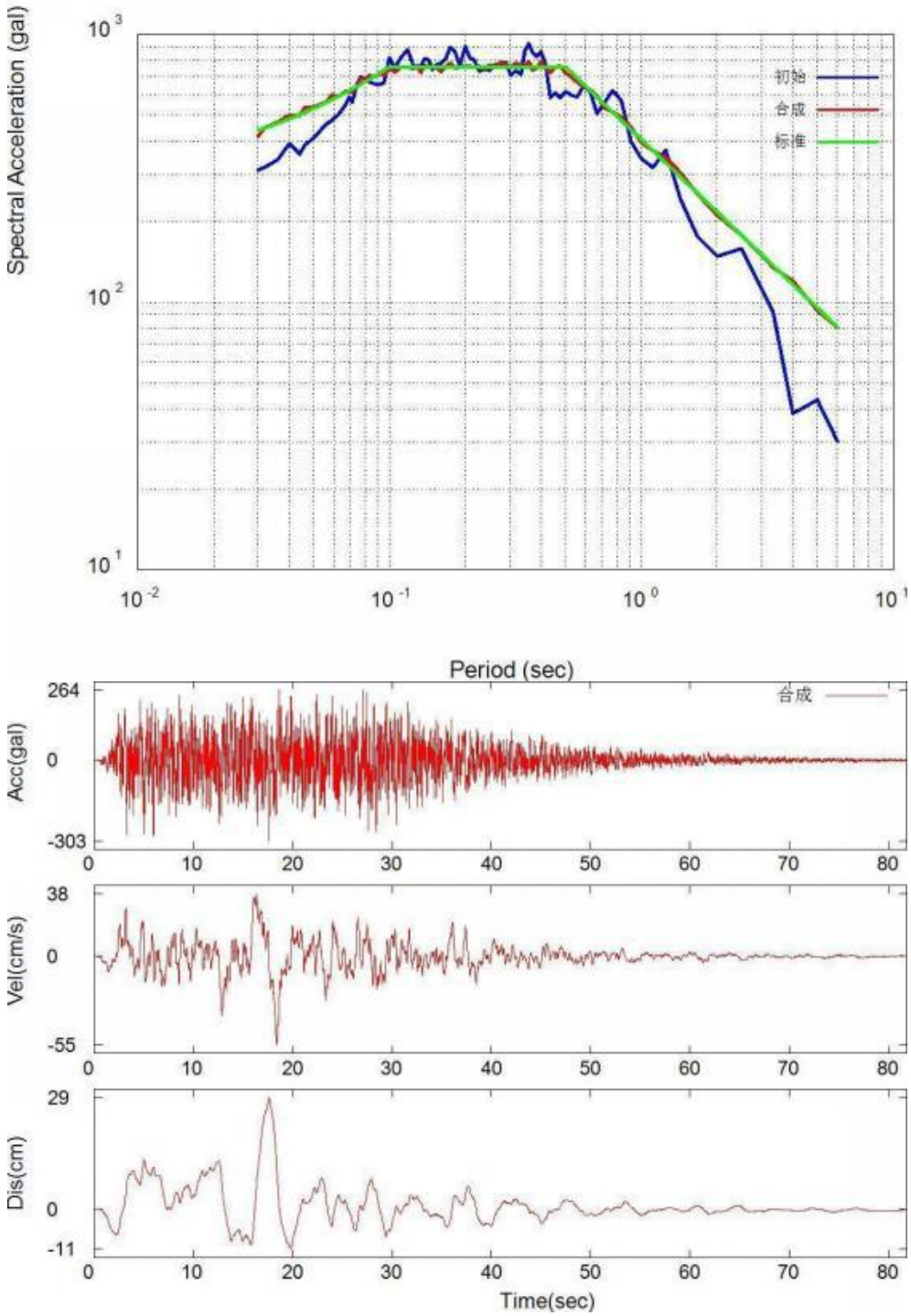


图 7.4-31 ZK1 控制孔 100 年 1%人工合成反应谱及地震动时程（第 1 条）（阻尼比 0.05）

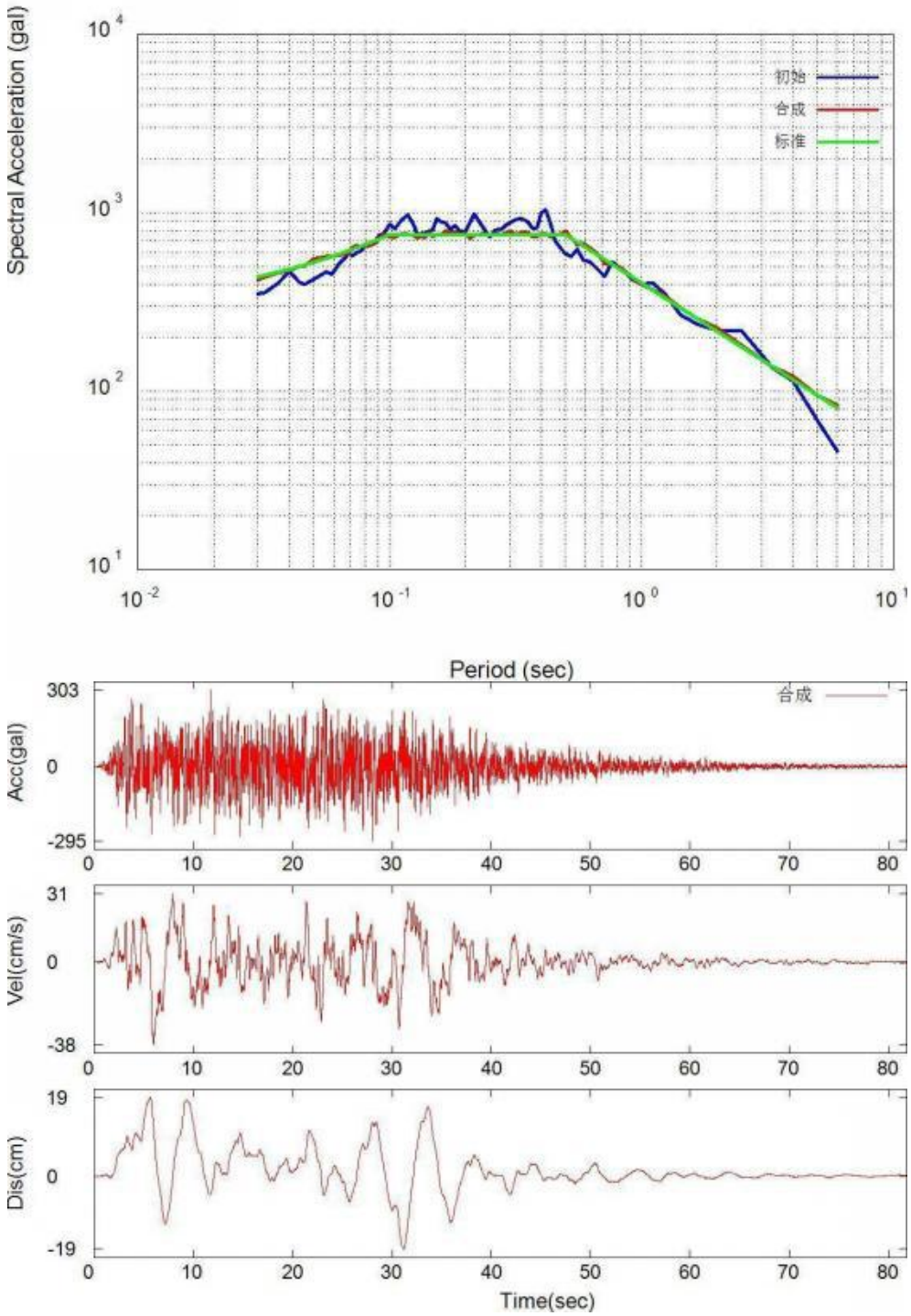


图 7.4-32 ZK1 控制孔 100 年 1%人工合成反应谱及地震动时程（第 2 条）（阻尼比 0.05）

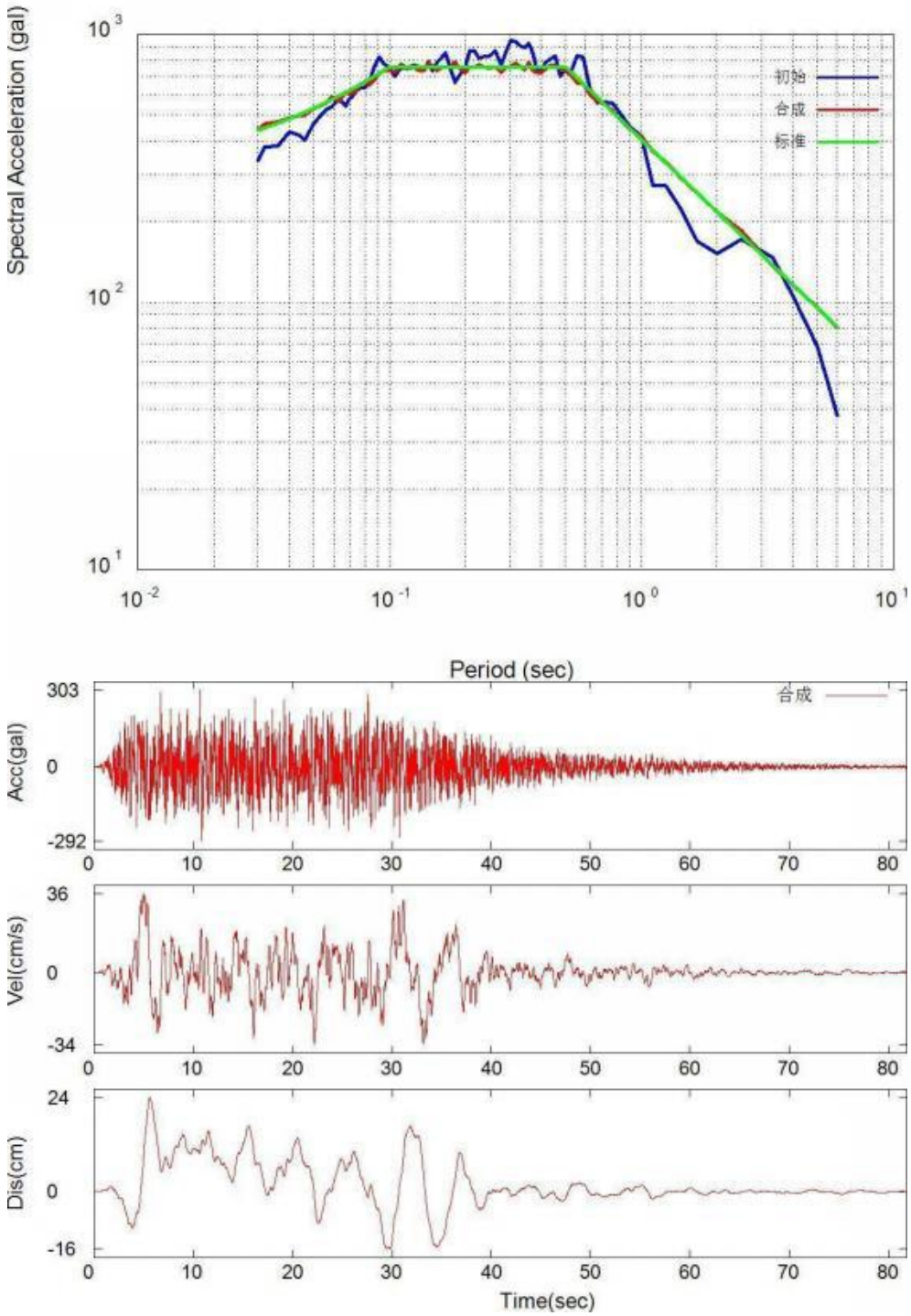


图 7.4-33 ZK1 控制孔 100 年 1%人工合成反应谱及地震动时程（第 3 条）（阻尼比 0.05）

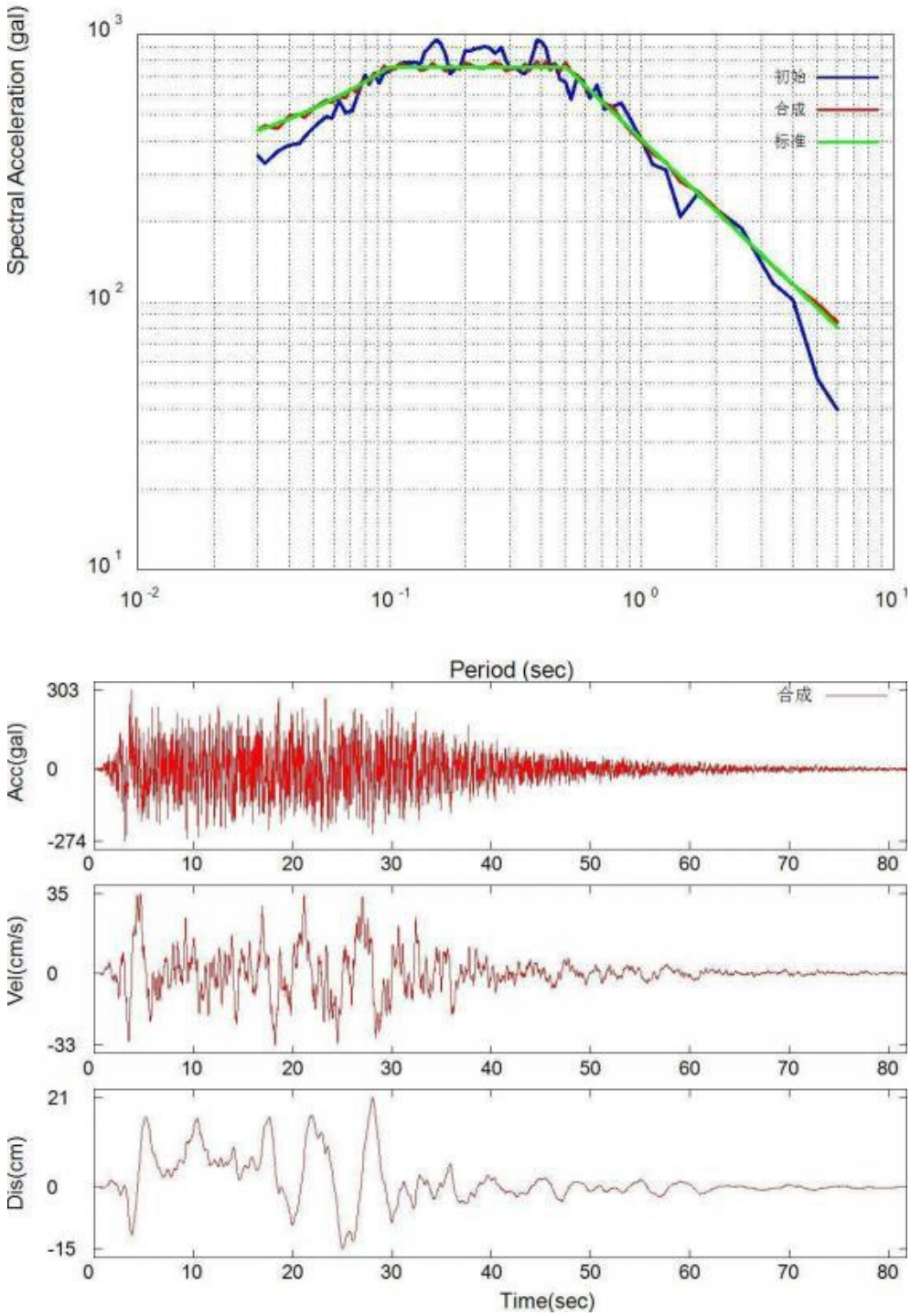


图 7.4-34 ZK1 控制孔 100 年 1%人工合成反应谱及地震动时程（第 4 条）（阻尼比 0.05）

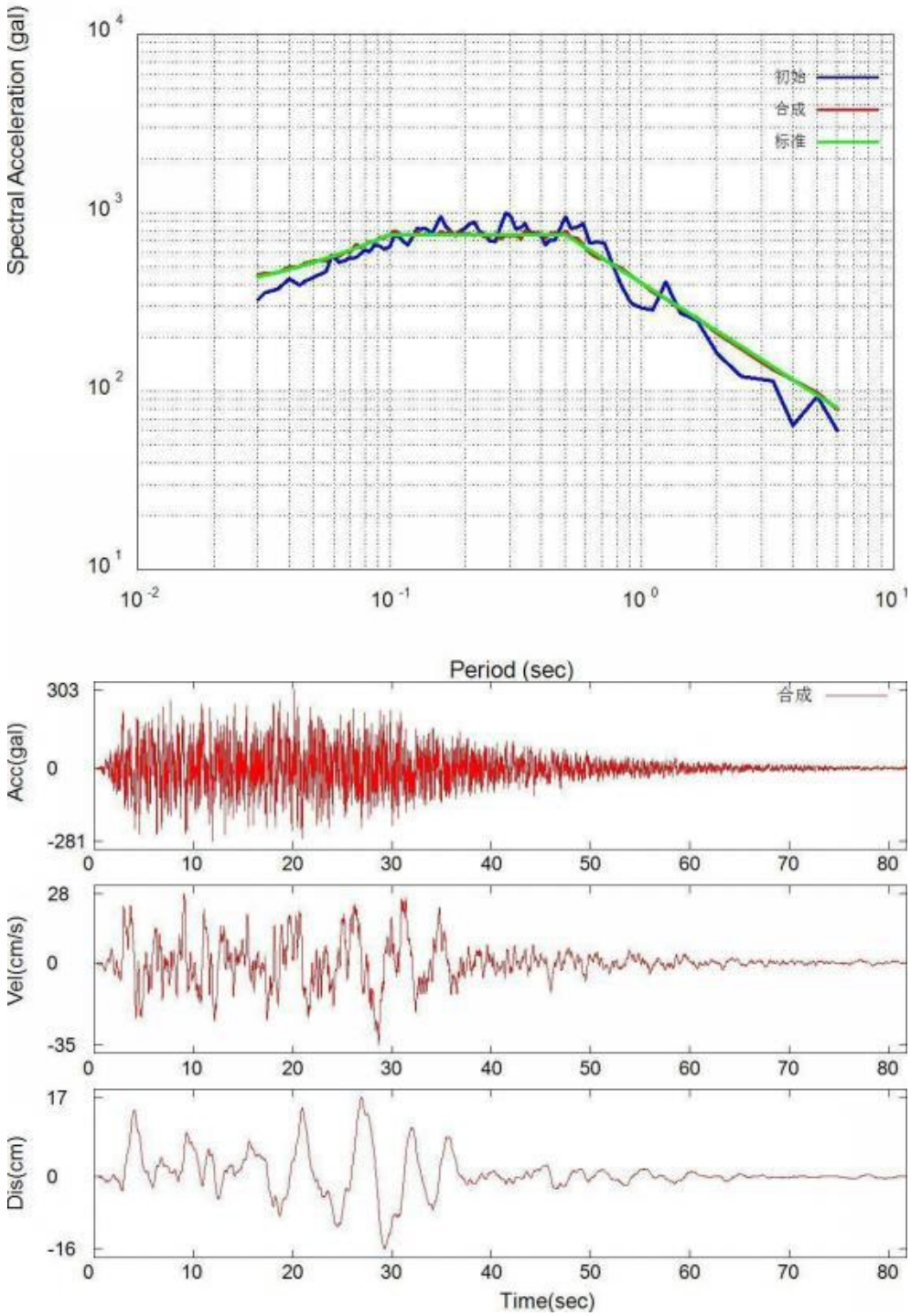


图 7.4-35 ZK1 控制孔 100 年 1%人工合成反应谱及地震动时程（第 5 条）（阻尼比 0.05）

8 目标区地震地质灾害评价

场地地震地质灾害是由地震动或断层错动引起的可能影响场地上工程性能的场地失效。震害经验表明，具不良地质条件的场地，常诱发产生各种地质灾害。地震地质灾害主要包括三大类：①由于地震动作用导致的对工程有直接影响的工程地基基础失效，包括饱和砂土液化、软土震陷等；②由于地震动作用导致的对工程有可能间接影响的工程场地失效，包括岩体崩塌、岩体开裂、岩土滑坡、泥石流等；③由地震断层作用导致的地表错动、地裂缝与地面变形等地质灾害。

