

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.142>



河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展

彭 铭^{1,2}, 王 悦^{1,2}, 马晨议^{1,2*}, 石振明^{1,2}, 朱 艳³

1. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092

2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092

3. 中船第九设计研究院工程有限公司, 上海 200063

摘 要: 河谷滑坡灾害链是由临河区域滑坡体与河谷水体复杂相互作用的一系列链式灾害事件构成的集合体, 最常见的是滑坡涌浪和滑坡堵江灾害链。这些灾害链具有影响范围广、致灾风险大、演化机制复杂等特点。对河谷滑坡灾害链的基本特征、风险评估及防控方法进行了全面综述。研究表明, 河谷滑坡灾害链的不确定性主要体现在灾害触发机制的不确定性、运动过程的动态不确定性以及灾害链相互作用的耦合不确定性。在灾害链识别与易发性评价方面, 主要采用遥感技术、空间分析和机器学习等方法, 但普遍存在对链生效应和时空动态演化特征考虑不足的问题。在风险评估方面, 已发展出定性、定量评估以及基于数值模拟的综合评估方法, 然而危险性和易损性分析受限于数据不足, 缺乏大尺度下的机理分析工具; 现有方法多将灾害链各环节结偶计算, 未能充分体现灾害链的整体性及联动效应。在防控措施方面, 工程与非工程措施相结合的防控策略得到广泛应用, 但对断链减灾效果的量化评估研究仍显不足。未来研究应重点关注: 发展多物理场耦合的跨尺度灾害链演化理论; 建立大尺度多场连续监测和多源异构数据融合的识别和易发性体系; 构建数据物理双驱动的危害链全过程风险评估模型; 强化灾害链精确预警和系统化断链调控机制。

关键词: 河谷滑坡灾害链; 灾害链特征和演化; 滑坡涌浪; 堰塞坝; 风险评估; 断链减灾; 工程地质学。

中图分类号: P642

文章编号: 1000-2383(2025)10-3723-38

收稿日期: 2025-05-02

Review of Risk Assessment and Prevention for Valley Landslide Disaster Chains

Peng Ming^{1,2}, Wang Yue^{1,2}, Ma Chenyi^{1,2*}, Shi Zhenming^{1,2}, Zhu Yan³

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

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

3. China Shipbuilding NDRI Engineering Co., Ltd., Shanghai 200063, China

Abstract: The valley landslide disaster chain refers to a series of cascading hazardous events resulting from the complex interactions between landslide masses in river-adjacent areas and fluvial systems among the most common types are landslide-induced tsunami and landslide damming disaster chains. Research indicates that the uncertainties in valley landslide disaster chains mainly stem from three aspects: the uncertainty of disaster-triggering mechanisms, the dynamic unpredictability of the movement processes, and the coupling uncertainty in chain interactions. Current methods for disaster chain identification and susceptibility assessment primarily utilize remote sensing, spatial analysis, and machine learning techniques. However, these approaches often

基金项目: 国家自然科学基金—联合基金重点项目(No.U23A2044); 广西重点研发计划项目(No. 桂科 AB25069121); 国家自然科学基金—青年基金(No. 42207238); 中央高校基本科研业务费专项资金。

作者简介: 彭铭 (1981—), 男, 教授, 主要从事地质灾害、溃坝机理、风险评估与决策研究。ORCID: 0000-0001-9134-4391. E-mail: pengming@tongji.edu.cn

*** 通讯作者:** 马晨议 (1996—), 男, 博士后, 主要从事地质灾害研究。E-mail: mcy@tongji.edu.cn

引用格式: 彭铭, 王悦, 马晨议, 石振明, 朱艳, 2025. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展. 地球科学, 50(10): 3723—3760.

Citation: Peng Ming, Wang Yue, Ma Chenyi, Shi Zhenming, Zhu Yan, 2025. Review of Risk Assessment and Prevention for Valley Landslide Disaster Chains. *Earth Science*, 50(10): 3723—3760.

fail to adequately account for cascading effects and spatiotemporal evolution characteristics. Although qualitative, quantitative, and numerical simulation-based methods have been developed for risk assessment, limitations remain due to data scarcity and the lack of large-scale mechanistic analysis tools. Current methodologies often couple individual segments of the disaster chain, but fail to capture its systemic integrity and cascading interactions. Although combined structural and non-structural mitigation measures have been implemented, quantitative evaluations of chain-breaking effectiveness remain underdeveloped. Future research should focus on: developing multi-physics, cross-scale evolution theories of disaster chains; establish a large-scale, continuous multi-field monitoring and multi-source heterogeneous data fusion identification system; constructing a data- and physics-driven full-process risk assessment model for disaster chains; and strengthening precise early warning and systematic chain-breaking mitigation strategies.

Key words: valley landslide disaster chain; disaster chain characteristics and evolution; landslide-induced tsunamis; landslide dam; risk assessment; chain-breaking mitigation; engineering geology.

0 引言

河谷滑坡灾害链是由临河区域滑坡体与河谷水体复杂相互作用的一系列链式灾害事件构成的集合体,最常见的是滑坡涌浪和滑坡堵江灾害链,具有影响范围广、致灾风险大、演化机制复杂、级联放大等特点。滑坡涌浪灾害链直接破坏桥梁、隧道、道路等工程结构,甚至导致其完全失效;滑坡堵江灾害链形成堰塞湖,溃坝洪水对下游工程设施造成毁灭性冲击。如,1963年意大利瓦伊昂滑坡激起175 m高的巨浪,造成近3 000人死亡,彻底摧毁了下游的村镇和交通设施,大坝功能完全丧失(Barla and Paronuzzi, 2013)。2018年金沙江白格滑坡形成的堰塞湖溃决后,洪水冲毁下游多个村庄和水利设施,导致交通中断、电力供应受损,经济损失高达数十亿元(Yang *et al.*, 2022)。河谷滑坡灾害链频发还会导致工程长期中断运营,显著增加维护成本等间接经济损失。随着我国“一带一路”和“十四五”规划的推进,川藏铁路、雅鲁藏布江水电开发等国家重大工程多面临穿越河谷地质灾害高发区的问题。灾害风险与工程建设的矛盾日益突出,河谷滑坡灾害链研究面临严峻挑战(彭建兵等, 2020; 马志明, 2024)。

与单一滑坡相比,河谷滑坡灾害链的形成和演变过程涉及流固耦合、能量传递以及灾种转换等关键问题,具有显著的链式特征和级联效应。在滑坡入水过程中,滑坡体与河水通过流固耦合作用剧烈交互,将滑坡动能转化为强冲击性的涌浪灾害;而堰塞坝的形成与溃决过程则进一步将地质灾害转化为水文灾害,导致灾害影响范围与破坏强度呈现非线性放大效应。滑坡体与河水的相互作用不仅决定了初始涌浪的规模,还影响着形成堰塞坝的稳定性及其后续溃决模式,这种多尺度耦合作用使灾害

链演化过程具有显著的非线性、时空延展性和演化路径不确定性,从而大幅提升了灾害链定量预测与风险评估的难度。

鉴于灾害链的破坏性、复杂性和不确定性,国内外学者在灾害链的演化机制以及灾害链的风险评估和防控等方面进行综述。在灾害链演化机制研究方面,不同学者从多角度综述了灾害链的致灾机理、演化过程及模拟方法研究进展。Xu *et al.* (2014)系统综述了灾害链的致灾机制,指出多灾种耦合的链式效应更具破坏性,并提出基于跨学科方法框架的动态阻断策略。余瀚等(2014)进一步聚焦灾害链的灾情累积放大效应,总结了经验地学统计方法、概率模型、复杂网络模型和灾害模拟等研究方法。Fan *et al.* (2019)针对地震诱发的滑坡灾害链,系统分析了滑坡—堰塞坝—溃坝洪水—泥石流等一系列次生灾害的演化过程及其地貌长期影响,揭示了灾害链的级联效应。Fan *et al.* (2021)结合遥感、多方法定年、地球物理和沉积学等手段,总结了滑坡堰塞坝的形成条件、触发因素及其地质背景,并探讨了其对洪水风险、湖泊形成及溃坝后果的影响。对于灾害链演化过程,石振明等(2021a)聚焦崩滑型堰塞坝的溃决演化机制,系统总结了溃坝阶段划分、溃口演变规律、溃决流量及洪水演进特点。Liu *et al.* (2023)进一步分析了滑坡堰塞坝的溃决模式、过程及影响因素,重点探讨了漫顶侵蚀和渗流破坏的判别方法,完善了堰塞坝溃决机制的理论体系。陈世壮等(2023)针对高坝大库滑坡—涌浪灾害链,系统总结了其形成机制、模拟方法及研究进展,分析了现有技术的适用性与不足。徐文杰(2023)从物理力学角度综述了库岸滑坡—涌浪灾害链的演化机制,重点探讨了水—岩耦合作用、滑坡启动—涌浪传播的动力学过程,并对比分析了物理试验与数值模拟方法的适用性。对于灾

害链模拟方法,刘郭林和马联华(2024)从滑坡涌浪爬高角度出发,综述了物理模型实验(参数优化与规律分析)和数值模拟(动力学行为与爬升预测)的研究进展.杜镇瀚等(2025)聚焦高山峡谷区土石坝库岸滑坡涌浪—溃坝灾害链,系统综述了其致灾机理、链式效应及研究进展.这些综述研究从灾害链的致灾机制、演化过程到模拟方法逐步深化,形成了从理论到应用的完整研究体系.然而,综述研究多侧重于灾害链影响因素和物理过程的确定性分析,缺乏面向复杂动态演化过程与不确定性耦合的系统性建模与评估框架.

在风险评估和防控方面,大量的学者从灾害链的稳定性、评估及防控策略优化等方面进行综述.针对灾害链稳定性,哈斯等(2016)系统归纳了灾害链研究的主要内容,涵盖形成机制、风险评估、损失评估及孕源断链减灾对策,总结了基于数据驱动、复杂网络和遥感实测的研究方法.年廷凯等(2018)聚焦堰塞坝灾害链,综述了其形成条件、稳定性分析、溃坝机制及链生效应,通过建立全球堰塞坝数据库揭示了多参数关联性,提出了基于三参数的稳定性快速评估方法,并指出未来需发展全寿命过程模拟与预警系统.针对灾害链评估,崔鹏和郭剑(2021)强调沟谷灾害链风险评估需关注原生灾害启动机制与次生灾害链生效应,提出应强化潜在物源识别、量化灾种转化临界条件,并构建灾害链全过程数值模拟方法.石振明等(2023)针对崩滑型堰塞坝,系统总结了其形成机制及危险性评估方法(成坝判别、稳定性分析、寿命预测及溃决洪水模拟),进一步完善了堰塞坝风险评估的理论体系.Zhong *et al.*(2023)从灾害链演化、全球数据库、评估方法、溃决模拟、损失量化及减灾措施等方面,系统综述了堰塞链定性及定量风险评估的研究进展,并提出未来需发展多尺度耦合模型.针对灾害链风险防控,汪华晨等(2024)聚焦高坝大库滑坡涌浪对水工建筑物的作用力,通过分析典型实例与现有成果(规范公式、物理试验与数值模拟),指出需重点关注涌浪二次冲击和回落拖曳力效应.杜镇瀚等(2025)从滑坡涌浪特征、建筑物作用过程及漫顶溃决机理出发,综述了近坝库岸滑坡涌浪—溃坝链生灾害的试验与模拟进展.黄波林等(2025)以涌浪演进阶段为主线,系统梳理了从科学认知、预测分析到风险防控的研究进展,阐述了不同阶段的工程防控方法.这些研究从灾害链的风险评估框架构建、

定量化方法发展到工程防控技术优化逐步深入,形成了“机制—评估—防控”的完整研究链条.然而,现有综述研究多从过程片段或灾种视角出发,聚焦于河谷滑坡灾害链中涌浪危险性或堰塞坝稳定性分析等局部过程,仍缺乏从河谷地理单元出发的系统性分析框架.尤其在灾害链演化过程中,河谷地貌对灾害路径与强度的调控作用尚未被系统揭示,针对易发性、易损性及综合防控策略的研究仍显薄弱,较少从河谷地理单元的角度对灾害链的演化机制和风险评估进行全面总结.

因此,本文从河谷地理单元的角度出发,明确河谷滑坡灾害链的概念,系统梳理灾害链完整的演化链条;重点关注多灾种耦合过程中的灾种转换机制与不确定性传播规律,梳理基于地质条件和诱发因素的易发性评价方法,探讨涵盖灾害链启动、转化与终止机制的危险性分析思路;整合对工程设施和社会经济系统影响的易损性分析方法,在此基础上,系统总结现有风险评估体系与防控策略,旨在为灾害链的识别、动态评估与应急管理提供理论支撑,并为后续研究提供方向指引.

本文结构如下:第1节系统梳理河谷滑坡灾害链的定义、分类及影响因素;第2节总结灾害链识别方法;第3~5节分别从易发性、危险性和易损性3个维度评述研究进展;第6~7节归纳风险评估与防控策略;第8~9节指出研究不足并展望未来发展方向.

1 灾害链的定义及影响因素分析

1.1 灾害链的定义

自20世纪70年代起,国际学者开始关注灾害间的复杂联动性,提出了“级联灾害”(Cascading Disaster)(Alexander *et al.*, 2018)、“附加灾害链”(Supply Chain for Disaster)、“多米诺效应”(Domino Effects)(Sivertun *et al.*, 2007)等概念,深入探讨灾害间的因果关系和传播路径.国内学者从20世纪70年代起(高建国,1986;李永善,1986;郭增建和秦保燕,1987)逐步构建了灾害链的理论框架,探讨灾害间的相互性、共生性与叠加效应,并为灾害预测与对策制定提供了科学依据.随着研究的不断深入,灾害链概念逐渐被系统化,并针对具体灾害类型的研究也日益深入.灾害链研究已从理论框架阶段发展至类型细化与机制探索.学者们提出了大气灾害链、生态环境灾害链、崩滑流地质灾害链、山地灾害链、黄土地质灾害链以及沟谷灾害链等具体概

念(Xu *et al.*, 2014; 马鹏辉和彭建兵, 2022), 分别从不同角度揭示了灾害链的形成机制与演化规律. 崩滑流地质灾害链揭示了崩塌、滑坡与泥石流之间的耦合作用(冯玉涛和肖盛燮, 2009; 刘传正和王建新, 2024); 山地灾害链阐明了山地环境中灾害的连锁反应过程(钟敦伦等, 2013); 黄土地质灾害链则聚焦于黄土层特有的地质特性引发的灾害序列(朱兴华等, 2017); 沟谷灾害链则强调了地形地貌对灾害演化的控制作用(崔鹏和郭剑, 2021).

