

花岗岩地区群发性降雨滑坡孕灾条件敏感性研究

赵建军, 赖琪毅, 马彦飞, 何娜, 刘朔维, 陈海伊, 常鸣, 吴福, 刘振宇

Study on the sensitivity of disaster-breeding conditions for rainfall-induced cluster landslides in granite areas: Case study of Beiliu City in southeast Guangxi

ZHAO Jianjun, LAI Qiyi, MA Yanfei, HE Na, LIU Shuowei, CHEN Haiyi, CHANG Ming, WU Fu, and LIU Zhenyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412032>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于模拟试验的强降雨条件下花岗岩残积土斜坡滑塌破坏机理分析

Experimental study on slope collapse characteristics of granite residual soil slope under heavy rainfall

胡华, 吴轩, 张越 中国地质灾害与防治学报. 2021, 32(5): 92-97

基于滑坡破坏模式分析的易发性评价

Evaluation of landslide susceptibility based on landslide failure mode analysis: A case study of the left bank of Xietan River in the first section of Three Gorges Reservoir

朱宇航, 黄海峰, 殷坤龙, 郭子正, 郭飞, 赖鹏 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(2): 156-166

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

西藏地区崩塌滑坡影响因子敏感性分析

Susceptibility analysis on influencing factors of rockfalls and landslides in Tibet

吴森, 张文, 刘民生 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 109-117

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

开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析

Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province

蒋涛, 崔圣华, 冉耀 中国地质灾害与防治学报. 2023, 34(3): 20-30



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.202412032

赵建军, 赖琪毅, 马彦飞, 等. 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, 2025, 36(2): 63-71.

ZHAO Jianjun, LAI Qiyi, MA Yanfei, et al. Study on the sensitivity of disaster-breeding conditions for rainfall-induced cluster landslides in granite areas: Case study of Beiliu City in southeast Guangxi[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 63-71.

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

赵建军¹, 赖琪毅¹, 马彦飞¹, 何 娜^{1,2}, 刘朔维¹, 陈海伊¹, 常 鸣¹, 吴 福², 刘振宇²

(1. 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室(成都理工大学), 四川 成都 610059; 2. 广西壮族自治区地质环境监测站, 广西南宁 530000)

摘要:近年来, 极端强降雨在我国南方全强风化花岗岩地区诱发了多起群发性滑坡事件, 造成了严重的损失。由于区域性的极端气候、厚层风化花岗岩与不规范切坡等因素, 群发滑坡频频发生。但滑坡发育特征及孕灾条件尚不明确, 给地质灾害监测和防治带来挑战。文章以广西北流市花岗岩地区为研究区, 采用现场调查、遥感解译与 XG-boost 模型, 探讨了降雨型群发滑坡的发育特征、时空分布规律、破坏模式和孕灾条件敏感性。结果表明, 区内两起暴雨事件共引发滑坡 1 670 处, 以中小规模为主, 占总数量的 72.57%。群发滑坡集中发育于高程<300 m、坡度>75°的切坡地形下, 表现出分布范围广、规模小、数量多、即雨即滑、爆发性强的特点, 主要形成剪切滑移型、滑塌型及流滑型(碎屑流)三类破坏模式。距居民点距离(概率贡献为 22.22%)、坡度(15.25%)、高程(14.47%)及植被覆盖率(12.01%)是诱发花岗岩地区降雨型群发滑坡的主要孕灾条件。本研究可为花岗岩地区降雨型群发滑坡的研究提供依据, 在防控减灾方面具有重要意义。

关键词:花岗岩地区; 极端降雨; 群发性滑坡; 破坏模式; 孕灾条件

中图分类号: P642.22

文献标志码: A

文章编号: 1003-8035(2025)02-0063-09

Study on the sensitivity of disaster-breeding conditions for rainfall-induced cluster landslides in granite areas: Case study of Beiliu City in southeast Guangxi

ZHAO Jianjun¹, LAI Qiyi¹, MA Yanfei¹, HE Na^{1,2}, LIU Shuowei¹, CHEN Haiyi¹,
CHANG Ming¹, WU Fu², LIU Zhenyu²

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection (Chengdu University of Technology),
Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Geological Environment Monitoring Station in Guangxi Zhuang Autonomous Region,
Nanning, Guangxi 530000, China)

Abstract: In recent years, extreme heavy rainfall has triggered numerous cluster landslide events in the fully weathered granite areas of southern China, causing severe losses. Factors such as regional extreme weather, thick weathered granite layers, and

收稿日期: 2024-12-20; 修订日期: 2025-03-08

投稿网址: <https://www.zgdzhyfzxb.com/>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFC3012605); 桂自然资函[2024]1785 号项目(GXZC2024-G3-002922-GXCJ)

第一作者: 赵建军(1980—), 男, 山东临朐人, 教授, 博导, 主要从事高边坡与采动滑坡等地质灾害方面的研究。

E-mail: jjzhao@cdut.edu.cn

通讯作者: 赖琪毅(1995—), 男, 四川仁寿人, 博士, 特聘副研究员, 主要从事地质灾害成因机理与滑坡运动方面的研究工作。

E-mail: laiqiy@cdut.edu.cn

non-standard slope cutting practices have led to frequent occurrences of cluster landslides. However, the developmental characteristics and conditions conducive to these landslides are not well-understood, posing challenges to geological disaster monitoring and prevention. This paper focuses on the granite area of Beiliu City in Guangxi as the study area. The study discusses the developmental characteristics, spatiotemporal distribution patterns, failure modes, and sensitivity of disaster-breeding conditions of rainfall-induced cluster landslides through an integrated approach combining field investigations, remote sensing interpretation, and XG-boost modeling. The results show that two rainstorm events in the area triggered 1,670 landslides, mainly of small to medium scale, accounting for 72.57% of the total occurrences. The cluster landslides primarily developed in cut slopes with elevations less than 300 meters and slope angles greater than 75° , exhibiting characteristics of wide spatial distribution, small individual scale, high frequency, immediate response to rainfall, and strong explosiveness. Three main types of failure modes were identified: shear-sliding, toppling-sliding, and flow-sliding (debris flow). The primary disaster-breeding conditions were identified as distance to residential areas (proportion contribution of 22.22%), slope (15.25%), elevation (14.47%), and normalized difference vegetation index (12.01%) in the granite areas. This study provides a basis for the research of rainfall-induced cluster landslides in granite areas and is of great significance in disaster prevention and mitigation.

