

基于地脉动的花岗岩风化壳滑坡浅层结构与易发性指标研究

秦林鹏¹, 郭桢^{1,2*}, 吴琮³, 王亮清³, 郑国明⁴, 孙自豪³, 徐梓杰¹, 贺学峰³,
罗森林¹, 张晨曦³, 冯晨锐³, 张鑫⁵, 范鑫³, 孙夕育³, 黄胤焜⁵

1. 同济大学土木工程学院地质与水利工程系, 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
3. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北武汉 430074
4. 福建省地质科学研究所, 福建福州 350013
5. 中国地质大学(武汉)湖北巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 湖北武汉 430074

摘要

东南地区花岗岩风化壳边坡广布, 在梅雨或台风暴雨作用下易发生群发性滑坡。本文以2024年6月福建武平下坝乡四处典型降雨型滑坡为例, 结合高密度地脉动观测、无人机LiDAR和野外地质调查, 采用水平-垂直谱比(HVSR)法反演边坡二维横波速度结构。结果表明, 花岗岩风化壳可划分为低速残积土层、全风化层、强风化层和中风化层, 其中残积土层为主要滑体, 滑动面多发育于全风化层内。滑坡后缘普遍发育沿坡向展布的低速异常带, 并与径流路径和渗流点对应, 表明地下水弱化全风化层是重要控制因素。当残积土厚度大于约0.8 m且浅层平均横波速度低于约400 m/s时, 坡体滑坡易发性较高。研究为花岗岩风化壳边坡的快速调查与滑坡易发性评估提供地球物理参考。

关键词: 降雨型滑坡; 花岗岩风化壳; 地脉动; 滑坡结构; 易发性评估;

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2026-2-6

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012601)。

作者简介: 秦林鹏(1999-), 男, 博士研究生, 主要从事基于地球物理方法的地质灾害过程研究。Email: qinlp@tongji.edu.cn, ORCID: 0000-0003-2251-3811

*通讯作者: 郭桢(1984-), 副教授, 博士生导师, 主要从事工程地质教学与科研工作。

Study on the susceptibility index of the Rainfall-Induced Landslides in Granite Weathering Crust Using Seismic Ambient Noise Recordings

Linpeng Qin¹, Zhen Guo^{1,2*}, Qing Wu³, Liangqing Wang³, Guoming Zheng⁴, Zihao Sun³, Zijie Xu¹, Xuefeng He³, Senlin Luo¹, Chenxi Zhang³, Chenrui Feng³, Xin Zhang⁵, Xin Fan³, Xiyu Sun³, Yinkun Huang⁵

1. Department of Geological and Hydraulic Engineering, Tongji University, Shanghai 200092
2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092
3. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074
4. Fujian Institute of Geological Sciences, Fuzhou 350013
5. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan 430074

Abstract

Granite weathering crust slopes are widely distributed in southeastern China and are prone to clustered landslides under prolonged Meiyu rainfall or typhoon-induced rainstorms. Characterizing shallow structural properties and their role in slope instability is essential for disaster prevention and risk assessment. Taking four typical rainfall-induced landslides in Xiaba Township, Wuping County, Fujian Province, in June 2024 as examples, this study integrates high-density ambient-noise measurements, UAV-based LiDAR surveys, and field geological investigations. The horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSr) method was used to invert the two-dimensional shear-wave velocity structure of the slopes. The results show that the granite weathering crust can be divided into a low-velocity residual layer, completely weathered granite, highly weathered granite, and moderately weathered granite. The residual layer constitutes the main sliding mass, while sliding surfaces are mostly developed within the completely weathered layer. Low-velocity anomalies are commonly developed near the landslide head scarps and extend downslope, spatially corresponding to surface runoff paths and seepage points. This indicates that groundwater-induced weakening of the completely weathered layer is an important controlling factor. Comparative analysis of typical cases further suggests that slopes with a residual soil thickness greater than approximately 0.8 m and a shallow average shear-wave velocity lower than approximately 400 m/s exhibit relatively high landslide susceptibility. This study provides a geophysical reference for rapid investigation and

landslide susceptibility assessment of granite weathering crust slopes.

Keywords: Granite weathering crust; Rainfall-induced landslides; Ambient noise; Structure of landslides; Landslide susceptibility;

1. 引言

东南沿海地区受早中生代构造演化及晚中生代花岗质岩浆活动的共同影响,广泛发育晚中生代花岗岩体 (王德滋和沈渭洲,2023)。该类岩体长期暴露于温暖湿润的亚热带季风气候条件下,易发生强烈风化作用,形成结构分异显著、层次清晰的花岗岩风化壳 (Huang et al., 2013)。其风化产物主要包括残积土、全风化层及强风化层,普遍具有结构疏松、孔隙比大、粗颗粒含量高、遇水易崩解软化等特征,对降雨变化高度敏感 (Lin et al., 2022; 冯文凯和胡芮,2022)。在梅雨季和台风季持续强降雨作用下,该类风化壳型边坡极易发生浅层滑坡,通常表现为单体规模小、数量多、分布密集且突发性强,对农村聚落、道路及农林设施构成严重威胁 (Ren et al., 2019; Su et al., 2022; 闫金凯等, 2020)。近年来,福建、浙江、广东等地在极端降雨事件期间频繁发生花岗岩风化壳滑坡,表明在气候变化背景下此类灾害呈现出显著的高频化趋势 (Lin et al., 2022)。例如,2019年6月广东龙川县在短时强降雨条件下触发滑坡667处,造成约9000万元经济损失 (Ma et al., 2022); 2019年8月台风“利奇马”期间强降雨诱发滑坡超过2000处,造成35人遇难 (Cui et al., 2024); 2024年4月广东韶关极端降雨引发1192处滑坡并造成多名村民失联 (许强等, 2024); 本文研究区域——福建龙岩武平下坝乡,在2024年6月特大暴雨过程中亦诱发滑坡超过3900处,直接经济损失超过10亿元 (陈博等, 2024),充分表明该类边坡对极端降雨事件的高度敏感性及潜在风险。