在近场范围内，自有历史地震记载以来，迄今已记录到 M≥4.7 级的地震只有 1 次，为 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震。本次地震震源深度 10km，地震极震区烈度达到 VIII度 。地震造成 3 人死亡，146 人受伤。本次地震震害特征主要表现为部分房屋建筑和工程结构 不同程度的破坏。本次地震地质灾害破坏较轻，未出现大规模滑坡或者泥石流等地质灾害 。

8.1 砂土液化

本次工作按照国家标准《区域性地震安全性评价工作大纲》(试行)将对目标区土层分别 50 年超越概率 63%、10%、2%以及 100 年 63%、10%、2%、1%情况下进行液化评价。

根据目标区共布置 17 个钻孔，钻孔揭露地层主要为表层第四系全新统人工填土层和中侏罗统上沙溪庙组粉砂岩基岩层，无饱和的粉土和砂土，可不考虑砂土液化问题。

8.2 软土震陷

软土的工程性质特点是高压缩性，低强度，高灵敏度和低透水性，在较大的地震力作用下易出现震陷。《岩土工程勘察规范》（GB 50021-2001）指出，软土主要包括淤泥、淤泥质土、泥炭、泥炭质土等高压缩性土层。

拟建目标区上覆土层为人工填土层和中侏罗统上沙溪庙组粉砂岩，仅在 zk14 中分布淤泥，厚度为 0.8m。

根据 GB50021－2001《岩土工程勘察规范》条文说明第 5.9.11 条之规定和《软土地区岩土工程勘察规程》（JGJ83-2011）6.3.4 条规定，当承载力特征值或等效剪切波速符合表 8.2-1 所列条件之一时，可不考虑软土震陷影响。

淤泥等效剪切波速为 168m/s。因此，目标区的淤泥在 9 度作用下存在软土震陷的影响。

表 8.2-1　临界承载力特征值与临界等效剪切波速值

抗震设防烈度	7 度	8 度	9 度
承载力特征值（kpa）	＞80	＞100	＞120
等效剪切波速（m/s）	＞90	＞140	＞200

因此，目标区在 9 度作用下存在软土震陷的影响。

8.3 断层错动评价

