

引用格式: 王鹏程, 罗永红, 刘红枫, 景俊杰. “9·5”四川泸定 M_s 6.8 级地震诱发磨西台地地震响应分析[J]. 山地学报, 2024, 42(4): 576-590.

WANG Pengcheng, LUO Yonghong, LIU Hongfeng, JING Junjie. Seismic response of Moxi Terrace induced by the M_s 6.8 Luding Earthquake on September 5th, 2022, in Luding County, Sichuan, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(4): 576-590.

“9·5”四川泸定 M_s 6.8 级地震诱发 磨西台地地震响应分析

王鹏程, 罗永红*, 刘红枫, 景俊杰

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 成都 610059)

摘要: 2022 年 9 月 5 日泸定县磨西发生 M_s 6.8 强烈地震, 震中距离磨西镇约 7 km, 此次强震导致磨西台地边缘产生了大量浅表滑坡灾害。本文通过调查、无人机测量、环境噪声测试及地形多谱放大分析 (Simulator for mapped seismic response using a hybrid model, SiSeRHMap) 等, 对磨西台地地震效应进行研究。调查表明: (1) 台地边缘发育同震滑坡 90 处, 集中在台地东、西两侧边缘, 以浅表层小型滑塌为主, 破坏深度 2~5 m, 地形坡度多在 50° 以上。(2) 33 处环境噪声水平与竖向谱比 (H/V) 分析揭示, 场地卓越频率以 1~4 Hz 低频为主, 谱比放大系数随着离台地边缘距离增加先增大后减小, 离台地边缘距离小于 20 m 的范围场地大多具有方向效应, 优势方向趋近垂直临空面走向。(3) 综合地形放大计算分析表明, 磨西台地边缘破坏与其场地地形共振效应密切相关, 在台地东、西两侧的坡度越大、地形越凸出、土体越松软的区域场地地震响应越强烈, 易破坏。本研究对磨西台地灾后重建及抗震设防具有重要应用价值及理论意义。

关键词: 泸定地震; 磨西冰水台地; 环境噪声; H/V 谱比; 地形放大效应

中图分类号: P694

文献标志码: A

地震地质灾害是灾区人员伤亡和财产损失的主要原因, 其发育机理、演化特征、发展趋势等方面受到学者广泛关注^[1-5]。研究发现^[6], 地震动存在地形放大效应, 地震波的传播和地面响应在特定地形条件下被增强, 造成地质灾害沿特定地形存在空间聚集^[6]。准确评估和预测地震放大效应下地质灾害空间分布和演化趋势, 需要更多的实证研究开展量化评估。

磨西台地位于四川省贡嘎山东侧, 其组成成分主要包括冰川堆积物、冲洪积物和老泥石流堆积物, 边缘被河流切割成高陡坡体, 具有典型的冰川地貌特征^[7-8]。2022 年 9 月 5 日四川泸定发生 M_s 6.8

地震 (以下简称泸定地震), 震中位于磨西台地附近。野外调查发现^[9-10]: 泸定地震同震地质灾害集中分布在磨西台地边缘、湾东河流域、王岗坪彝族藏族乡和大渡河两岸等区域, 空间分布与地形地貌、地质条件密切相关, 显示出明显的地形放大效应, 磨西台地地层具有明显的地震效应方向性特征^[7]。

针对地震地形放大效应的研究, 过去多依赖于定性分析和数值模拟, 往往集中在特定类型的地形 (如河谷、高山峡谷等), 而对于更复杂的地形组合 (如山峰与峡谷交替出现的区域) 的研究相对较少, 更缺乏量化实地检测与实证分析, 存在研究方法和手段的局限性。环境噪声测试是研究场地信

收稿日期 (Received date): 2024-03-04; 改回日期 (Accepted date): 2024-08-19

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金 (42077257)。[National Natural Science Foundation of China (42077257)]

作者简介 (Biography): 王鹏程 (2000-), 男, 四川内江人, 博士研究生, 主要研究方向: 工程地质学。[WANG Pengcheng (2000-), male, Neijiang, Sichuan province, Ph. D., candidate, research on engineering geology] E-mail: 1727382784@qq.com

* 通讯作者 (Corresponding author): 罗永红 (1981-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 工程地质学。[LUO Yonghong (1981-), male, Ph. D., professor, research on engineering geology] E-mail: lyh445890689@qq.com

息的重要方法^[11-12],能有效揭示场地的地震放大效应与卓越频率^[13-15],该方法具有数据获取方便、经济实用、操作简便等优点。基于环境噪声数据,利用水平与竖向(H/V)谱比获取的放大系数可以作为场地地震放大系数的下限^[16]。此方法在研究场地特征、斜坡动力响应、地质结构等方面得到了广泛应用^[17-21]。

本文以磨西台地为研究对象,根据现场调查及环境噪声测试及地形多谱放大(Simulator for mapped seismic response using a hybrid model, SiSeRHMap)计算,揭示了磨西台地场地共振、地形放大响应与灾害发育特征之间的联系。研究结果对磨西台地各乡镇灾后重建、抗震设防具有重要意义,亦可为类似冰水堆积台地场地动力稳定性评价提供参考。

1 研究区的地质环境条件

研究区位于龙门山断裂带、安宁河断裂带和鲜

水河断裂带构成的“Y”字形构造带交汇处(图1)^[22-23]。鲜水河断裂全长约400 km,是全新世以来一条构造活动强烈的大型左旋走滑断裂带^[24-25]。研究区发育大渡河及其支流,多为“V”字形河谷,相对高差一般为2000~3000 m,为典型高山峡谷地貌。除寒武纪外,研究区出露前震旦系到第四系,其中以元古代的花岗岩、闪长岩及第四系松散堆积物为主。

磨西台地位于新兴乡与磨西镇之间,长约10 km、宽1~2 km,高程为1500~2020 m。主要由冰川、冰水、洪积泥石流堆积,其次为冲洪积和老泥石流堆积。台地堆积物密实,主要为砾石夹砂组成,砾石含量60%以上,成分主要为花岗岩、闪长岩。一般粒径10~60 cm,漂石最大可达15 m,呈次棱角状-次圆状。台地两侧受燕子沟及雅家埂河流的冲刷侵蚀,边缘坡度 $35^{\circ} \sim 70^{\circ}$,西侧及东侧台面与河谷平均高差分别为130 m及60 m。在地震等影响下易沿两侧临空面发生滑坡等地质灾害。