已有研究表明,花岗岩风化壳滑坡多沿残积土层与全风化或强风化花岗岩界面发育,其形成机制受风化结构、物性弱化、地下水渗流以及结构面发育等多因素耦合作用控制 (张晨阳等,2018)。其中,降雨入渗引起的地下富水弱化带被认为是滑坡启动的关键因素,在地震横波速度结构剖面上通常表现为地下低速、低强度、连续性较差的局部带状结构 (刘红军等, 2024; 王志兵等,2020)。在强降雨条件下,地下水汇集导致孔隙水压力升高与颗粒间有效应力降低,从而引起风化层强度快速衰减并触发滑坡失稳。因此,滑坡的发生本质上是坡体结构条件与外部降雨触发因素共同作用的结果。然而,目前降雨型群发滑坡的判定多依赖降雨强度、累计雨量等外部触发指标,较少从滑体自身结构特征出发刻画其对降雨的响应能力。这种以外部触发因素为主导的判定方式,难以反映不同坡体在相同降雨条件下表现出的差异性稳定性,从而限制了滑坡风险评估的精细化水平。因此,从滑坡体结构角度出发,识别能够表征其弱化程度及对降雨敏感性的地球物理指标,对于提升滑坡易发性评价与风险识别能力具有重要意义。

目前,滑坡结构探查主要依赖地质调查、钻探、原位测试、电阻率成像及浅层地震反射或折射等方法 (Kamiński et al., 2021; Samyn et al., 2012), 其中,钻探虽可提供直接可靠的地

层信息，但难以满足大范围、高密度及快速调查的需求；主动源地球物理方法在丘陵山区受地形、植被及施工条件限制，布设成本高、效率较低，难以适用于灾后应急场景。浅层面波方法（如多通道面波成像方法，MASW）可通过多道记录反演剪切波速度结构，在工程勘察中得到广泛应用，但其横向分辨率受限于检波器间距及有效波长范围，且在复杂地形条件下阵列布设较为困难。此外，尽管利用高阶面波可以在一定程度上提高分辨能力 (Luo et al., 2008)，但高阶模态在实际观测中并非始终清晰可辨，其反演结果的稳定性在强非均质介质中亦受到一定限制。

相比之下，地脉动方法因布设灵活、操作简便、对场地条件依赖性小，逐渐成为浅层结构探测的重要补充手段 (Wang et al., 2019)。其中，水平-垂直谱比 (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio, HVSR) 法基于单台站观测获取场地频谱特征，其结构信息主要反映测点下方一定影响范围内的平均响应特征。由于 HVSR 不依赖阵列展布，其横向分辨能力主要取决于测点布设密度及地震波有效波长范围，因此可以通过高密度单点观测在复杂地形条件下实现对浅层结构横向变化的刻画。同时，HVSR 方法对覆盖层厚度、风化层-基岩界面及低速弱化带具有较高敏感性，仅需单点短时记录即可获得稳定结果，已在场地卓越频率分析 (Guo et al., 2021)、浅层速度结构反演 (朱冰清等, 2025)、滑坡结构反演 (Nelson and McBride, 2019; 孙晓倩等, 2024) 等方面得到广泛应用。同时，基于地脉动 HVSR 方法可快速获取浅层剪切波速结构及低速层厚度分布，这些参数能够反映地层的刚度与弱化程度，从而为刻画坡体结构状态及其潜在失稳敏感性提供重要依据。因此，有望构建基于地脉动参数的滑坡结构易发性指标体系，用于辅助滑坡风险识别与灾后快速评估。

武平县下坝乡位于东南沿海典型花岗岩丘陵区，是 2024 年暴雨期间滑坡灾害最为密集的区域之一，发育多处规模虽小但结构特征典型的浅层滑坡，为开展基于地脉动的滑坡结构解析提供了理想条件。基于该区域多条滑坡测线的地脉动观测数据，结合野外地质调查、风化剖面特征、DEM 差分分析及残积层厚度解译，本文旨在：（1）提取花岗岩风化壳的代表性剪切波速度结构模式，明确残积土层、全风化层与强风化层的典型速度区间及空间分布特征，为花岗岩风化壳浅层滑坡结构的地球物理表征贡献数据样本和思路；（2）识别沿坡向及层间展布的地下低速富水弱化带，并结合野外调查分析其与滑坡发生的空间关系；（3）构建基于浅层结构地球物理参数（如低速层厚度与平均 V_s ）的降雨条件下滑坡易发性指标。研究结果有助于深化对花岗岩风化壳浅层滑坡结构特征及失稳机制的认识，并为类似地区降雨型滑坡的应急调查、风险识别与防治提供技术参考。

2. 数据与方法

2.1. 区域地质及滑坡特征

研究区位于福建省龙岩市武平县下坝乡，地处东南低山丘陵区，地形起伏显著，坡面陡峭、沟谷切割强烈，区域整体坡度多介于 25° – 40° （图 1），局部人工切坡及自然陡坎坡段坡度超过 45° 。该区受亚热带季风气候控制，降雨过程呈现强度大、历时长、频次高的特征，暴雨条件下坡面易形成集中径流与汇水通道，导致浅层风化物含水量在短时间内急剧变化，从而诱发以浅层滑坡为主的地质灾害。2024 年极端强降雨过程中，下坝乡发生了密集的滑坡群发事件（图 1），规模以小型、中小型为主，但数量多、分布集中，对道路、房屋及农田等基础设施造成显著破坏，充分暴露出区域花岗岩风化壳型边坡对强降雨的高度敏感性。

研究区地层主要由第四纪坡积层及燕山期粗粒二长花岗岩组成。岩体长期暴露于温暖湿润的气候环境中，化学风化作用强烈，普遍形成厚度约 10–30 m 的花岗岩风化壳。该风化壳具有明显的垂向分带结构，自地表向下依次为残积土层、全风化花岗岩、强风化花岗岩及中风化花岗岩。其中，残积土层厚度约 0.5–3 m，颜色以黄棕色至红褐色为主，结构疏松、黏粒含量高。其下部全风化层颜色杂乱、颗粒松散，扰动后可迅速崩解为土状物，对降雨入渗高度敏感，是最易形成滑动面的关键软弱层；强风化层多呈铁锈红色，颗粒粗大但局部软化黏土状物质，水敏性显著，常作为潜在弱化带及滑动基底；最下部的中风化层结构相对完整，力学强度明显高于上覆风化层，是整个风化壳结构的主要承载与控制基底。

