



Analysis of the Impact of Topographic Effect on Ground Motion Characteristics in the Extreme Seismic Region of Yangbi $M_s6.4$ Earthquake on May 21, 2021

Libao Zhang¹, Lei Fu^{1,*}, Zhenghua Zhou², Guoliang Lin³,

Su Chen⁴, Aiwen Liu¹, Xiaojun Li^{1,4}

¹ Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

² Nanjing Tech University, Jiangsu 211816, China

³ Yunnan earthquake Agency, Yunnan 650216, China

⁴ Beijing University of Technology, Beijing 100085, China

* Fu Lei. Email: fulei11@cea-igp.a.cn

ABSTRACT

This paper conducted a damage investigation on the micro epicenter of the Yangbi $M_s6.4$ earthquake on May 21, 2021. Based on the observation data of mobile observation topographic array, the influence of topographic effect on ground motion characteristics is analyzed. It is found that if the seismic wave is incident perpendicular to the mountain trend, the steep slope will amplify the high-frequency part of the seismic wave, and there are obvious differences in the low-frequency part of Fourier amplitude spectrum along the mountain trend and vertical at different elevations. The site component (κ_0) of high-frequency attenuation parameters is calculated by spectral attenuation method, then the relationship between the horizontal component of κ_0 , the vertical component of κ_0 , the ratio of horizontal to vertical component of κ_0 and station elevation, site weakness and dominant frequency is analyzed respectively. The results show that in the small-scale range, the horizontal and vertical components of κ_0 have strong spatial heterogeneity, which needs further verification.

Keywords: earthquake damage phenomenon, high frequency attenuation parameters, site effect, topographic effect

2021年5月21日漾濞 $M_s6.4$ 地震极震区地形效应对地震动特性的影响分析

张立宝¹, 傅磊^{1,*}, 周正华², 林国良³, 陈苏⁴, 刘爱文¹, 李小军^{1,4}

¹ 中国北京 100081 中国地震局地球物理研究所

² 中国江苏 211816 南京工业大学

³ 中国云南 650216 云南省地震局

⁴ 中国北京 100124 北京工业大学

* 傅磊. 电子邮箱: fulei11@cea-igp.a.cn

摘要

本文对 2021 年 5 月 21 日漾濞 $M_S6.4$ 地震微观震中秀岭村进行了震害调查。以流动观测地形台阵观测资料为基础, 分析了地形效应对地震动特性的影响, 分析表明若地震波垂直山脉走向入射, 陡坡会放大地震波的高频部分, 不同高程傅里叶幅值谱沿山脉走向和垂向的低频部分存在明显差异。同时, 利用谱衰减法计算高频衰减参数的场地影响项 (κ_0), 分析 κ_0 水平分量、竖向分量、水平分量/竖向分量分别与台站高程、场地软弱程度、卓越频率的关系, 分析结果表明, 在小尺度范围内, κ_0 的水平分量和竖向分量具有较强的空间不均匀性, 这一结果还需要进一步验证。

关键字: 震害现象, 高频衰减参数, 场地效应, 地形效应

1. 引言

我国地形多种多样, 山区面积广大, 山区人口分布广泛, 历史震害经验表明山区复杂地形会加重震害, 造成巨大的生命和财产损失。在实际地震中, 复杂地形会改变地震波的持时、振幅和频率特性, 使坐落其上的结构物遭受预期之外的严重破坏, 这一现象被称为地形效应。1970 年云南通海地震中, 孤立突出地形的地震烈度较周围平地高出 0.5~1.0 度^[1]; 1971 年 San Fernando 地震中, 地形对高频地震动放大作用高达 50%^[2]; 1985 年 Central Chile 地震中, 山脊顶部建筑发生更严重的破坏; 1989 年 Loma Prieta 地震中, Robinwood 山脊较于邻近地区发生更大的破坏; 1994 年 Northridge 地震中, Tarzana 山顶加速度记录高达 1.82 g, 造成了严重破坏^[3]; 2008 年汶川地震中, 三面临空山脊平台上的青川县木鱼镇中学遭受毁灭性破坏^[4]。对地形地震记录分析发现, 凸起地形(山脊、山峰、小山包等)会放大地震动加速度^[5], 随着高程的增加, 加速度放大还具有逐渐增强的规律性^[6]。凸起地形放大效果与其自身特性相关, 如小山会放大与其卓越频率相近的地震波^{[2][3][7]}, 即引起山体的共振, 但对高于山体卓越频率的频率成分会产生滤波效果^[8]。凸起地形的形状同样影响放大效应, 如山体的延伸方向^[9]。但也存在山顶地震动水平低于山底的异常现象^[8]。综上所述, 地形效应对地震动具有显著放大作用, 并加重工程结构震害, 开展复杂地形作用下的实际地震观测和地形效应分析显得尤为重要。本文对

2021 年 5 月 21 日漾濞地震进行了震后地形流动观测并分析了地形效应对震害的影响。

此次地震发生在川滇块体西南边界, 位于青藏高原向东挤出的离散地带, 漾濞县位于横断山滇西高山峡谷区, 地形起伏较大。云南省大理白族自治州漾濞县发生前震-主震-余震型系列地震。当日于 21 时 21 分发生 $M_S5.6$ 前震 1 次, 21 时 48 分发生 $M_S6.4$ 主震, 随后发生 $M_S5.0$ 和 $M_S5.2$ 余震各 1 次。主震后余震丰富, 截至 2021 年 5 月 26 日, 云南区域地震台网共记录到 $M_L0.1\sim5.2$ 余震 2426 次。基于漾濞县复杂的地形和丰富的余震, 于 2021 年 6 月 8 日开展流动观测。基于流动观测数据, 分析了地形效应对地震动特性的影响。

本文利用此次漾濞主震的微观震中秀岭村不同高程架设的流动观测台阵, 根据捕捉到的余震记录, 分析了具有一定走向的山脉和盆地对不同方向入射地震波频率特性的影响, 利用谱衰减法^[10]分析讨论了 κ_0 水平分量和竖向分量及二者比值分别与卓越频率、高程和场地软弱程度的相关性。

2. 地形震害差异与流动台阵架设

秀岭村是此次漾濞 $M_s6.4$ 地震的微观震中, 所处山脉山顶到山脚直线距离约 4.5 km, 高差约为 800 m, 如图 1 所示。调查发现, 位于山顶的房屋破坏较重, 普遍表现为墙体倒塌或严重破坏, 如图 2a 和图 2b 所示; 位于山腰的房屋表现为墙体垮塌与地基沉降, 如图 2c 和图 2d 所示; 位于山脚的房屋破坏相对较轻, 没有发生墙体倒塌, 多以构造柱与承重墙接触面的拉

裂为主, 如图 2e 所示。

基于上述地形震害差异, 于 2021 年 6 月 8 日在山顶、山腰、山脚分别布置 4 处强震动观测台站, 并于淮安村布设一处参考台, 场地特征和台站编号如表 1 所示, 台站的空间分部如图 3 所示。其中山腰台地的 NO175 台站, 由于 GPS 授时和突发电池故障, 只记录到 8 组地震动。