1.2 河谷滑坡灾害链的分类

河谷区域特殊地质条件为灾害链的空间传播提供了重要的介质, 通过水动力学效应显著放大灾害的能量和破坏力, 导致灾害链的范围扩展及严重性叠加增强(Chang *et al.*, 2022). 考虑河谷滑坡灾害链水流的传递和放大效应, 根据灾害链的触发源和演化过程, 将河谷滑坡灾害链划分为涌浪灾害链、堰塞坝灾害链和复合灾害链进行详细叙述.

1.2.1 涌浪灾害链 主要发育于河谷宽阔、水深较大的岸坡地带, 其形成机制为大量松散物质高速入水, 激发强涌浪并造成沿岸冲击破坏. 根据失稳岩土体的运动方式, 可细分为滑坡—涌浪灾害链与崩塌—涌浪灾害链两类.

(1) 滑坡—涌浪灾害链. 滑坡—涌浪灾害链(图 1)主要发生在高山峡谷区的水库、湖泊或河流沿岸, 尤其是地质构造活跃、岩体破碎且水位变化显著的地区, 如中国西南地区的三峡库区、金沙江、雅砻江流域, 以及挪威峡湾、意大利等地. 该类灾害链破坏力极强、影响范围广泛, 不仅严重威胁水电工程结构安全与运行稳定, 也对上下游居民生命财产安全构成重大潜在风险. 1967 年拓溪水库滑坡引发 25 m 涌浪, 漫坝冲毁下游设施, 造成重大损失(杜伯辉, 2006). 2012 年溪洛渡水库蓄水诱发黄坪滑坡, 形成超 20 m 涌浪, 导致 12 人失踪(蒋权等, 2018).

(2) 崩塌—涌浪灾害链. 相较滑坡型, 崩塌—涌浪灾害链(图 2)主要发生在陡峭岩质岸坡、高山冰川区或冰湖溃决易发地带. 其特征为崩塌体自由坠落产生巨大冲击能量, 激发初始浪高更高, 具有突发性强、能量集中、破坏力大等显著特点. 根据崩塌体物质组成与触发环境的差异, 又可分为岩质崩塌—涌浪与冰崩—涌浪两种典型类型. 岩质崩塌—涌浪灾害链由构造应力、风化卸荷或河流侵蚀等作用诱发岸坡危岩体崩落, 冲击水体形成高能涌浪. 如挪威 Ramnefjellet 山体崩塌(Waldmann *et al.*,

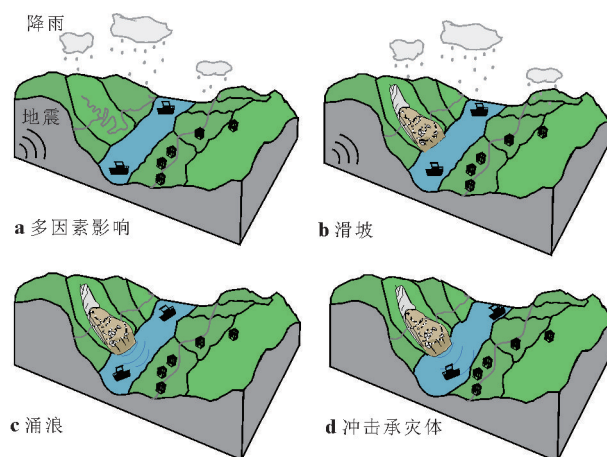


图 1 典型滑坡—涌浪—灾害链示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical landslide-induced tsunami hazard chain

2021). 三峡库区龚家方危岩体崩塌, 形成涌浪达 13 m, 影响范围超过 10 km(黄波林和殷跃平, 2012). 此外, 如箭穿洞、曲尺滩等多个危岩体, 在地形与水体作用下均具较高潜在风险(张全等, 2021). 冰崩—涌浪灾害链是由高山冰川或冰岩混合体在温度突变、地震或基底滑移等因素作用下失稳、坠落至冰湖或水体中, 激发剧烈涌浪, 形成特殊灾害链, 如印度查莫利冰川断裂事件(殷跃平等, 2021).

1.2.2 堰塞坝灾害链 多见于河道狭窄、地形陡峭的峡谷区, 其典型过程为失稳体快速堆积堵塞河道, 形成堰塞坝并蓄水成湖, 最终因坝体溃决引发次生洪水灾害. 依据堰塞坝的成因差异, 可分为滑坡—堰塞坝—溃决洪水灾害链和崩塌—堰塞坝—溃决洪水灾害链.

(1) 滑坡—堰塞坝—溃决洪水灾害链. 滑坡—堰塞坝—溃决洪水灾害链(图 3)主要分布于构造活动强烈、地形陡峭、降水充沛或冰川作用显著的高山峡谷区. 其形成过程包括大规模滑坡体堵塞河道形成堰塞坝, 坝体蓄水至失稳溃决, 进而引发洪水灾害. 堰塞坝的形成条件及其稳定性对下游安全具有极大影响, 一旦坝体溃决, 常造成重大人员伤亡与财产损失. 按不同滑坡类型分为常规滑坡和冰川型滑坡堵江溃坝灾害链. 常规滑坡堵江溃坝灾害链由松散土体或破碎岩体滑坡堆积形成堰塞坝, 结构松散、抗渗能力弱, 易受雨水入渗或坝体渗流破坏诱发溃决. 如 2000 年易贡滑坡、2008 年汶川地震触发的唐家山堰塞坝、2018 年西藏白格滑坡均为典型代表(Fan *et al.*, 2019; Zhou *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2022). 冰川型滑坡堵江溃坝灾害链由冰川体

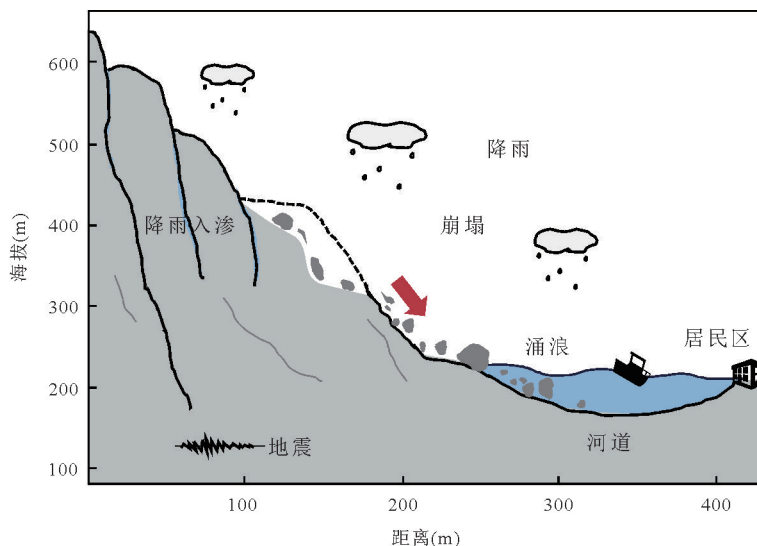


图 2 崩塌—涌浪灾害链示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the collapse-induced tsunami hazard chain

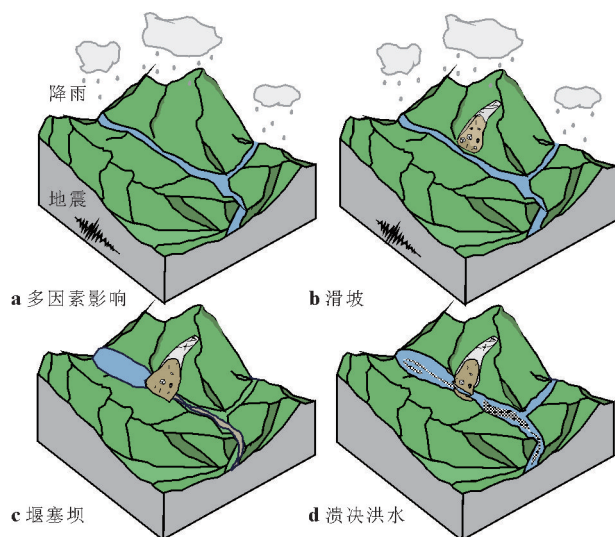


图 3 典型滑坡—堰塞坝—溃决洪水灾害链示意图

Fig. 3 Schematic diagram of a typical landslide-dam-outburst flood hazard chain

或冰岩混合体滑入河道形成堰塞坝,随着温度变化或应力扰动诱发坝体失稳,产生溃决洪水。

(2)崩塌—堰塞坝—溃决洪水灾害链.与滑坡—堰塞坝—溃决洪水灾害链相比,崩塌—堰塞坝—溃决洪水灾害链(图4)多见于高陡岩质山区、冰川活动带或高位碎屑流活跃区.该类灾害链由大规模岩体崩塌或高速碎屑流瞬时堆积堵塞河道形成堰塞坝,其物质多为粗颗粒岩石,坝体松散且透水性强,稳定性较差.由于崩塌体堆积速度快、坝体不均匀,往往更易受到后续降雨、冰雪融水或库水上涨等外部因素影响,发生突发性溃决,其灾害演

化过程更为复杂,防控难度大.如2010年巴基斯坦阿塔巴德村的冰岩崩塌,冰岩体滑入哈萨河阻塞了河道,形成堰塞湖并最终溃决(Butt *et al.*, 2013).2025年瑞士阿尔卑斯山部分山体发生大规模冰川断裂崩塌,形成堰塞湖。

1.2.3 复合型灾害链 常发生于大型河流峡谷等河谷狭窄、水体深邃的区域,兼具涌浪与堰塞坝的双重致灾效应.其显著特征是岩土体失稳后既触发涌浪,又形成堰塞坝,从而产生链式灾害的叠加与放大效应.根据灾害组合方式,可进一步划分为涌浪—堰塞坝复合灾害链与冰崩—涌浪—冰湖溃决灾害链等类型。

(1)涌浪—堰塞坝复合灾害链.涌浪—堰塞坝复合灾害链(图5)多发生于高山峡谷区的水库区域或构造活跃带,典型特征为崩滑体高速入水,激起巨大涌浪并在河道中堆积形成堰塞坝.在此类复合灾害链中,危险性通常由主导环节决定,如涌浪冲击、堰塞坝形成或其溃决过程,灾害效应往往通过链式响应显著放大.若崩滑体速度大而体积有限,难以有效阻断河道,则其主要破坏形式表现为涌浪冲击.如,2003年三峡库区首次蓄水时发生的千将坪滑坡,滑入青干河并激起近30 m高的涌浪,阻塞河道并形成堰塞坝,造成多人死亡和严重的经济损失(廖秋林等,2005).相反,当崩滑体规模庞大且河道狭窄时,堰塞坝灾害效应则可能主导整个链式过程.如2018年白格滑坡堰塞坝灾害链,激起巨大涌浪,并迅速阻塞河道,形成堰塞坝对上游地区造成

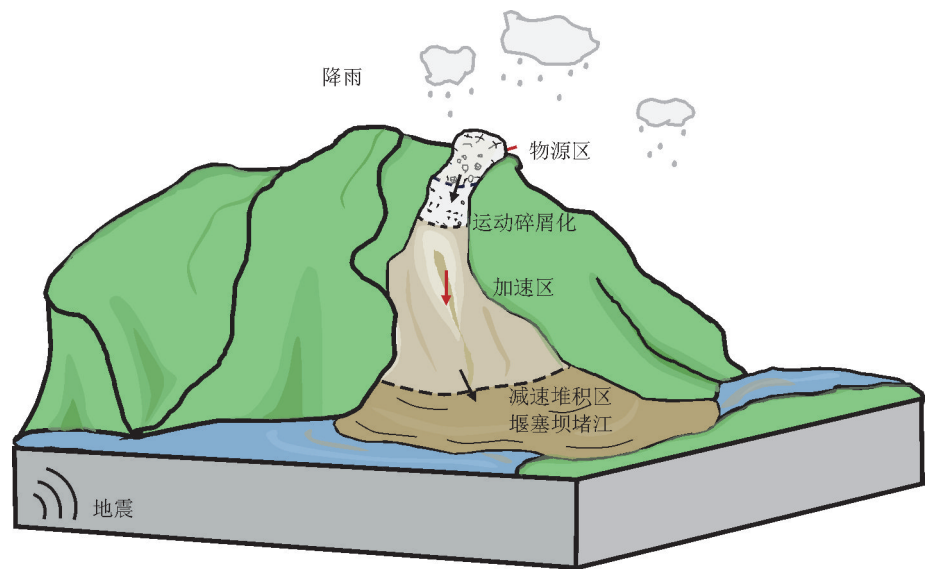


图 4 崩塌—堰塞坝—溃决洪水灾害链示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the collapse-landslide dam-outburst flood hazard chain

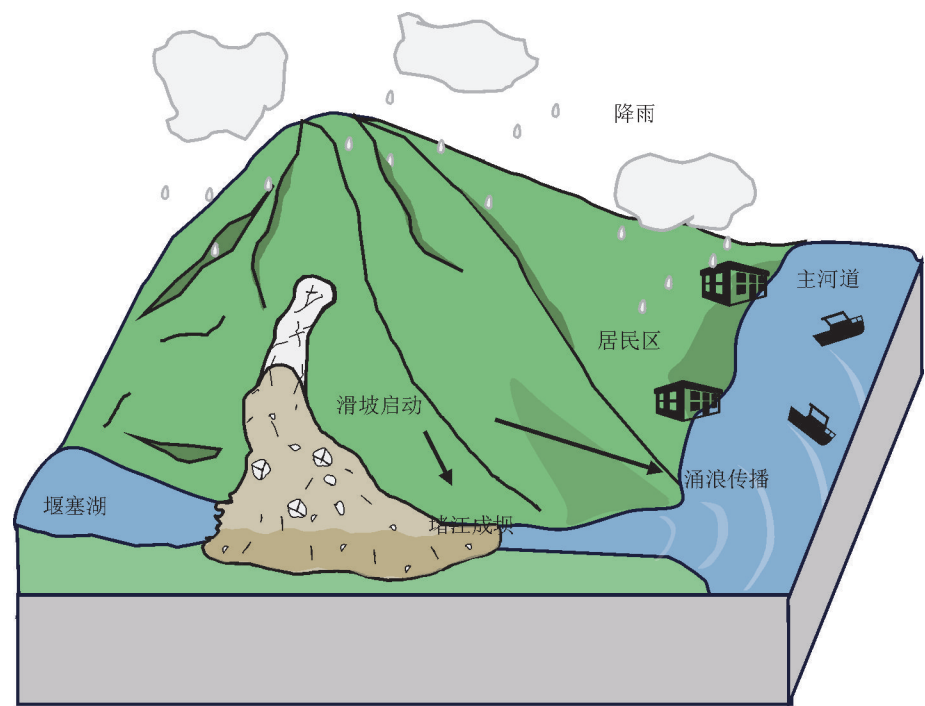


图 5 涌浪—堰塞坝复合灾害链示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the tsunami-dam combined hazard chain

了严重的淹没灾害,直接威胁到当地居民的生命财产安全、基础设施以及生态环境(Yang *et al.*, 2022).

