

基于差异渗透的花岗岩残坡积土滑坡群发规律研究

龚锦钊¹, 刘波泉¹, 彭章胤², 周朋涛¹, 刘剑³, 王盛娇², 方堃⁴, 谢济仁²

(1.广东省地质局韶关地质调查中心, 广东韶关 512026

2.中南大学土木工程学院, 湖南长沙 410075;

3.湖南省交通运输厅规划与项目办公室, 湖南长沙 410000

4.香港科技大学土木与环境工程系, 香港九龙 999077)

摘要:近年来, 极端降雨条件下花岗岩残坡积土群发性滑坡灾害频频发生, 严重制约区域发展、威胁人民生命财产安全, 然而目前对于花岗岩残坡积土滑坡群发规律仍缺乏清晰的认识, 因此难以建立可靠性高、针对性强的减灾防治方法。对此本文以"4·20"群发性花岗岩残坡积土滑坡灾害为研究对象, 基于不同深度野外双环渗透试验, 研究浅层植被覆盖环境下残坡积土边坡土层渗透参数变化特征, 结合土柱渗透实验, 探究降雨突增条件下渗透差异土层水分迁移特征, 分析差异渗透土层分界面汇水现象及孔压演化规律, 运用数值模拟方法, 进一步研究降雨强度突增条件下差异渗透花岗岩残坡积土边坡土层分界面孔隙水压力变化规律及对坡体稳定性的影响特征。浅层植被覆盖花岗岩残坡积土边坡存在显著的上下岩层渗透性差异, 在极端降雨期间, 该渗透性差异会阻碍水分向下伏低渗透性岩层运移, 致使表层土体及土层界面处因水分滞留引发孔隙水压力急剧累积, 进而导致坡体有效应力减小, 引起坡体稳定系数迅速下降, 最终触发群发性浅层滑坡。该成果为极端降雨下浅层植被覆盖花岗岩残坡积土滑坡失稳规律及群发机理认识提供了重要科学依据和试验支撑, 也为花岗岩地区降雨型群发性滑坡减灾防治研究提供了重要参考。

关键词: 群发性花岗岩残坡积土滑坡; 降雨激增; 渗透差异; 破坏规律; 数值模拟

中图分类号: P642.22

收稿日期: 2025-12-19

The Spatiotemporal Mass-Triggering Mechanism of Granite Residual-Colluvial Soil Landslides Induced by Differential Infiltration

GONG Jinzhao¹, LIU Boquan¹, PENG Zhangyin², ZHOU Pengtao¹, LIU Jian³, WANG Shengjiao², FANG Kun⁴, XIE Jiren²

(1.Shaoguan Geological Survey Center of Guangdong Bureau of Geology, Shaoguan 512026, China;

2.School of Civil Engineering of Central South University, Changsha 410075, China;

3.Planning and Project Office of Department of Transportation of Hunan Province, Changsha 410000, China

4.Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong University of Science and Technology, Kowloon, Hong Kong 999077, China)

Abstract: In recent years, frequent clustered landslides in granite residual-eluvial soils under extreme rainfall have severely constrained regional development and threatened life and property safety, while the mechanisms behind such clustered failures remain insufficiently understood, consequently impeding the development of highly reliable and targeted mitigation measures. This study investigates the "4·20" clustered granite residual soil landslide event through field double-ring infiltration tests at different depths to characterize permeability variations in shallow vegetated zones, combined with soil column infiltration experiments to examine water migration patterns in layers with permeability contrasts during rainfall intensification, analyzing water accumulation and pore pressure evolution at soil interfaces. Numerical simulations were further employed to study pore water pressure dynamics at interfacial zones of permeability contrast and their effects on slope stability under sudden rainfall increase. The results demonstrate that significant permeability differences between upper and lower layers

基金项目: 湖南省自然科学基金部门联合基金项目 (2026JJ30045), 国家自然科学基金资助项目 (51579137)

作者简介: 龚锦钊 (1988—), 男, 高级工程师, 硕士. 研究方向: 地质灾害风险预警及防治. E-mail: 286674302@qq.com

***通信作者:** 谢济仁, 男, 副教授, 博士, 从事滑坡机理研究工作, Email: jirenxie198911@csu.edu.cn

in shallow vegetated granite residual slopes hinder downward water movement during extreme rainfall, causing rapid moisture retention and sharp pore pressure buildup at soil interfaces, which reduces effective stress and leads to a rapid decline in the slope safety factor, ultimately triggering clustered shallow landslides. These findings provide important scientific evidence and experimental support for understanding the failure mechanisms of vegetated granite residual slopes under extreme rainfall, and offer valuable references for the study of mitigation strategies for rainfall-induced clustered landslides in granite regions.

Key Words: group-occurrence granite residual and colluvial soil landslides; rainfall surge; permeability contrast; failure mechanism; numerical simulation

0 引言

滑坡是我国典型的地质灾害类型,其巨大的破坏性常导致严重的生命财产损失和社会经济影响(Fang *et al.*, 2021; Zou *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Xie *et al.*, 2024; Xu *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2025;)。近年来,我国花岗岩地区在极端降雨条件下群发性滑坡灾害频发(Xu *et al.*, 2024; Chen *et al.*, 2024; Kong *et al.*, 2025; 刘智琪等,2025),如2019年6月,由于持续降雨,广东省龙川县发生群发性滑坡灾害,造成13人死亡,直接经济损失超10亿元;2024年4月,受极端强降雨影响,广东省韶关市江湾镇发生群发性滑坡灾害造成7人死亡;同年8月,极端强降雨影响下湖南省资兴市也发生了群发性滑坡灾害,累计造成50人因灾遇难、15人失踪。花岗岩残坡积土边坡的表层通常覆盖有植被发育良好的残坡积土层,其下伏基岩为风化花岗岩层。该类边坡特有的风化特征为群发性滑坡灾害的形成提供了地质条件,并表现出发灾迅速、突发性强、波及范围广的特点(Feng *et al.*, 2022; Chen *et al.*, 2024),而且严重影响到山区居民生命财产安全,因此,深入研究花岗岩残坡积土滑坡群发规律已成关乎山区民生安全、保障区域协调发展不可回避的命题。

滑坡机理研究一直是学者研究的重点(Song *et al.*, 2022; Tang *et al.*, 2022; Hu *et al.*, 2023; 章伟凯等, 2025),关于花岗岩地区残坡积土边坡破坏机理,黄汉芳(2008)和张文华(1994)分析了花岗岩残坡积土特征与边坡失稳的规律,提出其边坡稳定性主要取决于残坡积土原生或次生结构面的强度;郑晓栩(2014)通过室内物理试验研究了厦门地区花岗岩残坡积土的抗剪强度指标与含水率的关系,

并在室内模拟边坡失稳实验,通过人工模拟降雨工况,分析和总结了花岗岩残坡积土边坡失稳破坏的规律;方雪晶等(2012)利用数值分析软件对某花岗岩类土质边坡稳定性进行了模拟分析。上述研究主要集中于单体花岗岩滑坡的分析与研究,然而对于短历时、群发性的花岗岩残坡积土滑坡,目前多数学者的研究也仍然处于宏观视角,未深入明晰降雨触发群发性滑坡的发灾力学特性,Bai(2021)等对群发性滑坡进行解译、统计后,得出滑坡灾害与高程、地形坡度等地形环境因素的规律,分析花岗岩地区群发性滑坡分布与地质环境密切相关。赵建军等(2025)以广西北流市为例,分析花岗岩地区1670处群发滑坡特征,获取到滑坡发生的主要高程、坡度范围,并确定了群发滑坡的破坏模式为剪切、滑塌、碎屑流三类。黄瑞健等(2025)基于福建省武平县131处滑坡数据,按剪出口位置分三类建立运动距离预测模型,确定了影响群发浅层土质滑坡运动距离的主要因素,建立了基于统计分析的降雨型群发浅层土质滑坡运动距离预测模型。冯文凯等(2025)利用YOLOv8s解译强降雨影响下闽粤赣边区群发性滑坡35407处,并结合气象生态因素、地质条件和地形地貌探讨了滑坡驱动因素。上述研究主要从宏观尺度聚焦于群发性滑坡的区域分布规律、影响因子识别等研究,为理解花岗岩地区滑坡灾害的共性特征和诱发背景提供了重要基础。然而,这些研究尚未从内部机理揭示群发性花岗岩残坡积土滑坡在特定地质环境与降雨耦合作用下的具体成灾机制。

