

王树旺,王文才,杨晓鹏,等.2023年甘肃白银平川区4.9级地震强地面运动特征分析[J].地震工程学报,XXXX,XX(X):000-000.DOI:10.20000/j.1000-0844.20240120001

WANG Shuwang, WANG Wencai, YANG Xiaopeng, et al. Strong ground motion characteristics of the M4.9 earthquake in Baiyin Pingchuan District, Gansu Province in 2023[J]. China Earthquake Engineering Journal, XXXX, XX(X): 000-000. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240120001

2023年甘肃白银平川区4.9级地震 强地面运动特征分析

王树旺¹, 王文才^{1,2}, 杨晓鹏¹, 安昭², 张卫东¹,
石文兵¹, 李亮¹, 张蓉¹

(1. 甘肃省地震局, 甘肃兰州 730000;
2. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 中国地震预警台网在甘肃白银平川区4.9级地震中获得197组三分向地面运动加速度记录, 其中仅100 km范围内就有165组, 这是海原断裂带附近首次获得大量近断层强震动观测记录。通过近场台站加速度反应谱与设计谱比较、不同周期地震动与预测模型对比, 绘制出地震动的空间影响场, 研究此次地震的强地面运动特征。结果表明: 近场6个土层台的水平向加速度反应谱在卓越周期附近大于8度多遇地震的设计谱, 其中GS.D003E台EW向反应谱在峰值处超过8度设防地震的设计谱值, 但由于其卓越周期低于当地城乡普通建筑的自振周期, 因此其对采取了抗震措施的建筑物的破坏程度较小。土层台观测的PGA、PGV、 $S_a(0.2\text{ s})$ 、 $S_a(0.5\text{ s})$ 等短周期地震动普遍大于地震动预测值, 而 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 等中等周期地震动的观测值与预测值较一致, 说明本次地震高频成分的地震动比较卓越。基本站和一般站的地震动观测值普遍大于基准站, 结合相邻土层台和基岩台的谱比分析, 表明土层场地和地形对地震动有放大作用。PGA、 $S_a(0.2\text{ s})$ 、 $S_a(0.5\text{ s})$ 等短周期地震动除沿断层走向的幅值较大外, 在垂直于断层走向的震中西南侧的幅值也较大。而 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 和 $S_a(3.0\text{ s})$ 等中等周期的地震动在震中西南侧幅值较大的特点更加明显, 可能与震源破裂特性及台站所处局部场地对地震动的影响有关。

关键词: 地震预警台网; 平川区4.9级地震; 反应谱; 衰减关系; 空间分布

中图分类号: P315.63

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(XXXX)0X-0-10

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20240120001

收稿日期: 2024-01-20

基金项目: 中国地震局地震预测研究所中央级科研院所基本科研业务费专项(2022IESLZ07); 甘肃省科技计划(23YFFA0015, 23JRRA1397, 23JRRA1322); 国家自然科学基金(U2039206); 国家自然科学基金面上项目(42371404)

第一作者简介: 王树旺(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事地震监测和数据处理工作。E-mail: 137765120@qq.com。

通信作者: 王文才(1987-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事强震地面运动、场地反应等方面的研究工作。

E-mail: haocaiww@163.com。

Strong ground motion characteristics of the M4.9 earthquake in Baiyin Pingchuan District, Gansu Province in 2023

WANG Shuwang¹, WANG Wencai^{1,2}, YANG Xiaopeng¹, An Zhao²,
ZHANG Weidong¹, SHI Wenbing¹, Li Liang¹, Zhan Rrong¹

(1. Gansu Earthquake Agency, Lanzhou 730000, Gansu, China)

2. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing, 100081, China)

Abstract: The China Earthquake Early Warning Network obtained 197 sets of ground motion acceleration records during the 4.9-magnitude earthquake in Pingchuan District, Baiyin, Gansu Province. Among them, 165 sets were recorded within 100 kilometers, marking the first significant accumulation of near-fault strong motion observation records near the Haiyuan Fault Zone. Our study delved into the ground motion characteristics of this earthquake by comparing the acceleration response spectrum at near-field stations with the design spectrum, contrasting ground motions of different periods with prediction models, and mapping the spatial impact field of seismic motions. The findings reveal that horizontal spectral acceleration at six soil stations near the fault exceeds the design spectrum for 8-degree Frequent earthquakes at the dominant period. Particularly notable is the EW direction response spectrum at station GS.D003E, which surpasses the design spectrum value for an 8-degree fortification earthquake at its peak. Fortunately, the dominant period at GS.D003E station is lower than the natural period of typical urban and rural buildings in the area, resulting in relatively minimal damage to buildings equipped with seismic measures nearby. Observations of PGA, PGV, $S_a(0.2\text{ s})$, $S_a(0.5\text{ s})$, and other short-period ground motions at the soil stations generally exceed the predicted values, while those of $S_a(1.0\text{ s})$, $S_a(2.0\text{ s})$, and other intermediate-period ground motions align with predictions, indicating notably prominent high-frequency components in the ground motion during this earthquake. Furthermore, observations at the strong motion stations and intensity stations typically surpass those at the seismic stations. This, combined with spectral ratio analysis between adjacent soil stations and bedrock stations, suggests that soil conditions and topography amplify ground motion. The PGA, $S_a(0.2\text{ s})$, and $S_a(0.5\text{ s})$ exhibit significant amplitudes not only along the fault's direction but also on the southwest side of the epicenter, perpendicular to the fault. Conversely, $S_a(1.0\text{ s})$, $S_a(2.0\text{ s})$, and $S_a(3.0\text{ s})$ demonstrate larger amplitudes solely on the southwest side of the epicenter, perpendicular to the fault's trend. This phenomenon may be linked to the rupture characteristics of the seismic source and the influence of site conditions at the observation stations.

