

基于地脉动观测的花岗岩风化壳边坡结构探查与动力响应研究

郭 桢, 毛无卫, 黄 雨, 潘 龙, 牟 旭, 崔寅兵

Investigation of the structure and dynamic response of granite weathering crust slopes based on microtremor recordings: A case study of a landslide in Lishui, Zhejiang Province

GUO Zhen, MAO Wuwei, HUANG Yu, PAN Long, MOU Xu, and CUI Yinbing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412049>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

西安典型地裂缝场地地脉动测试及地震响应特征分析

Ground pulsation tests and analysis on seismic response of typical ground fissure sites in Xi'an

王 晗, 邓亚虹, 慕焕东, 薛捷 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(4): 55-64

降雨对花岗岩风化层路堑边坡滑动模式影响

Influence of rainfall on sliding modes of cutting slope of weathered granite stratum: Taking Yunxiao section in the Yunping freeway in Fujian for example

蔡荣坤, 戴自航, 徐根连, 胡长江 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(2): 27-35

基于“阶跃”变形特征的降雨型滑坡预警判据探讨

Preliminary analysis on rainfall thresholds for early warning of the rainfall induced landslides based on “step” deformation characteristics

贲琰棋, 易武, 李华兵, 黄晓虎, 刘伟, 肖宇煌 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(4): 30-38

台风暴雨型滑坡滞后效应分析

Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon “Lekima” in Qingtian County, Zhejiang Province

栗倩倩, 王伟, 黄亮, 柴波, 高乐 中国地质灾害与防治学报. 2022, 33(6): 10-19

“滞水构造”对降雨型滑坡的控制作用

Controlling influence of the “perched water structure” on rainfall-induced landslide: A case study of the Yaogou landslide in Zhushan County, Hubei Province

魏鹏飞, 李丽华, 杨潇, 汪子奇 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(2): 98-106

广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究

Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province

曾新雄, 刘佳, 赖波, 赵风顺, 江山 中国地质灾害与防治学报. 2024, 35(5): 141-150



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412049

郭桢, 毛无卫, 黄雨, 等. 基于地脉动观测的花岗岩风化壳边坡结构探查与动力响应研究——以浙江丽水某滑坡为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2025, 36(2): 54-62.

GUO Zhen, MAO Wuwei, HUANG Yu, et al. Investigation of the structure and dynamic response of granite weathering crust slopes based on microtremor recordings: A case study of a landslide in Lishui, Zhejiang Province[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 54-62.

基于地脉动观测的花岗岩风化壳边坡结构 探查与动力响应研究 ——以浙江丽水某滑坡为例

郭 桢^{1,2}, 毛无卫^{1,2}, 黄 雨^{1,2}, 潘 龙¹, 牟 旭¹, 崔寅兵¹

(1. 同济大学土木工程学院地下建筑与工程系, 上海 200092; 2. 同济大学岩土及地下工程教育部
重点实验室, 上海 200092)

摘要: 花岗岩风化壳边坡在我国东南地区广泛分布, 极易在降雨条件下发生群发性滑坡, 因此, 花岗岩风化壳边坡结构探查和动力响应研究对此类地质灾害防治具有重要的意义。文章以浙江丽水某降雨诱发的花岗岩风化壳滑坡为例, 于 2019 年 7 月滑坡发生后开展现场调查, 结果表明该边坡由粗粒花岗岩风化层和花岗闪长岩风化层组成; 2024 年 11 月开展边坡地脉动监测, 基于地脉动 HVSR 法的分析表明边坡坡顶、坡腰、坡脚的卓越频率不同, 基于 HVSR 法的边坡剪切波速反演结果表明边坡由外向内主要由花岗岩风化残积层、全-强-中风化层组成, 存在 2~3 个可能演化为滑面的地下界面, 边坡在坡向方位上具有最显著的放大效应, 且随高程的增大, 3~22 Hz 内竖直向和 4~60 Hz 水平向放大效应显著增强, 各台站间同频率上存在放大同步现象, 这不利于动力荷载作用下边坡的稳定, 但跨频率间放大不同步, 这有利于动力荷载作用下边坡的稳定性。

关键词: 花岗岩风化壳; 降雨型滑坡; 地脉动; HVSR 法; 卓越频率; 放大效应

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0054-09

Investigation of the structure and dynamic response of granite weathering crust slopes based on microtremor recordings: A case study of a landslide in Lishui, Zhejiang Province

GUO Zhen^{1,2}, MAO Wuwei^{1,2}, HUANG Yu^{1,2}, PAN Long¹, MOU Xu¹, CUI Yinbing¹

(1. Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education,

Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Granite weathering crust slopes are widely distributed in southeastern China and are highly susceptible to mass

收稿日期: 2025-01-02; 修订日期: 2025-02-05

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012601)

第一作者: 郭 桢(1984—), 男, 山西祁县人, 地质工程专业, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事工程地质教学与科研工作。

E-mail: zhenguo@tongji.edu.cn

通讯作者: 黄 雨(1973—), 男, 江苏南京人, 地质工程专业, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程地质教学与科研工作。

E-mail: yhuang@tongji.edu.cn

landslides during rainy events. Investigating the structure of granite weathering crust slopes and studying the dynamic responses of these slopes are crucial for preventing and mitigating such geological disasters. This paper examines a landslide in Lishui, Zhejiang Province, with field investigations conducted in July 2019 immediately following the landslide event. The results indicate that the slope consists of a coarse-grained granite weathering layer and a granodiorite weathering layer. In November 2024, subsequent microtremor monitoring was carried out on the slope. Utilizing the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) method, the analysis identified distinct predominant frequencies at the top, middle, and base of the slope. Shear wave velocity inversion based on the HVSr method showed that from the exterior to the interior, the slope mainly consists of granite weathered residual soil layers and fully to moderately weathered layers, with 2 to 3 potential underground interfaces that could evolve into sliding surfaces. The slope exhibits the most significant amplification effect in the direction of the slope, and as the elevation increases, the amplification effects significantly intensify within the 3 to 22 Hz vertically and 4 ~ 60 Hz horizontally, with synchronization of amplification at the same frequencies across different stations, which is detrimental to the slope stability under dynamic loading. However, the asynchronization of amplification across different frequencies is beneficial to the stability of the slope under dynamic loading.