综上所述,为研究降雨作用下花岗岩残坡积土滑坡的群发规律,本文以广东省韶关

市江湾镇花岗岩残坡积土群发性滑坡为研究对象，从土层渗透差异影响入手，通过对滑坡现场调查及一系列室内外试验对花岗岩残坡积土渗透特性进行深入研究，同时根据现场调查成果和试验结果数据，联合数值模拟对花岗岩残坡积土滑坡群发规律进行分析，可为同类型研究提供参考。

1 研究区域及发灾概况

江湾镇位于粤北地区(图 1a)，地貌总体上属河谷平原和丘陵地貌，地形起伏较大，并且呈现出四周高、中间低的地形特征，山地面积占全镇总面积的 80%，地质构造复杂，地处南岭山脉南缘构造侵蚀区，属地质灾害高易发区 (Li *et al.*, 2021; Shu *et al.*, 2021)。基岩主要由花岗岩和片麻岩组成，全镇范围内多为块状坚硬花岗岩岩组(图 1b)，此外，

此类岩石形成山体数量较多，坡体表层残坡积层及全风化—强风化层厚度较大，为灾害的发生提供了不利条件。

2024 年 4 月以来，广东省韶关市遭遇持续性降雨天气，降雨量是同期 4 倍，辖区内江湾镇也遭受数轮极端降雨影响，4 月累计降雨量达 949.5mm，并且打破当地 4 月雨量历史纪录 (Zhou *et al.*, 2021)。此外，发灾前短时极端强降雨达到峰值，4 月 19 日 9 时-4 月 20 日 9 时累计降雨量超过 150mm，每小时降雨量突破 40mm(图 1c)，由于持续强降雨，4 月 20 日上午 9 时许江湾镇境内发生群发性滑坡灾害，全镇在半个小时内共发生崩塌、滑坡超 2000 处(图 1d、e、f)。本次群发性滑坡灾害共造成江湾镇超 100 间房屋倒塌、多处道路坍塌，此次群发性滑坡灾害造成的经济损失超过 30 亿元，给区域经济和居民生活带来了巨大影响。

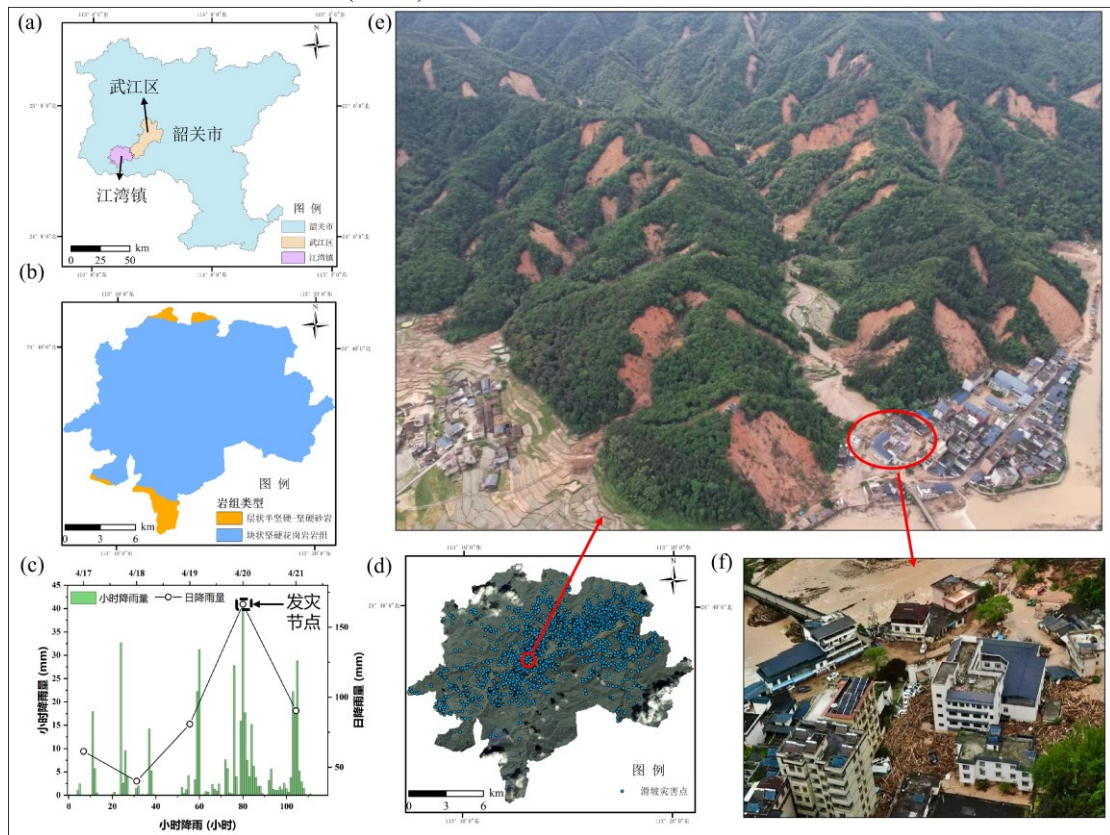


图 1 江湾镇群发滑坡发灾概况(a)江湾镇区域位置示意图 (b)江湾镇工程岩组示意图 (c)江湾镇降雨监测数据 (d)江湾镇滑坡点分布示意 (e)江湾镇群发滑坡航拍影像 (f)滑坡受灾房屋及道路

Fig.1 Overview of the multiple landslide disasters in Jiangwan Town

本研究对江湾镇滑坡现场灾情较为严重，且土体外观形态有一定差异的 5 处公路

沿线典型滑坡进行调查工作，同时在对应的调查点进行取样和现场实验，对应的调查滑

坡位置及部分造成严重经济损失的重点滑坡全貌图如图 2 所示。通过对 5 处滑坡现场的实地调查,发现边坡原始坡度分布在 20° - 35° 范围内,其滑面深度多未超过 1m,属于典型的浅层滑坡。原始地形山体植被覆盖良好,以乔木和灌木为主,覆盖率较高。在

5 处典型滑坡点,采用剖面挖掘法对根系分布进行分析(图 2)。调查表明,表层 0-0.5m 深度内根系主要为乔灌木须根网络;0.5-1m 以粗根为主,且根系主要沿坡面方向生长分布,深部风化花岗岩层未见明显根系。

