

• 自然灾害防治面临的挑战与应对 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0035

气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡 灾害防控挑战及应对^{*}

黄雨^{1,2**}

陆平⁴

毛无卫¹

李星月^{1,2}

郭桢¹

朱崇强^{1,2}

熊敏³

孙纪凯^{1,2}

1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092

2. 同济大学 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092

3. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620

4. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092

[摘要] 在全球气候变化加剧的背景下, 我国东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害的致灾风险显著增加。当前在降雨型滑坡灾害成因机制方面已经开展了大量卓有成效的研究, 但对此类复合链生滑坡灾害的演化机制认识仍显不足, 特别是在动态风险评估、精准监测预警和综合韧性防控等方面亟待进一步加强。通过系统分析东南降雨型复合链生滑坡灾害特征与演化机制, 深入剖析了防控体系面临的核心挑战, 包括复合链生灾害演化机理、动态风险评估、精准监测预警、综合韧性防控等关键问题。针对这些问题, 提出了基于人工智能的隐患智能识别技术、基于多源数据融合的高精度风险监测预警、基于点面结合的双控管理机制、防灾韧性提升技术以及社会防灾能力建设等应对策略和建议, 旨在促进降雨型滑坡灾害链的防控向精细化、数智化、韧性化方向不断发展。

[关键词] 东南沿海; 降雨型滑坡; 复合链生灾害; 机制机理; 监测预警; 风险评估; 韧性防控

我国东南沿海地区处于欧亚板块与太平洋板块俯冲带西缘, 地质环境复杂, 具有多期构造活动特征, 在板块构造运动的长期作用下形成多条区域性断裂带, 断裂带附近岩体破碎、节理裂隙发育, 地层以燕山期花岗岩、侏罗纪凝灰岩及古近纪砂泥岩为主, 长期湿热气候导致岩体强烈风化, 使区域内风化层广布, 遇水易崩解、软化, 叠加复杂低山丘陵地貌、高植被覆盖、高强度的人类工程活动等因素, 使之成为滑坡灾害的高发区域^[1,2]。在全球气候变化背景下, 极端气象事件频发^[3-6], 全球变暖导致降水变率显著增大^[7], 对滑坡灾害防控提出了新的挑战。东南沿海地区地理位置特殊, 濒临西北太平洋, 是台风频繁侵袭的区域^[8], 平均每年超7起台风登陆, 暴雨频率相对于1960年增长约30%^[9]。特别是梅雨

期, 长时间、大范围的降雨显著增加了区域内滑坡灾害的发生概率, 对东南地区人民的生命财产安全构成严重威胁。以2019年超强台风“利奇马”为例, 暴雨导致永嘉县山早村发生山体滑坡, 形成堰塞湖, 堰塞湖溃决后造成32人遇难^[10]。因此, 深入研究东南地区降雨型滑坡及其链生灾害, 对于提升该地区防灾减灾能力, 保障社会经济可持续发展具有至关重要的意义。

当前降雨型滑坡研究已在灾害特征与灾害机制方面取得显著进展, 如颜悠逸等^[11]基于气象与灾情数据, 分析了“杜苏芮”台风暴雨灾害链的致灾过程; 陈文鸿等^[12]基于区域斜坡稳定性模型进行了福建地区降雨型滑坡诱发泥石流灾害预测; 李子轩等^[13]采用机器学习方法开展降雨—滑坡灾害链经济损失脆弱性评估; 王浩

收稿日期: 2025-08-01; 修回日期: 2025-09-02

* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者, Email: yhuang@tongji.edu.cn

本文受到国家重点研发计划项目(2024YFC3012600)的资助。

引用格式: 黄雨,毛无卫,郭桢,等. 气候变化背景下东南沿海降雨型复合链生滑坡灾害防控挑战及应对. 中国科学基金, 2025, 39(6): 1006-1015.

Huang Y, Mao WW, Guo Z, et al. Challenges and strategies for cascading hazards of rainfall-induced landslides in southeastern coastal China under climate change. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 1006-1015. (in Chinese)

等^[14]在降雨型滑坡灾害链预警中验证了降雨阈值模型。当前研究多针对灾害链生过程中的单一环节开展研究,而东南地区降雨型滑坡链生灾害的成因机理、动态监测预警、风险评估及综合韧性防控等方面的系统性研究仍不足,难以应对灾害链的复杂性与不确定性。

为此,本文聚焦气候变化背景下东南沿海地区降雨型滑坡灾害,系统分析其复合链生演化机制,深入剖析灾害应对挑战,并从隐患识别、监测预警、动态风险评估、韧性防控及基层能力提升等角度,提出综合防控策略,旨在为该区域降雨型滑坡灾害的防灾减灾工作提供理论支撑与实践参考,推动灾害防控的科学化与精细化发展。

1 气候变化背景下东南降雨型滑坡灾害链特征

我国东南沿海地区降雨型滑坡主要发育在花岗岩、凝灰岩、砂泥岩等出露区,强烈风化作用形成“风化层—基岩”基覆结构。在台风、梅雨等带来的强降雨条件下,风化层遇水崩解软化后,往往呈现“先滑后流”的演化特征:空间上表现为多点启滑,物质状态由类固相向类液相转变^[15,16],最终形成多源汇聚的流滑复合链生灾害(图1)。当流滑灾害的堆积物堵塞河道形成堰塞湖,持续的强降雨可使湖水迅速上涨并最终漫顶溃决,进一步形成堰塞湖—洪水灾害链^[17]。此外,由于东南地区山地丘陵区高差大,台风雨暴雨在迎风坡易产生地形雨增幅,同时汇流时间缩短,极易引发“暴雨—山洪滑坡流滑/泥石流”链式灾害^[18]。

彭建兵等^[19]指出,地质灾害过程是地球多圈层相互作用与互馈过程的结果,强烈的人类工程活动干扰使

地质环境系统遭受过度损害,进一步放大了灾害的破坏强度。例如,在断裂带附近切坡建房或露天采矿,开挖形成高陡临空面,直接破坏构造应力平衡,在降雨条件下易诱发“工程扰动—构造活化—滑坡流滑复合”链式灾害;大量天然河道和泄洪区被无序开发和占用,加大了降雨—城市内涝、台风—暴雨—洪涝/泥石流灾害链风险^[20];城市化进程推动基础设施和工程建设逐渐由平原向丘陵山区延伸,大规模交通干线及矿山开采活动显著降低了山体边坡稳定性,在遭遇持续降雨时更易诱发流滑复合链生滑坡灾害。因此,东南沿海地区自然环境和不合理的人类活动相互叠加,加剧了降雨、滑坡流滑等灾害的链发性,使灾害链影响范围不断扩大,灾害损失逐渐累积并呈现逐年加剧的趋势。

