

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

刘智琪, 吴琼*, 王亮清, 朱悦, 唐辉明

中国地质大学工程学院, 湖北武汉 430074

摘要: 东南地区是我国降雨型群发滑坡的高发区, 其孕育过程受地质、气象、水文、生态与人类活动等多因素综合控制, 具有明显的多尺度效应。本文系统回顾了多因素耦合作用下东南降雨型群发滑坡的多尺度孕育机制研究进展, 重点分析了地质条件、气象水文、生态环境和人类活动等因素的单独及协同作用机制, 阐述了从单体尺度到流域尺度滑坡孕育过程的差异与联系, 并总结了现场监测、物理模型试验、数值模拟和人工智能数据驱动等研究方法的应用现状。研究表明, 多因素耦合机制与跨尺度联动是理解群发滑坡孕育规律的关键, 但目前仍存在多因素动态耦合机制不清、模型跨尺度衔接不足等挑战。未来应加强群发滑坡多因素互馈机制和协同演化物理力学过程研究, 推动构建多尺度孕育模型, 提升区域滑坡灾害预警与防控能力。

关键词: 东南地区; 降雨型群发滑坡; 多因素; 多尺度; 孕育机制

中图分类号: P694

收稿日期: 2025-10-08

Review on Multi-scale Formation Mechanisms of Rainfall-induced Cluster

Landslides in Southeastern China under Multi-factor Coupling Effects

Liu Zhiqi, Wu Qing*, Wang Liangqing, Zhu Yue, Tang Huiming

Faculty of Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: (purpose) The southeastern region of China is highly susceptible to rainfall-induced cluster landslides. Their formation process is governed by the complex interplay of multiple factors, including geology, meteorology, hydrology, ecology, and human activities, exhibiting significant multi-scale effects. (methods) This study systematically reviews the research progress on multi-scale formation mechanisms of rainfall-induced cluster landslides under multi-factor coupling effects, with a focus on analyzing the individual and synergistic mechanisms of geological conditions, meteorological-hydrological processes, ecological environment, and human activities. The differences and connections in landslide formation processes from the individual slope scale to the watershed scale are elaborated. Furthermore, the application status of research methods such as field monitoring, physical model testing, numerical simulation, and artificial intelligence is summarized. (results) The study indicates that understanding multi-factor coupling mechanisms and cross-scale linkages is essential for deciphering the formation patterns of cluster landslides. However, challenges remain, including an unclear understanding of dynamic multi-factor interactions and insufficient integration of models across scales. (conclusions) Future research should strengthen the investigation of the multi-factor coupling mechanisms and collaborative evolution of physical and mechanical processes, promote the development of multi-scale formation models, and enhance capabilities for regional landslide early warning and risk prevention.

Key words: Southeast region; Rainfall-induced cluster landslides; Multi-factor; Multi-scale; Formation mechanism

基金项目: 国家重点研发计划课题 (NO. 2024YFC3012601)

作者简介: 刘智琪 (1999—), 女, 博士研究生, 主要从事降雨型滑坡灾害与岩土工程方面研究, ORCID: 0009-0007-6610-1137, E-mail: Liuzhiqi@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

0 引言

近年来,在全球气候变化背景下,极端降雨事件的发生频次和强度增加,致使降雨型滑坡灾害频发,对全球范围内的人员安全和经济发展构成了严重威胁(Gariano and Guzzetti, 2016)。受气象条件、地质条件、水文条件、生态环境和人类活动等因素的影响,往往在短时内、同一区域或相邻区域同时或连续发生多个滑坡事件,这种灾害类型称为群发性滑坡(图1)。例如,2024年4月广东韶关江湾镇突遭极端降雨天气,诱发了约1192处滑坡,总面积达1.34 km²,致使江湾镇部分地区陷入了36小时的断水、断电、断网状态,造成了重大的人员伤亡和经济损失(许强等,2024; Yang *et al.*, 2025); 2024年福建省龙岩市普降暴雨,导致12.58万人受灾,摧毁房屋1214间,中断道路728处,农作物受灾约2894.73公顷,直接经济损失达11.96亿元(陈博等, 2024); 2023年7月浙江省杭州市富阳区遭遇特大暴雨,发生数百起山体滑坡,造成5人死亡、3人失踪,26处房屋受损或被毁,21条道路被封(Lv *et al.*, 2024); 2023年5月意大利Emilia-Romagna及其邻近地区因暴雨引发上千处山体滑坡,造成17人死亡,数万人流离失所,损失至少88亿欧元,是全球降雨诱发滑坡灾害的一个标志性事件(Ferrario and Livio, 2024); 2019年一场暴雨袭击江西省全南县,此次暴雨造成全县42处道路塌方,676公顷农作物、434间房屋受灾,直接经济损失达625亿元(马煜等, 2023)。因此,在全球气候变化背景下,开展降雨型群发滑坡灾害研究已成为当前亟待解决的重要课题。该研究不仅对全球防灾减灾工作具有关键意义,同时也是响应我国重大战略需求的必要举措。



图1 典型群发滑坡灾害无人机影像图(Feng *et al.*, 2022)

Fig.1 Unmanned aerial vehicle image of typical cluster landslides (Feng *et al.*, 2022)

全球范围内,降雨诱发型群发滑坡广泛分布于湿润或季风性气候区,如中国东南地区、日本中南部及意大利北部等地。目前国外降雨型群发滑坡多由持续性强降雨引发,以浅层失稳为主,人类活动影响较弱,研究主要关注降雨阈值、植被覆盖影响、滑坡预测预警及易发性评价(Martelloni *et al.*, 2012; Watakabe and Matsushi, 2019; Romeo *et al.*, 2023; Segoni *et al.*, 2024; Sato and Shuin, 2025)。这些研究为理解降雨入渗、浅层滑坡触发机制及预警模型构建等方面提供了重要的理论与方法支撑。相比之下,我国东南地区虽同处湿润季风区,但降雨型群发滑坡表现出更复杂的多因素协同特征(Wang *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024)。首先,台风暴雨与梅雨季持续降雨交替出现,使降雨过程在时间上呈现多峰性与非平稳性。其次,广泛分布的花岗岩及火山岩风化壳形成的多层垂向非均质结构导致降雨入渗差异显著。再次,东南沿海地区人口密集、人类活动频繁,密集的人类工程活动强化了坡体扰动效应,滑坡孕育过程受人为因素影响较大。因此,我国东南地区降雨型群发滑坡呈现多场耦合的区域特征,是多因素协同致灾研究的重要典型区。

我国福建、浙江、江西、广东等东南地区受梅雨季节和台风季节的影响,强降雨事件频发,降雨量、降雨强度和降雨历时均位于较高水平。加之这些地区岩体风化强烈、残坡积层覆盖广,在强降雨条件下,群发滑坡呈高发态势。经初步统计,仅在近十年时间内,东南诸省已经发生几十起强降雨、

极端暴雨致灾事件。滑坡灾害以中小型规模为主，具有数量多，隐蔽性强、突发性强、危害性大的特点，常表现出浅层、流态化等特征。降雨型群发滑坡灾害研究已成为该地区防灾减灾的重点工作之一。根据 2011-2024 年《中国统计年鉴》，全国及东南 4 省（福建、浙江、江西、广东）的地质灾害（滑坡、崩塌、泥石流和地面塌陷）发育情况和灾情损失情况如图 2 所示。我国滑坡灾害在每年地质灾害中的占比均位于较大水平，全国滑坡灾害约占全国地质灾害总数的 68.8%，东南地区滑坡灾害约占其地质灾害总数的 64.8%。同时，全国因地质灾害造成的累计人员伤亡高达 8600 人次，累计直接经济损失近 565 亿元，而东南 4 省累计人员伤亡占全国人员伤亡的 10.6%，直接经济损失占全国的比重为 6.1%。因此，亟需针对东南地区降雨型群发滑坡灾害开展系统研究，为区域灾害预警和防灾减灾提供关键支撑。

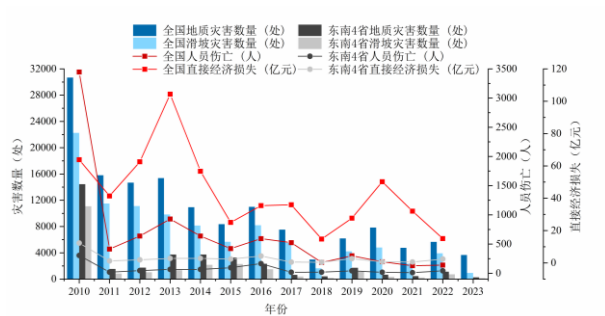


图 2 2010-2023 年全国及东南 4 省地质灾害数量及其造成的人员伤亡和经济损失情况

Fig.2 The number of geological disasters and their resulting casualties and economic losses in China and four southeastern provinces from 2010 to 2023

极端天气加剧了边坡地质-水文-生态系统的耦合互馈作用，显著增加了强降雨诱发群发性滑坡灾害的风险。我国东南地区作为此类灾害的高发区，其滑坡事件不仅与强降雨密切相关（张泰丽等，2017），同时还受以下因素影响：地形以山地和丘陵为主，地形起伏较大，沟谷发育，为滑坡的发生提供了有利的地形条件（Ma *et al.*, 2015）；地层岩性以变质岩和少量沉积岩为主，受热带/亚热带气候的影响，岩体风化作用强烈，极易在极端降雨条件下致使边坡失稳（Liu *et al.*, 2020；An *et al.*, 2022；

Li *et al.*, 2024）；受欧亚板块和太平洋板块的相互作用，断裂带活动导致岩体结构破碎，形成了大量的节理、裂隙和破碎带，为滑坡、泥石流等地质灾害提供了物源基础（代洪川，2022）。此外，东南地区人口稠密、经济高速发展，人类活动如工程建设、矿山开采、植被破坏和不合理土地利用等通过改变地形、地下水动态和岩土体结构，进一步加剧了滑坡风险。通常，群发滑坡孕育过程的研究主要从两个尺度开展，一是以单个滑坡为对象的“单体尺度”，侧重揭示降雨入渗、孔隙水压力演化与岩土体力学变化等失稳机制；二是以自然汇水单元或区域多个滑坡事件为对象的“流域尺度”，关注降雨空间分布、区域水文过程与地形地貌等对滑坡时空聚集性的影响。地质、水文、生态及人类活动等多因素在单体尺度及流域尺度上表现出差异化的作用方式，且跨尺度滑坡又存在着复杂的关联规律。因此，研究多因素作用下东南地区降雨型群发滑坡多尺度孕育机制，对于揭示滑坡孕育规律、预测滑坡发生，并制定针对性防灾减灾措施具有重要意义。

本文旨在综述近年来关于多因素作用下东南降雨型群发滑坡多尺度孕育机制的研究进展，重点阐述降雨型群发滑坡的影响因素，以及地质条件、气象水文、生态环境和人类活动等多因素的耦合作用机制，并论述单体尺度和流域尺度下滑坡的孕育过程。同时，从现场监测、物理模型试验、数值模拟和人工智能数据驱动四个方面总结现有群发滑坡孕育机制研究的主要手段。通过总结和梳理文献，可为相关领域研究人员提供全面的知识框架和参考，促进降雨型群发滑坡灾害孕育机制的研究进展。

1 多因素耦合作用下降雨型群发滑坡孕育机制

降雨型群发滑坡灾害不仅受降雨条件的影响，更是诸多内外因素耦合作用的结果，如地层岩性、地形地貌、地质结构等地质条件，降雨、地表径流、地下水渗流等气象水文条件，植被类型、植被覆盖密度、根系特征等生态环境条件，以及工程建设和

土地利用变化等人类工程活动。梳理影响群发滑坡灾害的主要与次要因素及其相互之间的耦合关联机制,对于准确分析群发滑坡事件的孕育机制至关重要。

1.1 降雨型群发滑坡影响因素

1.1.1 地质条件

地质条件是滑坡孕育的基础因素,主要包括地形地貌、地层岩性和地质结构等。东南沿海地区由于受到太平洋板块向欧亚大陆板块深部俯冲的挤压作用,并受限于区域构造运动历史上两大板块的运动速率与幅度,形成了以中山、低山和丘陵为主的地形环境,该地形条件下较高的重力势能与较大的下滑力为降雨诱发滑坡的形成提供了有利条件。斜坡坡度主要在几何特征上决定了斜坡的应力分布,通常认为随着斜坡坡度的增加,剪切力也随之增大,低山丘陵区 $25^{\circ}\sim 55^{\circ}$ 的斜坡坡度既保证了足够的下滑分力,又能够满足降雨入渗条件 (Guillard and Zezere, 2012; 白慧林, 2022)。坡向通过调控微气候参数 (如太阳辐射强度、风蚀作用、降水分布及土壤湿度等) 影响斜坡稳定性。阳坡 (南向坡) 日照充足,岩石风化作用强烈,松散覆盖层较厚,加之阳坡通常是人类活动的集中区域,工程扰动频繁,这些因素的协同作用使得阳坡相较于阴坡具有更高的滑坡易发性。坡形也是影响斜坡稳定性的重要因素之一,凹坡负地形相对容易汇集雨水,凸形坡虽汇水能力较差但应力集中,因此,凸形坡和凹形坡的滑坡风险存在差异。研究表明,微凹或微凸的坡面最易诱发降雨型滑坡,其中凹坡又比平坡和凸形坡发生滑坡的概率大 (冯杭建等, 2017; 白慧林, 2022)。高程则通过影响集水面积和植被覆盖特征间接控制滑坡发育 (兰恒星等, 2003)。这些要素共同构成了滑坡孕育的基础地形环境。