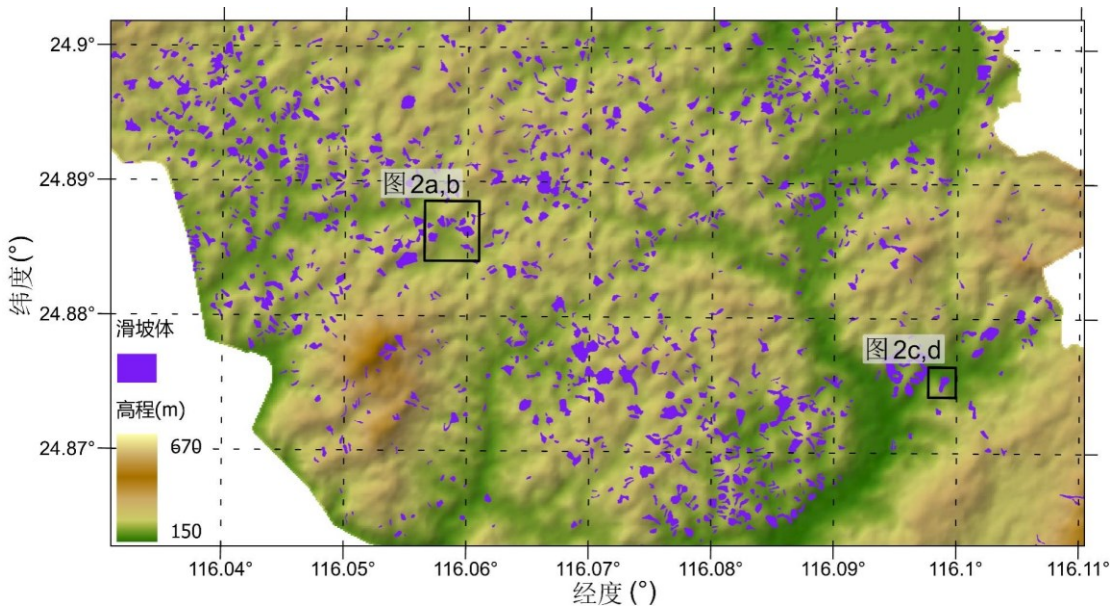


图 1 武平下坝乡高程图及区域内滑坡分布

野外调查表明，多处滑坡体内部或坡脚附近发育明显渗水带及局部饱水区，导致残积土、全风化层及强风化层发生显著软化并伴随强度骤降，为滑坡启动提供了直接诱因。总体而言，

花岗岩风化壳中“残积土层—全/强风化层”组合结构、厚度变化大且结构分异显著，是控制该区浅层滑坡孕育、演化及滑动面形成的核心地质条件。

2.2. 地脉动数据采集和处理

在上述区域内，本文选取四处具有代表性的花岗岩风化壳型边坡（P1–P4）作为研究对象（图 2）。其中，P1 坡、P2 坡与 P4 坡均在 2024 年强降雨过程中发生滑塌，P1 坡与 P2 坡的滑动造成坡脚民房受损，P2 坡局部区域出现房屋倒塌；P4 坡位于交通要道附近，暴雨期间坡体饱水，潜在安全风险突出。P3 坡为未发生滑动的原位边坡，作为对比样本，用于识别风化壳型滑坡发生前后浅层结构的差异特征。上述四处边坡在地形条件、母岩类型及风化壳发育特征方面具有高度一致性，有利于在统一地质背景下提取花岗岩风化壳浅层滑坡的共性结构特征及其易发性评估。

在野外调查基础上，采用 SmartSolo IGU-16 HR3C 三分量地震仪（仪器自然频率 5Hz）开展高密度地脉动观测，仪器采样频率设置为 1000Hz。仪器沿坡向或垂直坡面方向布设，测点位置见图 2 和图 3。每个测点连续记录时间不少于 30 min，以获取稳定的背景地脉动信号用于 HVSR 分析；测点间距根据地形起伏、植被覆盖及现场可达条件控制在 5–8 m，以兼顾横向分辨率与实际布设可行性。同时，利用无人机机载 LiDAR 获取高精度数字高程模型（DEM），并结合高精度差分 GPS 对各测点进行三维精确定位，为后续二维剪切波速剖面构建及地形校正提供可靠约束。

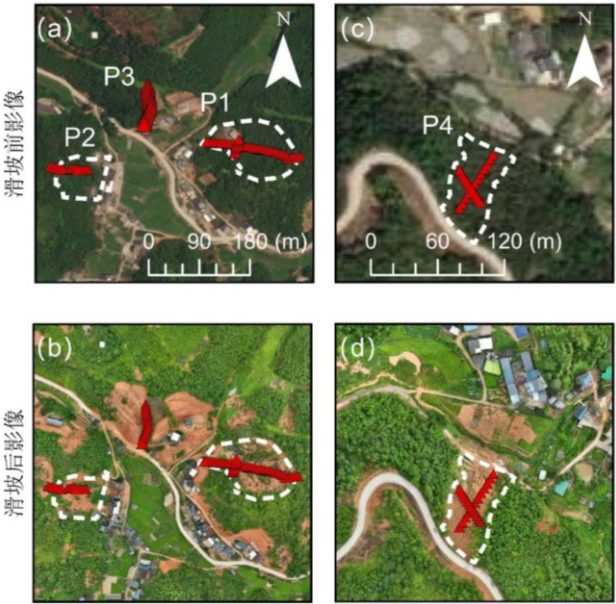


图 2 黄竹塘研究区典型滑坡的（a）滑前影像（哨兵 2 号）和（b）滑后无人机光学影像；湖坑子滑坡的（c）滑前影像（哨兵 2 号）和（d）滑后无人机光学影像。图中红色三角形为地脉动测点位置。

为实现滑坡体浅层结构的高横向分辨率成像，本文采用水平垂直谱比法（HVSr）对单台站地脉动记录进行处理。相较于多通道面波方法，HVSr 不依赖阵列布设，仅需单点短时记录即可反演覆盖层厚度及剪切波速结构，在地形破碎、植被茂密、不适宜布设长测线的丘陵滑坡区具有较好的适用性。