Keywords: Earthquake Early Warning Network; M4.9 Pingchuan earthquake; response spectrum; attenuation relationship; spatial distribution

0 引言

北京时间 2023 年 12 月 31 日 22 时 27 分在甘肃省白银市平川区(36.74°N, 105.00°E)发生了 M4.9 地震,震源深度 10 km。地震未造成人员伤亡,但甘肃省兰州市、白银市,以及宁夏中卫市等靠近震中的区域震感强烈。从区域地质构造来看,此次地震发生于青藏高原东北缘地区的海原断裂带附近。海原

断裂带是中国西部地区一条重要的活动断裂带,它西起甘肃古浪,经乌鞘岭、毛毛山、老虎山、马厂山、米家山,向东越过黄河经哈思山、水泉尖山、西华山、南华山,直至宁夏固原西的六盘山,全长 500 km,宽约 20 km^[1]。历史上海原断裂带上曾发生过 1920 年海原 8.5 级特大地震,并造成 28.82 万人死亡,约 30 万人受伤。有研究表明,海原断裂带自晚更新世以来的活动状态一直持续稳定到现在,以左旋走滑

为主兼有逆冲分量^[2],本次平川区 4.9 级地震距离海原 8.5 级大地震震中约 67 km。此次地震虽然震级较小,但随着国家烈度速报与预警工程的持续推进,使得获取强震动加速度记录的台站覆盖密度得到很大的提升^[3]。此次地震中甘肃和宁夏地震预警网共获得 197 组三分向加速度记录,仅在 100 km 范围内的就有 165 组,丰富的近场记录为研究近断层地面运动特征提供了良好的数据依据。此外,震中附近广泛分布着黄河阶地、黄土丘陵,受局部土层、地形等场地条件对地震动的影响,往往会造成相邻地区震害差异较大、局部地区建筑物破坏程度加重的现象^[4-5]。因此,利用此次地震中获取的丰富强震动记录进行近断层地震动特性、场地地震动反应分析等方面的研究很有必要。相关结果不仅可为该

地区地震危险性分析、地震动预测和震害估计、抗震设防等方面的研究提供参考,且对地震预警台网新建台站的观测数据质量评价等方面同样具有重要意义。

1 地震预警台站分布情况

中国地震预警台网布设在甘肃和宁夏地区的 22 个基准站、32 个基本站和 143 个一般站在此次 M4.9 地震中共获得三分向地面运动加速度记录 197 组,为近年来该地区捕获强震动记录最多的一次地震。记录台站分布在距震中 9.3~111 km 的范围内,其中 50 km 内有 38 个,50~100 km 范围内有 128 个,100~111 km 范围内有 32 个台站。图 1 给出了此次地震的震中位置、周围断层和台站分布情况,其中基准站指位于基岩场地的台站,这类台站多