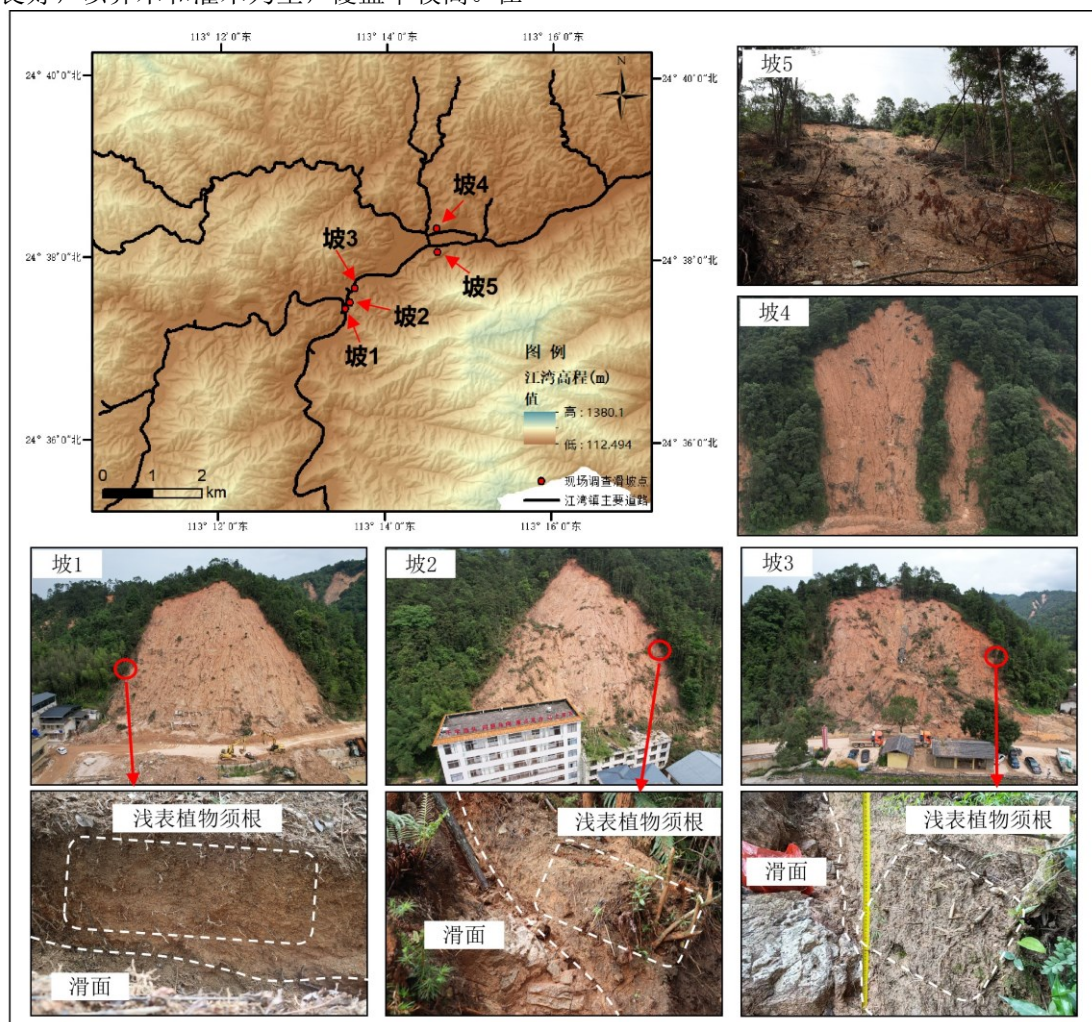


图 2 典型滑坡现场调查

Fig.2 Typical landslide field investigation

为准确测定滑坡现场不同垂直位置的花岗岩残坡积土边坡的饱和渗透系数,采用标准化野外双环渗透试验法开展原位测试(图 3)。基于滑坡结构特征分层情况,在现场调查的 5 处典型滑坡点潜在滑动面以上浅表根系发育的土体及滑动面以下深部无根系土体分别设置双环渗透试验测点。试验过程中按 10 分钟间隔观测入渗量,当连续两次观测的入渗量差值小于 10%时,即认为达到稳态渗流,此时记录对应的饱和渗透系数,共获取 10 个有效渗透参数如图 3 所示。

分析表明:有根系土层的平均饱和渗透系数达 0.03 cm/s ,而无根系土层平均饱和渗透系数仅为 0.003 cm/s ,两者存在一个数量级的显著性差异,这一结果系统揭示了表层土体渗透性显著高于深层土体这一坡体渗透性的垂向分异规律。该分布特征与现场调查滑坡地质结构高度吻合:表层为松散残积层,浅表植被根系发育茂密,深部为不同风化程度的花岗岩层。更重要的是,渗透性突变界面的深度位置与现场勘查确定的滑动面深度具有空间一致性,印证了滑动面上下土层

存在渗透性屏障效应,这种渗透差异在极端降雨下产生"上层快速入渗-下层阻滞汇集"的水文响应模式显著影响雨水的渗流路径,在降雨作用下加剧了雨水在滑动带附近聚

集,形成汇水区域,持续弱化土体强度,削弱了坡体自稳能力,是花岗岩残坡积土群发性滑坡的核心动力机制。

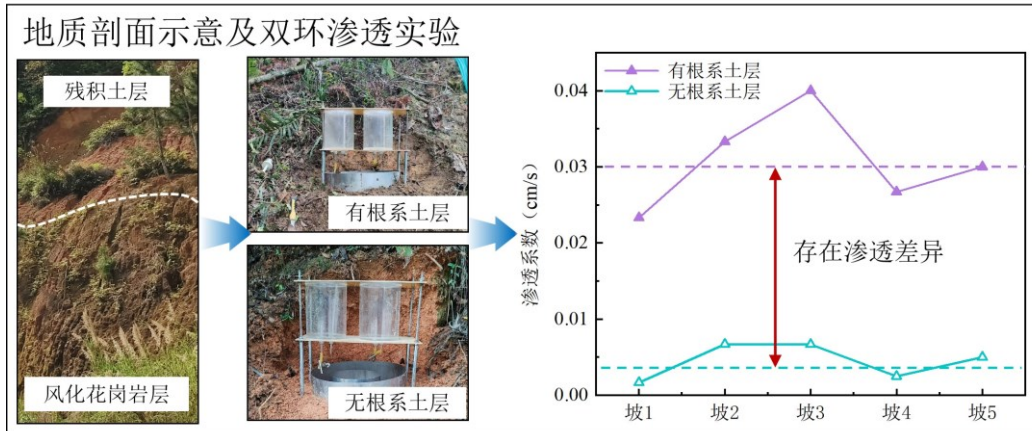


图 3 地质剖面及现场双环渗透实验

Fig.3 Geological profile and on-site double-ring infiltration test

2 花岗岩残坡积土群发滑坡室内实验研究

为获取现场土的颗粒级配曲线,在 5 处典型滑坡现场均进行了岩土材料采样工作,分析颗粒级配(图 4a)。依据花岗岩残坡积土颗粒级配定量分析方法(土工试验方法标准,2020),根据试验土样的最终筛分结果,5 处调查坡的颗粒级配曲线趋势较为接近,颗粒粒径范围在 0~10mm 之间,土样中粗颗粒占据主要部分,认定土体性质为残积砾质黏性土。

为探究降雨作用下边坡岩土层的渗透差异对土层分界面汇水作用及孔压演化规律,设计了分层土柱物理模拟实验如图 4b 所示,底层土体经夯实处理,上层土体为松散堆积状态,以此模拟滑坡现场下层土体渗透性显著低于上层土体的典型工况。分别在底层土(下部)、土层交界面上表面(中部)、

上层土(上部) 布置孔压传感器,首先施加前期强降雨直至上层土体饱和,再增加降雨强度。获取降雨过程三处孔隙水压力监测数据相对关系数据如图 4b 所示,前期降雨期间,由于上下土层间存在渗透差异,分界面间出现汇水现象,增加降雨强度后,下部监测点孔压从 0.92 kPa 微弱增长至 0.97 kPa,可见下层土由于渗透系数较小,其对降雨强度突增引起的孔隙水压力变化响应不明显,然而,在降雨强度增加时,中部孔压和上部孔压均出现陡增段,并在后续持续增加。该现象证实,在存在显著渗透性差异的土层中,当降雨强度突增时,雨水受下方低渗透性土体阻滞而无法快速下渗排出,导致在土层分界面上方土体附近孔隙水压力急剧升高,进而导致坡体有效应力减小,这一结果为理解降雨激增诱发群发性浅层滑坡的灾害规律提供了重要依据。