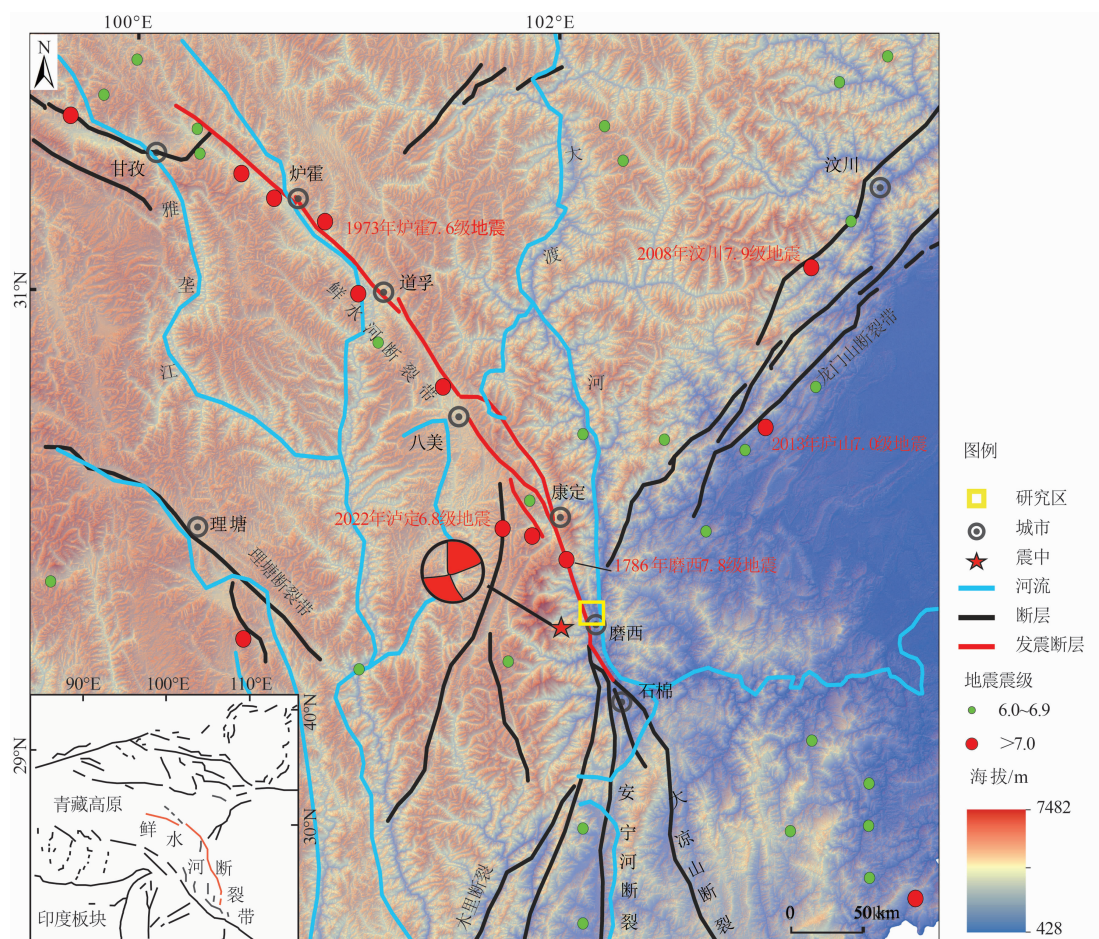


图1 中国泸定区域构造及地震分布特征^[9]

Fig. 1 Characteristics of regional structure and earthquake distribution in Luding, China

2 “9·5”泸定地震诱发磨西台地滑坡发育分布规律

“9·5”泸定地震沿鲜水河断裂南段的磨西断裂左旋走滑,地表破裂带出露长约 15.5 km^[26]。地震震中位于磨西台地北偏西约 7 km 处。

现场调查确认,强震诱发磨西台地边缘产生 90 处滑坡(图 2),其同震滑坡发育主要特征如下:(1)数量多、规模小、呈条带状分布,以浅表层小型滑坡为主,滑面深度一般为 2~5 m;(2)滑坡分布位置集中,成群发特征。集中在磨西镇,沿台地边缘坡脊向两侧发育;(3)台地东西两侧滑坡群集中在河

道凹岸,河流凸岸及其余地方滑坡少且小;(4)台地西侧滑坡多于台地东侧且规模更大;(5)台地东侧滑坡滑动方向集中在 20°~60°,西侧滑坡滑动方向集中在 210°~250°;(6)台地边缘滑坡坡度上陡下缓,平面形态多呈矩形,宽度大、长度小。

3 环境噪声测试及数据处理方法

3.1 环境噪声测点分布

为研究磨西台地场地效应特征,布置 33 个监测点,分别位于东侧(E)、西侧(W)、南侧(S)和北侧(N)四个区域(图 3),采用 QZ2012 型低频振动传感器和 G01NET-3 型采集仪(图 4)。



图 2 台地边缘滑坡
Fig. 2 Terrace edge landslide



图3 测点位置图

Fig. 3 Location map of measurement sites



图4 环境噪声现场测试仪器

Fig. 4 On site testing instrument for ambient noise

为保证采集的数据可靠,除要求对每个测点场地平整外,传感器的南北向与东西向与地理对齐,各监测点采样时间 30 ~ 35 min。各测点场地基本信息如表 1 所示。

3.2 数据处理方法

采用 Geopsy 软件对数据进行滤波和基线校准。先将数据进行裁剪,将开头和结尾各去掉 30 s,然后设置窗口时长 25 s,为减小高频干扰带来的影响,选择使用 Konno 和 Ohmachi 提出的方法进行平滑处理,平滑带宽系数为 40^[27-28],最后对 0.5 ~ 20 Hz 频率范围的 H/V 曲线进行分析(图 5)。

表 1 测点场地信息特征

Tab. 1 Characteristics of measurement site information

测点	高程/m	距崖边距离/m	表层岩性	测点	高程/m	距崖边距离/m	表层岩性
E1	1526	2	耕植土	W1	1565	5	碎石土
E2	1560	15	耕植土	W2	1591	2	碎石土
E3	1598	2	碎石土	W3	1612	2	碎石土
E4	1633	1	耕植土	W4	1629	3	耕植土
E5	1654	12	碎石土	W5	1659	3	耕植土
E6	1688	50	耕植土	W6	1691	7	耕植土
E7	1795	5	碎石土	W7	1716	2	耕植土
E8	1821	8	耕植土	W8	1769	20	碎石土
E9	1860	50	耕植土	W9	1783	10	碎石土
E10	1872	30	耕植土	W10	1830	1	碎石土
E11	1891	20	耕植土	W11	1877	30	耕植土
E12	1898	20	耕植土	W12	1895	4	耕植土
S1	1533	5	碎石土	N1	2015	25	耕植土
S2	1537	30	耕植土	N2	2006	230	耕植土
S3	1526	12	耕植土	N3	1985	450	耕植土
S4	1525	30	耕植土	N4	1955	280	耕植土
S5	1505	3	耕植土				

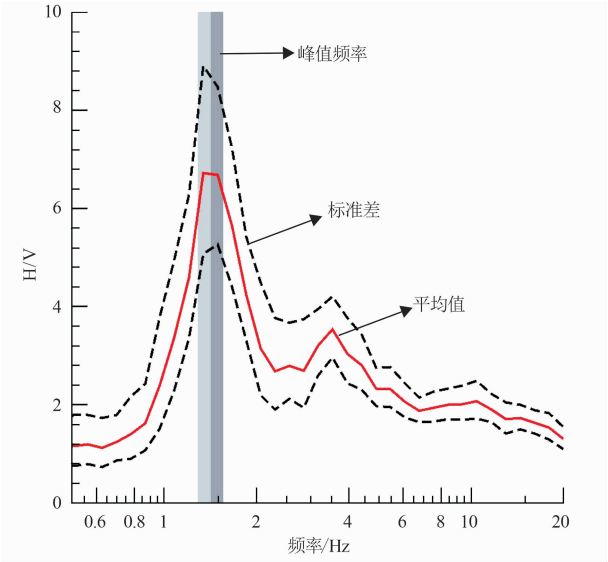


图5 环境噪声H/V谱比曲线

Fig. 5 Ambient noise H/V spectral ratio curve

4 磨西台地场地响应特征分析

4.1 各区场地频谱响应特征

台地东侧(E)各测点场地响应特征统计见表2。该区测点谱比放大系数为1.83~6.11,卓越频率为1.40~14.94 Hz。在2~5 m区间测点平均放大系数最大,随着测点位置离台地边缘距离的增大,测点的放大系数表现出先增大后减小的趋势,台地东侧典型测点(E12)剖面见图6。

台地西侧(W)各测点场地响应特征统计见表3。该区测点谱比放大系数为2.22~6.79,卓越频率为1.43~5.64 Hz。与东侧测点相似,在2~5 m区间测点平均放大系数最大,各监测点场地谱比放大系数随着离台地边缘距离先增大后减小,台地西

表2 台地东侧场地卓越频率与放大系数特征

Tab. 2 Characteristics of predominant frequency and amplification factor of the sites on the east side of the terrace

距崖边 d/m	测点编号	高程/ m	表层地层岩性	放大系数	平均放大系数	卓越频率/ Hz	平均卓越频率/ Hz
$d \leq 2$	E1	1526	耕植土	4.34	3.77	4.67	3.93
	E3	1598	碎石土	3.69		3.18	
	E4	1633	耕植土	3.27		14.94	
$2 < d \leq 5$	E7	1795	碎石土	4.12	5.12	2.09	2.09
	E12	1898	耕植土	6.11		2.08	
$5 < d \leq 10$	E8	1821	耕植土	2.84	2.84	4.22	4.22
$10 < d \leq 20$	E2	1560	耕植土	2.67	2.57	2.85	2.42
	E5	1654	碎石土	2.14		2.81	
	E11	1891	耕植土	2.89		1.59	
$20 < d \leq 50$	E6	1688	耕植土	2.71	2.38	1.40	2.41
	E9	1860	耕植土	2.60		4.18	
	E10	1872	耕植土	1.83		1.64	