Keywords: granite weathering crust; rainfall-induced landslides; microtremor; HVSr method; predominant frequencies; amplification effects

0 引言

由于早中生代的构造事件和晚中生代规模庞大的花岗质岩浆活动,我国东南地区浙江、福建、广东等地分布有大量花岗岩^[1-2]。在强烈构造^[3]和温暖湿润的亚热带季风性气候^[4]的影响下,花岗岩风化强烈,形成广泛分布且深厚的花岗岩风化壳边坡^[5-7],主要由花岗岩残积土和风化花岗岩组成,具有结构疏松、孔隙比大、粗颗粒占比大等特点^[8-9],遇水时极易快速崩解软化^[10-14]。我国东南地区常年降雨量大,梅雨期和台风期降雨占全年总降雨量的 70% 以上^[15-16],长时间降雨或短时强降雨极易诱发大量花岗岩风化壳滑坡^[17-21]。例如 2024 年 6 月 9—19 日,福建省龙岩、三明等地连续降雨,24 h 最大降雨量 300 mm 以上,仅在龙岩市就诱发花岗岩风化层的滑坡等地质灾害 1.6 万处;2024 年 4 月 19 日 9 时—20 日 9 时,广东韶关江湾镇累计降雨达到 217 mm,导致江湾镇 80 km² 范围内发生 1 100 多处花岗岩风化层滑坡(据中国地质调查局)。因此,花岗岩风化壳滑坡灾害研究对防灾减灾具有极其重要的意义。

花岗岩风化壳滑坡多沿花岗岩残积土和全/强风化花岗岩层界面发生^[17-19,21],因此,此类灾害防灾减灾研究的关键是花岗岩风化壳结构的探查,尤其是花岗岩风化残积土和全风化层厚度的确定。目前花岗岩风化壳结构探查的确定主要采用钻探、物探等方法^[22-23],但均存在高密度探查时经济性差、现场操作复杂等问题。为克服这些劣势,基于地脉动观测的地下结构探测方

法,以其仪器设备操作简单快速、现场布设灵活的优势而得到越来越多的应用。国内外学者开发了多种基于地脉动观测的地下结构反演算法:(1)基于地脉动台阵记录的地下结构反演算法^[24-26]可获得较精确的地下分层结构剪切波速结构,但此类算法对分层界面不敏感,同时野外记录中需要组成台阵且必须获得较长时间的地脉动记录,才能完成地下结构反演,因此,此类算法较难快速识别花岗岩风化壳结构;(2)基于单点地脉动水平-竖直谱比法(horizontal-to-vertical spectral ratio, HVSr)的地下结构反演算法^[27-29],由于单点短时(约 30 min)地脉动记录即可获得地下结构,且对分层界面(如风化层-基岩界面、滑面等)敏感,近年来在滑坡勘察和监测中得到越来越多的应用^[30],尤其在植被覆盖密度高的东南地区更加适用。因此,本文将采用 HVSr 法开展花岗岩风化壳边坡结构探查。

我国东南地区尤其福建地区靠近环太平洋地震带,地震可对东南花岗岩风化壳边坡产生扰动。一方面加剧花岗岩风化壳边坡的强度劣化;另一方面由于边坡结构和地形原因而产生动力非线性响应,进而加剧边坡失稳。因此,东南花岗岩风化壳滑坡灾害防灾减灾研究的另一个关键是结合花岗岩风化壳边坡结构和地形特点的边坡动力响应特征研究。开展边坡动力响应研究的主要方法有模型试验法、数值模拟法、现场观测法等^[31-32]。除此之外,近年来基于地脉动 HVSr 法的动力响应研究也得到越来越多的关注^[32-33]。地脉动 HVSr 法于 1989 年引入,用于快速估算场地动力响应参数,如

卓越频率(f_0)、高阻抗比地层界面深度、放大系数($HVSR@f_0$)、剪切波速(V_s)等, Bard 和 SESAME-Team^[29]提出了该方法的标准操作流程, 之后该方法得到广泛应用^[27-28, 30]。Guo 等^[30, 33-34]通过对地脉动源区定位及体波和面波成分的分离探讨了 HVSR 法的理论依据并拓展了其边坡地下结构反演、场地动力响应特征和边坡安全监测研究中的应用。

本文以浙江省丽水市松阳县象溪镇南坑源花岗岩风化壳滑坡为研究案例(图 1), 通过野外调查、现场地脉动监测等方法, 快速探查花岗岩风化壳分层结构, 并基于地脉动在地层中的响应机理^[30, 33], 研究花岗岩风化壳边坡的动力响应特征, 如卓越频率(f_0)、放大系数($HVSR@f_0$)等随时间、坡向、地形等因素的关系, 为东南地区花岗岩风化壳滑坡灾害防治提供科学支撑。

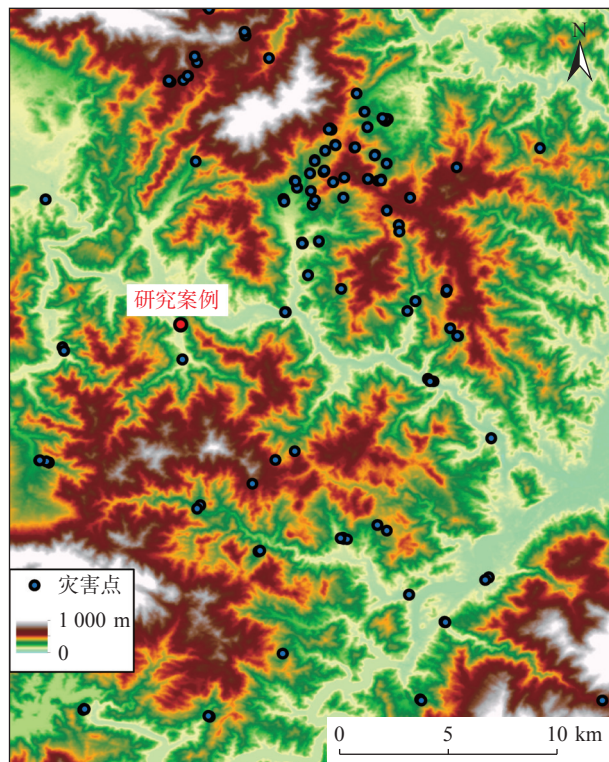


图 1 2019 年浙江丽水降雨型滑坡和本文研究案例位置

Fig. 1 Rainfall-induced landslides in Lishui, Zhejiang Province in 2019 and the location of the study site