(2)冰崩—涌浪—冰湖溃决灾害链.冰崩—涌浪—冰湖溃决灾害链(图6)主要发生于冰川覆盖区或退缩区,其形成机制通常涉及气候变暖、地震扰动或重力不稳定等诱因,引发冰体或冰—岩混合体

崩塌,进入冰湖或河道后激发巨大涌浪,进而冲击冰坝结构导致溃决.如,2013年7月西藏嘉黎县忠玉乡的冰湖溃决洪水灾害,造成238户1160人受灾和2.7亿元经济损失(孙美平等,2014).2021年印度北阿坎德邦的拉尼村冰川断裂诱发涌浪,引发下游洪水并冲毁水坝和水电站设施(Shugar *et al.*, 2021).这类灾害不仅威胁生命安全,还会造成巨大的财产

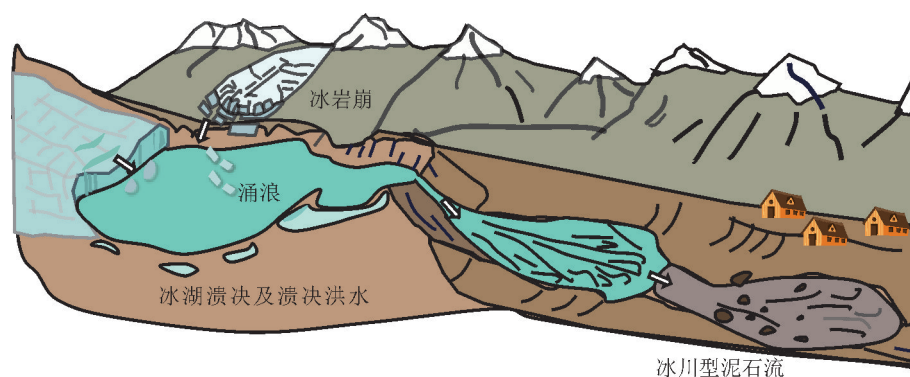


图6 冰崩—涌浪—冰湖溃决灾害链典型示意图(改编自 Westoby *et al.*, 2014)

Fig. 6 Typical schematic diagram of the ice avalanche-tsunami-glacial lake outburst hazard chain (adapted from Westoby *et al.*, 2014)

损失,并对生态环境和基础设施带来长期影响.然而,由于冰崩—涌浪—冰湖溃决灾害链形成机制复杂、观测数据有限,目前相关系统性综述研究仍较匮乏,因此本文不作为重点探讨对象.

1.3 影响因素及不确定性

河谷滑坡灾害链的发生受地质、水文、气象等自然因素及人为活动的共同驱动.灾害链的形成通常涉及复杂的因果关联,具有显著的周期性、随机性、突发性与不确定性特征.灾害链的不确定性主要源于触发因素的随机性、传播路径的复杂性以及灾害环节间相互作用的非线性效应.

滑坡的启动受地质条件、水文环境与外部扰动等多重因素的共同影响,导致其发生时间、规模和位置具有高度不确定性.地质条件方面,滑坡体的初始强度、岩土性质(如黏聚力、内摩擦角)直接影响其稳定性(徐文杰, 2012; Zengaffinen-Morris *et al.*, 2022).水文环境方面,降雨强度、入渗深度、库水位变动等水动力过程可显著降低剪切强度,诱发滑坡失稳(陈世壮等, 2023).外部触发因素如地震、人类工程活动等也可能加速滑坡启动(Ermini and Casagli, 2003; Wu *et al.*, 2022).这些因素间的相互耦合使滑坡启动的预测存在显著的不确定性.

滑坡的运动过程涉及速度、加速度、运动距离、前缘形态等一系列动态参数.这些参数直接决定了涌浪激发的能量或堰塞坝形成的可能性.滑坡体积是控制涌浪能量(Løvholt *et al.*, 2015, 2020)与堰塞坝堆积能力(Ermini and Casagli, 2003)的关键因素.动力学参数如速度、弗劳德数(Fr)影响涌浪初始浪高与传播距离(Løvholt *et al.*, 2020),而运动距离、滑坡轨迹与坡度则影响堵江可能性(Swanson *et al.*, 1985; Wu *et al.*, 2022).此外,滑坡材料的破

碎程度、前缘面积等变形特征也显著影响对水体或地形的冲击力,加剧了灾害链中后续灾害的形成复杂性(Zengaffinen-Morris *et al.*, 2022).

滑坡与水体、地形及外部环境的相互作用进一步增加了灾害链的复杂性.在滑坡—涌浪灾害链中,初始水深、水面宽度等水文参数决定了涌浪的激发效率与传播强度(Clarke *et al.*, 2019),滑坡前缘的入水面积与入水方式控制了涌浪的形态与波高(Løvholt *et al.*, 2020).在滑坡—堰塞坝灾害链中,河道宽度、水沙输移能力等影响物质堆积效率(崔鹏和郭剑, 2021),而地形因素如河谷坡度与切割深度等则影响滑坡物质的迁移路径与堆积范围(柴贺军等, 2005; 高云建等, 2020).这些因素之间复杂的非线性耦合使得灾害链最终表现形式(如涌浪高度、堰塞坝稳定性)难以进行准确预测.

2 灾害链识别

灾害链识别是指对滑坡灾害及其次生、衍生灾害的因果关系和演化过程进行分析,识别出滑坡可能引发的连锁灾害事件序列.准确识别灾害链的发生对于灾害预防、风险评估及应急管理具有重要意义.河谷滑坡灾害链的识别分为河谷岸坡滑坡灾害识别及涌浪、堰塞坝等灾害链识别.

2.1 滑坡灾害识别

滑坡作为灾害链的起始环节,其触发因素主要包括降雨、地震、库区水位变化或人为活动.目前识别方法可分为数据获取类与算法处理类(表1).

在数据获取类中,主要聚焦于数据的获取与分析,各具特点.野外调查虽然数据准确性高,但效率较低,适合小范围的精细研究(Nikolakopoulos

表 1 滑坡灾害识别方法
Table 1 Landslide hazard identification methods

	方法	原理
数据获取	野外调查	依赖于多种地质和环境特征的分析
	变化检测	差值法、比值法、主成分分析(PCA)
	基于像元的滑坡识别	根据像元的纹理和光谱信息进行遥感影像分类
	面向对象的滑坡识别	结合光谱、纹理和形状等信息将像元聚合为对象
	机载雷达	通过测量地表高程的变化来识别并监测灾害体
算法处理	合成孔径雷达干涉测量	D-InSAR PS-InSAR SBAS-InSAR
		根据卫星或飞机接收到的回波的相位差生成地形变形图进行滑坡识别
	目视解译	根据遥感影像中滑坡的颜色、纹理、形态等特征肉眼识别
	机器学习	支持向量机、随机森林、最大似然法
	深度学习	Mask、残差神经网络(Res-Net)、U-Net

et al., 2023); 基于像元的识别精度较高, 但易受“椒盐效应”干扰 (Saba *et al.*, 2023); 面向对象的识别综合性强, 能够处理复杂地形, 但计算复杂度较高 (Karantanellis *et al.*, 2020); 机载雷达可有效监测地表形变, 但成本高昂且受天气条件限制; 合成孔径雷达干涉测量精度卓越, 但易受大气干扰, 适合大范围监测 (张勤等, 2022; Joshi *et al.*, 2024). 近年来, 多源遥感数据融合方法逐渐受到重视, 主要通过联合 InSAR、LiDAR、光学影像及 DEM 等多类数据 (Sestras *et al.*, 2025), 融合空间、时间及几何信息, 实现对滑坡形变特征与空间边界的更高精度提取.

在算法处理类中, 则侧重于算法与自动化处理: 目视解译操作直观简便, 但主观性较强, 常用于初步筛查; 变化检测能够定量分析滑坡的动态变化, 但对数据质量要求较高 (Casagli *et al.*, 2023; Kang *et al.*, 2023); 机器学习适合大范围滑坡识别, 但对标注数据和特征选择依赖较强 (Meena *et al.*, 2022; 宋雨洋等, 2022); 深度学习自动化程度高, 识别精度显著, 但需要大量计算资源和数据支持 (Ghorbanzadeh *et al.*, 2023; 赵通等, 2024).

随着计算机、遥感技术的发展和遥感数据分辨率的提高, 基于特征信息的变化检测、机器学习、深度学习及 InSAR 技术有效丰富了滑坡识别的方法, 提高了滑坡识别的准确度, 提升了灾害监测的实用性. 但现有方法仍需人工协同分析, 尚未实现滑坡

自动化检测, 同时由于缺乏高质量光学遥感滑坡数据样本与资源, 导致滑坡和相似地物的区分存在难度, 限制了模型的泛化能力.

2.2 灾害链的识别

灾害链的识别主要分为两个方面: 一是潜在灾害链识别, 即通过分析潜在灾害的触发机制、传播路径和耦合关系, 预测未来可能形成的灾害链; 二是已发生灾害链的识别, 即对实际发生的灾害事件进行回溯分析, 明确其形成过程、演变规律及影响范围.

2.2.1 潜在灾害链识别

潜在灾害链识别的核心目标是判断滑坡是否会引发涌浪或堰塞坝灾害链.

滑坡发生后是否会产生涌浪的识别方法可总结为定性判断法、定量分析法、数值模拟法、监测与预警法等. 定性判断法基于经验和观察, 通过滑坡的规模、速度、地形条件等特征, 结合历史案例或专家经验进行初步判断. 这种方法简单快捷, 但依赖主观经验, 准确性有限. 定量分析法利用物理模型和公式, 用于评估涌浪是否发生及其规模. 这种方法需要滑坡体参数 (如体积、速度、密度等) 和水体参数 (如深度、面积等), 适用于有详细数据的场景. 数值模拟法通过计算机仿真软件 (如 FLOW-3D、ANSYS 等) 对滑坡体入水过程进行模拟, 预测涌浪的产生及其传播, 适用于复杂地形或大规模滑坡, 能够提供较为精确的结果 (Wang *et al.*, 2025). 监测与预警法基于实时监测数据, 通过传感器、遥感技

术等实时监测滑坡体的运动状态(如速度、位移)和水体变化,及时判断涌浪风险,适用于已安装监测设备的区域,能够实现动态预警(Dai *et al.*, 2020).

滑坡—堰塞坝灾害链需结合宏观地质背景调查,以评估堵江风险.主要的识别方法包括遥感识别、数值模拟、数据驱动方法等(李永超, 2021).遥感影像能够识别活跃的位置和规模,分析滑坡区域的地形地貌特征(如河谷宽度、坡度、地形起伏等),判断滑坡体是否可能堵塞河道形成堰塞坝(Jin *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2022).结合滑坡区域的地质条件(如岩性、结构、断裂带等),评估滑坡体的稳定性和堆积特征,判断其是否具备形成堰塞坝的条件,尽管识别效率较高,但仍受限于分辨率、天气、地质差异及滑坡参数的不确定性.数值模拟法利用计算机仿真软件(如 FLOW-3D、Massflow、PFC 等),模拟滑坡体运动及其与河道的相互作用,预测堰塞坝的形成可能性及其稳定性,能够模拟复杂场景,但需要较高的技术支持和计算资源(Yan *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).数据驱动方法(如逻辑回归、支持向量机、深度学习等)通过参考历史上类似滑坡事件是否形成过堰塞坝(付兵杰等, 2025),结合区域地形、地质、水文及土地利用信息等工程地质条件,评估滑坡发生的可能性及其形成堰塞坝的潜力.这一方法依赖于历史数据的完整性和可比性.

2.2.2 已发生灾害链识别 已发生灾害链的识别主要针对滑坡—涌浪灾害链和滑坡—堰塞坝灾害链两种典型灾害链类型.

当滑坡—涌浪灾害链已经形成时,识别方法可以分为:现场观测法、遥感监测法、数据分析法、模型预测法和综合评估法(Liu *et al.*, 2020).现场观测法通过实地考察获取滑坡运动状态、涌浪波高及其传播范围等信息(Heidarzadeh *et al.*, 2023).这种方法直观可靠,但受限于现场条件.遥感监测法利用卫星、无人机等平台获取影像数据,获取滑坡体和涌浪的影像数据,进行大范围、实时的监测和分析.遥感数据覆盖范围广,能够快速获取数据,但分辨率有限,且受天气条件影响.数据分析法基于已有的监测数据(如滑坡体位移、水体波动等),通过统计分析或机器学习算法,识别灾害链的发展趋势和潜在风险,能够挖掘数据中的规律,但需要高质量的数据支持(Farhadi *et al.*, 2016).模型预测法利用物理模型或数值模拟,预测滑坡—涌浪灾害链的后

续发展,包括涌浪的传播路径、影响范围等,能够提供科学预测,但需要精确的输入参数和计算资源.