Keywords: granite area; extreme rainfall; cluster landslides; failure modes; disaster-pregnant conditions

0 引言

近年来,我国南部地区普遍受到暴雨侵袭,在多地触发大量滑坡等地质灾害,如 2024 年 4 月广东韶关极端暴雨滑坡^[1]、2024 年 6 月福建龙岩特大暴雨滑坡^[2]、2022 年 6 月和 2023 年 6 月广西玉林暴雨群发滑坡^[3]、2018 年 9 月云南猛洞群发滑坡^[4]等。此类大范围极端降雨事件下诱发的大量滑坡灾害不仅造成了重大人员伤亡和上亿的财产损失,还引起了社会的广泛关注,在国际领域也有表现^[5-6]。

广西(桂)东南是群发性滑坡的集中分布区,也是花岗岩地层的集中分布区,由于充沛的降雨和温润的气候环境,使得区域内花岗岩风化程度较高,发育较厚的残坡积土层与全风化土层^[7]。花岗岩坡积土易遇水软化,力学性质大幅度降低^[8],在北流市等地区表现最为显著^[9]。以往研究发现,此类花岗岩地区崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害一般没有缓慢滑动的过程,边坡从失稳至结束(暂时稳定)的过程多是在很短时间内完成^[10],导致地灾监测困难、灾害逃生时间短。常规花岗岩地区降雨型滑坡研究方法,多以传统的现场调查与试验方法进行^[11]。如白慧林^[9]从花岗岩斜坡的细观结构、力学强度、渗流场规律入手,揭示滑坡启动机理与预警模型。

在针对滑坡进行孕灾条件敏感性分析和易发性研究时,多以探究滑坡与地质条件、花岗岩及降雨之间的分布关系^[12-13]。尽管准确性高,但耗时耗力,投入成本较高,难以快速生成大规模滑坡数据库^[14]。随着机器学习及 AI 的快速发展,该技术被积极应用于群发滑坡的孕灾条件敏感性分析^[15]。如李立丰^[16]通过 I-D 降雨阈

值模型探究了广西不同类型滑坡与孕灾条件,得到了对应的降雨阈值曲线;梁柱^[17]应用多种监督与无监督学习算法探索了西藏滑坡频发区的孕灾条件及高预测模型;陈贺等^[18]探讨了云南贡山群发滑坡地质特征、降雨阈值,建立了基于贝叶斯推断法和核密度估计法的滑坡降雨阈值和累计概率预警曲线;刘帅等^[19]以西秦岭极端降雨事件为例,优化随机森林模型进行降雨群发滑坡孕灾条件分析与易发性评价,通过超参数优化提升模型效率及效果。

随着桂东南花岗岩地区地质灾害数量的逐年递增,以及群发性滑坡造成危害的成倍增长,现有研究尚未重点考虑花岗岩地区降雨型群发滑坡所表现出的特有地质条件规律及其与极端暴雨之间的快速反应关系。极端暴雨、花岗岩地区孕灾地质环境与群发性滑坡的时空分布、孕灾条件及其敏感性尚不明确。为深入了解花岗岩地区降雨型群发性滑坡的形成条件及发育特征,同时及时为当地地质灾害的风险评价与防灾减灾工作提供支撑,本文开展桂东南北流市花岗岩地区降雨型群发性滑坡的孕灾规律研究。

1 研究区概况

1.1 地质背景

研究区地处桂东南北流市新丰镇、平政镇等位置,范围约 270 km^2 (图 1),由构造侵蚀低山-丘陵向侵蚀剥蚀丘陵盆地型地貌过渡,高程 $121\sim 1\,270\text{ m}$,研究区整体北东高、中部低。研究区构造以 NE 向展布的华夏-新华夏构造体系为主干骨架,次级构造有纬向构造体系、NW 向构造等,断层活动不明显。