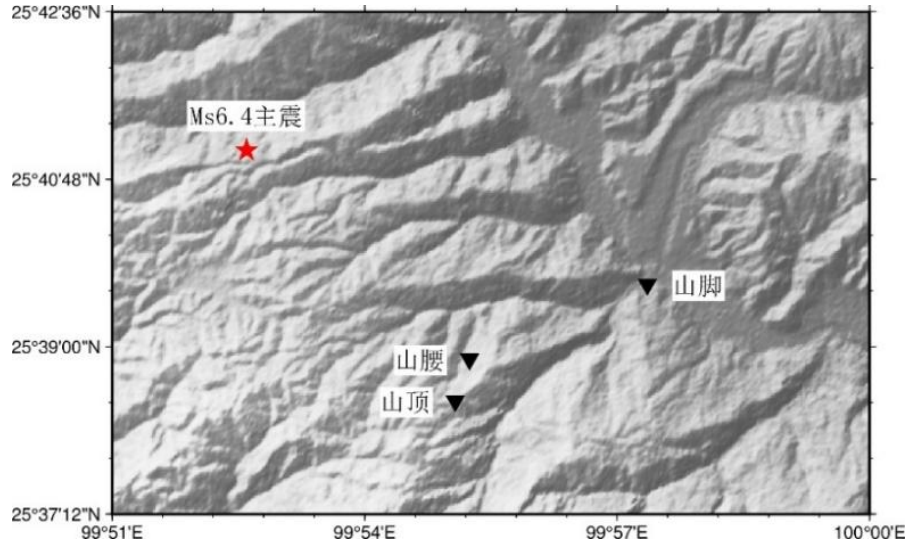


图 1 秀岭山脉地形



图 2 山顶/山腰/山脚地震破坏情况对比

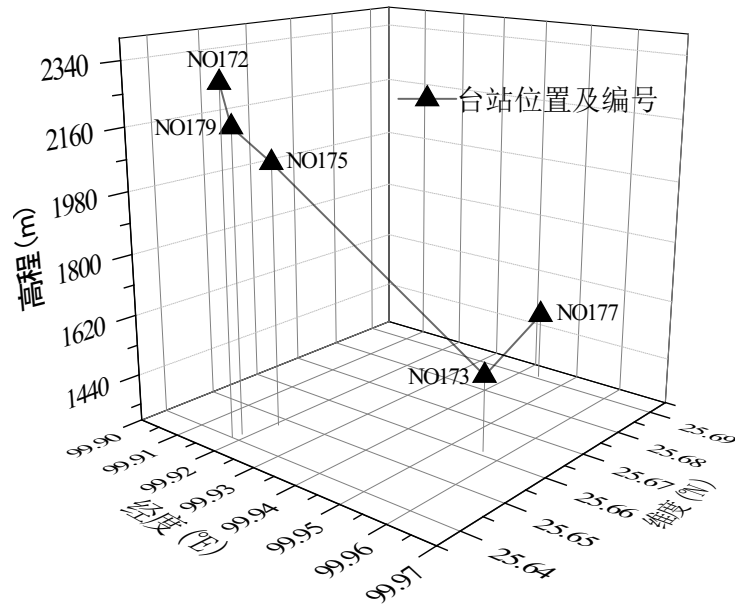


图3 观测台站空间分布

表1 流动地形台阵台站信息

台站编号	场地类型	仪器类型	经度	纬度	高程(m)	记录组数
NO172	山顶台地	ETNA2	99.92	25.64	2300	40
NO179	山腰陡坡	ETNA2	99.92	25.64	2180	40
NO175	山腰台地	ETNA2	99.92	25.65	2070	8
NO173	山脚缓坡	ETNA2	99.96	25.66	1523	40
NO177	狭长盆地	ETNA2	99.94	25.69	1505	39

3. 台阵数据记录与分析

3.1. 数据记录

自2021年6月8日地形台阵架设以来,台阵记录到多起余震,震级分布在1.0到4.9之间,震中距在0.9 km到25 km之间,具体记录信息见表2。图4为地形台阵台站与余震的空间分布及高程示意图,其中红色五角星代表漾濞主震,黄色圆点代表余震,圆点直径越大代表震级越大。从余震的空间分布可以看出,大部分余震发生在主震破裂面的前端方向;1次余震发生在主震破裂面后端方向;4次地震发生在距离主震破裂面以外区域。

表2 流动地形台阵地震记录情况

(2021年6月8日-7月11日)

震级范围	地震次数	记录组数	震中距范围
1.0-1.9	31	63	0.9-13.2 km
2.0-2.9	29	92	0.9-16.4 km
3.0-3.9	2	8	2.2-8.5 km
4.0-4.9	1	4	5.8-24.9 km
总计	63	167	--

