doi:10.3799/dqkx.2026.243

基于连续地脉动观测的降雨型风化花岗岩滑坡水文动力响应研究

贺学峰[1]，吴琼[1*]，郭桢[2]，王亮清[1]，吕庆[3]，吴俊宇[3]，苏思齐[1]

（1.中国地质大学工程学院，湖北武汉 430074；2.同济大学土木与建筑学院，上海 200092；3.浙江大学建筑工程学院，浙江杭州 310058）

摘要：风化花岗岩广泛分布于我国东南丘陵区，在强降雨作用下易发生滑坡灾害。深入认识降雨作用下该类滑坡的水文动力响应过程，对区域地质灾害防治具有重要意义。本文以福建省龙岩市武平县某典型风化花岗岩滑坡为研究对象，采用水平-垂直谱比法（HVSR）对降雨作用下滑坡的水文动力响应过程开展系统监测与分析。结果表明：（1）降雨事件发生后，卓越频率（65-95 Hz/140-155 Hz）呈现“快速下降-缓慢恢复”的演化特征，指示降雨入渗导致浅层土体含水率变化，从而引起剪切波速的降低及其逐步恢复；（2）在监测期间整体降雨偏少的背景下，土体含水率持续下降，卓越频率（65-95 Hz）随之升高，反映了含水率降低引起剪切波速增加的响应特征；（3）在三次降雨事件中均观测到新的卓越频率出现，表明降雨入渗过程中浅层土体内部可能存在低渗透性界面，导致水分在界面附近滞留并形成暂态饱和区，从而可能对滑坡稳定性产生不利影响。HVSR 方法能够有效表征降雨作用下风化花岗岩滑坡的水文动力响应，为降雨型滑坡机理研究及监测预警提供了新思路。

关键词：风化花岗岩滑坡；降雨型滑坡；地脉动；HVSR；水文动力响应

中图分类号: P642 **收稿日期：2026-2-9**

Hydrodynamic Response of Rainfall-Induced Weathered Granite Landslides Based on Continuous Microtremor Observations

He Xuefeng[1], Wu Qing[1*], Guo Zhen[2], Wang Liangqing[1], Lü Qing[3], Wu Junyu[3], Su Siqi[1]

(1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Weathered granite is widely distributed in the hilly regions of southeastern China and is prone to landslides under intense rainfall. A better understanding of the hydrodynamic response of such landslides during rainfall is of great significance for regional geohazard prevention and mitigation. In this study, a typical weathered granite landslide in Wuping County, Longyan City, Fujian Province, China, was selected as the study site, and the horizontal-to-vertical spectral ratio (HVSR) method was used to systematically monitor and analyze the hydrodynamic response of the landslide under rainfall conditions. The results show that: (1) Following rainfall events, the predominant frequencies (65-95 Hz/140-155 Hz) exhibit a characteristic evolution pattern of “rapid decrease-gradual recovery,” indicating that rainfall infiltration alters the moisture content of shallow soils, thereby reducing the shear-wave velocity, which subsequently recovers progressively. (2) Under the background of overall low rainfall during the monitoring period, the soil moisture content continuously decreased, accompanied by a corresponding increase in the predominant frequency (65-95 Hz). This behavior reflects the response of increasing shear-wave velocity induced by decreasing soil moisture content. (3) During all three rainfall events, the emergence of new predominant frequencies was consistently observed, suggesting that low-permeability interfaces may exist within the shallow soil layer

基金项目：国家重点研发计划课题（NO. 2024YFC3012601）
作者简介：贺学峰（2000—），男，博士研究生，主要从事地脉动监测与滑坡灾害方面研究，ORCID：0009-0008-2807-7073. E-mail：2202510240@cug.edu.cn
通讯作者：吴琼（1985—），女，教授，博士，博士生导师，主要从事地质灾害与岩土工程方面研究，ORCID：0000-0001-5029-5925. E-mail：wuqiong@cug.edu.cn

during rainfall infiltration. These interfaces can cause water to be temporarily retained nearby, leading to the formation of transient saturated zones, which may exert an adverse effect on landslide stability. The HVSR method can effectively characterize the hydrodynamic response of weathered granite landslides under rainfall, providing a new approach for investigating the mechanisms of rainfall-induced landslides and supporting monitoring and early warning strategies.

Key words: Weathered granite landslides; Rainfall-induced landslides; Microtremor; HVSR; Hydrodynamic response

引言

我国东南地区的浙江、福建、广东等地广泛分布着由花岗岩残积土与风化岩构成的风化壳斜坡（王德滋和沈渭洲, 2003; Liu et al., 2020）。此类岩土体结构疏松、孔隙比大，遇水极易软化崩解，导致岩土体强度迅速下降，从而促使高位斜坡崩滑并加速其运动（张抒和唐辉明, 2013; 黄瑞健等, 2025）。该区域地处亚热带季风气候区，台风暴雨和梅雨等极端降雨事件频发，加之强烈的岩体风化作用与广泛的丘陵山地地形，使其成为全球降雨型滑坡的高发和重灾区（黄雨等, 2025）。例如，2024 年 4 月 15 日至 21 日，广东韶关市累计降雨量达 436 mm，最大日降雨量 190 mm，诱发江湾镇滑坡共计 1192 处，导致当地交通与通讯中断近 36 小时（许强等, 2024; Yang et al., 2025）；同年 6 月 16 日至 17 日，福建龙岩市遭遇历史罕见的强降雨，24 小时最大降雨量达 377.3 mm，诱发大量滑坡及其他次生灾害（陈博等, 2024）。因此，系统研究东南地区降雨型风化花岗岩滑坡，对该区域的防灾减灾具有重要现实意义。

降雨是诱发滑坡失稳的最典型且关键的气候驱动因素之一（Shapiro et al., 2005; Zhuang et al., 2023）。厘清滑坡在降雨条件下的动态水文响应过程，对于深入理解降雨诱发型滑坡的失稳机理至关重要（Watakabe and Matsushi, 2019; 冯文凯等, 2025; Deng et al., 2025）。水文动力响应过程涉及降雨入渗、地下水运移、基质吸力变化及岩土体强度衰减等一系列复杂的水文-力学耦合作用（张泰丽等, 2017; 吴善百等, 2020）。传统研究多依赖钻孔监测、室内土工试验与数值模拟相结合的方法（Yu et al., 2024）。尽管现有监测技术（如钻孔渗压计、张力计、土壤水分传感器等）能够提供局部孔隙水压力或含水量的精确数据，但其空间代表性有限，难以捕捉滑坡内部水文场的空间异质性及连续动态演变过程（Watakabe and Matsushi, 2019; 赖增荣等, 2024）。近年来，电阻率成像、地震折射等地球物理方法被引入水文过程监测，但这些方法属于间接探测，其反演结果易受岩性、温度等多因素耦合影响，难以直接定量解释为水文参数变化（Bièvre et al., 2021; Watlet et al., 2024）。此外，这类方法在分辨率方面常存在不足，对浅层水文变化的敏感性有限，从而限制了其在水文响应监测中的应用。更为关键的是，现有技术尚缺少一种能够同步、原位响应水文过程所引起的地下界面与结构状态变化的连续观测手段。

鉴于此，基于地脉动（环境振动）信号的水平-垂直谱比法（HVSR）作为一种非侵入、低成本且可连续观测潜力的地球物理方法，为滑坡水文动力响应监测提供了新的技术途径（Guo et al., 2023; Liu et al., 2025）。该方法通过记录三向地脉动信号，并计算水平向和竖直向振动的频谱比，获得 HVSR 曲线。曲线中的多个峰值对应不同的卓越频率，反映地下不同深度的波阻抗突变界面，即岩土力学性质显著变化的边界，通常对应于风化层界面、裂隙密集带或岩性分界面。其中，基阶卓越频率 f_0 与地层平均剪切波速 V_s 及有效沉积厚度 h 的关系可表示为 $f_0=V_s/4h$。当外界条件发生变化时，该对应关系将通过 V_s 和 h 的变化表现为卓越频率的响应。降雨入渗会改变滑坡体内土体的含水率和孔隙水压力，进而影响其剪切波速 V_s（通常随饱和度增加而降低）和有效应力状态，并可能引发微形变及地下结构界面的调整，表现为等效厚度 h 的变化，从而驱动卓越频率发生偏移或