综上所述,东南降雨型滑坡灾害链是由气象因素和地质条件共同驱动形成的,具有典型的复合链生、级联放大和时空耦合特征。已有研究强调了降雨型滑坡灾害链的多阶段、相互关联的特性,重点关注其形成机制、动态演变和广泛影响。深入理解这些灾害链特征对于改进灾害风险评估、增强基础设施韧性、制定有效的减灾策略以减少降雨型滑坡复合链生灾害造成的损失至关重要。

2 灾害链防控面临的主要挑战

2.1 机制机理

东南沿海地区具有地貌特征复杂、地质结构空间差异大、植被覆盖密集、人类活动强烈等特点,在极端气候影响下这些因素的耦合互馈机制多变,导致东南沿海地区降雨型滑坡复合链生灾害成因机理与演化机制不明。



图1 东南沿海降雨型滑坡灾害的复合链生演化过程

Fig.1 Composite Chain Evolution Process of Rainfall Induced Landslide Disasters along the Southeast Coast of China

开展对降雨型滑坡灾害链生机制机理的研究,对提升我国东南沿海地区的防灾减灾能力至关重要^[21-23]。

东南沿海地区降雨型滑坡复合链生灾害本质上是一种由降雨驱动的复杂多尺度灾害,其核心在于区域尺度上地质条件的空间变异性与降雨时空不均匀分布^[24]的共同耦合作用。其中降雨—群发滑坡灾害链具有鲜明的复合链生动力学特征。

台风或梅雨期的极端降雨会对区域内的水文状况产生重要影响,如短时的极端降雨急剧冲刷地表,大部分降雨形成地表径流,其余降雨形成地下渗流。暴雨冲刷坡面产生的瞬时动水压力和高速地表径流剥蚀地质体,形成溯源侵蚀,掏空坡体支撑点;此外,下渗水在浅层滞水带积聚,孔隙水压力急剧升高,抵消有效应力,使潜在滑面抗剪强度趋近于零,因此极端暴雨条件下极易诱发滑动。由于暴雨覆盖区域大,区域内所有处于临界状态的斜坡易形成群发滑动,而在滑移过程中,岩土体与水相互裹挟放大,发生滑坡—流滑—泥流的相态转化,最终群发的滑坡汇聚在一起,会对区域人民生命财产安全和基础设施造成巨大威胁。此灾害链中的滑坡从“多点启滑”到“多源汇聚”,表现为复杂的三维流动与非定常湍流演化过程^[25-27],远超出传统单体滑坡以及单个滑坡失稳过程的动力学范畴。

降雨—群发滑坡灾害链并非单一因素触发,而是地质结构、降雨强度与时长、坡度、生态覆盖等多因素在区域尺度上共同耦合形成的综合效应^[28]。以往研究发现,岩土体强度的空间变异性在单坡尺度上能较好解释滑坡发生的位置选择性和随机性^[29]。但从区域尺度来看,这种单一尺度或单因素主导的研究方法存在明显局限性^[30],即多因素、多时空尺度耦合作用下的灾害孕育机理研究明显不足,尤其是不同空间尺度之间的关联性,以及降雨强度的时空分布对灾害孕育的动力作用亟待深入研究。崔鹏等^[31]研究发现,气候变化增强了灾害的时空联动性,降雨型群发滑坡灾害不仅仅是多个灾害的简单叠加,更涉及不同灾害之间的相互作用与转换,属于复合链生动力学问题。

2.2 风险评估

当前风险评估面临从静态向动态、多源向协同的转型^[32]。在短期风险评估层面,主要挑战是难以有效捕捉降雨型滑坡灾害链的动态链生演化过程。这类灾害(如群发滑坡)通常具有突发性强、多源并发、演化路径复杂的特点,现有基于阈值法的静态风险评估模型难以满足高时效性的应急响应需求。此外,现有预测方法缺乏多源数据整合,导致信息割裂、响应滞后^[33]。尤其在复杂地貌区域,滑坡的分布往往受地质和地貌因素的共

同控制,降雨、地形、地质、土地利用、植被覆盖和距道路距离等都是导致滑坡特征区域空间变异的潜在因素,只考虑单一因素会使预测精度显著下降^[34]。

中长期风险评估方面,现有风险模型多依赖历史灾害数据进行静态推演,难以准确预测未来气候变化情境下极端降雨的空间和强度变化^[35],尤其是在气候变化驱使降雨的强度和频率随时间变化的背景下。现有的滑坡风险评估研究多关注单次降雨事件的研究或基于年尺度边坡失稳概率的研究^[36-38],没有充分考虑降雨灾害的长时间依赖性的特征,而灾害长时间尺度的演化是滑坡的基本属性^[39]。因此,中长期风险评估必须重视灾害的长期演化过程及其风险累积特征。

长期风险评估则面临灾害链式演化和风险时序扩散的挑战,传统风险评估方法已难以适应长期、多阶段、多系统冲击的实际需求。近年来,韧性理论逐渐成为防灾减灾领域的重要支撑,该理论强调“抗扰—恢复”双能力的协同,即系统在遭遇扰动后保持关键功能与快速恢复的能力,成为未来灾害风险管理的重要方向^[40]。然而,当前研究多聚焦于地震等瞬时突发型灾害场景,对降雨型滑坡复合链生过程中阶段性损害与恢复路径不确定性缺乏深入探讨。

2.3 监测预警

近年来针对降雨型滑坡灾害链监测预警的研究发展迅速,国内外学者逐步建立起覆盖从宏观到微观、从区域到局地的“天—空—地一体化”地质灾害隐患识别与监测体系。其中,光学遥感与时序InSAR技术已成为广域山区地质灾害识别与监测的重要技术手段,尤其是InSAR技术具备覆盖范围广、受天气干扰小等优势^[41,42]。此外,无人机技术依靠可达性强、分辨率高等特点弥补了卫星遥感在广域地表信息监测方面的不足。通过搭载不同的传感器,无人机能够精准监测中等范围内灾害演化过程中的时序变形、植被覆盖度、水文响应及地质结构变化信息^[43]。