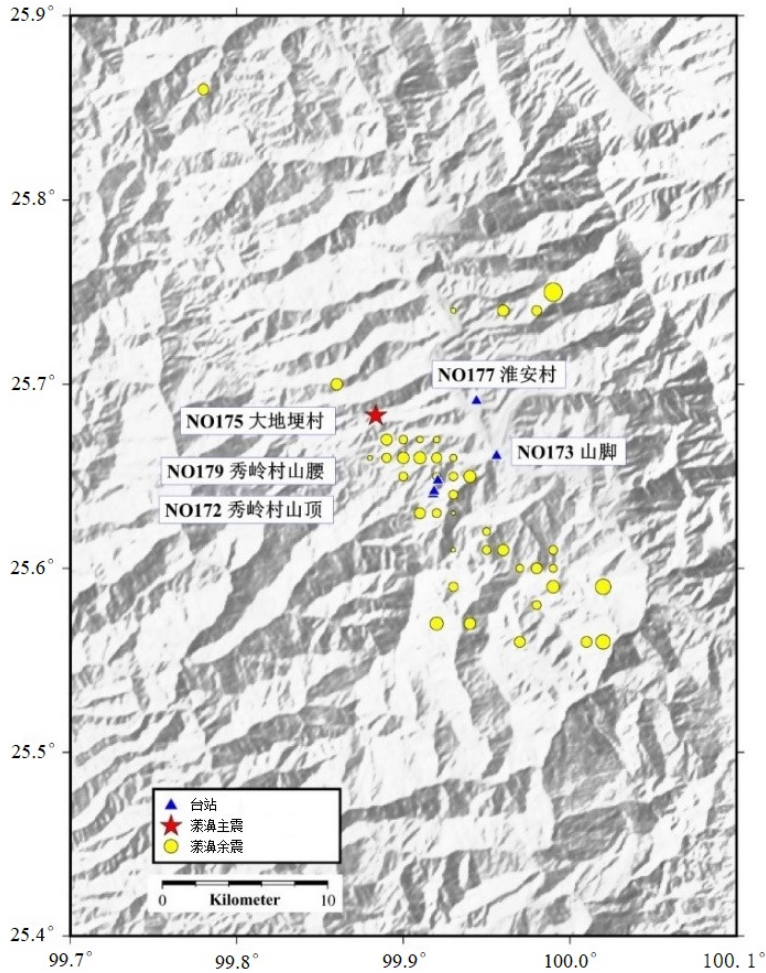


图4 流动台阵分布及余震分布

3.2. 地形台阵数据分析

3.2.1 对地形台阵的峰值加速度分析

本文根据流动台站和余震的空间分部、余震的大小以及山脉走向，选取三次地震进行分析，台站及余震的空间分部如图5所示。三次地震分别为2021年6月28日发生的 $M_S4.1$ 地震，震源深度9 km，位于山脉走向的前方；2021年7月4日发生的 $M_S3.4$ 地震，震源深度8 km，位于山脉走向的垂向；2021年6月28日发生的 $M_S2.5$ 地震，震源深度11 km，位于山脉走向的垂向，离山脉和台站最近。表3给出了三次地震中四个台站对应的震中距。由于NO175台站地震记录缺失，下文只用台站NO172、NO179、NO173、

NO177的地震记录来进行地形效应的影响分析，四个台站在 $M_S4.1$ 、 $M_S3.4$ 和 $M_S2.5$ 地震作用下的加速度三分量时程曲线分别如图6、图7和图8所示：横坐标代表时间，单位为秒(s)；纵坐标代表加速度，单位为 cm/s^2 ；从左到右依次为东西、南北和竖向；右上角给出了峰值加速度(PGA)，左上角为台站编号。

表3 三次地震中四个台站对应的震中距(km)

震级\台站	NO172	NO179	NO173	NO177
$M_S4.1$	16.8	16.6	13.8	12.0
$M_S3.4$	14.2	14.2	13.0	15.7
$M_S2.5$	11.8	11.8	12.9	12.5