1 数据与方法

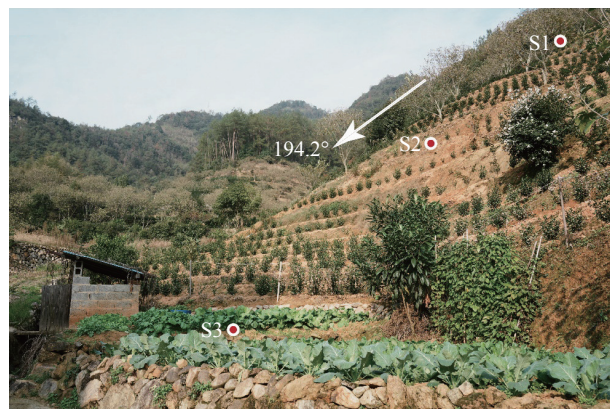
1.1 数据

研究区位于浙江省丽水市松阳县象溪镇(图 1), 为低山丘陵地貌, 区域内地质条件复杂, 断层发育, 地层以中生代花岗岩为主。在常年累月的差异性风化下形成了众多边坡, 坡角多集中在 $25^\circ \sim 50^\circ$ 。

本文研究边坡案例现场见图 2, 坡高约 18 m, 坡长约 50 m, 坡向 194° , 坡度约 32° 。2019 年 7 月, 因降雨发生滑坡灾害, 见图 2(a), 滑坡后暴露的全/强风化花岗岩见图 3, 滑坡南段为全/强风化粗粒花岗岩, 见图 3(a), 主要为粗粒石英、强风化长石和高岭土, 强度低, 扰动后易溃散; 滑坡中段为花岗闪长岩, 见图 3(b), 颗粒较细, 强度低。



(a) 2019 年 7 月 13 日



(b) 2024 年 11 月 22 日

图 2 浙江丽水研究案例边坡

Fig. 2 Field images of the study slope in Lishui, Zhejiang



(a) 粗粒花岗岩

(b) 花岗闪长岩

图 3 研究案例典型全/强风化

Fig. 3 Examples of fully/strongly weathered

本文采用三分量地震仪 (Smartsolo IGU-16HR 3C)

开展地脉动记录,地震仪布设地点见图 2(b), S1 台站位于坡顶, S2 台站位于坡中, S3 台站位于坡脚。为保证数据记录期间无强人类活动噪音影响,因此选择记录时间为 2024 年 11 月 22 日 17:00 至 11 月 23 日 08:00。

1.2 地脉动 HVSR 法

HVSR 法的基本原理是通过场地地表水平向和竖直向振动的频谱比表征地下结构^[23]。当场地为基岩时,理论上特定频段中水平向和竖直向的振动响应相同,即 HVSR 谱无明显峰值。当场地地表为软弱土层,下伏为基岩,且两层介质的波速阻抗比较大时, HVSR 谱在特定频段内出现相应显著的峰,该峰对应的频率为场地的卓越频率($f_i, i = 0, 1, 2, \dots$), 其 HVSR 值($HVSR@f_i$)可认为是场地的放大系数。

本文记录的地脉动为三分量(V, 竖直向; NS, 南北向; EW, 东西向)连续时间序列, 采样率为 1 000 Hz。采用下列步骤进行数据处理:

(1) 将三个分量的连续时间序列分割为 60 s 长的片段, 片段间不重叠;

(2) 去除每个时间序列片段的均值和线性趋势, 并依据仪器 PZ 参数去除每个时间序列片段的仪器响应;

(3) 计算短期(1 s)到长期(30 s)平均振幅比(STA/LTA), 并保留 STA/LTA 在 0.2 ~ 2.5 范围内的时间序列片段, 以保证数据不包含偶尔出现的能量暴发;

(4) 对保留的时间序列片段采用 5% 的余弦锥化, 并采用快速傅立叶变换(FFT)法计算各片段的振幅谱 $V(t, f)$ 、 $NS(t, f)$ 、 $EW(t, f)$;

(5) 采用带宽系数为 40 的 Konno-Ohmachi 法^[34]平滑处理各频谱;

(6) 依据以下公式计算所有时间序列片段的 HVSR 谱^[27, 29]:

$$HVSR(t, f) = \sqrt{\frac{NS(t, f)^2 + EW(t, f)^2}{2V(t, f)^2}} \quad (1)$$

(7) 计算 HVSR 谱在全部记录时间段内的均值和标准差, 依据 Bard 和 SESAME-Team^[29]获得各台站所在地的卓越频率 f_i ;

(8) 依据 Konno 等^[35]和 Guo 等^[34]反演各台站所在地的地下剪切波速 V_s ;

(9) 计算各方位角上的水平分量值, 并计算各方位上的 HVSR 谱:

$$H(t, f, \varphi) = -\cos(\varphi)NS(t, f) - \sin(\varphi)EW(t, f) \quad (2)$$

$$HVSR(t, f, \varphi) = H(t, f, \varphi)/V(t, f) \quad (3)$$

式中: φ ——后方位角, 自北顺时针 $0^\circ \sim 360^\circ$;

(10) 计算以坡角竖直向频谱为基准的坡面台站竖直向和水平向的放大谱:

$$VV_{toe}SR(t, f) = V_{si}(t, f)/V_{toe}(t, f) \quad (4)$$

$$HV_{toe}SR(t, f) = H_{si}(t, f)/V_{toe}(t, f) \quad (5)$$

式中: $V_{toe}(t, f)$ ——坡脚 S3 台站竖直分量频谱;

$V_{si}(t, f)$ ——坡面台站 S1 和 S2 竖直分量频谱;