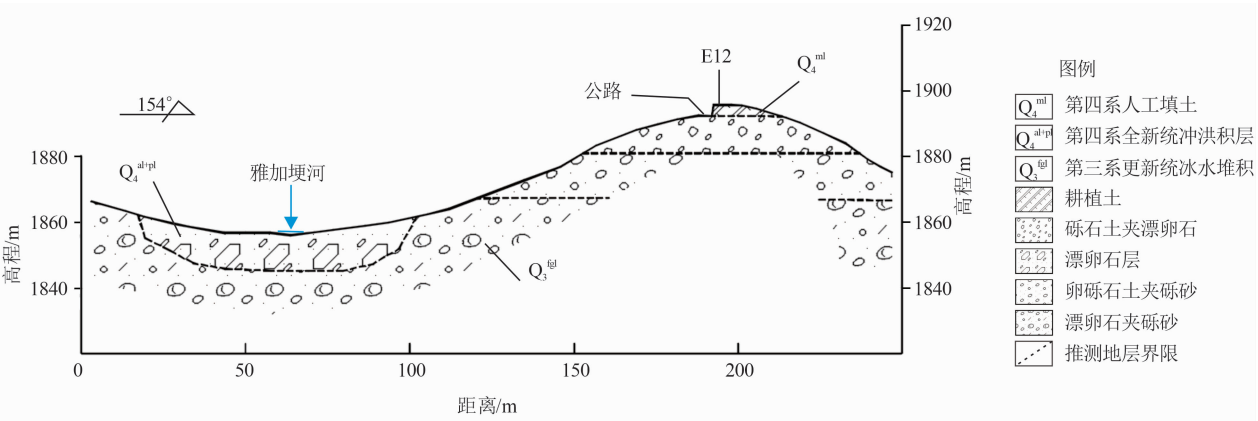


图6 台地东侧典型测点地质剖面

Fig. 6 Geological profiles of typical survey sites on the east side of the terrace

侧典型测点剖面(W4)见图7。

台地南侧(S)各测点场地响应特征统计见表4, 该区测点放大系数为 2.40~3.45, 卓越频率为 1.41~11.46 Hz。随测点位置离台地边缘距离的增大, 测点的放大系数呈减小的趋势, 台地南侧典型测点(S2)剖面见图8。

表3 台地西侧场地卓越频率与放大系数特征

Tab. 3 Characteristics of predominant frequency and amplification factor of the sites on the west side of the terrace

距崖边 d/m	测点编号	高程/ m	表层地层岩性	放大系数	平均放大系数	卓越频率/ Hz	平均卓越频率/ Hz
$d \leq 2$	W2	1591	碎石土	3.09	2.79	2.63	2.98
	W3	1612	碎石土	3.11		1.43	
	W7	1716	耕植土	2.59		4.18	
	W10	1830	碎石土	2.35		3.68	
$2 < d \leq 5$	W1	1565	碎石土	4.65	5.30	3.23	3.44
	W4	1629	耕植土	6.79		1.48	
	W5	1659	耕植土	5.58		5.64	
	W12	1895	耕植土	4.17		3.41	
$5 < d \leq 10$	W6	1691	耕植土	3.03	2.86	3.48	3.17
	W9	1783	碎石土	2.68		2.85	
$10 < d \leq 20$	W8	1769	碎石土	2.65	2.65	2.62	2.62
$20 < d \leq 50$	W11	1877	耕植土	2.42	2.42	5.62	5.62

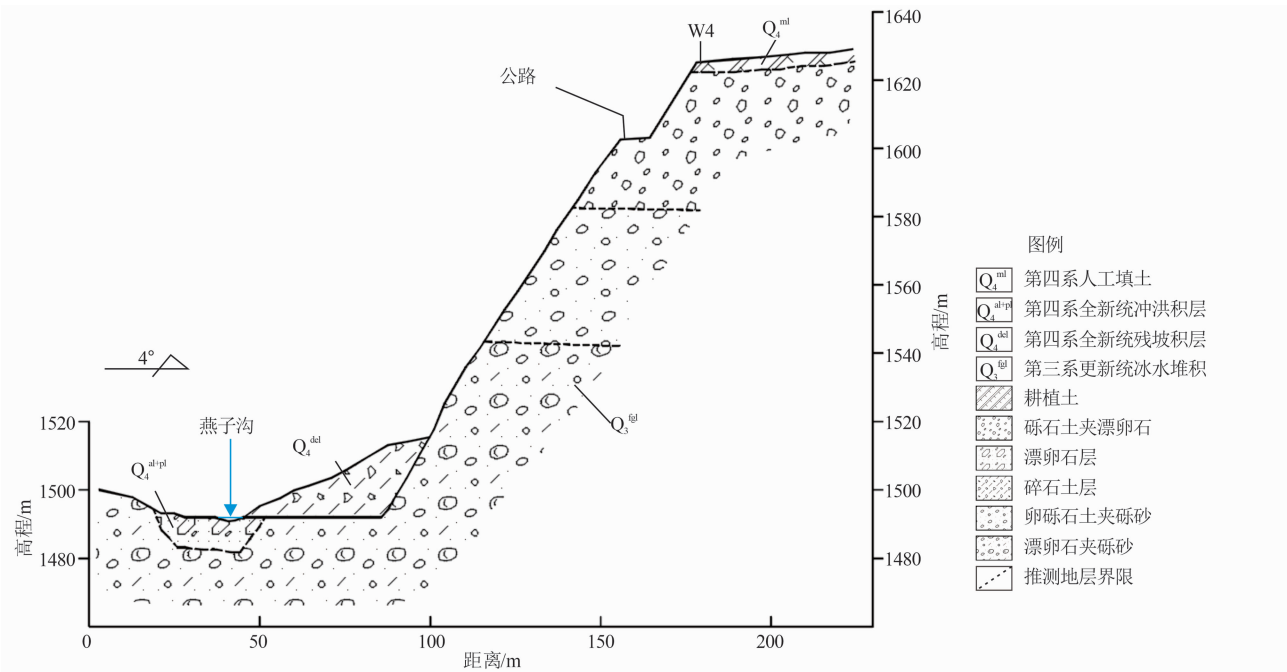


图7 台地西侧典型测点地质剖面

Fig. 7 Geological profiles of typical survey sites on the west side of the terrace

表4 台地南侧场地卓越频率与放大系数特征

Tab. 4 Characteristics of site predominant frequency and amplification factor on the south side of the terrace

距崖边 d/m	测点编号	高程/ m	表层地层岩性	放大系数	平均放大系数	卓越频率/ Hz	平均卓越频率/ Hz
$2 < d \leq 5$	S1	1533	碎石土	3.45	3.09	1.51	4.73
	S5	1505	耕植土	2.73		7.94	
$10 < d \leq 20$	S3	1526	耕植土	2.40	2.40	3.44	3.44
$20 < d \leq 50$	S2	1537	耕植土	2.45	2.56	11.45	1.41
	S4	1525	耕植土	2.67		1.41	

台地北侧(N)各测点场地响应特征统计见表5。该区测点谱比放大系数为1.67~2.60,卓越频率为0.64~3.55 Hz。随测点离台地边缘距离的增大,测

点的放大系数和卓越频率都呈减小的趋势,台地南侧典型测点(N1)剖面见图9。

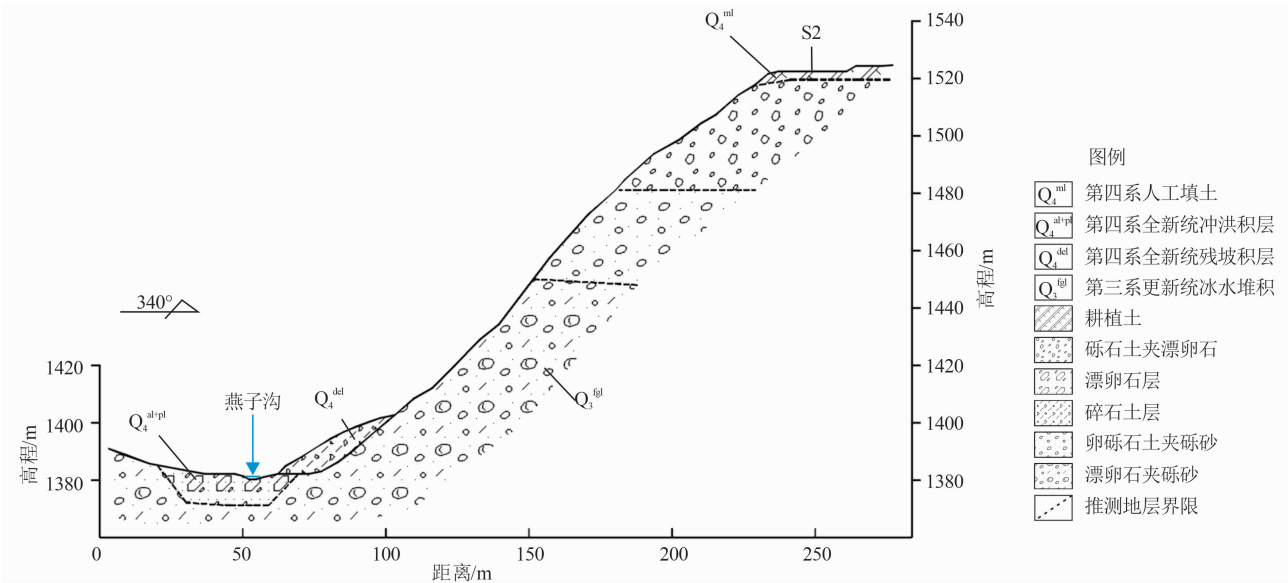


图8 台地南侧典型测点地质剖面
Fig.8 Geological profiles of typical survey sites on the south side of the terrace