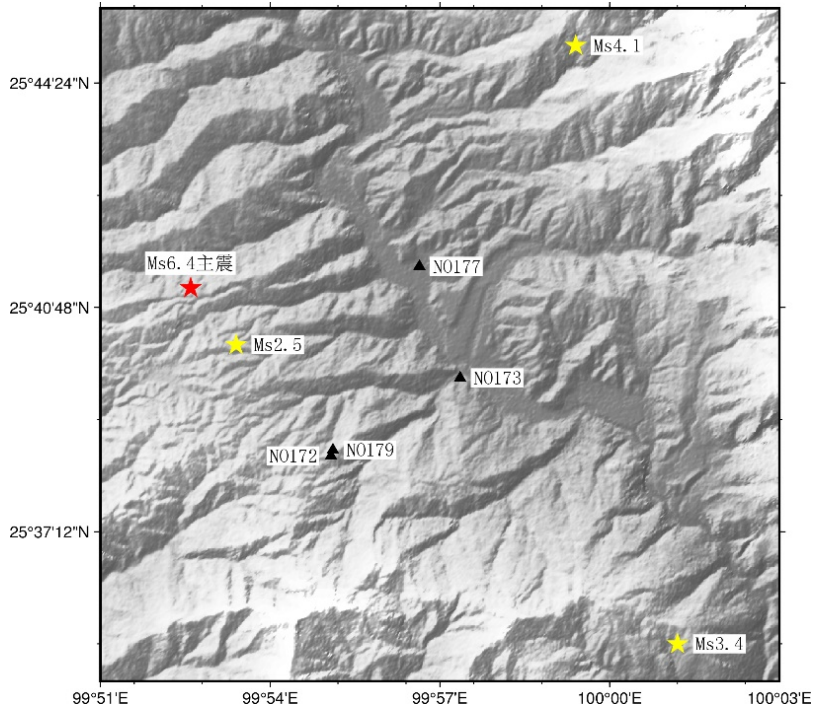


图 5 主震、台站、三个余震空间分布

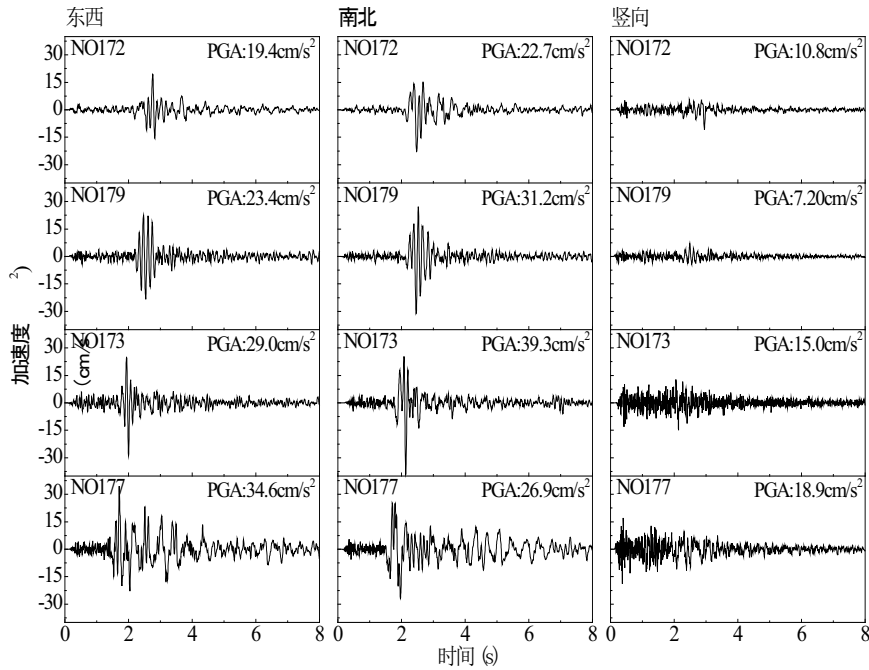


图 6 面波震级 4.1 地震作用下流动台阵的加速度三分量时程

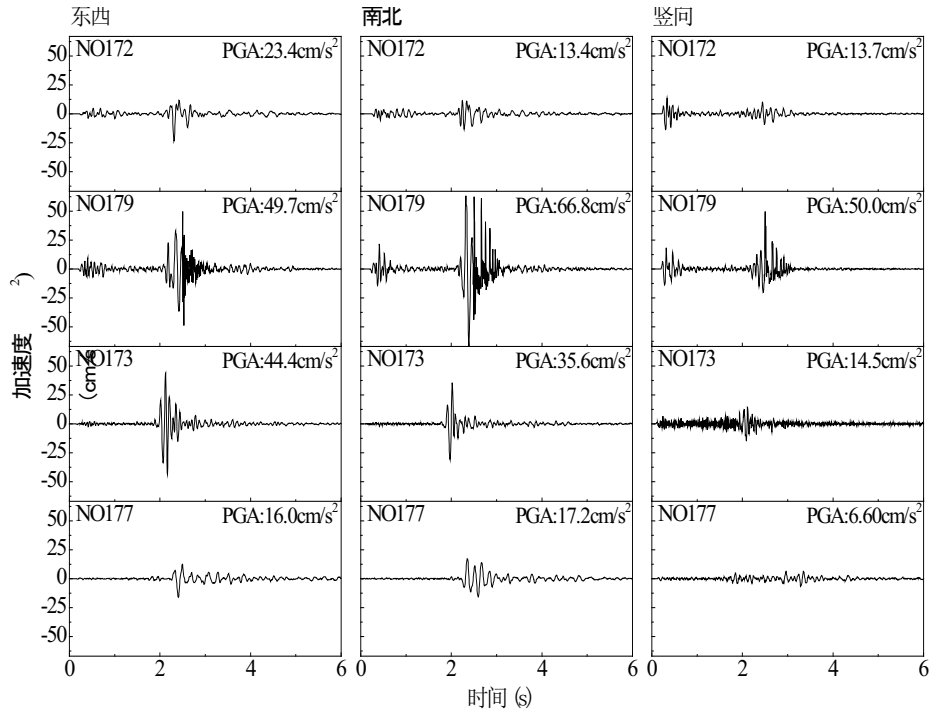


图 7 面波震级 3.4 地震作用下流动台阵的加速度三分量时程

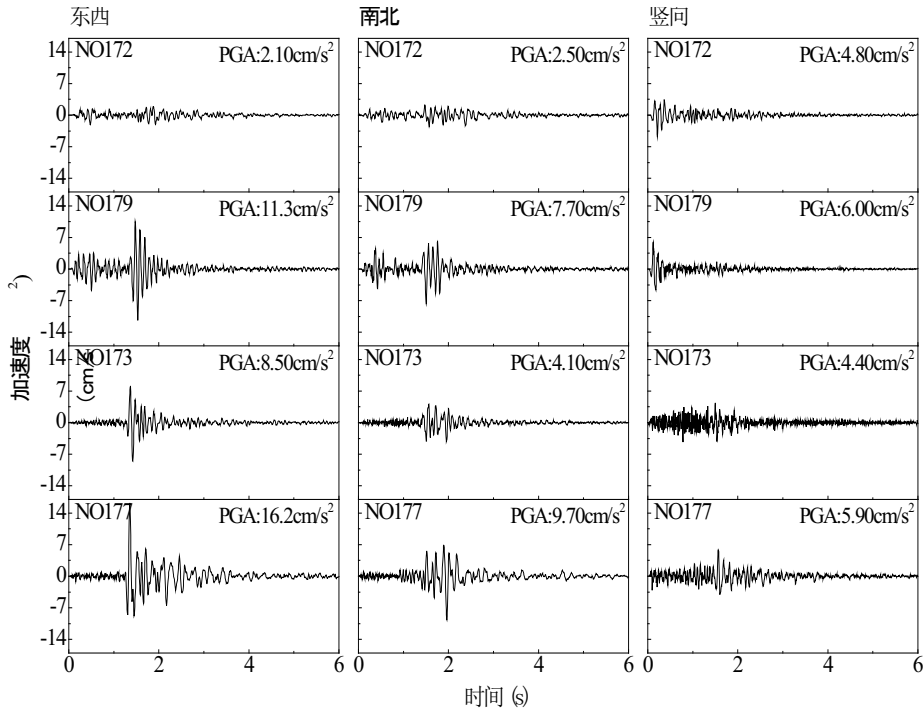


图 8 面波震级 2.5 地震作用下流动台阵的加速度三分量时程

图9从左到右依次展示了 $M_s4.1$ 、 $M_s3.4$ 和 $M_s2.5$ 地震作用下, 四个地形台站三分量 PGA 的变化趋势, 方块、圆圈和三角形分别代表东西、南北和竖向 PGA 值, 横坐标代表台站编号, 从左到右依次为山顶台地 NO172、山腰陡坡 NO179、山脚缓坡 NO173 和狭长盆地 NO177 台站。

观察图9可见, $M_s4.1$ 地震中, 随着台站海拔的降低(从左到右), 东西向 PGA 单调增大, NO172 台站为 19.4 cm/s^2 , NO177 台站为 34.6 cm/s^2 ; 南北向 PGA 先增大再减小, NO172 台站为 22.7 cm/s^2 , NO173 台站为 39.3 cm/s^2 , NO177 台站为 26.9 cm/s^2 ; 竖向 PGA 先减小再增大, NO172 台站为 10.8 cm/s^2 , NO179 台站为 7.2 cm/s^2 , NO177 台站为 18.9 cm/s^2 。 $M_s3.4$ 地震中, 三个方向上, NO179 台站的 PGA 都大于其它台站, 南北向为 66.7 cm/s^2 , 东西和竖向为 49.7 cm/s^2 ; 东西向最小 PGA 出现在 NO177 台站, 为 16.0 cm/s^2 ; 南北向最小 PGA 出现在 NO172 台站, 为 13.4 cm/s^2 ; 竖向最小 PGA 出现在 NO177 台站, 为 6.6 cm/s^2 , 而 NO172 台站和 NO173 台站相当, 为 14.0 cm/s^2 左右。 $M_s2.5$ 地震中, 水平向 PGA 最大值都出现在 NO177 台站, 分别为东西向 16.2 cm/s^2 和南北向 9.7 cm/s^2 ; 其次是 NO179 台站, 分别为东西向 11.3 cm/s^2 和南北向 7.7 cm/s^2 ; NO172 台站最小, 分别为东西向 2.1 cm/s^2 和南北向 2.5 cm/s^2 ; 所有台站竖向 PGA 相差不大。