$H_{si}(t, f)$ ——坡面台站 S1 和 S2 水平分量频谱, 由式(6)计算:

$$H(t, f) = \sqrt{\frac{NS(t, f)^2 + EW(t, f)^2}{2}} \quad (6)$$

(11) 计算各台站间 HVSR 谱在各频率对内的 Pearson 相关系数:

$$CC_{S_i, S_j}(f_m, f_n) = \frac{\text{cov}(HVSR_{S_i}(t, f_m), HVSR_{S_j}(t, f_n))}{\sigma(HVSR_{S_i}(t, f_m))\sigma(HVSR_{S_j}(t, f_n))} \quad (7)$$

式中, S_i 、 S_j ——台站 S_1 、 S_2 、 S_3 ;

f_m 、 f_n ——频率, $m = 1, 2, 3, \dots, n = 1, 2, 3, \dots$ 。

2 结果与分析

2.1 HVSR 谱

采用式(1)计算各台站在时间和频率域内的 HVSR 谱(图 4), 各台站 HVSR 谱在记录时间内变化不显著, 表明各台站在记录时间内无显著噪声干扰, 依据 Bard 和 SESAME-Team^[29]建议的 HVSR 谱可靠性标准, 可初步判定 HVSR 谱可靠且可用于地下结构反演的动力响应分析。

进一步计算各台站 HVSR 谱的均值和标准差, 如图 5 所示, 黑色实线为 HVSR 谱的均值, 灰色区域为 HVSR 谱均值加减一个标准差的范围, 依据 Bard 和 SESAME-Team^[29]建议的卓越频率识别标准, 可识别出各台站所在场地的卓越频率, 如坡顶台站 S1 处存在 3 个卓越频率($f_0 = 7.3$ Hz, $f_1 = 14.9$ Hz, $f_2 = 35.5$ Hz), 对应 3 个显著阻抗比界面, 即可能为中-强-全风化花岗岩-花岗岩风化残积土 4 层风化层的界面; 坡腰台站 S2 处存在 3 个卓越频率($f_0 = 13.4$ Hz, $f_1 = 25.3$ Hz, $f_2 = 50.0$ Hz), 对应 3 个显著阻抗比界面, 即可能为中-强-全风化花岗岩-花岗岩风化残积土 4 层风化层的界面; 坡脚台站 S3 处存在 2 个卓越频率($f_0 = 38.4$ Hz, $f_1 = 54.2$ Hz), 对应两个显著阻抗比界面, 即可能为强-全风化花岗岩-花岗岩风化残积土 3 层风化层的界面。

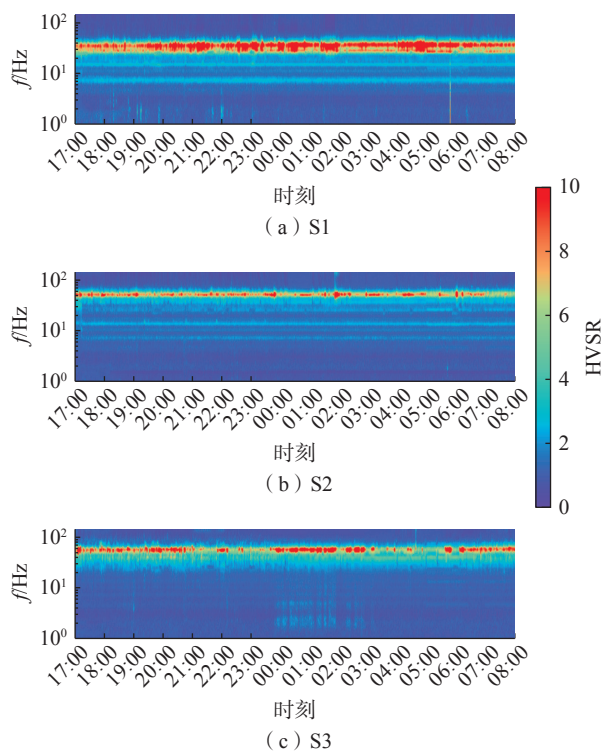


图 4 地脉动 HVSR 谱随时间的变化

Fig. 4 Time-dependent variation of HVSR spectra at three monitoring stations

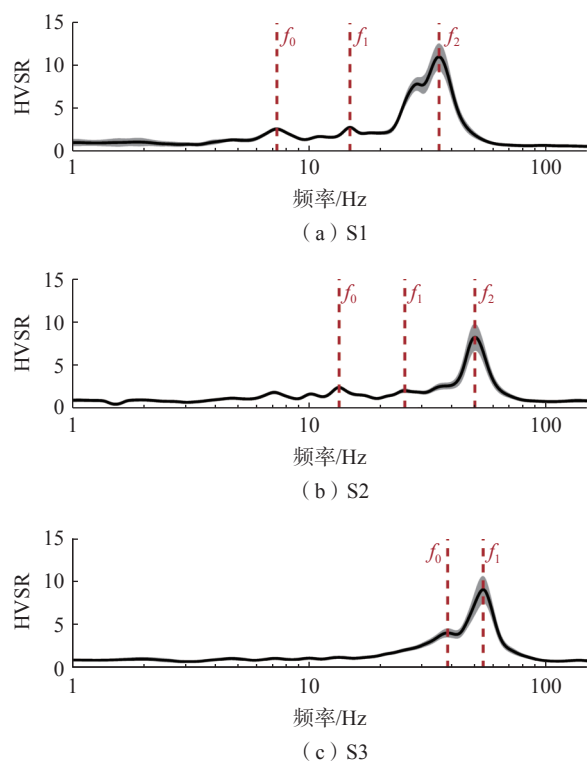


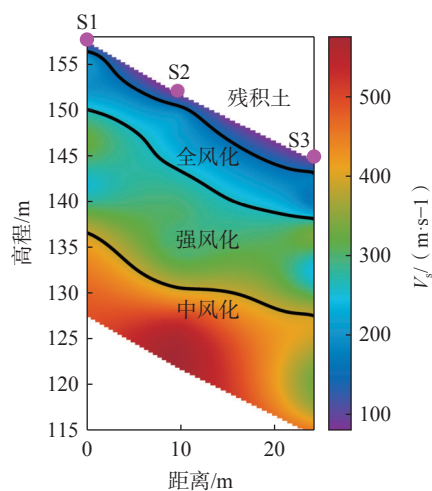
图 5 各台站的平均 HVSR 谱及卓越频率

Fig. 5 Average HVSR spectra and predominant frequencies at each station

如图 5 所示,各卓越频率处的放大系数不同,最大的 HVSR 值(8~12)出现在最高的卓越频率处,见图 5(a)(b)的 f_2 处、图 5(c)的 f_1 处,说明表层风化残积层与下伏物质的阻抗比、强度差别最大,更容易形成滑面。而较低卓越频率的放大系数(2~4)不显著,这表明花岗岩风化壳中随深度增大风化残积土、全风化层逐渐过渡为强风化层和中风化层。