表5 台地北侧场地卓越频率与放大系数特征

Tab.5 Characteristics of site predominant frequency and amplification factor on the north side of the terrace

距崖边 d/m	测点编号	高程/m	表层地层岩性	放大系数	平均放大系数	卓越频率/Hz	平均卓越频率/Hz
$20 < d \leq 50$	N1	2015	耕植土	2.60	2.60	3.55	3.55
	N2	2006	耕植土	2.21		1.66	
$d > 50$	N3	1985	耕植土	2.31	2.06	0.64	1.07
	N4	1955	耕植土	1.67		0.91	

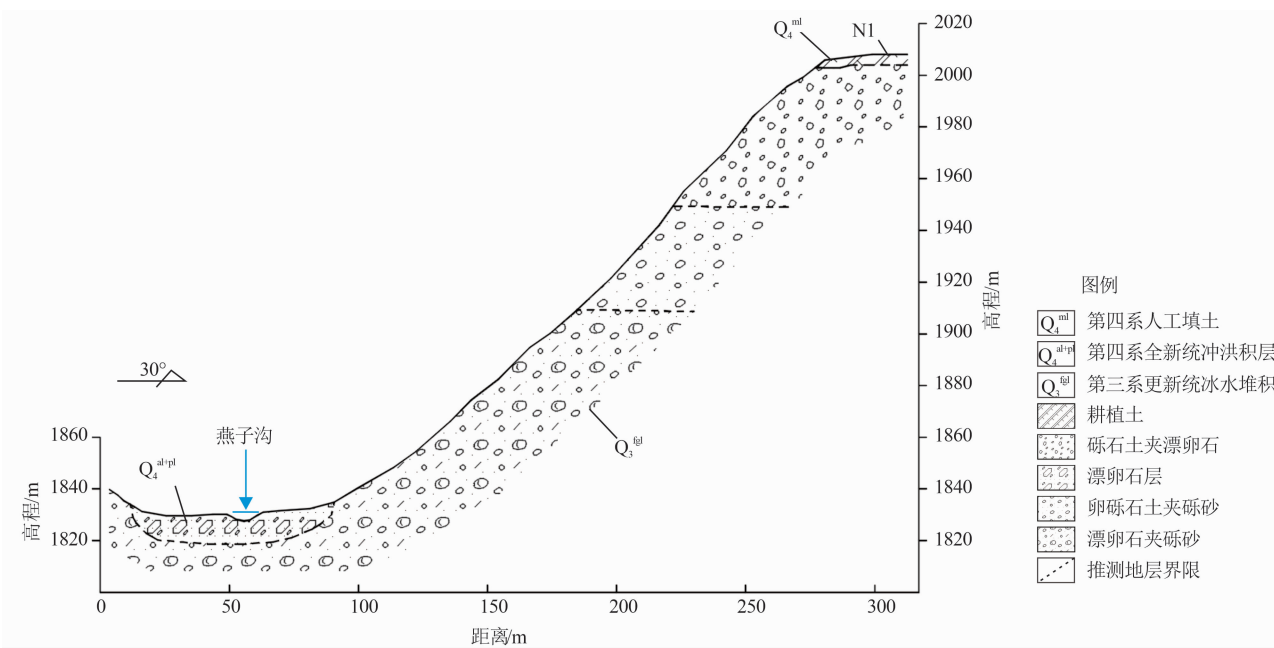


图9 台地北侧典型测点地质剖面
Fig.9 Geological profiles of typical survey sites on the north side of the terrace

4.2 场地优势方向特征

Del Gaudio^[29-30] 等对斜坡地震动响应研究表明:斜坡对地震波的放大会在特定方向呈现出最大值,当此方向与潜在滑动方向相近时,斜坡易发生地震破坏。然而对于控制场地响应方向性发生的因素仍缺乏明确的解释,因此需采集大量数据支持边坡动力响应特征研究。

图 10 显示了台地部分测点的频率、H/V 值和方位角变化的关系。可以看出,颜色越接近紫色所对应的 H/V 值越大,对应频率越接近峰值频率,对应的方位角越接近场地地震效应的优势方向。根据 Del Gaudio^[31] 等提出的判定准则确定优势方向:

准则 1:在 H/V 谱比中,存在相对最大值振幅大于 2;

准则 2:H/V 谱比的方位角变化,其峰值频率处

最小值不应大于最大值的 2/3;

准则 3:平均 H/V 谱比中主要方向峰取向一致(在 $20^\circ \sim 30^\circ$ 范围内);

准则 4:在噪声记录中,沿某个方向符合准则 1 和准则 2 且呈现出方向峰的时间窗口占主导地位(就数量而言)。

台地东侧离边缘距离小于 10 m 的测点表现出良好的方向效应,除测点 E4 卓越频率为高频 14.5 Hz,其余测点多为 2 ~ 4 Hz,优势方向集中于 $20^\circ \sim 60^\circ$,其余测点方向效应不明显(表 6)。

台地西侧离边缘距离小于 20 m 的测点大都表现出良好的方向效应,优势方向集中于 $20^\circ \sim 50^\circ$,卓越频率多为 1 ~ 4 Hz(表 7)。