地震活动断层是工程建设和地震安全性评价中最为重视的问题。地震活动断层灾害是指地震时，活动断层发生位移、升降等现象直接破坏地表，使位于断层带上及其附近的建筑物瞬间遭遇严重破坏，地震活动断层的破坏是现有抗御条件下难于抗御的地震地质灾害。

根据《建筑抗震设计规范》（GB50011—2010）（2016 年版）4.1.7 条相关条款规定，如对基本 烈度小于VIII度或非全新世断裂，可不考虑断裂错动对工程的影响。通过目标区构造环境图可知，拟建目标区区域未穿越活动断裂构造，且目标区基本烈度为VI度，因此，目标区可不考虑断层地表错动影响。

8.4 滑坡与崩塌

依据重大工程场地地震安全性评价标准，利用斜坡坡度危险度分级因子（表 8.4-1）、地震峰值加速度危害度分级因子（表 8.4-2）、Sr 岩土体危险度分级因子（表 8.4-3）计算地震崩塌滑坡危险性指数 H，对工程场地 1km 范围内地震地质灾害进行评价（表 8.4-4）。

$$H=Sa\times Sp\times Sr$$

式中：Sa 代表斜坡坡度危险度分级因子；Sp 地震峰值加速度危害度分级因子；Sr 岩土体危险度分级因子。

表 8.4-1　斜坡坡度危险度分级因子 Sa 赋值

滑坡坡度（°）	≤20	21-40	＞40
崩塌坡度（°）	≤40	41-60	＞60
程度	低	中等	高
Sa	1	2	3

表 8.4-2　地震险峰值加速度危害度分级因子 Sp 赋值

峰值加速度（g)	＜0.04	0.04-0.18	≥0.19
程度	低	中等	高
Sp	1	2	3

表 8.4-3　岩土体危险度分级因子 Sr 赋值

岩土体性状（R)	程度	Sr
岩石坚硬，节理不发育，结构完整，弱风化；或组成斜坡的地层倾向与坡向相反	低	1
岩石较破碎，节理发育，结构不完整，中风化；或组成斜坡的地层倾向与坡向斜交	中等	2
岩石较极破碎，节理密集发育，结构不完整，强风化；或组成斜坡的地层倾向与坡向大致相同，并存在软弱地层	高	3