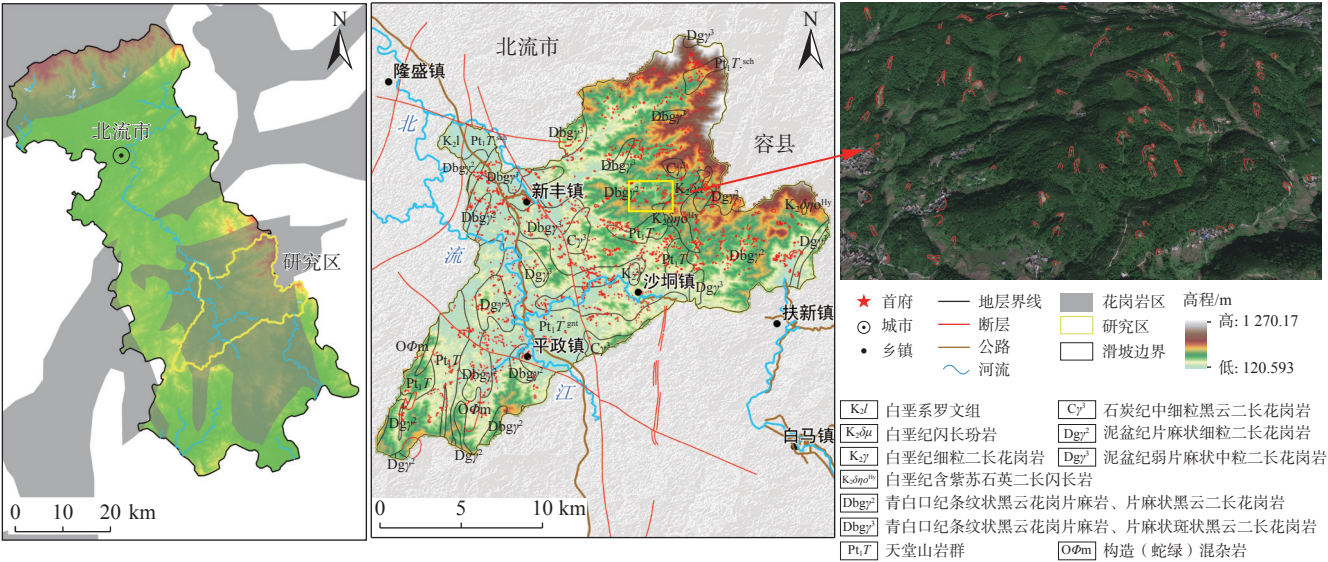


图1 研究区位置
Fig. 1 Location of the study area

研究区属于北流市花岗岩分布最为集中,花岗岩降雨滑坡最为典型的区域,广泛分布着不同时期、不同类型的花岗岩地层,在山体斜坡地带呈片状分布,上覆松散第四系土体。花岗岩岩性主要片麻状花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩等,岩体为块状结构,性脆,裂隙发育。岩层表面受风化强烈,有大量较大厚度的全、强风化残坡积层,平均厚度>30 m,受侵蚀、剥蚀、切割作用强烈。

区域内斜坡典型结构如图2所示,下伏强风化花岗岩基岩,岩性较硬,结构面展布清晰,上覆花岗岩残积层,结构相对松散。残积层中花岗岩矿物颗粒分明,抗水性弱,透水性好。部分花岗岩矿物高岭土化,石英颗粒粒径和矿物成分存在差异,主要呈现出两类:粗颗粒褐黄色花岗岩及细颗粒褐红色花岗岩(图2),两类花岗岩地层中群发滑坡均有发生。

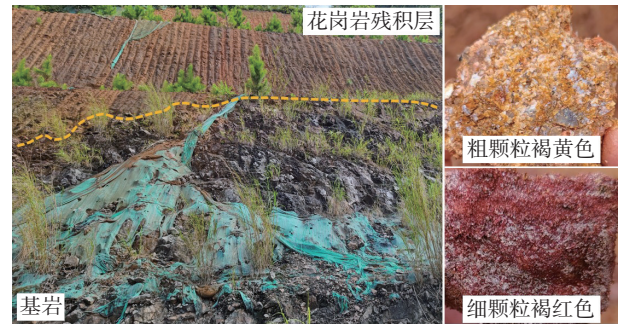


图2 研究区斜坡结构及风化花岗岩照片
Fig. 2 Photos of slope structure and weathered granite within the study area

1.2 极端降雨事件

区域属亚热带季风气候,多年平均降雨量在1 300~

2 800 mm,降雨多集中在5—9月份,且多为暴雨,降雨量≥100 mm的大暴雨天数多年平均为0.5~1.1 d,最多2~3 d,最大日降雨量可达334.5 mm(图3)。近年来,研究区内记录到两起主要的降雨型群发滑坡灾害,即2022年的“6•9”群发滑坡和2023年的“6•25”群发滑坡。据资料记录,两起群发滑坡的降雨量属于特大暴雨级别,时序降雨规律相似。2022年6月8日4时至9日4时的降雨总量达273.4 mm;2023年6月25日8时至26日8时的降雨总量达380.7 mm,雨水下渗强烈^[12]。在短时极端降雨条件下,群发滑坡迅速发生,即雨即滑。

2 群发性滑坡

2.1 滑坡发育特征

受地形地质条件复杂、地质构造发育、降水时空分布不均匀等自然条件影响,加上人类工程活动对地质环境破坏,研究区群发性滑坡显著。

通过遥感解译与现场调查,在约270 km²的研究区内共发育有1 670个滑坡,广泛分布于区域内的人类活动区域(图1右)。其中“6•9”群发滑坡总引发1 000多处滑坡灾害,“6•25”群发滑坡总引发500多处滑坡灾害。结合30 m分辨率的DEM数据,对滑坡尺寸规模、堆积形态等特征、人类工程活动等进行统计,总结群发滑坡的发育特征。

研究区群发滑坡的平面形态有舌形、半圆形、矩形、不规则形,剖面形态有直线形、凹形、阶梯形、凸形、复合形。滑坡高差普遍在5~15 m不等,滑坡厚度普遍为3~10 m。滑坡体堆积物的形态主要有扇形、锥