台地南侧离台地边缘小于 20 m 的测点具有良好的方向效应,优势方向集中于 $0^\circ \sim 40^\circ$ 和 $160^\circ \sim$

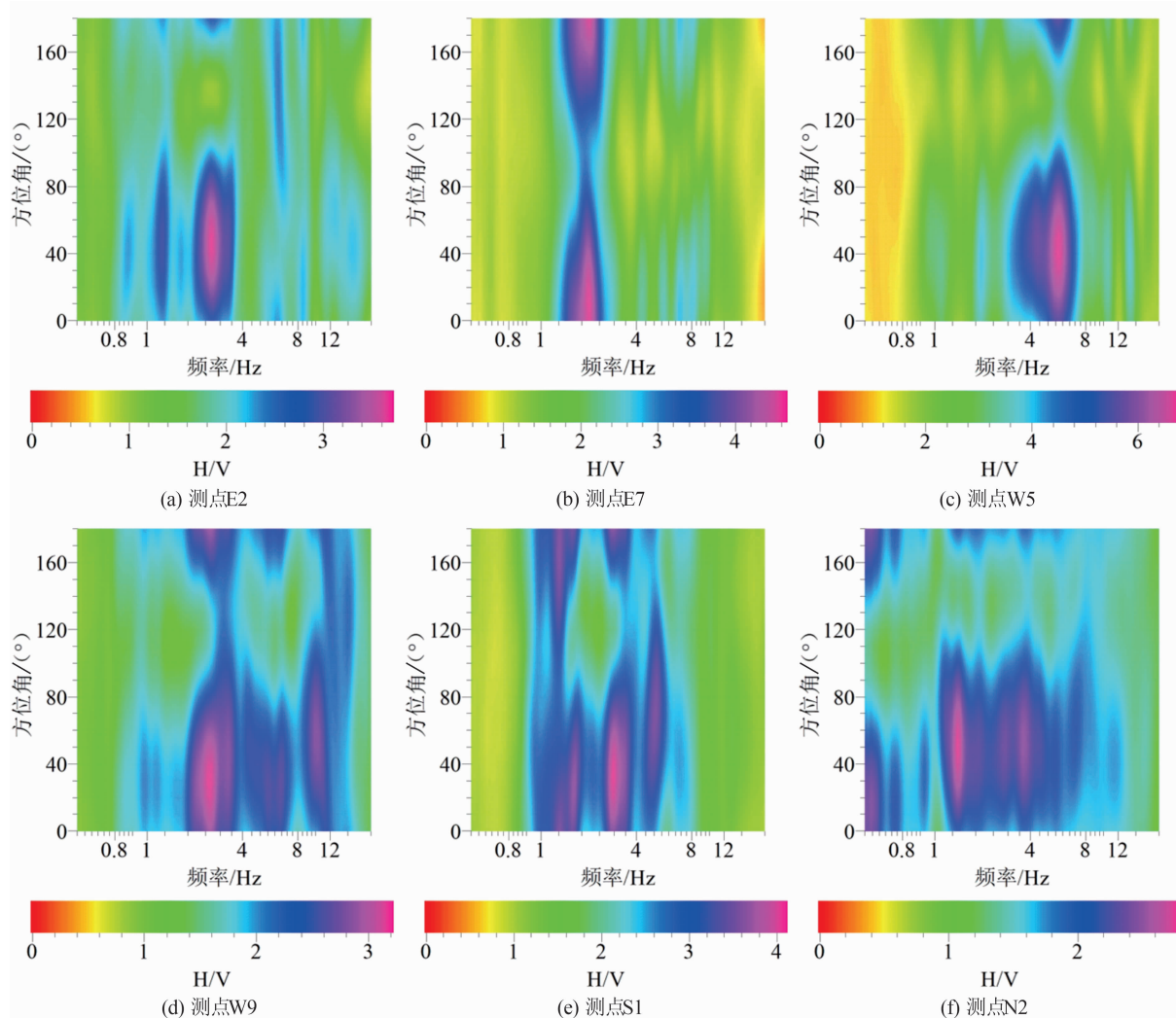


图 10 台地部分测点光谱特征图

Fig. 10 Spectral characteristics of selected measurement sites on the terrace

180°,其余测点方向效应不明显(表8)。

台地北侧除测点 N2 表现出良好方向效应外,其余测点方向效应不明显(表9)。现场调查表明 N2 距台地边缘超过 50 m,但具有良好的方向效应,推测与 N2 位于沟道边的微地貌放大相关。

4.3 地形多谱放大效应分析

SiSeRHMap 是由 Grelle^[32]等开发的使用混合模型绘制地震反应图的程序,能够生成地层和地形影响的预测地震场地放大效应图,可以大面积计算地形和地层综合效应。SiSeRHMap 已有效应用于多

表 6 台地东侧测点优势方向
Tab. 6 Dominant directions of measuring sites on the east side of the terrace

距台地边缘 d/m	测点编号	卓越频率/Hz	优势方向/(°)	准则 1	准则 2	准则 3	准则 4
$d \leq 2$	E1	4.3	40 ~ 60	4.6(√)	1.6(√)	√	√
	E3	3.3	10 ~ 30	4.6(√)	2.3(√)	√	√
	E4	14.5	40 ~ 60	3.8(√)	1.6(√)	√	√
$2 < d \leq 5$	E7	2.2	0 ~ 20	4.5(√)	1.6(√)	√	√
	E12	2.1	130 ~ 150	8.0(√)	2.5(√)	√	√
$5 < d \leq 10$	E8	3.8	150 ~ 175	3.2(√)	1.5(√)	√	√
$10 < d \leq 20$	E2	2.7	35 ~ 55	3.4(√)	2.4(√)	√	√
	E5	2.8	60 ~ 80	2.3(√)	1.4(×)	√	√
	E11	1.6	40 ~ 70	2.9(√)	1.3(×)	√	√
$20 < d \leq 50$	E6	1.3	20 ~ 60	2.7(√)	1.2(×)	×	√
	E9	4.2	20 ~ 50	3.0(√)	1.4(×)	√	√
	E10	1.5	50 ~ 80	2.2(√)	1.2(×)	√	√

注:“√”表示符合该准则;“×”表示不符合该准则。下同。

表 7 台地西侧测点优势方向
Tab. 7 Dominant directions of measuring sites on the east side of the terrace

距台地边缘 d/m	测点编号	卓越频率/Hz	优势方向/(°)	准则 1	准则 2	准则 3	准则 4
$d \leq 2$	W2	2.5	30 ~ 50	3.4(√)	1.7(√)	√	√
	W3	1.4	25 ~ 55	3.4(√)	1.5(√)	√	√
	W7	3.8	50 ~ 70	2.7(√)	1.6(√)	√	√
	W10	4.0	0 ~ 20	2.7(√)	2.8(√)	√	√
$2 < d \leq 5$	W1	3.2	45 ~ 65	5.7(√)	2.9(√)	√	√
	W4	1.4	160 ~ 180	8.0(√)	1.8(√)	√	√
	W5	5.7	30 ~ 50	6.3(√)	2.1(√)	√	√
	W12	3.5	40 ~ 60	5.3(√)	2.6(√)	√	√
$5 < d \leq 10$	W6	3.6	50 ~ 70	3.1(√)	1.4(×)	√	√
	W9	2.7	20 ~ 40	3.1(√)	1.5(√)	√	√
$10 < d \leq 20$	W8	2.6	25 ~ 50	2.8(√)	1.7(√)	√	√
$20 < d \leq 50$	W11	3.8	20 ~ 50	2.6(√)	1.4(×)	√	√

表 8 台地南侧测点优势方向
Tab. 8 Dominant directions of measurement sites on the south side of the terrace

距台地边缘 d/m	测点编号	卓越频率/Hz	优势方向/(°)	准则 1	准则 2	准则 3	准则 4
$2 < d \leq 5$	S1	3.0	20 ~ 40	4.0(√)	1.6(√)	√	√
	S5	4.1	0 ~ 25	2.9(√)	1.7(√)	√	√
$10 < d \leq 20$	S3	1.4	160 ~ 180	2.6(√)	1.6(√)	√	√
$20 < d \leq 50$	S2	11.5	70 ~ 140	2.3(√)	1.1(×)	×	√
	S4	1.3	20 ~ 70	2.6(√)	1.3(×)	×	√

表9 台地北侧测点优势方向

Tab.9 Dominant directions of measuring sites on the north side of the terrace

距台地边缘 d/m	测点编号	卓越频率/Hz	优势方向/ $^{\circ}$	准则1	准则2	准则3	准则4
$20 < d \leq 50$	N1	3.6	10 ~ 40	2.7(√)	1.4(×)	√	√
	N2	1.6	40 ~ 60	2.7(√)	2.3(√)	√	√
$d > 50$	N3	0.6	130 ~ 170	2.2(√)	1.3(×)	×	√
	N4	0.8	120 ~ 180	1.8(×)	1.4(×)	×	√

个地区研究^[33-35]。本研究选取磨西台地中段典型地形(图 11),使用该方法计算其图形放大效应成果如图 12 所示。

地形放大图分析显示(图 12),区域 a 和 b 在低频(1 Hz、2 Hz、3 Hz、4 Hz)呈现强烈的地形放大效应,而在中高频(大于 4 Hz)地形整体放大效应明显减弱,地形放大因子(Topographic amplification factor, TAF)值基本在 1.6 以下;两块区域在斜坡、地形凸出、地形转折部位地形放大效应较强,最大 TAF 值可达 2.5,在台地中部及河谷底部较为平坦区域($\text{TAF} = 1.0 \sim 1.5$)地形放大效应较弱;此外,两块区