在滑坡—堰塞坝灾害链的识别中,主要包括对堰塞坝位置、方量的识别以及根据堵江残余体的特征来识别早期堵江事件,主要识别方法包括现场调查、历史数据分析、遥感识别、数值模拟、地球物理探测等.现场调查法通过实地考察,能够获取高精度的第一手数据,直接观察滑坡体和堰塞坝的实际情况(Wolter *et al.*, 2022),但耗时较长、成本较高.历史数据分析法通过分析历史灾害事件的数据,与当前情况进行类比和预测,借鉴历史经验,提高识别的准确性(Tacconi *et al.*, 2018),但历史数据不完整或缺乏可比性,无法完全反映当前灾害链的特殊性.遥感监测法(如卫星影像、无人机影像和雷达影像)能够快速获取大范围的地形地貌信息(石振明等, 2023),监测滑坡和堰塞坝的形态、规模及其动态变化,具有覆盖范围广、效率高的优势,但其分辨率可能不足以识别小规模或细微变化,且受天气和光照条件影响较大(Abad *et al.*, 2022).数值模拟法利用计算机仿真软件模拟滑坡体的运动、堰塞坝的形成及其对河道的影响,能提供量化的预测结果(Wu *et al.*, 2023),但需要高精度的输入数据和计算资源,模型假设影响结果的准确性.地球物理探测法(如地震勘探、电磁勘探、地质雷达等)则能够探测滑坡体和堰塞坝的地下结构、岩性、含水层等特征,弥补遥感技术的不足(Yang *et al.*, 2022; 梁姚颖等, 2025),但技术要求复杂,数据解译存在不确定性.

灾害链演化路径的不确定性和链式特征的延展性相互影响增加了整个灾害过程的复杂性和持续时间,且灾害链多发生于隐蔽河谷,导致缺乏灾害链完整发生过程记录 and 高质量遥感数据,使得潜在灾害链和已发生灾害链的识别结果的准确性受限.同时,现有的灾害链识别方法是对独立灾害识别的扩展,缺乏系统性的多灾种耦合过程识别方法.

3 灾害链的易发性

易发性指某一区域在自然条件或人类活动影响下,发生地质灾害的潜在可能性,是地质灾害风险评估的重要组成部分.

3.1 滑坡的易发性

区域滑坡易发性分析是地质灾害研究的重要方向,常见方法包括统计方法、机器学习方法和新

兴人工智能技术三大类.统计方法主要依赖专家经验或统计分析,包括专家打分法、指标权重法(如层次分析法 AHP、信息量法 IV)、频率比法以及逻辑回归等(Huang *et al.*, 2024),适用于数据量较小或机器学习条件不足的情况.机器学习方法通过数据驱动模型自动学习滑坡与影响因素之间的关系,常用的方法包括随机森林、支持向量机(SVM)、人工神经网络(ANN)等,能够处理大量数据并捕捉滑坡与影响因素之间的非线性关系(Merghadi *et al.*, 2020; 叶润青等, 2021).人工智能技术进一步提升了滑坡易发性分析的精度和效率,包括集成学习(如梯度提升树)、深度学习(如卷积神经网络 CNN、循环神经网络 RNN)、迁移学习和强化学习等(王悦等, 2024),这些技术能够处理更高维度和更复杂的数据,尤其适用于数据量充足或需要跨区域迁移模型的情况.近年来,融合物理模型与机器学习方法的混合建模策略逐渐成为研究热点.该类方法结合地质力学的过程建模能力与数据驱动模型的泛化能力,在数据样本不足或地质异质性强的区域表现出更强的鲁棒性和解释性.

单体滑坡概率分析方法根据技术手段和模型特点分为统计分析方法、数值模拟方法以及复杂网络和概率模型方法三大类.统计分析方法主要基于历史数据和时序分析,通过统计滑坡发生的频率、趋势和规律来评估滑坡概率,适用于数据积累较为丰富的区域(Dai *et al.*, 2023).数值模拟方法则通过物理模型和数学计算模拟滑坡的发生过程,常用的方法包括有限元分析(FEA)和离散元分析(DEM),这些方法能够模拟岩土体的应力、应变和变形行为,为滑坡概率分析提供力学依据(蒋水华等, 2024).复杂网络和概率模型方法则结合了网络理论和概率统计,包括复杂网络模型和贝叶斯网络等,这些方法能够处理滑坡系统中的多因素相互作用和不确定性,通过构建概率图模型或网络结构评估滑坡发生的条件概率(宋宇飞等, 2023).

当前滑坡易发性评价研究已形成较为成熟的区域易发性分析和单体概率预测方法体系.区域易发性评价方法中,机器学习和人工智能技术逐渐取代传统统计方法,显著提高了预测精度.在单体滑坡概率分析中,数值模拟和网络模型的应用使得评价精度有了较大提升.但是,一方面,区域内滑坡数量多,灾害发生受多因素影响,导致数据获取困难,多源数据融合不充分;另一方面,现有的易发性评

价模型在特定区域展示出优秀效果,但在其他区域应用时存在泛化能力不足的问题,机器学习和人工智能技术的“黑箱”特征,导致模型内部机制不明确,可解释性差.单体方法,一方面,缺乏精细化物理原理和数据融合方法,且依赖于有限的的数据,难以实现灾害发生和演化全过程的动态预测;另一方面,许多滑坡灾害具有突发性,缺乏明确的先兆,现有分析方法严重依赖感知数据,缺乏动态感知滑坡状态的能力.

3.2 灾害链的易发性

灾害链的易发性分析从涌浪灾害链和堰塞坝灾害链两方面进行详细的总结.

滑坡—涌浪灾害链的易发性分析,旨在评估滑坡引发涌浪灾害的可能性,其分析方法通常包括定性分析、定量分析和综合评估三类.定性分析法主要基于专家经验和现场调查判断涌浪灾害的可能性(张宇, 2022).这类方法简单易行,但主观性较强,结果可能受专家经验的影响.定量分析法则通过数学模型和统计方法对易发性进行量化评估,如利用统计模型(如逻辑回归、多元回归等)分析历史数据,或通过数值模拟法模拟滑坡体的运动、涌浪的形成及其传播过程(陈李蓉, 2023; Singh *et al.*, 2025).此外,机器学习法(如支持向量机、随机森林、神经网络等)也被广泛应用于处理大量复杂数据(Li *et al.*, 2024a),预测灾害链的易发性.定量分析法能够提供客观的量化结果,但需要大量数据和计算资源,模型假设可能影响结果的准确性.

滑坡—堰塞坝灾害链的易发性分析是评估滑坡及其引发的堰塞坝灾害发生可能性的关键环节,其分析方法主要包括定性分析、定量分析和综合评估三类.定性分析法主要基于专家经验和现场调查,对滑坡体特征、地形地貌、水文条件等因素进行初步评估,或通过现场调查法获取第一手数据,判断堰塞坝灾害的可能性.定量分析法则综合考虑滑坡动力学特征、河谷地形约束及水文地质条件,通过数学模型与统计方法、机器学习等处理大量复杂数据,量化评估堰塞坝形成的可能性(王珊珊等, 2016; Wu *et al.*, 2024).定量分析方法被广泛应用于分析滑坡体积、运动距离与河谷宽度的阈值关系,以及地质地形因子的空间关联性,构建多指标评价体系,量化堰塞坝与非堰塞滑坡的地形—水文差异,预测灾害链的易发性(Chen *et al.*, 2024).

相比滑坡易发性,灾害链易发性研究相对较

少,主要针对滑坡特定特征的预测,预测过程是非完整的链式分析,侧重于对多灾害的预测结果进行结偶处理,而链式过程精细化模拟不足.其次,灾害链全过程数据稀缺,难以支撑有效的建模与分析,导致灾害链易发性结果准确性较低,迫切需要提出考虑多物理场耦合的跨尺度灾害链分析方法.同时,灾害链形成和演化过程存在不确定性,然而,灾害链的易发性预测依赖于确定性分析模型,导致评价结果的准确度较低.

4 灾害链的危险性

滑坡的体积、滑速、运动距离等多维特征参数对灾害链的形成与演化具有重要影响.在涌浪或堰塞坝灾害链的形成及传播过程中,由滑坡诱发的洪水对周边环境及土木工程设施构成重大威胁.

4.1 滑坡的危险性

滑坡危险性通常可分为 3 个维度:空间(发生位置)、时间(发生概率)、规模(灾害规模).许多文献将“空间”维度用于描述滑坡易发性(通常以概率表达),时间(发生概率)基于触发因子如降雨、地震、库水位等的频率和特征,而规模用于评估滑坡影响程度,涉及滑坡体积、滑速、运动距离等.

4.1.1 滑坡体积计算 滑坡体积预测主要包括几何模型、数字高程模型(DEM)计算、经验公式、三维建模、现场测量、遥感估算和数值模拟等.几何模型法将滑坡体简化为规则几何体(如棱柱或锥体)进行估算,方法简单但精度有限(杨玲等, 2025);DEM 法则基于滑坡发生前后的高程差异,计算体积变化,精度较高但需依赖高质量的高程数据(Lin and Chen, 2020).经验统计法基于历史滑坡数据,建立体积与面积等空间指标之间的幂律关系.如面积—体积经验公式(Fan *et al.*, 2019):

$$V = k \cdot A^\gamma, \quad (1)$$

式中: V 表示滑坡体积(m^3), A 表示滑坡面积(m^2), k 和 γ 为回归分析得到的经验系数.

三维建模法借助建模软件重建滑坡体三维形态,精度较高但建模过程复杂.现场测量法通过钻探、激光扫描等手段获取滑坡体几何参数,数据精确但操作繁琐、成本较高(李彩虹等, 2021).遥感技术法利用卫星影像、InSAR 等遥感数据解译滑坡特征估算滑坡面积和厚度,覆盖范围广但精度受限于影像分辨率与算法性能(Ju *et al.*, 2023);数值模拟法基于有限元法(FEM)或离散元法(DEM)建立的

模型,模拟滑坡体变形及运动过程,适用于复杂地形和材料条件下滑坡体积与运动特征预测(王焘等, 2021).

4.1.2 滑坡滑速计算 针对滑坡的速度预测,主要有经验公式(如美国工程师协会推荐计算方法、潘家铮滑速等),使用复杂物理数学方程控制的数值模拟法等,基于能量守恒的分析公式等.

经验公式法基于大量滑坡案例的统计分析,建立滑体体积、等效摩擦系数等参数与滑速之间的经验关系.如 Scheidegger(1973)通过统计分析滑坡体积与等效摩擦系数之间的关系,提出了以下公式:

$$\lg \varphi_e = -0.15666 \lg V + 0.62419, \quad (2)$$

式中: φ_e 为等效摩擦系数,用于描述滑坡运动中的能量耗散特性; V 为滑体体积(m^3).

在获得等效摩擦系数后,可利用均匀化的等价摩擦系数计算滑坡滑速:

$$V = \sqrt{2g(S_v - \varphi_e S_h)}, \quad (3)$$

式中: S_v 为滑体下滑竖向距离(m); S_h 为滑体下滑水平向距离(m).

美国土木工程师协会推荐的速度计算公式假设滑体滑落于半无限水体中,并且将整个滑坡体视为刚体,以其重心为质点做下滑运动,进而运用牛顿定律和运动学方程推算其滑落水中的速度和加速度:

$$V_1 = \sqrt{2gh} = \sqrt{1 - \frac{\tan \varphi}{\tan \alpha} - \frac{CL}{mg \sin \alpha}}, \quad (4)$$

式中: V_1 为滑坡速度(m/s), g 为重力加速度(9.81 m/s^2), h 为滑坡重心垂直下降高度(m), m 为滑坡质量(kg), C 为粘聚力(kPa), φ 为内摩擦角($^\circ$), α 为斜坡坡角($^\circ$).

潘家铮(1980)滑速计算方法假设滑体为刚体,沿滑面运动时,其速度由重力势能转化为动能的过程决定.对于每一个条块设其初始速度为 V_{i1} ,末速为 V_{i2} ,其滑动距离为 L_i ,滑动时间为 T_i ,基于能量守恒原理,滑坡速度的计算公式为:

$$V_{i2} = \sqrt{V_{i1}^2 + 2a_i L_i}, \quad (5)$$

$$T_i = \frac{V_{i2} - V_{i1}}{a_i}, \quad (6)$$

式中: a 为滑坡加速度(m/s^2); L 为滑块与滑面接触面长.

数值模拟方法基于流体力学或离散元方法,能够综合考虑滑坡材料、地形与水文条件,通过计算机模拟滑坡的动态过程,预测滑动速度(Mergili

et al., 2020).

传统二维速度计算方法在分析滑坡运动特征时未能考虑滑坡三维几何形态对滑动行为的控制作用. 为更准确地描述滑坡动力学过程, 考虑孔隙水压力和水阻力效应的三维滑坡速度计算方法被提出, 该方法通过建立三维力学模型, 更精确地描述滑坡动力学过程(Dong *et al.*, 2023).

4.1.3 滑坡运动距离计算 滑坡水平运动距离预测是灾害动力学研究的重要内容, 主要方法包括理论模型、统计模型、信息模型与数值模拟等. 在理论模型中, 通过能量守恒定律和牛顿运动学原理计算滑坡运动距离, 主要有摩擦模型和雪橇模型等方法(杨明钰等, 2023), 然而该方法依赖过多假设. 在统计模型中, 基于大量滑坡数据, 通过统计分析建立滑坡体积、垂直落距、地形等因素与水平运动距离的关系(樊晓一等, 2020). 然而, 这些公式通常依赖于有限的地形和几何因素, 未充分考虑滑坡过程中的动态变化, 导致其在复杂或多变环境下的预测精度受到限制. 在信息模型中, 通过模糊数学和机器学习方法计算滑坡运动距离, 主要有模糊信息优化处理和人工神经网络等方法(彭达, 2024). 该方法对数据依赖较高, 且易过拟合. 在数值预测模型方面, 主要基于岩土力学、流体力学、摩擦学等学科原理, 采用计算机仿真技术对滑坡运动过程进行动态模拟, 是一种高效且精确的研究手段. 常见的数值模拟方法包括离散介质方法(如离散元法 DEM、不连续变形分析 DDA、通用离散元法 UDEC)、连续介质方法(如光滑粒子流体动力学 SPH、物质点法 MPM、Massflow)以及混合方法(如有限元-离散元耦合方法 FDEM)(Chen *et al.*, 2025).