表 8.4-4　坡体地震崩塌滑坡危险度分级

危险程度	低	中等	高
危险性指数（H)	1-4	6-12	18-27

目标区地形高程变化不大，从目标区附近的地形高程图（图 8.4-1）可以看出，目标区整体地形高差不大，地形起伏不大，拟评价区域呈浅丘的地貌形态，区内最高点位的海拔高程约 335m，最低处位的海拔高程约 289m，高低相差 46m。

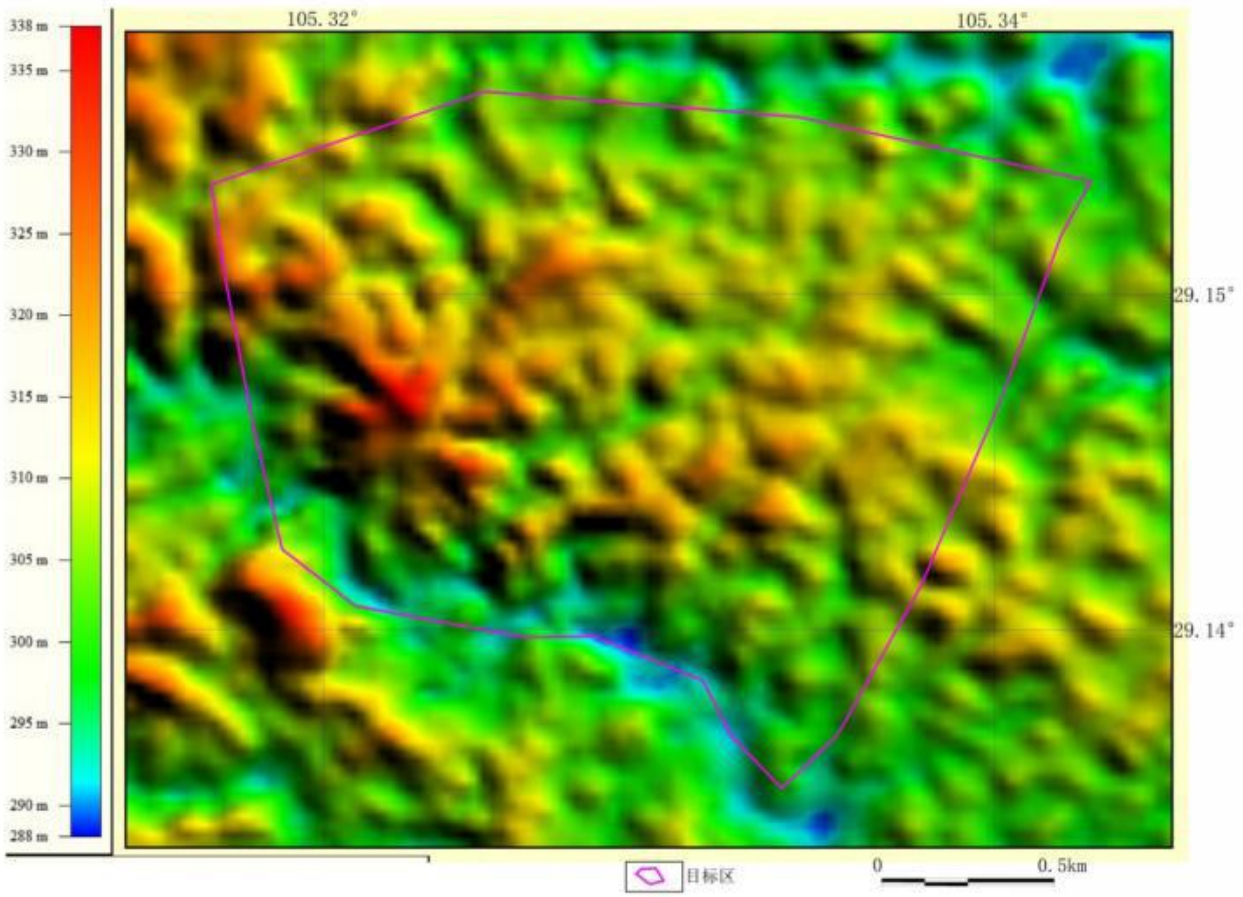


图 8.4-1　目标区 DEM 像图

利用 DEM 提取了目标区周边 1km 区域内的地形坡度值，从图 8.4-2 中可以看出，目标区及其附近的地形坡度全都位于 40°以下，绝大多数区域的地形坡度小于 20°。由此可知，目标区及其附近区域的地形坡度都比较小，因此斜坡坡度危险度分级因子 Sa 的取值均为 1，个别地点区 2。

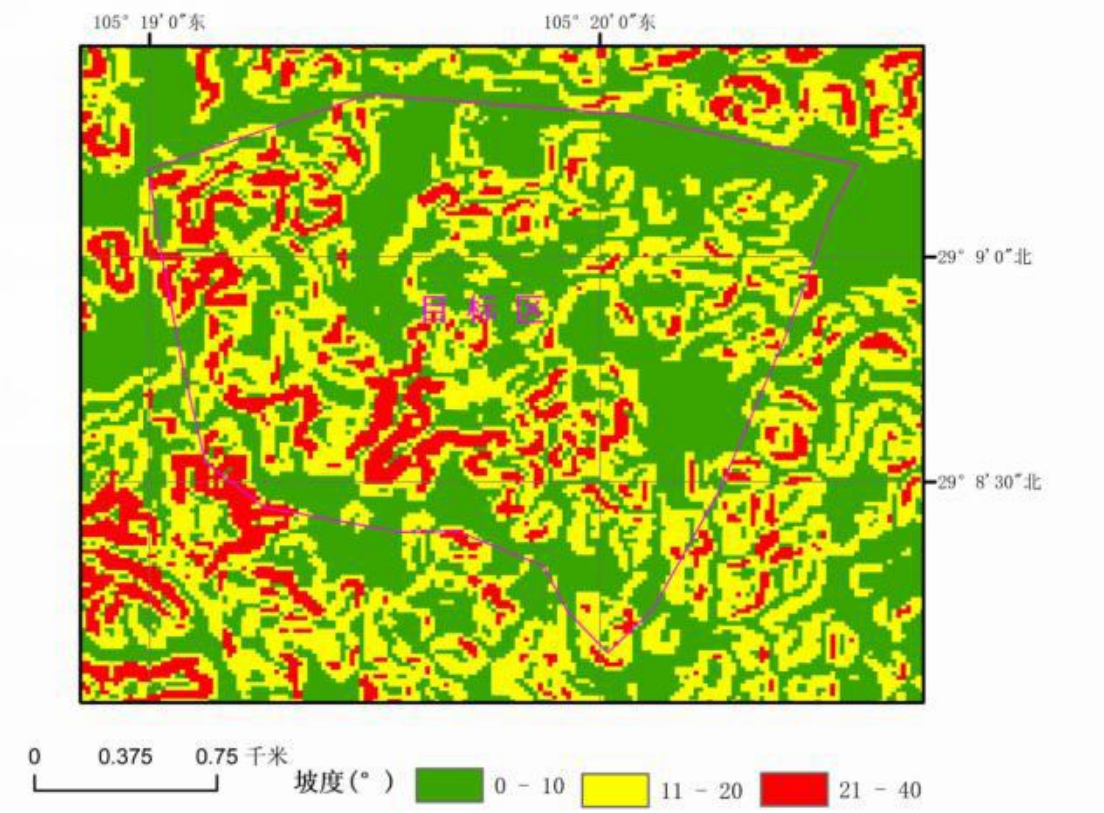


图 8.4-2　目标区坡度图

通过前面地震动参数分区的分析结果可知，目标区在一般在峰值加速度0.04-0.18g，地震峰值加速度危害度分级因子 Sp 取 2 或者 3。

根据野外调查，目标区主要出露地层为侏罗系中统上沙溪庙组（J_2s），中等风化泥岩呈紫色-棕色，夹灰绿色斑块，含粉砂质，泥质结构，厚层状，中风化砂岩呈黄色-青灰色，粉细粒状，多为泥质胶结，局部钙质胶结。对于出露的砂岩岩性较软，大多处于弱风化或中等风化，节理稍发育，岩体结构较完整，斜坡岩土体危险度分级因子 Sr 赋值 1 或 2。