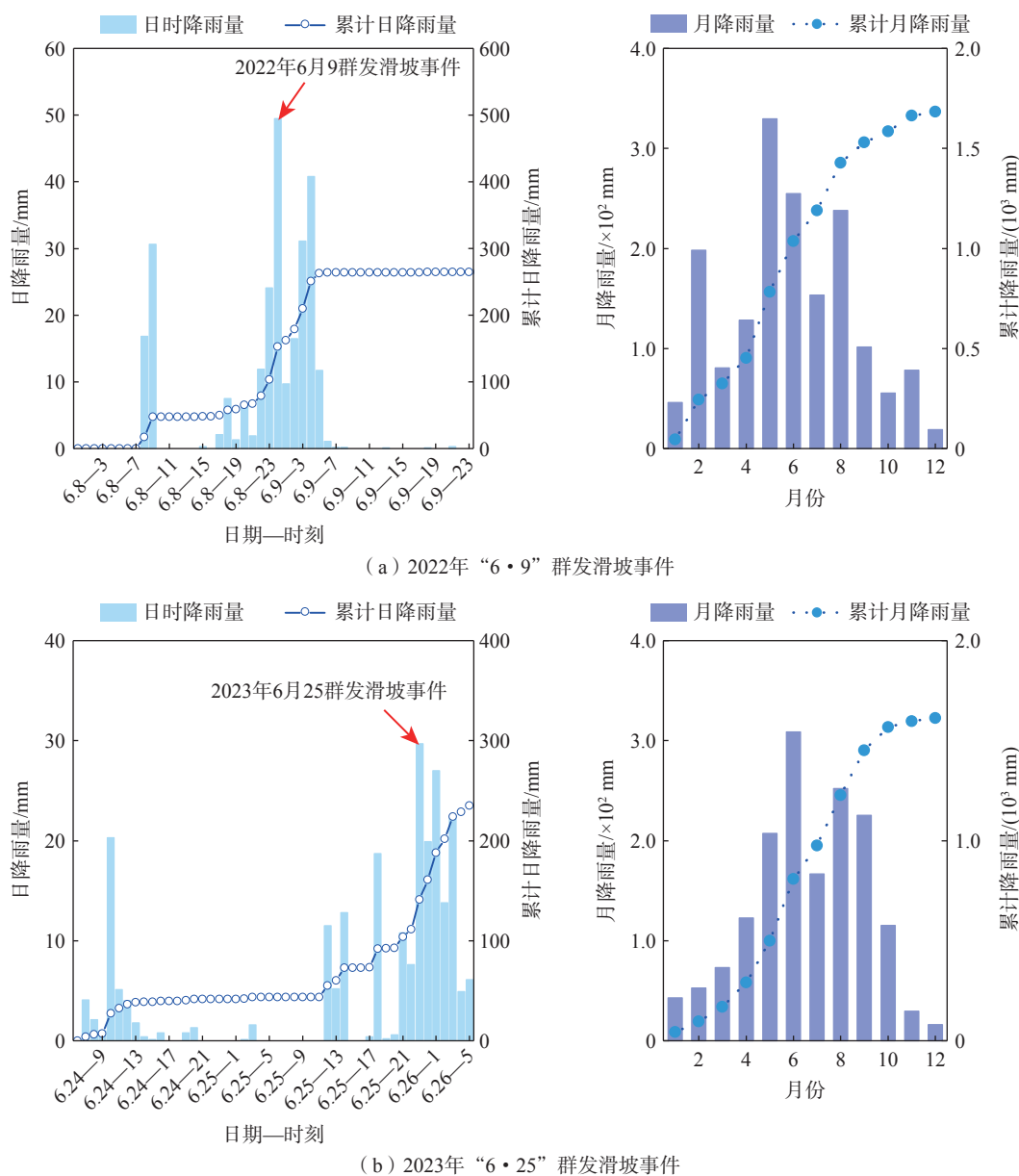


图3 研究区两起降雨事件数据

Fig. 3 Rainfall data for two events in the study area

形,因滑坡多发生在村民房屋后及公路沿线边坡,多数滑坡体堆积物已被人工清除。群发滑坡所处的微地貌主要为山坡坡脚,山体的凹陷处,人工、机械削坡形成的陡坡或陡坎,冲沟发源地带、平台、山顶等。坡表存在周界剪、拉裂缝、地面沉陷、树木斜歪或倾倒等。

根据统计,滑坡总面积约为 4.86 km^2 ,占研究区的 1.80% 。滑坡面积主要为 $500 \sim 4000 \text{ m}^2$,约占滑坡总数的 72.57% 。其中,面积小于 500 m^2 的滑坡共发育 147 个,占滑坡总数的 8.80% ;超过 10000 m^2 的滑坡数量为 75 个,占滑坡总数的 4.49% ;滑坡的平均面积为 2908.78 m^2 ,最大滑坡面积为 68903.20 m^2 。此类滑坡

普遍为浅层崩滑,以小-中型规模为最,在失稳前坡表通常有一定植被覆盖,失稳后滑体解体明显,爆发性强,冲击坡脚的物体,部分地区的群发滑坡已经给当地人民的生命财产、交通水利、旅游设施和植被景观等造成了损失(图4)。

2.2 滑坡时空分布规律

基于研究区降雨型群发滑坡统计数据,群发滑坡多发生在每年的夏季(6月),其高发期与当地的雨季十分吻合。滑坡发生时间与降雨密切相关,受集中性的极端暴雨强烈控制,时间分布上具有季节性和群发性^[20-22],且表现出即雨即滑的特点。

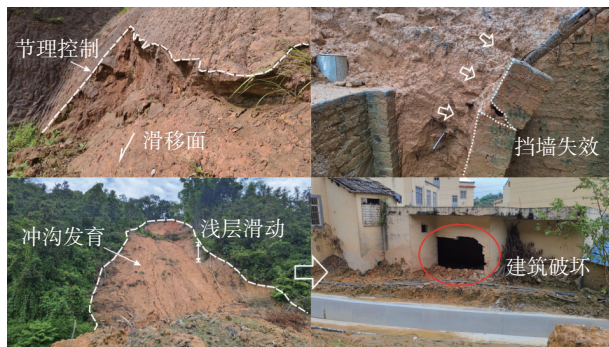


图 4 滑坡发育特征

Fig. 4 Characteristics of landslide development

滑坡发生的位置主要集中于村落房前屋后或道路两侧区域,属于侵蚀剥蚀低山丘陵地貌区,滑坡分布高程主要在<300 m 地段,主要分布坡度在>75°区间(图 5)。分析认为,这与村落建筑、交通、水利等建筑设施的空间分布有关,集中于低山丘陵地区。同时,滑坡受到切坡建房的强烈控制作用,当地居民在设计建房时普遍将屋后斜坡切削至 60°~70°,甚至超过 75°,以留出足够的修建空间,在降雨条件下,缓坡地形的滑坡形成数量与常规研究相似^[23-25],而当地形坡度在 75°左右时,群发滑坡的数量突增,这与切坡后的地形坡度高度吻合^[26]。

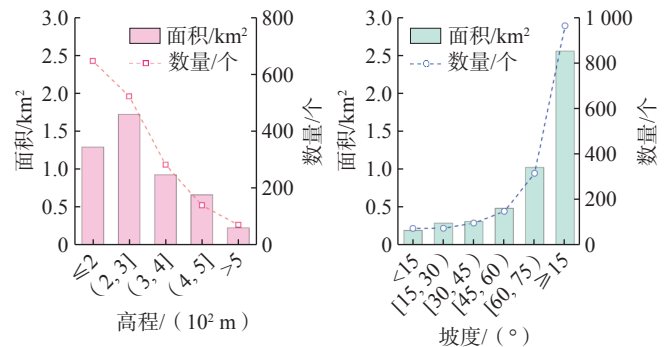


图 5 滑坡与地形因子的关系

Fig. 5 Relationship between cluster landslides and geomorphologic factors

2.3 滑坡破坏模式

区内滑坡的控滑结构面类型主要有松散层与基岩接触面、风化裂隙面、重力卸荷裂隙面。由于区内花岗岩残积土土体结构松散,孔隙度大,渗水能力强,土体与下伏基岩面存在一个软硬分界面。另外,受控于地形及土体本身的结构和人类工程活动,岩土体在自身重力作用下剪切而成的控滑结构面,主要出现在农村民房后边坡。按照群发滑坡的变形破坏及运动特征,主要可以划分为三类破坏模式:剪切滑移型、滑塌型、流滑型(碎屑流),如图 6 所示。