产生新的频率峰值。因此，连续观测卓越频率的时变特征理论上能够表征由水文过程引起的滑坡地下界面及结构状态的动态响应。然而，目前基于 HVSR 方法对滑坡水文动力响应的研究仍相对匮乏。此外，该方法不仅可用于监测滑坡水文动力响应，还可用于探查滑坡地质结构特征（郭桢等, 2025; 罗恒等, 2025）。相较于钻探、常规物探及需要长时间观测的台阵记录方法（Shapiro et al., 2005），HVSR 方法设备轻便、布设灵活，能够在短时间内（约 30 分钟）获取地质结构信息，并对分层界面及浅层剪切波速结构敏感（朱鑫等，2023; 孙晓倩等, 2024），因此在复杂地形和植被茂密区域的滑坡调查与监测中具有广阔的应用前景。

本文以福建省龙岩市武平县一处典型风化花岗岩滑坡为研究对象，通过野外调查与现场地脉动观测相结合的方法，查明了滑坡体的地质结构特征。在此基础上，基于连续地脉动观测数据，结合同步监测的土壤含水量与降雨数据，系统分析了降雨作用条件下卓越频率的响应规律及其物理机制，进而揭示了降雨入渗引起的浅层介质物性变化及地下界面的动态演化特征，明确了降雨型风化花岗岩滑坡的水文动力响应规律。研究旨在为深入认识降雨诱发型风化花岗岩滑坡的水文动力响应提供一种新的技术路径。

1 研究区域与 HVSR 方法

1.1 研究区域

本研究以福建省龙岩市武平县下坝乡的下坝中心小学滑坡为研究对象，其地理位置见图 1a。该滑坡位于武平县西南部，属丘陵缓坡地貌，整体地势西北高、东南低，平均海拔约 180 m。区域气候属亚热带海洋性季风气候，年均气温约 19.5℃，年降水量介于 1643.8 至 2200 mm 之间，降水集中且雨热同期。每年 5-6 月受梅雨影响，多持续性低强度降雨；7-10 月则常受台风等天气系统影响，以短时强降水为主。下坝中心小学滑坡（图 1b）坡高约 40 m，坡长约 70 m，坡向 98°，坡度约 30°。区域出露晚侏罗世中 / 粗粒黑云母二长花岗岩，风化强烈，具典型“上土下岩”二元结构：上部为花岗岩残积土，疏松多孔；下部为风化程度不同的花岗岩基岩。根据野外调查结果，可将滑坡岩土体划分为 3 层：①表层残积砂质黏土层；②全风化细粒黑云母二长花岗岩层；③强/中风化中粗粒黑云母二长花岗岩层。该滑坡水文地质结构具有明显的分层特征，各层渗透性差异显著，并主导了降雨入渗模式（Feng et al., 2022）。表层为砂质黏性土，孔隙较为发育，加之植被根系形成的优势通道，整体渗透性较好，有利于降雨期间水分快速下渗并形成优先流。下伏全风化花岗岩局部含砂量较高、颗粒相对较粗，内部存在大孔隙或优势流路径。同时，该层因结构脆弱，遇水易发生崩解与流变，其渗透系数甚至高于上覆残积土层。这种渗透性差异性导致水分在两层界面处易滞留聚集，致使上覆残积土层含水量升高、土体软化，孔隙水压力上升，抗剪强度降低，加剧滑坡的下滑趋势（Lü et al., 2024）。

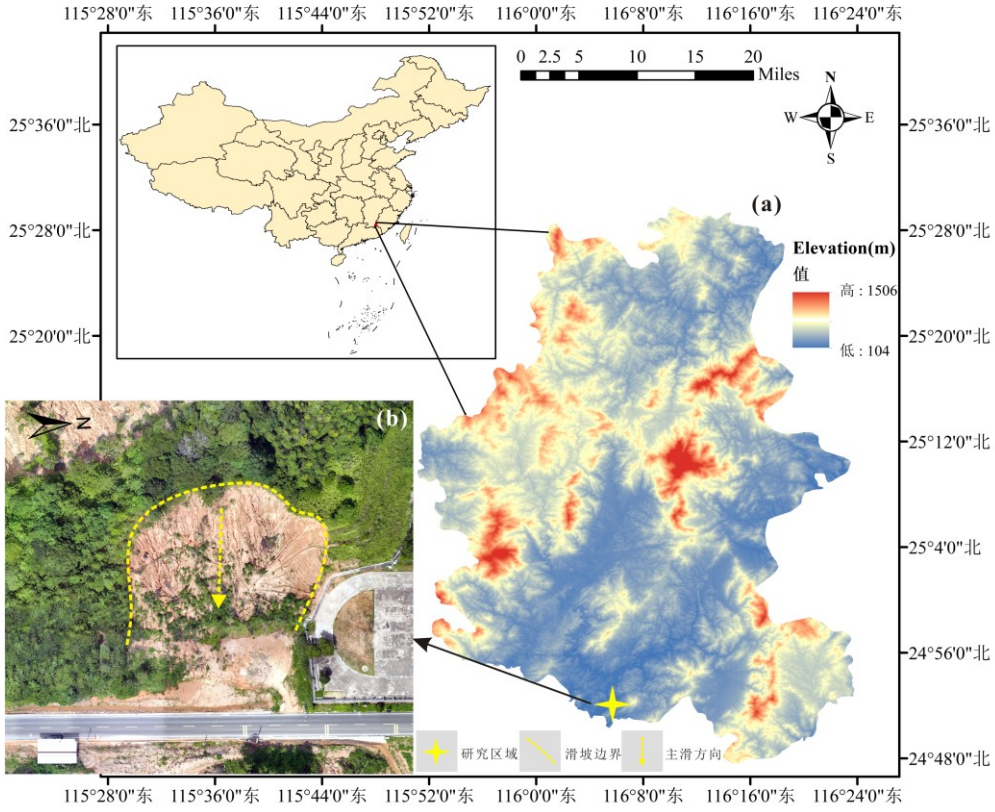


图 1 下坝中心小学滑坡地理位置与地形特征

Fig.1 Geographical location and topographic characteristics of the xiaba central primary school landslide

1.2 HVSR 方法

1.2.1 理论基础

HVSR 方法最早由 Nogoshi 和 Igarashi 提出（Nogoshi and Igarashi, 1971），随后由 Nakamura 系统推广并应用于地震噪声观测研究（Nakamura，1989）。该方法基于三分量地震仪对背景地震噪声（亦称微动或环境振动）信号的连续记录，通过计算水平分量与竖直分量傅里叶振幅谱（FAS）的平均比值，获得场地的 HVSR 曲线。理论上，当观测场地为均质基岩时，在目标频段内水平向与竖直向振动响应近似一致，HVSR 曲线通常不表现出明显峰值特征；而当场地地表为覆盖软弱土层、下伏为基岩，上下层介质之间存在显著波阻抗差异时，HVSR 谱在特定频段内出现显著峰值，该峰值所对应的频率称为场地卓越频率（或共振频率）。对于上层覆盖沉积层的弹性半空间双层模型而言，其水平剪切波（SH 波）传递函数的第 n 阶卓越频率 f_n 可表示为：

$$f_n = (2n+1)\frac{V_s}{4h}, (n = 0,1,2,\ldots) \quad (1)$$

其中，V_s 为沉积层的平均剪切波速，h 为沉积层厚度。$n=0$ 对应基阶卓越频率 $f_0 = V_s / 4h$，$n=1,2,\ldots$ 对应高阶谐波频率。由于场地沉积层厚度 h 通常不会突变，因此可通过识别基阶卓越频率 $f_{n=0}$ 随时间的变化来表征沉积层剪切波速 V_s 的动态演变，两者呈显著正相关关系。此外，相较于 V_s，$f_{n=0}$ 对沉积层厚度 h 的变化更为敏感（Guo et al., 2021），因此，当地下介质中形成新的波阻抗界面（如潜在滑移面）时，HVSR 曲线上往往会出现新的卓越频率峰值。对于由 M 层介质组成的地下结构模型，理论上可识别出与 M−1 个界面对应的 M−1 个卓越频率。通过持续追踪这 M−1 个卓越频率的时变特征，可实现对地下界面及结构演化过程的动态监测（Guo