岩性和土壤类型的不同会导致岩土体强度、孔隙水压力和渗透性存在差异,这些特性决定了岩土体对水分变化的响应机制和滑坡的触发阈值 (Pradhan *et al.*, 2010)。我国东南地区火成岩分布最为广泛,并主要以花岗岩和火山岩为主。在亚热

带湿润气候长期作用下,火成岩的风化剖面呈现明显的垂向分带性,自上而下依次发育残积层、全风化层、强风化层、中风化层和微风化层。花岗岩残积层在强烈的风化作用下常表现为黏土-粉质黏土组合,具有结构疏松、孔隙比大、粗颗粒占比大的结构特征,遇水快速崩解软化,有机质及次生矿物富集 (简文彬等, 2017; 张抒和唐辉明, 2013)。凝灰岩作为该地区分布最为广泛的火山岩,具有显著的高孔隙性和开放絮凝结构,遇水后快速崩解和膨胀,渗透性较强而力学强度较低,工程稳定性较差,尤其在含水条件下易发生结构弱化 (Chen *et al.*, 2018; 韩帅等, 2022)。火成岩虽具有特征显著的风化剖面,具有遇水易软化、崩解的特性,但滑坡灾害的发生通常受多因素协同控制,需结合具体孕灾环境综合判定其主控因素 (Lv *et al.*, 2024; Lee *et al.*, 2024)。地质灾害的发生与地质结构有着密切的联系,岩土体中的节理裂隙等结构不仅降低其整体强度,还为降雨入渗提供了渗流通道。但我国东南地区滑坡与西部结构主控型滑坡相比,地质构造的影响并不十分强烈,而更多受人类工程活动和强降雨控制。

1.1.2 气象水文

在气象条件方面,降雨是东南地区触发滑坡的主要诱因,该地区降雨充沛,年降雨量普遍在 1500 毫米以上,部分地区甚至超过 2000 毫米。具有致灾能力的强降雨往往在短时间内表现出极强的爆发性和集中性,导致大量水分入渗,迅速增加岩土体饱和度,降低其抗剪强度,从而诱发滑坡 (曾新雄等, 2024; 周诗凯等, 2024; 魏平新等, 2024)。我国东南地区群发滑坡主要由台风暴雨和梅雨诱发,这两类降雨在降雨强度、持续时间和时序特征上存在显著区别,对滑坡触发产生不同影响。台风暴雨由于强度大、历时短,滑坡群发特征显著,且多为浅层滑坡;梅雨由于历时长、范围广,引起的多为中深层滑坡,单体滑坡规模相对较大,滑坡发生与降雨期存在显著的滞后效应。人们普遍认为,浅层滑坡优先由短时强降雨引发,而深层滑坡通常

与长历时降雨事件有关 (Martelloni *et al.*, 2012)。降雨具有多种结构特征, 根据降雨历时与降雨强度的关系, 将降雨分为均匀型、递增型、递减型和峰值型 (Ng *et al.*, 2001; Tsai, 2008)。降雨类型对浅层滑坡的影响是显著的, 在降雨量和降雨历时相同的情况下, 致灾性强的降雨事件其整体结构多表现为递减型和峰值型两类 (罗渝等, 2014)。例如, 2019 年 6 月广东龙川群发滑坡灾害事件持续 4 天的强降雨表现为递减型; 2016 年 7 月福建闽清及 2022 年 5 月福建武平群发滑坡灾害事件的直接触发因素均是峰值型降雨事件。

地表与地下水文过程在降雨型群发滑坡孕育过程中起着关键作用。地表径流的形成与汇流特征决定了坡面水动力条件, 其流速与流量的时空变化会显著影响坡面侵蚀与物质搬运过程。在时间维度, 台风暴雨期短时高能径流强烈冲刷坡表, 造成坡表土体扰动和局部冲沟发育; 而梅雨季持续性径流则通过长期软化和浸润削弱斜坡稳定性。在空间维度, 由于地形起伏、土地利用和土壤渗透性差异, 地表径流分布呈明显的空间非均匀性, 特别是在坡度转折带或沟谷区常形成汇水集中现象, 导致局部坡面水动力增强。降雨入渗深度和地下水位变化控制着坡体的水分再分布, 并决定了坡体的含水状态。当极端降雨超过地表土层的调蓄能力时, 地下水系统进入高水位状态, 坡体内部滞水层增厚, 导致局部渗流增强。东南地区地形破碎、地表覆盖层厚度变化大, 由于不同风化程度地层渗透性的差异, 常出现多层地下水系统叠置现象, 其补给与排泄的不均衡性在一定程度上放大了流域内的滑坡易发性。总体而言, 气象条件通过降雨强度、历时与时序结构决定地表径流与地下水渗流的时空格局; 水文过程则通过入渗分配与地下水位响应等调控斜坡含水状态和孔隙水压力分布, 从而影响斜坡稳定性。

1.1.3 生态环境

在东南地区降雨型群发滑坡孕育机制研究中, 生态环境条件, 尤其是植被覆盖情况, 是一个不可忽视的重要影响因素。植被根系在岩土体中形成的

复杂网络一方面能够限制土体开裂起到锚固作用, 产生固坡效果, 另一方面可能因根系网络形成渗流通道加速雨水入渗与扩散, 从而转化为促滑作用。在植被固坡效应方面, 发达根系通过机械固结和生物化学作用改善土壤结构, 有效提升土体的凝聚力和抗剪强度。不同根系形态的加固效果存在明显差异, 均匀形根系通过提供剪切阻力和末端锚固作用展现出最优的加固性能, 倒三角态根系深入下层土壤发挥较大拉力, 梭形根系则因上部较窄且下部锚固根较少表现出相对较弱的加固效果 (Song *et al.*, 2024; Song and Tan, 2024; Ding *et al.*, 2024)。此外, 植被根系还可在一定程度上通过水文调节功能抑制滑坡的发生, 例如, 植被冠层截留减轻雨水对坡面冲刷, 枯枝落叶腐殖质削弱地表径流侵蚀能力, 植物蒸腾作用有效降低土体孔隙水压力 (Deng *et al.*, 2025)。

在台风暴雨等极端气候条件下, 植被的固坡效果可能发生根本性转变。植被根系网络在土体中呈现粗细不一、分布不均的异质性结构, 易形成连通的优先渗流通道, 从而加速雨水入渗, 促使滑带土体饱和与劣化。台风风荷载可使植物根系产生显著的扭矩效应, 诱发土体裂隙扩展, 为降雨入渗提供快速通道, 导致土壤渗透系数增加 10 倍以上 (孙强等, 2022; 庄宇和邢爱国, 2025)。这种水文-力学耦合效应可能完全抵消植被的固坡作用。此外, 植物根系腐烂会导致根体积比降低, 且随着腐烂时间延长, 根系生物量、直径、长度和数量均呈现递减趋势, 这一过程不仅改变土壤结构, 更会显著增强根-土复合材料的渗透性, 最终对边坡稳定性产生负面影响 (Meng *et al.*, 2025)。因此, 植被覆盖与滑坡之间存在复杂的非线性关系, 适度植被覆盖可提供最佳防护效果, 而过高或过低的覆盖率均可能增加滑坡风险 (Zhang *et al.*, 2022)。这些发现为深入理解植被与边坡的相互作用机制提供了重要理论依据。

1.1.4 人类活动

在地方经济发展过程中, 开挖建房、开挖修路、

露天采矿等工程建设活动,以及大规模的土地利用变化,直接改变地表形态和地下水文特征,削弱边坡原有抗滑阻力的同时又提供了有利的临空条件,加剧边坡在降雨等外界因素作用下的失稳风险 (Singh, 2010)。东南低山丘陵及中低山地区,居民建房常通过开挖形成高度为 5-15 米、坡度超过 50° 的临空边坡,且由于缺少足够的安全意识,多数边坡缺乏支护和放坡处理。在山区公路建设中,大规模的开挖工程不仅破坏了斜坡原有的力学平衡状态,导致应力重分布,同时还改变了地表径流和地下水的渗流路径。因工程切坡所带来的安全隐患在强降雨期间表现的尤为突出,一方面坡面汇流对坡表产生强烈的冲刷侵蚀作用,另一方面,雨水入渗降低边坡岩土体强度,在坡脚负载减小、后缘应力增大及临空条件的共同作用下,极易诱发滑坡 (Ayalew *et al.*, 2005; Yalcin, 2008)。此外,地表径流携带的大量泥沙不仅会淤积在房屋和道路周边,甚至会直接冲入室内或阻拦道路,对人民生命财产构成严重威胁。由于建房和修路开挖集中,对地质环境产生累积影响,致使东南强降雨诱发灾害呈现区域化特征。

东南地区土地利用类型多样,不同土地利用类型在滑坡易发区对斜坡稳定性的影响存在差别 (Pradhan *et al.*, 2010; Tien Bui *et al.*, 2012; Conforti *et al.*, 2014)。常见的土地利用类型有住宅用地、耕地、园地、交通运输用地、工矿用地等,其中住宅用地由于人类工程活动频繁且不透水面积比例高,表现出最高的滑坡易发性。坡地开垦和水田改造等农业活动、城市化进程中的地表硬化与绿地缩减等土地利用变化,以及更为剧烈的湿地填埋、河流改道等人为干预活动,均通过改变地表形态、土壤性质、地表径流和地下水动态过程等地质和水文学环境,从不同程度上影响着斜坡的稳定性,使得人类活动影响区域的滑坡发生频率远高于自然状态。

1.2 多因素耦合作用机制

降雨型群发滑坡的孕育过程并非单一因素作

用的结果,而是地质条件、气象水文、生态环境及人类活动等多因素在时空上长期耦合的产物。这些因素通过复杂的非线性交互作用,共同影响着斜坡的稳定性,并最终诱发滑坡灾害。近年来,随着研究的深入,多因素耦合作用机制逐渐成为揭示降雨型群发滑坡孕育规律的核心。

1.2.1 地质条件与气象水文的耦合作用

在降雨型滑坡孕育机制研究中,地质条件与气象水文耦合作用的研究最为广泛,它也是揭示滑坡孕育机制的关键。地质条件为滑坡提供了物质基础和结构背景,影响着降雨入渗和地下水运移路径;气象条件是降雨型滑坡的主要外动力因素,降雨量、降雨强度和降雨历时等影响水分入渗的深度和范围;水文过程作为关键的中介环节,将外界降雨信号转化为坡体内部的渗流响应,通过控制渗流-应力耦合过程主导滑坡动力学行为。地质、气象、水文三者相互作用决定了群发滑坡的时空发育规律 (Chen *et al.*, 2014; Lo *et al.*, 2016)。

东南地区广泛分布的火成岩风化壳与强降雨事件表现出显著的协同效应。残积层和全风化层孔隙发育、透水性强,在强降雨条件下易形成浅层快速入渗和径流转换;下部强风化和中风化层渗透性较弱,可造成雨水滞蓄与局部高水位区 (王志兵等, 2020)。不同层系在强降雨期间补给与排泄过程中的响应差异导致上部风化壳表层可在小时内达到饱和,而深层饱和则存在明显的滞后效应 (周勇等, 2015; 周峙等, 2020)。这种差异饱和引发瞬态孔隙水压力梯度,成为浅层滑坡的主要触发机制。地形地貌条件进一步强化了地质条件与气象水文之间的耦合效应。坡度、坡向和坡形不仅影响降雨入渗和汇流过程,还决定了坡体的水动力分布与应力集中模式。凹形坡因其独特的地形汇水效应易形成高饱和区,凸形坡则在降雨侵蚀下易形成局部应力集中;中等坡度斜坡 (15° ~35°) 对降雨入渗引发的自重增加和抗剪强度衰减尤为敏感;阳坡由于降雨与斜坡岩土体之间的快速入渗-增重-软化机制,在短时强降雨条件下易发生快速浅层滑坡,而阴坡

由于渐进饱和引发的孔隙水压力累积，易在持续降雨作用下产生缓慢深层滑动（Yang *et al.*, 2025）。流域尺度群发滑坡分析表明，地质结构与降雨格局的耦合作用导致滑坡呈现明显的空间聚集特征（陈博等，2024；黄雨和何正迎，2025）。InSAR 监测显示，构造敏感区的坡体变形速率与降雨量呈指数关系，表明构造控水作用显著放大了降雨效应（Li *et al.*, 2019；解明礼等，2020；杨沛璋等，2023）。当前气候变化背景下，极端降雨事件发生的频率与强度上升，加剧了地质-气象水文耦合过程的非平稳性，使斜坡稳定性呈现出更加明显的时变特征。