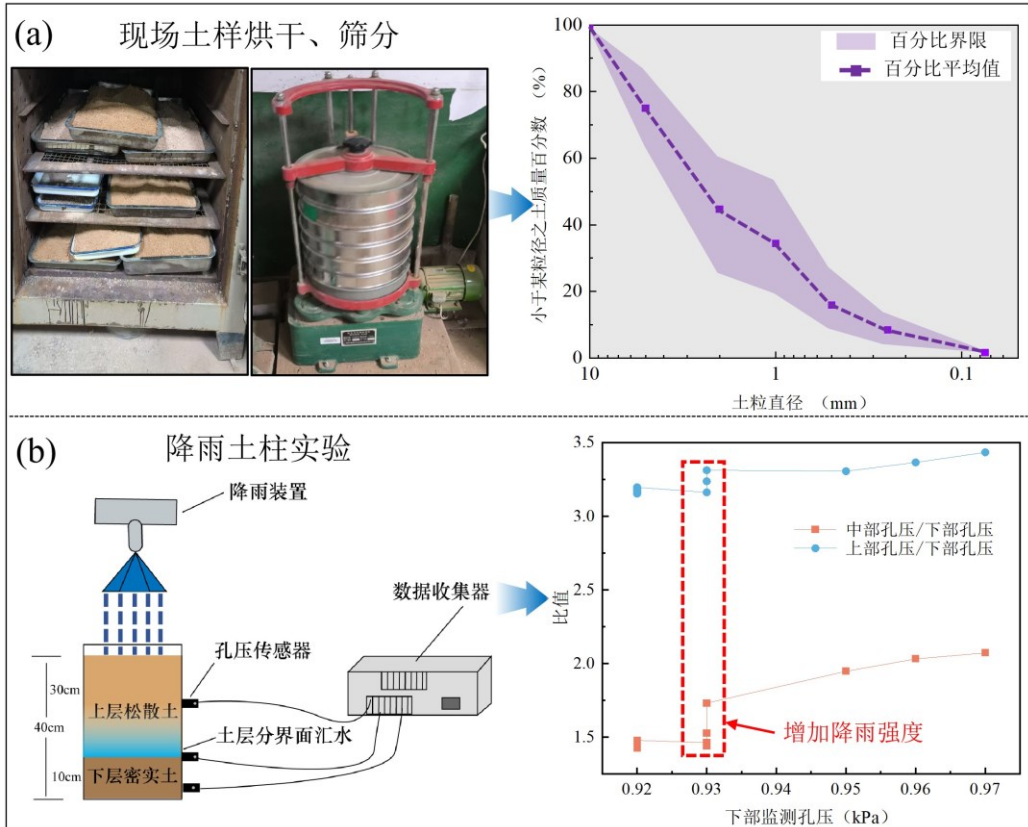


图 4 花岗岩残坡积土室内实验(a)筛分实验 (b)室内降雨土柱实验装置示意图

Fig.4 Indoor experiment on residual slope soil of granite

3 花岗岩群发滑坡规律数值研究

基于前期滑坡现场调查所确定的坡度主要分布范围，本研究建立了坡度为 20°的边坡二维有限元概化模型。根据勘查结果，实际滑坡岩土层结构均表现为上覆残坡积土层、下伏风化花岗岩层的典型特征。据此，在数值模型中相应设置了上层为花岗岩残坡积土、下层为风化花岗岩的双层地质结构，以准确模拟该类滑坡的地质条件。底面

为水平向竖向约束边界，侧面为水平向约束边界，其余为自由边界。顶面边界为降雨入渗边界，不考虑地表径流或蒸发。为了充分考虑降雨影响，结合实际江湾镇降雨监测数据，取初始降雨强度为 0.005 m/h，降雨历时 72h。在 72h 增大 0.03 m/h 的降雨强度，同时在边坡上、中、下处设置九处监测点，材料为理想弹塑性模型，遵循 Mohr-Coulomb 强度准则。具体材料参数见表 1。

表 1 土体参数表

Table 1 Soil parameters table

土层	弹性模量 MPa	容重(kN/m ³)	泊松比	黏聚力(kPa)	内摩擦角(°)	渗透系数 (cm/s)
残坡积土	50	12.38	0.27	18	26	0.03
风化花岗岩	100	24.10	0.30	32	40	0.003

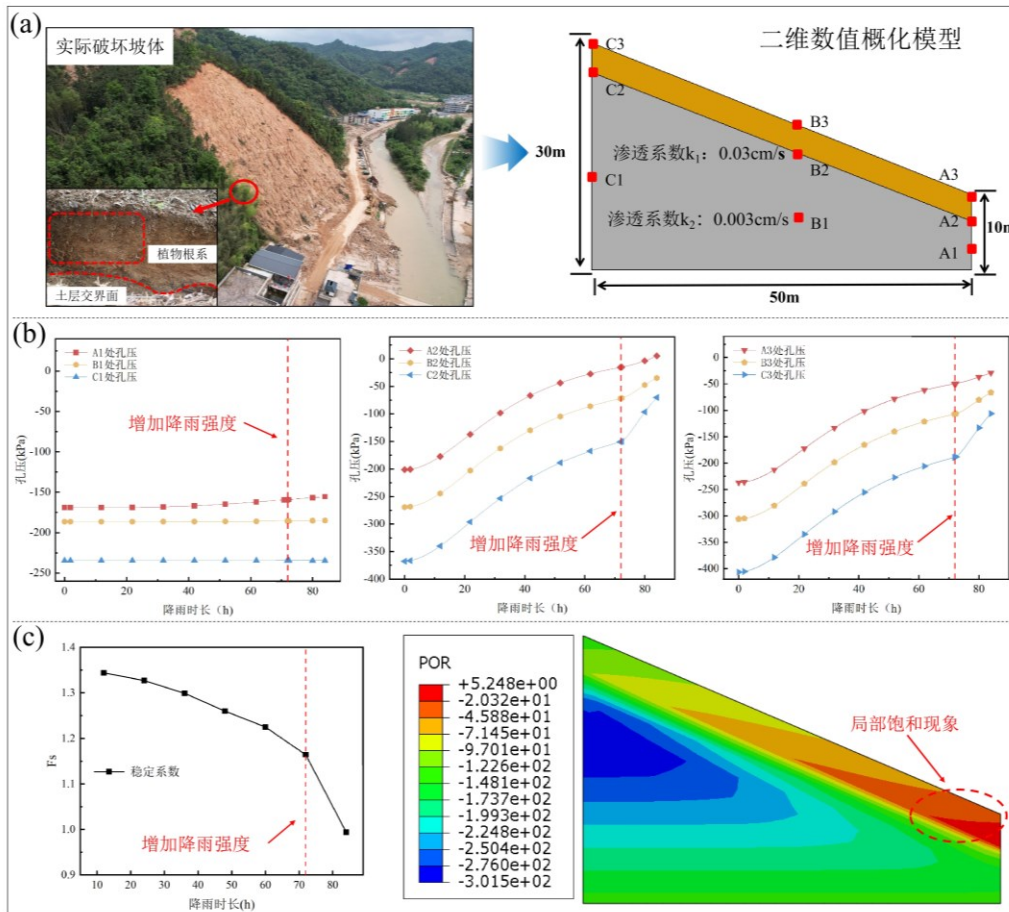


图 5 初始数值概化模型(a)边坡数值模型示意图 (b)监测点孔隙水压力示意 (c)安全系数及孔隙水压力云图

Fig.5 Initial numerical abstraction model

基于现场调查揭示的实际坡体破坏特征，本文建立二维数值概化模型进行机理分析，采用简化处理策略，将植被根系层与无根系岩土层在渗流与力学响应上的复杂相互作用，概化为上下土层渗透系数的垂向差异模型几何参数依据典型滑坡形态取值：坡度 20° ，并在降雨历时 72 h 时将降雨强度突增 0.03 m/h 以模拟极端降雨情况(图 5a)，探究渗透性分异对滑坡启动的控制作用。图 5b 展示了其在降雨过程中位于坡体底部、中部及上部共 9 个监测点的孔隙水压力变化曲线。在持续 72 小时、强度为 0.005 m/h 的降雨入渗条件下，由于上下岩土层间显著的渗透性差异，雨水难以持续下渗至下层风化花岗岩层，而持续在表层土体中汇聚。监测结果显示，坡脚处土层交界面附近的监测

点 A2，受前期降雨影响率先达到饱和状态。对比前期降雨阶段孔隙水压力的渐进式增长，当施加降雨强度增量时，位于土层交界面及以上的各监测点孔隙水压力均呈现不同程度的上升。然而，由于下方风化花岗岩层的渗透系数远小于上方花岗岩残坡积土层，雨水无法有效入渗至该层，导致其监测点孔隙水压力变化，受此渗透屏障效应的影响，表层土体中易形成局部饱和区。随着降雨进程持续，饱和土体强度呈现渐进式弱化，致使边坡安全系数随之持续衰减。尤其在降雨强度突增后，模型稳定系数的衰减速率显著增大，这清晰地表明突发性降雨强度增强对边坡稳定性具有明显的弱化作用(图 5c)。