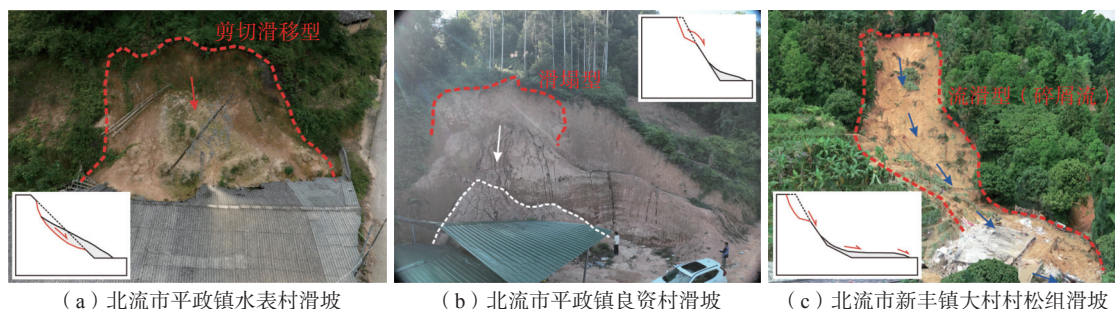


图 6 典型降雨型群发滑坡及破坏模式

Fig. 6 Typical rainfall-induced cluster landslides and their damage patterns

(1)剪切滑移型:此类破坏模式的群发滑坡主要是在降雨的渗透和浸润作用下,岩土体的含水量增加并受水软化,裂隙产生超孔隙水压力,坡体在重力作用下沿着花岗岩残积层内部软弱处的或基覆界面形成剪切贯通面,向临空面滑移。

(2)滑塌型:在降雨及重力作用下,陡峭斜坡上部岩土体结构面逐渐扩展,形成后缘拉裂缝,与花岗岩体软弱结构面相互连通,发生拉裂-滑移(倾倒)破坏,最终崩落至坡脚。

(3)流滑型(碎屑流):此类滑坡破坏模式通常具有较好的运动空间。当上部滑体失稳后,力学性质较低的

花岗岩体在下滑过程中发生破碎解体铲刮等现象,岩体孔隙水压力增大,促进滑体的长距离的流态化运动,形成碎屑流。

3 孕灾条件敏感性研究方法

本文的孕灾条件敏感性分析思路如图 7。以前人在该地域内对降雨型滑坡研究的数据结果为基础^[3,7-9,13],通过遥感解译与现场调查构建降雨型群发滑坡数据库,数据库以地质调查卡片为主,然后根据群发滑坡的发育特征,统计分析该区降雨型群发滑坡的时空分布规律。选取机器学习方法中的 XG-boost 模型对筛选出的滑坡

影响因子进行相关性分析^[21], 并使用 SHAP 方法对花岗岩地区降雨型群发滑坡的影响因子进行权重排序, 从而

对花岗岩地区降雨型群发滑坡的孕灾条件敏感性进行探讨分析。

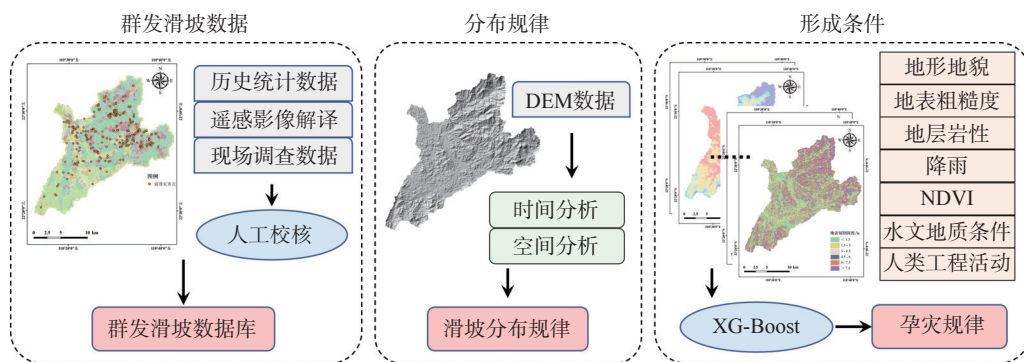


图 7 整体流程图

Fig. 7 Overall workflow diagram

3.1 遥感解译与现场调查

光学遥感数据源于陆地探测一号卫星影像, 空间分辨率 3 m, 满足研究区地质灾害的遥感解译工作。本文选取的影像图拍摄时间为 2022 年 7 月—2023 年 7 月, 多期影像对比解译。

考虑到研究区频繁降雨天气, 遥感影像存在多云雾遮挡等情况, 同时对主要受灾区和人类活动区开展现场调查测量工作, 对每个群发滑坡单体的工程地质条件进行描述, 并对应记录相关地灾卡片, 结合多年降雨条件下研究区滑坡的统计数据, 用于校核群发滑坡的识别结果。

3.2 孕灾条件敏感性分析

XG-Boost 是一种有监督的集成学习算法, 它在梯度提升算法的基础上进行了一系列的改进和优化^[20]。XG-Boost 算法的核心思想是通过不断地拟合残差, 构建一系列弱学习器, 并将它们组合起来形成一个强学习器。与传统的梯度提升算法相比, XG-Boost 具有一些显著的优势, 因为它引入了二阶导数信息, 支持多种目标函数和评估指标, 能够处理回归、分类、排序等问题, 其高效的并行计算能力使得在大规模数据集上的训练速度更快^[21]。