然而,当前针对广域地质灾害的隐患识别与监测研究面向具有“渐进形变特征”的灾害体,旨在以坡体的形变趋势作为判别特征,而忽视了非渐进形变地质灾害隐患。此外,已有的隐患识别模型仅考虑光学遥感数据,缺乏对InSAR形变特征、高精度微地貌结构以及气象水文等多源信息的有效挖掘。另一方面,现有监测体系未充分考虑极端降雨特征与灾害链动力演化机理,难以充分捕捉灾害在不同失稳阶段的多源特征,从而制约了监测的准确性。

在预警方面,当前模型同样以针对具有“渐进形变特征”的单体滑坡为主。考虑到东南地区地质结构变异

性强、链生灾害演化机制复杂,传统预警模型在应对极端降雨触发的灾害链时存在显著局限性,难以全面量化不同失稳节点中预警阈值的动态变化特征^[44]。具体而言,数据驱动的预警模型高度依赖历史事件,而忽略了地质结构、气象水文特征及灾害机理等多场耦合作用下的失稳机制^[45]。物理驱动模型受制于复杂地质空间结构及动力学过程建模的复杂度,在强降雨导致的地质灾害链短临预警中的适用性有限^[46]。

2.4 综合防治

目前学术界和工程界对单体灾害的工程防治手段、生态修复技术已有较深入的研究和应用,在韧性评估方面也取得了一定进展,而对东南地区复杂地质条件和降雨型滑坡灾害复合链生特征的系统性防治技术研究仍不能满足当前防灾减灾的需求。当前汛期地质灾害的防控主要依赖人力巡查和基础性工程设施,技术手段相对单一,防控成本高昂,难以实现对广域灾害的高效率应对。因此,亟需构建适应多地质背景与人居环境差异的区域性综合防治技术体系,系统提升村庄与关键基础设施的防灾韧性。

目前针对滑坡等单体灾害隐患点,发展了削坡、排水、抗滑桩等防治技术,生态—工程协同的边坡防治技术也已成功应用于实际工程,但主要集中于单坡防治,缺少面向灾害链防治的工程技术^[47]。东南沿海降雨型滑坡灾害具有多点群发、区域性致灾等复合链生动力学

特征,直接使用上述单体灾害防治技术存在适用性的问题,需要提出区域尺度的综合防治技术^[48],针对灾害链演化关键节点,采用多手段协同的综合防治策略,构建多道防线(图2)。

3 面向气候变化背景下的东南降雨型滑坡灾害链综合防控策略

3.1 研发地质—气象—水文耦合的隐患智能识别技术

近年来,在广大地质灾害防控工作者的不懈努力下,“空一天一地”一体化三查体系不断完善,我国地质灾害防治体系已初步建立“人防+技防”的隐患点“点控”模式,针对山区的滑坡灾害隐患识别研究取得了显著进展^[49]。该体系以InSAR反演的形变特征为主,辅助光学时序影像的地表形态学特征,并结合区域的地质水文和地貌形态要素,为灾害隐患指标体系的建立提供了重要的理论基础^[50-52]。然而,在东南沿海植被茂密区域,受植被冠层遮蔽、雷达信号穿透性限制以及多源孕灾要素耦合协同作用机制不明等影响,现有的隐患特征识别体系在隐患点的识别精度上显著降低。需通过厘清灾害链“启动—演进—致灾”全过程机理,研发基于物理过程的数值模拟技术,构建“地质—气象—水文”协同分析框架。在此基础上,深度融合人工智能技术,推动地质灾害防治向智能化方向发展^[53]。例如,基于机器学习建立岩土体物理力学参数与破坏状态间的非线性关

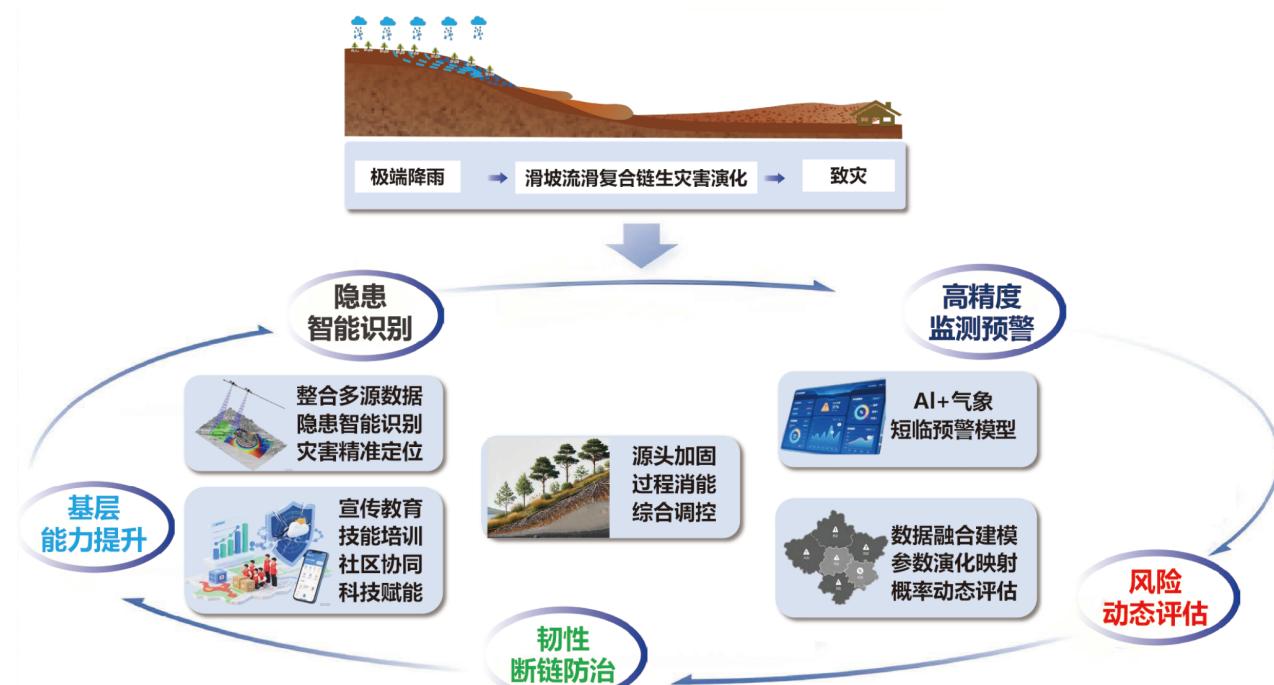


图2 降雨型滑坡灾害链综合防控策略概念图

Fig.2 Concept Illustration of Comprehensive Prevention and Control Strategy for Rainfall Induced Landslide Disaster Chain