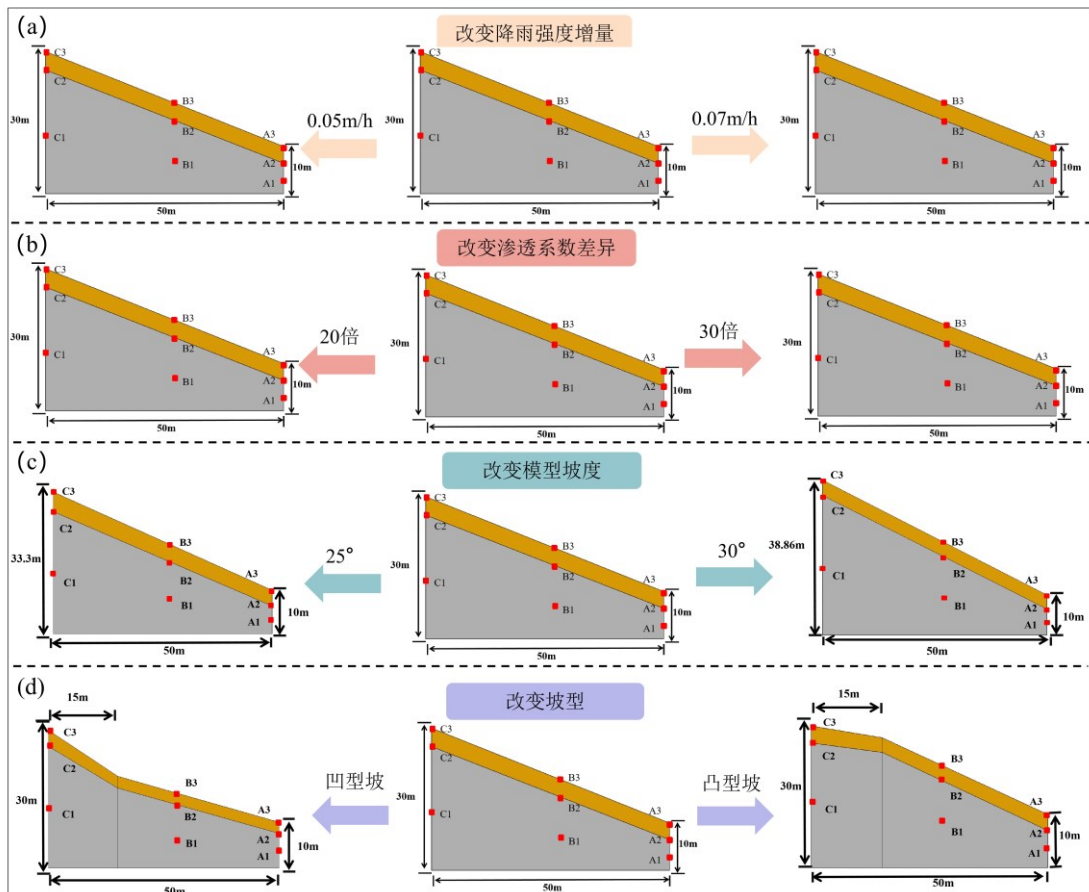


图 6 数值模型坡型及参数调整(a)降雨条件改变模型 (b)渗透条件改变模型 (c)坡度改变模型 (d)坡型改变模型

Fig.6 Numerical model slope type and parameter adjustment

为探究不同降雨强度增量对花岗岩残坡积土边坡破坏形式的影响，本研究以上述建立的边坡有限元模型为基础，在保持前期降雨条件（初始强度 0.005 m/h，持续 72 小时）及其他模型几何尺寸、边界条件均相同的前提下（模型示意如图 6a 所示），通过改变第 72 小时所施加的降雨增量进行参数分析。同时，为揭示不同土层间渗透系数差异对降雨条件下花岗岩残坡积土边坡的破坏规律，本研究基于前述边坡模型开展了专项参数分析。基于前期的现场调查发现下层存在不同风化程度的花岗岩层，为模拟滑坡现场多种下覆风化花岗岩岩土层工况，通过调整下层风化花岗岩层的渗透系数，将残坡积土层与风化花岗岩层之间的渗透系数比值由初始模型的 10 倍依次增大至 20 倍和 30 倍。分析过程中，除渗透系数比值外，模型几何尺寸、边界条件及前期降雨条件均

保持不变，并在降雨开始后第 72 小时统一增加降雨强度 0.03 m/h。相关模型设置示意图如图 6b 所示。

此外，通过在滑坡现场调查发现，不同的边坡坡型对残坡积土边坡的灾发形式也有一定的影响，为探究不同边坡坡度与坡型在降雨条件下花岗岩残坡积土边坡的破坏形式，本研究基于前述坡度为 20° 的边坡有限元模型开展参数分析。通过调整表层土厚度，构建了坡度分别为 25° 和 30° 的边坡模型，如图 6c 所示。同时，通过改变坡表形态，设置了凹型坡和凸型坡。模型初始几何尺寸、边界条件及前期降雨条件均保持一致。在降雨开始后第 72 小时，统一将降雨强度提高 0.03 m/h，相关模型示意如图 6d 所示。

在完成均匀降雨阶段及降雨强度突增阶段后，图 7 展示了上述 8 组具有不同降雨

参数、渗透参数、坡度及坡型配置的有限元模型对应的孔隙水压力分布情况。数值模拟结果表明：基于预设的土层间渗透系数差异，各组模型均在岩土层界面处产生了显著的渗流屏障效应。该效应导致在高强度降雨施加期间，雨水垂直入渗受阻，从而促使弱透水层顶部孔隙水压力快速累积并迅速形成局部饱和带。尽管各模型参数组合各异，其最终呈现的饱和带形成机制表现出显著的共性规律，这一发现为深入解释降雨诱发群发性浅层滑坡的灾害机制提供了重要的数值模拟佐证。对不同坡度模型的孔隙水压力响应分析表明，随着坡度从 20° 增加到 30° ，平行于坡面向坡脚方向的水分运移驱

动力显著增强。然而，坡脚有限的排水能力难以有效疏导由此产生的集中且大幅增加的水流输入，最终导致水分大量滞留于坡体下部，形成范围明显扩大的饱和区域。进一步对不同坡型模型的孔隙水压力响应分析显示，凹型坡地形因其固有的汇水效应，促使降雨及入渗水分向坡脚处显著富集，但由于存在渗透屏障效应，导致在土层分界面附近形成局部饱和区；凸型坡地表曲率为正值，使得土层分界面上方的水分分布模式发生改变，饱和区主要集中于该界面附近，这种水分分布特征进而导致层间水头发生显著跃变。