分析图9发现, 在三次不同震级的地震作用下,

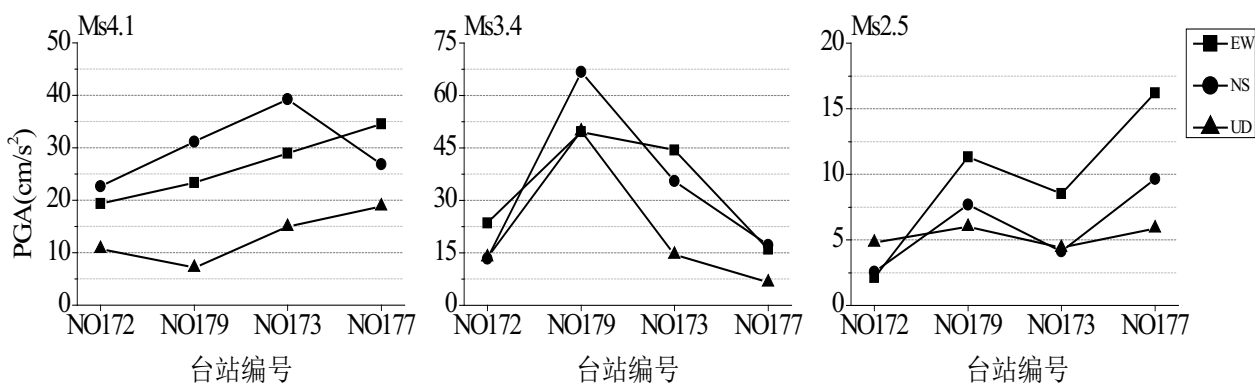


图9 三个地震作用下不同高程(台站) PGA 的变化规律

山顶台地 NO172 台站的水平向 PGA 都小于山脚缓坡 NO173 台站和山腰陡坡 NO179 台站; 山腰陡坡 NO179 台站在 $M_s3.4$ 和 $M_s2.5$ 地震作用下, PGA 存在异常放大现象; 盆地 NO177 台站在 $M_s4.1$ 和 $M_s2.5$ 地震作用下, PGA 各方向上普遍大于其它台站, 而在 $M_s3.4$ 地震作用下 PGA 比其它台站都小。观察图5发现, $M_s4.1$ 和 $M_s2.5$ 地震震中到 NO177 台站的方向与盆地延伸方向垂直, 而 $M_s3.4$ 地震到 NO177 台站的方向几乎与盆地延伸方向平行, 所以 $M_s4.1$ 和 $M_s2.5$ 地震的地震波受狭长盆地效应影响更大; 且存在东西向 PGA 大于南北向 PGA 的现象, 这与盆地走向更接近南北相关。同时观察图5还看到, $M_s3.4$ 和 $M_s2.5$ 地震震中到 NO179 台站的方向与山脉延伸方向垂直, 而 $M_s4.1$ 地震震中到 NO179 台站的方向与山脉延伸方向呈锐角, 在山脉走向和垂向的刚度差异与 NO179 台站所处陡坡的共同作用下, 山腰陡坡 NO179 台站 PGA 在地震波垂直山脉走向入射时出现异常放大现象。

对图9观察分析可知, 狭长盆地的盆地效应存在方向差异, 会放大垂直走向入射地震波的 PGA; 垂直山脉走向入射地震波的 PGA 会被山腰陡坡异常放大, 而平行山脉走向入射的地震波则几乎不受影响; 虽然 NO172 台站被命名为山顶台地, 但观察图5发现, 实际地形非常复杂, 其所处位置并不是真正意义上的山顶, 所以三个地震作用下其三个方向 PGA 相较其它台站总体偏小。

3.2.2 对地形台阵傅里叶幅值谱 (FAS) 分析

根据上文分析结果,为了更好地认识山脉走向对地震波的影响,将 $M_s4.1$ 、 $M_s3.4$ 、和 $M_s2.5$ 地震作用下四个台站南北、东西方向的加速度记录向山脉走向和垂向正交分解,并比较分析各台站的傅里叶幅值谱,结果如图 10 所示:横坐标代表频率 (Frequency),单位为赫兹 (Hz);纵坐标代表傅里叶幅值谱 (FAS),单位为 cm/s^2 。

观察图 10 可见, $M_s4.1$ 地震中, NO179 台站在大约 7 Hz 左右处的水平向幅值明显大于其它台站,而 7 Hz 左右处的竖向幅值与 NO172 台站相当,比 NO177 台站小,大于 NO173 台站,在小于 5 Hz 频段内水平向幅值明显小于其它台站; NO173 台站在大于 5.5 Hz 频段内水平向幅值明显小于其它台站,而在低于 2 Hz 频段内的水平向幅值明显大于 NO172 台站和 NO179 台站; NO177 台站在 2-3 Hz 频段之间有明显峰值。 $M_s3.4$ 地震中,与其它两个地震相比, NO179 台站的水平分量在小于 2 Hz 频段内、南北分量大于 15 Hz 的频段内可能存在问题,在 6-15 Hz 频段内幅值明显大于其它台站幅值; NO173 台站在小于 7 Hz

频段内的水平向上,除了垂向上 3 Hz 左右处明显小于 NO172 台站外,都比 NO172 台站大;与 $M_s4.1$ 地震的台阵记录对比发现, NO177 台站在大于 5 Hz 频段内所有方向幅值下降明显,且小于所有台站。 $M_s2.5$ 地震中, NO179 台站的水平向幅值在 7-15 Hz 频段范围内明显大于 NO172 台站和 NO173 台站,在更小的频段范围内,走向上三个台站幅值大小相当,垂向上三个台站幅值大小相差较大;水平方向上, NO177 台站在 8 Hz 处开始明显下降,比 $M_s3.4$ 地震下降的晚,且小于 5 Hz 频段内幅值明显大于其它台站。

分析图 10 发现,虽然三个地震作用下山腰陡坡 NO179 台站在 7-15 Hz 频段内的水平向幅值大于其它台站,但垂直山脉入射的 $M_s3.4$ 和 $M_s2.5$ 地震中差异更加明显,且相较于 $M_s3.4$ 地震, $M_s2.5$ 地震中 NO179 台站的峰值向高频移动。垂直山脉入射的 $M_s2.5$ 地震作用下,不同高程处,山脉垂向低频差异较大,山脉走向低频差异较小。三个地震作用下,盆地 NO77 台站高频衰减起始频率不同, $M_s3.4$ 地震为 5 Hz 左右, $M_s2.5$ 地震为 7 Hz 左右, $M_s4.1$ 地震为 10 Hz 左右。