以斜坡单元为最小分析单元, 选取归一化植被指数 (NDVI)、地表粗糙度、地表切割深度、地形地貌、地形湿度指数、高程 (绝对高程, 后续表述相同)、径流强度指数、距道路距离、距居民点距离、距河流距离、坡度、坡向、曲率、人类工程活动强度、土壤侵蚀强度等 16 个因子, 基于滑坡数据库, 运用 XG-boost 模型对研究区群发性滑坡影响因子进行敏感性评价的对比及分析 (图 8)。

其中对于花岗岩风化层厚度指标, 由于研究区花岗岩风化层厚度为 5~15 m, 而区内普遍发生的降雨型滑

坡厚度在 3~10 m, 均处于浅表层的风化花岗岩层内, 在针对研究区的地层岩性敏感性分析中, 花岗岩地层的敏感性总是最大值, 发生的群发滑坡也未分布于其他地层岩性内, 因此此次模型分析不再考虑花岗岩地层的影响。另外, 由于研究区内构造活动不明显, 地震对斜坡岩土体的控制作用不明显, 文中不考虑断层及地震动峰值加速度对降雨型群发滑坡的影响。

模型训练完成后, 使用 SHAP 对用于训练的特征因子进行分析, 以量化各特征因子对滑坡形成的控制作用^[1]。SHAP 贡献度排序的定义公式为:

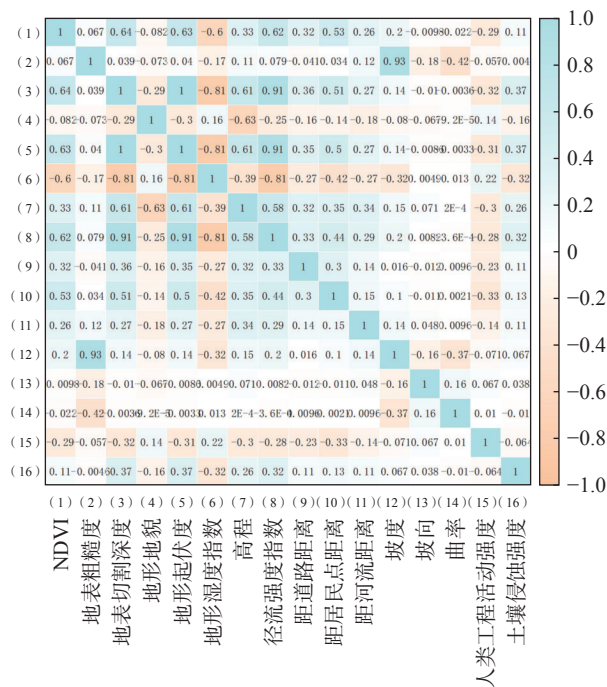


图 8 Pearson 相关系数

Fig. 8 Pearson correlation coefficients

$$g(z') = \phi_0 + \sum_{i=1}^k \phi_i \quad (1)$$

式中: g ——解释模型;

ϕ_0 ——模型基线值;

k ——输入模型的因子总数,本文中 $k=16$;

ϕ_i ——第 i 个因子的 SHAP 值,表示对模型预测结果的贡献。

通过绘制各特征因子值的变化与其 SHAP 值的变化关系,可以得出特征因子及特征因子相互作用对于滑坡形成的作用机制^[1]。

4 结果与讨论

研究区群发滑坡的形成发育主要受控于降雨气象条件,也受控于地形地貌、花岗岩物理力学性质等条件。通过计算 SHAP 值对北流市花岗岩地区降雨型群发滑坡的影响因子进行了分析(图 9),初步探讨群发滑坡影响因子的控制作用。由于大部分群发滑坡发生于屋后切坡处,使得距居民点距离的影响程度最强(22.22%)。与自然陡倾斜坡不同,人为的切坡使斜坡微地貌急剧变陡,且表现为坡面裸露,无植被覆盖,加剧水流入渗,促进滑坡。高程及坡度在滑坡时空分布规律中已经表明,滑坡在高程<300 m、坡度>75°的范围内较为密集,因子对群发滑坡的概率贡献分别为 14.47%、15.25%。

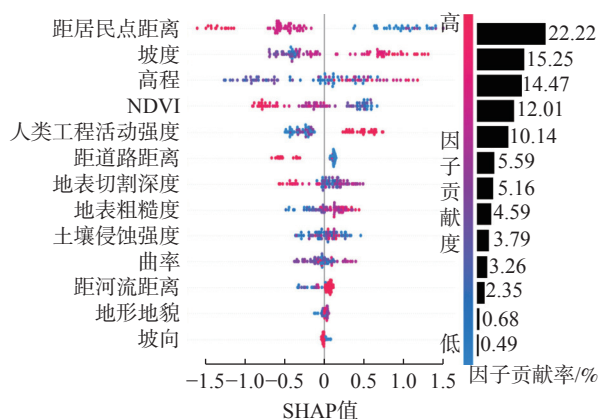


图 9 滑坡特征因子 SHAP 排序

Fig. 9 SHAP values ranking for landslide characterization factors

NDVI 反映地层表面的植被覆盖的程度,通常植被覆盖越好,水土保持程度较好,滑坡发生概率较低^[16]。在研究区内,NDVI 决定着土壤含水率和岩石粗糙度,被开挖或裸露的斜坡表面更易受到水流侵蚀,地下水更易达到饱和,岩土体更易弱化,对滑坡的概率贡献为 12.01%。地表切割深度与地表粗糙度影响着坡面径流的水动力学特征,进而影响土壤侵蚀的强度与进程,对

滑坡的概率贡献适中,分别为 5.16%、4.59%。由于滑坡规模普遍较小,曲率代表的凹型坡、凸型坡及平面坡中均有滑坡发生,其概率贡献偏小。坡向对滑坡发生的概率贡献小,这与研究区多雨高温的气候有关,蒸发量差异较小,坡向影响程度较弱。分析表明,北流市花岗岩地区极端暴雨诱发的群发性滑坡主要形成于具有一定绝对高程(<300 m)、陡倾的坡度(>75°)、具有汇水地形和存在切坡改造的边坡。