et al., 2023），其理论示意如图 2 所示。

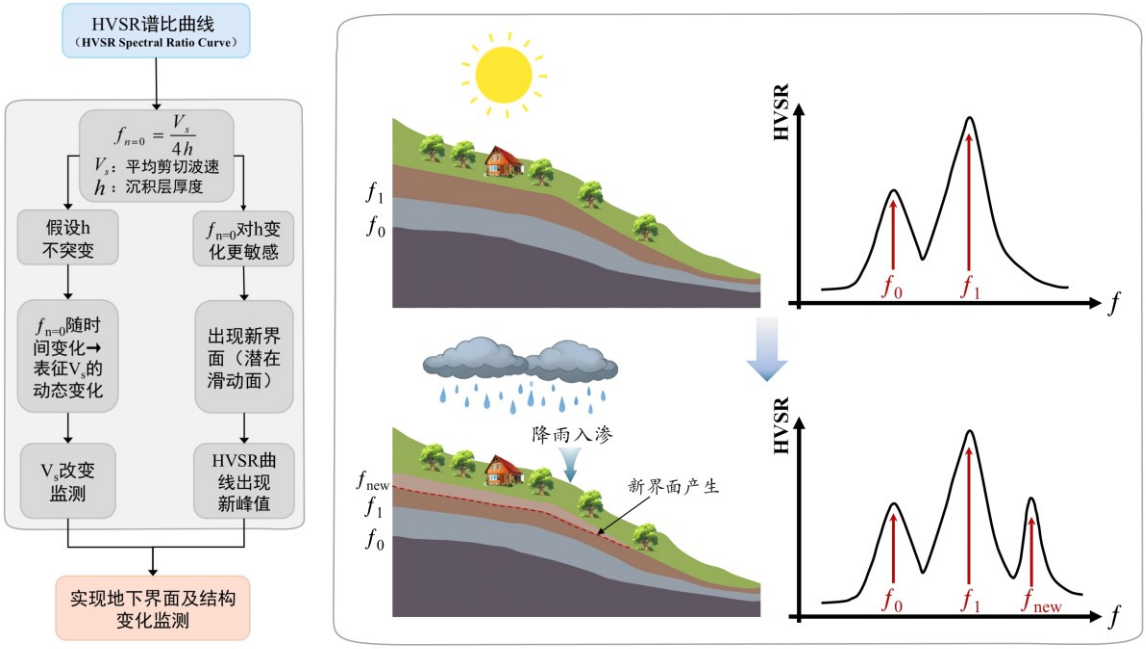


图 2 基于连续地脉动 HVSR 方法监测滑坡地下界面及结构变化示意图

Fig.2 Schematic diagram of monitoring the evolution of slope underground interfaces and medium structures based on continuous microtremor HVSR method.

1.2.2 现场监测方案

为查明该滑坡的地质结构特征，2025 年 8 月对该案例滑坡开展了短期地脉动观测。基于 HVSR 方法的地下 V_s 反演无需台站间互相关分析，因此结合滑坡潜在滑体的预估规模、空间展布及反演分辨率需求，对检波器数量、测点布设方式及台站间距进行了合理设计。该滑坡区内共布设两条测线，如图 3 所示：一条垂直于滑坡主滑方向（A1-A1'），另一条平行于滑坡主滑方向（A2-A2'），台站间距为 5-8 m，每条测线均开展了一次地脉动观测。数据采集使用高精度三分量地震仪（Ant-3C，有效频带 0.2-1000 Hz），采样频率设置为 1000 Hz，单点连续记录时长为 40 min。为保障观测数据质量，现场测试均在无降雨、大风等环境干扰条件下进行。在布设前清除地表杂草、浮土及碎石，并对场地进行整平处理，以确保仪器与地面之间的良好耦合状态，从而获取高信噪比的垂直向（V）、东西向（EW）和南北向（NS）三分量微动信号。

为长期监测不同深度土体含水率变化，在坡体布设了 3 支高精度水分探头（型号 CSF-13，分辨率 0.001$m^3 \cdot m^{-3}$，精度±0.02 $m^3 \cdot m^{-3}$），安装深度分别为 0.3 m、0.7 m 和 1.1 m。同时，在距观测剖面约 80 m 的开阔区域布设一台雨量计，用于同步获取降雨过程数据。此外，为持续获取滑坡地脉动响应信息，自 2025 年 8 月 12 日起，在滑坡关键部位布设单个固定台站，对该滑坡开展了为期四个月的地脉动连续观测。台站选址于滑坡滑动后形成的滑床上，该部位在前期地质调查中被识别为降雨入渗的潜在通道，因此作为首期验证性监测的关键部位。各类仪器与传感器的具体布设位置如图 3 所示。

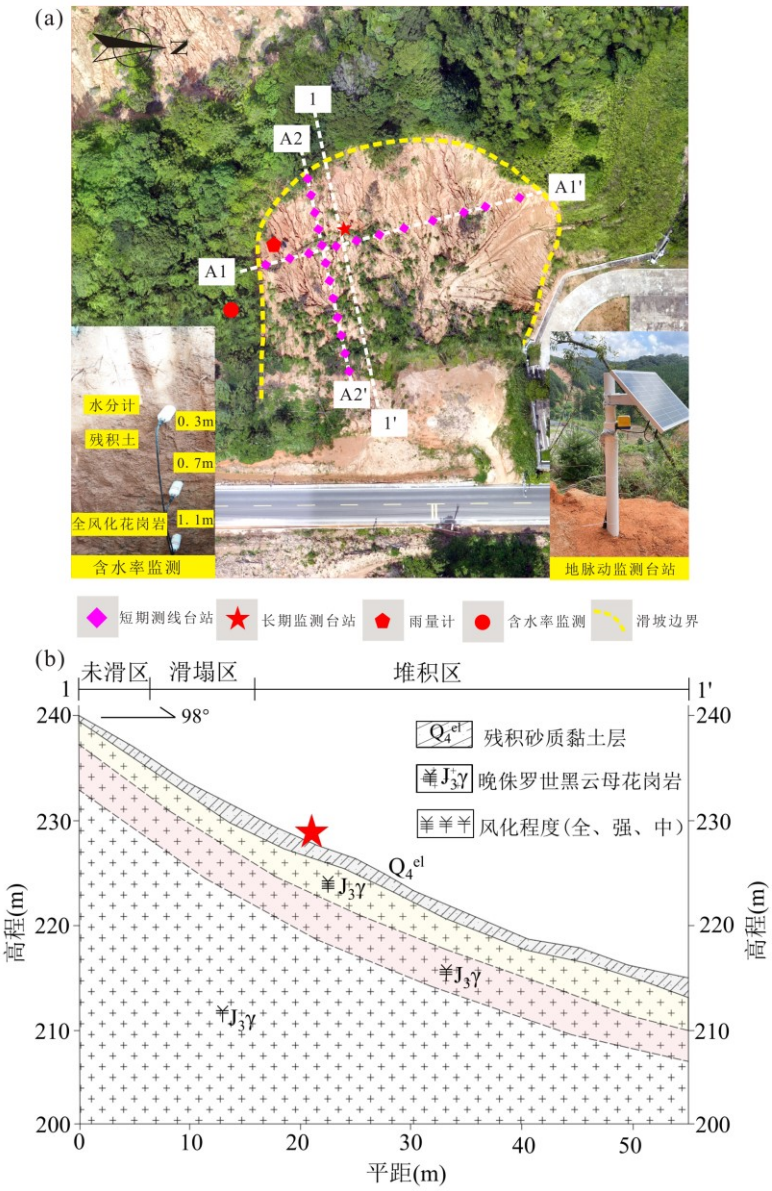


图 3 (a)下坝中心小学滑坡监测仪器布设图; (b)滑坡区 1-1'地质剖面图

Figure 3 (a) Monitoring instrument deployment map of the Xiaba Central Primary School landslide; (b) Geological cross-section diagram of line 1-1' in the landslide area

1.2.3 数据处理

对于短期和连续地脉动观测数据，首先将原始三分量时间序列降采样至 500 Hz，并分割为长度 30 秒、无重叠的数据片段。对每个时间序列片段进行去均值、去线性趋势及仪器响应校正处理。为排除因偶发干扰（如能量爆发）造成的异常数据，采用一种反触发算法进行筛选：该算法基于短时间窗（1 秒）与长时间窗（30 秒）的平均振幅比值，仅保留比值在预设范围（0.2 至 2.5）内的数据片段(Guo et al., 2014, 2023; Bard and SESAME-Team, 2004)。对保留的时间序列片段采用 5%的余弦锥化，最大限度降低片段间不连续的影响。

采用快速傅里叶变换法（FFT）计算各片段的傅里叶振幅谱，并选用带宽系数为 40 的 Konno&Ohmachi 平滑窗对各频谱进行平滑处理（Konno and Ohmachi, 1998; 孙晓倩等, 2024）。根据以下公式计算时间片段的 HVSR 谱：