1.2.2 生态环境与自然因素的耦合作用

在东南地区特殊的地质背景和气候条件下，生态环境与地质、水文等自然因素通过复杂的耦合作用，深刻影响着斜坡的物质组成、结构特征和稳定性演化，从而调控着滑坡的启动、发展和空间分布规律。现有研究表明，这种生态环境与自然因素的耦合作用既可能通过生物工程效应增强斜坡稳定性，也可能在某些条件下形成灾害放大效应，其双向调控特征对滑坡灾害预警与防治具有重要指导意义（姜彤等，2022；Wang *et al.*, 2024；Song *et al.*, 2024；Prasetyaningtiyas *et al.*, 2024；Ding *et al.*, 2024）。

东南地区浅层滑坡易发性与植被覆盖存在显著相关性，植被群落对滑坡的调控作用受区域地质和水文环境等的多重制约（Hu *et al.*, 2024）。植被根系通过其力学作用与水文调节功能与岩土体形成互馈关系（Prasetyaningtiyas *et al.*, 2024）。一方面，植被根系网络通过其锚固作用，提高根-土复合体的黏聚力与抗剪强度，增强边坡稳定性。但由于根系分布的密度与深度存在空间差异，同一性质土体在不同空间位置的抗剪强度可能不同（Ma *et al.*, 2025）。另一方面，根系的存在改变了土壤的渗透结构，可形成优先渗流路径，同时通过蒸腾作用、降雨截留等方式影响边坡在强降雨条件下的入渗速率和饱和过程。植被覆盖斜坡上：在地上，植被产生树干茎流和树冠穿透雨影响地表径流；在植

被内部，形成自上而下的水文路径；在地下，植被根系的存在有助于突出优先渗流区和基质渗透区（图3）（Deng *et al.*, 2025）。植被根系的加固效应与其导致的局部孔隙水压力增长同步出现且存在阈值，当后者的影像大于前者时，根系促滑效应放大，增加滑坡风险。此外，植被根系的生长和衰败过程，还能够显著改变土壤的裂缝分布和水力传导性，从而调控岩土体的稳定性和适应性（Yuliana *et al.*, 2025）。

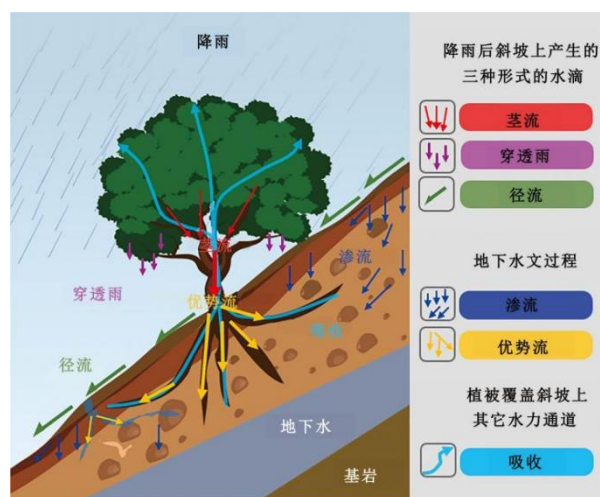


图3 植被在斜坡水文过程中的作用示意图(改自 Deng *et al.*, 2025)

Fig.3 A schematic representation of the role of vegetation in slope hydrological processes (revised from Deng *et al.*, 2025)

1.2.3 人类活动与自然因素的耦合作用

工程建设活动、土地利用变化等人类活动和自然因素耦合，增加了滑坡的发生概率（Conforti *et al.*, 2014）。东南地区作为我国经济快速发展区域，人类活动已成为诱发群发性滑坡的关键驱动因素。有研究表明，人为因素对滑坡的影响要远大于自然因素，人类活动通过改变地形地貌特征、地质结构特征和水文地质条件等自然因素，导致区域滑坡敏感性提升（Singh, 2010；Laimmer, 2017）。

大规模的工程建设活动通过多种途径改变着斜坡的应力-渗流场，增加滑坡风险：人工切坡破坏坡体原始应力平衡并制造临空条件，加剧水分入渗和侵蚀作用（栗倩倩等，2022；蒋涛等，2023）；矿山开采扰动地质结构并改变地表形态和水文条件，诱发地下水位变动和地裂缝发育（李腾飞等，

2011)；农业灌溉活动抬升地下水位，叠加降雨使土壤水分增加，加速岩土体抗剪强度劣化速度（Gu *et al.*, 2021）；水库运营产生的水位波动在库岸形成干-湿循环作用区，导致库岸边坡岩土体力学参数持续劣化（亢金涛等，2019；孟朕等，2022；Wu *et al.*, 2022, 2023a, b, c, 2024a, b）。当前气候变化与人类活动协同作用还催生了新型灾害链。例如，城市热岛效应通过双重机制加剧地质灾害风险：一方面，通过改变局地气候特征增强极端降雨事件的发生频率和强度；另一方面，城市高温和地表硬化削弱斜坡岩土体的力学性能（Liu *et al.*, 2013；El-Hadidy *et al.*, 2021）。两方面协同作用扩大了地质脆弱区的空间范围，增加了受城市扩张影响区域的滑坡风险。当人类活动强度超过自然系统的自适应阈值时，气候变化导致的降雨增强将使滑坡发生频率呈非线性增长，这种放大效应在重大线性工程（如高速公路和铁路），以及快速城市化区域表现的尤为显著，可能大幅扩展极端降雨的致灾范围。因此，群发滑坡防治需统筹考虑工程活动、土地利用变化与气候的协同效应。

1.3 多因素耦合作用下降雨型群发滑坡孕育机制研究发展趋势

东南地区降雨型群发滑坡的孕育机制研究越来越重视复杂化和动态化的多因素耦合作用过程，逐渐从传统的单因素独立影响向多因素动态协同作用转变，注重地质条件、气象水文、生态环境与人类活动的非线性耦合效应及其时空演变规律。未来，随着全球气候和人类活动强度的持续变化，降雨型群发滑坡的时空分布规律、触发条件及成灾模式可能发生显著改变，亟需深入探究多因素耦合作用的长期累积效应及其对滑坡孕育过程的调控机制，从而提升区域滑坡灾害的早期识别与风险防控能力。

2 群发滑坡多尺度孕育过程

降雨型群发滑坡的形成源于区域降雨与地质环境等时空不均匀因素的耦合作用（Xiao and Zhang, 2023）。不同空间尺度滑坡相互关联、层层

递进，单体尺度滑坡的失稳行为构成了群发滑坡的基本单元，而流域尺度研究揭示这些局部事件在气象-水文-地质系统下的协同响应规律。因此，从单体到流域的多尺度研究有助于系统阐明从局部失稳到区域群发的群发滑坡孕育机制与灾变演化过程。

2.1 单体尺度

对于单体尺度降雨型滑坡，其孕育过程主要表现为岩土体对降雨入渗的动态响应。研究表明，降雨入渗过程中湿润锋下移导致土体基质吸力减小是降雨型滑坡失稳的关键诱因（豆红强等，2023）。而湿润锋的推进速度受控于土壤质地、初始含水量、渗透系数和降雨强度等多种因素（雷文凯等，2020）。从力学机制看，滑坡孕育本质上是渗流场-应力场-变形场多场耦合作用的结果。在降雨入渗过程中，岩土体从非饱和状态到饱和状态的转变会出现明显的强度参数劣化，微观尺度上表现为黏土矿物吸水膨胀导致颗粒间胶结破坏，继而引发结构重组。受岩土体物理力学性质和坡体结构的影响，高强度降雨会在短时间内引起坡体内部含水率的快速变化，进而导致孔隙水压力和土压力的变化。这种力学性能的衰减与孔隙水压力的动态变化共同构成了滑坡发生的力学基础（Yuliza *et al.*, 2016）。

在强降雨条件下，东南地区斜坡岩土体容易在浅表层首先造成失稳，表现为“逐级后退、依次破坏”的表层渐进破坏特征，以牵引滑动失效模式为主，而土壤含水量的增加速率和孔隙水压力的变化范围可作为边坡变形和失效的主要指标（Tan *et al.*, 2024）。根据学者们对东南地区降雨型风化层滑坡变形破坏机制的研究，其形成演化具有阶段性，并将其划分为以下3个阶段（图4）：降雨入渗阶段，降雨初期，受地层结构松散、裂隙发育及根系通道等因素影响，雨水沿坡表快速渗入残积土层，导致土体含水量增加、基质吸力降低、抗剪强度减弱；径流冲刷阶段，降雨中期，受植被覆盖度及地形汇流条件的影响，地表径流形成并冲刷坡表形成冲沟，在重力作用下形成坡表裂隙，加剧土体结构破坏；

流滑破坏阶段，在持续的强降雨作用下，土体达完全饱和，孔隙水压力升高，抗剪强度骤降，浅层土体沿后缘拉张裂隙及滑动面发生滑移，形成流滑破坏。整体来看，东南地区由降雨引发的滑坡，是地

质、水文和生态等因素耦合作用的结果，各因素共同决定了滑坡的发育特征（沈佳等，2020；冯文凯等，2022，2025；Tan *et al.*, 2024）。

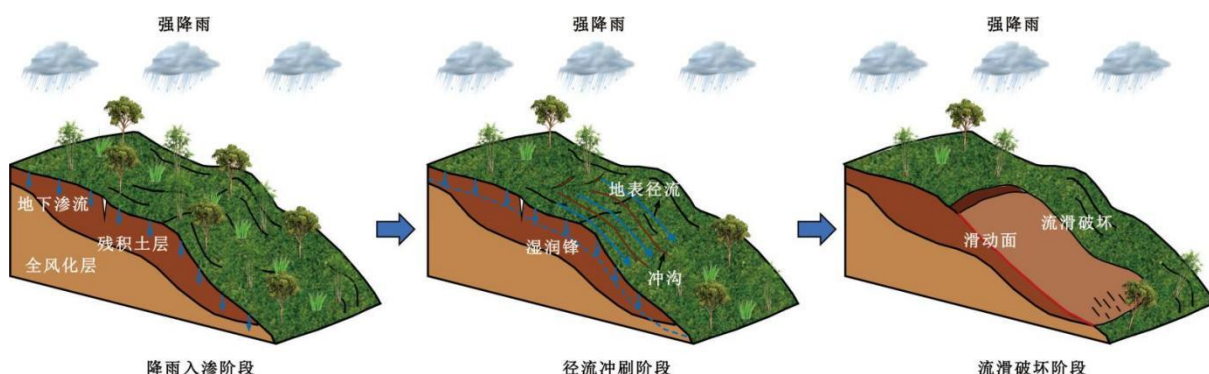


图 4 降雨型浅层滑坡失稳过程示意图（改自冯文凯等，2025）

Fig.4 Schematic diagram of failure process of rainfall-induced shallow landslide (revised from Feng *et al.*, 2025)

2.2 流域尺度

流域尺度研究强调滑坡在自然汇水系统内的整体响应与集群效应。东南地区独特的地质环境和气候条件使得滑坡的发生具有典型的时空聚集性和时间协同性特点。流域内降雨空间分布不均，高强度降雨常集中于特定地带，加之岩性差异、断裂带发育及地形汇流作用，滑坡易沿沟谷、断裂或陡坡集中分布（Lv *et al.*, 2024）。因此，群发滑坡的空间分布特点表现为在市县或流域范围内呈现出显著的区域集中性和地带性。由于形成地表径流或降雨入渗需要一定的时间，通常情况下，降雨的持续时间越久，其影响的地域广度、深度和程度越大。降雨持续时间与累积雨量共同决定流域响应的时效特征。东南地区降雨主要集中在台风季和梅雨季，但降雨诱发的滑坡并非全部发生在降雨期间，而是部分滑坡的启动时间与降雨存在一定的迟滞，滞后时长 1~10 天不等（豆红强等，2023）。滑坡的滞后效应与降雨特征呈非线性关系，在特定地质条件下，滞后时间随累积降雨量呈指数增长，但当超过临界阈值时可能转为即时响应。对于台风暴雨型滑坡而言，由于台风裹挟而来的降雨具有降雨量大、降雨强度大等特点，致使其总体上表现为“即雨即滑”，多与台风登陆-离境过程大致相同（刘艳辉等，2016）。当前对于群发滑坡时空演化规律的研究

主要采用两类技术路径：一是依托长时间序列的降雨记录与滑坡编录数据的历时分析方法，通过时空聚类识别流域滑坡演化阶段与触发阈值（Wu and Lin, 2021）；二是基于光学遥感、InSAR 和 GIS 等的空间分析技术，精准刻画滑坡的分布规律与变形特征（Gan *et al.* 2019; Kuang *et al.* 2022）。这两类方法通过多源数据融合与多尺度分析，为理解滑坡的时空演化机制提供了支撑。