需要指出的是，HVSr 方法的应用效果与地脉动波场特征密切相关。环境地脉动信号通常由体波与面波混合组成 (Nakamura, 1989; SESAME, 2004)，其能量分布受噪声源空间分布及场地条件影响，不同频段内主导波型（体波、面波）可能发生变化，从而影响谱比峰值位置及反演结果 (Bonnefoy-Claudet et al., 2006)。同时，实际坡体介质具有明显的横向非均质性及复杂地形条件，而 HVSr 反演通常基于一维层状假设，这可能导致界面深度及剪切波速度估计存在一定偏差 (Pilz et al., 2010; Del Gaudio & Wasowski, 2011)。进一步地，在复杂坡面地形条件下，波场传播过程中的散射、折射及地形放大效应会增强地脉动信号的空间非均一性，从而影响不同测点之间谱比特征的一致性 (Mainsant et al., 2012)。在此背景下，基于离散测点的 HVSr 结果进行二维插值成图时，可能在坡折、沟谷或局部结构突变区域产生异常增强或伪结构响应，使得低速带的空间连续性及其几何形态存在一定不确定性。

针对上述影响因素，本文在数据处理中采取多步质量控制与频谱稳定化措施。首先，将连续时间序列划分为 60 s 时间片段，并对各片段进行去均值、去趋势及仪器响应校正 (Bensen et al., 2007)，以保证振动信号的幅值与相位一致性。其次，为避免人类活动、交通活动等瞬时强信号干扰，我们使用 STA/LTA 方法提取并删除这些高能量的干扰，其中从浅地表速度结构反演的研究案例来看 (Guo et al., 2014, 2023)，长短时窗分别选择 2.5s 和 0.2s 更为合适。随后，对保留片段施加 5% 余弦锥化窗，并通过快速傅里叶变换（FFT）计算三分量频谱 $NS(t, f)$ 、 $EW(t, f)$ 和 $V(t, f)$ ，同时采用带宽系数为 40 的 Konno–Ohmachi 平滑方法 (Konno and Ohmachi, 1998) 对频谱进行平滑处理，以降低随机波动并增强谱比曲线的稳定性，并依据式（1）计算 HVSr 谱：

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

最后对所有时间片段的 HVSr 曲线取平均值并计算标准差，以获得不同边坡浅层结构特征的稳定场地响应谱。

尽管通过上述处理能够在一定程度上提高谱比曲线的稳定性并减弱随机噪声影响，但受限于地下介质对地震波的散射与折射作用以及波场组成的复杂性，HVSr 结果仍主要反映浅层结构的相对变化特征。在二维成图解释中，相关结果需结合地形条件、地质调查及其他地

球物理资料进行综合分析，以提高结构判读的可靠性。因此，在野外地质调查结果、区域地质资料及钻探信息约束下，本文采用 Guo et al., (2023)提出的 HVSr 反演算法对各测点的 HVSr 曲线进行浅层剪切波速反演。通过沿测线的连续反演结果并结合 DEM 高程校正，构建高横向分辨率的二维剪切波速结构剖面，从而揭示残积土层、风化层、强风化层的空间展布特征及滑塌、堆积体内部结构，为理解滑坡形成机制及滑后稳定性提供关键依据。

2.3. 滑坡高程数据

基于滑前与滑后 DEM 的差分分析，计算了各滑坡体的高程变化量及滑塌体体积(表 1，图 3)，结果显示，黄竹塘区域 P1 滑坡的垮塌体积最大，约为 7966 m³，表明即使在同一暴雨事件触发的群发滑坡中，不同滑体之间仍存在显著的规模差异。总体而言，各滑坡体的滑塌体积均大于堆积体积，反映出滑坡过程中物质向坡脚及坡外的扩散与流失特征，同时亦与滑坡发生后堆积层固结沉降、局部人工清理与开挖活动有关。

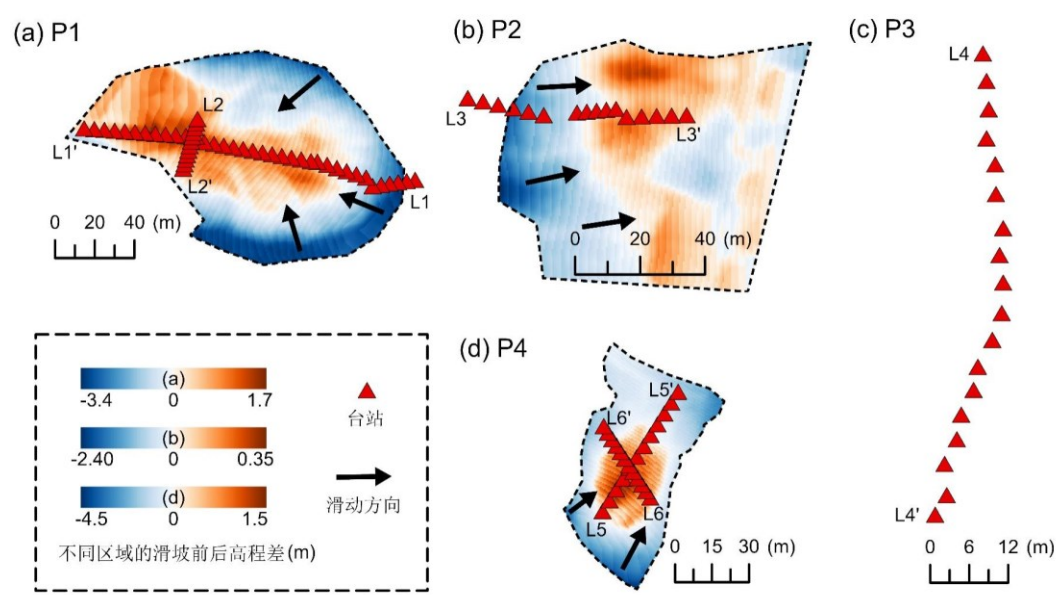


图 3 四处典型滑坡高程变化量（a-d 对应 P1-P4）及地脉动测点位置（红色三角形）。其中 P3 坡为原位边坡，未产生滑动。

表 1 基于滑坡体前后高程差计算的滑体方量

滑坡	P1	P2	P3	P4
滑体方量(m ³)	7966.32	1593.15	0	1463.37

3. 典型边坡的横波速度结构

P1 坡两条测线的横波速度反演剖面如图 4 所示。坡体表层普遍发育一层厚度约 0.5–2 m 的低速覆盖层 ($V_s < 150$ m/s)，对应松散残积土层，其厚度与野外调查结果一致。残积土之