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

式中$V(t,f)$、$NS(t,f)$和$EW(t,f)$分别为第t个数据片段在频率f处，垂直向、南北向和东西向的平滑傅里叶振幅。

将所有有效片段的 HVSR 结果叠加并平均，得到各台站的最终 HVSR 曲线。基于此曲线，采用 Guo et al., (2023)提出的 HVSR 反演算法，反演获得台站下方的剪切波速结构。与基于台阵的反演技术相比，该方法在保证反演可靠性的同时具有更高的计算效率。

为监测滑坡地下界面及结构随时间的变化特征，我们对连续地脉动观测得到的连续 HVSR 结果按 24 小时时间窗进行统计处理。在每个 24 小时窗内，按照 Bard and SESAME-Team (2004) 的判据识别卓越频率，以此分析卓越频率在日尺度上的时序变化规律。

2. 结果与分析

2.1 滑坡地质结构反演

图 4 展示了基于短期地脉动记录反演得到的滑坡剪切波速结构。剖面显示，坡体地表以下约 1-2 m 范围内存在明显的残积土低速层（V_s<150 m/s），其物质组成可能与早期滑塌体堆积物有关，这与现场调查中观察到的松软堆积物特征相符。残积土之下依次为全风化层（Vs = 150-260 m/s）、强风化层（Vs = 260-395 m/s）及中风化基岩（Vs > 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）。基于以上划分依据，可确定各风化层界面的平均深度，残积土-全风化层界面、全风化-强风化层界面及强风化-中风化层界面的平均深度分别约为 1.1 m、1.5 m 和 2.1 m。本研究结果进一步验证了该 V_s 分区标准在风化花岗岩滑坡区的适用性与可靠性。

基于滑坡前后高程变化以及不同风化层界面埋深特征，可将研究区划分为未滑区（B）、滑塌区（C）与堆积区（D），如图 4 所示。测线 A2-A2'的反演结果显示，滑塌区风化层界面深度明显浅于堆积区，反映了滑动过程中对表层风化物质的剥蚀作用。值得注意的是，滑塌区仍保留约 0.6-0.9 m 厚的残积土层，这可能与滑坡发生后降雨引起的再风化过程以及来自上部未滑区的持续入渗补给有关。此外，在滑坡后缘下方识别出明显低速体，推测其与地下水局部富集或径流汇聚活动有关，可能在滑坡孕育与触发过程中发挥了重要作用。

在降雨冲刷作用下，坡面形成了两个径流优势汇流区I和II，这些区域由于长期接受降雨补给，其剪切波速显著低于周边区域。尤其是在汇流区II下方，发育了一条与地下低速带相连通的渗流通道。上述结果表明，地表径流路径对水分入渗过程具有显著控制作用，并进一步影响滑体材料的剪切波速分布及力学性质演化。

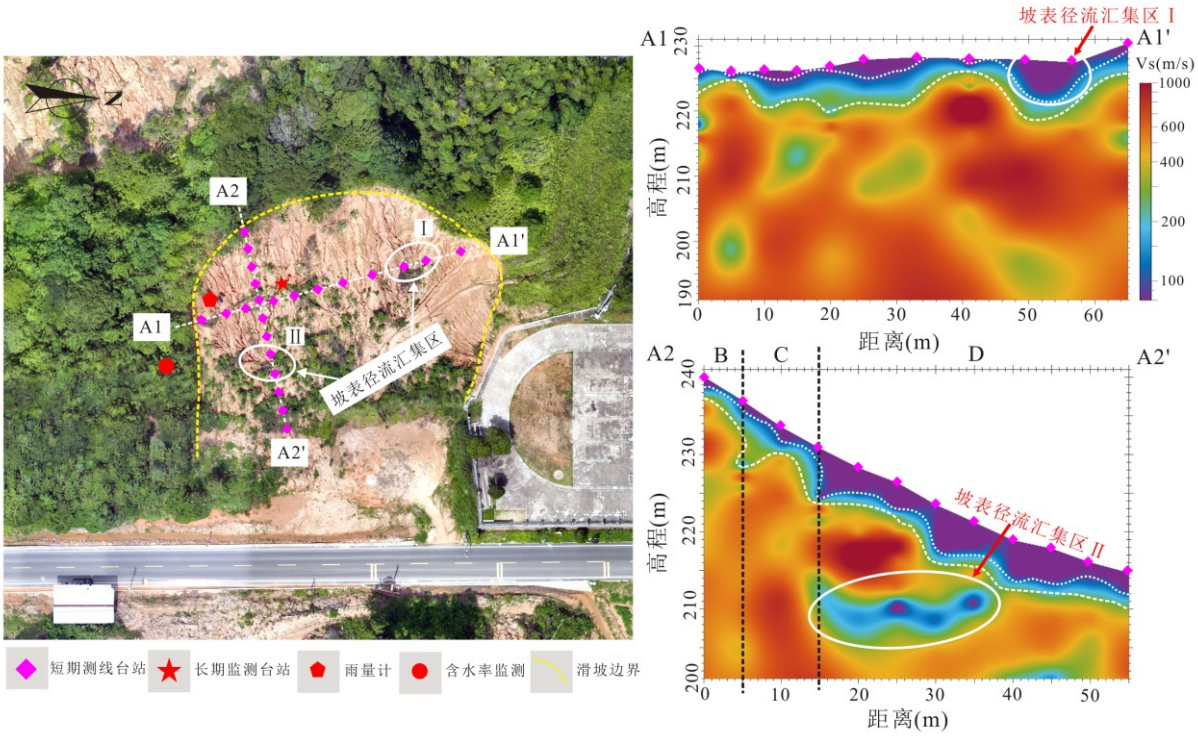


图 4 下坝中心小学滑坡 V_s 剖面图

Fig.4 V_s profile of the xiaba central primary school landslide

2.2 HVSR 时频变化分析

2.2.1 基于全时序监测的滑坡水文动力响应

依据 HVSR 方法的理论基础，通过持续追踪卓越频率 f_n 的时间演化特征，可实现对降雨作用下滑坡地下界面及结构状态动态演化过程的监测。当 f_n 保持相对稳定时，表明对应波阻抗界面处于稳态；当 f_n发生显著变化时，则反映该界面以上介质的平均剪切波速 V_s 随时间发生调整；而新的卓越频率峰值的出现，则指示滑坡内部可能形成了新的波阻抗界面。自 2025 年 8 月起，在滑坡关键部位布设单个固定台站，对该滑坡开展了为期四个月的地脉动连续观测，并绘制了 HVSR 时频图，如图 5a 所示。监测期间因仪器维护、供电中断及网络传输导致部分数据缺失，有效数据完整率为 81.95%，缺失时段与关键降雨事件无重叠，整体数据连续性和信噪比均满足后续分析需求。

按照 Bard and SESAME-Team (2004) 建议的卓越频率识别标准，本研究共识别出 7 个卓越频率（f_0-f_6），依据其分布范围可大致划分为三个频段：1-5 Hz、5-35 Hz 和＞35 Hz。已有大量研究表明，卓越频率与地下波阻抗界面的埋深呈反比关系（Ibs-von Seht and Wohlenberg, 1999; Abd el-aal, 2018; Tian et al., 2019; Guo et al., 2023），即频率越高，所响应的界面深度越浅。基于这一规律，本文识别的低频段、中频段和高频段卓越频率，可分别半定量地指示滑坡体深部、中深部及浅部波阻抗界面的响应特征。如图 5(b)所示，f_0-f_3 卓越频率在整个监测期间表现为连续、稳定的水平条带特征，表明其对应的波阻抗界面位置基本保持不变，指示该深度范围内的地下结构处于相对稳定状态。结合界面埋深反演结果，这些稳定卓越频率对应的界面可能位于风化程度较低的花岗岩地层。由于该深度范围岩体整体渗透性较低，对降雨入渗的响应有限，因此在监测期间未表现出显著的水文动力响应特征。相比之下，f_4-f_6 卓越频率表现出明显的时变特征，其中 f_5 和f_6 变化尤为显著（图 5b），反映了浅部地下结构物性参数（如密度、含水状态等）的动态演化。通过将卓越频率时序与同期降雨记录对比