群发滑坡易发性与危险性评价是量化刻画流域尺度滑坡孕育机制的重要手段，也是滑坡灾害预警和防治的重要基础（Havenith *et al.*, 2015）。群发滑坡易发性评价是指在区域尺度范围内，基于环境背景条件和历史滑坡数据，综合分析地质、水文、植被及人类活动等因素，通过数据驱动模型（统计模型，如逻辑回归等；机器学习，如随机森林、支持向量机、神经网络等）或物理机制模型（如无限斜坡模型），评估未来特定时间段内滑坡可能发生的空间概率，回答“哪里可能发生滑坡？”的问题。数据驱动模型因其鲁棒性、准确性最佳，在滑坡易发性评价中被广泛应用（Bui *et al.*, 2020; Sun *et al.*, 2020; 吴润泽等，2021; Huang *et al.*, 2022）。滑坡危险性评级是在易发性的基础上，进一步考虑时间概率和触发条件，通过降雨阈值模型、时间连续概率模型等，评估滑坡发生的时空概率及规模，

回答“某地在特定时间内发生滑坡的可能性有多大？可能造成多大影响？”的问题。在计算降水诱发滑坡的时间概率时，临界降雨阈值法是最常用的方法之一（Rossi *et al.*, 2017; Segoni *et al.*, 2018; Tang *et al.*, 2019; Gonzalez *et al.*, 2024）。然而，现有成果多偏重统计模型，尚缺乏基于机理与数据双驱动的成果。未来研究应在机理与数据双驱动框架下，构建多源信息融合的动态化评估体系，为群发滑坡预测与风险防控提供科学支撑。

2.3 群发滑坡多尺度孕育过程研究发展趋势

东南地区降雨型群发滑坡的多尺度孕育机制研究正趋向于呈现单体尺度与流域尺度深度融合的新特征。在单体尺度上，研究重点已从传统的稳定性分析转向降雨入参与边坡响应的动态耦合过程。在流域尺度上，研究范式正从静态的敏感性制图转向滑坡集群的时空演化规律分析，强调降雨空间分布、地形汇流网络与地质结构格局的系统性耦合对群发滑坡触发机制的影响。未来应进一步强化群发滑坡的跨尺度关联规律，揭示多因素耦合作用下流域群发滑坡位置、群发时间和链生过程与单体滑坡启滑模式的关联规律，构建多尺度耦合模型，为群发滑坡的时空预测提供理论支撑。

3 降雨型群发滑坡孕育机制研究方法

为了获取较为全面的群发滑坡研究文献，本文利用 Web of Science(WOS)核心数据库以“clustered landslides”为检索词，利用 CNKI 数据库以“群发滑坡”为检索词，对 1995 年 1 月 1 日至 2025 年 3 月 31 日的文献进行检索，得到了如图 5 所示的国内外群发滑坡研究领域的发文量随时间变化的趋势图。WOS 和 CNKI 数据库中早期关于群发滑坡研究的文献均较少，但在近十年发文量明显增多，且逐年增长。可见，群发滑坡研究热度一直在增加，越来越多的学者开始认识到群发滑坡研究的重要性。在阅读和分析文献过程中发现，降雨和地震是群发滑坡最主要的两大触发因素。在我国，尤其是东南地区是降雨型群发滑坡的高发区。近年来，随着科学技术的发展，关于群发滑坡的研究方法不断

丰富和完善，主要包括现场监测、物理模型试验、数值模拟和人工智能数据驱动四个方面。这些方法从不同角度揭示了降雨型群发滑坡的孕育机制和群发机理，为滑坡灾害的预警预报和防治提供了科学依据。

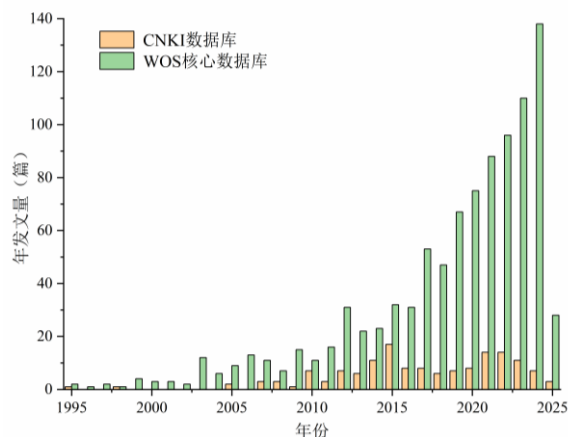


图 5 群发滑坡中英文文章发文量统计（1995-01-01 至 2025-03-31）

Fig.5 Statistics of Chinese and English articles on the cluster landslides (January 1, 1995 to March 31, 2025)

3.1 基于现场监测的研究方法

基于现场监测研究降雨型群发滑坡孕育机制是揭示斜坡破坏过程最直接的方法（Manconi and Giordan, 2016）。滑坡监测技术多种多样，涵盖地质测绘、工程地质测绘、水文地质测绘、遥感技术、摄影测量技术、地球物理技术、无线传感网络等（Lucieer *et al.*, 2014; Thirugnanam *et al.*, 2022; Auflīč *et al.*, 2023）。选择合适的监测技术需要考虑滑坡的类型、规模、运动速度以及监测目的。单一技术往往难以全面监测滑坡的复杂过程，因此要结合多种技术以获得更系统、全面的监测数据。滑坡监测内容主要包括：降雨监测，通过雨量计和气象站等实时获取降雨量、降雨强度和降雨历时等数据；地表位移监测，主要通过 GPS、全站仪、InSAR 等大地测量技术获取滑坡体位移数据；地下水位监测，依托钻孔水位计、渗压计等设备监测地下水位、孔隙水压力等参数；岩土体物理力学性质监测，利用土壤压力计、倾斜仪等监测岩土体应力应变和位移特征。此外，可利用三目视觉设备 24 小时连续拍摄山坡图像，便于利用三维重建技术生成滑坡体的

三维模型，并通过点云数据计算滑坡的实际位移（Nie *et al.*, 2025）。由于无人机能够快速获取高分辨率的滑坡区域航空图像，特别适用于人力难以到达的地区，并且可以在需要时随时进行飞行。因此，多将无人机与地质技术相结合，以获取关键数据完善监测网络（Lucieer *et al.*, 2014）。当前，许多滑坡监测技术还可通过物联网（IoT）实现自动化和智能化，从而提高监测效率和预警能力，例如，自动化的 GPS 监测系统、无线传感网络等技术均已表现出与 IoT 集成的潜力（Thirugnanam *et al.*, 2022）。

当前滑坡监测技术呈现多技术融合与物联网智能化发展趋势。现场监测的优势在于可以实时获取滑坡体数据，且数据真实可靠，能够反映滑坡动态变化过程，为滑坡灾害的预警预报提供直接依据。然而，现场监测也存在一些局限性，如监测设备的布设和维护成本较高、监测周期长、监测数据的精度和分辨率有限、监测难以覆盖大面积区域等，难以全面反映滑坡孕育机制的复杂性。

3.2 基于物理模型试验的研究方法

物理模型试验是研究滑坡孕育机制的重要手段，通过可控条件下模拟降雨入渗、地下水渗流及岩土体变形破坏等过程，可直观地揭示滑坡的动态演化规律（Li *et al.*, 2024; Terajima *et al.*, 2014）。试验系统通常由边坡模型、降雨模拟装置、数据监测系统及高清摄像设备组成，可分为概化斜坡室内模型试验和未扰动斜坡原位试验两类。东南地区边坡模型主要针对残积土滑坡（如花岗岩残积土）或多层结构斜坡（如残积层-全风化层）进行构建。室内试验多采用定制模型箱并在内部搭建概化边坡模型，通过控制岩土体力学参数以及坡体结构特征来模拟真实地质条件；原位试验则直接在现场典型滑坡体上开展试验，保留了天然岩土结构与水文特征。图 6 为考虑地质、气象、水文、生态多因素耦合作用的室内降雨型滑坡物理模型试验概念图。降雨模拟系统多采用人工降雨装置，通过调节降雨强度和历时来模拟实际降雨条件。部分研究还在边

坡中引入优先流模拟，以刻画降雨通过裂缝或渗透通道的快速入渗效应，揭示其对滑坡触发的主导作用（Hencher, 2010）。数据监测系统的监测参数涵盖水文和力学响应，通常在坡体内部和表面布设土压力传感器、孔隙水压力传感器、土体含水量传感器和位移传感器等，用于监测试验过程中坡体内部的应力状态、水压力状态、土体含水量和坡体表面位移情况。高速摄像或延时摄影用于全程记录滑坡的渐进破坏过程、表面裂缝扩展等情况，从而使滑坡过程可视化、位移场量化，为揭示降雨型滑坡孕育机制提供重要依据。

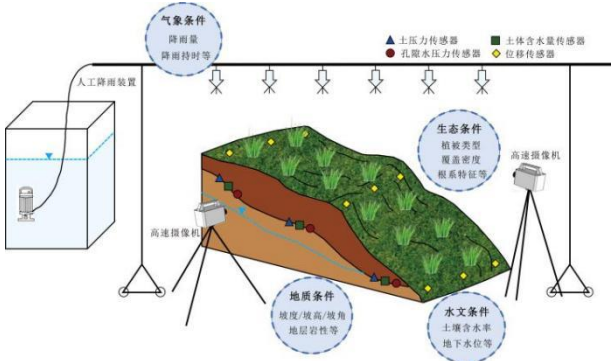


图 6 多因素耦合作用下滑坡物理模型试验概念图
Fig.6 Conceptual diagram of landslide physical model test under multi-factor coupling effect

目前国内主要通过开展单体尺度滑坡的物理模型试验来研究其孕育机制，并在地质、水文和生态等因素对滑坡孕育的影响方面取得了一定的进展。在地质因素方面，Li *et al.*（2024）构建了三种不同结构条件的边坡模型（含接触面、含接触面和垂直节理、含弱夹层和垂直节理），模拟间歇性降雨模式，阐明了结构面在降雨诱发滑坡中的控滑作用；冯文凯等（2022）以广东省龙川县贝岭地区群发性滑坡为背景，选择具有典型双层结构（残积层+花岗岩风化层）的斜坡开展现场物理模型试验，模拟了不同降雨强度的持续多次降雨与间断降雨工况，揭示了降雨强度、岩土体性质和斜坡结构共同控制的滑坡触发阈值。在水文条件方面，Terajima *et al.*（2014）通过砂质斜坡室内模型试验，结合孔隙水压力与含水量监测，提出了考虑渗流力与剪切力传递的降雨型浅层滑坡稳定性分析方法；吴善百

等(2020)通过室内试验,研究了初始干密度、降雨强度及历时对花岗岩残积土滑坡起动模式的影响;Zhang *et al.* (2019)通过模拟台风“鲇鱼”的降雨过程,并设置人工沟渠模拟优先入渗通道,发现优先流对边坡稳定性的影响显著大于坡面均匀入渗;Tan *et al.* (2024)针对广东花岗岩残积土滑坡开展大型原位试验,揭示了强降雨条件下斜坡的变形演化 and 失效机制。在生态条件方面,Song *et al.* (2024)、Song 和 Tan (2024)开展了考虑生态效应的滑坡物理模型试验,探讨了植物根系的固坡作用,得出不同根系形态对滑坡加固效果的影响。

物理模型试验的优势在于可控性强,能够直观地模拟滑坡体在不同工况下的变形破坏过程,揭示滑坡孕育的物理本质。但也存在一些局限性,如模型尺寸效应难以完全避免、简化模型难以完全反映边坡真实情况、试验成本高等。近年来国内外学者针对降雨型滑坡孕育机制开展了大量研究,但研究对象仍局限于单体尺度滑坡,并尚未充分考虑地质、水文、生态等多因素的耦合互馈作用,且从区域、单体等多尺度角度开展降雨型群发滑坡孕育机制研究的成果较少。因此,亟需构建群发滑坡多尺度孕育模型,研究多因素耦合作用下群发滑坡孕育机制和群发机理。

3.3 基于数值模拟的研究方法

数值模拟方法基于离散介质或连续介质理论,在模型试验与现场监测数据的基础上,系统模拟降雨入渗过程、地下水动态变化、边坡稳定性演化及滑坡运动全过程,为滑坡灾害的机理分析与预测提供定量化依据(Lollino *et al.*, 2016; Bru *et al.*, 2018; Scaringi *et al.*, 2018; Xie *et al.*, 2021)。在连续介质模拟方面,Geo-Studio、Plaxis、ABAQUS 等软件被用于构建岩土体力学模型模拟滑坡变形破坏过程,例如魏新平等(2024)提取坡长、坡度、岩土分层几何参数和物理力学参数,基于 Midas GTS/NX 构建二维/三维滑坡数值模型,分析降雨前后边坡稳定性系数的动态演变。在离散介质模拟方面,利用 PFC2D/3D、3DEC 等颗粒离散模型再现

滑坡运动特征,如 Lo *et al.* (2016)通过 PFC3D 重现降雨诱发的台湾坪广溪滑坡动力学过程;Nie *et al.* (2025)基于三维重建技术构建精细化颗粒模型,研究在极端降雨条件下滑坡体的位移、速度、含水量和运动路径等特征。在多场耦合模型模拟方面,通过耦合渗流场和应力场等模拟降雨入渗与边坡动力响应,如 Moradi *et al.* (2024)对未考虑地下水流动与土力学动态相互作用的三种简化模型和完全耦合的两相流流体力学模型进行了比较研究,验证了不同模型局部安全系数的一致性;Liu *et al.* (2025)采用流固耦合数值方法结合 InSAR 变形监测数据,揭示了降雨与库水位变动对滑坡变形机制的协同影响。