系^[54],利用深度学习进行灾害隐患的智能自动识别等,由此强化隐患特征挖掘,突破东南沿海地区复杂环境下降雨型滑坡复合链生灾害隐患识别的技术瓶颈,为区域防灾减灾提供科学支撑^[55]。

3.2 构建灾害链精准监测预警和动态风险评估体系

当前,我国地质灾害防治以“看住”已知隐患点为主,但统计数据显示,大量新增地质灾害并未发生在已登记的隐患点范围内^[56]。这种现象说明当前隐患点筛选与监测设备布设仍存在不足,防控体系需在现有较为成熟的地质灾害隐患点群测群防体系基础上,进一步将风险区管控纳入整体建设,构建“点面双控”的综合管理模式^[57]。因此,应着力优化监测网络布局,充分利用专业监测新技术与新方法,逐步形成“全域覆盖、重点突出”的地质灾害风险监测“一张网”,从而提升地质灾害风险预警数据的精度。

针对我国东南沿海地区极端降雨致灾的特点,灾害预警模型构建应突破单一临界雨量建模局限,转向以高精度气象预警为核心^[58],采取多维度信息耦合的技术路径。首先,基于地质结构、岩土体特征等多场耦合分析,系统揭示灾害链动态演化机制。其次,通过强化原位观测网络,精准捕捉多场耦合作用下的岩土体性能演化^[59],开发融合地质参数空间异质性与多场耦合效应的物理驱动模型,以提升灾害链时空演化模拟精度,耦合降雨时空分布、土壤水分初始状态及地质条件空间异质性等多要素,构建非线性预警模型,实现对灾害事件发生时间、地点与影响范围的精准预测,从而为提前部署防灾与救援措施提供科学依据^[60]。例如,Li等^[61]基于四川省自然资源厅提供的天然降雨诱发滑坡事件,通过深度学习网络融合雷达回波与雨量站实测数据,结合频率理论和贝叶斯概率分析法构建降雨强度—历时阈值,提出融合降雨阈值与变形监测的多级预警模型。此模型在2021年8月的侯家滑坡事件中,提前11小时发出预警,验证了预警方法的有效性,为山区防灾减灾提供关键技术支撑。Mondini等^[24]提出了一种基于深度学习的降雨诱发浅层滑坡预测方法,通过整合历年的降雨和滑坡数据,构建全连接神经网络模型,实现了大范围区域降雨诱发浅层滑坡的有效预测,为滑坡预警提供了新的有效技术手段。

此外,需要加强对网络舆情、监控视频等泛在信息和多源数据的利用。基于地质灾害监测数据,建立跨部门协同机制,构建多部门数据共享平台,实现观测站点互联互通,通过多源数据融合的技术体系,整合InSAR形变监测、LiDAR微地貌重构、高分辨率影像和气象数据等,对多源数据进行综合分析和合理利用,消除数据之

间可能存在的冗余性和互斥性,可有效改善监测数据的可靠性、提高地质灾害监测数据的利用率。例如,Wang等^[62]通过Flink流处理框架与改进粒子群优化算法,实现了滑坡监测数据、空间数据、图像数据等多源数据的高效整合,既为灾害监测提供了数据支撑,也为滑坡灾害数据管理提供了标准化解决方案;Caleca等^[63]首次整合滑坡灾害、强度、脆弱性和暴露度四大要素,以经济损失为量化指标,评估了三种主要滑坡类型在2年、5年和10年情景下的风险,开发并展示了在国家尺度整合多源异构数据(地质、地貌、遥感、社会经济)进行定量滑坡风险评估的可行框架。

需要指出的是,当前降雨型滑坡灾害链风险评估存在一定局限性:一方面,现有研究多集中于短期预测和静态评估,难以满足乡村级中长期防灾规划需求;另一方面,传统基于历史数据的评估方法缺乏动态演化和不确定性分析能力。为此,可构建基于机器学习的多尺度评估体系,通过整合历史灾害数据,建立多参数关联模型,并结合极端情景分析实现动态风险评估。例如,Bakhtiari等^[64]提出了一种动态贝叶斯网络框架,可以动态捕捉基础设施系统在灾害中的破坏与恢复过程,能用于对基础设施系统的综合风险等级与韧性指数进行评估,为制定多灾害风险策略与提升基础设施韧性提供支撑;Qian等^[65]通过开发系统动力学模型,量化“岩石风化—降雨触发—边坡失稳”的动态反馈机制,并引入时变参数,实现了月度动态风险评估。

在坚持人民至上、生命至上的新防灾减灾形势下,自然资源部《全国地质灾害防治“十四五”规划》提出了地质灾害“隐患点+风险区”双控管理机制,即对地质灾害隐患点和风险区分别进行风险管控,以达到防范和化解地质灾害风险的目的^[66],并进行了大量有效尝试。浙江省作为全国首批开展地质灾害“隐患点+风险区”双控试点工作的省份,近年来在地质灾害防控方面取得了显著成效。在2025年第4号台风“丹娜丝”影响期间,苍南县普降大到暴雨,基层工作人员根据雨情与当地地质条件精准研判风险,依据预警级别和应急响应及时组织危险区人员转移,成功避免10户16人可能因灾伤亡。该灾害点位于地质灾害风险防范区内,是“点面结合”双控机制下实现成功避险的典型案例,为地质灾害双控体系建设提供了可复制、可推广的实践经验^[67]。

3.3 建立韧性断链技术综合防治体系

韧性防灾作为国际防灾减灾新范式,为东南沿海降雨型滑坡灾害链综合防控提供了新的解决方案。在灾害阻断方面,重点聚焦灾害链综合断链技术体系构建:通过建立灾害链—承灾体—防治工程耦合网络模型,运