研究区的降雨型群发滑坡孕灾影响因子的敏感性结果如图 10 所示。研究区主要为低山丘陵地貌,在平地少、人口较多和大规模基础设施建设等因素的共同作用下,削坡建房和边坡开挖等人类活动在当地成为了常见现象,有的切坡高度甚至高达 10 m 以上,而且并未采取任何防护措施,一旦发生滑坡,将造成巨大的人员伤亡和财产损失。此类行为不仅破坏了坡体原有的稳定结构与力学平衡状态,导致残积土应力释放与内力重分布,陡峭临空面形成,而且还将原来受影响较小的深层岩土体暴露于湿润的大气环境中,加速花岗岩岩土体风化进程,最终在降雨激发作用下,岩土体软化崩解更为频繁,滑坡加速起动。

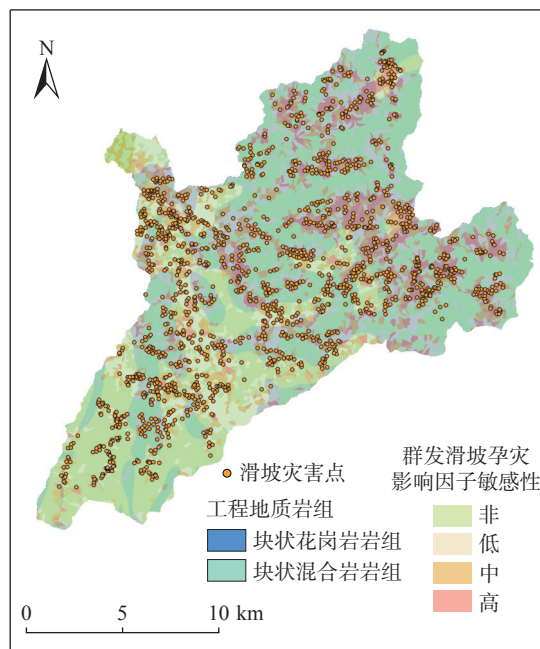


图 10 研究区群发滑坡影响因子敏感性结果

Fig. 10 Sensitivity results for influencing factors of rainfall-induced cluster landslides in the study area

ROC 特征曲线表明(图 11),XG-Boost 算法的计算结果精度可以达到 0.91,适宜于研究区的孕灾规律分析。真正例率(TPR)为敏感性结果的正确判断概率,误报率(FPR)为敏感性结果的误报程度,计算公式如式(2)。

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN}, FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (2)$$

其中: TP ——模型正确预测为正类的样本;

FN ——模型错误预测为负类的正样本;

FP ——模型错误预测为正类的负样本;

TN ——模型正确预测为负类的样本。

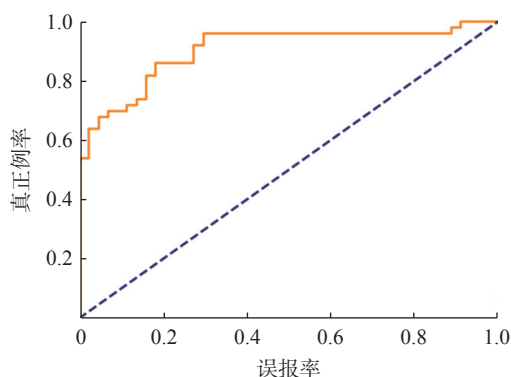


图 11 ROC 特征曲线

Fig. 11 Receiver operating characteristic(ROC) curve

可见群发滑坡的诱因中,人类工程活动中距居民点距离因子的影响最大,其次为地形坡度及高程。

5 结论

(1)在 2022 年“6·9”及 2023 年“6·25”两起群发滑坡事件中,研究区共发生 1 670 处滑坡,以中小型滑坡为主,厚度普遍<10 m,占滑坡总数的 72.57%,多处于切坡微地貌,在绝对高程<300 m、坡度>75°的范围内密集发育。滑坡主要存在剪切滑移型、滑塌型及流滑型(碎屑流)三类破坏模式,总体表现出分布范围广、规模小、数量多、即雨即滑且爆发性强的特点。

(2)不同影响因子对厚层花岗岩残积土地区的短时极端降雨型群发滑坡的形成均有不同程度的敏感性,在孕灾影响因子的耦合作用下共同控制,距居民点距离的概率贡献为 22.22%、坡度的为 15.25%、高程的为 14.47%、NDVI 的为 12.01% 等。

(3)针对此类降雨型群发滑坡的防灾减灾,建议加强高敏感区域的监测与预警工作,设计适宜的人工切坡规范与生态治理方案,加强完善群发滑坡高易发区的村落应急管理提升技术。

参考文献(References):

[1] 许强,徐繁树,蒲川豪,等. 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), 2024, 49(8): 1264-1274. [XU Qiang, XU Fanshu, PU Chuanhao, et al. Preliminary analysis of extreme

rainfall-induced cluster landslides in Jiangwan township, Shaoguan, Guangdong, April 2024 [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(8): 1264-1274. (in Chinese with English abstract)]

- [2] 陈博,张灿灿,李振洪,等. 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), 2024, 49(11): 2145-2155. [CHEN Bo, ZHANG Cancan, LI Zhenhong, et al. Developmental characteristics and controlling factors of landslides triggered by extreme rainfalls on 16 June 2024 in Longyan, Fujian Province [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2024, 49(11): 2145-2155. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 何娜,潘宏坚,吴秋菊. 基于 GIS 的山地地质灾害气象预警研究——以广西陆川县为例[J]. 南方自然资源, 2022(10): 40-47. [HE Na, PAN Hongjian, WU Qiuju. Study on meteorological early warning of geological disasters in mountainous areas based on GIS: A case study of Luchuan County, Guangxi [J]. NanFang ZiRan ZiYuan, 2022(10): 40-47. (in Chinese with English abstract)]
- [4] YANG Hongjuan, YANG Taiqiang, ZHANG Shaojie, et al. Rainfall-induced landslides and debris flows in Mengdong Town, Yunnan Province, China [J]. Landslides, 2020, 17(4): 931-941.
- [5] ROY P, MARTHA T R, VINOD KUMAR K, et al. Cluster landslides and associated damage in the Dima Hasao District of Assam, India due to heavy rainfall in May 2022 [J]. Landslides, 2023, 20(1): 97-109.
- [6] BENZ S A, BLUM P. Global detection of rainfall-triggered landslide clusters [J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2019, 19(7): 1433-1444.
- [7] 吴善百. 广西东南部花岗岩残积土降雨型滑坡的启动机理研究[D]. 南宁: 广西大学, 2020. [WU Shanbai. Study on starting mechanism of rainfall landslide in granite residual soil in southeast Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 翁峻择. 桂东南地区压实花岗岩风化土崩解特性研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2023. [WENG Junze. Study on disintegration characteristics of compacted granite weathered soil in southeast Guangxi [D]. Guilin: Guilin University of Technology, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 白慧林. 花岗岩残积土滑坡降雨启动机理与预警模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2022. [BAI Huilin. Study on rainfall initiation mechanism and early warning model of granite residual soil landslide [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2022. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 陈立华,羊汉平,廖丽萍,等. 容县 2010 年 6 月滑坡灾害降雨阈值研究[J]. 自然灾害学报, 2023, 32(1): 228-235. [CHEN Lihua, YANG Hanping, LIAO Liping, et al. Study on the rainfall threshold of the landslide disaster in Rong