分析发现，f_5与f_6的变化与降雨事件呈显著相关：几乎每次降雨事件后，两者均呈现“快速下降-缓慢恢复”的典型演化模式。该演化过程主要归因于降雨入渗导致浅层非饱和带含水率快速升高，从而使介质剪切波速下降，卓越频率随之降低。随后，随着水分向下迁移及蒸发作用的共同影响，含水率逐步降低，剪切波速恢复，卓越频率亦随之回升。此外，f_6（对应更浅界面）的下降幅度普遍大于 f_5，表明浅层残积土层对降雨入渗及水分再分布过程的响应更加迅速且直接。

从全时序监测结果来看，f_5卓越频率由监测初期约 65 Hz 持续升高至约 95 Hz，呈现出显著的趋势性上升特征。在此期间，降雨频率和累计降雨量整体较低，浅层非饱和带可能处于水分流失状态（排水效应大于降雨补给），导致含水率呈缓慢下降趋势（图 5b）。f_5的逐步升高与土体含水率持续下降呈显著同步，反映了在整体降雨偏少的背景下，浅层非饱和带水分状态的季节性演化及其引起的土体物性变化。为进一步定量验证上述关联，对三个深度含水率与卓越频率进行了 Pearson 相关分析（表 1）。结果表明，各深度含水率与 f_5均呈显著负相关（r = − 0.72~ − 0.80，P < 0.001），其中 0.3 m 深度相关性最强（r = − 0.80），0.7 m 次之（r = − 0.74），1.1 m 略低（r = − 0.72），上述结果定量证实了含水率变化对卓越频率的驱动作用。进一步分析其物理机制，降雨频率下降导致土体含水率降低，浅层介质逐渐干燥，引起剪切波速升高。根据公式（1），卓越频率 f_n与剪切波速 V_s 呈正相关，因此 f_5随 V_s 的升高而持续上升。相比之下，f_6对应更浅的次级界面，其波阻抗差异较小，剪切波速易受孔隙水分布非均匀性及土体非均质性影响，频率响应以短周期波动为主，未表现出明显的演化趋势，相关分析亦显示f_6与各深度含水率均无显著相关性（P > 0.05）。

综合全时序监测结果可知，降雨事件会引起 f_5和 f_6卓越频率的短暂快速下降，而浅层土体含水率持续下降则导致 f_5呈现显著的趋势性上升。上述现象表明，降雨入渗及水分迁移过程在不同时间尺度上对浅层滑体介质状态具有显著影响，并间接驱动卓越频率的变化。同时，这一结果验证了 HVSR 方法在表征降雨作用下滑坡水文动力响应过程及地下界面结构演化中的有效性和应用潜力。

表 1 不同深度含水率与卓越频率的 Pearson 相关系数

Table 1 Pearson correlation coefficients between moisture content at different depths and dominant frequency.

含水率深度	与 f_5的相关系数 r	P 值	与 f_6的相关系数 r	P 值
0.3 m	-0.797	P < 0.001	0.073	0.46
0.7 m	-0.743	P < 0.001	0.071	0.48
1.1 m	-0.716	P < 0.001	0.07	0.49

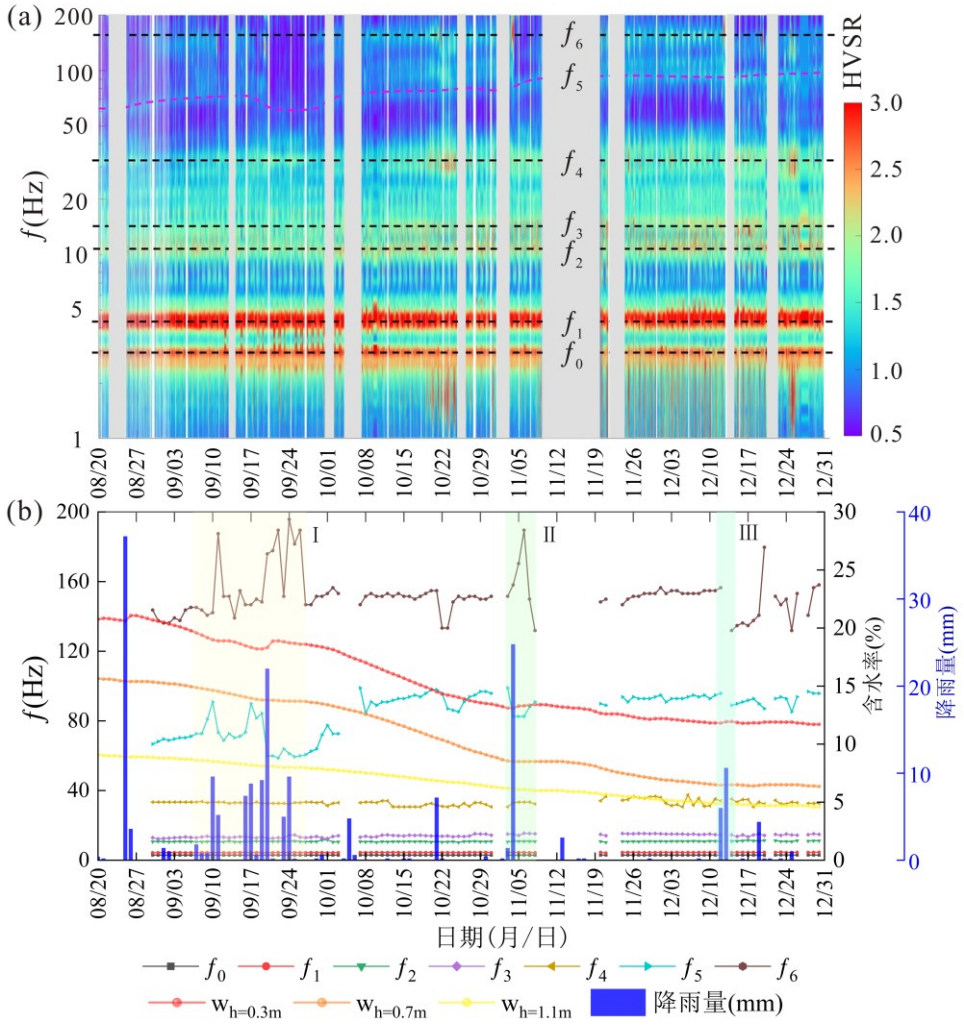


图 5 (a) HVSR 时频图；(b) 卓越频率、含水率和降雨量随时间变化；

灰色时间窗口是无数据的时期

Fig.5 (a) HVSR time-frequency plot; (b) Temporal variations in dominant frequency, moisture content and rainfall;

The gray time windows represent the periods without available data.

2.2.2 滑坡对典型降雨事件的水文动力响应

由于监测期间处于研究区台风季末期至初冬的过渡阶段，整体降雨偏少，四个月内仅识别出三次独立的降雨事件（依次记为事件I、II和III）。其中，事件I持续时间最长，9 月 16 至 21 日累积雨量达 41.2mm，单次最长连续降雨时间为 36h，峰值 6 小时降雨 18.8 mm；事件II和事件III持续时间相对较短，峰值 6 小时降雨分别为 16.6 mm 和 8.0 mm，具体降雨事件特征参数详见表 2。三次事件间隔均超过 15 天，便于独立分析单次降雨的响应与恢复过程。针对各降雨事件对应的连续地脉动数据，采用 6 小时时间窗口计算平均水平与垂直谱比，6 小时窗口在保证 HVSR 谱比计算稳定性的前提下能有效捕捉这一快速响应过程，并提取对应的卓越频率 f_5、f_6 及事件期间新出现的卓越频率f_{new}。

如图 6 所示，三次降雨事件均表现出相似的卓越频率时序响应特征。在降雨事件峰值日（事件I：9 月 20 日；事件II：11 月 04 日；事件III：12 月 13 日），f_5 均出现显著下降，f_6 表现为短暂消失后逐步恢复的特征，同时伴随新的卓越频率 f_{new} 的产生。以事件II为例，降雨当日 f_5 由约 98 Hz 快速下降至 83 Hz，降幅约 15.3%；

f_6在降雨期间短暂消失，随后次日重新出现，其频率由约 150 Hz 降至 120 Hz，降幅约 20%。这些变化表明，降雨入渗可在短时间内显著提高浅层非饱和带土体含水率，导致剪切波速衰减，从而使卓越频率降低（如 f_5）或短暂消失（如f_6）。降雨结束后，各卓越频率经历数日缓慢回升，对应水分逐步排出和土体干燥的恢复过程。