从目标区地形坡度分级图来看，目标区及其附近的地形坡度全都位于 40°以下，绝大多数区域的地形坡度小于 20°，则斜坡坡度危险度分级因子 Sa 的取值均为 1 或 2，由于Ⅵ度、Ⅶ度和Ⅷ烈度下 Sp 取值部分调查点不相同，其地震峰值加速度危害度分级因子 Sp 取 2 或者 3，目标区出露的地层为弱风化和中风化的泥岩和砂岩，则斜坡岩土体危险度分级因子 Sr 赋值 1 或 2。因此，崩塌滑坡危险性指数计算值为 2-12，综合考虑，目标区及附近区域大部分为地震崩塌滑坡低风险区，仅在目标区西南区域为黄色中风险区（图 8.4-3）。

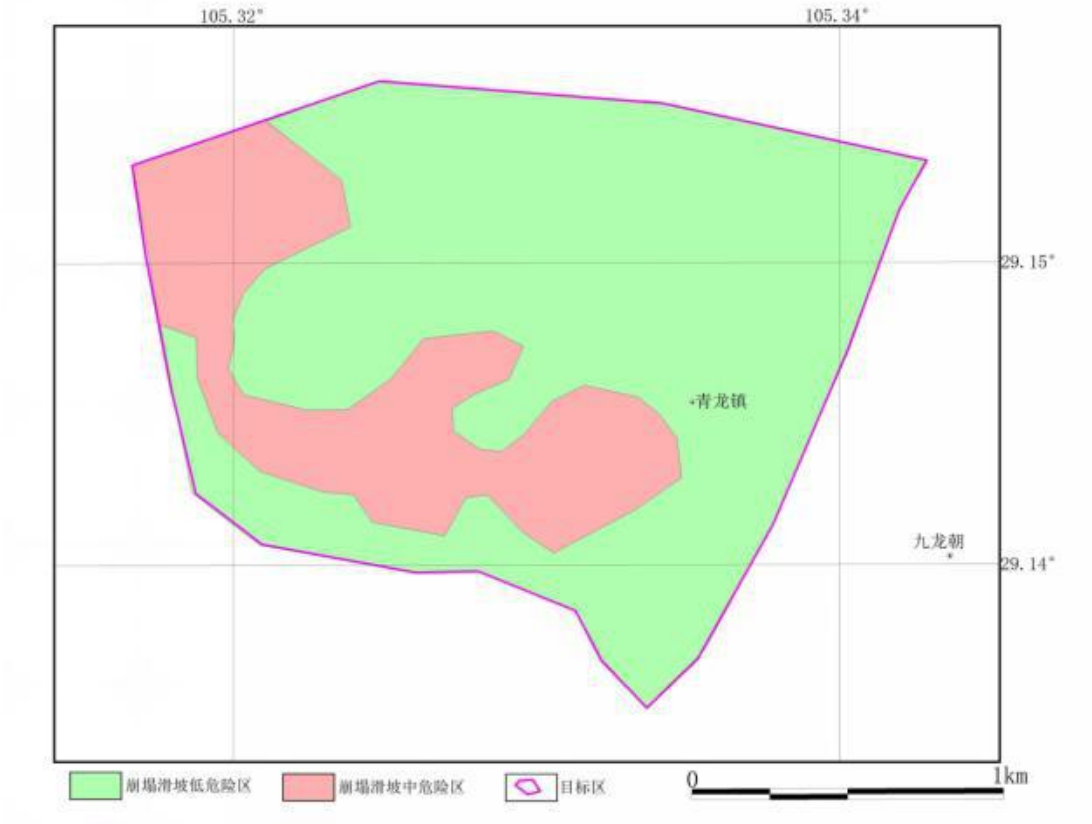


图 8.4-3　目标区崩塌滑坡危险性分区图

8.5 地震地质灾害综合评价

（1）目标区位于四川省泸州市泸县城区的西侧，地貌上表现为构造剥蚀浅丘地貌。根据现场调查和目标区勘察资料，目标区地层主要为表层第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）和下伏中侏罗统上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩基岩层。

（2）目标区基岩地层产状平缓，无断裂构造发育，构造相对稳定。因此，目标区不存在地震地表断错的构造条件。

（3）目标区上覆土层为人工填土层和中侏罗统上沙溪庙组粉砂岩，无饱和的粉土和砂土。因此，目标区可不考虑砂土液化。

目标区仅 zk14 钻孔分布淤泥，在 9 度作用下存在软土震陷的影响震陷影响。

（4）目标区及附近区域大部分为地震崩塌滑坡低风险区，仅在目标区西南区域为黄色中风险区。

9 区域性地震安全性评价技术服务系统建设

本项目建设了基于国家标准坐标系统的地理数据库（GeoDataBase），内容主要包括属性数据库和空间数据库，空间数据库为专业数据和基础地理数据，并研制了基于 GIS 平台的具备相应服务功能的技术服务系统：

（1）专业数据包含以下内容：

①目标区控制性钻孔土层计算模型库；

②目标区各控制点多概率水准的基岩地震动参数数据库；

③目标区各控制点多概率水准地表地震动参数数据库；

④目标区各控制点多概率水准地表地震动时程数据库；

⑤目标区多概率水准的多参数地震动区划数据库；

⑥目标区地震地质灾害数据库，包括砂土液化、软土震陷、崩塌滑坡等。

（2）基础地理数据主要是合法合理利用测绘部门生产的地理数据

（3）软件系统具备以下功能：

①输出地层结构不同参数的数据表和图件（目标区或控制孔）；

②输出不同概率水准基岩地震动参数结果表和图件（目标区或控制孔）；

③输出目标区不同概率水准地表地震动参数区划结果表和区划图；

④对设定场点设计地震动参数的确定，输入该点位置、工程类型和场地类别后，具备能够给出基于区域性地震安全性评价结果、符合场地条件和工程结构抗震设计所需要概率水准的地震动参数的功能，包括峰值加速度、反应谱和地震动时程。

⑤输出不同概率水准地震地质灾害评价结果数据表和图件。

（4）服务系统介绍

技术服务系统部份功能见图 9-1。

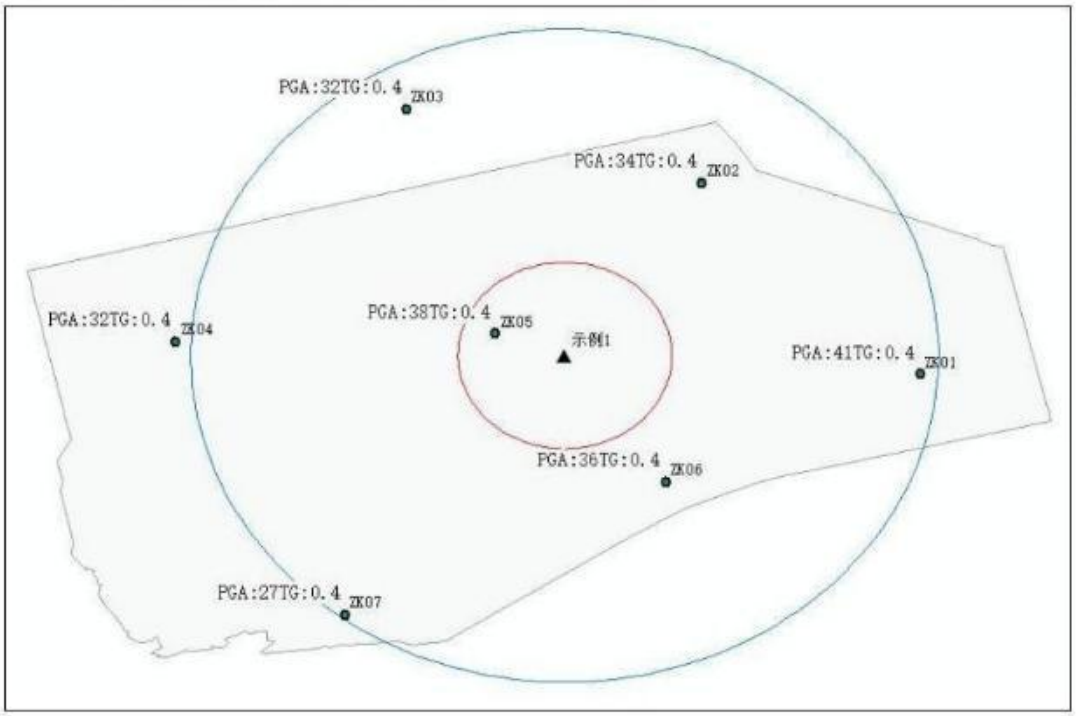


图 9-1　设定场点地震动参数确定功能展示图(200m 内有控制点)-50a63%

红色圆圈表示 200m 范围，蓝色圆圈表示 700m 范围

10 主要结论和建议

10.1 区域地震活动性评价结果

（1）在以目标区为中心，东经 102°06′～107°03′、北纬 27°18′～31°15′的区域范围内，自公元前 26 年至 2023 年 10 月的二千余年中，共记到 M≥4.7 级破坏性地震 175 次，其中 8 级 1 次，7.0～7.9 级 6 次，6.0～6.9 级 17 次，5.0～5.9 级 94 次，4.7～4.9 级 57 次；自 1970～2023 年 10 月间，区域范围内共记到 M=2.0～4.6 级中小地震 30430 次。区域目前记到的最大地震是 2008 年 5 月 12 日四川汶川 8.0 级地震。