然而, 滑坡的多模式变形、时空非均匀性及多滑动面演化显著增加了大变形模拟的难度. 关键参数的时空变化高度依赖物理实验和原位物理特征, 受限于尺度效应与边界条件, 当前模拟结果仍存在较大不确定性. 尽管无网格方法(如 SPH、MPM)在模拟滑体破碎与远程运动方面具有优势, 相关模型参数依然依赖经验设定. 未来需融合多源监测、物理-数据混合驱动模型和人工智能技术以提高精度和可靠性.

4.2 涌浪危险性分析

涌浪的复杂过程按其阶段可以分为产生、传播、衰减和爬高阶段(图 7), 涌浪的危险性评价需针对不同阶段的特点采取相应的方法.

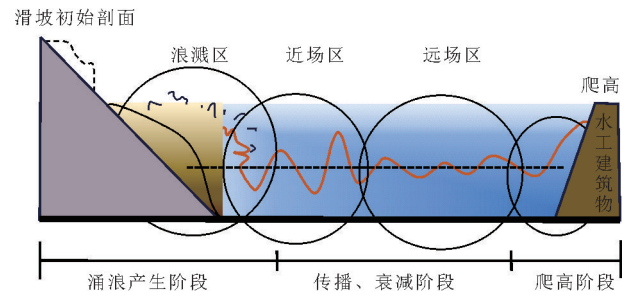


图 7 涌浪产生阶段示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the tsunami generation phase

4.2.1 涌浪产生阶段危险性 在产生阶段, 重点关注滑坡入水后如何转化为涌浪的过程, 通过经验公式、物理模型试验以及数值模拟评估涌浪的初始高度和能量, 同时分析滑坡方量、速度等参数的敏感性. 涌浪计算公式(表 2)如美国土木工程学会推荐公式(Noda, 1970)、Slingerland and Voight(1979)推荐公式、潘家铮(1980)推荐公式、中国水科院推荐公式(黄种为和董兴林, 1983)、Huber and Hager(1997)推荐公式、殷坤龙等(2008)推荐公式, 黄波林(2014)推荐公式, EurOtop 手册(Van Der Meer *et al.*, 2016), Vinodh and Tanaka(2020)等. 经验公式简便直观、计算效率高, 但由于各自构建背景、参数体系不同, 其在异地异质地形中的适用性受限, 计算结果易产生较大误差(Sabeti *et al.*, 2022).

物理模型试验通过模拟滑坡与水体的相互作用, 揭示涌浪的动态演化规律. 根据实验维度和滑体材料的不同, 可分为二维(2D)和三维(3D)试验. 二维试验(Russell, 1840; Fritz *et al.*, 2004)主要采用块体或散粒体模拟滑坡体的一维运动, 研究滑体体积、速度、倾角等参数对涌浪的影响; 而三维试验(Huang *et al.*, 2023; 王梅力等, 2025)更接近真实滑坡的多维特征, 可分析滑体入水角度、横向扩散及复杂地形效应. 滑坡涌浪试验研究为理解滑坡灾害提供了重要的实验数据和理论支持. 但在实践过程中实验条件、设备和模型的限制使得实验结果仍然存在一定的局限性.

数值模拟方法通过构建滑坡-水体耦合模型, 在岩土力学与流体力学理论支撑下, 重现滑坡体运动及其激发涌浪的全过程. 按照计算域描述方式可分为欧拉方法和拉格朗日方法. 欧拉方法基于固定网格, 常用的模型包括 Navier-Stokes 方程、Boussinesq 方程以及非恒定浅水方程等(殷坤龙等, 2022), 求解方法涉及有限单元法、有限差分法、有限体积法和边界元法等. 拉格朗日方法则通过追踪粒子轨

表 2 常用经典计算滑坡涌浪高度公式(改自秦盼盼,2023)		
Table 2 Common classic formulas for calculating landslide tsunami wave height (adapted from Qin, 2023)		
计算方法	计算公式	适用条件
美国土木工程学会推荐公式	由 $v^* = \frac{v}{\sqrt{gh_w}}$ 和 $\frac{HS}{h_w}$ 确定波浪分区和 $\frac{h_{(0,t)\max}}{H_s}$, 确定入水点最大波高 $h_{(0,t)\max}$	水体条件为半无限水体, 滑体下滑高度大于水深
Slingerland 和 Voight 推荐公式	$\log(\frac{H_{\max}}{h_w}) = -1.25 + 0.71 \log(\frac{1}{2} \frac{\rho_s}{\rho_w} \frac{V_s}{h_w^3} \frac{v_s^2}{gh_w})$	适用于滨海或湖泊地区的滑坡涌浪, 且以滑动入水产生的涌浪
潘家铮推荐公式	水平运动模式: $\frac{H_{\max}}{h} = 1.17 \cdot \frac{v_h}{\sqrt{g \cdot h_w}}$	水体条件为半无限水体, 水平运动时滑体厚度和水体深度接近; 垂直运动时适用于接近崩塌入水产生的涌浪高度
	垂直运动模式: (1) 当 $0 < \frac{v_v}{\sqrt{g \cdot h_w}} \leq 0.5$ 时, $\frac{H_{\max}}{h_w} = 1.17 \cdot \frac{v_v}{\sqrt{g \cdot h_w}}$	
	(2) 当 $0.5 < \frac{v_v}{\sqrt{g \cdot h_w}} \leq 2$ 时, $\frac{\xi_0}{h_w} = f(\frac{v}{gh_w})$	
	(3) 当 $\frac{v_v}{\sqrt{g \cdot h_w}} > 2$ 时, $\frac{\eta_v}{h_w} = 1$	
中国水科院推荐公式	$H_{\max} = K \frac{v^{1.85}}{2g} V^{0.5}$	适用大体积滑坡所产生的涌浪, 且不考虑水位深度对滑坡涌浪的影响
Huber 和 Hager 推荐公式	$\frac{H(r, \gamma)}{h_w} = 1.67 \sin(\alpha) \cos^2(\frac{2\gamma}{3}) \left(\frac{\rho_s}{\rho_w}\right)^{1/4} \left(\frac{V_s}{wh_w^2}\right)^{1/2} \left(\frac{r}{h_w}\right)^{-2/3}$	适用于滑体高倾角入水或由危岩体所产生的涌浪
殷坤龙和汪洋推荐公式	$\frac{H_{\max}}{h_w} = 1.17 \frac{v_v}{\sqrt{g \cdot h_w}} (\sin^2 \alpha + 0.6 \cos^2 \alpha) \left(\frac{L}{bh_w}\right)^{0.15} \left(\frac{w}{b}\right)^{0.45}$	适用计算中一缓倾角滑移入水所产生的涌浪
黄波林推荐公式	$\frac{H_{\max}}{h_w} = 0.667 \left(\frac{h_{oc}(1 - f \tan \alpha)}{h_w}\right)^{0.334} \left(\frac{w}{s}\right)^{0.754}$	适用计算中一高倾角、滑体呈块体状或散体状滑移入水所产生的涌浪
EurOtop 手册 2% 超值爬高	$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.65 \gamma_b \gamma_i \gamma_\beta \xi_{m-1.0} \quad (\text{当 } \gamma_\beta \xi_{m-1.0} < 4)$	综合坡度、粗糙度、入射角修正, 适用于光滑或粗糙斜坡
	$\frac{R_{u2\%}}{H_{m0}} = 1.75 \gamma_b \gamma_i \gamma_\beta \xi_{m-1.0} \quad (\text{当 } \gamma_\beta \xi_{m-1.0} < 1.8)$	
EurOtop 手册 最大爬高	$\frac{R}{H_{m0}} = 1.0 \gamma_i \gamma_\beta \sqrt{4 - \frac{1.5}{\gamma_\beta \xi_{m-1.0}}} \quad (\text{当 } \gamma_\beta \xi_{m-1.0} < 4)$	统计最大爬高值, 适用于工程设计安全评估
	$\frac{R}{H_{m0}} = 1.07 \gamma_i \gamma_\beta \sqrt{4 - \frac{1.5}{\gamma_\beta \xi_{m-1.0}}} \quad (\text{当 } \gamma_\beta \xi_{m-1.0} < 1.8)$	
Vinodh and Tanaka	$\frac{R}{h} = 2.9049 s^{0.931} [s \sqrt{H/h}]^{-0.1931 \ln s - 1.2704}$	二维滑坡实验, 适用于不同坡度(β)和波高(H)组合

注: 表中 $H_{\max}$ 最大涌浪高度(m); R 表示波浪爬高(m); H_{m0} 表示有效波高(最高 1/3 波的平均高度)(m); v 表示滑坡速度(m/s); h_w 表示水深(m); V_s 表示滑坡体积(m^3); ρ_s 滑坡密度(kg/m^3); ρ_w 为水体密度(kg/m^3); g 为重力加速度(m/s^2); L 为涌浪波长(m); α 为崩滑体入水角度($^\circ$); r 为小于 600 m 的径向距离(m); w 为滑体宽度(m); f 为滑体与滑动面间的摩擦系数; b 为滑坡入水断面的河道宽度(m); L/bh_w 为滑坡相对单宽体积(m^3); w/b 为滑坡相对宽度(m); h 为坡脚处水深(m); H 为坡脚处波高(m); β 为斜坡倾角; ξ 为冲量参数, $\xi = \tan \beta \sqrt{H/h}$; γ_i 为粗糙度修正系数; γ_β 为入射角修正系数; γ_b 为斜坡形状修正系数。

迹模拟流体运动, 典型方法包括光滑粒子流法 (SPH) (图 8) (彭铭等, 2025) 和物质点法 (MPM) (Wu *et al.*, 2024), 适用于模拟大变形、多相流及强非线性过程。

4.2.2 涌浪传播、衰减阶段危险性 在涌浪传播和

衰减阶段中, 危险性分析的重点在于评估涌浪的空间影响范围及对区域的综合风险, 主要分析指标包括波高、波速、能量衰减、淹没范围与冲击力。结合人口分布、土地利用等社会经济数据, 可实现对潜在损失的综合评估。传播阶段关注涌浪波形演变过

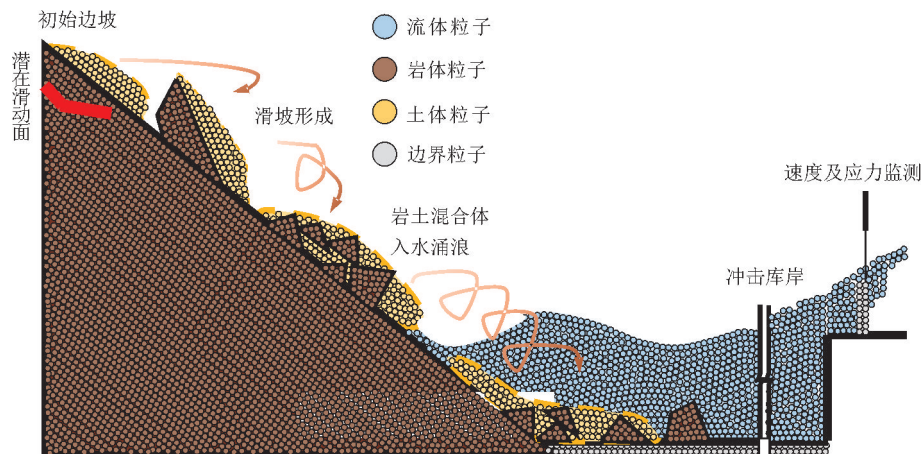


图 8 滑坡—涌浪灾害链全过程 SPH 分析模型

Fig.8 SPH analysis model of the whole process of the disaster chain

程,分析方法涵盖线性浅水波理论(适用于远场传播)、非线性波理论(考虑波一波相互作用)以及基于浅水方程的数值模型(Yavari-Ramshe and Ataie-Ashtiani, 2016; Lee *et al.*, 2022). 衰减阶段包括动能耗散、转向近岸区域的涌浪波高变化、淹没范围及其对基础设施的冲击力评估. 能量衰减模型(如指数衰减)可量化波能耗散程度,辅助预测波高演变. Green's Law 可用于浅水区波高变化的估算(Ruffini *et al.*, 2019), Boussinesq 方程模型能够精确刻画非线性浅水波行为; 基于数字高程模型(DEM)的水动力模拟(Heller *et al.*, 2023). 有限元法(FEM)和有限体积法(FVM)等数值方法(Xu *et al.*, 2022)可用于复杂地形条件下的淹没范围与涌浪压力评估. 冲击力计算模型可进一步量化涌浪对沿岸建筑物、堤坝等工程设施的破坏风险.

4.2.3 涌浪爬高阶段危险性 涌浪在爬高阶段形成强烈冲击波,对建筑物、堤岸及人员安全构成重大威胁. 爬高过程危险性分析侧重于爬高高度、动态冲击力与岸边淹没范围等关键参数. 主要方法有经验公式、模型试验和数值模拟等. 经验公式(如 Hunt 公式、EurOtop 模型)基于波浪参数(波高、周期、水深)、岸坡坡度、粗糙度等输入变量,快速估算爬高高度和冲击力(汪华晨等, 2024),适用于初步评估,但难以考虑复杂流态(如多相流、湍流)和非线性效应. 模型试验(如波浪水槽、离心机试验)通过缩尺物理模型模拟涌浪与承灾体(如堤坝、建筑物)的相互作用,直接测量冲击力、爬高及淹没范围(Wang *et al.*, 2021),尤其适用于验证经验公式或数值模型的准确性,但受限于相似律和成本. 数值模拟(如 CFD-VOF、SPH、Boussinesq 模型)则可细致

模拟波浪爬坡过程中的流体动力响应,支持动态压力分布、多相耦合与地形适应分析(黄帅等, 2025),适用于复杂地形和极端工况分析.