此外,SINMAP 和 TRIGRS 数值模型基于 GIS 平台,耦合稳态水文模型和无限斜坡稳定性评价模型,非常适合于评价区域性降雨型浅层型滑坡的可能性(姚志永,2018)。许多学者分别基于 SINMAP (康超等,2011;庄建琦等,2013)或 TRIGRS (Iverson *et al.*, 2000;丛威青等,2008;夏蒙等,2013)模型开展区域浅层滑坡易发性和危险性评价工作。数值模拟方法在揭示降雨参数与地质环境因素的耦合机制方面也取得了显著进展(Yu *et al.*, 2024),Wang *et al.* (2024)通过有限元方法模拟降雨渗透过程,选择降雨强度、降雨持时、斜坡高度、坡角和土壤饱和渗透系数五个影响因素,进行敏感性分析,识别了斜坡水文响应的主要控制因素;Zhuang *et al.* (2023)使用有限元软件考虑坡表渗流、优先渗透、风荷载和根系加固等因素对斜坡稳定性的影响,模拟了台风期间斜坡稳定性的瞬态变化,揭示了裂缝和优先渗透路径对深部滑坡启动的关键作用;Wang *et al.* (2024)使用有限元模拟滑坡的渗流场,离散元模拟滑坡的三维破坏过程,揭示了降雨及裂缝对滑坡地下水渗流场和稳定性的重要影响,并预测了滑坡的滑动趋势。

数值模拟的优势在于能够低成本地复现复杂工况下的滑坡演化过程,但也存在模型参数获取困难、计算结果不确定性较大等局限性,特别是在多

场耦合条件下模拟结果的精度和可靠性仍需进一步提升。未来研究需加强多尺度建模方法创新,并注重数值模拟与物理模型试验、现场监测的协同验证,以更准确地揭示降雨型群发滑坡的孕育机制。

3.4 基于人工智能数据驱动的研究方法

基于人工智能数据驱动手段研究降雨型群发滑坡孕育机制已成为近年来的研究热点,该方法通过整合历史滑坡数据、环境因子数据及遥感监测数据等,构建智能模型用于滑坡易发性评价和预测预警等工作。应用机器学习方法开展滑坡易发性评价研究位居 2020 年地球科学领域 Top10 热点前沿发展趋势榜首(窦杰等, 2023)。早期提出的区域滑坡易发性评价主要依赖数理统计模型和浅层机器学习模型。随着人工智能技术的发展,支持向量机(SVM)、随机森林(RF)、人工神经网络(ANN)等传统机器学习模型表现出较强的适应性(Yilmaz, 2009; Marjanović *et al.*, 2011)。此外,集成学习方法通过融合多模型,相较于单个模型进一步提升了预测能力(Thai Pham *et al.*, 2019)。深度学习模型因其强大的非线性特征提取能力,逐渐成为研究热点。Sameen *et al.* (2020) 利用贝叶斯优化的一维卷积神经网络对滑坡敏感性进行分析,表明卷积神经网络(CNN)算法表现优于 ANN 和 SVM; 王世宝等(2022)、Habumugisha *et al.* (2022) 分别通过 CNN 和深度神经网络(DNN)证实了深度学习在复杂地形中的优越性; 王毅等(2021)进一步对比 1D/2D/3D-CNN 与传统机器学习方法在滑坡易发性评价上的应用效果,证明所有 CNN 模型的滑坡预测精度都高于传统机器学习方法。由于滑坡孕育机制受地形、水文、植被及人类活动等多因素耦合影响(Goetz *et al.*, 2015), 学者们通过因子筛选与模型融合优化预测效果,例如 Dou *et al.* (2015) 通过确定性因子(CF)优化输入因子并结合 ANN, 有效提高了滑坡敏感性分析的准确性。

19 世纪左右滑坡预测预警主要以物理方法为主,自 1980 年开始,基于统计学的区域滑坡预警方式得到应用,近年,机器学习与深度学习等人工

智能算法被逐步运用到区域滑坡预警的研究中。随机森林(RF)模型在滑坡预警中通过融合降雨与地质环境等多源因子,其预测精度显著优于传统降雨阈值法(Kuradusenge *et al.*, 2020; 刘艳辉等, 2021)。深度学习模型在特征自动提取方面表现突出, Huang *et al.* (2018) 提出了一种具有 Softmax 分类器和 Dropout 机制的深度置信网络(DBN), 其气象预警精度显著优于 BP 神经网络及其改进算法。当前滑坡预警也已逐渐从单一降雨阈值模型发展为多参数动态综合评估,例如王伟等(2022)综合考虑历时滑坡、监测数据、降雨和库水位等因素,构建了多算法耦合的滑坡敏感性预警模型; 杨宗佶等(2022)基于非饱和水-力耦合分析,提出了融合降雨强度概率、基质吸力和地形参数的实时预警系统。GNSS、裂缝计等监测技术为滑坡智能预警模型提供了高精度动态数据输入,并通过多源数据融合与多阈值响应机制显著提升了预警可靠性及临滑状态识别能力(张勤等, 2022; 白洁等, 2020; 张海艳等, 2022)。此外,部分研究还尝试将物理模型与人工智能方法结合以增强机理解释性,如何满潮等(2021)提出了“牛顿力变化”预警理论,研发了融合力学机制与数据驱动的滑坡远程监测预警新系统。

人工智能数据驱动具有能够处理海量滑坡数据、识别滑坡特征、挖掘潜在规律、预测精度较高等优势。然而,也存在一些局限性,如模型可解释性不足、数据质量依赖性强,尤其在多因素耦合机制解析方面仍面临挑战。未来研究需融合物理模型与数据驱动方法,发展可解释的人工智能技术,以更加全面地揭示区域群发滑坡多因素多尺度孕育机理。

4 降雨型群发滑坡孕育机制研究的挑战与展望

4.1 面临的挑战

(1) 群发滑坡多因素耦合作用机制

降雨型群发滑坡的发生是地质条件、气象水文、

生态环境与人类活动等多因素耦合作用的结果,且各因素间的相互作用呈现高度的时空非线性特征。当前研究更倾向于将各滑坡影响因素分开考虑,往往忽视了它们在特定时空背景下的耦合效应。这种分散分析方式可能导致多因素动态耦合机制认识不足,制约滑坡预警模型的精度提升和风险评估的可靠性。因此,揭示多因素耦合作用下群发滑坡的孕育机制仍是当前研究中的一大难点。

(2) 群发滑坡多尺度模型跨尺度衔接

东南地区降雨型群发滑坡的孕育过程涉及从单体到流域的多尺度演变,但各尺度间的关联关系尚未完全阐明。微观尺度的土-水作用过程如何影响宏观单体滑坡行为,单体滑坡又如何引发流域级的关联效应,这些关键科学问题制约着对群发滑坡孕育机制的深刻理解。此外,不同尺度滑坡孕育模型参数体系的差异性、多源监测数据的时空分辨率不匹配,以及气候变化导致的降雨空间异质性,也加剧了多尺度建模的难度。这种尺度断层问题使得对群发滑坡孕育机制的理解出现偏差,导致预警系统难以实现局部精准性与区域覆盖性的统一。

4.2 未来的展望

(1) 群发滑坡多因素互馈机制和协同演化物理力学过程

未来研究应关注气候变化背景下地质条件、气象水文、生态环境和人类活动等因素的耦合作用过程。考虑构建非平稳降雨特征的“地质-水文-生态”动态耦合模型,量化各因素间的非线性作用关系。同时,研究台风暴雨型和梅雨型等不同降雨模式与滑坡体裂隙网络动态渗透和岩土体强度劣化的耦合表征,发展能够反映气候变化背景下极端降雨与地质条件协同演化的物理力学理论。通过将多场耦合物理模型试验与数值模拟相结合,阐明多因素耦合作用下群发滑坡的链式反应机制,为揭示复杂环境下区域群发滑坡的孕育机制提供理论支撑。

(2) 群发滑坡多尺度孕育模型构建

厘清地质、水文、生态等多因素耦合作用下流域群发滑坡位置、群发时间和链生过程与单体滑坡

启动模式的关联规律,构建多尺度孕育模型至关重要。因此,未来研究要重点突破多源数据融合与跨尺度数据整合难题,借助空间遥感、人工智能和理论分析等手段,构建多因素耦合作用下群发滑坡多尺度孕育模型,并致力于提升模型的准确性、可操作性、普适性和适应性,以应对全球气候变化背景下的群发滑坡风险。

5 结论

东南地区独特的地质、气象、水文、生态和人类活动等使得滑坡灾害具有典型的突发性、多发性和群发性等特点,加之其多因素耦合的复杂性和多尺度特性,使得降雨型群发滑坡孕育机制成为东南地区地质灾害研究领域的重要课题。近年来,随着研究方法的不断进步,学者们对降雨型群发滑坡的孕育机制进行了广泛而深入的探讨,取得了显著进展。本文通过多因素耦合作用和多尺度孕育过程两方面,系统综述了降雨型群发滑坡灾害的研究进展,并在此基础上总结了群发滑坡孕育机制研究的4种主要手段,得到以下主要结论:

(1) 多因素耦合作用是揭示滑坡孕育机制的关键。降雨型群发滑坡的孕育过程涉及多种因素的耦合作用,包括地质条件、气象水文、生态环境和人类活动等,这些因素在不同时空尺度上相互交织,共同决定了滑坡的发育和分布。然而,现有研究多侧重单一因素对滑坡发生和发展的影响,尚未充分考虑地质、水文、生态等多因素的耦合互馈关系。未来,随着全球气候及人类活动强度的持续变化,亟需深入探讨多因素耦合的长期累积效应及其对群发滑坡孕育过程的调控机制。

(2) 多尺度研究是揭示群发滑坡孕育机制的重要途径。降雨型群发滑坡是区域降雨与地质、水文、生态等时空不均匀因素耦合作用的结果,仅从单体尺度无法解释群发滑坡区域尺度孕灾机制及灾变演化机理。从单体滑坡尺度到流域群发尺度,不同尺度上滑坡的孕育机制存在显著差异但又相互关联。但现有研究却很少关注到多因素耦合作用下流域群发滑坡位置、群发时间和链生过程与单体

滑坡启滑模式的关联规律。未来降雨型群发滑坡孕育机制研究应呈现跨尺度深度融合的新特征,构建单体滑坡失稳机制与流域滑坡分布规律的多因素多尺度耦合模型。

(3) 现场监测、物理模型试验、数值模拟和人工智能数据驱动方法在揭示滑坡孕育机制方面发挥了重要作用。现场监测通过实时获取滑坡体动态参数,为滑坡灾害的预警预报提供了直接依据;物理模型试验通过模拟降雨入渗、地下水渗流和岩土体变形破坏等过程,可揭示滑坡孕育机制的物理本质;数值模拟通过建立数值模型,全面模拟滑坡体的变形破坏过程,可表征滑坡孕育机制的复杂性;人工智能方法则通过分析大量滑坡数据,从而识别滑坡特征、预测滑坡孕育过程。但这些方法,尤其物理模型试验和数值模拟,现有的研究对象仍多为单体滑坡,忽略了群发滑坡的空间异质性与连锁效应,同时也存在各影响因素耦合机制的简化问题。未来应尝试建立多尺度流域物理模型和数值模型,突破从“单点”到“集群”、从“静态”到“动态”的研究瓶颈,为区域滑坡灾害防控提供科学支撑。

References

- An, R., Kong, L., Zhang, X., et al., 2022. Effects of Dry-wet Cycles on Three-dimensional Pore Structure and Permeability Characteristics of Granite Residual Soil Using X-ray Micro Computed Tomography. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 14(3): 851–860. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.10.004>
- Auflič, M. J., Herrera, G., Mateos, R. M., et al., 2023. Landslide Monitoring Techniques in the Geological Surveys of Europe. *Landslides*, 20(5): 951–965. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-02007-1>
- Ayalew, L., Yamagishi, H., 2005. The Application of GIS-based Logistic Regression for Landslide Susceptibility Mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. *Geomorphology*, 65(1): 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.06.010>
- Bai, H. L., 2022. Study on rainfall initiation mechanism and early-warning model of granite residual soil landslide (Dissertation). *Chengdu University of Technology* (in Chinese with English abstract).
- Bai, J., Ju, N. P., Zhang, C. Q., et al., 2020. Characteristics and Successful Early Warning Case of Xingyi Landslide in Guizhou Province. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1246–1258 (in Chinese with English abstract).
- Bru, G., Fernández-Merodo, J. A., García-Davalillo, J. C., et al., 2018. Site Scale Modeling of Slow-moving Landslides, A 3D Viscoplastic Finite Element Modeling Approach. *Landslides*, 15(2): 257–272. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0867-y>
- Bui, D. T., Tsangaratos, P., Nguyen, V. T., et al., 2020. Comparing the Prediction Performance of a Deep Learning Neural Network Model with Conventional Machine Learning Models in Landslide Susceptibility Assessment. *Catena*, 188: 104426. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426>
- 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).
- Chen, S., Liu, H. J., You, Y. L., et al., 2014. Evaluation of High-Resolution Precipitation Estimates from Satellites during July 2012 Beijing Flood Event Using Dense Rain Gauge Observations. *Plos One*, 9(4): e89681. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089681>
- Chen, X. H., Ma, T. H., Li, C. J., et al., 2018. The Catastrophic 13 November 2015 Rock-debris Slide in Lidong, South-western Zhejiang (China): A Landslide Triggered by a Combination of Antecedent Rainfall and Triggering Rainfall. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 9(1): 608–623. <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1455750>
- Conforti, M., Pascale, S., Robustelli, G., et al., 2014. Evaluation of Prediction Capability of the Artificial Neural Networks for Mapping Landslide Susceptibility in the Turbolo River Catchment (Northern Calabria, Italy). *Catena*, 113: 236–250. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.08.006>
- Cong, W. Q., Li, T. F., Pan, M., et al., 2008. Research on Dynamic Predictive Model of Regional Rainfall-Triggered Geologic Hazard Based on Unsaturated Flow Theory. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 44(2): 212–216 (in Chinese with English abstract).
- Dai, H. C., 2022. Study on formation mechanism and