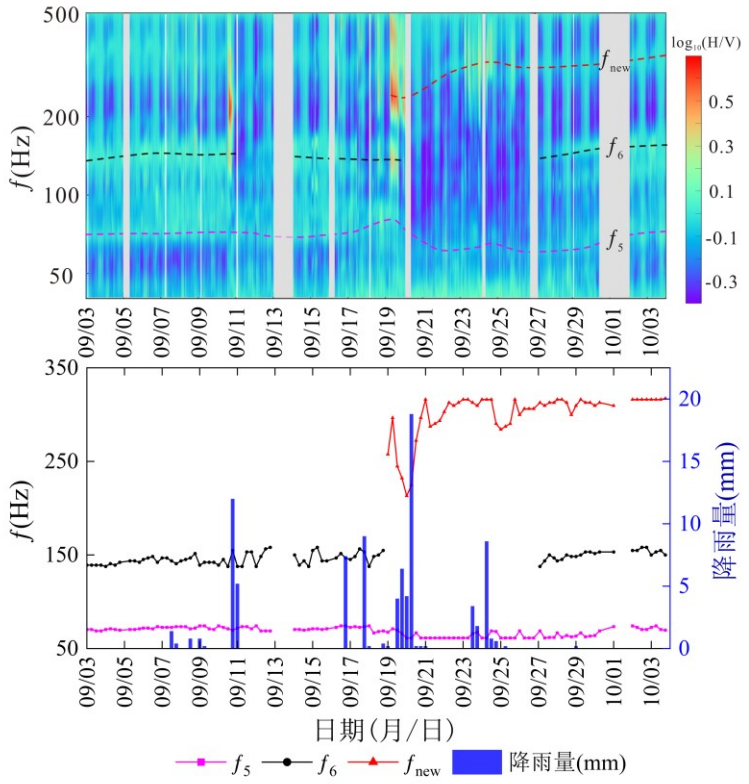
值得注意的是，在三次降雨事件中均观测到 f_{new} 的出现。为进一步厘清其成因，本文结合 HVSR 时频图（图 6）的谱比演化特征进行分析。在降雨期间，如 9 月 11 日、9 月 20 日、11 月 4 日及 12 月 13 日前后，高频段特定频率处的 H/V 谱比值出现明显升高，色标由蓝色突变为红色，指示该深度范围内可能产生了新的波阻抗界面（$IC=\rho_l V_{sl}/\rho_u V_{su}$，$\rho$：密度；$V_{\mathrm{s}}$：剪切波速；下标$l$和$u$分别代表界面下方与上方地层）。上述谱比突增现象与降雨过程具有高度同步性，且在三次事件中均可观测到。相比之下，在非降雨时段，如 9 月 3 日至 10 日和 12 月 8 日至 12 日，H/V 谱比值稳定维持在较低水平，色标主要表现为蓝绿色，表明该深度范围内未出现显著的波阻抗差异界面。同时，这也说明监测系统及环境背景噪声总体保持稳定，从而排除了仪器耦合状态随机变化的可能性。综上，降雨不仅改变了既有界面的波阻抗特性，还可能诱发新的波阻抗界面形成。这一现象可能与降雨入渗过程中浅层岩土体内部低渗透性界面的存在有关：该界面可导致水分在湿润锋附近滞留并形成暂态饱和区，进而产生显著的波阻抗差异。与此同时，孔隙水压力升高和有效应力降低可能削弱浅层土体的抗剪强度，并进一步影响滑坡稳定性。降雨结束后，f_{new} 呈现缓慢上升后逐步衰减的变化趋势，表明暂态饱和区经历了一个水分渐进消散的过程。

对比三次降雨事件可见，不同降雨特征在卓越频率响应中表现出明显差异。事件I总雨量最大且持续时间最长，f_5 降幅最为显著；事件II总雨量略小、持续时间较短，其响应幅度次之；事件III总雨量最小、持续时间最短，频率响应也最弱。进一步分析不同频率成分可见，f_{new} 的波动幅度最大，对应最浅部介质界面，因此对水分变化最为敏感；f_5 和f_6 对应次级浅层界面，响应幅度相对较小，但恢复周期更长，反映出降雨入渗向深部传播过程中存在明显的时间滞后效应。此外，频率恢复周期与降雨强度呈正相关。事件I的峰值降雨强度最大，其对应频率恢复周期约 7 天，明显长于事件II。这表明降雨强度越大，水分入渗深度可能越大，土体排水与结构恢复过程也越缓慢。总体而言，卓越频率的响应幅度与恢复周期并非由单一因素控制，而是受降雨量、降雨强度及前期含水状态共同影响。

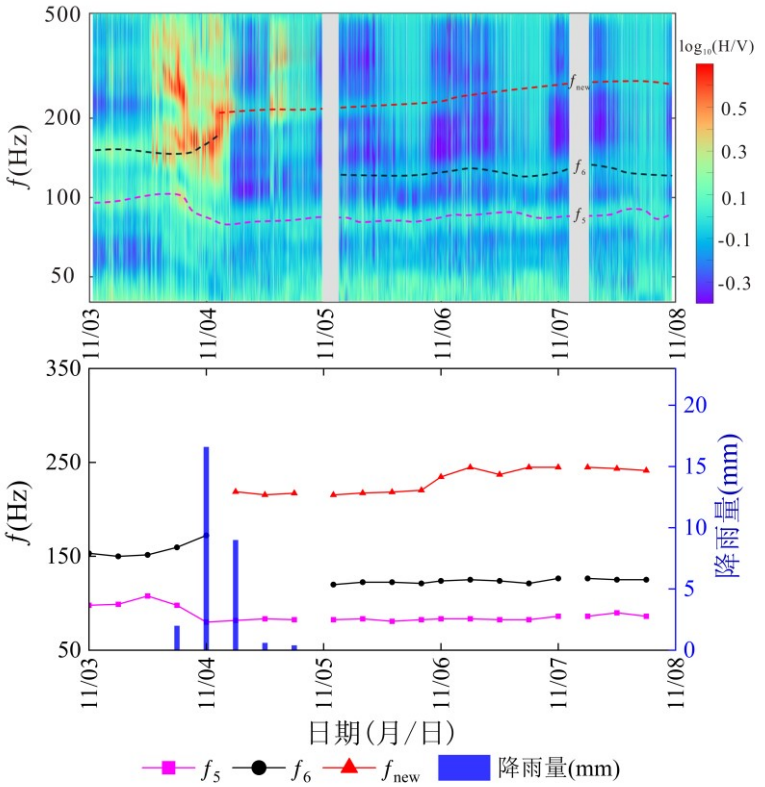
表 2 三次典型降雨事件特征参数

Table 2 Characteristic parameters of three typical rainfall events

事件编号	日期	总降雨量 (mm)	峰值 6h 降雨量 (mm)	单次最长连续降雨时间 (h)	前期干燥天数 (d)
事件I	09/16-09/21	41.2	18.8	36	5
事件II	11/03-11/04	28.6	16.6	24	10
事件III	12/12-12/13	16.6	8.0	12	8



(a) 降雨事件 I



(b) 降雨事件 II

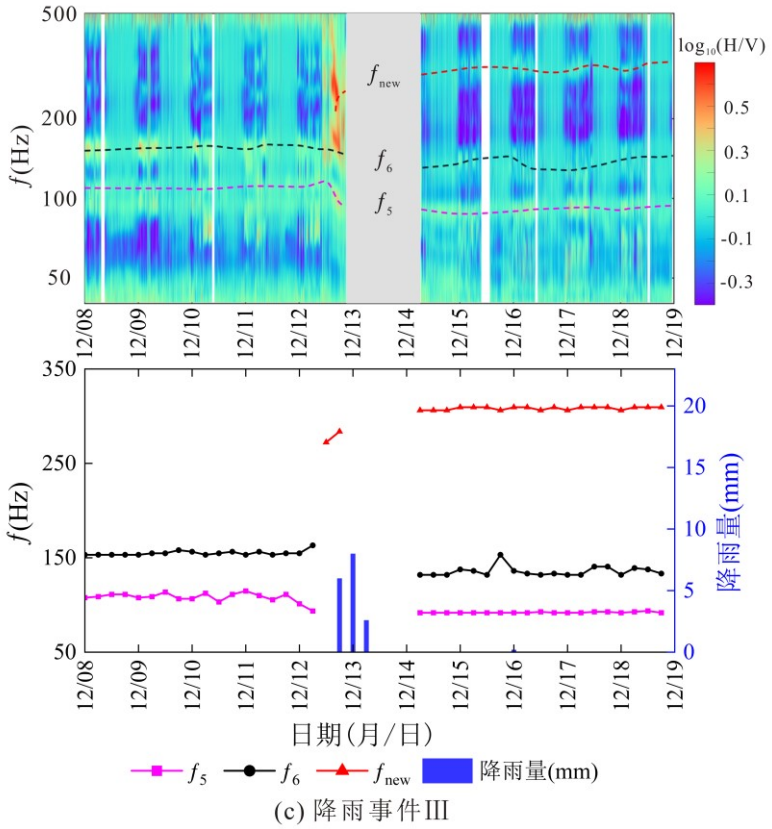


图 6 三次典型降雨事件 HVSR 时频图及降雨量和卓越频率随时间变化

Fig.6 HVSR time-frequency plots and temporal variations of rainfall and predominant frequencies for three typical rainfall events