2.2 边坡地下结构反演

依据图 5 的平均 HVSR 谱,反演边坡压缩波速(V_p)和剪切波速(V_s)结构(图 6),坡面存在 1~2 m 厚的低速体($V_s < 150$ m/s),现场调查发现,坡面为当地村民耕植工作形成的松散层底部为残积层,见图 2(b)。随深度增大,波速总体逐渐增大,参考 Moon 等^[27]在花岗岩风化壳中测得的 V_s 剖面可知, V_s 值在 150~260 m/s 范围内的物质为全风化花岗岩, V_s 值在 260~395 m/s 范围内的物质为强风化花岗岩, V_s 值大于 395 m/s 的物质为中风化花岗岩。同时,各风化层的边界(图 6 中的黑线)基本与坡面平行,表明花岗岩的风化作用基本随深度而降低。然而,也可观察到部分速度异常,即局部速度较周边突然升高或降低,这与花岗岩的空间变异性相关,即该边坡的花岗岩结构和矿物在空间上不均匀,既存在粗粒花岗岩,又存在花岗闪长岩,其风化产物也不同,因此,表现为波速的局部变异。

图 6 根据图 5 中 HVSR 谱反演的边坡剪切波速(V_s)剖面Fig. 6 The S-wave velocity (V_s) cross-section profile of the slope inverted from the HVSR spectra shown in Fig. 5

2.3 边坡放大效应的方向性

在动力荷载作用下,边坡由于边坡内部结构和差异性和地形等因素的影响,可能会产生局部放大效应,同时具有方向性,因此,本文通过地脉动观测,开展了边坡

放大效应的研究。图 7 为各台站各方位上的 HVSR 谱, 图中洋红色线表示各频率上放大系数最大的方位, 白色虚线为边坡的坡向(方位角 194°)。由图可知, 边坡各台站在各频率上均表现出与方位相关的放大效应, 而在各台站的卓越频率处放大效应的方向性最显著, 同时各频率上最显著放大效应所在的方位不同, 总体与坡向大致相同。在坡顶台站 S1 和坡腰台站 S2 的卓越频率 f_2 左右, 最显著放大效应所在的方位发生较大偏转, 使最显著放大效应发生在更接近于边坡坡向的方位上; 而坡脚台站 S3 处, 最显著放大效应所在方位较稳定, 与坡向相差大约 30° 。这说明, 边坡对动力的放大效应与坡向相关, 且最显著的放大效应发生在边坡的坡向方向, 这主要是由于边坡的临空方向更有利于边坡发生水平向位移, 从而导致全频段内的放大效应, 叠加地下分层结构导致的放大效应, 使卓越频率处的放大效应在边坡坡向方向最显著。因此, 在研究边坡的动力响应时, 除考虑地形因素外, 还应考虑边坡内部结构导致的放大效应。

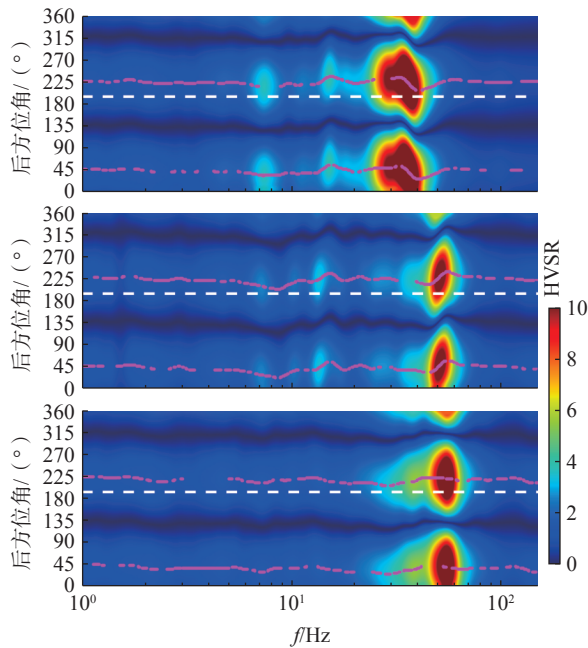
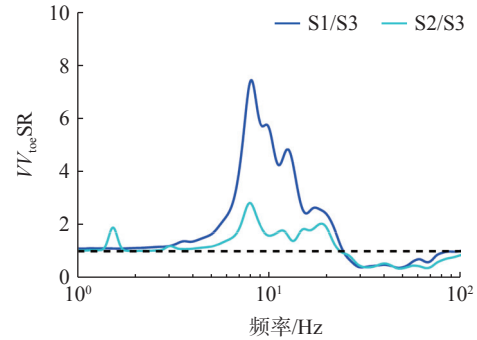


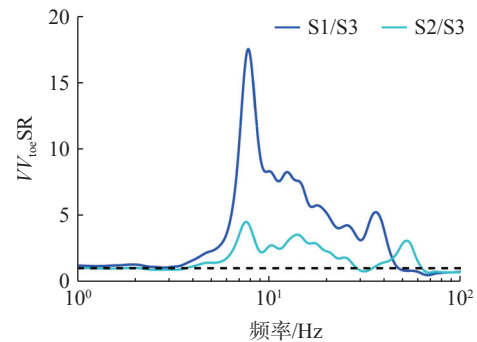
图 7 台站 S1、S2 和 S3 各后方位角上的 HVSR 谱
Fig. 7 Directional HVSR spectra for three stations