- movement process of landslide debris flow in No. 1 gully of Mibei village, Longchuan County (Dissertation). *Chengdu University of Technology* (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>
- Ding, H., Xue, L., Shang, J. S., et al., 2024. Study on Synergistic Action of Tap-like Arbor Root System and Anti-slide piles by Physical Model Experiment of Landslides. *Landslides*, 21(7): 1707–1717. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02248-2>
- Dou, H. Q., Jian, W. X., Wang, H., et al., 2023. Review of failure mechanism and early warning model of landslides induced by typhoon and associated rainstorm in high vegetation coverage area. *Journal of Natural Disasters*, 32(2): 1–15 (in Chinese with English abstract).
- Dou, J., Xiang, Z. L., Xu, Q., et al., 2023. Application and Development Trend of Machine Learning in Landslide Intelligent Disaster Prevention and Mitigation. *Earth Science*, 48(5): 1657–1674 (in Chinese with English abstract).
- Dou, J., Yamagishi, H., Pourghasemi, H. R., et al., 2015. An Integrated Artificial Neural Network Model for the Landslide Susceptibility Assessment of Osado Island, Japan. *Natural Hazards*, 78(3): 1749–1776. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1799-2>
- El-Hadidy, S. M., 2021. The Relationship between Urban Heat Islands and Geological Hazards in Mokattam Plateau, Cairo, Egypt. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3): 547–557. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.02.004>
- Feng, H. J., Zhou, A. G., Tang, X. M., et al., 2017. Susceptibility Analysis of Factors Controlling Rainfall-triggered Landslides Using Certainty Factor Method. *Journal of Engineering Geology*, 25(2): 436–446 (in Chinese with English abstract).
- 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(8): 1957–1970. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01904-9>
- Feng, W. K., Hu, R., Bai, H. L., et al., 2022. Formation Mechanism of Rainfall Residual Layer of Granite Landslide. *Science Technology and Engineering*, 22(18): 7799–7809 (in Chinese with English abstract).
- Feng, W. K., Zhao, J. C., Yi, X. Y., et al., 2025. Characteristics and Drivers of Clustered Landslides Induced by the Extreme Rainstorm on June 16 in the Fujian-Guangdong-Jiangxi Junction Area. *Earth Science*, 2025-06-03: 1-16. (in Chinese with English abstract).
- Ferrario, M. F., Livio, F., 2024. Rapid Mapping of Landslides Induced by Heavy Rainfall in the Emilia-Romagna (Italy) Region in May 2023. *Remote Sensing*, 16(1): 122. <https://doi.org/10.3390/rs16010122>
- Gan, B. R., Yang, X. G., Zhou, J. W., 2019. GIS-based Remote Sensing Analysis of the Spatial-temporal Evolution of Landslides in A Hydropower Reservoir in Southwest China. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 10(1): 2291–2312. <https://doi.org/10.1080/19475705.2019.1685599>
- Gariano, S. L., Guzzetti, F., 2016. Landslides in A Changing Climate. *Earth Science Reviews*, 162: 227–252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011>
- Goetz, J. N., Brenning, A., Petschko, H., et al., 2015. Evaluating Machine Learning and Statistical Prediction Techniques for Landslide Susceptibility Modeling. *Computers & Geosciences*, 81: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.04.007>
- Gonzalez, F. C. G., Cavacanti, M. D. C. R., Nahas Ribeiro, W., et al., 2024. A Systematic Review on Rainfall Thresholds for Landslides Occurrence. *Heliyon*, 10(1): e23247. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23247>
- Gu, T. F., Wang, J. D., Lin, H., et al., 2021. The Spatiotemporal Relationship between Landslides and Mechanisms at the Heifangtai Terrace, Northwest China. *Water*, 13(22): 3275. <https://doi.org/10.3390/w13223275>
- Guillard, C., Zezere, J., 2012. Landslide Susceptibility Assessment and Validation in the Framework of Municipal Planning in Portugal: The Case of Loures Municipality. *Environmental Management*, 50(4): 721–735. <https://doi.org/10.1007/s00267-012-9921-7>
- Habumugisha, J. M., Chen, N. S., Rahman, M., et al., 2022. Landslide Susceptibility Mapping with Deep Learning Algorithms. *Sustainability*, 14(3): 1734. <https://doi.org/10.3390/su14031734>
- Han, S., Liu, M. J., Wu, J. B., et al., 2022. Risk assessment of slope disasters induced by typhoon-rainfall in the

- southeast coastal area, China: A case study of the Shiyang north slope. *Journal of Geomechanics*, 28(4): 583–595(in Chinese with English abstract).
- Havenith, H.B., Torgoev, A., Schlögel, R., et al., 2015. Tien Shan Geohazards Database: Landslide Susceptibility Analysis. *Geomorphology*, 249: 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.019>
- He, M. C., Ren, S. L., Tao, Z. G., 2021. Remote monitoring and forecasting system of Newton force for landslide geological hazards and its engineering application. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(11): 2161–2172(in Chinese with English abstract).
- Hencher, S. R., 2010. Preferential Flow Paths Through Soil and Rock and Their Association with Landslides. *Hydrological Processes*, 24(12): 1610–1630. <https://doi.org/10.1002/hyp.7721>
- Hu, B. L., Su, L. J., Zhang, C. L., et al., 2024. Mobility Characteristics of Rainfall-triggered Shallow Landslides in a Forest Area in Mengdong, China. *Landslides*, 21(9): 2101–2117. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02267-z>
- Huang, F. M., Chen, J. W., Liu, W. P., et al., 2022. Regional Rainfall-induced Landslide Hazard Warning Based on Landslide Susceptibility Mapping and A Critical Rainfall Threshold. *Geomorphology*, 408: 108236. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2022.108236>
- Huang, L., Xiang, L. Y., 2018. Method for Meteorological Early Warning of Precipitation-Induced Landslides Based on Deep Neural Network. *Neural Process Letters*, 48(2): 1243–1260. <https://doi.org/10.1007/s11063-017-9778-0>
- Huang, Y., He, Z. Y., 2025. Research progress on rainfall-triggered landslide risk assessment under the context of climate change. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(2): 13–27(in Chinese with English abstract).
- Iverson, R. M., 2000. Landslide Triggering by Rain Infiltration. *Water Resources Research*, 36(7): 1897–1910. <https://doi.org/10.1029/2000WR900090>
- Jian, W. B., Hu, H. R., Luo, Y. H., et al., 2017. Experimental Study on Deterioration of Granitic Residual Soil Strength in Wetting-Drying Cycles. *Journal of Engineering Geology*, 25(3): 592–597(in Chinese with English abstract).
- Jiang, T., Cui, S. H., Ran, Y., 2023. Analysis of landslide mechanism induced by excavation and rainfall: A case study of the Qianjin square landslide in Wanyuan City, Sichuan Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 34(3): 20–30(in Chinese with English abstract).
- Jiang, T., Li, L. F., Xue, L., et al., 2022. Physical Model Experiment on Slope Protection Effect of Arbor Species System. *Science Technology and Engineering*, 22(35): 15546–15553(in Chinese with English abstract).
- Kang, C., Chen, W. W., Zhang, F. Y., et al., 2011. Application of deterministic model to analyzing stability of hillslope of loess gully area. *Rock and Soil Mechanics*, 32(1): 207–210, 260(in Chinese with English abstract).
- Kang, J. T., Wu, Q., Tang, H. M., et al., 2019. Strength Degradation Mechanism of Soft and Hard Interbedded Rock Masses of Badong Formation Caused by Rock/Discontinuity Degradation. *Earth Science*, 44(11): 3950–3960(in Chinese with English abstract).
- Kuang, J. M., Ng, A. H. M., Ge, L. L., 2022. Displacement Characterization and Spatial-Temporal Evolution of the 2020 Aniangzhai Landslide in Danba County Using Time-Series InSAR and Multi-Temporal Optical Dataset. *Remote Sensing*, 14(1): 68. <https://doi.org/10.3390/rs14010068>
- Kuradusenge, M., Kumaran, S., Zennaro, M., 2020. Rainfall-Induced Landslide Prediction Using Machine Learning Models: The Case of Ngororero District, Rwanda. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(11): 4147. <https://doi.org/10.3390/ijerph17114147>
- Laimer, H. J., 2017. Anthropogenically Induced Landslides – A Challenge for Railway Infrastructure in Mountainous Regions. *Engineering Geology*, 222: 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.015>
- Lan, H. X., Wang, L. J., Zhou, C. H., 2003. Study on the key landslide factor by means of GIS in Xiaojiang Valley, Yunnan. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 14(1): 103–109(in Chinese with English abstract).
- Lee, J. S., Pradhan, A. M. S., Song, C. H., et al., 2024. Lithological Terrain-based Rainfall Thresholds for Possible Initiation of Shallow Landslides in South Korea. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 38(1): 175–191. <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02568-0>
- Lei, W. K., Dong, H. Y., Chen, P., et al., 2020. Improved Green-Ampt infiltration model of soil slope considering inclination. *Hydro-Science and Engineering*, 6: 101–

- 107(in Chinese).
- Li, C. S., Kong, L. W., Zhang, B. X., et al., 2024. Determination of Damage Evolution Characteristics in Granite Residual Soil Shear Bands by Micro-CT-based Advanced Digital Volume Correlation. *Engineering Geology*, 333: 107505. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107505>
- Li, C., Zhang, R. T., Zhu, J. B., et al., 2024. Model Test Study on Response of Weathered Rock Slope to Rainfall Infiltration under Different Conditions. *Journal of Earth Science*, 35(4): 1316-1333. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1704-3>
- Li, K., Sun, P., Wang, H. J., et al., 2024. Insight into Failure Mechanisms of Rainfall Induced Mudstone Landslide Controlled by Structural Planes: from Laboratory Experiments. *Engineering Geology*, 343: 107774. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107774>
- Li, M. H., Zhang, L., Dong, J., et al., 2019. Characterization of pre- and post-failure displacements of the Huangnibazi landslide in Li County with multi-source satellite observations. *Engineering Geology*, 257: 105140. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.05.017>
- Li, Q. Q., Wang, W., Huang, L., et al., 2022. Analysis on lag effect of typhoon-induced landslide: A case study of typhoon “Lekima” in Qingtian County, Zhejiang Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 33(6): 10–19(in Chinese with English abstract).
- Li, T. F., Li, X., Yuan, W. N., et al., 2011. Current Status and Prospects of Landslide Geohazards Induced by Underground Mining. *Journal of Engineering Geology*, 19(06): 831-838(in Chinese with English abstract).
- Liu, C., Shi, B., Shao, Y. X., et al., 2013. Experimental and Numerical Investigation of the Effect of the Urban Heat Island on Slope Stability. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 72(3): 303–310. <https://doi.org/10.1007/s10064-013-0476-5>
- Liu, G., Wang, B., Sun, Q., et al., 2025. New Insights Into the Reservoir Landslide Deformation Mechanism From InSAR and Numerical Simulation Technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 18: 2908–2927. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3523294>
- Liu, Y. H., Ma, S. W., Dong, L. H., et al., 2024. A comparative study of regional rainfall-induced landslide early warning models based on RF、CNN and MLP algorithms. *Frontiers in Earth Science*, 12: 1419421. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1419421>
- 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(2): 992–1002. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02467-4>
- Liu, Y. H., Fang, R. K., Su, Y. C., et al., 2021. Machine learning Based Model for Warning of Regional Landslide Disasters. *Journal of Engineering Geology*, 29(1): 116–124(in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. H., Wen, M. S., Su, Y. C., et al., 2016. Characteristics of geo-hazards induced by typhoon rainstorm and evaluation of geo-hazards early warning. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 43(5): 119–126(in Chinese with English abstract).
- Lo, C. M., Lee, C. F., Huang, W. K., 2016. Failure Mechanism Analysis of Rainfall-induced Landslide at Pingguang Stream in Taiwan: Mapping, Investigation, and Numerical Simulation. *Environmental Earth Sciences*, 75(21): 1422. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6228-7>
- Lollino, P., Cotecchia, F., Elia, G., et al., 2016. Interpretation of Landslide Mechanisms Based on Numerical Modelling: Two Case-histories. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9): 1032–1053. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.985851>
- Lucieer, A., Jong, S. M. D., Turner, D., 2014. Mapping Landslide Displacements Using Structure from Motion (SfM) and Image Correlation of Multi-temporal UAV Photography. *Progress in Physical Geography*, 38(1): 97–116. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>
- Luo, Y., He, S. M., He, J. C., 2014. Effect of Rainfall Patterns on Stability of Shallow Landslide. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 39(9): 1357–1363(in Chinese with English abstract).
- Lv, 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(11): 2725–2740. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02314-9>
- Ma, T. H., Li, C. J., Lu, Z. M., et al., 2015. Rainfall Intensity–duration Thresholds for the Initiation of Landslides in Zhejiang Province, China. *Geomorphology*, 245: 193–206. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.05.016>
- Ma, X. J., Yu, Z. H., Liu, M., et al., 2025. Mechanical Properties and Critical State Characteristics of Maize