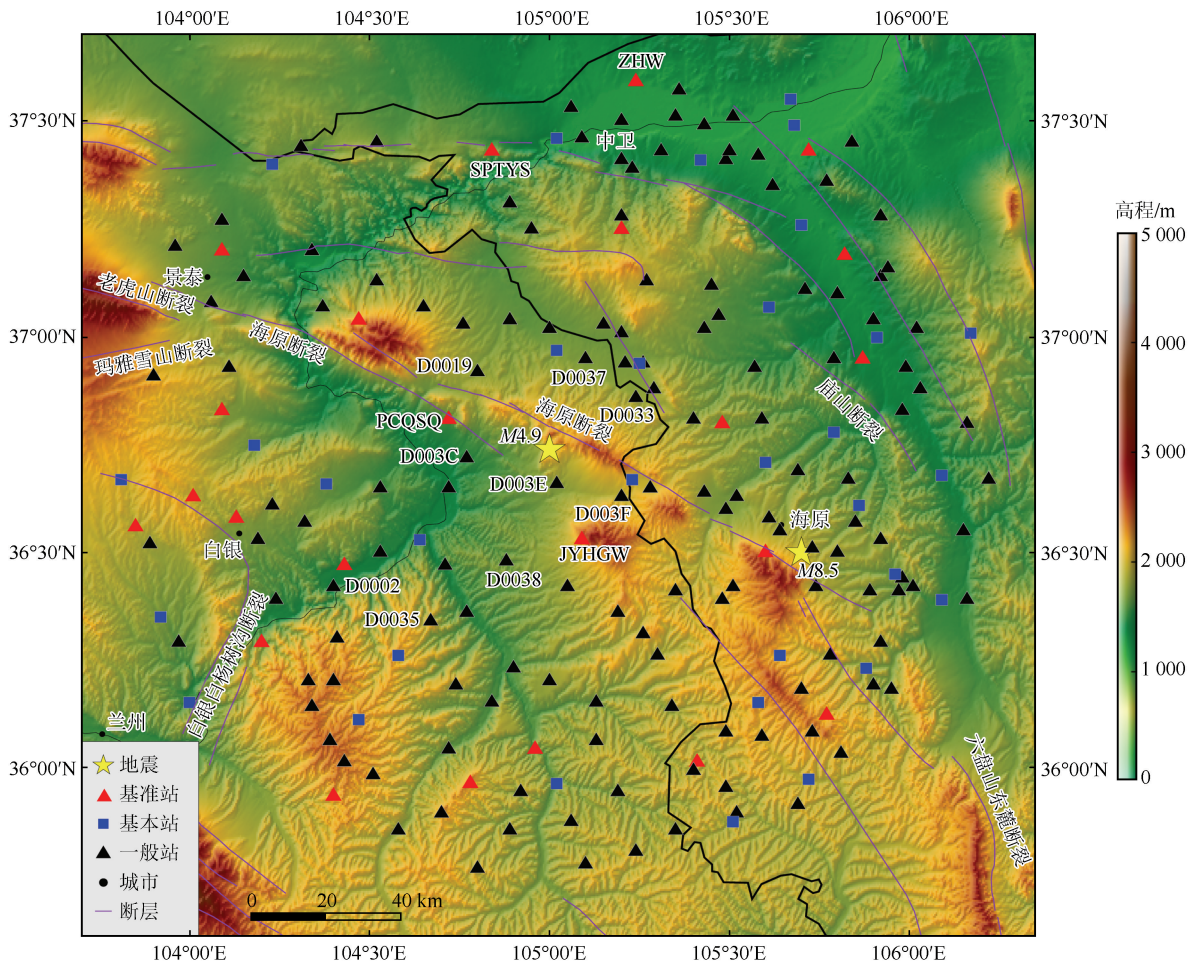


图 1 记录台站分布图

Fig.1 Distribution of recording stations

建于地表出露的基岩上,少数位于山洞或地下深井中。所有基准站同时配备有 1 套微震仪和 1 套强震仪,本次地震中除 NX.SPTYS 基准站和 NX.ZHW 基准站的加速度传感器分别布设在井下 300 m 和

180 m 的砂岩上之外,其余基准站的传感器均固定于地表观测室内的基坑中。基本站多建于学校、乡镇政府、村委会等人口较为密集地区的土层场地上,通常配备 1 套强震仪,加速度传感器固定于观测室

内的观测墩上。一般站多位于通讯铁塔机房内,通常配备1套基于MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)传感器的简易烈度计,烈度计使用螺栓固定于地面或不高于30 cm的墙面上。

2 强震动观测数据处理

强震动数据应用前需要对获取的原始加速度时程记录进行常规处理,包括基线校正、滤波和积分等。首先自动识别P波到时^[6],计算出P波到时前20 s记录的平均值作为基线,通过加速度记录波形减去基线值,实现对地震记录波形的校正,从而消除基线偏移对地震动时程的影响;然后采用拐角频率分别取0.1 Hz和50 Hz的Butterworth带通滤波器滤波干扰信号;最后对加速度记录积分得到速度时程^[7-9]。本次地震中GS.D003E、GS.D003F、GS.D003C、GS.D0033、GS.D0037、GS.D0019、GS.D0038、GS.D0002及GS.D0035台三分向记录中至少有一个分向的PGA大于100 gal,这些台站的位置见图1。绘制出幅值较大的两个土层台GS.D003E($R=9.3$ km)、GS.D003F($R=21.6$ km)和两个基岩台GS.PCQSQ($R=24.8$ km)、GS.JYHGW($R=26.4$ km)的加速度和速度时程如图2所示。由图2可知GS.D003E台记录的峰值加速度(PGA)最大,其EW、NS、UD向PGA分别为-184.7、-132.2和114.2 gal。

3 近场加速度反应谱与设计谱比较

根据《建筑抗震设计规范(GB 50011—2010)》^[10],甘肃白银平川区的抗震设防烈度为8度,设计地震动加速度为 $0.30g$,地震动分组为第三组。本文选取震中附近PGA最大的6个建于土层场地的一般站(GS.D003E、GS.D003C、GS.D003F、GS.D0033、GS.D0037、GS.D0019)和2个建于基岩场地的基准站(GS.PCQSQ、GS.JYHGW),通过计算加速度反应谱(阻尼比取5%),并与文献^[10]规定的抗震设防反应谱进行比较,如图3所示。由图3可知,6个土层台三分向记录的反应谱峰值对应周期主要集中在0.05~0.3 s的范围内,这符合中、小地震高频(短周期)地震动成分较丰富的特点。6个土层台观测的水平向反应谱在卓越周期处的值均超过了8度多遇地震设计谱的平台值,除GS.D003E台EW向反应谱在峰值处略大于8度设防地震设

计谱的平台值外,其余台站的谱加速度均远小于8度设防地震的反应谱值。由于GS.D003E台EW向反应谱的卓越周期在0.1 s附近,低于我国城乡居民普通多层房屋的自振周期(0.2~1.2 s)^[11],因此,此次地震对该地区这一自振周期范围内的建筑破坏性较小。另外,GS.D003E台NS向和UD向的反应谱呈“双峰”型,其第一个峰值对应周期在0.1 s附近,第二个峰值对应周期在0.3 s左右,但由于峰值处的反应谱幅值远小于8度设防地震的设计谱,因此本次地震对该台站附近采取了设防措施的建筑物的破坏程度较小。对于周期大于1 s的中长周期,由于观测的反应谱值近乎为0,因此地震对该台站周围自振周期较长的大坝、桥梁、输电塔、超高建筑等也不会造成大的影响。

由图1可知,GS.PCQSQ、GS.JYHGW两个基准站位于上述6个土层台站附近,但其观测的谱加速度值远小于土层台站的反应谱值。由于地震动同时受震源、传播路径和场地反应的影响,为尽量减小震源和传播路径的影响,分别选取震中西北侧的GS.PCQSQ台(基岩台)和GS.D003C台(土层台),以及震中东南侧的GS.JYHGW台(基岩台)和GS.D003F台(土层台)进行对比,计算出土层台与基岩台反应谱的幅值之比随着周期的变化情况[图4(a)、(b)]。由图可见,土层台相对基岩台而言,土层场地对水平向地震动和竖向地震动均有不同程度的放大作用,且在大多数周期范围内对水平向的放大作用大于对竖向的放大作用。其中GS.D003F台所处场地对地震动的放大作用更大,主要集中在0.1~0.6 s的高频部分,而GS.D003C台所处场地对地震动的放大作用相对较小。这可能与GS.D003C台(土层台)和GS.D003F台(土层台)所处局部地形对地震动的放大作用有关。由图4(c)、(d)可知,GS.D003F台位于一个局部高突山梁的通信铁塔机房内,而GS.D003C台地处地形平缓的农户聚居区内。