2.4 边坡放大效应与高程的关系

在水平场地上, 地表竖直向与基岩竖直向相比几乎无放大效应, 因此, HVSR 谱可较真实反映水平场的放大效应。然而, 对于边坡场地, 由于地形的变化, 竖直向可能随地形发生不同程度的放大效应, 此时, HVSR 谱并不能表明坡面各点真实的动力响应特征, 因此, 本文选取坡脚处竖直向的频谱作为基准, 计算坡面各台站竖



(a) 竖直向与坡脚台站竖直向的放大效应



(b) 水平向与坡脚台站水平向的放大效应

图 8 坡顶台站 S1 和坡腰台站 S2

Fig. 8 Amplification effects at top slope station S1 and mid-slope station S2

直向和水平向分别与基准的比值(图 8), 从而真实反映由于地形造成的竖直向和水平向的放大效应。

由图 8(a)可见, 坡顶处(S1)和坡腰处(S2)竖直向的频谱在 $3 \sim 22$ Hz 频段内较坡脚处(S3)产生显著放大效应($VV_{\text{toe}}\text{SR}$ 达 7.5), 且坡顶台站放大最显著, 而在 $22 \sim 100$ Hz 频段内发生较显著的缩小效应。相似地, 由图 8(b)可见, 坡顶处(S1)和坡腰处(S2)水平向的频谱在 $4 \sim 60$ Hz 频段内较坡脚处(S3)产生显著放大效应($HV_{\text{toe}}\text{SR}$ 达 17.5), 且坡顶台站放大最显著; 与竖直向不同的是, 缩小效应几乎不存在。这表明, 由于坡顶和坡腰处在 f_0 (7.3 Hz 和 13.4 Hz)和 f_1 (14.9 Hz 和 25.3 Hz)上竖直向的放大效应, 导致水平放大效应被低估, 而由于坡顶和坡腰处在 f_2 (35.5 Hz 和 50.0 Hz)上的竖直向的缩小效应, 导致水平放大效应被高估, 而 $HV_{\text{toe}}\text{SR}$ 更能反映边坡场地的真实响应特征。

2.5 边坡各台站 HVSR 谱的互相关

为研究各台站 HVSR 谱在各频率间和各台站间的相关性, 即反映边坡各点放大效应是否同步, 本文依据式(7)计算了各台站对在各频率对内 HVSR 的 Pearson 相关系数(图 9)。

台站间 HVSR 谱仅在 $1 \sim 20$ Hz 频段内相同频率上

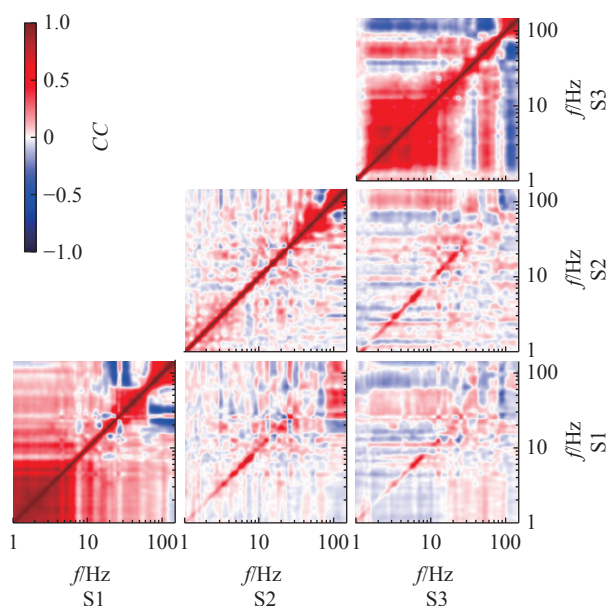


图 9 各台站对在各频率对内 HVSR 谱的 Pearson 相关系数(CC)

Fig. 9 Pearson correlation coefficients (CC) across frequency and station pairs for HVSR spectra

拥有较高的相关系数,代表其放大效应的同步性强,这可能不利于边坡在动力荷载下的稳定。跨频率间的相关系数绝对值小于 0.3,即相关性差,放大效应的同步性差,表明放大效应不因频率间信号的转化而同步。在同台站的自相关中,HVSR 谱在 1~10 Hz、40~100 Hz 等频段内出现不同频率间的强相关,尤其是 S1 和 S3 台站,这说明各台站在频率间存在信号转化,但转化过程与各台站的地质结构相关。最终各台站地质结构影响下的信号转化导致台站间信号和放大效应不同步,这可能有利于动力荷载作用下边坡的稳定性。

3 讨论

花岗岩风化壳边坡的灾变演化过程及防灾减灾研究的关键是对花岗岩风化壳厚度、内部结构的探查,从而为隐患识别、边坡岩土体结构劣化、长期稳定性评价提供依据。然而,由于东南地区低山丘陵区边坡数量众多,且植被覆盖茂密,常规结构探查手段存在不适用性和经济性差等问题,因此,需要针对性地探索经济、高效、准确的探查手段。地脉动作为一种被动的、易采集的地面震动信号,可广泛应用于地下结构探查中。基于地脉动 HVSR 法的地下结构探查方式更具有别的方法无可比拟的优势:(1)现场调查中灵活性高,可单点也可组网探查,同时每次只需要 30 min^[29]的记录即可有效开展地下结构反演。本文展示的 15 h 的地脉动记录表明地脉动 HVSR 法可稳定地获得卓越频率 f_0 ,进而可以稳

定地反演地下结构。(2)地脉动 HVSR 法对地层界面敏感^[27-28],因此,适用于调查地下结构中的高阻抗比界面,即极有可能发展为滑动面的地层界面,本文的研究表明,即使对花岗岩风化壳这类风化程度渐变的地层结构,地脉动 HVSR 法也可获得较好的地下结构反演结果。(3)本文展示的 15 h 的地脉动记录表明基于地脉动的放大系数随时间变化,这种变化可能与边坡结构的演化相关^[30],同时也可能与地脉动信号本身随时间的变化相关^[34-35],这为基于地脉动数据开展边坡动力响应提供了可能性,因此,未来可继续挖掘地脉动在边坡结构演化监测和边坡动力响应研究方面的潜力。