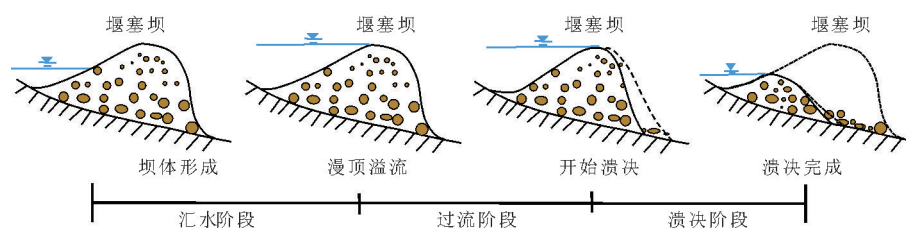
涌浪危险性分析在经验公式、物理模型试验和数值模拟方面取得显著进展,能够评估初始波高、能量传递和爬高等关键过程. 然而,经验公式受限于简化假设,难以捕捉灾害链的动态演化过程及内在机理,导致预测误差较大;物理试验虽能提供直观演化过程与实验数据,但受缩尺效应、边界条件简化与材料相似性约束,适用范围有限;数值模拟具备模拟大尺度灾害链演进过程的能力,但受多灾害耦合机制及计算效率的约束,其预测精度和可靠性仍面临挑战.

4.3 堰塞坝危险性分析

堰塞坝的全寿命过程通常经历 3 个主要阶段(图 9):汇水阶段、过流阶段和溃决阶段.

在汇水阶段,堰塞坝的危险性主要体现为淹没风险,由于坝体堵塞河道,上游水位迅速上升,可能导致大面积淹没,威胁周边居民、农田、基础设施和生态环境,表现为水位迅速上涨与淹没范围扩大. 在过流阶段,危险性侧重于坝体稳定性风险,随着上游水位持续上升,水流可能从坝顶或坝体薄弱部位溢出,导致坝体受到冲刷和侵蚀,此阶段坝体抗冲刷能力下降,结构稳定性显著减弱. 在溃决阶段,堰塞坝的危险性主要表现为溃坝洪水风险,一旦坝体发生溃决,大量蓄水瞬间释放,形成破坏性极强的洪水,对下游区域造成严重威胁,其特点是洪水量急剧增加和洪水传播速度加快(石振明等, 2021b).

4.3.1 堰塞坝汇水阶段危险性 在滑坡堵江形成

图9 堰塞坝的3个阶段(汇水、过流、溃决)(Shen *et al.*, 2020)Fig.9 Three stages of a landslide dam (catchment, overflow, and breach) (Shen *et al.*, 2020)

堰塞坝后,上游来流被坝体截断汇集形成堰塞湖。在坝体不发生溃决的情况下,湖水位将持续上升,其回水效应将导致坝体上游大范围区域被淹没。汇水阶段的危险性分析研究重点在于评估上游淹没风险,具体包括淹没范围、水位上升速率及其潜在影响的量化分析,评价方法可分为定性和定量两大类。在定性方法方面,主要依赖专家经验、历史案例类比和快速评估手段,适用于数据匮乏或时间紧迫的应急场景。专家打分法通过模糊数学将坝体稳定性、库容规模、地质条件等定性指标转化为风险等级(Liao *et al.*, 2018; 杨华阳等, 2025),而历史类比较法则通过对比类似堰塞湖事件快速推断淹没趋势(Ermini *et al.*, 2006)。这类方法能够迅速形成初步判断,但受限于主观性强、过度依赖经验,难以精确量化淹没范围或动态演进过程。在定量方法中,应用数学模型进行精确计算,包括水文模型、水动力模型和网络模型,数值模型(如HEC-HMS、MIKE 21、FLOW-3D)(钟启明等, 2024)通过求解流体动力学方程或数据驱动建模,量化淹没深度、流速及演进时间等关键参数。网络模型(如贝叶斯网络、人工神经网络、图神经网络等)(Zeng *et al.*, 2022)融合专家知识和观测数据,预测淹没趋势,进行概率风险评估。定量方法虽能提供高精度预测,但对数据质量和计算资源要求较高。

4.3.2 坝体稳定性分析 稳定性评估方法主要分为定性评估和定量评估两类。定性分析方面,包括工程类比法、历史分析法和模糊数学综合评价法等。这些方法不依赖精确的数值计算,通过对堰塞坝的宏观特征、地质条件、历史数据和专家经验进行评估,提供对堰塞坝稳定性的一般性判断。如,崔鹏等(2009)和 Xu *et al.* (2009)通过考虑大坝高度、湖泊蓄水能力和大坝的材料对2008年汶川地震期间堰塞坝的风险级别进行分类,将风险分为4个级别:极高风险、高风险、中等风险以及低风险。此类方法快速、简便、实用性强,但由于主观性较强,评估结果

易受专家经验和评价指标选取的影响(Li *et al.*, 2024c)。

在定量评估方面,可分为基于概率的数理统计方法和基于计算机的数值分析以及机器学习方法。学者们(Casagli and Ermini, 1999; Korup, 2004; Dong *et al.*, 2011; 刘宁等, 2013; Tacconi *et al.*, 2016, 2018; 沈丹祎等, 2019; Shan *et al.*, 2020; 石振明等, 2020; 徐凡献, 2020)通过分析全球多组堰塞坝案例,结合其坝体材料、形态与水文特征,建立了堰塞坝稳定性多参数评估模型(表3),为堰塞坝稳定性研究提供了重要的理论依据和参考。

数值分析方法通过考虑坝体构型、内部结构、滑坡岩土特性以及水动力条件,评估堰塞坝的稳定性。常见稳定性数值分析方法包括极限平衡法、有限元法、有限差分法、离散元法和非连续变形分析法等(Xu *et al.*, 2022; 吴昊等, 2023)。然而大多数堰塞坝从形成到溃决可能只持续几分钟,而数值分析方法往往相对耗时。因此,这类方法较少应用于实时风险评估,大多数研究集中在山体边坡稳定性评估。

机器学习方法选取坝体体积、高度、宽度、长度、库容、汇水面积等影响因素进行模型训练,从而预测堰塞坝的稳定性、溃坝洪水峰值流量和溃坝时长等关键参数,为堰塞坝稳定性分析提供参考。常见的模型包括随机森林、支持向量机和人工神经网络等(Wang *et al.*, 2022; Wu *et al.*, 2023)。机器学习方法对输入参数的要求较低,能够实现快速的分析和预测。然而,由于全球范围内堰塞坝案例数据相对有限,这在一定程度上制约了机器学习模型的应用和泛化能力。

4.3.3 溃坝洪水分析 溃决阶段的评估重点关注堰塞坝溃决风险、水流突发性及可能引发的二次灾害。堰塞坝溃决超过坝体可能引发大规模的洪水灾害,导致下游区域出现严重的水灾,甚至可能引发次生灾害(如泥石流、山洪等)。因此,精确模拟溃决

表 3 堰塞坝稳定性评估模型(石振明等,2021b;冯震宇等,2024)

Table 3 Stability assessment models of landslide dams (Shi *et al.*, 2021b; Feng *et al.*, 2024)

判别指标及表达式	数据库	判别标准	物理意义
$BI=\lg(V_d/A_c)$	意大利	$3<BI<4$ 不稳定; $4<BI<5$ 坝体堆积 不确定; $5<BI$ 指标 稳定	坝体堆积 指标
$II=\lg(V_d/V_1)$	意大利	$3<II$ 不稳定; $0<II$ 稳定	—
$DBI=\lg(A_cH_d/V_d)$	世界	$DBI<2.75$ 稳定; $2.75<DBI<3.08$ 无量纲坝 体堆积指 标 不确定; $3.08<DBI$ 稳定	无量纲坝 体堆积指 标
$I_s=\lg(H_d^3/V_1)$	新西兰	$I_s<-3$ 不稳定; $-3<I_s<0$ 反映冲刷 坝体水量 不确定; $0<I_s$ 的地貌指 稳定 标	反映冲刷 坝体水量 的地貌指 标
$I_a=\lg(H_d^2/A_c)$		$I_a<3$ 不稳定; $3<I_a$ 稳定	反映汇水 面积和坝 体冲刷的 地貌指标
$I_r=\lg(H_d/H_r)$		—	—
$HDSI=\lg(\frac{V_d}{A_cS})$	意大利、 秘鲁	—	—
$L_s(PHWL)=-2.55\lg P-3.64\lg H_d+2.99\lg L_d+2.73\lg W_d-3.87$	日本	—	反映坝体 形态特征
$L_s(AHWL)=-2.22\lg A_c-3.76\lg H_d+3.17\lg L_d+2.85\lg W_d+5.93$		$L_s(AHWL)<0$ 不稳定; $0<L_s(AHWL)$ 水文参数 的地貌指 稳定 标	水文参数 的地貌指 标
$L_s(AHV)=-4.48\lg A_c-9.31\lg H_d+6.61\lg L_d+6.39$		$L_s(AHV)<0$ 稳定不稳定; $0<L_s(AHV)$ 稳定	—
$L'_s(IVAS)=-0.264\lg(\frac{H_d}{W_d})+1.661\lg V_d-1.551\lg A_c-0.168\lg S_d-4.847$	亚平宁山 脉北部	—	—
$L'_s(IVAM)=-0.198\lg(\frac{H_d}{W_d})+1.387\lg V_d-1.432\lg A_c+4.169M_i-8.674$		—	—
$Y_A=-3.943+2.453\lg H_d-0.832\lg V_d+0.491\lg V_1+0.471\lg A_c$	世界	$0<Y_A$ 不 稳定; $Y_A<0$ 稳定	反映坝体 形态及汇 水面积的 地貌指标
$Z_B=-4.15+3.704\lg H_d-0.732\lg V_d+0.801\lg A_c$		$Z_B<0$ 不 稳定; $0<Z_B$ 稳定	—

续表 3

判别指标及表达式	数据库	判别标准	物理意义
$K=\alpha\frac{\lg\left(\frac{T\times C\times\rho}{A_c}\right)}{M\times DBI}$	—	—	反映坝体级配、坝体结构、几何形态及流域特征的综合指标
$y=-0.564+0.029\lg\left(\frac{H_d}{H_r}\right)+0.007\lg\left(\frac{W_d}{H_d}\right)-0.367\lg\left(\frac{V_d^{\frac{1}{3}}}{W_d}\right)+0.609\lg\left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{W_d}\right)+0.0811\lg\left(\frac{Q_m}{V_1}\right)+\alpha'+\beta$	世界	$0<y$ 不稳定; $y<0$ 稳定	反映坝体种类、形成原因、几何形态及水文参数的综合指标
$Z=8.766-1.896\ln\left(\frac{H_d}{H_r}\right)+1.126\ln\left(\frac{H_d}{W_d}\right)-0.113\ln\left(\frac{L_1}{W_d}\right)-1.101\ln\left(\frac{V_1^{\frac{1}{3}}}{W_d}\right)-0.387\ln\left(\frac{L_d}{W_d}\right)$	世界	$Z<0$ 不稳定; $0<Z$ 稳定	反映几何形态及水文参数的地貌指标

注： V_d 为堰塞坝体积(10^6 m^3)； A_c 为汇水面积(km^2)； H_d 为坝高(m)； V_1 为堰塞湖库容(10^6 m^3)； H_r 为堵塞点到上游顶高差(m)； L_d 为坝长(m)； W_d 为坝宽(m)； P 、 Q_m 为入库峰值流量(m^3/s)； S 为河道坡度， S_d 为颗粒组成系数($S_d=(D_{90}-D_{60})/(D_{30}-D_5)$)； M_i 为坝体材料相关系数； T 为不均匀系数($T=(D_{75}/D_{25})$)； ρ 为坝体密度； DBI 无量纲堆积指标； M 为发生二次滑坡的概率； α 为综合修正系数； α' 、 C 为坝体材料，堆石取-0.902，土质取0.948，土石混合体取-0.115； β 为诱因，降雨取-2.739，地震取-1.865，其他取-0.185。

洪水过程,对于灾害评估与管理至关重要.主要的溃决洪水模拟方法包括经验模型、数学模型和GIS与遥感技术等.

经验模型是基于历史观测和统计分析,通过总结不同类型坝体溃决灾害的特征,建立溃决洪水流量的经验公式(表4).

数学模型通过求解流体动力学方程,模拟溃决洪水的水流行为,能够精确预测洪水的演进路径、流速、流量及淹没范围.该方法综合考虑地形、初始流量、溃决过程、时间演变等多因素影响,是目前应用广泛的溃坝洪水模拟手段.主要包括网格法、粒子法及混合方法(Peramuna *et al.*, 2024).网格法基于连续介质假设,通过简化流体运动控制方程(N-S方程)来模拟洪水演进过程,常见的方法如HEC-RAS(Butt *et al.*, 2013)、MIKE 21(Cui *et al.*, 2012)、DAMBRK(范鸿杰,2019)等.粒子法将水体离散为粒子,通过粒子间相互作用模拟流动,常见的方法有光滑粒子流体动力学法(SPH)(Li *et al.*, 2024b),混合模型结合粒子法与网格法的优势,在关键区域(如大变形界面)使用粒子,其余区域用网格,如物质点法(MPM)(Issakhov *et al.*, 2023).

堰塞坝危险性分析在汇水淹没评估、坝体稳定性判别和溃决洪水模拟方面已形成定性经验分析与定量数值模拟相结合的多层次评估体系.但是,当前研究多采用分步机制分析,而滑坡—堵江—溃坝—洪水灾害链的全过程耦合模拟仍面临较大难度.这主要受限于多物理场耦合的复杂性,以及不同灾害阶段的时空尺度差异.灾害链涉及多种参数传递,而现有模型在跨灾种参数转换时依赖经验假设,导致误差累积.此外,不同机制的参数协同性不足,不确定性叠加效应进一步影响预测可靠性.堵江的发生及规模判定仍高度依赖地质经验模型,而数值模拟受计算效率限制,难以高效模拟堵江动态过程.溃决模式的预测则受控于坝体材料和上游来水的相互作用,现有模型对非均质坝体的适用性仍有待提升.