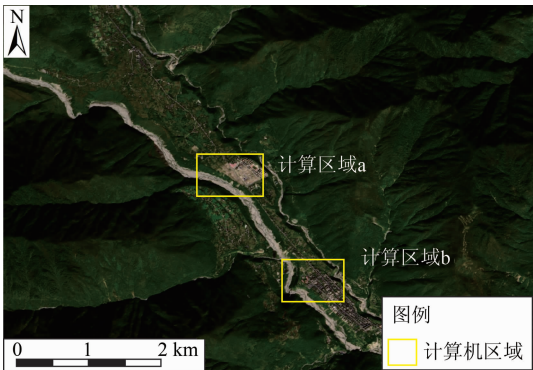


图 11 SiSeRHMap 计算位置图

Fig. 11 SiSeRHMap calculation location map

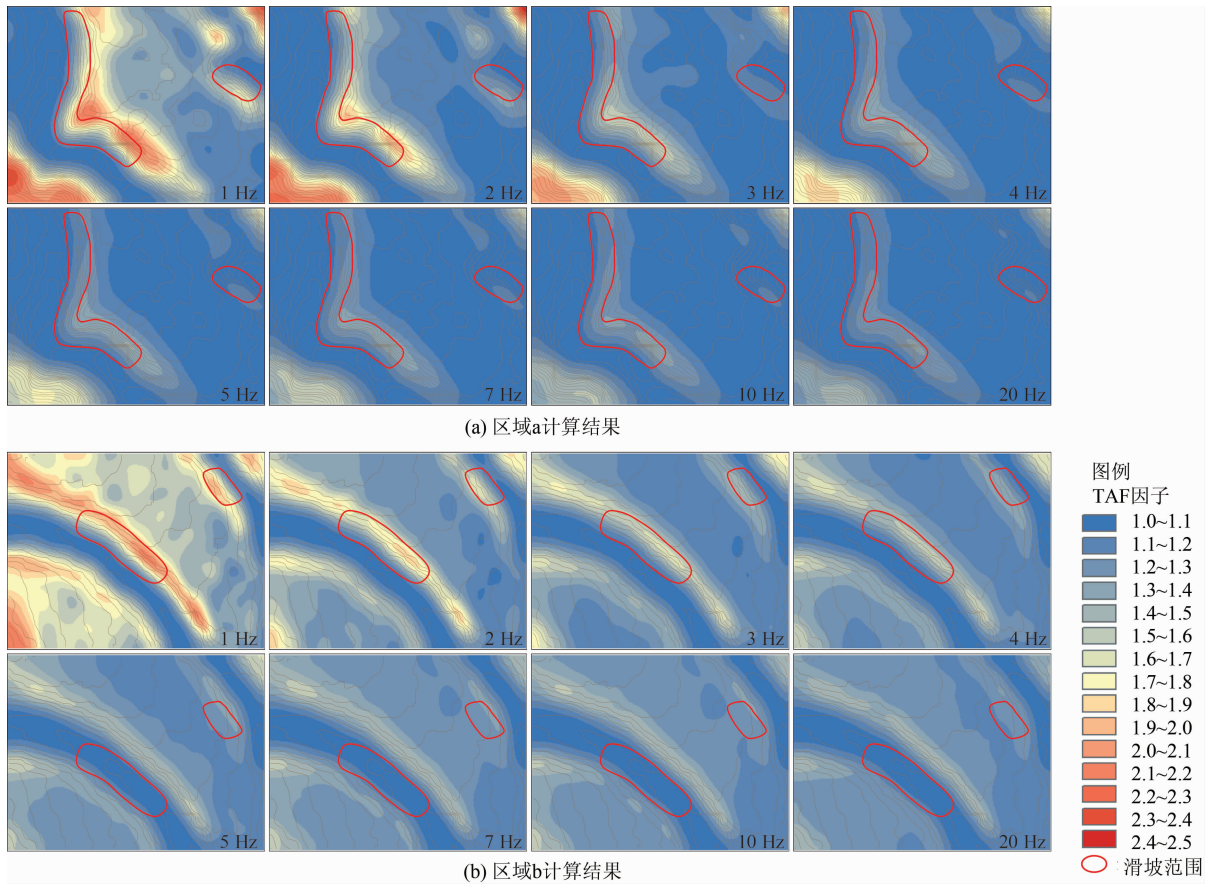


图 12 均质模型分析台地中部地形放大因子(TAF)与滑坡区耦合特征

Fig. 12 Coupling characteristics between the topographic amplification factor (TAF) in the middle of the terrace and the landslide area in the homogeneous model analysis

域均表现出台地西侧比台地东侧的地形放大效应更为强烈。此计算结果与采用环境噪声测试揭示研究区的谱比放大较一致。

5 讨论

现场调查表明,磨西台地西侧比东侧滑坡数量更多且规模更大,与强震作用下一般斜坡背坡面更易破坏的现象并不一致^[36],磨西台地迎坡面(西侧)破坏更明显。此外环境噪声测试分析表明,相同距离区间台地西侧测点平均放大系数整体高于其东侧。推测受地形影响,台地西侧因燕子沟水流量大,侵蚀下切能力强导致西侧边坡陡峭且坡度整体大于东侧地形,结合 SiSeRHMAP 图形放大分析表明,其地形放大更明显,也更易破坏。

台地东、西两侧的谱比平均放大系数均随离崖边距离的增加先增大后减小,在 2~5 m 区间最大。由于地震波传播到台地边缘时,在台地边缘形成强烈的动拉应力区,使得该区间场地响应最为强烈。这与实际调查情况一致,台地边缘滑坡都为浅层滑坡,滑面深度一般在 2~5 m;台地南、北两侧的放大系数总体上表现为随着离崖边距离的增加呈减小趋势,推测台地南北长度远大于东西宽度,在南北方向短周期波长不易产生共振放大效应。

台地相同距离区间的测点其谱比放大系数亦有较大的差异。例如 $E5(2.14) < E2(2.67) < E11(2.89)$,分析认为主要是测点场地介质存在差异,其中前者表层为碎石土,后两者测点为土层。一般来说,土体堆积介质放大系数都会高于碎石土堆积介质^[37];此外,位于台地边缘坡脊处的测点 W4(6.79)和 E12(6.11),其谱比放大系数远高于同距离区间其余测点。这与地形放大分析结果中地形突出和转折部位放大效应强烈一致,也符合台地边缘滑坡沿坡脊向两侧发育的分布情况。

台地少数测点呈现高频,例如测点 E4(14.5 Hz)、S2(11.5 Hz),推测其主要受到河流及车辆经过时的瞬态震动等影响相关,其余场地测点多以 1~4 Hz 低频为主。泸定地震波分析表明,其地震波周期为 0.3~1.5 s 时能量较大^[38],与磨西台地场地卓越频率相近易产生共振作用,从而导致冰水台地破坏较严重。

台地各区域场地优势方向均有差异,台地东侧

大致为 20°~60°,台地西侧大致为 20°~50°,台地南侧大致为 0°~40°和 160°~180°,台地北侧优势方向不明显。临空条件相似的台地东、西两侧场地优势方向具有良好的一致性,而南、北侧由于临空条件相差较大,方向效应也相差较大;同时,在离崖边距离小于 20 m 的测点多数具有良好的方向效应,而 20 m 以上的测点优势方向不明显。综合表明,磨西台地场地的方向效应主要受临空面以及临空面之间距离的影响。

由 SiSeRHMAP 计算结果可知,TAF 值在台地边缘与斜坡部位较高,特别是坡脊和地形凸出部位,与地震诱发台地破坏空间分布相吻合;台地西侧的 TAF 值明显高于台地东侧,说明台地西侧地形放大效应更为强烈,与地质调查结果和环境噪声分析结论较一致。此外,在低频 1~4 Hz 的 TAF 值整体较大(与环境噪声测试较吻合),最大可达 2.5,地形放大效应明显。根据建筑固有周期与建筑高度之间的经验公式^[39]($T = (0.05 \sim 0.075)H^{3/4}$, H 为高度, T 为建筑的固有振动周期),高度为 5~54 m(2~16 层)的建筑其固有频率为 1~4 Hz,与台地强放大频率范围较接近,此类建筑高度处于地震高风险范围。

6 结论

(1)台地边缘同震滑坡平面形态多为矩形,具有数量多、规模小、陡坡发育、滑体薄、河道凹岸集中发育等特点;滑坡地形坡度具有上陡下缓,坡向集中于 20°~60°和 220°~260°。

(2)环境噪声 H/V 谱比曲线揭示:台地场地卓越频率以低频 1~4 Hz 为主,放大系数随着离台地边缘距离的增加先增大后减小。其中平均谱比放大系数,在离台地边缘距离 1~2 m 为 3.21,2~5 m 为 4.70,5~10 m 为 2.85,大于 10 m 为 2.41。

(3)磨西台地场地方向效应主要受临空面以及临空面之间距离的影响。在离临空面距离小于 20 m 的区域具有良好的方向效应,且表现为趋近垂直临空面的方向。

(4)在坡度越大、地形越凸出,土体越松软的区域场地动力响应越强烈,H/V 谱比放大系数高,容易诱发滑坡破坏。

(5)由 SiSeRHMap 揭示地形放大效应在台地边缘和斜坡部位明显,特别是坡脊、地形凸出转折部

位,共振频率在 1~4 Hz 地形放大效应更明显,最大 TAF 值可达 2.5,与环境噪声测试分析结果一致。

参考文献 (References)