下依次为全风化层（150–260 m/s）、强风化层（260–395 m/s）及中风化基岩（ $V_s > 395$ m/s），构成完整的花岗岩风化壳垂向结构（Moon et al., 2019；郭桢等, 2025）。沿坡向（L1 – L1'），不同分区之间的风化层界面深度存在系统性差异。滑塌区残积土层厚度整体小于堆积区（表 2），反映滑坡过程中表层松散物质被显著剥蚀与搬运；然而，滑塌区仍保留约 0.7 m 厚的残积土层，说明滑坡并未完全剥离风化壳顶部软弱层。结合滑坡发生后一年内持续强降雨过程，推测滑塌区残留残积土可能与滑后快速再弱化以及坡头未滑区物源补给共同有关。值得注意的是，在滑坡顶部可识别一条沿坡向延伸的连续低速异常带，其空间位置与现场观察到的渗水迹象及地表汇水路径高度吻合。该低速带推测为地下水集中渗流通道，在强降雨条件下可能经历显著孔隙水压力升高，从而成为控制滑坡启动位置的关键弱化结构。

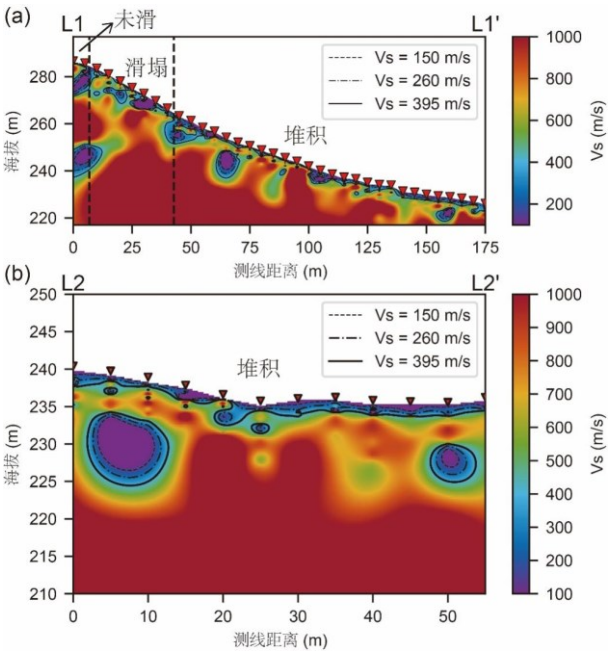


图 4 P1 坡的横波速度剖面。红色三角为地震仪所在位置；三条黑色曲线分别代表 150、260、395 m/s 横波速度等值线；垂直虚线代表边坡不同区域的分界线。

表 2 P1 坡的各区平均界面深度及其标准差

S 波速度（m/s）	未滑区（m）	滑塌区（m）	堆积区（m）
150	0.86±0.02	0.71±0.05	1.08±0.15
260	1.07±0.05	1.18±0.14	1.54±0.30
395	1.58±0.21	1.47±0.35	2.10±0.45

P2 坡测线的横波速度结构如图 5 所示。坡体浅表层 0.5–2 m 范围内普遍发育低速残积土层，其下为全风化和强风化花岗岩，风化壳分带特征清晰。基于滑前与滑后高程差划分的未滑区、滑塌区和堆积区在风化界面深度上表现出显著差异（表 3）。滑塌区的残积土/全风

化层界面明显浅于未滑区和堆积区，表明该区域风化壳顶部在滑坡过程中遭受强烈剥蚀。未滑区表现为整体风化层较薄，浅层平均波速较高，表示其强度较大，尚未达到滑坡启动条件。

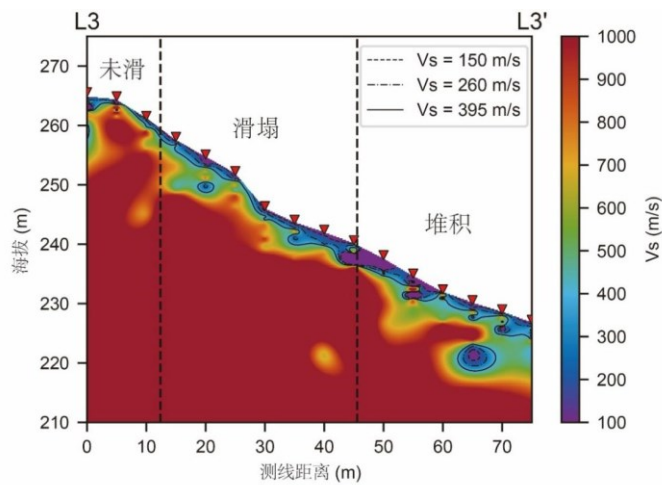


图 5 P2 坡的横波速度剖面。图例与图 4 一致。

表 3 P2 坡的各区平均界面深度及其标准差

S 波速度（m/s）	未滑区（m）	滑塌区（m）	堆积区（m）
150	1.44 ± 0.03	0.71 ± 0.12	1.08 ± 0.20
260	1.52 ± 0.08	1.18 ± 0.20	1.54 ± 0.31
395	1.68 ± 0.39	1.47 ± 0.28	2.10 ± 0.39

P3 坡为研究区内未发生滑坡的对比样本，其沿坡向测线的横波速度结构如图 6 所示。该坡体同样发育完整的风化壳分带结构，但各典型速度界面的平均埋深整体小于其他滑坡坡体，表明风化壳厚度相对较薄。且坡面下 3 m 内的平均横波速度显著较其他滑坡高，反映其浅层风化程度较弱、整体结构刚度较大。尽管剖面中仍可识别局部低速弱带，形态上类似地下水通道，但其空间尺度与连通性均较有限，尚不足以在极端降雨条件下诱发整体失稳。

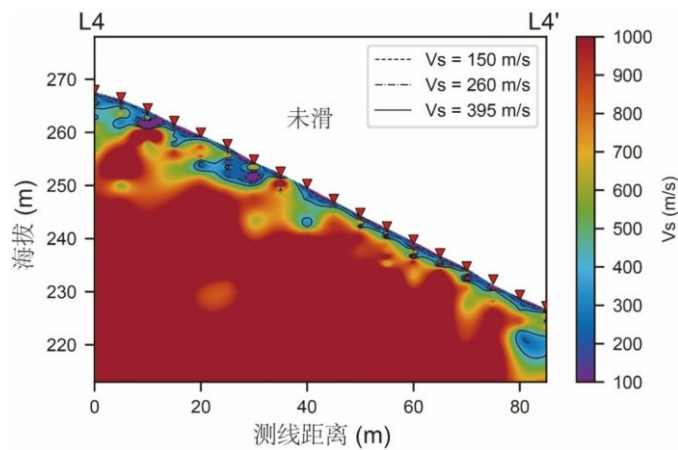


图 6 P3 坡的横波速度剖面。图例与图 4 一致。

P4 坡的横波速度结构反演剖面如图 7 所示。坡体地表下 2–3 m 范围内发育连续的低速层，局部厚度显著较大，与现场观察到的地下水潜蚀区分布一致。滑塌区残积土层明显薄于堆积区（表 4），反映滑坡对表层物质的显著重塑作用。与其他坡体相比，P4 坡地下低速异常带的空间连通性最为突出，低速带沿坡向及垂直坡向方向均呈连续分布，并与地表径流路径、坡脚涌水位置对应。这一特征表明坡体内部长期存在稳定的地下水补给与渗流系统，持续的地下水渗流使风化壳局部长期处于弱化状态，从而在强降雨条件下发生失稳。