- Root-soil Composites at Different Soil Depths. *Biosystems Engineering*, 250: 163–173. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.12.014>
- Ma, Y., Yu, B., He, Y. X., et al., 2023. Rainfall threshold and development characteristics of shallow landslides induced by rainfall: A case study of the "June 10th, 2019" disaster in the Dajishan area, Quannan County, Jiangxi Province. *Geology and Exploration*, 59(5): 1065–1073(in Chinese).
- Manconi, A., Giordan, D., 2016. Landslide Failure Forecast in Near-real-time. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(2): 639–648. <https://doi.org/10.1080/19475705.2014.942388>
- Marjanović, M., Kovačević, M., Bajat, B., et al., 2011. Landslide Susceptibility Assessment Using SVM Machine Learning Algorithm. *Engineering Geology*, 123(3): 225–234. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.09.006>
- Martelloni, G., Segoni, S., Fanti, R., et al., 2012. Rainfall Thresholds for the Forecasting of Landslide Occurrence at Regional Scale. *Landslides*, 9(4): 485–495. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0308-2>
- Meng, S. Y., Zhang, T. Y., Zhao, G. Q., et al., 2025. Time-varying Mechanisms of Hydraulic Properties of Root-soil Composites under Plant Root Decay. *Journal of Hydrology*, 658: 133192. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133192>
- Meng, Z., Wu, Q., Lu, S., et al., 2022. Investigation on Microstructure Deterioration of Sliding-prone Formation in Badong Formation Based on CT Scanning. *Safety and Environmental Engineering*, 29(4): 11–23, 45(in Chinese with English abstract).
- Moradi, S., Huisman, J. A., Vereecken, H., et al., 2024. Comparing Different Coupling and Modeling Strategies in Hydromechanical Models for Slope Stability Assessment. *Water*, 16(2): 312. <https://doi.org/10.3390/w16020312>
- Ng, C. W. W., Wang, B., Tung, Y. K., 2001. Three-dimensional Numerical Investigations of Groundwater Responses in an Unsaturated Slope Subjected to Various Rainfall Patterns. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(5): 1049–1062. <https://doi.org/10.1139/t01-057>
- Nie, W., Tian, C. C., Song, D. Q., et al., 2025. Disaster Process and Multisource Information Monitoring and Warning Method for Rainfall-triggered Landslide: a Case Study in the Southeastern Coastal Area of China. *Natural Hazards*, 121(3): 2535–2564. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06897-3>
- Pradhan, B., Lee, S., 2010. Landslide susceptibility assessment and factor effect analysis: backpropagation artificial neural networks and their comparison with frequency ratio and bivariate logistic regression modelling. *Environmental Modelling & Software*, 25(6): 747–759. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.016>
- Prasetyaningtiyas, G. A., Kamchoom, V., Leung, A. K., et al., 2024. Hydromechanical Behaviour of A Slope Reinforced by Grass Roots under Rainfall Conditions. *Ecological Engineering*, 209: 107427. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107427>
- Romeo, S., D'Angiò, D., Fraccica, A., et al., 2023. Investigation and preliminary assessment of the Casamicciola landslide in the island of Ischia (Italy) on November 26, 2022. *Landslides*, 20(6): 1265–1276. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02064-0>
- Rossi, M., Luciani, S., Valigi, D., et al., 2017. Statistical Approaches for the Definition of Landslide Rainfall Thresholds and Their Uncertainty Using Rain Gauge and Satellite Data. *Geomorphology*, 285: 16–27. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.02.001>
- Sameen, M. I., Pradhan, B., Lee, S., 2020. Application of Convolutional Neural Networks Featuring Bayesian Optimization for Landslide Susceptibility Assessment. *Catena*, 186: 104249. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104249>
- Sato, T., Shuin, Y., 2025. Variation in the frequency and characteristics of landslides in response to changes in forest cover and rainfall in Japan over the last century: A literature review. *Catena*, 249: 108639. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108639>
- Scaringi, G., Fan, X. M., Xu, Q., et al., 2018. Some Considerations on the Use of Numerical Methods to Simulate Past Landslides and Possible New Failures: the Case of the Recent Xinmo Landslide (Sichuan, China). *Landslides*, 15(7): 1359–1375. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0953-9>
- Segoni, S., Piciullo, L., Gariano, S. L., 2018. A Review of the Recent Literature on Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence. *Landslides*, 15(8): 1483–1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Segoni, S., Ajin, R. S., Nocentini, N., et al., 2024. Insights Gained from the Review of Landslide Susceptibility Assessment Studies in Italy. *Remote Sensing*, 16(23): 4491. <https://doi.org/10.3390/rs16234491>

- Shen, J., Dong, Y. S., Jian, W. B., et al., 2020. Study on Evolution Process of Landslides Triggering by Typhoon Rainstorm. *Journal of Engineering Geology*, 28(6): 1290–1299(in Chinese with English abstract).
- Singh, A. K., 2010. Landslide Management: Concept and Philosophy. *Disaster Prevention and Management*, 19(1): 119–134. <https://doi.org/10.1108/09653561011022180>
- Song, X. H., Tan, Y., 2024. Experimental Study on the Stability of Vegetated Earthen Slopes under Intense Rainfall. *Soil and Tillage Research*, 238: 106028. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106028>
- Song, X. H., Tan, Y., Lu, Y., 2024. Microscopic Analyses of the Reinforcement Mechanism of Plant Roots in Different Morphologies on the Stability of Soil Slopes under Heavy Rainfall. *Catena*, 241: 108018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108018>
- Sun, D. L., Wen, H. J., Wang, D. Z., et al., 2020. A Random Forest Model of Landslide Susceptibility Mapping Based on Hyperparameter Optimization Using Bayes Algorithm. *Geomorphology*, 362: 107201. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107201>
- Sun, Q., Zhang, T. L., Wu, J. B., et al., 2022. Promoting effect of vegetation on the landslide induced by typhoon rainstorm. *Geological Survey of China*, 9(4): 66–73(in Chinese).
- Tan, D., Xu, X., Wang, L., et al., 2024. 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>
- Tang, H. M., Wasowski, J., Juang, C. H., 2019. Geohazards in the Three Gorges Reservoir Area, China – Lessons Learned from Decades of Research. *Engineering Geology*, 261: 105267. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105267>
- Terajima, T., Miyahira, E., Miyajima, H., et al., 2014. How Hydrological Factors Initiate Instability in A Model Sandy Slope. *Hydrological Processes*, 28(23): 5711–5724. <https://doi.org/10.1002/hyp.10048>
- Thai Pham, B., Shirzadi, A., Shahabi, H., et al., 2019. Landslide Susceptibility Assessment by Novel Hybrid Machine Learning Algorithms. *Sustainability*, 11(16): 4386. <https://doi.org/10.3390/su11164386>
- Thirugnanam, H., Uhlemann, S., Reghunadh, R., et al., 2022. Review of Landslide Monitoring Techniques With IoT Integration Opportunities. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15: 5317–5338. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2022.3183684>
- Tien Bui, D., Pradhan, B., Lofman, O., et al., 2012. Landslide Susceptibility Assessment in the Hoa Binh Province of Vietnam: A Comparison of the Levenberg–Marquardt and Bayesian Regularized Neural Networks. *Geomorphology*, 171–172: 12–29. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.04.023>
- Tsai, T. L., 2008. The Influence of Rainstorm Pattern on Shallow Landslide. *Environment Geology*, 53(7): 1563–1569. <https://doi.org/10.1007/s00254-007-0767-x>
- Wang, F., Chen, F., Deng, H., et al., 2024. An Improved Monitoring Strategy for Shallow Rainfall-induced Landslides under Critical Site-specific Recognition. *Landslides*, 21(10): 2569–2581. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02298-6>
- Wang, L., Zhang, K. Y., Chen, Y. S., et al., 2024. Progressive Deformation Mechanism of Colluvial Landslides Induced by Rainfall: Insights from Long-term Field Monitoring and Numerical Study. *Landslides*, 21(12): 3069–3086. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02344-3>
- Wang, S. B., Zhuang, J. Q., Zheng, J., et al., 2022. Landslides Susceptibility Evaluation Based on Deeplearning Along Kangding-Litang Section of CE Railway. *Journal of Engineering Geology*, 30(3): 908–919(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Yuan, W. Y., Zou, L. F., et al., 2022. Comprehensive regional-scale early warning of water-induced landslides in reservoir areas based on landslide susceptibility assessment. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 41(3): 479–491(in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Chen, X. Q., Chen, H. Y., et al., 2024. Influence Mechanism of Herbaceous Plants on Debris Flow Bank Erosion. *Catena*, 245: 108308. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108308>
- Wang, Y., Fang, Z. C., Niu, R. Q., et al., 2021. Landslide susceptibility analysis based on deep learning. *Journal of Geo - information Science*, 23(12): 2244–2260(in Chinese with English abstract).
- Wang, Y., Xu, D., Yang, Y., et al., 2024. A typhoon-induced debris flow warning model integrating rainfall thresholds with geological factors. *Frontiers in Earth Science*, 12:

1443738. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1443738>
- Wang, Z. B., Zou, Y. S., 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(3): 405–415(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>
- Wei, X. P., Zheng, Z. W., Zhou, Z. H., et al., 2024. Research on risk early warning for rainfall-induced shallow landslides in Guangdong Province based on a dynamic slope instability model. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(2): 30–39(in Chinese with English abstract).
- Wu Q., Wang D., Tang H. M., et al., 2023b. Strength Deterioration Characteristics of Soft and Hard Interbedded Rock Masses in Three Gorges Reservoir Area Induced by Wetting-Drying Cycles. *Journal of Earth Science*. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1788.P.20230827.1657.002.html>.
- Wu, C. H., Lin, C. Y., 2021. Spatiotemporal Hotspots and Decadal Evolution of Extreme Rainfall-Induced Landslides: Case Studies in Southern Taiwan. *Water*, 13(15): 2090. <https://doi.org/10.3390/w13152090>
- Wu, Q., Liu, Y. X., Tang, H. M., et al., 2023a. Experimental Study of the Influence of Wetting and Drying Cycles on the Strength of Intact Rock Samples from A Red Stratum in the Three Gorges Reservoir Area. *Engineering Geology*, 314: 107013. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107013>
- Wu, Q., Liu, Z. Q., Tang, H. M., et al., 2024a. Experimental investigation on shear strength deterioration at the interface between different rock types under cyclic loading. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(8): 3063–3079. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.11.019>
- Wu, Q., Meng, Z., Tang, H. M., et al., 2022. Experimental investigation on weakening of discontinuities at the interface between different rock types induced by wetting and drying cycles. *Rock Mechanics Rock Engineering*, 55(3): 1179-1195. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02731-5>
- Wu, Q., Qin, Y., Tang, H. M., et al., 2024b. Influence of Wetting and Drying Cycles on the Shear Behavior of Discontinuities Between Two Different Rock Types with Various Surface Topographies. *Acta Geotechnica*, 19: 7125-7147. <https://doi.org/10.1007/s11440-024-02332-w>
- Wu, Q., Zhang, B., Tang, H. M., et al., 2023c. Theoretical Study on Stability Evolution of Soft and Hard Interbedded Bedding Reservoir Slopes. *Journal of Mountain Science*, 20(9): 2744–2755. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8073-y>
- Wu, R. Z., Hu, X. D., Mei, H. B., et al., 2021. Spatial Susceptibility Assessment of Landslides Based on Random Forest: A Case Study from Hubei Section in the Three Gorges Reservoir Area. *Earth Science*, 46(1): 321–330(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Xia, M., Wang, J. D., Gu, T. F., et al., 2013. Evaluation of shallow loess landslide destruction probability based on TRIGRS model. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 49(4): 453–458(in Chinese with English abstract).
- Xiao, T., Zhang, L. M., 2023. Data-driven Landslide Forecasting: Methods, Data Completeness, and Real-time Warning. *Engineering Geology*, 317: 107068. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2023.107068>
- Xie, M. L., Zhao, J. J., Ju, N. P., et al., 2020. Research on Temporal and Spatial Evolution of Landslide Based on Multisource Data: A Case Study of Huangnibazi Landslide. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 45(6): 923–932(in Chinese).
- Xie, W. L., Guo, Q. Y., Wu, J. Y., et al., 2021. Analysis of Loess Landslide Mechanism and Numerical Simulation Stabilization on the Loess Plateau in Central China. *Natural Hazards*, 106(1): 805–827. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04492-w>
- 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).
- Yalcin, A., 2008. GIS-based Landslide Susceptibility Mapping