- [1] 黄润秋, 李为乐. “5.12”汶川大地震触发地质灾害的发育分布规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, **27**(12): 2585 – 2592. [HUANG Runqiu, LI Weile. Research on the development and distribution rules of geological induced by the Wenchuan earthquake on 12th May, 2008 [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, **27**(12): 2585 – 2592] DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2008.12.028
- [2] 程强. 汶川强震区公路沿线地震崩滑灾害发育规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, **30**(9): 1747 – 1760. [CHENG Qiang. Research on development rules of seismic landslide and collapse along highways in highly seismic region of Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, **30**(9): 1747 – 1760]
- [3] 李秀珍, 孔纪名, 崔云, 等. 芦山地震诱发次生地质灾害的分布规律和类型、特征及演化趋势分析[J]. 工程地质学报, 2014, **22**(2): 272 – 279. [LI Xiuzhen, KONG Jiming, CUI Yun, et al. Analysis on distribution law, types and characteristics and development tendency of secondary geo-hazards induced by Lushan earthquake [J]. Journal of Engineering Geology, 2014, **22**(2): 272 – 279] DOI: 10.3969/j.issn.1004-9665.2014.02.018
- [4] 高会会, 裴向军, 崔圣华, 等. 汶川震区震后地质灾害发育分布及演化特征统计分析[J]. 长江科学院院报, 2019, **36**(8): 73 – 80. [GAO Huihui, PEI Xiangjun, CUI Shenghua, et al. Geological hazards after earthquake in Wenchuan earthquake area: Distribution and evolvement features [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, **36**(8): 73 – 80] DOI: 10.11988/ckyyb.20180109
- [5] 冉涛, 徐如阁, 李奇. 川藏交通廊道怒江段斜坡地质灾害发育特征及主控因素分析[J]. 自然灾害学报, 2024, **33**(4): 176 – 187. [RAN Tao, XU Ruge, LI Qi. Development characteristics and main controlling factors of the slope geohazards in Nujiang River section of Sichuan – Xizang traffic corridor [J]. Journal of Natural Disasters, 2024, **33**(4): 176 – 187] DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0416
- [6] 罗永红, 王运生. 汶川地震诱发山地斜坡震动的地形放大效应[J]. 山地学报, 2013, **31**(2): 200 – 210. [LUO Yonghong, WANG Yunsheng. Mountain slope ground motion topography amplification effect induced by Wenchuan Earthquake [J]. Mountain Research, 2013, **31**(2): 200 – 210] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2013.02.012
- [7] 李孝波, 常晁瑜, 蔡晓光, 等. 泸定磨西台地场地震效应研究[J]. 防灾科技学院学报, 2022, **24**(4): 34 – 45. [LI Xiaobo, CHANG Chaoyu, CAI Xiaoguang, et al. Site seismic effect of the Moxi platform in Luding, Sichuan [J]. Journal of Institute of Disaster Prevention, 2022, **24**(4): 34 – 45] DOI: 10.3969/j.issn.1673-8047.2022.04.004
- [8] 郑本兴. 贡嘎山东麓第四纪冰川作用与磨西台地成因探讨[J]. 冰川冻土, 2001, **23**(3): 283 – 291. [ZHENG Benxing. Study on the quaternary glaciation and the formation of the Moxi platform in the east slopes of the Mount Gongga [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(3): 283 – 291] DOI: 10.3969/j.issn.1000-0240.2001.03.012
- [9] 张佳佳, 陈龙, 李元灵, 等. 2022 年 9 月 5 日泸定 $M_s 6.8$ 地震的同震地质灾害发育特征及主控因素分析[J]. 地震学报, 2023, **45**(2): 167 – 178. [ZHANG Jiajia, CHEN Long, LI Yuanling, et al. Development characteristics and controlling factors of co-seismic geo-hazards triggered by the Luding $M_s 6.8$ earthquake on September 5, 2022 [J]. Acta Seismologica Sinica, 2023, **45**(2): 167 – 178] DOI: 10.11939/jass.20220215
- [10] 范宣梅, 王欣, 戴岚欣, 等. 2022 年 $M_s 6.8$ 级泸定地震诱发地质灾害特征与空间分布规律研究[J]. 工程地质学报, 2022, **30**(5): 1504 – 1516. [FAN Xuanmei, WANG Xin, DAI Lanxin, et al. Characteristics and spatial distribution pattern of $M_s 6.8$ Luding Earthquake occurred on September 5, 2022 [J]. Journal of Engineering Geology, 2022, **30**(5): 1504 – 1516] DOI: 10.13544/j.cnki.jeg.2022-0665
- [11] VELLA A, GALEA P, D'AMICO S. Site frequency response characterisation of the Maltese islands based on ambient noise H/V ratios [J]. Engineering Geology, 2013, **163**: 89 – 100. DOI: 10.1016/j.enggeo.2013.06.006
- [12] YAMAZAKI F, ANSARY M A. Horizontal – to – vertical spectrum ratio of earthquake ground motion for site characterization [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1997, **26**(7): 671 – 689. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9845(199707)26:7<671::AID-EQE669>3.0.CO;2-S
- [13] 黄俊阁, 罗永红, 王运生, 等. 基于环境噪声测试表征斜坡地震动响应: 以自贡西山斜坡为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2020, **47**(1): 16 – 27. [HUANG Junge, LUO Yonghong, WANG Yunsheng, et al. Characterization of slope ground motion response based on ambient noise test: A case study for the Xishan slope in Zigong [J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2020, **47**(1): 16 – 27] DOI: 10.3969/j.issn.1671-9727.2020.01.02
- [14] 卢滔, 周正华, 周雍年, 等. 关于 Nakamura 方法有效性的讨论[J]. 地震工程与工程振动, 2006, **26**(1): 43 – 48. [LU Tao, ZHOU Zhenghua, ZHOU Yongnian, et al. Discussion on validation of Nakamura's technique [J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, **26**(1): 43 – 48] DOI: 10.3969/j.issn.1000-1301.2006.01.007,
- [15] NAKAMURA Y. Basic structure of QTS (HVSr) and examples of applications [J]. Increasing Seismic Safety by Combining Engineering Technologies and Seismological Data, 2009: 33 – 51. DOI: 10.1007/978-1-4020-9196-4_4
- [16] WEN Ruizhi, REN Yefei, ZHOU Zhenghua, et al. Preliminary