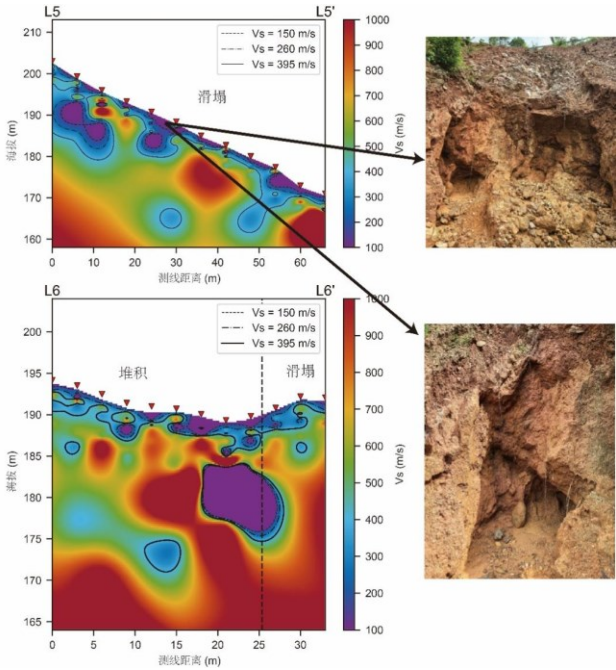


图 7 P4 坡的横波速度剖面及坡体裂隙水渗出现场照片。图例与图 4 一致。

表 4 P4 坡的各部分平均界面深度及其标准差

S 波速度（m/s）	滑塌区（m）	堆积区（m）
150	0.60 ± 0.04	1.31 ± 0.12
260	1.26 ± 0.15	1.57 ± 0.28
395	2.25 ± 0.32	2.15 ± 0.43

综上，P1–P4 坡各典型坡体的横波速度结构在相同的风化壳分带背景下，呈现出由滑坡活动和地下水作用共同塑造的差异化特征。滑塌区以残积土减薄和低速弱化带发育为主要特征，堆积区表现为厚层低速覆盖，而未滑区则具有较高浅层波速。这些结构差异为后续建立滑坡易发性估计及探讨滑坡孕育机制提供了依据。

4. 滑坡易发性的地脉动结构指标

综合所有测线的横波速度结构与滑前–滑后高程差分析结果可知，尽管坡体浅层结构在局部尺度上受地下水通道控制而呈现明显的横向非均质性，但本文统计的几个经典降雨诱发

滑坡以及未滑区域结果来看，不同滑坡分区之间仍表现出稳定而清晰的结构差异特征。该差异表明，基于 HVSr 反演获得的浅层速度结构参数能够较好地地区分未滑区、滑塌区与堆积区的工程地质状态，并为识别降雨型花岗岩风化壳滑坡的结构敏感性提供依据。

基于各测点 HVSr 反演的横波速度结构，以 $V_s = 150 \text{ m/s}$ 作为残积土层与下伏全风化层的经验分界，统计得到的残积土/全风化层界面埋深结果如图 8a 所示。结果显示，滑塌区与堆积区的界面深度分布范围整体较为接近，而未滑区界面埋深普遍较浅，表明未滑区浅表低速层厚度相对较小。滑塌区与堆积区之间较为接近的厚度特征，说明滑坡发生后坡体浅层结构经历了显著调整，滑塌区在后续降雨、表层再风化及局部物质再分配作用下，其浅层低速层厚度呈现出向堆积区靠近的趋势。相比之下，未滑区残积土层厚度整体较薄，可能与其风化程度较弱、坡面长期剥蚀作用较强或局部汇水条件相对较差有关，从而使其在相同降雨背景下不易形成足够厚的浅层弱化带。

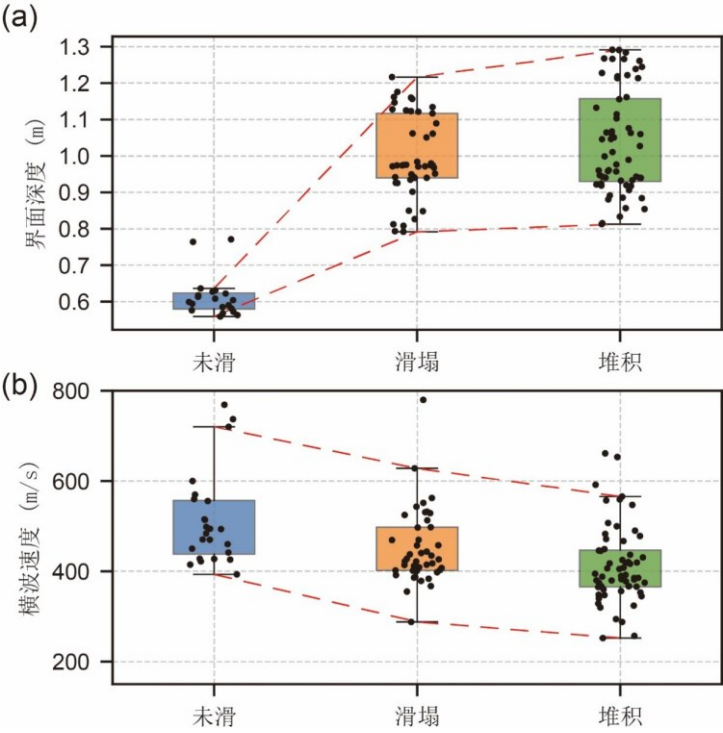


图 8 未滑区、滑塌区和堆积区 (a) 残积土深度分布和 (b) 地下三米平均横波波速。

为进一步刻画边坡浅层的结构特性，本文统计了各测点地下 3 m 范围内的平均横波速度（图 8b）。结果表明，不同分区的浅层平均横波速度同样呈现出明确的分区差异：未滑区平均横波速度最高，反映其浅层风化程度较低、物质整体刚度较大；堆积区平均速度最低，对应厚层松散堆积物，孔隙发育、渗水性强且结构松散；滑塌区的平均速度介于两者之间，反映出滑坡发生后虽然坡体表层已明显弱化，但整体结构强度仍略高于松散堆积体。