（2）区域范围强、弱地震震源深度的优势分布层位是有明显差异的，M≥4.7 级地震震源深度的优势分布层较之近代中小地震震源深度优势分布层更深一些，中强地震震源深度的优势分布层位在 6~20km 之间，近代中小地震震源深度的优势分布层位处于地下 1～10km 范围内，都属于浅源地震的震源深度分布范围。

（3）区域地跨龙门山地震带、长江中游地震带、鲜水河—滇东地震带和右江地震带。龙门山地震带自公元前 193～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 241 次，其中 8 级大震 3 次，7.0～7.9 级强震 10 次，6.0～6.9 级地震 35 次；鲜水河—滇东地震带自公元 624～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 763 次，其中 8 级地震 1 次，7.0～7.9 级地震 30 次，6.0～6.9 级地震 99 次；长江中游地震带自公元前 143～2023 年 10 月已记到 M≥4.7 级地震 123 次，其中 6.0～6.9 级地震 5 次，5.0～5.9 级地震 72 次；右江地震带自 1526～2023 年 10 月共记到 M≥4.7 级地震 53 次，其中 6.0～6.9 级地震 1 次，5.0～5.9 级地震 30 次。这 4 个地震区内的地震活动随时间分布是不均匀的，其活动方式也有十分明显的差异。分析表明，龙门山地震带地震活动具有一定的周期性，目前本带仍处于第二活跃期，未来地震活动水平应略高于平均的地震活动水平；鲜水河—滇东地震带在未来百年内仍将保持活跃的地震活动水平，并有可能发生多次 M≥7.0 级地震；长江中游地震带未来百年内的地震活动时间进程仍将主要持续现在的地震相对活跃期，地震活动将保持活跃水平；右江地震带正处在自 1982 年开始的地震相对活跃期中，未来将处于相对活跃的地震活动水平。

（4）区域范围基本处于以北西—北西西向近水平的主压应力为主的现代构造应力场中。在这样的应力场作用下，易于发生以走滑为主或走滑兼具倾滑型的

断层活动，北西及近南北向的断层易产生左旋走滑运动，北东向的断层易产生右旋走滑运动。

（5）自有历史地震记载以来，历史地震对目标区影响最大的是 1536 年西昌北 7½级地震、1786 年在康定、泸定磨西间 7¾级地震、1896 年四川富顺 5¾级地震、2008 年汶川 8.0 级地震和 2021 年泸县 6.0 级地震，其中，2021 年泸县 6.0 级地震对各目标区的影响最大，为Ⅶ度；其他历史地震对目标区的最大影响烈度均为Ⅵ度。

10.2 区域主要发震构造评价结果

区域范围内的发震构造主要有荥经—马边—盐津断裂带、鲜水河断裂南东段、安宁河断裂、则木河断裂、龙门山断裂带、大凉山断裂等，以下将分别讨论这几条断裂的分段性、潜在地震能力和强震复发间隔等，为区域范围内高震级潜在震源区的地震活动性参数确定提供地质学依据。

（1）荥经-马边-盐津断裂带

地表有多条次级断裂组成，其深部是一条连续的北西向构造带，它是四川盆地与川西高原的分界断裂带。历史上已发生 1216 年雷波马湖 7 级地震，根据历史地震与构造类比估计该断裂的最大潜在地震震级为 7 级。但在该断裂的南端与近东西向断裂带交汇的部位有发生更大地震的可能。如在与东西向盐津断裂带的交汇部位发生 1974 年云南永善、大关间 7.1 级地震。因此交汇部位最大潜在地震可确定为 7.5 级。

（2）鲜水河断裂南东段

区域内仅包括了鲜水河断裂南东段康定以南部分，成为磨西断裂，呈一条主干断裂延伸，平均水平滑动速率估值为 8±2mm/a（周荣军等，2001），发生过 1786 年康定、泸定磨西间 7¾级地震，强震复发间隔在 300-500a。

（3）安宁河断裂

安宁河断裂带以冕宁和西昌为界，可分为三段：北段为全新世活动断裂，平均水 平滑动速率在 4.7-5.3mm/a 左右，最大潜在地震能力在 7.5 级左右，最晚一次强震的发生时间在 A.D.1480 年，距今时间已 521a。根据古地震研究成果，该断裂段的强震平均复发间隔在 570-660a（闻学泽等，2000；周荣军等，2001），因此未来百年内强震复发的可能性极大。中段由三条断裂呈羽列组合而成，为全

新世活动断裂，平均水平滑动速率在 5.5mm/a 左右，最大潜在地震能力在 8 级左右，发生过 A.D.1536 年 7½级地震和 A.D.1952 年 6.7 级地震，根据该断裂段古地震研究结果，7.0 级以上的强震复发间隔约在 900a 左右，未来百年内存在强震复发的可能性, 冉永康等（2008）通过地质地貌调查与古地震研究，在安宁河断裂北段的紫马跨和野鸡洞揭示出 3 次古地震事件，分别为距今约 1634~1811a、1030~1050a 和 280~550 a，左旋位移量在 3 m 左右，复发间隔为 520~660 a；同时认为大海子-干海子最新一次古地震事件为 1536 年西昌北 7½级地震，其它古地震事件分别发生在距今 1768~1826、2755~4108 和 4108~6593 a，重复间隔为 1300~1900 a，并获得了晚全新世以来的左旋位移速率为 6.2mm/a，垂直位 移速率 1.4mm/a；断层水平和垂直位移速率的比例约为 4：1。该段 1913 年发生过 1 次小盐井 6.0 级地震。南段活动性相对较弱，为早中更新世活动断裂，迄今未为 6 级以上强震的历史记载。

（4）则木河断裂

①则木河断裂北西段（西昌—松新段）该断裂段长度约 90km，断错地貌清晰，晚第四纪以来的平均水平滑动速率为 4.7mm/a 左右。历史上曾发生过公元 814 年西昌 7 级地震和 1850 年西昌大箐梁子 7½级地震，最晚一次地震的地表破裂展布于西宁—松新间，长度约 90m，最大同震位错在大箐梁子一带可达 5.7m。根据大箐梁子和四呷布史两个探槽的研究结果，则木河断裂北西段全新世以来发生过 7 次古地震事件，大震复发间隔介于 1036～1758a 之间，均值为 1323a。

②则木河断裂南东段该断裂段长度约 40km。则木河断裂南东段的活动性远逊于北西段，但仍可以见到断错地貌现象，晚更新世以来的平均水平滑动速率为 2～3mm/a。按走滑型断裂的 1 次 7 级左右地震的平均同震位错约为 1.5～1.8m 可以估计，该断裂段大地震的复发间隔约为 500～800a。

（5）龙门山断裂带

该断裂带主要由茂汶-汶川断裂、北川-映秀断裂和彭县-灌县断裂等三条断裂组成，其中茂汶-汶川断裂的茂汶-草坡段、北川-映秀断裂北中段、彭县-灌县断裂的都江堰-天全段和茶坝-林庵寺断裂的石坎子以西段为全新世活动段，平武-青川断裂和茶坝-林庵寺断裂的石坎子-茶坝段为晚更新世活动段，历史上曾发生过数次 6 级左右地震，最大地震为 2008 年汶川 8.0 级地震。根据断裂分段性及活动性差异，划分出汶川 8.0 级、宝兴 7.5 级、青川 7.0 级、大邑 7.0 级、彭州