本研究还存在一定的局限性以及进一步研究的建议:(1)地脉动 HVSR 法虽然对地层界面较敏感,但无法获得地层的绝对波速,因此,需要结合台阵法,开发既能获得地层界面、又能获得地质体绝对波速的数据处理方式,提高反演的准确性和可推广性。(2)本文记录的时间仍较短,为开展基于地脉动的边坡动力响应研究,未来应增加地脉动的连续记录时长,从而获得足够多的动力信号样本量,尤其是真实强震的记录,将有助于获得边坡在真实强震条件下的动力响应特征。

4 结论和建议

(1)单点地脉动水平-竖直谱比法(HVSR)作为一种被动地震勘探法,可快速高效地开展东南花岗岩风化壳边坡结构探查,本文展示的案例表明该方法可有效探查风化壳中残积土、全-强风化花岗岩等分层结构,为风化壳边坡稳定性评价提供依据。

(2)花岗岩风化壳边坡存在显著的场地效应和地形效应,即边坡可在坡向方向产生显著的动力荷载放大效应,同时,随高程的增大,坡顶和坡腰可产生显著的竖直向和水平向动力放大效应。

(3)各台站间同频率上存在放大同步现象,这不利于动力荷载作用下边坡的稳定性,但跨频率间放大不同步,这有利于动力荷载作用下边坡的稳定性。

(4)未来研究中,建议加长花岗岩风化壳边坡上的地脉动连续记录,结合降雨等的监测,构建地脉动 HVSR 指标与降雨参数的关联关系,为降雨条件下花岗岩风化壳滑坡的监测和预警提供依据,同时积累强震记录,从而进一步分析花岗岩风化壳边坡在强动力荷载作用下的响应特征和边坡结构演化过程。

参考文献(References):

- [1] 王德滋,沈渭洲.中国东南部花岗岩成因与地壳演化

- [J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 209 – 220. [WANG Dezi, SHEN Weizhou. Genesis of granitoids and crustal evolution in southeast China [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(3): 209 – 220. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 舒良树. 华南构造演化的基本特征 [J]. 地质通报, 2012, 31(7): 1035 – 1053. [SHU Liangshu. An analysis of principal features of tectonic evolution in south China Block [J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(7): 1035 – 1053. (in Chinese with English abstract)]
- [3] GILDER S A, GILL J, COE R S, et al. Isotopic and paleomagnetic constraints on the Mesozoic tectonic evolution of south China [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1996, 101(B7): 16137 – 16154.
- [4] 陈春利, 方志伟. 福建省地质灾害气象预警有效降雨模型研究 [J]. 地质力学学报, 2023, 29(1): 99 – 110. [CHEN Chunli, FANG Zhiwei. Research on an effective rainfall model for geological disaster early warning in Fujian Province, China [J]. Journal of Geomechanics, 2023, 29(1): 99 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 尚彦军, 吴宏伟, 曲永新. 花岗岩风化程度的化学指标及微观特征对比——以香港九龙地区为例 [J]. 地质科学, 2001, 36(3): 279 – 294. [SHANG Yanjun, WU Hongwei, QU Yongxin. Comparison of chemical indices and micro- properties of weathering degrees of granitic rocks: A case study from Kowloon, Hong Kong [J]. Scientia Geologica Sinica, 2001, 36(3): 279 – 294. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 吴仕川. 花岗岩风化带的野外划分方法 [J]. 土工基础, 2013, 27(6): 105 – 106. [WU Shichuan. Field classification of granite weathering zone [J]. Soil Engineering and Foundation, 2013, 27(6): 105 – 106. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 吴宏伟, 尚彦军, 曲永新, 等. 香港花岗岩风化分级化学指标体系与风化壳分带 [J]. 工程地质学报, 1999, 7(2): 125 – 134. [WU Hongwei, SHANG Yanjun, QU Yongxin, et al. Chemical weathering indices, classification, and zoning of weathered granitic rock in Hong Kong [J]. Journal of Engineering Geology, 1999, 7(2): 125 – 134. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 王清, 唐大雄, 张庆云, 等. 中国东部花岗岩残积土物质成分和结构特征的研究 [J]. 长春地质学院学报, 1991, 21(1): 73 – 81. [WANG Qing, TANG Daxiong, ZHANG Qingyun, et al. A study on the structure and composition of granite residual soil in the eastern China [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 1991, 21(1): 73 – 81. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 王清, 蒋惠忠, 唐大雄. 闽南三角地区花岗岩残积土及其工程地质特性的研究 [J]. 福建地质, 1990, 9(2): 90 – 99. [WANG Qing, JIANG Huizhong, TANG Daxiong. A study on engineering geological properties of granitic residual soil in south Fujian [J]. Geology of Fujian, 1990, 9(2): 90 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 简文彬, 陈文庆, 郑登贤. 花岗岩残积土的崩解试验研究 [C] //中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上册). 北京, 2003: 312 – 315. [JIAN Wenbin, CHEN Wenqing, ZHENG Dengxian. Experimental study on disintegration of granite residual soil [C] // Proceedings of the 9th academic conference on soil mechanics and geotechnical engineering of china civil engineering society (Volume 1). Beijing, 2003: 312 – 315. (in Chinese)]
- [11] 简文彬, 胡海瑞, 罗阳华, 等. 干湿循环下花岗岩残积土强度衰减试验研究 [J]. 工程地质学报, 2017, 25(3): 592 – 597. [JIAN Wenbin, HU Hairui, LUO Yanghua, et al. Experimental study on deterioration of granitic residual soil strength in wetting-drying cycles [J]. Journal of Engineering Geology, 2017, 25(3): 592 – 597. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 吴能森. 花岗岩残积土的崩解性及软化损伤参数研究 [J]. 河北建筑科技学院学报, 2006, 23(3): 58 – 62. [WU Nengsen. A study on calving property and softening damage parameter of GRS [J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Science and Technology, 2006, 23(3): 58 – 62. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 张抒. 广州地区花岗岩残积土崩解特性研究 [D]. 武汉: 中国地质大学, 2009. [ZHANG Shu. Study on disintegration characteristics of granite residual soil in Guangzhou area [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 张抒, 唐辉明. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究 [J]. 岩土力学, 2013, 34(6): 1668 – 1674. [ZHANG Shu, TANG Huiming. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(6): 1668 – 1674. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王深法, 王援高, 胡珍珍. 浙江山地滑坡现状及其成因 [J]. 山地学报, 2000, 18(4): 373 – 376. [WANG Shenfa, WANG Yuangao, HU Zhenzhen. Actuality of hill sliding and its cause in the mountainous region of Zhejiang Province [J]. Journal of Mountain Research, 2000, 18(4): 373 – 376. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 詹良通, 李鹤, 陈云敏, 等. 东南沿海残积土地区降雨诱发型滑坡预报雨强-历时曲线的影响因素分析 [J]. 岩土力学, 2012, 33(3): 872 – 880. [ZHAN Liangtong, LI He, CHEN Yunmin, et al. Parametric analyses of intensity-duration curve for predicting rainfall-induced landslides in residual soil slope in southeastern coastal areas of China [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(3): 872 – 880. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 岳中琦. 梅大高速公路路基边坡失稳条件与滑坡机理初探 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(4): 1 – 12. [YUE Zhongqi. Study on the instability condition and landslide mechanism of subgrade slope in Mei-Da Expressway [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(4): 1 – 12. (in Chinese with English abstract)]