4 地震动衰减特性

为分析此次4.9级地震的地震动衰减特性,首先将地震动观测值进行水平向合成,然后与国内常用的地震动预测模型进行比较,如图5所示。由于各种预测模型均在一定条件下适用,有些预测模型仅针对单种地震动参数进行预测,有些模型适用于多种地震动参数。本文将PGA与俞言祥等2006年

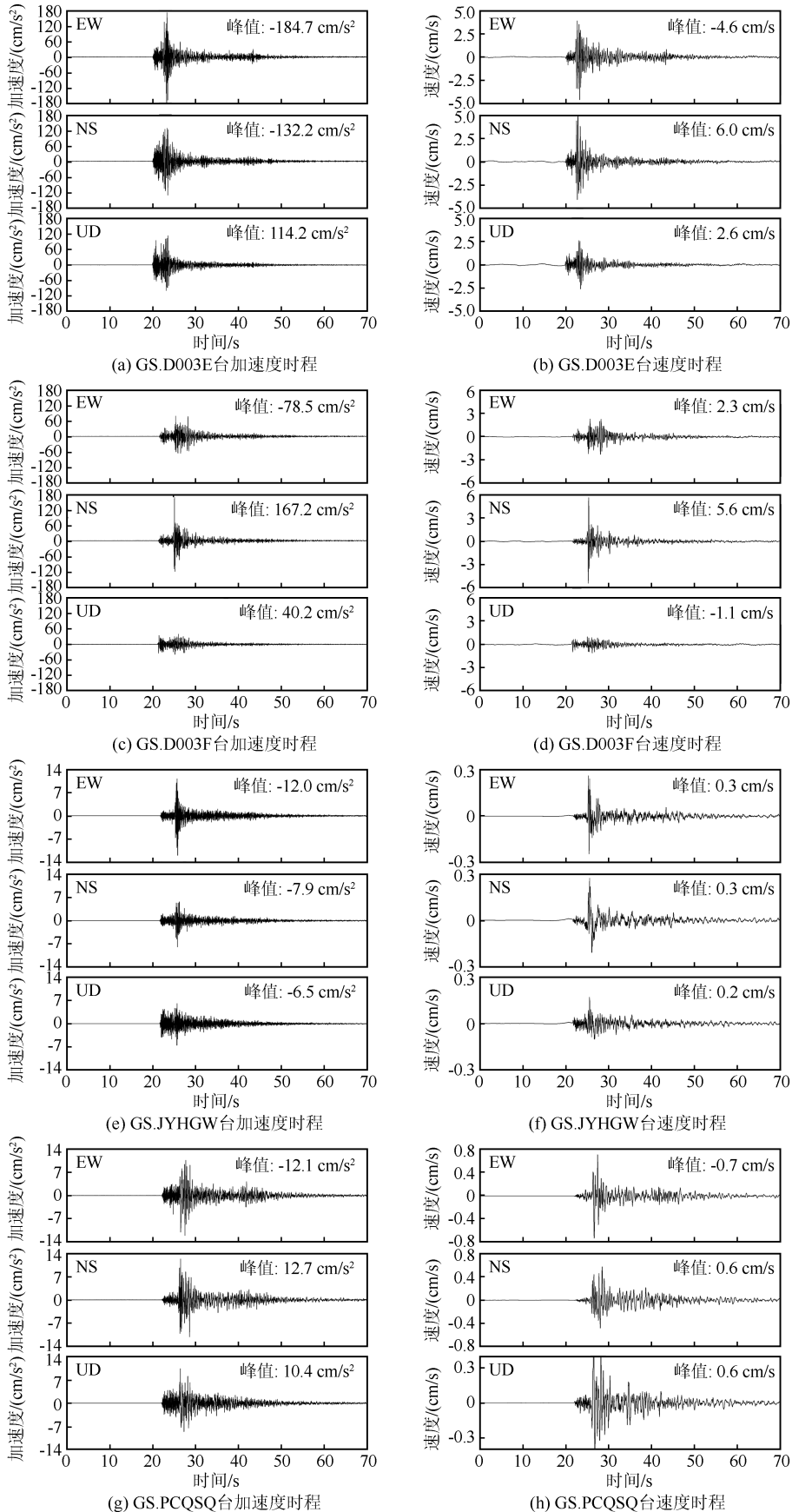


图 2 典型记录的加速度时程和速度时程

Fig.2. The acceleration time-history curves and velocity time-history curves of typical stations