6.5 级和竹园 6.5 级五个潜在震源区。龙门山断裂带单条断裂上的滑动速率估值在 1mm/a 左右，估计 8 级大地震的复发间隔在 2000～3000a。

（6）大凉山断裂带

可以将大凉山断裂带划分成海棠-越西、普雄河、布拖和交际河四个不同的段落，这四条段落均呈左阶或右阶羽列排列，羽列距 4-20km 不等。大凉山断裂的四条次级断裂均存在明显断错地貌现象，晚更新世晚期-全新世以来的平均水平滑动速率介于 2.6-3.9mm/a 之间，平均值约为 3mm/a（周荣军等，2003）。这四条断裂均有可能为独立的破裂单元。有史料记载以来，大凉山断裂上迄今尚未有 6 级以上强震发生，但探槽业已证实该断裂发生过史前强震，相对较长的强震复发间隔及历史地震的漏记有可能是该断裂上无强震记载的主要原因。按大凉山断裂带的分段结果，可以将大凉山断裂带划分为石棉 7.5 级潜在震源区、昭觉 7.5 级潜在震源区、布拖 7.5 级潜在震源区。

（7）昭通断裂带

该断裂长逾 150km，对地层发育与区域构造变形也起明显控制作用。地表多条断层不连续分布，控制着昭通、鲁甸新生代盆地发育，其线性地貌清楚。野外调查发现，断裂断错了晚第四纪地层，具有晚第四纪新活动性。沿该断裂带历史上发生多次 5-5.5 级地震，是一条中、小地震活动带。根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 7.5 级。

（8）黑水河断裂

黑水河断裂北接鲜水河断裂、南连小江断裂，位于安宁河断裂与大凉山断裂之间总长约 200km。黑水河断裂可分为北、中、南三段，最新研究成果表明该断裂具备全新世活动性。该断裂探槽开挖揭示出的地层变形证据，识别出了全新世以来的 4 次古地震事件，地震平均复发间隔约为 2130 年，其中最新事件应为 1489 年西昌-越西地震。 根据构造类比估计，该断裂的最大潜在地震震级为 7.5 级，将该断裂归入布拖 7.5 级潜在震源区。

10.3 近场区地震活动性和构造评价结果

（1）对近场地震资料分析可知，近场区只记录到 1 次 M≥4.7 级的地震，为 2021 年 9 月 16 日泸县 6.0 级地震，对目标区的最大影响为Ⅶ度。对近代小震资料分析可知，近场范围内的中小地震活动绝大多数为 2.0～2.9 级的小震。近场区

内的现代地震空间分布不均匀，小震活动的集群特征表现为团簇状。现代小震主要分布在近场东北部安富镇、广顺镇；西北部圣灯镇；目标区以北的福集镇；南部胡市镇等地密集成丛、成带分布，近场其余地方中小地震活动较弱。

（2）近场区位于四川中生代前陆盆地内，区内构造变形定型于印支期，喜马拉雅运动对此有所改造和加强。四川台拗内的川中台拱地质构造简单，地层近水平，变形微弱，仅发育有一些鼻状或穹隆状构造。川东陷褶束地表表现为背斜构造与向斜大致等间距的梳状构造，具“断层弯曲背斜”或“断层扩展背斜”的典型特征。而上扬子台褶带表现宽缓的褶皱构造。均为较稳定的大地构造单元。

（3）近场区内发育有 NE 向断层主要为薄刀岭断层、黄泥垭断层、天洋坪断层、大凹场断层、白云寺断层、堆金湾断层、阳高山断层等一系列北东向次级断裂组成，属于华蓥山断裂带，断裂发育于背斜构造的轴部或陡翼，规模较小，呈断续状延伸。已有资料显示这些断裂均为第四纪早、中期或前第四纪活动断裂，不具备晚第四纪活动性。四川盆地中强地震发震构造条件研究结果表明，这一类的背斜构造对中强地震的发生具有明显的制约作用。因此，近场区内的背斜构造不能排除发生中强地震的可能性。

10.4 目标区断层勘查和活动性鉴定结果

（1）根据近场区断裂的研究成果及目标区地震构造图，结合现场地震地质调查和本次 2 条地球物理勘探剖面结果表明，目标区内未发现断裂发育或隐伏断层通过。

（2）根据《筑抗震设计规范》（GB50011-2010）4.1.7 条规定，目标区无断裂，可不考虑断层地表错动影响。

10.5 目标区地震工程地质条件勘测

目标区勘探深度范围内，土层结构较简单，揭露地层主要为表层表层第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）和下伏中侏罗统上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩基岩层。

根据 17 个钻孔的孔中波速测试综合计算结果，本场地卓越周期约为 0.23s。该场地等效剪切波平均波速为 201m/s,该场地类别主要为Ⅱ类，中软土、中硬土。

10.6 目标区地震反应分析与地震动参数确定

目标区为Ⅱ类场地，根据地震工程地质条件勘察结果，构建钻孔模型，用一维等效线性波动法对拟建场地内各钻孔模型进行土层地震反应计算，给出各孔地

表 50 年和 100 年多种概率水准下的加速度时程和峰值加速度，计算相应的加速度反应谱。计算得到各钻孔的地震动参数值见表 10.6-1。图 7.3-120～图 7.3-126 为目标区各钻孔 7 个超越概率的峰值加速度分布图，图 7.3-127～图 7.3-133 为目标区各钻孔 7 个超越概率的特征周期分布图。

表 10.6-1 目标区各钻孔地表设计地震动参数值（阻尼比 0.05）

钻孔编号	超越概率	Amax（cm/s^2）	αmax	T_0	T_g(s)	βm	γ
ZK1	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	97	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	46	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	137	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	259	0.66	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	303	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK2	50 年 63%	43	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	110	0.28	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	205	0.52	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	49	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	150	0.38	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	277	0.71	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	328	0.84	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK3	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	102	0.26	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	206	0.52	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	140	0.36	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	265	0.68	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	302	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK4	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	95	0.24	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	188	0.48	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	130	0.33	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	245	0.62	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	298	0.76	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK5	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	94	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	190	0.48	0.1	0.5	2.5	0.9

	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	131	0.33	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	247	0.63	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	284	0.72	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK6	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	89	0.23	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	121	0.31	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	226	0.58	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	276	0.70	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK7	50 年 63%	42	0.11	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 10%	112	0.29	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	226	0.58	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	54	0.14	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 10%	155	0.40	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	297	0.76	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	343	0.87	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK8	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	104	0.27	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	214	0.55	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	145	0.37	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	276	0.70	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	315	0.80	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK9	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	100	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	199	0.51	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	48	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	138	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	262	0.67	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	303	0.77	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK10	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	86	0.22	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	40	0.10	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	122	0.31	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	227	0.58	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	281	0.72	0.1	0.5	2.5	0.9

ZK11	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	91	0.23	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	184	0.47	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 63%	44	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	125	0.32	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	241	0.61	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 1%	279	0.71	0.1	0.45	2.5	0.9
ZK12	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	97	0.25	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	47	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	136	0.35	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	260	0.66	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	310	0.79	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK13	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	89	0.23	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	174	0.44	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	43	0.11	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	121	0.31	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	226	0.58	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	276	0.70	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK14	50 年 63%	49	0.12	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	128	0.33	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	232	0.59	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	59	0.15	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	171	0.44	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	289	0.74	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	344	0.88	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK15	50 年 63%	37	0.09	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 10%	94	0.24	0.1	0.5	2.5	0.9
	50 年 2%	191	0.49	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 63%	46	0.12	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 10%	132	0.34	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 2%	252	0.64	0.1	0.55	2.5	0.9
	100 年 1%	300	0.76	0.1	0.55	2.5	0.9
ZK16	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	96	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	198	0.50	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9

	100 年 10%	135	0.34	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	242	0.62	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	297	0.76	0.1	0.5	2.5	0.9
ZK17	50 年 63%	35	0.09	0.1	0.4	2.5	0.9
	50 年 10%	95	0.24	0.1	0.45	2.5	0.9
	50 年 2%	191	0.49	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 63%	45	0.11	0.1	0.4	2.5	0.9
	100 年 10%	132	0.34	0.1	0.45	2.5	0.9
	100 年 2%	239	0.61	0.1	0.5	2.5	0.9
	100 年 1%	294	0.75	0.1	0.5	2.5	0.9