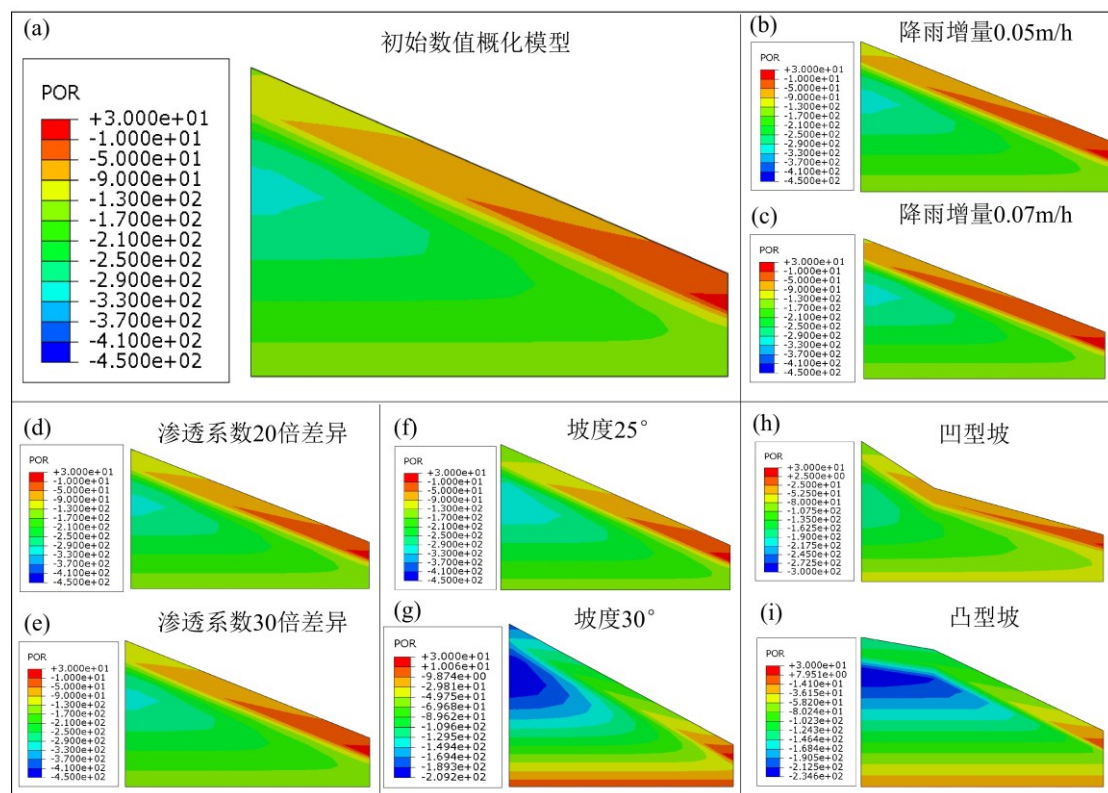


图 7 降雨过程结束后不同降雨、渗透参数设置，不同坡度、坡型边坡模型孔压分布 (a)原始数值模型 (b)降雨增量 0.05m/h (c)降雨增量 0.07m/h (d)渗透系数 20 倍差异 (e)渗透系数 30 倍差异 (f)坡度 25° (g)坡度 30° (h)凹型坡 (i)凸型坡

Fig.7 Pore pressure distribution in slope models with different rainfall and infiltration parameter settings, slope gradients, and slope shapes after the rainfall processg.

降雨进程下孔隙水压力分布云图揭示不同坡型对雨水下渗与汇聚过程具有显著调控作用。其中，凹型坡因其地形形成的天然汇水效应，相较于直线型坡和凸型坡展现出更强的雨水汇聚能力。经历完整降雨过程

后，两个凹型坡模型在土层分界面上方发育的饱和区范围明显大于其余坡型。值得注意的是，尽管不同坡型存在几何形态差异，土层交界面处的孔隙水压力演化机制呈现系统性共性如附件中的孔隙水压力监测数据

所示,在土层交界面上,凹型坡与凸型坡在整个降雨过程中均遵循与基准模型一致的三阶段孔隙水压力变化规律:初始快速累积阶段、中期缓速累积阶段、雨强突增期上升阶段。这一现象证实,渗透性差异主导的水力屏障效应是控制孔隙水压力动态变化的核心机制,而坡型变异主要通过改变汇水效率调制压力累积强度,并不改变其基本响应模式。同时,其余各组数值模型的监测点孔隙水压力数据(见附件)均呈现高度一致的变化规律:受控于上下岩土层显著的渗透性差异,在降雨强度增加阶段,水分垂向运移在土层交界面处受阻,导致各模型交界面以上区域出现持续性孔隙水压力累积,相较于前期降雨阶段,该阶段孔压增幅显著提升,上层高渗透性土体中的水分下渗至交界面,而下方低渗透性岩土层无法及时吸纳下渗水流,致使界面附近水力连续性遭到破坏,最终引发超孔隙水压力的系统性积聚,进而削弱土层交界面土体有效应力,导致边坡发生浅表层破坏。

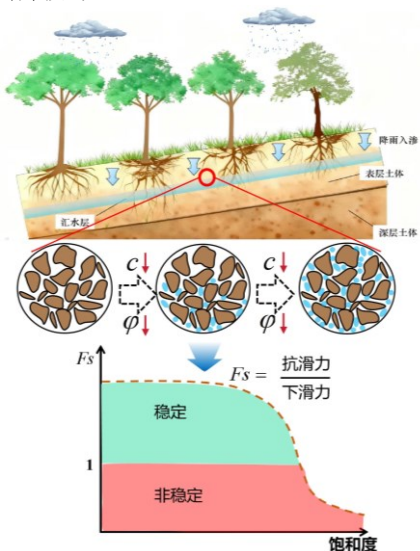


图8 降雨过程土体含水状态变化-抗剪强度弱化示意图

Fig.8 Schematic diagram of changes in soil water content and shear strength weakening during rainfall

在降雨过程中,花岗岩残坡积土边坡的抗剪强度指标是伴随含水率或饱和度的变化而变化的,而 ABAQUS 有限元软件无法表征降雨入渗作用下边坡岩土体的抗剪强度参数随饱和度变化而弱化的情形(图 8),

据此,结合室内重塑土剪切试验数据分析了花岗岩残坡积土的抗剪强度指标与土体饱和度的关系,编写考虑降雨弱化强度的花岗岩残坡积土边坡稳定性计算 USDFLD 子程序,首先通过 Fortran 语言在子程序中将饱和度定义为场变量,利用内置“CALL GETVRM”命令导出材料的饱和度数据,结果定义为场变量,即“FIELD(1)=w”;再依据花岗岩残坡积土的抗剪强度和饱和度拟合公式,获取降雨过程中边坡模型单元抗剪强度变化情况,进而分析降雨过程边坡的稳定系数的变化规律。

得到经过前期 72h 的 0.005 m/h 的降雨及突增降雨强度之后,各工况下的边坡稳定系数变化情况如图 9 所示。当进行至 72h 施加增量式降雨荷载(0.03 m/h、0.05 m/h、0.07 m/h)后,边坡稳定性劣化速率呈现显著梯度特征,边坡稳定系数由 72h 的 1.164,在 84h 时分别降至 0.994、0.962、0.905,致使边坡体系安全储备降低至临界阈值,标志着边坡在 72h 进入渐进破坏阶段,其中降雨增量 0.07m/h 的情况下边坡稳定性被削弱最严重。通过控制下层风化花岗岩层水力传导特性,使上下岩土层的渗透系数差异达到 20 倍、30 倍,从图上数据获知,下层的风化花岗岩的渗透系数越小,雨水不能及时下渗,导致水分在岩土层分界面汇集,经过 72h 的降雨之后,渗透系数差异 10 倍、20 倍、30 倍的边坡稳定系数分别降至 1.164、1.100、1.030,突增降雨强度之后,在 84h 时三种工况下边坡的稳定系数降至 0.994、0.940、0.890,在 72h 至 84h 时坡体的稳定性持续被削弱,无法自稳。

经过 72h 的降雨阶段,坡度为 20°、25°、30° 的边坡的稳定系数分别降至 1.164、1.115、1.080,此时边坡均尚能维持基本稳定状态,在 72h 增加 0.03m/h 的降雨强度,三组模型稳定性系数衰减速率显著加快,其中坡度为 30° 的模型在增加降雨强度后的稳定系数降幅最为明显。一般而言,凹型坡比原始坡型、凸型坡的具有更强的初始自稳能力,但经过前期 72h 的降雨,由于凹型坡的有一定汇水能力,导致雨水可持续弱化土体强度,凹型坡的稳定系数均低于凸型坡及