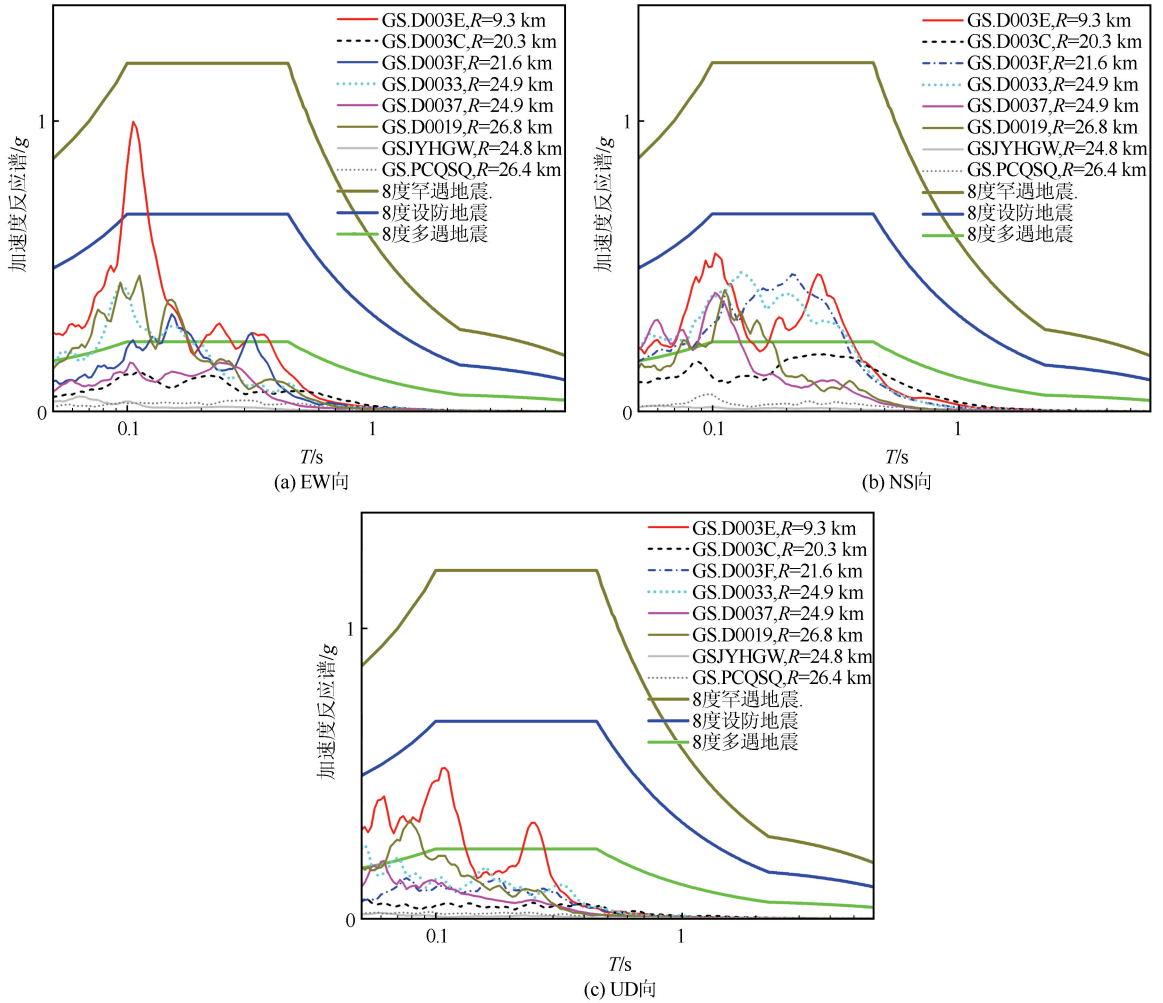


图3 近场6个土层台和2个基岩台观测记录反应谱

Fig.3 The acceleration response spectra of typical soil and rock stations

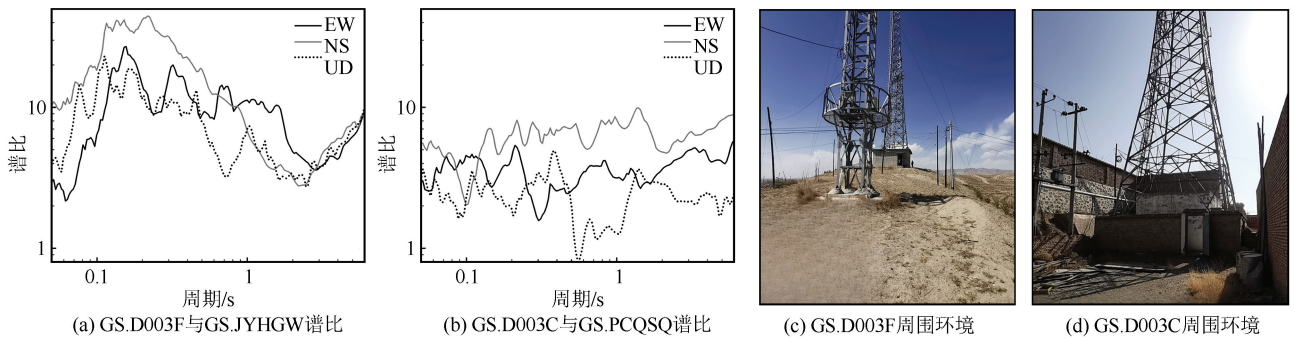


图4 土层台(GS.D003F、GS.D003C)与相邻基岩台(GS.JYHGW、GS.PCQSQ)的谱比曲线及土层台周围环境

Fig.4 Spectral ratios of soil stations (GS.D003F,GS.D003C) to neighboring bedrock stations (GS.JYHGW,GS.PCQSQ) and the surroundings of soil stations

建立的中国西部地区基岩场地衰减关系^[12]及2013年为第五代区划图建立的衰减规律^[13],以及Zhang等2022年建立的中国西部地区土层场地地震动预测模型^[14]比较,将PGV与俞言祥等2013年为第五

代区划图建立的衰减规律^[13]对比,将不同周期的加速度反应谱值 $S_a(T=0.2\text{ s},0.5\text{ s},1.0\text{ s},2.0\text{ s})$ 与Zhang等2022年建立的中国西部地区基岩场地衰减关系^[14]比较。