- Using Analytical Hierarchy Process and Bivariate Statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of Results and Confirmations. *Catena*, 72(1): 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2007.01.003>
- 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>
- Yang, P. Z., Cui, S. H., Pei, X. J., et al., 2023. Deformation and evolution of large dumping bodies based on SBAS-InSAR and optical remote sensing images. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 42(6): 63–75(in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. X., Wang, L. Y., Shi, L. L., et al., 2020. Research of monitoring and early warning methods for rainfall-induced landslides based on multivariate thresholds. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(2): 272–285(in Chinese with English abstract).
- Yao, Z. Y., 2018. Susceptibility Assessment of Shallow Landslides in Chenxi County Based on SINMAP and TRIGRS Models (Dissertation). *China University of Geosciences (Beijing)*(in Chinese with English abstract).
- Yilmaz, I., 2009. Landslide Susceptibility Mapping Using Frequency Ratio, Logistic Regression, Artificial Neural Networks and Their Comparison: A Case Study from Kat Landslides (Tokat—Turkey). *Computers & Geosciences*, 35(6): 1125–1138. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.08.007>
- 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>
- Yuliana, Y., Apriyono, A., Kamchoom, V., et al., 2025. Seasonal Dynamics of Root Growth and Desiccation Cracks and Their Effects on Soil Hydraulic Conductivity. *Engineering Geology*, 349: 107973. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107973>
- Yuliza, E., Habil, H., Munir, M. M., et al., 2016. Study of Soil Moisture Sensor for Landslide Early Warning System: Experiment in Laboratory Scale. *Journal of Physics: Conference Series*, 739: 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/739/1/012034>
- Zeng, X. X., Liu, J., Lai, B., et al., 2024. Study on warning rainfall threshold for rainfall-induced collapses and landslide geological hazards in Zhuhai City, Guangdong Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(5): 141–150(in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. Y., Jian, W. X., Yang, T., et al., 2022. Monitoring and Early Warning of Tanjiawan Landslide in Zigui, Three Gorges Reservoir Region under Rainfall Effect. *Safety and Environmental Engineering*, 29(4): 129–138(in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. J., Qiu, H. J., Tang, B. Z., et al., 2022. Accelerating Effect of Vegetation on the Instability of Rainfall-Induced Shallow Landslides. *Remote Sensing*, 14: 5743. <https://doi.org/10.3390/rs14225743>
- Zhang, M., Yang, L., Ren, X. W., et al., 2019. Field Model Experiments to Determine Mechanisms of Rainstorm-induced Shallow Landslides in the Feiyunjiang River Basin, China. *Engineering Geology*, 262: 105348. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105348>
- Zhang, Q., Bai, Z. W., Huang, G. W., et al., 2022. Review of GNSS landslide monitoring and early warning. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(10): 1985–2000(in Chinese with English abstract).
- 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).
- Zhou, S. K., Liu, Z. H., Yu, F. H., et al., 2024. Exploration and practice of integrated construction of meteorological risk warning for geological hazards in Zhejiang Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(2): 21–29(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y., Wang, D. L., Wang, X., 2015. Parametric Analysis of Influence on Global Stability of Grillage Flexible Supporting Structure with Prestressed Anchors under Heavy Rainfall. *Journal of Engineering Geology*, 23(2): 233–244(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Z., Zhang, J. M., Ning, F. L., et al., 2020. Temporal and spatial characteristics of moisture migration and instability mechanism of cracked soil slope under rainfall infiltration. *Journal of Traffic and Transportation*

- Engineering*, 20(4): 107–119(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, J. Q., Peng, J. B., Zhang, L. Y., 2013. Risk Assessment and Prediction of the Shallow Landslide at Different Precipitation in Loess Plateau. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 43(3): 867–876(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, Y., Xing, A. G., 2025. Impacts of trees on slope stability during typhoons. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 36(2): 87-95(in Chinese with English abstract).
- Zhuang, Y., Xing, A., Sun, Q., et al., 2023. Insights into Initiation of Typhoon-induced Deep-seated Landslides in Southeast Coastal China. *Natural Hazards*, 119(1): 721–749. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06138-z>
- 附中文参考文献
- 白慧林, 2022. 花岗岩残积土滑坡降雨启动机理与预警模型研究 (博士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 白洁, 巨能攀, 张成强, 何朝阳, 刘秀伟, 2020. 贵州兴义滑坡特征及过程预警研究. *工程地质学报* 28(6), 1246–1258.
- 曾新雄, 刘佳, 赖波, 等, 2024. 广东珠海市降雨型崩塌滑坡预警阈值研究. *中国地质灾害与防治学报*, 35(5): 141–150.
- 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.
- 丛威青, 李铁锋, 潘懋, 等, 2008. 基于非饱和渗流理论的区域降雨型地质灾害动力学预警方法研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 44(2): 212–216.
- 代洪川, 2022. 龙川县米贝村 1 号沟滑坡-泥石流形成机理与泥石流运动过程研究 (硕士学位论文). 成都: 成都理工大学.
- 豆红强, 简文彬, 王浩, 等, 2023. 高植被覆盖区台风暴雨型滑坡成灾机制及预警模型研究综述. *自然灾害学报*, 32(2): 1–15.
- 窦杰, 向子林, 许强, 等, 2023. 机器学习在滑坡智能防灾减灾中的应用与发展趋势. *地球科学*, 48(5): 1657–1674.
- 冯杭建, 周爱国, 唐小明, 等, 2017. 基于确定性系数的降雨型滑坡影响因子敏感性分析. *工程地质学报*, 25(2): 436–446.
- 冯文凯, 胡芮, 白慧林, 等, 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(18): 7799–7809.
- 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*.
- 韩帅, 刘明军, 伍剑波, 等, 2022. 东南沿海台风暴雨型单体斜坡灾害风险评价—以泰顺仕阳北坡为例. *地质力学学报*, 28(4): 583–595.
- 何满潮, 任树林, 陶志刚, 2021. 滑坡地质灾害牛顿力远程监测预警系统及工程应用. *岩石力学与工程学报*, 40(11): 2161–2172.
- 黄雨, 何正迎, 2025. 气候变化背景下降雨型滑坡风险评估研究进展. *中国地质灾害与防治学报*, 36(2): 13-27.
- 简文彬, 胡海瑞, 罗阳华, 等, 2017. 干湿循环下花岗岩残积土强度衰减试验研究. *工程地质学报*, 25(3): 592–597.
- 姜彤, 李龙飞, 薛雷, 等, 2022. 乔木护坡效果物理模型试验研究. *科学技术与工程*, 22(35): 15546–15553.
- 蒋涛, 崔圣华, 冉耀, 2023. 开挖和降雨耦合诱发滑坡机理分析——以四川万源前进广场滑坡为例. *中国地质灾害与防治学报*, 34(3): 20-30.
- 解明礼, 赵建军, 巨能攀, 等, 2020. 多源数据滑坡时空演化规律研究——以黄泥坝子滑坡为例. *武汉大学学报 (信息科学版)*, 45(6): 923–932.
- 康超, 谌文武, 张帆宇, 等, 2011. 确定性模型在黄土沟壑区斜坡稳定性预测中的应用. *岩土力学*, 32(1): 207–210, 260.
- 亢金涛, 吴琼, 唐辉明, 等, 2019. 岩石/结构面劣化导致巴东组软硬互层岩体强度劣化的作用机制. *地球科学*, 44(11): 3950-3960.
- 兰恒星, 王苓涓, 周成虎, 2003. 云南小江流域滑坡关键影响因子研究. *中国地质灾害与防治学报*, 14(1): 103-109.
- 雷文凯, 董宏源, 陈攀, 等, 2020. 考虑倾角的土质边坡 Green-Ampt 改进入渗模型. *水利水运工程学报*, 6: 101–107.
- 李腾飞, 李晓, 苑伟娜, 等, 2011. 地下采矿诱发山体崩滑地质灾害研究现状与展望. *工程地质学报*, 19(06): 831-838.
- 栗倩倩, 王伟, 黄亮, 等, 2022. 台风暴雨型滑坡滞后效应分析—以浙江青田县“利奇马”台风为例. *中国地质灾害与防治学报*, 33(6): 10–19.
- 刘艳辉, 方然可, 苏永超, 等, 2021. 基于机器学习的区域滑坡灾害预警模型研究. *工程地质学报*, 29(1): 116–124.
- 刘艳辉, 温铭生, 苏永超, 等, 2016. 台风暴雨型地质灾害时空特征及预警效果分析. *水文地质工程地质*, 43(5): 119–126.

- 罗渝,何思明,何尽川,2014. 降雨类型对浅层滑坡稳定性的影响. 地球科学(中国地质大学学报), 39(9): 1357–1363.
- 马煜,余斌,何元勋,等,2023. 降雨激发浅层滑坡发育特征与阈值研究—以江西省全南县大吉山“2019.6.10”灾害为例. 地质与勘探, 59(5): 1065–1073.
- 孟朕,吴琼,鲁莎,等,2022. 基于CT扫描的巴东组易滑岩组微观结构劣化研究. 安全与环境工程, 29(4): 11–23, 45.
- 沈佳,董岩松,简文彬,等,2020. 台风暴雨型土质滑坡演化过程研究. 工程地质学报, 28(6): 1290–1299.
- 孙强,张泰丽,伍剑波,等,2022. 植被对台风暴雨型滑坡发育的促进作用. 中国地质调查, 9(4): 66–73.
- 王世宝,庄建琦,郑佳,等,2022. 基于深度学习的CZ铁路康定—理塘段滑坡易发性评价. 工程地质学报, 30(3): 908–919.
- 王伟,袁雯宇,邹丽芳,等,2022. 基于滑坡敏感性评价的库区水动力型滑坡区域综合预警研究. 岩石力学与工程学报, 41(3): 479–491.
- 王毅,方志策,牛瑞卿,等,2021. 基于深度学习的滑坡灾害易发性分析. 地球信息科学学报, 23(12): 2244–2260.
- 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, 42(3): 405–415.
- 魏平新,郑志文,周志华,等,2024. 广东省暴雨型浅层滑坡灾害动力预警模型与气象风险预警研究. 中国地质灾害与防治学报, 35(2): 30–39.
- 吴润泽,胡旭东,梅红波,等,2021. 基于随机森林的滑坡空间易发性评价: 以三峡库区湖北段为例. 地球科学, 46(1): 321–330.
- 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.
- 夏蒙,王家鼎,谷天峰,等,2013. 基于TRIGRS模型的浅层黄土滑坡破坏概率评价. 兰州大学学报(自然科学版), 49(4): 453–458.
- 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.
- 杨沛璋,崔圣华,裴向军,等,2023. 基于SBAS-InSAR和光学遥感影像的大型倾倒变形体变形演化. 地质科技通报, 42(6): 63–75.
- 杨宗佑,王礼勇,石莉莉,等,2020. 降雨滑坡多指标监测预警方法研究. 岩石力学与工程学报, 39(2): 272–285.
- 姚志永,2018. 基于SINMAP和TRIGRS模型的辰溪县暴雨型浅层滑坡易发性评价研究(硕士学位论文). 北京: 中国地质大学(北京).
- 张海艳,简文星,杨涛,等,2022. 降雨作用下三峡库区秭归谭家湾滑坡监测预警研究. 安全与环境工程, 29(4): 129–138.
- 张勤,白正伟,黄观文,等,2022. GNSS滑坡监测预警技术进展. 测绘学报, 51(10): 1985–2000.
- 张抒,唐辉明,2013. 非饱和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.
- 周诗凯,刘正华,余丰华,等,2024. 浙江省地质灾害气象风险预警一体化建设的探索与实践. 中国地质灾害与防治学报, 35(2): 21–29.
- 周勇,王栋良,王鑫,2015. 强降雨条件下框架预应力锚杆柔性支护结构整体稳定性影响参数分析. 工程地质学报, 23(2): 233–244.
- 周峙,张家铭,宁伏龙,等,2020. 降雨入渗下裂土边坡水分运移时空特征与失稳机理. 交通运输工程学报, 20(4): 107–119.
- 庄建琦,彭建兵,张利勇,2013. 不同降雨条件下黄土高原浅层滑坡危险性预测评价. 吉林大学学报(地球科学版), 43(3): 867–876.
- 庄宇,邢爱国,2025. 台风作用下植被对边坡稳定性的影响机制研究. 中国地质灾害与防治学报, 36(2): 87–95.