对图 10 观察分析可知,对于具有一定走向的山

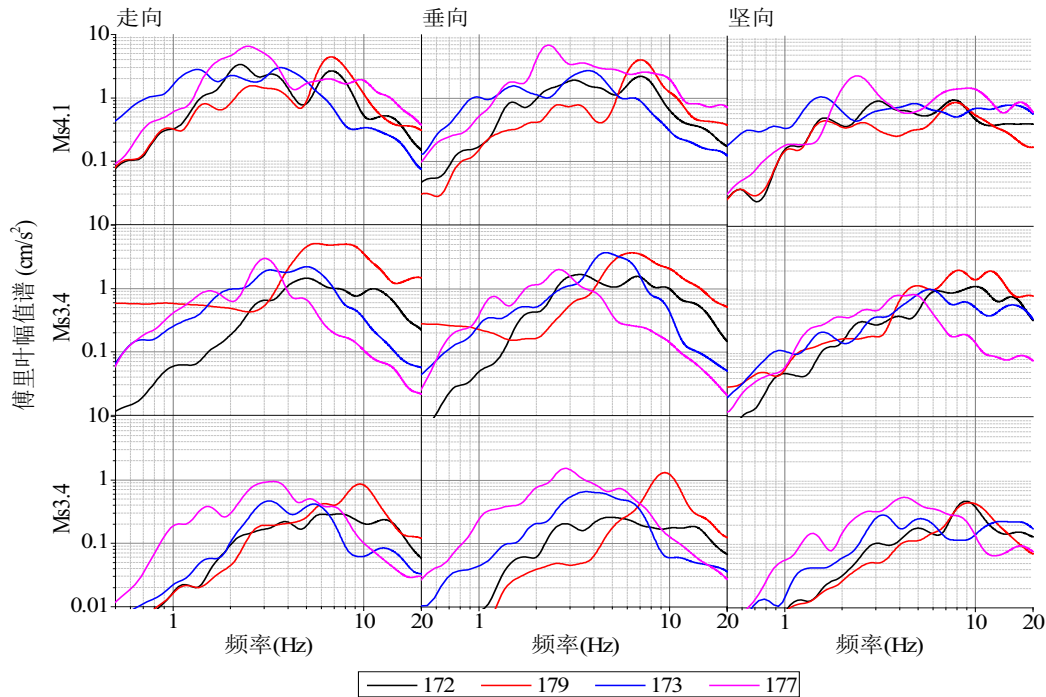


图 10 三个地震作用下流动台阵加速度三分量傅里叶谱

脉,对于近场小震,不同方向入射的地震波沿山脉走向分量和垂向分量频谱成份存在差异;山腰陡坡对地震波的高频成分具有放大效应,尤其是在地震波垂直于山脉走向入射的情况下;盆地 NO177 台站低频放大明显,且地震震级越小,与地形台站对比越明显,且沿盆地延伸方向入射的地震波,其高频衰减起始频率更低,高频幅值更小。

3.2.3 对地形台阵场地影响项的分析

上述只是地形效应的定性分析,而强地震动模拟、地震动预测等的实际运用需要确定具体场地参数的变化规律。 κ 的场地影响项(κ_0)是一个重要的场地参数,对强地震动模拟和地震动预测方程的建立和调整具有重要意义^{[11][12]}。本文利用 5 个台站的全部记录分析了 κ_0 参数与台站高程、场地软弱程度和卓越频率的变化关系。本文使用 HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectra Ratio) 方法,又称水平/竖向谱比法,确定了地形场地的软弱程度。HVSR 方法最早由 Nakamura^[13] 提出,利用地脉动研究场地效应,之后由 Lermo 等^[14] 推广到基于强震动数据研究场地效应。该方法利用单台记录地震动水平分量傅氏谱与竖向分量傅氏谱的比值反映土层对地震动不同频率成分的影响,至今仍

被广泛应用于局部场地特性的研究^{[15][16][17]}。

图 11 为根据 5 个台站的所有地震记录分别计算得到的平均 HVSR,图中可以看出:在小于 0.7 Hz 的长周期段,5 个台站的 HVSR 基本相似;NO172、NO175、NO177 放大峰值宽度在 2~7 Hz 频段内,NO173、NO179 放大峰值宽度在 3~12 Hz 频段内;在 13~20 Hz 的高频段,NO179、NO175 放大效应明显。根据放大峰值宽度和卓越频率,将场地从软到硬、从 1 到 4 分成四个等级,5 个台站场地对应的等级依次为:NO177 (1),NO172、NO175 (2),NO179 (高频放大受斜坡场地影响,3),NO173 (4)。

Anderson 和 Hough^[10]提出了谱衰减法来计算高频衰减参数(κ),它表征了加速度傅里叶振幅谱的高频衰减现象。近年来,越来越多的学者注意到 κ 对地震动模拟结果和地震动预测方程的建立有显著的影响。为更准确地计算局部场地放大系数, Douglas 等^[18]采用了钻孔剪切波速度剖面、地壳速度结构、标准贯入实验值和地表到基岩的深度等场地参数开展计算,结果表明高频部分的场地放大效应只有在合理考虑 κ 时才能表达。Mena 等^[19]在开展宽频带地震动模拟研究中指出,当 κ 从 0.01 s 增大到 0.1 s 时,模拟结

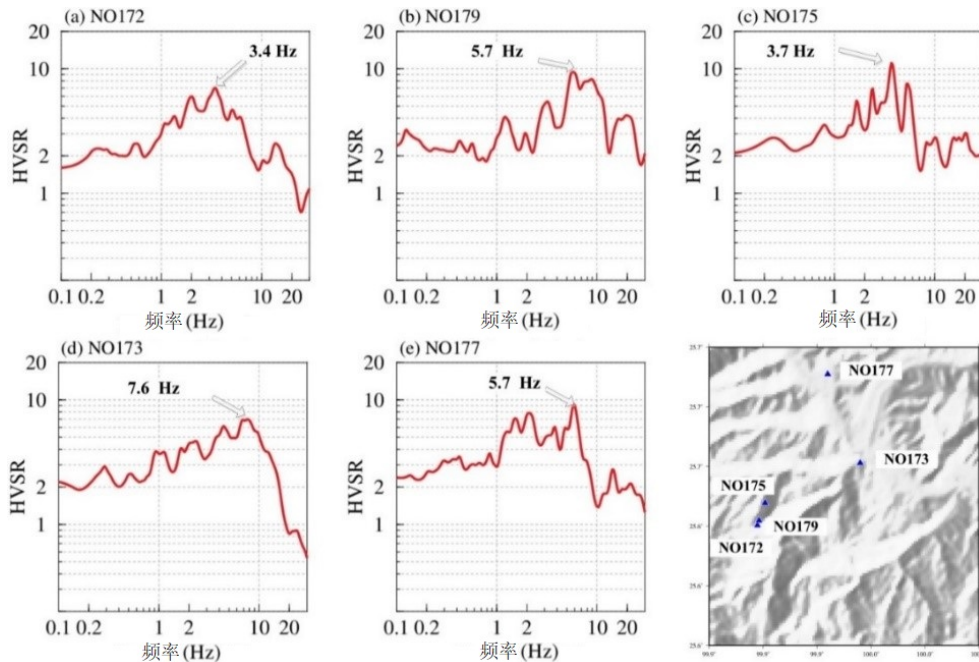


图 11 流动台站 HVSR 结果

果的 PGA 减小 2.5 倍, 阿里亚斯烈度减小了 8 倍。Laurendeau 等^[20]研究了 κ 对加速度反应谱的影响。结果显示, 当 κ 从 0.01 s 增大到 0.06 s 时, 加速度反应谱的峰值周期向长周期部分移动, 最大振幅减小了约 4 倍。傅磊和李小军^[11]提出了基于地形高程的 κ 模型, 并通过随机有限断层法模拟了 2008 年汶川 $M_S 8.0$ 地震的震动影响场。结果表明, 当更合理地考虑 κ 时, 模拟 PGA 与观测 PGA 间的相对误差平均减小 40% 左右。因此, 本文基于流动观测数据初步分析了加速度记录水平向和竖向分量的 κ (κ_H 和 κ_V) 与场地卓越频率、场地软弱程度和地形高程之间的相关性。

根据强震动记录, 首先采用谱衰减法分别计算了 5 个台站的 κ 。因为流动观测数据的震中距集中在 25 km 以内, 通过求取平均值得到单个台站 κ 的场地影响项 (κ_0)^[21]。结果如图 12 所示。表 4 列出了 5 个台站的高程、场地软弱程度、卓越频率、 κ_H 、 κ_V 、以及 κ_H/κ_V 。通过分析 κ_0 与场地卓越频率、高程、场地软