用复杂网络理论识别关键断链节点;基于水土—结构相互作用机制,研发“源头阻隔—过程消能—末端调控”的递阶式断链技术。具体而言,“源头阻隔”环节可采用生态固坡技术与截排水系统,从源头上减少滑坡启滑概率;“过程消能”环节可部署格栅坝、消能平台,消减致灾体能量及减缓灾害链演进速度;“末端调控”环节可建设拦挡工程与排导槽,避免灾害冲击核心承灾体。结合智能决策算法,开发多场景自适应断链方案,实现从单点防控到全链条阻断转变,显著提升东南沿海地区灾害链综合防控系统韧性。在韧性提升方面,实施灾前、灾中和灾后三阶段防控策略:在灾前阶段,通过优化区域排水系统、提升抗灾能力及建设智能化监测预警系统来降低灾害风险^[68]。在灾害发生阶段,建立高效的应急响应体系,优化应急疏散路线并提高救援调度效率,结合AI辅助决策系统,优化救援物资调度,提高救援响应速度和资源分配效率。在灾后恢复阶段,重点推进基础设施快速修复及生态修复,提高灾区的长期恢复能力,如采用模块化装配式建筑技术,提高灾后住房及公共基础设施的恢复效率^[69]。此外,同步推进生态修复与经济重建。通过政府支持政策,确保产业快速恢复,全面提升社区抗灾与恢复能力。

3.4 提升村镇多灾种防御意识与应急响应能力

基层作为防灾减灾的“最后一公里”,其防灾意识与应急能力直接影响灾害链防治的实际成效^[70]。为有效应对灾害,需多措并举,构建“全民参与、科学防控”的基层防灾体系,全面落实“人民至上、生命至上”的价值理念,最大限度地保护人民生命财产安全是极端天气灾害应对的根本宗旨。

宣传教育方面,应针对乡村、社区、学校等不同场景开展差异化科普,提升全民风险意识。技能培训方面,政府主导开展专业培训,组织跨部门应急演练,重点提升预警发布、群众转移和伤员救治能力。社区协同方面,应组建防灾志愿者队伍,设立标准化应急物资储备点,建立乡镇间物资共享机制,筑牢社会韧性的基层基础。科技赋能方面,为基层配备地质灾害智能终端,实现隐患实时监测和多源数据整合,提高预警精准度。最终形成以科技赋能为支撑、以制度建设为保障、以全民参与为核心的韧性防灾体系。

4 结论

极端气候背景下,东南沿海降雨型滑坡复合链生灾害因其链发性、放大效应及复杂性,对区域安全与社会经济发展构成严重威胁。本文通过系统总结,梳理了该类灾害链的核心特征:由降雨驱动,叠加山地地形、复杂

地质及人类活动影响,形成降雨—流滑复合链生滑坡灾害,具有显著的时空耦合与非线性放大效应。

本文综述了当前防控面临的关键挑战:

(1)灾害链成因机理与演化机制不明,多尺度、多因素耦合的动力学过程尚未厘清,导致隐患识别精准度不足。

(2)监测预警体系难以整合多源信息,对非形变隐患和动态阈值的捕捉能力有限,难以应对链生灾害的动态演化。

(3)风险评估多为静态模型,难以适应灾害链的级联放大效应和长期气候变率影响。

(4)综合防治技术缺乏系统性,单体与单过程灾害防治手段难以应对区域尺度的链生风险。

针对上述挑战,本文提出的综合防控策略涵盖“地质—气象—水文”耦合的隐患识别、融合高精度气象预报的多维信息耦合预警技术、强化点面双控管理、韧性断链技术体系及基层能力提升等维度,形成从隐患识别到应急响应、从工程防治到社会协同的全链条防控框架。

参 考 文 献

- [1] 司晓博,冯艳芳,苏尚国,等. 华东南地区花岗岩型铌-钽矿床区域成矿地质背景. 地质通报,2020,39(7):1085—1103.
Si XB, Feng YF, Su SG, et al. Regional metallogenic geological background of granite-type Nb-Ta deposits in Southeast China. Geological Bulletin of China, 2020, 39(7): 1085—1103. (in Chinese)
- [2] 谢刚. 福建省东南沿海地区地质灾害易发性评价方法探究. 绿色科技,2024,26(14):209—213.
Xie G. Study on the evaluation method of geological disaster susceptibility in the southeast coastal area of Fujian Province. Journal of Green Science and Technology, 2024, 26(14): 209—213. (in Chinese)
- [3] 王伟,石雨欣,宋月,等. 暴雨-滑坡灾害链应急能力评估——以粤港澳大湾区为例. 自然灾害学报,2024,33(4):95—105.
Wang W, Shi YX, Song Y, et al. Emergency capability assessment of the rainstorm-landslide disaster chain: Taking the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area as an example. Journal of Natural Disasters, 2024, 33(4): 95—105. (in Chinese)
- [4] 黄雨,何正迎. 气候变化背景下降雨滑坡风险评估研究进展. 中国地质灾害与防治学报,2025,36(2):13—27.
Huang Y, He ZY. Research progress on rainfall-triggered landslide risk assessment under the context of climate change. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2025, 36(2): 13—27. (in Chinese)
- [5] 王海,王宝华,崔平,等. 气候变化对高山区灾害影响及科学挑战. Advances in Climate Change Research, 2024, 15(3):367—389.
- [6] 张存杰,肖潺,李帅,等. 极端气候事件综合危险性等级指标构建及近60年来长江流域极端气候综合分析. 地球物理学报,2023,66(3):920—938.
Zhang CJ, Xiao C, Li S, et al. Construction of multi-extreme climate