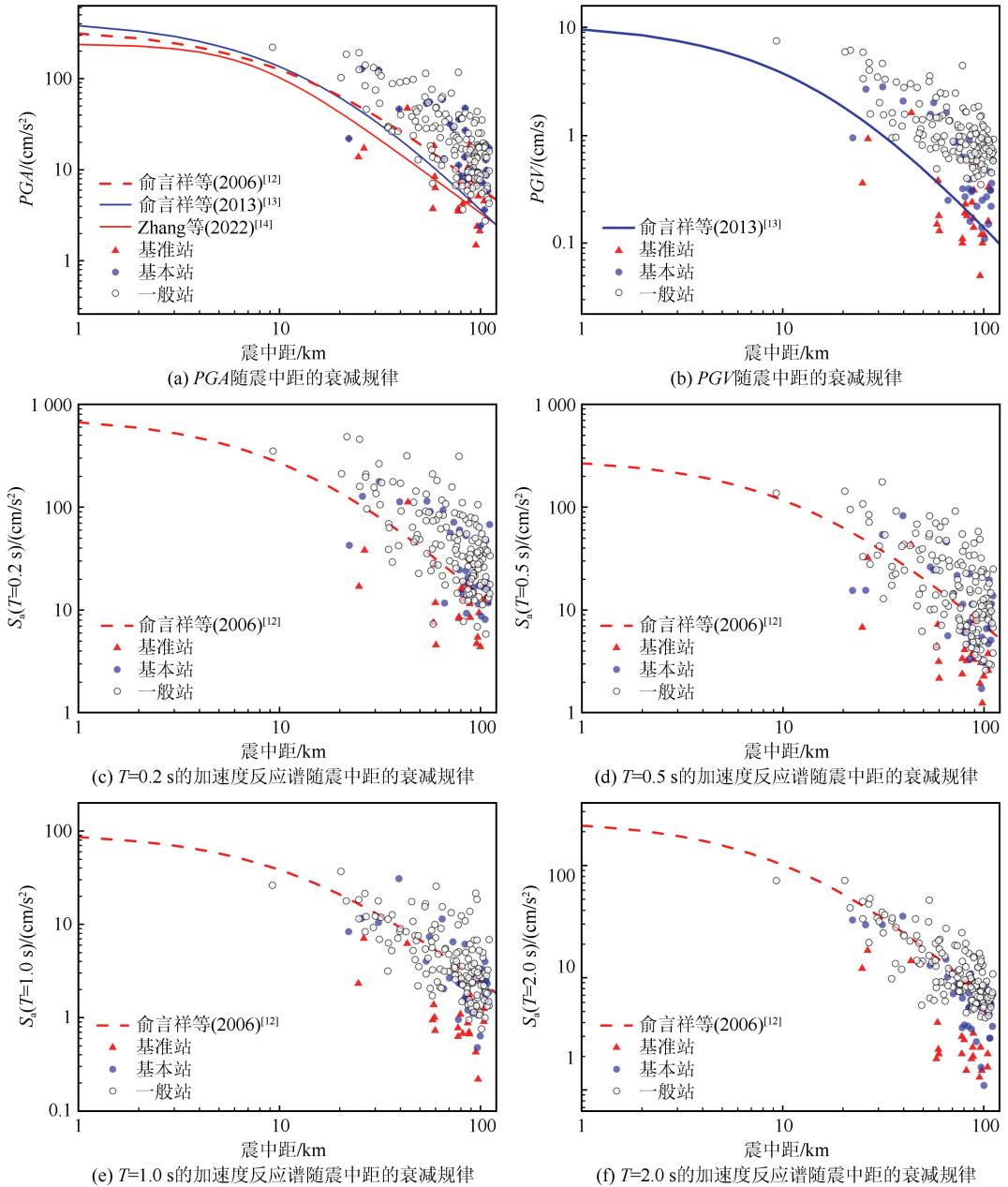


图 5 不同周期谱加速度观测值与地震动预测方程(GMPE)比较

Fig.5 Comparison of acceleration response spectra and ground motion prediction Equation (GMPE) for different periods

由图 5(a)可知,基岩场地(预警基准站)的地震动观测值比较均匀地分布在几种预测曲线的两侧,说明俞言祥等(2006)^[12]及(2013)^[13]和 Zhang 等(2022)^[14]建立的衰减模型能较好地反映此次地震基岩场地的 PGA 衰减规律。由图 5(b)可知,PGV 观测值的衰减特性与 PGA 类似,即衰减模型可以较好地预测基岩场地的地震动。由图 5(c)、(d)可知,基岩台站观测的谱加速度值普遍位于预测曲线的下方,而土层台站(基本站和一般站)观测的谱加速度值普遍位于预测曲线的上方。由图 5(e)、(f)可

知,对 $T=1.0\text{ s}$ 和 $T=2.0\text{ s}$ 的观测值而言,俞言祥等(2013)^[13]建立的衰减模型能较好地预测土层场地台站的地震动,但高估了基岩台的观测值。总体来看,土层台站观测的 PGA、PGV、 $S_a(0.2\text{ s})$ 、 $S_a(0.5\text{ s})$ 等高频(短周期)地震动的观测离散点普遍位于基岩场地地震动预测曲线之上,而 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 等中等周期地震动观测值与基岩场地的地震动预测值水平相当,说明本次地震的高频地震动幅值较大。另外,不同周期的基岩台观测值普遍小于土层台的观测值,说明土层场地对地震动的放

大作用普遍存在。

5 强震动的空间分布

此次平川区 4.9 级地震及 1920 年海原 8.5 级大

地震均发生于南华山与西华山断裂及其延伸部分构成的海原断裂带中段部位,海原断裂带在该段的产状特点为:走向 NWW、倾向 SSW,以左旋走滑为主兼有逆冲分量^[2]。图 6 为本次地震的水平向 PGA、