弱程度的相关性发现, 在近距离范围内 (<30km), κ_H 与场地卓越频率和地形高程间没有发现明显的相关性 (图 13a、d), 但 κ_V 随着卓越频率的增大而减小, 随着地形高程的增大而增大 (图 13b、e), κ_H/κ_V 变化趋势则相反 (图 13c、f); κ_H 随着场地软弱程度的增大而增大 (图 13g), 而 κ_V 和 κ_H/κ_V 与场地软弱程度间未发现明显相关性 (图 13h、i)。以上结果表明, 在小尺度范围内 κ_H 和 κ_V 具有较强的空间不均匀性, 对地震动模拟和地震动预测方程的建立等方面的研究, 采用单个 κ_H 表征区域的平均值均可能引起较大的不确定性。需要注意的是, 本文场地软弱程度是根据场地卓越频率和峰值放大频带宽度经验确定的, 可能导致软弱程度划分不准确, 但是不会影响总体趋势。另外, 由于台站数量较少, 对于本文得到的 κ_H 和 κ_V 与场地卓越频率、地形高程和场地软弱程度等场地条件的相关性需在未来工作中对这一结果进一步验证。

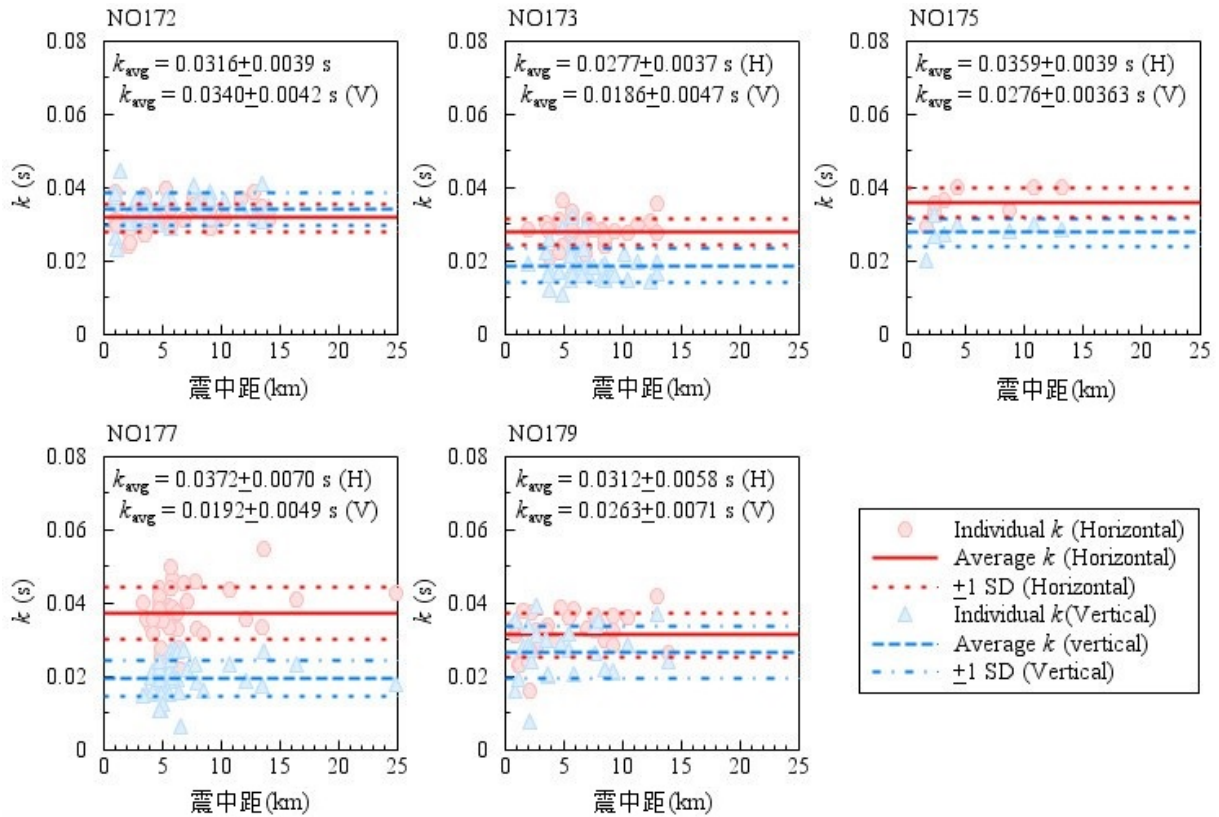


图 12 高频衰减参数拟合结果

表 4 五个流动台高频衰减参数信息

台站编号	高程 (m)	软弱程度	f_{res} (Hz)	κ_H (s)	κ_V (s)	κ_H / κ_V
NO172	2300	2	3.40	0.0316	0.0340	0.93
NO175	2070	2	3.70	0.0359	0.0276	1.30
NO179	2180	3	5.69	0.0312	0.0263	1.19
NO177	1523	1	5.86	0.0372	0.0192	1.94
NO173	1505	4	7.58	0.0277	0.0186	1.49