- events composite grads index and comprehensive analysis of extreme climate in the Yangtze River Basin from 1961 to 2020. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(3): 920—938. (in Chinese)
- [7] 王会军. 全球变暖已经导致降水变率和灾害风险加剧了吗? *中国科学(地球科学)*, 2025, 55(2): 662—664.
- Wang HJ. Has global warming already led to increased precipitation variability and disaster risks? *Scientia Sinica(Terrae)*, 2025, 55(2): 662—664. (in Chinese)
- [8] 孟凡昌, 李本霞, 王娟娟. 1949—2021年登陆我国热带气旋历史规律研究. *海洋预报*, 2024, 41(3): 80—89.
- Meng FC, Li BX, Wang JJ. A study on the characteristics of tropical cyclones landing in China from 1949 to 2021. *Marine Forecasts*, 2024, 41(3): 80—89. (in Chinese)
- [9] 刘艳辉, 唐灿, 李铁锋, 等. 地质灾害与降雨雨型的关系研究. *工程地质学报*, 2009, 17(5): 656—661.
- Liu YH, Tang C, Li TF, et al. Geohazards and rain-type statistical relations. *Journal of Engineering Geology*, 2009, 17(5): 656—661. (in Chinese)
- [10] Zhuang Y, Xing AG, Sun Q, et al. Failure and disaster-causing mechanism of a typhoon-induced large landslide in Yongjia, Zhejiang, China. *Landslides*, 2023, 20(10): 2257—2269.
- [11] 颜悠逸, 高路, 陈仁德, 等. 福州市2305“杜苏芮”台风灾害链致灾与成害过程分析. *灾害学*, 2024, 39(4): 1—9.
- Yan YY, Gao L, Chen DR, et al. Analysis of disaster and damage process caused by No.2305 “Doksuri” Typhoon disaster chain in Fuzhou City. *Journal of Catastrophology*, 2024, 39(4): 1—9. (in Chinese)
- [12] 陈文鸿, 余斌, 叶鹏, 等. 福建区域浅层滑坡诱发沟谷型泥石流灾害预测. *自然灾害学报*, 2024, 33(5): 12—22.
- Chen WH, Yu B, Ye P, et al. Regional prediction of gully-type debris flow caused by shallow landslides in Fujian. *Journal of Natural Disasters*, 2024, 33(5): 12—22. (in Chinese)
- [13] 李子轩, 杜鹃, 徐伟. 基于机器学习的降雨—滑坡灾害链直接经济损失脆弱性评估. *灾害学*, 2022, 37(4): 220—224.
- Li ZX, Du J, Xu W. Rainfall-induced landslides direct economic loss vulnerability assessment using machine learning methods. *Journal of Catastrophology*, 2022, 37(4): 220—224. (in Chinese)
- [14] 王浩, 傅奕萱, 郭朝旭, 等. 基于降雨指数的台风暴雨型滑坡预警阈值研究——以福州市永泰县为例. *中国地质灾害与防治学报*, 2025, 36(2): 43—53.
- Wang H, Fu YX, Guo ZX, et al. Research on the early warning threshold for typhoon rainstorm-induced landslides based on rainfall index: A case study of Yongtai County, Fuzhou. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36(2): 43—53. (in Chinese)
- [15] 蔡昕瑶, 高路. 不同地形条件下的台风灾害链致灾分析——以“利奇马”台风为例. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 74—83.
- Qi XY, Gao L. Analysis on typhoon disaster chain under different terrain conditions: A case study of typhoon Lekima in 2019. *Journal of Fujian Normal University: Natural Science Edition*, 2020, 36(5): 74—83. (in Chinese)
- [16] 王静爱, 雷永登, 周洪建, 等. 中国东南沿海台风灾害链区域规律与适应对策研究. *北京师范大学学报(社会科学版)*, 2012(2): 130—138.
- Wang JA, Lei YD, Zhou HJ, et al. Regional features and adaptation countermeasures of typhoon disaster chains in southeast coastal regions of China. *Journal of Beijing Normal University (Social Sciences)*, 2012(2): 130—138. (in Chinese)
- [17] Cui YL, Hu JH, Xu C, et al. A catastrophic natural disaster chain of typhoon-rainstorm-landslide-barrier lake-flooding in Zhejiang Province, China. *Journal of Mountain Science*, 2021, 18(8): 2108—2119.
- [18] Liang X, Segoni S, Yin KL, et al. Characteristics of landslides and debris flows triggered by extreme rainfall in Daoshi Town during the 2019 Typhoon Lekima, Zhejiang Province, China. *Landslides*, 2022, 19(7): 1735—1749.
- [19] 彭建兵, 兰恒星. 略论生态地质学与生态地质环境系统. *地球科学与环境学报*, 2022, 44(6): 877—893.
- Peng JB, Lan HX. Ecological geology and eco-geological environment system. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2022, 44(6): 877—893. (in Chinese)
- [20] Yang XL, Qin XC, Zhou X, et al. Assessment of disaster mitigation capability oriented to typhoon disaster chains: A case study of Fujian Province, China. *Ecological Indicators*, 2024, 167: 112621.
- [21] Guo WZ, Chen ZX, Wang WL, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau. *Geomorphology*, 2020, 350: 106879.
- [22] 冯文凯, 贾邦中, 吴义鹰, 等. 低山丘陵区典型滑坡-泥石流链生灾害特征与成灾机理. *中国地质灾害与防治学报*, 2022, 33(1): 35—44.
- Feng WK, Jia BZ, Wu YY, et al. Characteristics and mechanism of landslide-debris flow chain disaster in low mountain and hilly terrain. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2022, 33(1): 35—44. (in Chinese)
- [23] 崔鹏, 郭剑. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. *工程科学与技术*, 2021, 53(3): 5—18.
- Cui P, Guo J. Evolution models, risk prevention and control countermeasures of the valley disaster chain. *Advanced Engineering Sciences*, 2021, 53(3): 5—18. (in Chinese)
- [24] Mondini AC, Guzzetti F, Melillo M. Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides. *Nature Communications*, 2023, 14: 2466.
- [25] Tian YF, Woodward M, Stepanov M, et al. Lagrangian large eddy simulations via physics-informed machine learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2023, 120(34): e2213638120.
- [26] Li XH, Gao JN, Guo ZH, et al. A study of rainfall-runoff movement process on high and steep slopes affected by double turbulence sources. *Scientific Reports*, 2020, 10: 9001.
- [27] Anand MS, Medic G, Paliath U, et al. Vision 2030 aircraft propulsion grand challenge problem: Full-engine CFD simulations with high geometric fidelity and physics accuracy. *AIAA Scitech 2021 Forum*. Virtual Event. Reston, Virginia: AIAA, 2021: 0956.
- [28] 殷跃平. 新三峡库区长期地质安全战略研究. *中国水利*, 2024(22): 26—35.
- Yin YP. Studies on long-term geological safety strategy in the new Three Gorges Reservoir area. *China Water Resources*, 2024(22): 26—35. (in Chinese)
- [29] Bellugi DG, Milledge DG, Cuffey KM, et al. Controls on the size distributions of shallow landslides. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021, 118(9):