3 讨论

风化花岗岩滑坡在降雨作用下表现出显著的水文动力响应特征，其中浅层介质物性变化及地下结构界面的动态演化，是认识降雨型滑坡形成机理与响应过程的关键科学问题。然而，在东南丘陵区，由于斜坡数量众多且植被覆盖度高，传统钻探及常规地球物理探测手段在成本、效率和空间分辨率方面存在明显局限，因而难以实现对滑坡地下界面及结构演化过程的连续监测。已有研究，如 Watlet et al., (2024)在黏土质滑坡中联合高分辨率 ERT 与低频 DAS，虽成功刻画了湿度累积的空间分布及其与变形前兆的关联，展现了二维剖面成像与空间异质性定位的优势，然而 ERT 每日一次的采样频率仍不足以捕捉降雨后数小时内的快速水文响应过程。相比之下，地脉动 HVSR 方法作为一种被动源、非侵入式的地球物理技术，具有低成本、易于连续观测的优势，能够在小时尺度上追踪降雨入渗过程中浅层介质刚度与界面状态的动态变化，从而为揭示滑坡水文动力响应过程提供有效途径。若未来进一步布设多台站，还可在连续跟踪时序响应的同时获取斜坡不同部位的结构变化信息，实现“时序追踪”与“空间成像”的有机结合，从而更全面地认识滑坡水文动力响应的时空演化规律。

基于短期地脉动反演结果，HVSR 方法能够有效识别风化花岗岩滑坡的“上土下岩”二元地质结构特征，并查明残积土层、全风化层与强风化层的平均界面深度，为后续水文动力响应分析提供了关键的地下结构约束。进一步基于连续四个月的单台站地脉动监测数据，本文系统分析了卓越频率在降雨过程中的动态响应特征，揭示了降雨入渗引起浅层介质物性变化的主要物理机制。研究结果表明，降雨入渗导致浅层土体含水率升高、基质吸力降低，从而引起土体软化并伴随剪切波速衰减。由于卓越频率与剪切波速呈正相关，V_s 的降低会直接导致相应波阻抗界面处卓越频率下降。因此，在降雨事件发生后，f_5 和f_6 卓越频率表现为先快速下降、后缓慢回

升至雨前水平的演化特征。值得注意的是，f_5 卓越频率在整个监测期间呈现出持续缓慢升高的趋势，该变化与浅层非饱和带土体含水率整体下降具有较好的对应关系，反映了整体降雨偏少的背景下浅层非饱和带水分状态的季节性演化及其引起的土体物性变化。更具指示意义的是，降雨期间曾短暂出现的新卓越频率成分。该频率成分并非随机噪声信号，而可能指示浅层非饱和带内暂态饱和区的形成。作为一个新的显著波阻抗界面，暂态饱和区的产生、维持与消散过程，与降雨诱发孔隙水压力快速累积及其后续逐步衰减的演化过程表现出较好的一致性(Lü et al., 2024; Tan et al., 2025)。这一现象为进一步认识降雨型浅层滑坡的孕育与触发机制提供了潜在的物理指示。

本研究采用的单台站 HVSR 连续监测方法无需台站间互相关分析，单次反演计算时间仅需数十分钟，能够满足滑坡连续监测对近实时处理能力的需求。监测结果表明，卓越频率对降雨过程的响应可在小时至天尺度内被有效捕捉，进一步验证了 HVSR 方法用于表征降雨作用下滑坡水文动力响应过程的适用性。尽管如此，本研究仍存在若干局限性：（1）HVSR 方法虽对波阻抗界面敏感，但单台站反演具有多解性，所得界面深度与波速绝对数值仍存在固有不确定性。后续应结合钻孔资料、面波频散反演或孔中波速测试对反演结果施加约束，以提高其可靠性；（2）地脉动监测样本库仍需持续扩充。目前监测时长相对较短，仅捕捉到三次典型降雨事件，样本量有限，相关结论的统计稳健性仍有待更多事件数据验证。未来应延长连续观测时间，重点积累台风、持续梅雨等极端水文事件下的地脉动响应数据，以深化对降雨型风化花岗岩滑坡的水文动力响应特征的认识；（3）降雨入渗过程中在浅层土体内部形成的暂态饱和区，可视为一个波阻抗差异显著的界面，但其对剪切波速衰减的具体影响机制仍需进一步验证。后续宜结合孔隙水压力和地下水位的同步监测资料，将暂态饱和区的动态演化与雨水在土体中的渗透迁移过程及孔隙水压力变化进行关联分析，从而深化对降雨型滑坡水文动力响应机制的定量认识；（4）单台站观测在空间代表性方面存在固有局限。本文台站布设于滑坡渗流汇集区，该部位虽是降雨入渗敏感区，但滑坡后缘、中部和前缘等不同部分的水文动力响应特征可能存在差异。后续需布设多台站并开展 HVSR 空间阵列观测，以获取滑坡体水文动力响应的空间异质性特征。

4 结论

本研究以福建省龙岩市武平县一处典型风化花岗岩滑坡为对象，基于 HVSR 方法系统开展了降雨作用下滑坡水文动力响应过程的连续监测与分析，揭示了卓越频率对降雨入渗过程的动态响应特征及其物理机制。主要结论如下：

（1）短期地脉动 HVSR 反演能够较有效地识别风化花岗岩滑坡“上土下岩”的二元结构特征，并确定残积土层、全风化层与强风化层界面的平均埋深，验证了 HVSR 方法在滑坡分层结构探查中的适用性，也为后续水文动力响应分析提供了关键的地下结构约束。

（2）降雨事件发生后，f_5 和f_6 卓越频率总体呈现“快速下降-缓慢回升”的演化特征，反映了降雨入渗导致浅层非饱和带土体含水率升高、剪切波速衰减，以及雨后水分逐步排出、介质性质恢复的过程。此外，f_5 卓越频率在整个监测期内呈现缓慢上升趋势，并与浅层非饱和带土体含水率的逐步下降较好对应，揭示了降雨偏少背景下浅层水分季节性演化及其对土体物性变化的影响。

（3）三次降雨事件中均观测到新卓越频率的出现，表明降雨入渗过程中浅层岩土体内部可能存在低渗透性界面。该界面可导致水分在其附近滞留并形成暂态饱和区，进而可能对滑坡稳定性产生潜在影响。这一发现为认识降雨型浅层滑坡的孕育与触发机制提供了新的观测视角。

参考文献

Abd el-aal, A, 2018. New relationship between fundamental site frequency and thickness of soft sediments from seismic ambient noise. Journal of Seismology, 22, 1315–1323. https://doi.org/10.1007/s10950-018-9753-x.

Bard, P., SESAME-Team., 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations measurements, processingand and interpretations. In: SESAME European Research Project No. EVG1-CT-2000-00026, D23.12.

Bièvre, G., Jongmans, D., Lebourg, T., et al., 2021. Electrical resistivity monitoring of an earthslide with electrodes located outside the unstable zone (Pont-Bourquin landslide, Swiss Alps). Near Surface Geophysics, 19(2): 225-239. https://doi.org/10.1002/nsg.12145.

Chen, B., Zhang, C. C., Li, Z. H., 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): 2145-2155(in Chinese with English abstract).

Deng, Z. C., Lan, H. X., Li, L. P., et al., 2025. Vegetation-induced modifications in hydrological processes and the consequential dynamic effects of slope stability. Catena, 251: 108793. https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108793.

Feng, W. K., Bai, H. L., Lan, B., et al., 2022. Spatial–temporal distribution and failure mechanism of group-occurring landslides in Mibei village, Longchuan County, Guangdong, China. Landslides, 19:1957–1970. https://doi.org/10.1007/s10346-022-01904-9

Feng, W. K., Zhao, J C., Yi, X. Y., et al., 2025. Formation Characteristics and Drivers of Clustered Landslides Induced by Extreme Rainstorm on June 16 in Fujian-Guangdong-Jiangxi Junction Area. Earth Science,50(10):4111-4124. (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. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106274.