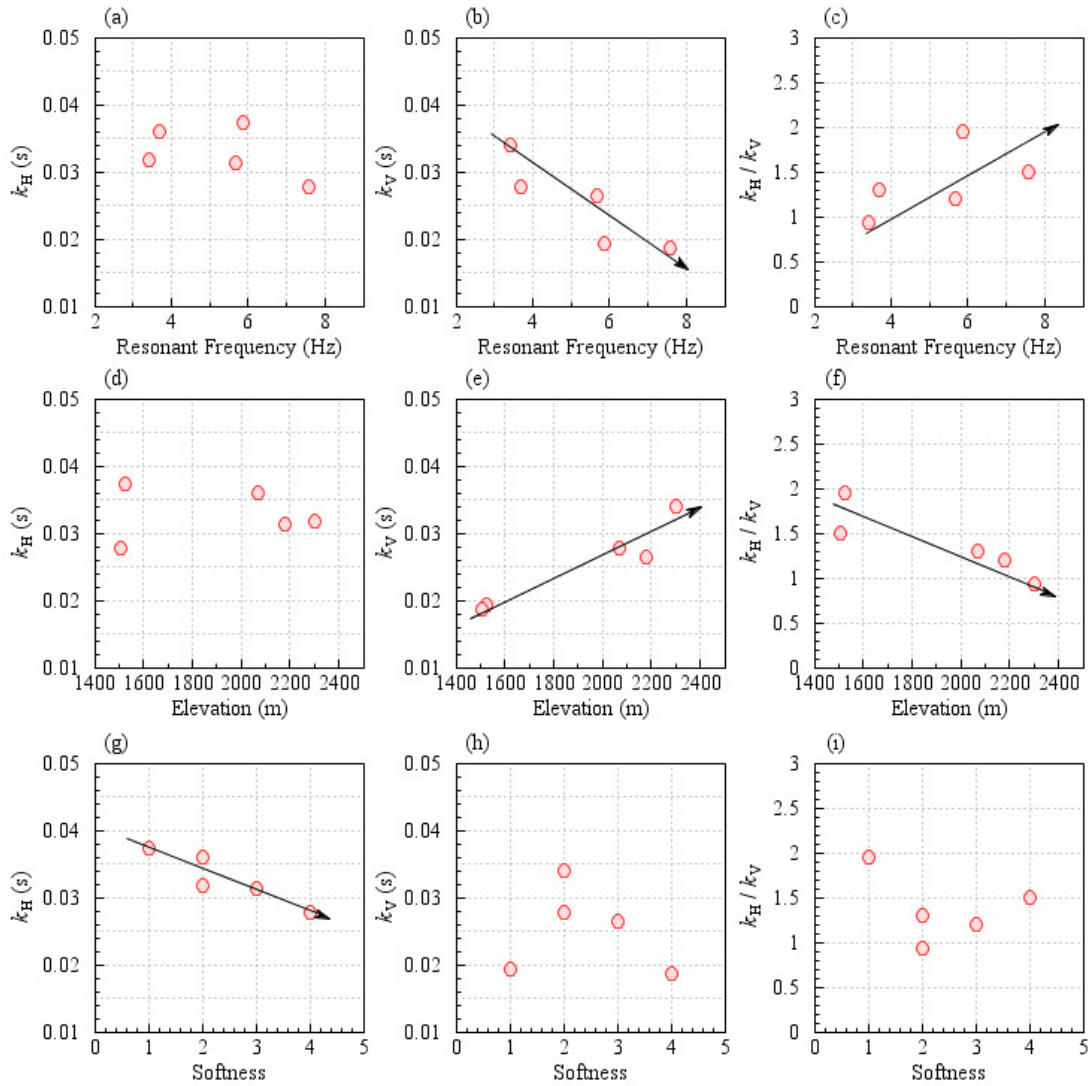


图 13 κ_V 随场地卓越频率、高程、场地软弱程度的变化规律

4. 讨论与结论

根据流动观测台阵捕捉的三个震级大小不同地震的加速度记录,发现当地震波垂直山脉走向入射时,山腰陡坡处存在高频异常放大的现象,同时三个地震作用下盆地台站的分析结果也体现了盆地效应的方向性差异。流动观测数据的高频衰减特性分析显示,在近距离(<30 km)范围内, κ_H 与局部场地条件的软硬程度(与场地卓越频率和峰值放大频带宽度相关)有关, κ_V 与局部场地的场地卓越频率和地形高程有关。

本文利用流动观测记录初步分析了漾濞 $M_S6.4$ 地震极震区秀岭村和淮安村的场地和地形效应影响,由于观测台站相对较少,相关结论仅针对本次研究区域。考虑到实际山区地形的复杂性,需要更多的实际观测数据进行验证。通过进一步验证,可为小尺度范围地震动影响估计的场地调整提供有益参考。

致谢

感谢云南省地震局提供的设备和技术支持,感谢老乡提供场地和电源。

本文章受到国家自然科学基金(0917602);中央级公益性科研院所基本科研业务专项(0222911)的支持。

参考文献

- [1] 周正华, 张艳梅, 孙平善, 等. 2003. 断层对震害影响的研究[J]. 自然灾害学报, 12(4):20-24.
- [2] Boore D M. 1973. The effect of simple topography on seismic waves: Implications for the accelerations recorded at Pacoima Dam, San Fernando Valley, California[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 63(5):1603-1609.
- [3] Davis L L, West L R. 1973. Observed effects of topography on ground motion[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 63(1):283-298.
- [4] 李渝生, 黄润秋. 2009. 5.12 汶川大地震损毁城镇的震害效应与重建选址问题[J]. 岩石力学与工程学报, 28(7):7.
- [5] 孙崇绍, 闵祥仪, 周民都. 2011. 陇南山区局部地形对地震动强度的影响[J]. 地震工程学报, 033(004):331-335.
- [6] 王伟, 刘必灯, 刘欣, 等. 2015. 基于汶川 $M_S8.0$ 地震强震动记录的山体地形效应分析[J]. 地震学报, 37(3):11.
- [7] Bard P, Tucker B E. 1985. Underground and ridge site effects: A comparison of observation and theory[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 75(4):905-922.
- [8] 王伟. 2012. 地震动的山体地形效应[J]. 国际地震动态, (3):2.
- [9] Spudich P, Hellweg M, Lee W. 1996. Directional Topographic Site Response at Tarzana Observed in Aftershocks of the 1994 Northridge, California, Earthquake: Implications for Mainshock Motions[J]. Bull.seism.soc.am, 86(1).
- [10] Anderson J G, Hough S E. 1984. A Model for the shape of the Fourier amplitude spectrum of acceleration at high frequencies: Bull[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 74(5).
- [11] 傅磊, 李小军. 2017. 龙门山地区的 κ_0 模型及汶川 $M_S8.0$ 地震的强地震动模拟[J]. 地球物理学报, 060(008):2935-2947.
- [12] Houtte C V, Ktenidou O J, Larkin T, et al. 2014. Hard-Site κ_0 (Kappa) Calculations for Christchurch, New Zealand, and Comparison with Local Ground-Motion Prediction Models[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 104(4):1899-1913.

- [13] Nakamura Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface[J]. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30(1).
- [14] Lermo J, Chávez-García F J. 1993. Site effect evaluation using spectral ratios with only one station[J]. Bulletin of the seismological society of America, 83(5): 1574-1594.
- [15] 李小军, 荣棉水, 喻烟. 2020. 场地土层模型参数的地震记录反演方法[J]. 地球物理学报, 63(1):236-246.
- [16] 林国良, 张潜, 崔建文, 等. 2019. 利用地脉动 HVSR 研究 2014 年鲁甸 6.5 级地震场地效应[J]. 地震研究, 42(4):531-537.
- [17] 荣棉水, 李小军, 王振明, 等. 2016. HVSR 方法用于地震作用下场地效应分析的适用性研究[J]. 地球物理学报, 59(8):2878-2891.
- [18] Douglas J, Gehl P, Bonilla L F, et al. 2009. Making the most of available site information for empirical ground-motion prediction [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 99(3): 1502-1520.
- [19] Mena B, Mai P M, Olsen K B, et al. 2010. Hybrid broadband ground-motion simulation using scattering Green's functions: application to large-magnitude events [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 100(5A):2143-2162.
- [20] Laurendeau A, Cotton F, Ktenidou O J, et al. 2010. Rock and stiff-soil site amplification: dependency on V_{S30} and Kappa (κ_0) [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(6):3131-3148.
- [21] Ktenidou O J, Gélis C, Bonilla L F. 2013. A study on the variability of kappa (κ) in a borehole: implications of the computation process [J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 103(2A): 1048-1068.

Open Access This chapter is licensed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits any noncommercial use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license and indicate if changes were made.

The images or other third party material in this chapter are included in the chapter's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the chapter's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder.