- e2021855118.
- [30] Bontemps N, Lacroix P, Larose E, et al. Rain and small earthquakes maintain a slow-moving landslide in a persistent critical state. *Nature Communications*, 2020, 11: 780.
- [31] 崔鹏,王岩,张国涛,等. 气候变化灾害风险防范:现状、挑战与科学问题. *气候变化研究进展*, 2025, 21(4): 449—460.
- Cui P, Wang Y, Zhang GT, et al. Disaster risk prevention under climate change: current status, challenges, and scientific issues. *Climate Change Research*, 2025, 21(4): 449—460. (in Chinese)
- [32] 孔锋. 透视大尺度综合自然灾害风险评估的主要进展和展望. *灾害学*, 2020, 35(2): 148—153.
- Kong F. Perspective on the main progress and prospect of large-scale integrated natural disaster risk assessment. *Journal of Catastrophology*, 2020, 35(2): 148—153. (in Chinese)
- [33] Zhou WQ, Qiu HJ, Wang LY, et al. Combining rainfall-induced shallow landslides and subsequent debris flows for hazard chain prediction. *Catena*, 2022, 213: 106199.
- [34] Ma H, Wang FW, Fu ZJ, et al. Characterizing the clustered landslides triggered by extreme rainfall during the 2024 typhoon Gaemi in Zixing City, Hunan Province, China. *Landslides*, 2025, 22(7): 2311—2329.
- [35] Mirzaei M, Shirmohammadi A, Ruiz-Barradas A, et al. Climate change effects on the spatial and temporal distribution of extreme precipitation in the Mid-Atlantic region. *Urban Climate*, 2025, 61: 102382.
- [36] Liu X, Wang Y. Analytical solutions for annual probability of slope failure induced by rainfall at a specific slope using bivariate distribution of rainfall intensity and duration. *Engineering Geology*, 2023, 313: 106969.
- [37] Lu M, Zhang J, Zheng JG, et al. Assessing annual probability of rainfall-induced slope failure through a mechanics-based model. *Acta Geotechnica*, 2022, 17(3): 949—964.
- [38] Wang CH, Fang L, Chang DT, et al. Back-analysis of a rainfall-induced landslide case history using deterministic and random limit equilibrium methods. *Engineering Geology*, 2023, 317: 107055.
- [39] 唐辉明,李长冬,龚文平,等. 滑坡演化的基本属性与研究途径. *地球科学*, 2022, 47(12): 4596—4608.
- Tang HM, Li CD, Gong WP, et al. Fundamental attribute and research approach of landslide evolution. *Earth Science*, 2022, 47(12): 4596—4608. (in Chinese)
- [40] Lu DC, Liao YZ, Zeng J, et al. Development strategy for recovery resilience of urban underground space. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2023, 25(1): 38.
- [41] Bekaert DPS, Handwerger AL, Agram P, et al. InSAR-based detection method for mapping and monitoring slow-moving landslides in remote regions with steep and mountainous terrain: An application to Nepal. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 249: 111983.
- [42] Song C, Yu C, Li ZH, et al. Triggering and recovery of earthquake accelerated landslides in Central Italy revealed by satellite radar observations. *Nature Communications*, 2022, 13: 7278.
- [43] Casagli N, Intrieri E, Tofani V, et al. Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2023, 4(1): 51—64.
- [44] Keefer DK, Wilson RC, Mark RK, et al. Real-time landslide warning during heavy rainfall. *Science*, 1987, 238(4829): 921—925.
- [45] Emberson R, Kirschbaum D, Stanley T. Global connections between El Nino and landslide impacts. *Nature Communications*, 2021, 12: 2262.
- [46] Ponziani F, Ciuffi P, Bayer B, et al. Regional-scale InSAR investigation and landslide early warning thresholds in *Umbria*, Italy. *Engineering Geology*, 2023, 327: 107352.
- [47] He ST, Wang DJ, Fang YC, et al. Guidelines for integrating ecological and biological engineering technologies for control of severe erosion in mountainous areas—A case study of the Xiaojiang River Basin, China. *International Soil and Water Conservation Research*, 2017, 5(4): 335—344.
- [48] Luo SL, Huang D, Peng JB, et al. Performance and application of a novel drainage anti-slide pile on accumulation landslide with a chair-like deposit-bedrock interface in the Three Gorges Reservoir area, China. *Computers and Geotechnics*, 2023, 155: 105199.
- [49] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2019, 44(7): 957—966.
- Xu Q, Dong XJ, Li WL. Integrated Space-Air-Ground Early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(7): 957—966. (in Chinese)
- [50] Dong J, Zhang L, Tang MG, et al. Mapping landslide surface displacements with time series SAR interferometry by combining persistent and distributed scatterers: A case study of Jiaju landslide in Danba, China. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 205: 180—198.
- [51] Wu L, Liu R, Ju NP, et al. Landslide mapping based on a hybrid CNN-transformer network and deep transfer learning using remote sensing images with topographic and spectral features. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024, 126: 103612.
- [52] 吴琼,葛大庆,于峻川,等. 广域滑坡灾害隐患InSAR显著性形变区深度学习识别技术. *测绘学报*, 2022, 51(10): 2046—2055.
- Wu Q, Ge DQ, Yu JC, et al. Deep learning identification technology of InSAR significant deformation zone of potential landslide hazard at large scale. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2022, 51(10): 2046—2055. (in Chinese)
- [53] 佟彬,殷跃平,李昊,等. 地质灾害人工智能大语言模型研究展望. *中国地质灾害与防治学报*, 2025, 36(2): 1—12.
- Tong B, Yin YP, Li B, et al. Review on artificial intelligence-based large language models for geological hazards. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2025, 36(2): 1—12. (in Chinese)
- [54] 王松挺,王昌硕,杜时贵,等. 基于机器学习的岩体结构面剪切破坏区域预测研究. *地质与勘探*, 2024, 60(2): 388—406.
- Wang ST, Wang CS, Du SG, et al. Prediction of shear failure zones of rock structural planes based on machine learning. *Geology and Exploration*, 2024, 60(2): 388—406. (in Chinese)
- [55] 刘婧,史培军,葛怡,等. 灾害恢复力研究进展综述. *地球科学进展*, 2006, 21(2): 211—218.
- Liu J, Shi PJ, Ge Y, et al. The review of disaster resilience research. *Advances in Earth Science*, 2006, 21(2): 211—218. (in Chinese)
- [56] 张永忠,高俊华,罗伟奇,等. 湖南省地质灾害综合防治体系建设策略研究. *地质灾害与环境保护*, 2023, 34(3): 36—42.
- Zhang YZ, Gao JH, Luo WQ, et al. Research on construction strategy of comprehensive prevention and control system of geological disasters in Hunan Province. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2023, 34(3): 36—42. (in Chinese)