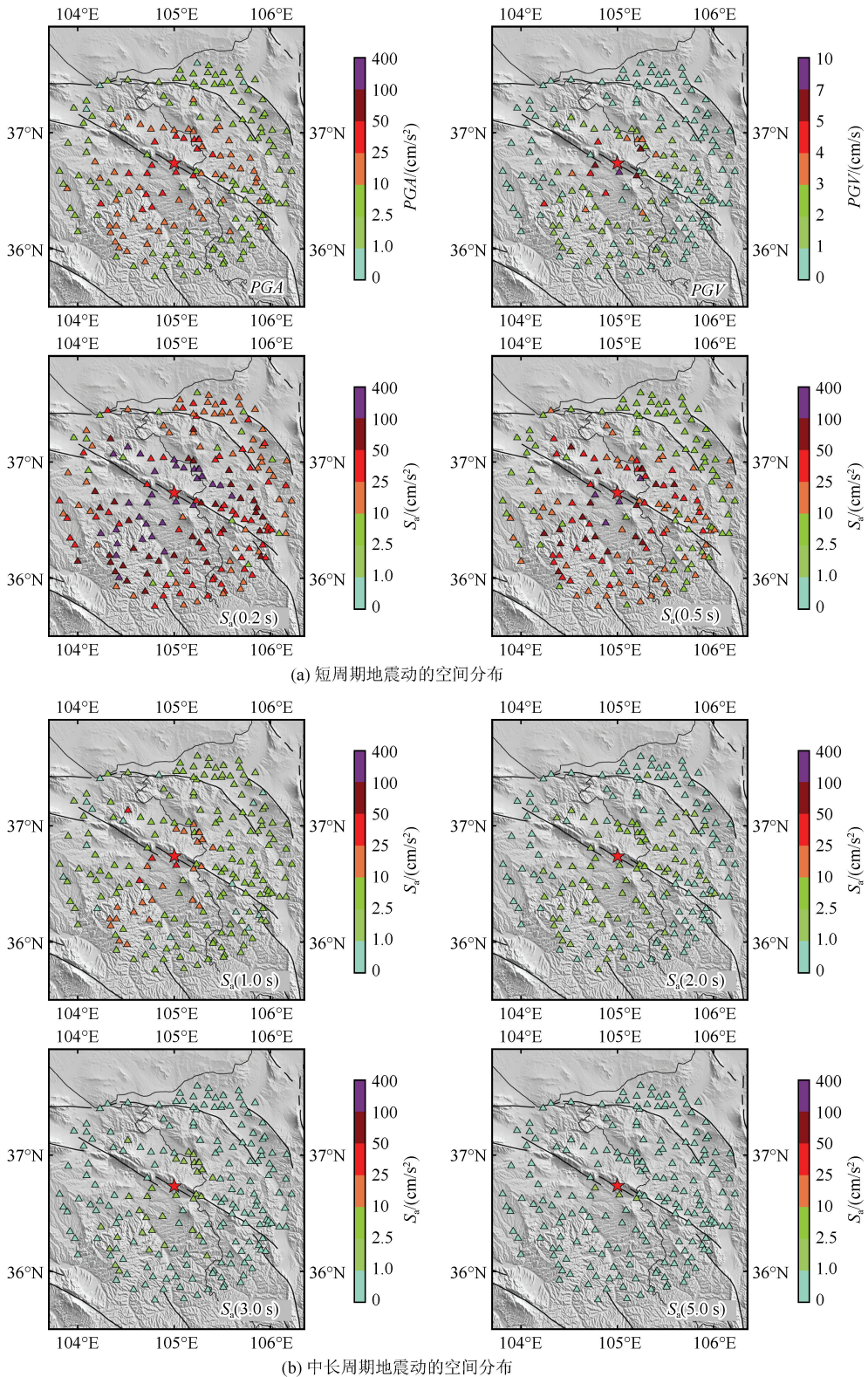


图 6 不同周期地震动的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of ground motion with different periods

PGV 和 $S_a(T=0.2\text{ s}, 0.5\text{ s}, 1.0\text{ s}, 2.0\text{ s}, 3.0\text{ s}, 5.0\text{ s})$ 的空间分布图。可以看出,不同周期地震动的空间分布情况有所不同,其中 PGA、 $S_a(0.2\text{ s})$ 和 $S_a(0.5\text{ s})$ 沿断层走向上的幅值较大,这可能与走滑断层的破裂方式引起地震动的方向性效应有关^[15]。此外,PGA、 $S_a(0.2\text{ s})$ 和 $S_a(0.5\text{ s})$ 等高频地震动在垂直于断层走向的震中西南侧的幅值也较大,尤其是 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 和 $S_a(3.0\text{ s})$ 等中等频率地震动影响场向震中西南侧延展的这种趋势更加明显,其中以 $T=1.0\text{ s}$ 的地震动反应谱最为突出。这种断层一侧(西南侧)地震动影响场占优的现象可能与上、下盘效应引起断层西南侧地震动幅值增大有一定关系^[16],但考虑到此次地震的震级较小,震源效应的影响半径有限。而平川区地处黄土高原,属陇中山地与黄土丘陵区,地貌特征以基岩山地和川坪地为主,除个别基岩山地外,地面被黄土覆盖,主要有基岩中低山地、黄土沟壑丘陵地形、山间盆地和河谷平原类型。因此,上述现象可能还与震中西南侧观测台站所处局部场地对地震动的放大作用有关^[17],尚待进一步考察。

6 结论

本文对中国地震预警台网在白银平川区 4.9 级地震中获得的 197 组加速度数据进行常规处理,通过观测值与预测模型对比、近场台站反应谱与设计谱比较,绘制出不同周期地震动空间分布图,分析了此次地震的地面运动特征,得到如下结论:

(1) 震中附近 6 个土层台的水平向反应谱在卓越周期附近(0.05~0.3 s)均超过了 8 度多遇地震的设计谱,其中 GS.D003E 台 EW 向的反应谱最大值超过 8 度设防地震的设计谱,但由于其卓越周期(0.1 s)低于该地区城乡普通多层房屋的自振周期(0.2~1.2 s),且其他周期段的谱值也远低于 8 度设防谱,因此本次地震对采取了设防措施的建筑物的破坏较小。