10.7 目标区地震地质灾害评价结果

（1）目标区位于四川省泸州市泸县城区的西侧，地貌上表现为构造剥蚀浅丘地貌。根据现场调查和目标区勘察资料，目标区地层主要为表层第四系全新统人工填土层（Qh^{ml}）和下伏中侏罗统上沙溪庙组（J_2s）粉砂岩基岩层。

（2）目标区基岩地层产状平缓，无断裂构造发育，构造相对稳定。因此，目标区不存在地震地表断错的构造条件。

（3）目标区上覆土层为人工填土层和中侏罗统上沙溪庙组粉砂岩，无饱和的粉土和砂土。因此，目标区可不考虑砂土液化。

目标区仅 zk14 钻孔分布淤泥，在 9 度作用下存在软土震陷的影响震陷影响。

（4）目标区及附近区域大部分为地震崩塌滑坡低风险区，仅在目标区西南区域为黄色中风险区。

10.8 地震动参数使用说明

目标区内设定场点工程场地地震动参数，可根据工程结构特征、场地工程地质条件和目标区地表地震动参数数据库、地震动时程数据库综合确定。

（1）根据场地工程地质勘察报告，给出场地类别。

（2）依据工程结构所需的概率水准，选择距离场点 700m 范围内的控制点结果综合确定场地地震动参数。其中场点距离控制点小于 200m 时，取该控制点地震动参数和五代区划图所在位置的地震动参数二者的高值作为该场点的场地地震动参数；场点距离控制点大于 200m 时，选择该场点周围 700m 范围内的多个控制点，取地震动参数大的控制点参数和《中国地震动参数区划图》（GB 18306－2015）提供的地震动参数二者的高值作为该场点的场地地震动参数。

（3）根据建筑结构类型选取不同年限对应的不同超越概率水准的地震动参数；

（4）本结果适用阻尼比为 5%，如果工程结构抗震设计中需要设计地震动的其它阻尼比加速度反应谱，可依据不同建筑结构的抗震规范中所给的地震影响系数的阻尼比调整规定，利用本结果（5%阻尼比）计算场地地震动的其它阻尼比加速度反应谱值。

（5）如需竖向地震动参数，竖向地震动峰值加速度可取为对应概率水准的水平向地震动设计参数值。

主要参考文献

陈学波等，1988，龙门山构造带两侧地壳速度结构特征（中国大陆学部构造的研究与进展），地质出版社。

成都地震大队，1970，1970 年 2 月 24 日四川芦山县长石坝地震宏观调查报告（内部资料）。

邓起东、于贵军、叶文华，1992，地震地表破裂参数与震级关系研究，活动断裂研究理论与应用（2）。

黄玮琼，等．1994.中国大陆地震资料完整性研究之二——分区地震资料基本完整的起始年分布图象[J]．地震学报，16(4)，423～432

焦远碧，吴开统，杨满栋. 我国地震台网监测能力及台网观测条件质量评定[J]. 中国地震，1990，6（4）

地震出版社邓起东、陈社发、赵小麟，1994，龙门山及其邻区的构造地层活动及动力学，地震地质 16（4），389—403。

邓起东、冯先岳等，2000，天山活动构造，地震出版社。

胡聿贤等，1982，基岩地震动参数与震级和距离的关系，地震学报，第 4 卷，第二期。

胡聿贤，1988，地震工程学 地震出版社，北京。

胡聿贤、张敏政，1989，缺乏强震观测资料地区的地震动参数的估算方法，《地震小区划—理论与实践》，地震出版社。

谷继成、魏富胜，论地震活动定量化：地震活动度，中国地震，1987 年，第 3 卷，增刊。

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2005，工程场地地震安全性评价（GB17741—2005），中国标准出版社，北京。

国家质量技术监督局，2001，中国地震动参数区划图（GB18306—2001），中国标准出版社，北京。

雷建成，高孟潭，俞言祥.2006.西南地区近代地震的震中烈度与有感地震的统计研究[J].震灾防御技术，1（2），137-145

刘瑞丰，陈云泰，Peter Bormann，任枭，侯建民，邹立晔，杨辉.2006.中国地震台网与美国地震台网测定震级的对比（Ⅱ）——面波震级[J].地震学报，28 （1）：1-7

李勇、曾允孚、伊海生，1995，龙门山前陆盆地沉积及构造演化，成都科技出版社

马杏垣主编，1989，中国岩石圈动力学图集，中国地图出版社钱洪、周荣军、马声浩、黎小刚，1999，岷江断裂南段与 1933 年叠溪地震研究，中国地震，Vol,15, No.4, 333 — 338

四川省石油管理局地质勘探开发研究院，1978，成都地区断裂发展特征与现代地震关系（内部资料）

四川省地质局、四川省地震局地质编图组，1980，四川省构造体系与地震分布规律图说明书（内部资料）

四川地震资料汇编编辑组，1980，四川地震资料汇编第一卷（一九四九年前），四川人民出版社。

四川省地震局地震简目编目组，云南省地震局地震简目编辑组，西藏自治区地震协会地震简目编目组，1988，西南地震简目，四川科学技术出版社。

四川西藏地震等烈线图资料汇编编辑组，1994，四川西藏地震等烈度线图资料汇编成都地图出版社

四川省石油管理局地质勘探开发研究院，1998，官店子测区浅层勘探报告（内部资料）

《四川地震资料汇编》（第三卷）编辑组，2000，四川地震资料汇编（第三卷），成都地图出版社

时振梁、鄢家全、高孟潭，1991，地震区划原则和方法—以华北地区为例，地震学报，第 13 卷，第 2 期。

唐荣昌、韩渭宾主编，1993，四川活动断裂与地震，地震出版社

许志琴等，1986，东秦岭复合山链的形成，中国环境科学出版社

许志琴、侯立玮、王宗秀等，1992，中国松潘—甘孜造山带的造山过程，地质出版社

汪素云，俞言祥，高阿甲，阎秀杰.2000.中国分区地震动衰减关系的确定[J].中国地震.16（2）：99-106

闻学泽、徐锡伟等，2001，磨西断裂的晚第四纪活动性与大地震复发间隔，见卢演俦等主编：新构造与环境，地震出版社，255—266

杨晓平、蒋溥、宋方敏、梁小华、陈献强、邓志文，1999，龙门山断裂带南段断错晚更新世以来地层的证据，地震地质，21（4），341—345

赵小麟、邓起东、陈社发，1994，岷江隆起的构造地貌学研究，地震地质，16（4），429—439

叶洪，1996，潜在震源区的确定，《中国地震烈度区划图（1990）概论》，地震出版社

张诚等主编，1990，中国地震震源机制，学术书刊出版社

中国地震烈度区划图编委会，1992，中国地震烈度区划图（1990）及其说明，中国地震，第 8 卷，第 4 期。

国家地震局，1996，中国地震烈度区划图（1990）概论，地震出版社

周荣军、李勇、Alexander D. Mickael A.,2000,青藏高原东缘晚第四纪构造变形的新证据，中国地震学会第八次学术大会论文摘要等，地震出版社

周荣军、蒲晓虹、何玉林、黎小刚、戈天勇，2000，四川岷江断裂带北段的新活动、岷山断块的隆起及其与地震活动的关系，地震地质，第 3 期。

中华人民共和国建设部，国家质量监督检验检疫总局，2001，建筑抗震设计规范

（GB50011—2001）中国建筑工业出版社，北京

周荣军、雷建成、唐荣昌，2005，四川盆地潜在震源区的细致划分，四川地泸州泸天化化工园区区域性地震安全评价项目

周荣军、黄润秋、雷建成等，2008，四川汶川 8.0 级地震地表破裂与震害特点，岩土力学与工程学报，第 11 期。

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中华人民共和国住房和城乡建设部 ，2010，建筑抗震设计规范（GB50011－2010），中国建筑工业出版社，北京

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准化管理委员会，2015，中华人民共和国国家标准《中国地震动参数区划图》，中国标准出版社，北京

中国地震局震害防御司，1999，《中国近代地震目录(公元 1912 年－1990 年)》，中国科学技术出版社

中国地震局地质研究所，2011，《成都市活断层初查与鉴定报告》

易桂喜、赵敏、龙锋等，2021，2021 年 9 月 16 日四川泸县 Ms6.0 地震序列特征及孕震构造环境，地球物理学报，64（12）；

吴萍萍、李大虎、詹艳等，2023，2021 年 9 月 16 日四川泸县 M6.0 地震震区三维 S 波精细度结构，地球物理学报，66(6)；