原坡型，且在突增降雨之后，凹型坡的稳定

性弱化程度更为明显。

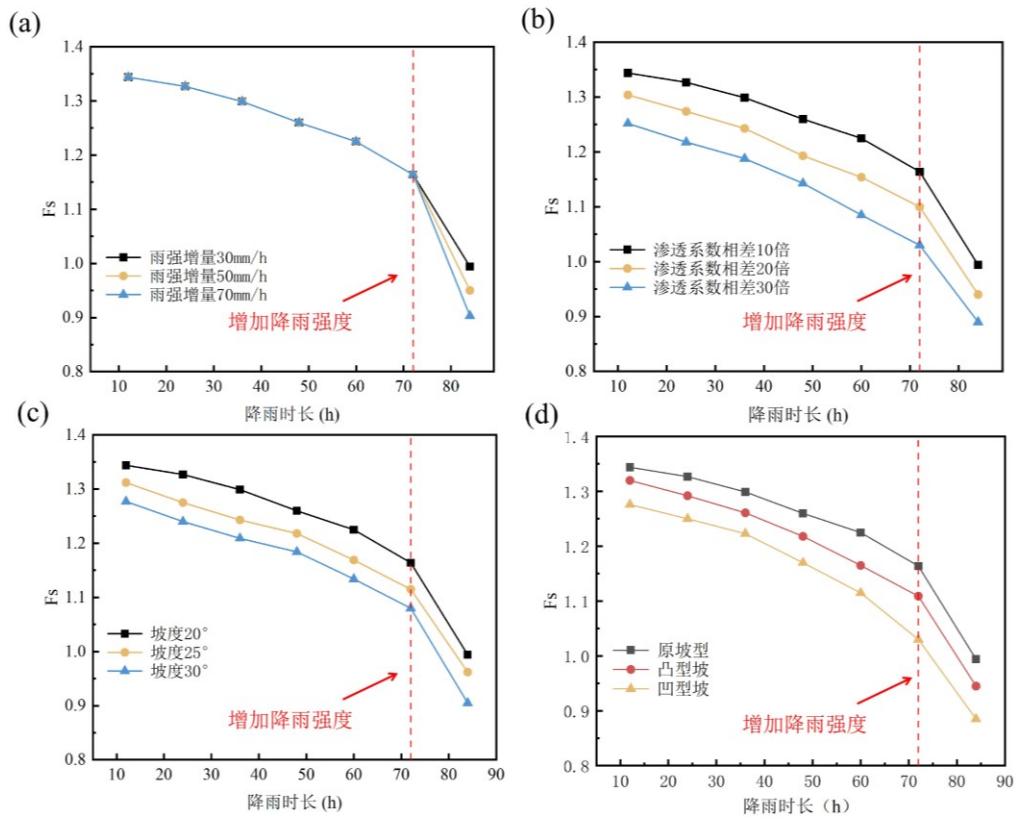


图9 降雨过程边坡各工况稳定性系数变化情况 (a)不同降雨增量 (b)不同渗透差异 (c)不同坡度 (d)不同坡型

Fig.9 Variation of slope stability coefficients under different working conditions during rainfall process

4 结论

(1) 基于广东省韶关市江湾镇群发性花岗岩残坡积土滑坡的现场调查，滑坡区域土质为残积砾质黏性土，滑坡表层土浅表植物根系发育茂盛，为雨水提供了更多的下渗通道，而下方为不同风化程度的花岗岩，质地相较于上方残坡积土坚硬，且未见明显植物根系分布，多数滑坡呈浅层特征，其滑动面深度均未超出表层残坡积土厚度范围。

(2) 花岗岩残坡积土边坡特有的植被-风化土层耦合结构为群发性滑坡灾害的形成提供了关键条件。通过根系分布调查与不同岩土层的野外双环渗透试验对比试验，揭示植被根系在表层 0-0.5m 形成须根网络，使该层渗透系数（平均 0.03 cm/s）较无根层提升约 5-10 倍，而根系下界恰与渗透性突变界面及滑坡滑动面深度高度吻合。这种

根系调控的垂向渗透分异形成水力屏障，水分在根系层底部快速积聚并产生超静孔隙水压力，有效应力骤降，从而触发群发性的浅层滑坡。本研究从植被根系水力调控视角揭示了残坡积土滑坡群发的新机制，为生态修复与滑坡防控协同提供了理论依据。

(3) 随着降雨强度增量与坡度的增大，边坡稳定性呈现显著下降趋势。同时，上下岩土层渗透系数差异越大，对雨水的下渗阻碍就越明显，进而当降雨强度突增时坡体安全系数衰减更为迅速。降雨强度从 30 mm/h 增至 70 mm/h 的过程中，安全系数进一步下降 10% - 14%。另外，凹型坡由于其特有的汇水作用，有利于雨水汇集并持续入渗，从而导致土体强度不断弱化。因此，在相同降雨条件下，凹型坡的安全系数较直线型坡低 8% - 12%，较凸型坡低 5% - 8%，反映出凹型坡的汇水效应对土体强度的持

续弱化作用。

(4) 尽管各组花岗岩残坡积土边坡数值模型的参数组合存在差异,但其孔压变化情况在整体降雨过程中表现为初始快速累积阶段、中期缓速累积阶段、雨强突增期上升阶段的三阶段,当降雨强度突增时,岩土体分界面上部土体的孔隙水压力持续累积,进而导致分界面上部土体有效应力减小,引起坡体稳定系数显著下降,最终导致本次群发型滑坡的发生。

References

- Fang, Z . C . , Wang, Y . , Peng, L . , et al . , 2021. A Comparative Study of Heterogeneous Ensemble-Learning Techniques for Landslide Susceptibility Mapping. *International Journal of Geographical Information Science*, 35(2): 321-347. <https://doi.org/10.1080/13658816.2020.1808897>
- Zhu, Y . C . , Chen, H . , Sun, D . L . , et al . , 2025. A Heterogeneous Ensemble Landslide Susceptibility Assessment Method Based on InSAR and Geographic Similarity Extended Landslide Inventory. *Gondwana Research*, 144: 181-196. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2025.04.010>
- Xie, J . R . , Chen, J . X . , Withanage, K . R . , et al . , 2024. Failure Behaviors of Rainfall-Induced Shallow Landslides: Insights from a Novel Large Angle-Adjustable Plane Shear Apparatus. *Landslides*, 21(9): 2261-2272. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02271-3>
- Zou, F . C . , Leng, Y . Y . , Tao, X . L . , et al . , 2022. Landslide Risk Identification Based on Slope Unit: A Case Study of the Shallow Soil Slope in Wanshan, Guizhou. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(3): 114-122 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.03-13>
- Xu, W . Z . , Feng, W . K . , Yi, X . Y . , et al . , 2025. Catastrophic Landslide in Yibin City, Sichuan Province, China: 10 Fatalities, 19 Missing, and 2 Injured on February 8, 2025. *Landslides*, 22(9): 3149-3159. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02574-z>
- Liu, Z . Q . , Wu, Q . , Wang, L . Q . , et al . , 2026. A Review of the Multi-Scale Initiation Mechanisms of Southeast Rainfall-Induced Cluster Landslides under the Coupled Effects of Multiple Factors. *Journal of Earth Science*, 70: 1-24. <https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.266>
- Li, B . , Zhao, C . Y . , Li, J . , et al . , 2023. Mechanism of Mining-Induced Landslides in the Karst Mountains of Southwestern China: A Case Study of the Baiyan Landslide in Guizhou. *Landslides*, 20: 1481-1495. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02047-1>
- Xu, Q . , Xu, F . S . , Pu, C . H . , et al . , 2024. Preliminary Analysis of Extreme Rainfall-Induced Landslides in Jiangwan Town, Shaoguan, Guangdong Province, April 2024. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(8): 1264-1274 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240202>
- Chen, B . , Zhang, C . C . , L, Z . H . , et al . , 2024. Development Characteristics and Controlling Factors of Landslides Triggered by the "6-16" Extreme Rainstorm in Longyan City, Fujian Province, 2024. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 49(11): 2145-2155 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13203/j.whugis20240336>
- Kong, Y . X . , Chen, Q . M . , Chen, J . H . , et al . , 2025. Development Characteristics and Risk Management of Clustered Geological Disasters Triggered by Typhoon Gaemi in Zixing, Hunan Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 36(2): 50-55 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.12474/dzhh.20250219>
- Feng, W . K . , Jia, B . Z . , Wu, Y . Y . , et al . , 2022. Characteristics and Disaster-Causing Mechanisms of Typical Landslide-Debris Flow Chain Disasters in Low Mountainous and Hilly Areas. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(1): 35-44 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-05>
- Chen, W . H . , Yu, B . , Ye, P . , et al . , 2024. Prediction of Gully-Type Debris Flow Disasters Triggered by Shallow Landslides in Fujian Province. *Journal of Natural Disasters*, 33(5): 12-22 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13577/j.jnd.2024.0502>
- Tang, H . M . , Li, C . D . , Gong, W . P . , et al . , 2022. Basic Attributes and Research Ap