- site classification of free - field strong motion stations based on Wenchuan earthquake records [J]. *Earthquake Science*, 2010, **23**(1): 101 - 110. DOI: 10.1007/s11589 - 009 - 0048 - 8
- [17] GUEGUEN P, CHATELAIN J L, GUILLIER B, et al. An indication of the soil topmost layer response in Quito (Ecuador) using noise H/V spectral ratio [J]. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 2000, **19**(2): 127 - 133. DOI: 10.1016/S0267 - 7261(99)00035 - 4
- [18] LUO Yonghong, DEL GAUDIO V, HUANG Runqiu, et al. Evidence of hillslope directional amplification from accelerometer recordings at Qiaozhuang (Sichuan - China) [J]. *Engineering Geology*, 2014, **183**: 193 - 207. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.10.015
- [19] LUO Yonghong, FAN Xuanmei, HUANG Runqiu, et al. Topographic and near - surface stratigraphic amplification of the seismic response of a mountain slope revealed by field monitoring and numerical simulations [J]. *Engineering Geology*, 2020, **271**: 105607. DOI: 10.1016/j.enggeo.2020.105607
- [20] DEL GAUDIO V, LUO Yonghong, WANG Yunsheng, et al. Using ambient noise to characterize seismic slope response: The case of Qiaozhuang peri - urban hillslopes (Sichuan, China) [J]. *Engineering Geology*, 2018, **246**: 374 - 390. DOI: 10.1016/j.enggeo.2018.10.008
- [21] 朱鑫, 罗永红, 南凯, 等. 环境噪声测试在滑坡体场地快速勘探中的应用——以赵家山滑坡为例[J]. *地球物理学进展*, 2023, **38**(6): 2778 - 2790. [ZHU Xin, LUO Yonghong, NAN Kai, et al. Application of environmental noise test in rapid exploration of landslide site: Take Zhaojiashan landslide as an example [J]. *Progress in Geophysics*, 2023, **38**(6): 2778 - 2790] DOI: 10.6038/pg2023HH0056
- [22] 吕国森, 章旭, 张云辉, 等. 川西鲜水河、安宁河和龙门山断裂带地热水的水文地球化学特征及成因模式的讨论[J]. *中国地质*, 2024, **51**(1): 341 - 359. [LYU Guosen, ZHANG Xu, ZHANG Yunhui, et al. Discussion on hydrogeochemical characteristics and genetic model of geothermal waters in Xianshuihe, Anninghe and Longmenshan fault zones in western Sichuan, China [J]. *Geology in China*, 2024, **51**(1): 341 - 359] DOI: 10.12029/gc20230309001
- [23] 王敏杰, 李天斌, 孟陆波, 等. 四川“Y 字形”断裂交汇部应力场反演分析[J]. *铁道科学与工程学报*, 2015, **12**(5): 1088 - 1095. [WANG Minjie, LI Tianbin, MENG Lubo, et al. Back analysis of stress field in the intersection region of Y shaped fault, Sichuan [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2015, **12**(5): 1088 - 1095] DOI: 10.19713/j.cnki.43 - 1423/u.2015.05.016
- [24] 闻学泽, ALLEN C R, 罗灼礼, 等. 鲜水河全新世断裂带的分段性、几何特征及其地震构造意义[J]. *地震学报*, 1989, **11**(4): 362 - 372. [WEN Xueze, ALLEN C R, LUO Zhuoli, et al. Segmentation and geometric features, and their seismotectonic implications for the Holocene Xianshuihe fault zone [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1989, **11**(4): 362 - 372]
- [25] 潘家伟, 李海兵, CHEVALIER M L, 等. 鲜水河断裂带色拉哈—康定段新发现的活动的断层: 木格措南断裂[J]. *地质学报*, 2020, **94**(11): 3178 - 3188. [PAN Jiawei, LI Haibing, CHEVALIER M L, et al. A newly discovered active fault on the Selaha - Kangding segment along the SE Xianshuihe fault: The South Mugecuo fault [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, **94**(11): 3178 - 3188] DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020196
- [26] 李传友, 孙凯, 马骏, 等. 四川泸定 6.8 级地震——鲜水河断裂带磨西段局部发起、全段参与的一次复杂事件[J]. *地震地质*, 2022, **44**(6): 1648 - 1666. [LI Chuanyou, SUN Kai, MA Jun, et al. The 2022 M_s 6.8 Luding earthquake: A complicated event by faulting of the Moxi segment of the Xianshuihe fault zone [J]. *Seimology and Geology*, 2022, **44**(6): 1648 - 1666] DOI: 10.3969/j.issn.0253 - 4967.2022.06.017
- [27] KONNO K, OHMACHI T. Ground - motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor [J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, **88**(1): 228 - 241. DOI: 10.1029/98JB00054
- [28] WATHELET M, JONGMANS D, OHRNBERGER M, et al. Array performances for ambient vibrations on a shallow structure and consequences over Vs inversion [J]. *Journal of Seismology*, 2008, **12**: 1 - 19. DOI: 10.1007/s10950 - 007 - 9067 - x
- [29] DEL GAUDIO V, COCCIA S, WASOWSKI J, et al. Detection of directivity in seismic site response from microtremor spectral analysis [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2008, **8**(4): 751 - 762. DOI: 10.5194/nhess - 8 - 751 - 2008
- [30] DEL GAUDIO V, WASOWSKI J, MUSCILLO S. New developments in ambient noise analysis to characterise the seismic response of landslide - prone slopes [J]. *Natural Hazards and Earth System Science*, 2013, **13**(8): 2075 - 2087. DOI: 10.5194/nhess - 13 - 2075 - 2013
- [31] DEL GAUDIO V, MUSCILLO S, WASOWSKI J. What we can learn about slope response to earthquakes from ambient noise analysis: An overview [J]. *Engineering Geology*, 2014, **182**: 182 - 200. DOI: 10.1016/j.enggeo.2014.05.010
- [32] GRELLE G, BONITO L, LAMPASI A, et al. SiSeRHMap v1.0: A simulator for mapped seismic response using a hybrid model [J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(4): 1567 - 1596. DOI: 10.5194/gmd - 9 - 1567 - 2016
- [33] GRELLE G, WOOD C, BONITO L, et al. A reliable computerized litho-morphometric model for development of 3D maps of Topographic Aggravation Factor (TAF): The cases of East Mountain (Utah, USA) and Port au Prince (Haiti) [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2018, **16**(5): 1725 - 1750. DOI: 10.1007/s10518 - 017 - 0272 - x
- [34] GRELLE G, GARGINI E, FACCIORUSSO J, et al. Seismic site

- effects in the Red Zone of Amatrice hill detected via the mutual sustainment of experimental and computational approaches [J]. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 2020, **18**(4): 1955 – 1984. DOI: 10.1007/s10518-019-00777-z
- [35] LUO Yonghong, XU Qiang, ZHAN Weiwei, et al. Seismic hazard prediction using multispectral amplification maps in a complex topographic area: A case study of Qiaozhuang Town, Sichuan Province, southwest China [J]. *Journal of Mountain Science*, 2022, **19**(3): 726 – 739. DOI: 10.1007/s11629-021-6837-9
- [36] 许强, 李为乐. 汶川地震诱发滑坡方向效应研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2010, **42**(S1): 7 – 14. [XU Qiang, LI Weile. Study on the direction effects of landslides triggered by Wenchuan Earthquake [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2010, **42**(S1): 7 – 14] DOI: 10.15961/j.jsuese.2010.s1.007
- [37] 马海森, 罗永红, 南凯. 基于环境噪声表征石膏地滑坡堆积区场地特征[J]. *科学技术与工程*, 2022, **22**(22): 9508 – 9515. [MA Haimiao, LUO Yonghong, NAN Kai. Site characteristics of gypsum landslide accumulation based on environmental noise [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, **22**(22): 9508 – 9515] DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2022.22.007
- [38] 江鹏, 李萍萍, 李同林, 等. 2022 年四川泸定 $M_s 6.8$ 地震强震记录特征[J]. *地震研究*, 2023, **46**(4): 593 – 602. [JIANG Peng, LI Pingping, LI Tonglin, et al. The characteristics of strong motion records of the 2022 Luding, Sichuan $M_s 6.8$ earthquake [J]. *Journal of Seismological Research*, 2023, **46**(4): 593 – 602] DOI: 10.20015/j.cnki.ISSN1000-0666.2023.00570
- [39] GB50011—2010. 建筑抗震设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010. [GB50011 – 2010. Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2010]

Seismic Response of Moxi Terrace Induced by the $M_s 6.8$ Luding Earthquake on September 5th, 2022, in Luding County, Sichuan, China

WANG Pengcheng, LUO Yonghong*, LIU Hongfeng, JING Junjie

(State Key Laboratory of Geological Hazard Prevention and Control and Geological Environmental Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: On September 5, 2022, a severe earthquake of $M_s 6.8$ occurred in Luding county, China, with its epicenter approximately 7 km away from Moxi Town. This earthquake triggered numerous shallow landslides along the edges of Moxi Terrace, a glacial landform constituted by glacial till, alluvial and colluvial sediments, and remnants of ancient debris flows.

In this paper, the seismic effects on Moxi Terrace were investigated through surveys, unmanned aerial vehicle (UAV) measurements, ambient noise testing and multispectral topographic amplification analysis by SiSeRHMap methodology (simulator for mapped seismic response using a hybrid model).

(1) A total of 90 co-seismic landslides were identified along the edges of the Terrace, primarily developed on the eastern and western flanks, featuring small-scale shallow collapses with 2 – 5 meters in depths, and slopes exceeding 50° .

(2) By an examination of ambient noise levels and vertical-to-horizontal spectral ratios (H/V) at 33 sites on the Terrace, it found that the predominant frequencies of site were primarily low frequencies of 1 – 4 Hz. The amplification factor of H/V spectral ratio initially increased and then decreased with distance increasing from the Terrace edge. Most sites within 20 meters of the Terrace edge exhibited directional effects, with the dominant direction approaching to the perpendicular of the air face of the Terrace.

(3) By SiSeRHMap method, it suggested that the collapses occurred on the edges of Moxi Terrace were

consistent with resonance effect of site terrain. In areas with steeper slopes, more prominent topography, and softer soil on the eastern and western flanks of the Terrace, the seismic responses were more intense and prone to failure.

This study has practical value and theoretical significance for post-disaster reconstruction and seismic fortification of Moxi Terrace.

Key words: Luding Earthquake; Moxi Terrace; ambient noise; H/V spectral ratio; topographic amplification effect

(责任编辑 朱颖彦 钟雨倩)