- [18] 曾新雄, 刘佳, 赖波, 等. 广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(5): 141 – 150. [ZENG Xinxiong, LIU Jia, LAI Bo, et al. Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(5): 141 – 150. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 栗倩倩, 王伟, 黄亮, 等. 台风暴雨型滑坡滞后效应分析——以浙江青田县“利奇马”台风为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2022, 33(6): 10 – 19. [LI Qianqian, WANG Wei, HUANG Liang, et al. Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon “Lekima” in Qingtian County, Zhejiang Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2022, 33(6): 10 – 19. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 周诗凯, 刘正华, 余丰华, 等. 浙江省地质灾害气象风险预警一体化建设的探索与实践 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 21 – 29. [ZHOU Shikai, LIU Zhenghua, YU Fenghua, et al. Exploration and practice of integrated construction of meteorological risk warning for geological hazards in Zhejiang Province [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 21 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 魏平新, 郑志文, 周志华, 等. 广东省暴雨型浅层滑坡灾害动力预警模型与气象风险预警研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(2): 30 – 39. [WEI Pingxin, ZHENG Zhiwen, ZHOU Zhihua, et al. Research on risk early warning for rainfall-induced shallow landslides in Guangdong Province based on a dynamic slope instability model [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(2): 30 – 39. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 薛翊国, 李术才, 苏茂鑫, 等. 厚层堆积层滑坡滑面的综合探测技术及其应用 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2013, 24(3): 43 – 53. [XUE Yiguo, LI Shucai, SU Maoxin, et al. Comprehensive detection technologies and their implementation on slip plane in thick colluvium landslide [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2013, 24(3): 43 – 53. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 陈松, 陈长敬, 吴俊, 等. 物探方法在强风化区填图中的应用探索 [J]. 地质力学学报, 2017, 23(2): 206 – 213. [CHEN Song, CHEN Changjing, WU Jun, et al. Application and exploration of geophysical methods in geological mapping in strongly weathered area [J]. Journal of Geomechanics, 2017, 23(2): 206 – 213. (in Chinese with English abstract)]
- [24] SHAPIRO N M, CAMPILLO M, STEHLY L, et al. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise [J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1615 – 1618.
- [25] WANG Shuang, SUN Xinlei, LIU Lanbo, et al. Sub-surface structures and site effects extracted from ambient noise in metropolitan Guangzhou, China [J]. *Engineering Geology*, 2020, 268: 105526.
- [26] CHEN Chunte, KUO C H, LIN Chemin, et al. Investigation of shallow S-wave velocity structure and site response parameters in Taiwan by using high-density microtremor measurements [J]. *Engineering Geology*, 2022, 297: 106498.
- [27] MOON S W, SUBRAMANIAM P, ZHANG Yunhuo, et al. Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: Empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore [J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 171: 103866.
- [28] BODIN P, SMITH K, HORTON S, et al. Microtremor observations of deep sediment resonance in metropolitan Memphis, Tennessee [J]. *Engineering Geology*, 2001, 62(1/2/3): 159 – 168.
- [29] ACERRA C, HAVENITH H, ZACHAROPOULOS S. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation [J]. SESAME European Research Project EVG1-CT-2000-00026, D23.12, 2004.
- [30] GUO Zhen, ZHOU Mi, HUANG Yu, et al. Monitoring performance of slopes *via* ambient seismic noise recordings: Case study in a colluvium deposit [J]. *Engineering Geology*, 2023, 324: 107268.
- [31] 刘俊辰, 王文沛, 高杨, 等. 强震条件下西藏则隆弄沟高位滑坡失稳特征研究 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(6): 15 – 23. [LIU Junchen, WANG Wenpei, GAO Yang, et al. Study on the unstable characteristics of high-level landslide in Zelongnong Gou, Xizang under severe earthquakes [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(6): 15 – 23. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 王来贵, 孙颖聪, 赵娜, 等. 地震作用下含弱层顺向坡响应规律分析 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 2024, 35(3): 26 – 35. [WANG Laigui, SUN Yingcong, ZHAO Na, et al. Analysis on the response of the dip slope with weak layer to earthquake [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2024, 35(3): 26 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [33] GUO Zhen, AYDIN A, HUANG Yu, et al. Polarization characteristics of Rayleigh waves to improve seismic site effects analysis by HVSR method [J]. *Engineering Geology*, 2021, 292: 106274.
- [34] GUO Zhen, XUE Mei, AYDIN A, et al. Locating the source regions of the single and double-frequency microseisms to investigate the source effects on HVSR in site effect analysis [J]. *Journal of Earth Science*, 2022, 33(5): 1219 – 1232.
- [35] KONNO K, OHMACHI T. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor [J]. *The Bulletin of the Seismological Society of America*, 1998, 88(1): 228 – 241.