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. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107268.

Guo, Z., Mao, W. 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).

Huang, R. J., Feng W. K., Li S. Q.， et al., 2025. Empirical prediction model for the runout distance of rainfall-induced group-occurring shallow soil landslides. Bulletin of Geological Science and Technology, 44(3): 255-267(in Chinese with English abstract).

Huang, Y., Mao, W. W., Guo, Z., et al., 2025. Challenges and Strategies for Cascading Hazards of Rainfall- induced Landslides in Southeastern Coastal China under Climate Change. Bulletin of National Natural Science Foundation

of China, 39(6): 1006-1015(in Chinese with English abstract).

Ibs-von Seht, M., Wohlenberg, J., 1999. Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments. Bulletin of the Seismological Society of America, 89, 250–259. https://doi.org/10.1785/BSSA0890010250.

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. https://doi.org/10.1785/BSSA0880010228.

Lai, Z. R., Jian, W. B., Lin, Y. Z., et al., 2024. Hydrological Response of Granite Residual Soil Slope to Short-Duration Heavy Rainfall. Bulletin of Soil and Water Conservation, 44(4): 135-142(in Chinese with English abstract).

Li, B., Gao, Y., Zhuang, Y, et al., 2025. Characteristics and Cascading Effects of the Blatten Avalanche in the Swiss Alps. Earth Science, 50(12): 4950-4969(in Chinese with English abstract).

Liu, H., Li, J., Hu, R., et al., 2024. Quantitatively monitoring of seasonal frozen ground freeze–thaw cycle using ambient seismic noise data. Seismological Research Letters, 96: 282-293. https://doi.org/10.1785/0220240201.

Liu. W. P., Song, X. Q., Luo, J., et al., 2020. The processes and mechanisms of collapsing erosion for granite residual soil in southern China. Journal of Soils and Sediments, 20: 992-1002. https://doi.org/10.1007/s11368-019-02467-4

Lü, Q., Wu, J. Y., Liu, Z. H., et al., 2024. The fuyang shallow landslides triggered by an extreme rainstorm on 22 july 2023 in zhejiang, china. Landslides, 21: 2725-2740. https://doi.org/10.1007/s10346-024-02314-9.

Luo, H., Deng Y. F., Zhang Z., et al., 2025. Shallow Structure Beneath the Yilan Crater Based on HVSR Analysis. Geotectonica et Metallogenia, 49(4): 900-911(in Chinese with English abstract).

Moon. S., Subramaniam, P., Zhang, Y. H., et al., 2019. Bedrock depth evaluation using microtremor measurement: empirical guidelines at weathered granite formation in Singapore. Journal of Applied Geophysics, 171: 103866. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.103866.

Nakamura, Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports, 30 (1): 25–30.

Nogoshi, M., Igarashi, T., 1971. On the amplitude characteristics of microtremor (part 2). Journal of Seismological Society of Japan, 24: 26–40. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:134172177.

Shapiro, N., Campillo, M., Stehly, L., et al., 2005. High-resolution surface-wave tomography from ambient seismic noise. Science, 307(5715): 1615-1618. https://www.science.org/doi/10.1126/science.1108339.

Sun, X. Q., Chu, R. S., Zeng, Q., et al., 2024. Velocity structure of the Xishancun landslide in Li County, Sichuan Province, explored by HVSR method. Chinese Journal of Geophysics, 67(4): 1515-1526(in Chinese with English abstract).

Tan, D. L., Xu, X. L., Wang, L. H., et al., 2025. Deformation evolution and failure mechanism of rainfall-induced granite residual soil landsliding event in northern guangdong, china. Landslides, 22: 925-941. https://doi.org/10.1007/s10346-024-02403-9.

Tian, H. M., Li, D. Q., et al., 2019. Reliability-based monitoring sensitivity analysis for reinforced slopes using BUS and subset simulation methods. Engineering Geology, 293, 106331. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105223.

Wang, D. Z., Shen, W. Z., 2003. Genesis of Granitoids and Crustal Evolution Southeast China. Earth Science Frontiers, 10(3): 209-220(in Chinese with English abstract).

Watakabe, T., Matsushi, Y, 2019. Lithological controls on hydrological processes that trigger shallow landslides: observations from granite and hornfels hillslopes in hiroshima, japan. Catena, 180: 55-68. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.04.010.

Watlet, A., Wilkinson, P., Whiteley, J., et al., 2024. High-resolution geophysical monitoring of moisture accumulation preceding slope movement—a path to improved early warning. Environmental Research Letters, 19: 124059. https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ad8fbe.

Wu, S. B., Liao, L. P., Wei, Y., et al., 2020. Effect of Initial Dry Density on Initiation Mode of Rainfall- Induced Granite Residual Soil Landslide, Southeastern Guangxi Province, China. Mountain Research, 38(6): 881-893(in Chinese with English abstract).

Xu, Q., Xu, F. S., Pu, C. H., 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).

Yang, G. L., Zhao, L. H., Qin, Y. G., et al., 2025. Clustered landslides induced by rainfall in jiangwan town, shaoguan city, guangdong province, china. Landslides, 22: 1325-1338. https://doi.org/10.1007/s10346-025-02463-5

Yu, P., Shi, W. Q., Cao, Z. H., et al., 2024. Numerical analysis of seepage field response characteristics of weathered granite landslides under fluctuating rainfall conditions. Water, 16(14): 1996. https://doi.org/10.3390/w16141996.

Zhang, S., Tang, H. M.,2013. Experimental study of disintegration mechanism for unsaturated granite residual soil. Rock and Soil Mechanics, 34(6): 1668-1674(in Chinese with English abstract).

Zhang, T. L., Zhou, A. G., Sun, Q., et al., 2017. Characteristics of the Groundwater Seepage and Failure Mechanisms of Landslide Induced by Typhoon Rainstorm. Earth Science, 42(12): 2354-2362(in Chinese with English abstract).

Zhu, X., Luo, Y. H., Nan, K., et al., 2023. Application of environmental noise test in rapid exploration of landslide site: take Zhaojiashan landslide as an example. Progress in Geophysics, 38(6): 2778-2790(in Chinese with English abstract).

Zhuang, Y., Xing, A. G., Sun, Q, et al., 2023. Insights into initiation of typhoon-induced deep-seated landslides in southeast coastal china. Natural Hazards, 119: 721-749. https://doi.org/10.1007/s11069-023-06138-z.

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（信息科学版）, 49(11): 2145-2155.

冯文凯, 赵家琛, 易小宇,等, 2025. 闽粤赣边区“6·16”强降雨诱发群发滑坡特征与驱动因素. 地球科学, 50(10):4111-4124.

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.

罗恒, 邓阳凡, 张周, 等, 2025. 基于 HVSR 方法研究依兰陨石坑地下浅层结构. 大地构造与成矿学, 49(4):900-911.

黄瑞健, 冯文凯, 李双权, 等，2025. 降雨型群发浅层土质滑坡运动距离经验预测模型. 地质科技通报, 44(3): 255-267.

黄雨, 毛无卫, 郭桢, 等, 2025. 气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害防控挑战及应对. 中国科学

基金, 39(6): 1006-1015.
赖增荣, 简文彬, 林昀昭, 等, 2024. 花岗岩残积土坡对短历时强降雨的水文响应. 水土保持通报, 44(4): 135-142.
李滨,高杨,庄宇,等, 2025. 瑞士瓦莱州 Blatten 高位远程崩滑碎屑流成灾特征与级联放大效应.地球科学, 50(12):4950-4969.
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(4): 1515-1526.
王德滋，沈渭洲. 2003. 中国东南部花岗岩成因与地壳演化. 地学前缘, 10(3): 209-220.
吴善百, 廖丽萍, 韦遥, 等, 2020. 初始干密度对桂东南降雨型花岗岩残积土滑坡起动模式的影响. 山地学报, 38(6): 881-893.
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（信息科学版）, 49(8): 1264-1274.
张抒, 唐辉明. 2013. 非饱和花岗岩残积土崩解机制试验研究. 岩土力学, 34(6): 1668-1674.
张泰丽, 周爱国, 孙强, 等, 2017. 台风暴雨条件下滑坡地下水渗流特征及成因机制. 地球科学, 42(12): 2354-2362.
朱鑫, 罗永红, 南凯, 等, 2023. 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. 地球物理学进展, 38(6): 2778-2790.