- proaches of Landslide Evolution. *Earth Science*, 47(12): 4596-4608 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.4611>
- Song, K . , Chen, L . Y . , Liu, Y . L . , et al . , 2022. Dynamic Mechanism of Rainfall-Induced Reactivation and Deformation of Deep-Seated Ancient Landslides. *Earth Science*, 47(10): 3665-3676 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.184>
- Hu, Y . X . , Xu, Z . J . , Yan, W . , et al . , 2023. Interval Prediction of Soil Landslide Surface Deformation Based on Bootstrap and GA-Elman. *Journal of Railway Science and Engineering*, 20(5): 1718-1728 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222329>
- Zhang, W . K . , Niu, J . L . , Xin, J . Q . , et al . , 2026. Numerical Simulation of the Instability Mechanism of Accumulated Layer Landslides Considering the Influence of Base Topography. *Journal of Earth Science*, 51: 1-13 (in Chinese with English abstract).<https://link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20251216.1714.002>
- Huang, H . F . , 2008. Characteristics of Granite Residual Soil and Slope Stability Analysis in the Coastal Area of Quanzhou, Fujian Province. *Science and Technology of West China*, 7(33): 7-8 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, W . H . , 1994. Study on Shear Strength of Granite Residual Soil and Stability Analysis of Soil Slopes. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 21(3): 41-43 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, X . X . , 2014. Simulation Tests of Rainfall-Induced Landslides in Granite Residual Soil of Xiamen Area and Mesoscopic Evolution Law of Soil Failure[D]. Xiamen University, Xiamen (in Chinese with English abstract).
- Fang, X . J . , Wang, H . , Gong, K . Z . , et al . , 2012. Stability Analysis of Cutting Slopes in Granite-Like Soil under Seepage Effect. *Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition)*, 40(4): 515-520 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/CNKI:SUN:FZDZ.0.2012-04-019>
- Bai, H . L . , Feng, W . K . , Yi, X . Y . , et al . , 2021. Group-Occurring Landslides and Debris Flows Caused by the Continuous Heavy Rainfall in June 2019 in Mibei Village, Longchuan County, Guangdong Province, China. *Natural Hazards*, 108(3): 3181-3201.<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-161293/v1>
- Zhao, J . J . , Lai, Q . Y . , Ma, Y . F . , et al . , 2025. Sensitivity Analysis of Disaster-Causing Conditions for Grouped Rainfall-Induced Landslides in Granite Areas: A Case Study of Beiliu City in Southeastern Guangxi. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(2): 63-71 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412032>
- Huang, R . J . , Feng, W . K . , Li, S . Q . , et al . , 2025. Empirical Prediction Model for Runout Distance of Grouped Rainfall-Induced Shallow Soil Landslides. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2025(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.19509/j.cnki.dzkq.tb20240364>
- Feng, W . K . , Zhao, J . C . , Yi, X . Y . , et al . , 2025. Characteristics and Driving Factors of Grouped Landslides Induced by the "6·16" Heavy Rainfall in the Min-Yue-Gan Border Region. *Journal of Earth Science*, 2025(1): 1-16(in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.087>
- Li, C . L . , Wang, Z . X . , Lü, Q . T . , et al . , 2021. Mesozoic Tectonic Evolution of the Eastern South China Block: A Review on the Synthesis of the Regional Deformation and Magmatism. *Ore Geology Reviews*, 131: 1040-1048.<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104028>
- Shu, L . S . , Yao, J . L . , Wang, B . , et al . , 2021. Neoproterozoic Plate Tectonic Process and Phanerozoic Geodynamic Evolution of the South China Block. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103596>
- Zhou, J . Q . , Chen, S . F . , 2021. Analysis on Characteristics of Rainstorm in South China during the Previous Flood Season from 1951 to 2018: Taking Shaoguan City as an Example. *Research of Soil and Water Conservation*, 28(3): 163-169 (in Chinese with English abstract).<https://doi.org/10.13869/j.cnki.rswc.2021.03.019>

Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China, 2019. Standard for Soil Test Methods: GB/T 50123-2019[S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China (in Chinese).

中文参考文献

- 邹凤钗, 冷洋洋, 陶一郎, 等, 2022.基于斜坡单元的滑坡风险识别——以贵州万山浅层土质斜坡为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 3 (3): 114-122. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-035.2022.03-13
- 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 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 49 (8): 1264-1274. DOI: 10.13203/j.whugis20240202
- 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 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 49 (11): 2145-2155. DOI: 10.13203/j.whugis20240336
- 孔雅茜, 陈全明, 陈建华, 2025.湖南资兴“格美”台风群发性地质灾害发育特征及风险管控 [J]. 地质灾害与环境保护, 36 (2): 50-55. DOI: 10.12474/dzhh.20250219
- 刘智琪, 吴琼, 王亮清, 等, 2025.多因素耦合作用下东南降雨型群发滑坡多尺度孕育机制研究综述 [J]. 地球科学, 70: 1-24. DOI: 10.3799/dqkx.2025.266
- 冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 等, 2022.低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 33 (1): 35-44. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2022.01-05
- 陈文鸿, 余斌, 叶鹏, 等, 2024.福建区域浅层滑坡诱发沟谷型泥石流灾害预测 [J]. 自然灾害学报, 33 (5): 12-22. DOI: 10.13577/j.jnd.2024.0502
- 唐辉明, 李长冬, 龚文平, 等, 2022.滑坡演化的基本属性与研究途径 [J]. 地球科学, 47 (12): 4596-4608. DOI: 10.3799/dqkx.2022.461
- 宋琨, 陈伦怡, 刘艺梁, 等, 2022.降雨诱发深层老滑坡复活变形的动态作用机制 [J]. 地球科学, 47 (10): 3665-3676. DOI: 10.3799/dqkx.2022.184
- 胡迎新, 徐占军, 严伟, 等, 2023.基于 Bootstrap 和 GA-Elman 的土质滑坡坡表变形区间预测 [J]. 铁道科学与工程学报, 20 (5): 1718-1728. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20222329
- 章伟凯, 牛佳伦, 幸金权, 等, 2026.考虑基覆面形态影响的堆积层滑坡失稳机制数值模拟 [J]. 地球科学, 51: 1-13. DOI: <https://link.cnki.net/urlid/42.1874.p.20251216.1714.002>
- 黄汉芳, 2008.福建泉州沿海地区花岗岩残坡积土特性及边坡稳定性分析 [J]. 中国西部科技, 7 (33): 7-8.
- 张文华, 1994.花岗岩残坡积土的抗剪强度及土质边坡稳定分析 [J]. 水文地质工程地质, 21 (3): 41-43.
- 郑晓翔, 2014.厦门地区花岗岩残坡积土降雨滑坡模拟试验及土体破坏细观演变规律研究 [D](硕士学位论文). 厦门: 厦门大学, 17-24.
- 方雪晶, 王浩, 龚匡周, 等, 2012.渗流作用下花岗岩类土质路堑边坡稳定性分析 [J]. 福州大学学报 (自然科学版), 40 (4): 515-520. DOI: CNKI:SUN:FZDZ.0.2012-04-019
- 赵建军, 赖琪毅, 马彦飞, 等, 2025.花岗岩地区群发性降雨滑坡孕灾条件敏感性研究——以桂东南北流市为例 [J]. 中国地质灾害与防治学报, 36 (2): 63-71. DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412032
- 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 [J]. 地质科技通报, (1): 1-13. DOI: 10.19509/j.cnki.dzkt.tb20240364
- 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 [J]. 地球科学, 69(1): 1-16. DOI: 10.3799/dqkx.2025.087
- 周嘉琦, 陈世发, 2021.1951—2018年华南前汛期暴雨特征分析——以韶关市为例 [J]. 水土保持研究, 28 (3): 163-169. DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.03.019
- 中华人民共和国住房和城乡建设部. 土工试验方法标准: GB/T 50123-2019 [S]. 北京: 中华人民共和国住房和城乡建设部, 2019.