上述结果表明，残积土层厚度与浅层平均横波速度能够有效刻画花岗岩风化壳边坡的浅

层结构特征及其空间差异。未滑区普遍表现为低速层较薄且平均波速较高，而滑塌区与堆积区则具有较厚的低速层和较低的平均波速，反映出更强的结构弱化程度及对降雨入渗的响应能力。从机制上看，降雨诱发滑坡的发生依赖于坡体结构条件与水文过程的耦合作用。浅层低速体厚度及平均横波速度能够反映风化壳的弱化程度及其对地下水入渗的响应能力，因此可用于刻画坡体的失稳敏感性及其空间分布特征。

结合未滑区、滑塌区与堆积区的对比结果可见，未滑区普遍表现为低速层厚度较小且平均横波速度较高，而堆积区则表现为低速层较厚、平均横波速度较低，反映出更强的结构弱化程度。考虑到堆积区物质来源于滑体本身，其结构特征在一定程度上可代表滑体失稳后的松散状态。同时，由于本文地脉动观测开展于滑坡发生约一年后，堆积体在此期间经历了一定程度的固结沉降及表层侵蚀作用，使得当前观测到的低速层厚度可能被低估，而平均横波速度可能偏高。

基于这些典型降雨诱发滑坡的案例研究表明，本文推测当浅层低速体厚度大于约 0.8 m 且地下 3 m 范围平均 V_s 低于约 400 m/s 时，坡体通常表现出较高的失稳敏感性。该指标反映了坡体在降雨作用下更易发生强度衰减并进入不稳定状态的结构背景，具有一定的初步判别意义。

5. 结论与讨论

基于武平下坝乡 4 处典型花岗岩风化壳边坡的高密度地脉动 HVSr 反演结果，结合滑前-滑后 DEM 差分分析及野外地质调查，本文揭示了浅层结构特征及滑坡分区差异。分析显示，残积土层厚度和浅层平均横波速度在不同滑坡分区之间表现出稳定差异：未滑区低速层较薄且平均横波速度较高，滑塌区和堆积区低速层厚度较大、平均横波速度较低，反映出降雨入渗条件下坡体结构弱化程度及其与滑坡易发性的关系。典型案例分析表明，当浅层低速体厚度大于约 0.8 m 且地下 3 m 范围平均横波速度低于约 400 m/s 时，坡体通常表现出较高的失稳敏感性，该结构指标为滑坡易发性评价提供了地球物理参考指标。

需要强调的是，本文采用的横波速度分层标准主要基于区域经验和野外调查结果，不同地区风化壳的组成、风化程度及含水状态存在差异，可能导致剪切波速度范围具有一定区域差异性。在缺乏钻孔或原位测试约束的情况下，基于地脉动 HVSr 的分层结果可作为重要参考依据。不同测点反演结果也存在一定离散性，本文通过均值及标准差对各分区进行描述，但该统计结果仍受测点分布及样本规模影响，因此所得阈值主要反映典型边坡特征，其普适性仍需更大样本范围中验证。

未来研究可在更大空间尺度开展系统观测，结合钻探、面波及电阻率等多源资料对浅层

结构进行联合约束,并将结构参数与降雨过程及地下水响应相结合,以建立更加完善的滑坡易发性评价与风险判别模型。综上,本文通过典型案例分析揭示了花岗岩风化壳浅层滑坡的结构特征及地下水弱化作用,验证了基于地脉动的 HVSR 方法在滑坡快速探测中的可行性,并提出了可用于初步识别坡体易发性的横波速度结构指标,为类似地区降雨型滑坡的调查与风险识别提供参考。

References

- Bensen, G.D., Ritzwoller, M.H., Barmin, M.P., et al., 2007. Processing seismic ambient noise data to obtain reliable broad-band surface wave dispersion measurements, *Geophysical Journal International*, 169, 1239–1260.
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., Bard, P. Y., 2006. The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79: 205–227.
- Chen B., Zhang C., Li Z., et al., 2024. Developmental Characteristics and Controlling Factors of Landslides Triggered by Extreme Rainfalls on 16 June 2024 in Longyan, Fujian Province. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(11) (in Chinese with English abstract).
- Cui, Y., Yang, L., Xu, C., et al., 2024. Spatial distribution of shallow landslides caused by Typhoon Lekima in 2019 in Zhejiang Province, China. *Journal of Mountain Science*, 21: 1564–1580.
- Del Gaudio, V., Wasowski, J., 2011. Advances and problems in understanding ground motion response of complex unstable slopes. *Engineering Geology*, 122: 30–46.
- Feng W., Hu R., Bai H., et al., 2022. Study on formation mechanism of granite eluvium landslide by field rainfall simulation. *Science Technology and Engineering*, 22(18): 7799–7809 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z., Aydin, A., Kuszmaul, J.S., 2014. Microtremor recordings in Northern Mississippi. *Engineering Geology*, 179, 146–157.
- Guo, Z., Aydin, A., Huang, Y., et al., 2021. Polarization characteristics of Rayleigh waves to improve seismic site effects analysis by HVSR method. *Engineering Geology*, 292: 106274.
- Guo, Z., Mao W., Huang, Y., et al., 2025. 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. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(2):

54-62 (in Chinese with English abstract).