- County in June 2010 [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2023, 32(1): 228 – 235. (in Chinese with English abstract)]
- [11] TAN Delin, XU Xiaoliang, WANG Lehua, et al. Deformation evolution and failure mechanism of rainfall-induced granite residual soil landsliding event in Northern Guangdong, China [J]. *Landslides*, 2025, 22(3): 925 – 941.
- [12] 李荣华, 江思义, 李春玲, 等. 基于 GIS 的北流市地质灾害气象预警研究 [J]. *西部探矿工程*, 2024, 36(7): 13 – 15. [LI Ronghua, JIANG Siyi, LI Chunling, et al. Study on meteorological early warning of geological hazards in Beiliu City based on GIS [J]. *West-China Exploration Engineering*, 2024, 36(7): 13 – 15. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 吴秋菊, 江思义, 李春玲, 等. 基于 GIS 的北流市地质灾害危险性分区评价研究 [J]. *贵州地质*, 2023, 40(1): 20 – 25. [WU Qiuju, JIANG Siyi, LI Chunling, et al. Evaluation research of geological hazard division based on GIS in Beiliu City [J]. *Guizhou Geology*, 2023, 40(1): 20 – 25. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李振洪, 朱武, 余琛, 等. 影像大地测量学发展现状与趋势 [J]. *测绘学报*, 2023, 52(11): 1805 – 1834. [LI Zhenhong, ZHU Wu, YU Chen, et al. Development status and trends of imaging geodesy [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805 – 1834. (in Chinese with English abstract)]
- [15] LIU Haizhi, XU Hui, BAO Hongjun, et al. Application of machine learning classification algorithm to precipitation-induced landslides forecasting [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2022, 33(3): 282 – 292.
- [16] 李立丰. 广西地区滑坡灾害的临界降雨量阈值研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2020. [LI Lifeng. Study on critical rainfall threshold of landslide disaster in Guangxi [D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 梁柱. 机器学习在浅层滑坡敏感性评价中的综合应用与研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2021. [LIANG Zhu. Comprehensive application and research of machine learning in sensitivity evaluation of shallow landslide [D]. Changchun: Jilin University, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 陈贺, 付有旺. 贡山县进藏通道群发性滑坡地质特征与降雨阈值 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2024, 43(增刊 2): 3861 – 3871. [CHEN He, FU Youwang. Geological feature and rainfall threshold of cluster landslides along roads toward Tibet in Gongshan County, Yunnan Province, China [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2024, 43(Sup 2): 3861 – 3871. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 刘帅, 王涛, 曹佳文, 等. 基于优化随机森林模型的降雨群发滑坡易发性评价——以西秦岭极端降雨事件为例 [J]. *地质通报*, 2024, 43(6): 958 – 970. [LIU Shuai, WANG Tao, CAO Jiawen, et al. Susceptibility assessment of precipitation-induced mass landslides based on optimal random forest model: Taking the extreme precipitation event in western Qinling mountains as an example [J]. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(6): 958 – 970. (in Chinese with English abstract)]
- [20] CHEN Tianqi, GUESTRIN C, CHEN Tianqi, et al. XGBoost [C] // *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. August 13 - 17, 2016, San Francisco, California, USA. ACM, 2016: 785-794.
- [21] 赵楠, 卢毅敏. 中国地表臭氧浓度估算及健康影响评估 [J]. *环境科学*, 2022, 43(3): 1235 – 1245. [ZHAO Nan, LU Yimin. Estimation of surface ozone concentration and health impact assessment in China [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(3): 1235 – 1245. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘云, 康卉君. 江西崩塌滑坡泥石流灾害空间时间分布特征分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2020, 31(4): 107 – 112. [LIU Yun, KANG Huijun. Spatial-temporal distribution of landslide, rockfall and debris flow hazards in Jiangxi Province [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2020, 31(4): 107 – 112. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 方宏宇. 广东龙川县“6·12”群发型浅层滑坡发育特征及成因机理研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2021. [FANG Hongyu. Study on the development characteristics and genetic mechanism of “6·12” group-type shallow landslide in Longchuan County, Guangdong Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 邓祖保, 龚恩德. 山地公园群发地质灾害致灾因子分析及防治建议 [J]. *地质灾害与环境保护*, 2024, 35(3): 55 – 60. [DENG Zubao, GONG Ende. Analysis of the factors inducing group geological disasters in a mountain park and suggestions for control measures [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2024, 35(3): 55 – 60. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 穆启超, 王万迁, 王琦, 等. 贵州松桃长冲组滑坡形成机理分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2023, 34(3): 40 – 47. [MU Qichao, WANG Wanqian, WANG Qi, et al. Analysis of the formation mechanism of landslide in Changchong group, Songtao, Guizhou [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2023, 34(3): 40 – 47. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 郭飞, 王秀娟, 陈玺, 等. 基于不同模型的赣南地区小型削方滑坡易发性评价对比分析 [J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(6): 125 – 133. [GUO Fei, WANG Xiujuan, CHEN Xi, et al. Comparative analyses on susceptibility of cutting slope landslides in southern Jiangxi using different models [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(6): 125 – 133. (in Chinese with English abstract)]