- [57] 铁永波,徐伟,向炳霖,等.西南地区地质灾害风险“点面双控”体系构建与思考.中国地质灾害与防治学报,2022,33(3):106—113.
Tie YB,Xu W,Xiang BL,et al. The thoughts on construction of “double-control of point and zone” system of geological hazard risk in southwest China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,2022,33(3):106—113. (in Chinese)
- [58] 肖智林,陈高翔,张浴阳,等.四川省地质灾害气象风险预警“省市县一体化”建设探索与实践.中国地质灾害与防治学报,2024,35(2):47—54.
Xiao ZL,Chen GX,Zhang YY,et al. Construction and application of the “integration of provincial,urban, and county-wide” geo-hazard meteorological risk warning system in Sichuan Province. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*,2024,35(2):47—54. (in Chinese)
- [59] 施斌,朱鸿鹄,张丹,等.从岩土体原位检测、探测、监测到感知.工程地质学报,2022,30(6):1811—1818.
Shi B,Zhu HH,Zhang D,et al. From in-situ rock-and-soil testing, exploration, monitoring to sensing. *Journal of Engineering Geology*,2022,30(6):1811—1818. (in Chinese)
- [60] 王嫄,霍鹏,韩毅,等.基于深度学习的气象预报模型研究综述.计算机科学,2025,52(3):112—126.
Wang Y,Huo P,Han Y,et al. Survey on deep learning-based meteorological forecasting models. *Computer Science*,2025,52(3):112—126. (in Chinese)
- [61] Li PL,Xu Q,Liu JL,et al. Establishing radar-derived rainfall thresholds for a landslide early warning system: A case study in the Sichuan Basin, Southwest China. *Scientific Reports*,2025,15:26308.
- [62] Wang ZM,Liang H,Yang HB,et al. Integration of multi-source landslide disaster data based on flink framework and APSO load balancing task scheduling. *ISPRS International Journal of Geo-Information*,2025,14(1):12.
- [63] Caleca F,Tofani V,Raspini F,et al. Quantitative landslide risk assessment for Italy. *Landslides*,2025. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-025-02590-z>.
- [64] Bakhtiari S,Najafi MR,Goda K,et al. A dynamic Bayesian network approach to characterize multi-hazard risks and resilience in interconnected critical infrastructures. *Reliability Engineering & System Safety*,2025,257:110815.
- [65] Qian LH,Zhao P,Li ZS. Dynamic risk assessment of collapse geological hazards on highway slopes in basalt regions during rainy seasons. *Atmosphere*,2025,16(8):978.
- [66] 王瑜.我国“十四五”地质灾害防治明确六大目标.资源与人居环境,2023(1):14.
Wang Y. China’s 14th five-year plan for geological disaster prevention and control defines six major objectives. *Resources Inhabitant and Environment*,2023(1):14. (in Chinese)
- [67] 中国自然资源报.防范台风“丹娜丝”,浙江苍南成功避险一起滑坡灾害. (2025-07-09)/[2025-09-02]. <https://www.iziran.net/news.html?aid=5410430>.
- [68] 胡庆芳,张建云,苏鑫,等.重庆中心城区洪涝灾害防御与韧性提升路径.中国水利,2023(14):15—23.
Hu QF,Zhang JY,Su X,et al. Flood and waterlogging control and the route of resilience promotion strategies for the central urban area of Chongqing. *China Water Resources*,2023(14):15—23. (in Chinese)
- [69] 何正迎,黄雨,Akiyama Mitsuyoshi,等.基于路网连通可靠度的边坡韧性提升决策优化方法.中国科学:技术科学,2024,54(12):2392—2404.
He ZY,Huang Y,Akiyama M,et al. A decision optimization method for resilience-enhanced strategies for slopes based on road network connectivity reliability. *Scientia Sinica (Technologica)*,2024,54(12):2392—2404. (in Chinese)
- [70] 郭晓梅,黄晶晶,王常效,等.广东深圳:夯实基础 提升能力 打通防灾减灾救灾“最后一公里”.中国减灾,2025(9):36—39.
Guo XM,Huang JJ,Wang CX,et al. Guangdong Shenzhen: Consolidate the foundation, enhance capabilities, and bridge the “last mile” in disaster prevention, mitigation, and relief. *Disaster Reduction in China*,2025(9):36—39. (in Chinese)

Challenges and Strategies for Cascading Hazards of Rainfall-induced Landslides in Southeastern Coastal China under Climate Change

Yu Huang^{1, 2*} Wuwei Mao¹ Zhen Guo¹ Min Xiong³
Ping Lu⁴ Xingyue Li^{1, 2} Chongqiang Zhu^{1, 2} Jikai Sun^{1, 2}

1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. College of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China

4. College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract Against the backdrop of intensifying global climate change, the risk of rainfall-induced landslide-flow compound chain disasters in southeastern China's coastal regions has increased significantly. Although current research has made substantial progress in understanding disaster mechanisms, knowledge gaps remain regarding the evolutionary processes of compound chain landslides, particularly in dynamic risk assessment, precise monitoring and early warning, and comprehensive resilience-based mitigation. This study systematically analyzes the characteristics and evolution mechanisms of compound chain disasters from rainfall-induced landslides in southeastern China, identifying core challenges in current prevention systems, including the evolution mechanisms of compound chain disasters, dynamic risk assessment, precision monitoring and warning, and integrated resilience-based mitigation. To address these issues, we propose: AI-based intelligent hazard identification techniques, high-precision risk monitoring and early warning through multi-source data fusion, a dual-control management mechanism combining site-specific and regional approaches, disaster resilience enhancement technologies, and social capacity building for disaster prevention. These solutions aim to advance landslide chain disaster mitigation toward more refined, intelligent, and resilience-oriented approaches.

Keywords southeast coastal areas; rainfall-induced landslides; compound chain landslide hazard; mechanism; monitoring and early warning; risk assessment; resilient disaster prevention

黄雨 同济大学教授,教育部长江学者特聘教授。长期从事地质灾害成因机理及防治方面的教学和科研工作,主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)、重点项目、重点国际(地区)合作研究项目等。以第一完成人获教育部科技进步奖一等奖、上海市自然科学奖一等奖等奖励。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Author, Email: yhuang@tongji.edu.cn