- Guo, Z., Zhou, M., Huang, Y., et al., 2023. Monitoring performance of slopes via ambient seismic noise recordings: Case study in a colluvium deposit. *Engineering Geology*, 324: 107268.
- Huang, R., Zhao, J., Ju, N., et al., 2013. Analysis of an anti-dip landslide triggered by the 2008 Wenchuan earthquake in China. *Natural Hazards*, 68: 1021–1039.
- Jongmans, D., Garambois, S., 2007. Geophysical methods for landslide investigations: A review. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 178: 101–112.
- Kamiński, M., Zientara, P., Krawczyk, M., 2021. Electrical resistivity tomography and digital aerial photogrammetry in the research of the “Bachledzki Hill” active landslide in Podhale (Poland). *Engineering Geology*, 285: 106004.
- Konno, K., Ohmachi, T., 1998. Ground-motion characteristics estimated from spectral ratio between horizontal and vertical components of microtremor. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 88: 228–241.
- Lin, Q., Steger, S., Pittore, M., et al., 2022. Evaluation of potential changes in landslide susceptibility and landslide occurrence frequency in China under climate change. *Science of the Total Environment*, 850: 158049.
- Liu H., Wu W., Geng L., et al., 2024. Analysis of the Relationship Between Stability of Fully Weathered Granite Landslides and Rainfall. *Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering*, 44(02): 322-332 (in Chinese with English abstract).
- Luo, Y., Xia, J., Miller, R. D., et al., 2008. Rayleigh-wave dispersive energy imaging using a high-resolution linear Radon transform. *Pure and Applied Geophysics*, 165: 903–922.
- Ma, S., Shao, X., Xu, C., 2022. Characterizing the distribution pattern and a physically based susceptibility assessment of shallow landslides triggered by the 2019 heavy rainfall event in Longchuan County, Guangdong Province, China. *Remote Sensing*, 14: 4257.
- Mainsant, G., Larose, E., Brönnimann, C., et al., 2012. Ambient seismic noise monitoring of a clay landslide: Relationships between Rayleigh wave velocity and cumulative rainfall. *Geophysics*, 77: KS21–KS29.
- Moon, S. W., Subramaniam, P., Zhang, Y., et al., 2019. Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore. *Journal of Applied Geophysics*, 171: 103866.

- Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30: 25–33.
- Nelson, S., McBride, J., 2019. Application of HVSR to estimating thickness of laterite weathering profiles in basalt. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44: 1365–1376.
- Pilz, M., Parolai, S., Picozzi, M., et al., 2010. Evaluation of the localized site response through the H/V method: the case study of the town of Castelfiorentino (central Italy). *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 30: 583–605.
- Ren, R., Yu, D., Wang, L., et al., 2019. Typhoon-triggered operation tunnel debris-flow disaster in coastal areas of SE China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10: 562–575.
- Samyn, K., Travelletti, J., Bitri, A., et al., 2012. Characterization of a landslide geometry using 3D seismic refraction traveltimes tomography: The La Valette landslide case history. *Journal of Applied Geophysics*, 86: 120–132.
- SESAME, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processing and interpretation. European Commission—Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, 62.
- Su, Z., Wang, Y., Zhang, H., 2022. Study on the failure mechanism, safety grading and rainfall threshold of landslide caused by typhoon rainstorm. *Geotechnical and Geological Engineering*, 40: 2201–2211.
- Sun X., Chu R., Zeng Q., et al., 2024. Velocity structure of the Xishancun landslide in Li County, Sichuan Province, explored by HVSR method. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 67(4): 1515-1526 (in Chinese with English abstract).
- Wang, D., Sheng W., 2023. Genesis of Granitoids and crustal evolution in Southeast China. *Earth Science Frontiers*, 10: 209-220 (in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Chen, P., Keifer, I., et al., 2019. Weathering front under a granite ridge revealed through full-3D seismic ambient-noise tomography. *Earth and Planetary Science Letters*, 509: 66–77.
- Wang Z., Zou Y., Li B., et al., 2020. Micro-structure and Evolution of Relict Joints and Weathered Granite Soils in the Southeastern Guangxi, China. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 42(03): 405-415 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q., Xu F., Pu C., et al., 2024. Preliminary Analysis of Extreme Rainfall-Induced Cluster

- Landslides in Jiangwan Township, Shaoguan, Guangdong, April 2024. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 49(8): 1264-1274 (in Chinese with English abstract).
- Yan J., Haung J., Li H., et al., 2020. Study on instability mechanism of shallow landslide caused by typhoon and heavy rain. Journal of Geomechanics, 26 (4): 481-491 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C., Zhang M., Zhang T., et al., 2018. Impact of dyke and its residual soil on seepage and stability of Zhonglin landslide, 39(7): 2617-2625 (in Chinese with English abstract).
- Zhu B., Xie J., Wang W., et al., 2025. Research on fine sedimentary interface structure in Tongzhou area based on HVSR spectral ratio method. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 68(4): 1340-1351 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 陈博, 张灿灿, 李振洪, 等, 2024. 福建龙岩市 2024 年“6·16”特大暴雨诱发滑坡发育特征及其调控因子分析. 武汉大学学报, 49: 2145-2155.
- 冯文凯, 胡芮, 2022. 花岗岩残积层滑坡形成机理降雨模拟研究. 科学技术与工程, 22: 7799-7809.
- 郭桢, 毛无卫, 黄雨, 等, 2025. 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. 中国地质灾害与防治学报, 36(2): 54-62.
- 刘红军, 武闻禹, 耿林, 等, 2024. 全风化花岗岩滑坡稳定性与降雨关系分析. 防灾减灾工程学报, 44(2): 322-332.
- 孙晓倩, 储日升, 曾求, 等, 2024. 利用 HVSR 方法探测四川理县西山村滑坡速度结构. 地球物理学报, 67: 1515-1526.
- 王德滋, 沈渭洲, 2023. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10: 209-220.
- 王志兵, 邹永胜, 李斌, 等, 2020. 桂东南花岗岩风化土与残余节理的微观结构及演化. 地球科学与环境学报, 53: 405-415.
- 许强, 徐繁树, 蒲川豪, 等, 2024. 2024 年 4 月广东韶关江湾镇极端降雨诱发群发性滑坡初步分析. 武汉大学学报, 49: 1264-1274.
- 闫金凯, 黄俊宝, 李海龙, 等, 2020. 台风暴雨型浅层滑坡失稳机理研究. 地质力学学报, 26: 481-491.
- 张晨阳, 张明, 张泰丽, 等, 2018. 侵入岩脉风化壳对中林村残积土滑坡渗流场和稳定性的影响. 岩土力学, 39: 2617-2625.

朱冰清, 谢俊举, 王伟涛, 等, 2025. 基于 HVSr 谱比法的北京通州精细沉积界面结构研究.
地球物理学报, 68: 1340-1351.