5 灾害链的易损性

损失是指灾害对人类社会和自然环境的负面影响,包括经济(如基础设施破坏、经济活动中断)、社会(如人员伤亡、生活质量下降)和生态损失(如自然环境退化)等多种损失.损失程度取决于灾害

表 4 溃决流量经验公式
Table 4 Empirical formula for outburst flow

公式	来源	适用范围	影响因素
$Q_p = 13.4H^{1.89}$ $Q_p = 1.776S^{0.47}$	Singh and Snorrason (1984)	人工坝	仅考虑库容或坝高
$Q_p = 0.0158(PE)^{0.41}$ 滑坡			
$Q_p = 0.0184(PE)^{0.42}$ 崩塌	Costa and Schuster(1988)	天然和人工堰塞坝	考虑坝高和库容
$Q_p = 0.607(V^{0.295}H^{1.24})$			
$Q_p = V_0^b$ $Q_p = ad^b$ $Q_p = a(dV_0)^b$	Froehlich (1995)	土石坝	考虑坝高和库容
	Walder and O'Connor (1997)	多种坝体	仅考虑库容
$\frac{Q_p}{g^{\frac{1}{2}}H_d^{\frac{5}{2}}} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{-1.417} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.265} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{1.569} \left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right)^{-0.471} e^a$ $\frac{H_b}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.882} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.041} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{0.139} \left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right)^{-0.099} e^a$ $\frac{W_t}{H_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.752} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{0.315} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{0.682} \left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right)^{-0.243} e^a$	Peng and Zhang(2012a)	天然堰塞坝	考虑坝高和库容
$\frac{W_b}{H_d} = 0.004\left(\frac{H_d}{H_r}\right) + 0.050\left(\frac{H_d}{W_d}\right) + 0.088\left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{0.682} - 0.044\left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right) + \alpha$ $\frac{T_b}{T_r} = \left(\frac{H_d}{H_r}\right)^{0.262} \left(\frac{H_d}{W_d}\right)^{-0.024} \left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right)^{0.705} \left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right)^{-0.103} e^a$ $Q_p = 3.130H_d^{0.120}W_d^{0.302}V_d^{0.106}V_1^{0.453}e^a$ $H_b = H_d^{0.840}W_d^{-0.169}V_d^{0.089}V_1^{0.040}e^a$			
$W_t = 1.593H_d + 85.249\left(\frac{H_d}{W_d}\right) - 3.438\left(\frac{V_d^{1/3}}{H_d}\right) + 15.963\left(\frac{V_1^{1/3}}{H_d}\right) + \alpha$ $W_b = -0.006H_d^2 - 0.047\left(\frac{H_d^2}{W_d}\right) + 0.017V_d^{1/3} + 0.047V_1^{1/3} + \alpha H_d$	石振明等(2014)	天然堰塞坝	考虑坝高和库容
$T_b = H_d^{0.275}W_d^{-1.224}V_d^{0.439}V_1^{0.232}e^a$			

注:式中, Q_p 为溃决洪水峰值流量(m^3/s); PE 为势能(J); V_0 为释放库容; d 为水位下降高度; V 为溃决总库容(m^3); H 为溃决坝高(m); g 为重力加速度; V_1 为库容; V_d 为坝体的体积; H_d 为坝高; H_r 为单位高度; W_d 为坝宽; H_b 为溃口深度; W_t 为溃口顶宽; W_b 为溃口底宽; T_b 为溃决时间; T_r 为单位时间; α 为坝体侵蚀度; a 、 b 为回归系数; d 为水位下降高度。

强度及暴露要素的特征。

5.1 滑坡易损性

滑坡易损性指滑坡灾害对社会、经济及环境造成的潜在损失,是滑坡风险管理的重要内容。按照受影响对象的性质,可将滑坡易损性划分为生命体易损性、经济易损性、社会易损性与环境易损性四大类。由于环境和社会层面的影响较难量化,现阶段地质灾害易损性评估通常更侧重于对生命损失和经济损失的定量研究。常用的评价方法有基于历史数据的反演法、基于损失与暴露要素价值的定量法、基于矩阵或框架的评估法、基于区域风险的综合指标法、基于滑坡类型和强度的分类法基于场景的易损性函数法等(Li *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2024)。基于历史数据的反演法通过分析滑坡事件,建立不同承灾体的损失响应曲线(即 V - I 曲线, V_{ul} -

nerability-Intensity curve),为人员、车辆、建筑等典型暴露体提供场景化易损性估算值(Fuchs *et al.*, 2007)。基于损失与暴露要素价值的定量法通过计算经济损失与暴露要素净值的比值,实现易损性的量化评估。基于矩阵或框架的评估法,采用损害矩阵或三维概念框架,结合数学模型(如加权叠加法、模糊综合评判法等),确定承灾体综合易损性。系统分析结构、人员和功能易损性。基于区域风险的综合指标法结合影响空间比、人口密度、人均GDP等指标,评估区域滑坡风险。基于滑坡类型和强度的分类法通过定性或定量分级,区分不同滑坡类型(如块体崩塌、岩崩、滑动和流动)的强度及其对易损性的影响。

在承灾体层面,建筑物、道路、桥梁等典型基础设施由于结构特性、地形位置及功能用途的差异,

在滑坡灾害中表现出不同的损伤模式与响应强度。为实现其易损性的量化评估,研究中常采用损伤概率矩阵法(Damage Probability Matrix, DPM)与易损性函数法(Vulnerability/Fragility Function)。DPM方法通常基于专家经验或历史案例数据,将滑坡强度等级与结构损伤等级交叉构建二维概率矩阵,操作简便、适用于应急评估和数据有限的情境,但主观性较强,评估结果稳定性有限(Nirandjan *et al.*, 2024)。易损性函数法通过统计建模或实证分析,建立滑坡强度与损失概率之间的函数关系,常采用Logistic函数、Weibull分布或指数模型等形式,能更精细地刻画强度与损伤之间的非线性关联,适用于滑坡灾害链模拟与区域风险图编制,但对高质量数据依赖较高。

滑坡易损性评估已发展出多方法的评价体系,为风险精准管理提供了科学支撑。基于物理机制的模型高度依赖于具体地质环境,泛化能力有限,难以跨区域推广;而基于统计与机器学习的方法虽具备一定通用性,但模型精度较低,且在计算效率与精细化程度之间难以兼顾。此外,易损性评估高度依赖于高质量的地形、地质、水文及历史灾害数据,现实中往往面临数据缺失、分辨率不足等问题。尤其是在跨尺度应用中,评估方法衔接困难,导致从局部到区域层级的易损性映射存在偏差,难以实现统一的风险表达。在此背景下,如何科学制定评估标准、合理量化主观因素影响,以及准确评估滑坡灾害的间接经济损失,成为当前研究亟待解决的关键问题。

5.2 涌浪易损性

当高位滑坡体入水,其势能可迅速转化为强烈的波浪动能,对更大范围、更广种类的承灾体构成威胁。根据承灾体的属性差异,可分为固定承灾体与移动承灾体两类。

固定承灾体主要包括大坝、码头、库岸建筑物及涉水基础设施。涌浪对这类目标的影响主要表现为涌浪爬高、漫顶破坏与结构共振等现象。目前常用的研究方法包括物理模型试验、数值模拟、经验公式与脆弱性曲线等(Chen *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2020; Sathiparan, 2020)。物理模型试验通过缩比模型试验,水槽或波浪池模拟涌浪的冲击作用,研究涌浪对建筑物的冲击力、共振等问题。数值模拟则结合流体动力学模型(如CFD、SPH)和结构力学模型(如FEM)分析涌浪的生成、传播及其对承灾体的

破坏模式。经验公式和脆弱性曲线则基于历史数据建立涌浪参数与承灾体破坏程度之间的关系,用于快速评估和风险量化。重点考虑因素包括涌浪的冲击力、淹没深度、作用时间以及承灾体的结构强度、材料特性和抗冲击能力。

移动承灾体主要有各类船舶,人体和交通工具等。涌浪灾害对船舶的主要影响包括翻覆、沉没、断缆漂移等。常用分析方法包括灾后调查、物理模型试验、数值模拟、经验公式与脆弱性曲线(Peng and Zhang, 2012b; 王平义等, 2016; Li *et al.*, 2021)。灾害调查通过现场勘查和采访目击者,记录船舶受损情况、人员伤亡和经济损失。物理模型试验通过水槽或波浪池模拟涌浪对移动承灾体的动态影响,数值模拟则结合流体动力学模型和多体动力学模型,研究涌浪对船舶和车辆的稳定性及安全性的影响(牟萍等, 2020)。经验公式和脆弱性曲线基于历史数据,建立涌浪参数与移动承灾体破坏概率之间的关系,用于快速评估和风险预测。重点考虑因素包括涌浪的冲击力、淹没深度、作用时间以及承灾体的稳定性、抗倾覆能力和人员安全。

然而,固定承灾体易损性分析方法未能充分考虑动态冲击、累积损伤及多灾害耦合作用,间接经济损失(如交通中断、供应链断裂)的量化仍缺乏标准化方法,限制了综合风险评估的可靠性。移动承灾体易损性计算涉及复杂的流体动力学作用,存在演化过程不确定性,复杂地形影响及流固耦合机制(包括冲刷、推力、吸力等多种力学作用),当前模型往往对灾害链过程进行简化处理,忽视了级联效应,可能导致风险低估。此外,复杂地形条件下移动承灾体的运动路径与冲击效应具有高度不确定性,对高精度动态模拟提出更高要求。

5.3 堰塞坝易损性

堰塞坝易损性包括滑坡破坏、上游淹没与下游洪水冲击的损失,涉及生命损失、经济损失、环境损失、社会损失和间接经济损失等方面。由于现有的研究更侧重于灾害对人体和经济的影响,因此本文仅从生命损失和经济损失两方面进行分析。

5.3.1 生命损失 生命损失指人体受到山体滑坡或洪水的影响,失去特定生命的可能性(AGS, 2007)。主要方法包括(表5):基于统计分析的数据驱动法、基于物理力学的理论分析法、联合统计数据与人体物理模型法,以及综合考虑参数不确定性的网络模型法,如死亡与伤亡模型、蒙特卡罗模型、

表 5 生命损失计算公式(Zhong *et al.*, 2023)
Table 5 Formula for calculating loss of life (Zhong *et al.*, 2023)

表达式或影响因子	模型类型	来源
$LOL = \begin{cases} 0.5P_{AR}W_T < 0.25\text{ h} \\ P_{AR}^{0.56}W_T < 1.5\text{ h} \\ 0.0002P_{AR}W_T > 1.5\text{ h} \end{cases}$	经验模型	Brown and Graham(1988)
人体不稳定性试验, 进水流量(D, V, P_S)	物理模型	Abt <i>et al.</i> (2010)
$LOL = \begin{cases} 0.075(P_{AR}^{0.560})e^{-0.759W_T} \text{低} \\ 0.075(P_{AR}^{0.560})e^{(-0.759W_T + 3.790)} \text{高} \end{cases}$	经验模型	Dekay and McClelland (1993)
人体不稳定性试验, 进水流量(D, V, P_S)	物理模型	Reiter(2001)
基于拉丁超立方抽样技术蒙特卡洛仿真($F_S, W_T, P_{AR}, N_S, E_M, T_M, F_M$)	不确定性模型	Lee(2003)
基于水动力学模型理论分析(D, V, P_S)	物理模型	Lind <i>et al.</i> (2004)
将人员死亡模块与每个失去庇护类别/洪水区的致死率概率分布相结合(D, V, R, W_T, B_D)	妥协模型	Aboelata and Bowles(2005)
$P_{LOL} = \frac{LOL}{P_{AR}} = \frac{S(B_D)}{n \times B_D}$	经验模型	Zhai <i>et al.</i> (2006)
将死亡人数模块与危险阈值、暴露阈值及缓解因素结合(D, V, R, W_T, B_D)	妥协模型	Priest <i>et al.</i> (2007)
给定物理效应强度与暴露人群死亡率之间的关系(D, V, R, W_T)	妥协模型	Jonkman(2007)
人体不稳定性试验, 进水流量(D, V, P_S)	物理模型	Jonkman and Penning-Rowsell(2008)
$P_{LOL} = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 P(LOL = D_{IED}, E_{VA} = E_i, W_T = W_j, F_S = F_k)$	经验模型	Peng and Zhang(2012b)
$LOL = 0.075D_M^{0.384}(P_R + 2)^{-3.207}(W_A + 2)^{-1.017}$	不确定性模型	Brazdova and Riha(2014)
利用两种多变量非线性回归方法和留一交叉验证($F_S, E_C, P_{AR}, U_B, W_T, T_B, V_B, D_D, M_B, S_W, W_B$)	经验模型	Huang <i>et al.</i> (2017)
基于灾难评估方法建立的大坝溃坝潜在后果评估模型($S_W, H_D, P_{AR}, U_B, W_T, V_B$)	妥协模型	Ge <i>et al.</i> (2019)
基于多变量回归分析为低洪水 and 中高洪水严重性开发的经验方程($H_D, F_S, E_C, P_{AR}, U_B, W_T, T_B, V_B, D_D, M_B, S_W, W_B$)	经验模型	Mahmoud <i>et al.</i> (2020)
$LOL = PAR \times f_1(W_T, U_B) \times f_2(F_S, V_B)$	经验模型	Ge <i>et al.</i> (2021)

注: LOL 为人员死亡; P_{AR} 为暴露人口; W_T 为预警时间; F_S 为洪水严重度; U_B 为对大坝溃坝的理解; N_S 为模拟次数; E_M 为最大洪水位; T_M 为最大洪水时间; F_M 为最大洪水流量; D 为水深; V 为流速; P_S 为人员状态; R 为水位上升率; B_D 为建筑物损坏; P_{LOL} 为致死概率; $S(B_D)$ 为建筑物损坏函数; n 为每栋建筑物的居民人数; D_{IED} 为死亡人数; E_1 为疏散人数; E_2 为未疏散人数; W_1 为足够的预警时间; W_2 为少量预警时间; F_1 为高洪水严重性; F_2 为低流量严重性; D_M 为物质损失; P_R 为社会对洪水管理和控制的总体准备情况; W_A 为影响人口预警的因素; E_C 为疏散条件; T_B 为大坝溃坝时间; V_B 为建筑物脆弱性; D_D 为距大坝的距离; M_B 为大坝溃坝模式; S_W 为水库水位; W_B 为大坝溃坝时的天气; H_D 为大坝高度; $f_1(W_T, U_B)$ 为暴露人口的暴露率, 受预警时间和对大坝溃坝理解的影响和 $f_2(F_S, V_B)$ 为暴露人口死亡率受洪水严重性和建筑物脆弱性影响。

贝叶斯网络模型和社会脆弱性指数法等。

5.3.2 经济损失 堰塞坝灾害的经济损失可分为直接经济损失和间接经济损失两部分。在直接经济损失方面, 主要包括堰塞坝溃决或洪水对建筑物、道路桥梁、移动车辆、农田及基础设施(如电力、通信、供水设施)等造成的直接破坏。通常基于定量公式采用损失率法、成本—效益分析法、蒙特卡洛模拟等方法进行评估。损失率法通过统计历史灾害数据, 确定不同类型资产在洪水中的损失率, 并结合资产价值计算直接经济损失。成本—效益分析法通过比较灾害造成的损失与防灾减灾措施的成本, 评估直接经济损失的合理性。蒙特卡洛模拟通过随机

模拟洪水演进过程, 预测不同情景下的直接经济损失。GIS 与遥感技术结合, 利用遥感数据与地理信息系统评估洪水淹没范围内的资产损失。在间接经济损失方面, 主要指堰塞坝溃决或洪水对区域经济活动的中断、产业链的破坏以及旅游业等行业的衰退, 通常采用统计学评估方法、经济学评估方法和计量经济学评估方法(Okuyama *et al.*, 2004; Song *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2019; Khalid and Ali, 2020) 计算。统计学评估方法基于历史灾害数据, 通过分析间接经济损失与直接经济损失之间的关系, 进行损失估算。经济学评估方法通过经济学模型(如投入产出模型、一般均衡模型)评估灾害对区域经济

的影响.计量经济学评估方法通过计量经济学模型(如时间序列分析、面板数据分析)评估灾害对区域经济的长期影响.社会网络分析法通过分析区域经济网络,评估灾害对产业链和供应链的破坏.旅游业损失评估基于游客数量和旅游收入等数据,量化灾害影响.