(2) 基准站观测的短周期地震动(如 PGA、PGV)与预测模型的一致性较好,但中等周期地震动[如 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 等]普遍小于地震动预测值。基本站和一般站观测的短周期地震动普遍大于地震动预测值,而中等周期地震动与预测值的一致性较好。说明基本站和一般站观测的地震动普遍大于基准站。结合 2 个土层台与邻近基岩台的谱比结果,这种现象可能与一般站和基本站所处土层场地和局部地形对地震动的放大作用有关。另外,本次

地震具有高频地震动卓越的特点,这符合中小地震的震源破裂特征。

(3) 不同周期地震动的空间分布情况有所不同,其中 PGA、 $S_a(0.2\text{ s})$ 和 $S_a(0.5\text{ s})$ 等短周期地震动的影响场除在沿断层走向上的幅值较大外,在垂直于断层走向的震中西南侧的幅值也较大。而 $S_a(1.0\text{ s})$ 、 $S_a(2.0\text{ s})$ 和 $S_a(3.0\text{ s})$ 等中等周期的地震动仅在垂直于断层走向的震中西南侧幅值较大的特点更加明显。这种现象可能与震源的破裂特性及震中西南侧台站所处于基岩山地、黄土丘陵和山间盆地等局部场地条件对地震动的放大作用有关,有待进一步考察。

致谢: 中国地震台网中心为本研究提供了原始的强震加速度记录数据在此表示感谢。

参考文献(References)

- [1] 段虎荣,周仕勇,李闰.基于地震活动性资料估计海原断裂倾向[J].地球物理学报,2018,61(9):3713-3721.
DUAN Hurong,ZHOU Shiyong,LI Run.Estimation of dip angle of Haiyuan faults based on seismic data[J].Chinese Journal of Geophysics,2018,61(9):3713-3721.
- [2] 施炜,刘源,刘洋,等.青藏高原东北缘海原断裂带新生代构造演化[J].地学前缘,2013,20(4):1-17.
SHI Wei,LIU Yuan,LIU Yang,et al.Cenozoic evolution of the Haiyuan fault zone in the northeast margin of the Tibetan Plateau[J].Earth Science Frontiers,2013,20(4):1-17.
- [3] 张红才,金星,王士成,等.烈度仪记录与强震及测震记录的对比分析:以 2015 年河北昌黎 $M_L4.5$ 地震为例[J].地震学报,2017,39(2):273-285.
ZHANG Hongcai,JIN Xing,WANG Shicheng,et al.Comparative analyses of records by seismic intensity instrument with strong ground motion records and seismograph stations records:taking the $M_L4.5$ Changli earthquake of Hebei Province for an example[J].Acta Seismologica Sinica,2017,39(2):273-285.
- [4] BOUCKOVALAS G D,PAPADIMITRIOU A G.Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion[J].Soil Dynamics and Earthquake Engineering,2005,25(7-10):547-558.
- [5] LEE S J,KOMATITSCH D,HUANG B S,et al.Effects of topography on seismic-wave propagation: an example from Northern Taiwan[J].Bulletin of the Seismological Society of America,2009,99(1):314-325.
- [6] 刘畅,靳平,李欣.3 种远震 P 波到时拾取方法的比较及其参数优化[J].地震学报,2018,40(4):419-429.
LIU Chang,JIN Ping,LI Xin.A comparative study on three methods of onset-time determination for teleseismic P arrivals and parameters optimization [J]. Acta Seismologica Sinica,2018,40(4):419-429.

- [7] BOORE D M, BOMMER J J. Processing of strong-motion accelerograms; needs, options and consequences[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2005, 25(2): 93-115.
- [8] CAUZZI C, CLINTON J. A high- and low-noise model for high-quality strong-motion accelerometer stations[J]. *Earthquake Spectra*, 2013, 29(1): 85-102.
- [9] 姚鑫鑫, 任叶飞, 岸田忠大, 等. 强震动记录的数据处理流程: 去噪滤波[J]. *工程力学*, 2022, 39(增刊 1): 320-329.
- YAO Xinxin, REN Yefei, KISHIDA Tadahiro, et al. The procedure of filtering the strong motion record; denoising and filtering[J]. *Engineering Mechanics*, 2022, 39(Suppl01): 320-329.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 国家质量监督检验检疫总局. 建筑抗震设计规范; GB 50011—2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China. Code for seismic design of buildings; GB 50011—2010[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 住宅设计规范; GB 50096—2011[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Design code for residential buildings; GB 50096—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2012.
- [12] 俞言祥, 汪素云. 中国东部和西部地区水平向基岩加速度反应谱衰减关系[J]. *震灾防御技术*, 2006, 1(3): 206-217.
- YU Yanxiang, WANG Suyun. Attenuation relations for horizontal peak ground acceleration and response spectrum in eastern and Western China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(3): 206-217.
- [13] 俞言祥, 李山有, 肖亮. 为新区划图编制所建立的地震动衰减关系[J]. *震灾防御技术*, 2013, 8(1): 24-33.
- YU Yanxiang, LI Shanyou, XIAO Liang. Development of ground motion attenuation relations for the new seismic hazard map of China[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2013, 8(1): 24-33.
- [14] ZHANG B, YU Y X, LI X J, et al. Ground motion prediction equation for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5% damped acceleration response spectra at periods ranging from 0.033 to 8.0 s in southwest China[J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2022, 159: 107297.
- [15] XIE J J, WANG W C, AN Z, et al. Quantification of rupture directivity effects on strong ground motion during the 8 January 2022 $M_s 6.9$ Menyuan earthquake in Qinghai, China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1068536.
- [16] LI X J, ZHOU Z H, YU H Y, et al. Strong motion observations and recordings from the great Wenchuan earthquake[J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2008, 7(3): 235-246.
- [17] XIE J J, LI X J, WEN Z, et al. Soil profile database and site classification for national strong-motion stations in Western China[J]. *Seismol Res Lett*, 2022, 93: 1930-1942.

(本文编辑: 张向红)