尽管当前堰塞坝易损性评估在生命损失和经济损失方面取得了一定进展,但在理论模型、数据支持与综合框架方面仍面临诸多挑战.现有研究多聚焦于人员伤亡和直接经济损失,较少涉及环境破坏、社会影响和间接经济损失等广义易损性要素,难以全面反映灾害后果.大多数模型依赖历史事件数据,存在地区适应性差、参数不完整、模型泛化能力弱等问题,难以适应山区突发灾害环境.此外,历史灾害资料分散、缺乏标准,也限制了数据驱动模型的训练与应用,降低了评估结果的科学性与实用性.此外,多数模型为静态分析,缺乏对堰塞坝形成—演化—溃决全过程的动态模拟能力.当前评估视角以工程和水文为主,缺乏社会、生态与经济等多学科融合,暴露与脆弱性表征不足,且缺少情景构建与防灾响应模拟框架.

6 灾害链的风险评估

灾害链风险评估可分为定性评估和定量评估两类.定性评估常采用专家经验打分法和概念模型,适用于初步识别灾害链的潜在风险.定量评估则依赖灾害链模型,通过数学建模、地理信息系统(GIS)、遥感等技术手段对灾害链的触发机制与演化过程进行模拟.

6.1 滑坡风险评估

滑坡风险评估方法可分为定性方法、定性半定量方法和定量方法(何世阳等,2023;张雨春,2024).定性方法主要依赖滑坡编录和专家判断,使用模糊语言描述灾害发生的可能性与潜在损失.这类方法成本低、应用广,但主观性较强,评估标准不统一,难以保证结果的科学性和可重复性.半定量方法结合指标体系与专家赋权结果,估算滑坡的空间分布概率,适用于快速识别潜在高风险区域.然而,该方法在估算事件概率时常忽略环境条件的动态变化,特别是工程活动、气候变化及滑坡对地貌结构的反馈作用,难以全面反映风险的复杂性(Wang *et al.*, 2013).定量方法基于数学与统计工具进行风险量化评估,能够估算滑坡发生的概率及其造成的具体损

失.常用公式为 Varnes(1984)提出的风险评价公式:

$$R = H \times V \times E, \quad (7)$$

式中: R 为风险; H 为危险性,即一定区域在一定时间段内灾害发生的概率; E 为承灾体,通常与受影响区域的人口、基础设施和土地利用相关; V 为易损性,即某种灾害以一定的强度发生而对承灾体所造成的损失程度.

当前滑坡风险评估方法虽已形成定性、半定量和定量等多种技术路径,但仍存在诸多挑战.定性方法依赖专家判断,主观性强、标准不一,难以确保评估结果的客观性与可重复性;半定量方法对诱发机制响应不足、动态模拟能力有限;定量方法虽然理论完备,但在地质复杂或资料缺乏的地区,常受限于数据难获取与模型适应性差.此外,现有研究多聚焦于滑坡危险性,对承灾体的空间分布、脆弱性演化过程及社会经济系统的耦合影响考虑不足,限制了滑坡风险综合评估的系统性与实用性.

6.2 涌浪风险评估

涌浪风险评估方法可以分为定性方法和定量方法两大类.定性方法主要通过专家经验、历史案例分析和现场调查,对滑坡涌浪风险进行描述性评估(黄波林等,2021).专家打分法根据滑坡地质条件、地形特征等指标对风险进行定性分级;风险矩阵法通过分析滑坡发生的可能性和涌浪后果的严重性,构建风险矩阵,将风险划分为不同等级;历史案例法通过对比类似滑坡涌浪事件的诱发条件、规模和影响范围,辅助判断当前滑坡的潜在风险;现场调查与描述性评估则通过实地考察,对滑坡体的地质结构、地形特征等进行描述性判断.这些方法操作简便,适用于数据稀缺或复杂地质环境,但由于依赖专家判断,评估结果存在一定主观性,精度有限.

定量方法在滑坡涌浪风险评估中主要集中在风险识别、涌浪危险性分析和易损性评估等方面.通过数学模型、物理实验和数据分析,定量方法能够将风险量化为具体的数值,从而提高评估的客观性和精确性.这些方法通常基于通用风险评估公式,在计算危险性与易损性概率时进一步引入涌浪灾害的影响;或在滑坡概率估算的基础上,结合降雨、库水位等工况条件,综合评估涌浪风险.

基于概率的滑坡涌浪风险评估方法通过计算滑坡概率、涌浪生成概率及其影响,综合评估涌浪

风险;考虑降雨和库水位影响的涌浪风险评估则通过量化降雨和库水位变化对滑坡概率的影响,进一步计算综合工况下的涌浪风险.此外,针对滑坡涌浪可能引发的次生灾害(如洪水、泥石流等),提出了扩展公式(Yin *et al.*, 2018):

$$R = H \times V \times E + R_{\text{sec}}.$$

(8)

经验公式方法依据历史或实验数据快速估算涌浪高度与影响范围,并结合易损性与暴露度参数,进行风险量化.数值模拟方法通过滑坡动力学模拟和涌浪传播模拟,结合易损性和暴露度参数,量化涌浪风险(罗鹏等,2025).贝叶斯网络方法则通过构建概率图模型,动态更新滑坡和涌浪的概率,计算综合风险及其不确定性.

尽管这些方法在涌浪风险评估中取得了显著进展,但评估方法多以单一模型为主,缺乏定性与定量、概率与物理过程模拟的有效集成,难以系统反映灾害链演化过程.对灾害链风险的关注相对不足,滑坡涌浪往往并非孤立事件,其可能引发一系列次生灾害,形成复杂的灾害链.这种灾害链效应会显著放大风险,并对下游区域造成更广泛的影响.然而,现有风险评估方法在灾害链全过程的量化与分析方面仍不充分,缺乏系统性视角.同时,缺乏统一的数据标准和多情景决策支持机制,制约了评估结果的实用性与推广性.

6.3 堰塞坝风险评估

6.3.1 定性评估方法 现有的堰塞坝风险评估方法通常包括定性方法和定量方法.定性方法根据经验或判断划分风险等级.如 MWR (2009)、Peng *et al.* (2014)根据堰塞坝危险等级(表 6)和后果等级(表 7)将汶川地震引起的滑坡堰塞坝划分为 4 个风险等级(即极高、高、中、低)(表 8).

6.3.2 定量评估方法 堰塞坝的定量评估方法通过结合历史数据、数学模型和数值仿真等手段,对堰塞坝的失稳概率、灾害影响和后果进行精确的计算和预测.常见的定量评价方法包括概率分析、贝叶斯网络模型、蒙特卡洛模拟、水动力学数值模型、失稳模型、风险曲线法和模糊综合评价法等(Cui *et al.*, 2012; Shen *et al.*, 2024).这些方法在评估堰塞坝稳定性及其直接后果方面取得了显著进展,通过概率分析计算失稳概率,利用水动力学模型模拟溃坝后的洪水演进过程,或通过 F-N 风险曲线法评估灾害风险水平.结合 GIS 空间分析技术,数值模拟方法还可以准确预测洪水淹没范围及演进路

表 6 滑坡堰塞坝危险等级(MWR,2009)

Table 6 Hazard level of landslide dam (MWR, 2009)

危险等级	影响因素		
	坝高(m)	堰塞湖容量(m ³)	材料和结构
极高	≥70	≥100	主要为土体
高	30~70	10~100	含块石的土体
中	15~30	1~10	含土体的块石
低	<15	<1	主要为块石

注:危险等级由 3 个影响因素中最高等级来确定.如果只有一个最高等级因素,而最低等级比最高等级低两个或以上等级,则危险等级可以降低一级.如,由大量含土体的块石(中等级)、高度为 80 m (极高等级)和湖容量为 8 000 万 m³(高等级)组成的大坝危险等级被评定为“高”.

表 7 滑坡堰塞坝后果等级(MWR,2009)

Table 7 Consequence levels of landslide dams (MWR, 2009)

后果等级	影响因素		
	风险人口	影响区域	设施
极高	≥106	县级以上中心城市	国家或同等设施
高	105~106	县级市中心	省级或同等设施
相对较高	104~105	城镇中心	市政或同等设施
平均	<104	村庄	普通设施

注:后果等级由 3 个因素中最高等级决定.

表 8 堰塞坝风险等级分类(MWR, 2009)

Table 8 Risk classification of landslide dams (MWR, 2009)

风险等级		后果等级			
		极高	高	相对较高	平均
危险等级	极高	I	I	II	II
	高	I	II	II	III
	中	I	II	III	III
	低	II	II	III	IV

注:危险级别:I=极高,II=高,III=中,IV=低.

径,并基于社会经济数据和生命等计算潜在灾害损失,最终通过多准则决策方法实现风险的定量化评估与分级管理(Yang *et al.*, 2022).然而,现有的定量评估方法往往相对孤立,未能充分考虑灾害链的串联效应.堰塞坝失稳可能引发洪水、泥石流等次生灾害,而这些次生灾害的连锁反应在现有方法中通常被忽略,导致评估结果可能低估了实际风险.

当前多数模型侧重单一灾害过程,忽略堰塞坝灾害链中多灾种的耦合关系,难以准确捕捉次生灾害所引发的链式反应.堰塞坝形成具有突发性和隐蔽性,现场调查滞后,关键参数难以实时获取,现有定量模型高度依赖历史灾害数据和统计规律,在地质条件复杂、数据稀缺的山区适用性有限,模型参

数往往需经验设定,误差较大.此外,当前多数评估模型缺乏多情景模拟与决策支持功能,难以适应不同降雨强度、滑坡体运动速率或人工干预条件下的风险动态演化.

7 灾害链的风险防控

滑坡、涌浪和堰塞坝等灾害常呈现时空连续性与因果关联性,导致更严重的次生灾害.因此,灾害防治应从灾害链整体视角出发,构建跨灾种、跨尺度的综合防控体系,推动防控策略由“单点治理”向“链式断控”转变.

7.1 滑坡风险防控

河谷区域滑坡防控主要包括工程措施和非工程措施.工程手段主要通过增强坡体稳定性、降低地下水压力和减少坡面侵蚀,达到防治滑坡的目的.具体方法包括边坡加固(使用抗滑桩、挡土墙、锚杆、锚索等)、排水系统(修建地表排水沟、地下排水廊道等)和植被恢复(种植根系发达的植物)等(周家文等,2023).针对不同的坡体结构与失稳机制,可在滑移面关键部位设置抗滑桩、挡土墙或预应力锚索,以增强深层稳定性并防止整体滑移;对于浅层松散坡体,则可采用微型桩群或土工格栅加固技术,以提高表层土体的抗剪强度与整体稳定性(Cherkez *et al.*, 2021).同时,构建“地表—地下”排水系统对于河谷区域滑坡的防控至关重要,通过地表截水沟拦截坡面径流、地下排水廊道疏导深层渗流、排水孔降低孔隙水压力,系统调控水文条件,减少水体对岸坡稳定性的不利影响.此外,生态护坡措施如种植深根植物与铺设三维植被网,固土防冲,改善坡面微环境,形成工程与生态相结合的协同防护体系(周家文等,2019;崔鹏和郭剑,2021).非工程手段从管理和预防层面减少滑坡的发生及其影响,如监测预警系统(安装位移监测仪、倾斜仪等)、土地利用规划(避免在滑坡高风险区进行建设或避险搬迁等)(薛强等,2025)和公众教育(普及防灾减灾知识)等.依托 GNSS、InSAR 和孔隙水压力计构建“空—地—地下”监测网络,动态调整降雨和位移预警阈值;通过风险评估划分风险区,严格限制高风险区建设,必要时实施避险搬迁.

然而,许多高效防护措施如深层加固和大规模排水系统虽能增强坡体稳定性,但因其建设和维护成本较高,往往在经济条件有限的地区无法全面应用.在极端条件下的应对能力也存在不足,尤其在

强震区和强降雨区,滑坡风险在地震和极端降雨的共同作用下急剧增大,现有单一工程或生态防护措施难以有效应对多重灾害叠加效应.同时,现有防控措施依赖静态模型和历史数据的风险评估难以应对自然环境、社会因素以及不确定性的变化,降低了评估的准确性.多数措施仅聚焦滑坡本体稳定性,忽视其对堰塞坝形成与溃决的潜在驱动作用,缺乏与下游灾害节点的联动防控机制.滑坡高风险区域开发活动控制不严,公众防灾意识薄弱,避险搬迁政策缺乏执行刚性,导致隐患区域人类活动持续扩张,增加了灾害链爆发风险.

7.2 涌浪灾害链风险防控

相较于滑坡等灾害,涌浪具有突发性强、影响范围广、传导速度快等特点.因此,其防控不仅在于削弱涌浪能量本身,更在于阻止涌浪进一步引发次生灾害,遏制灾害链的纵深演化.

在工程措施方面,滑坡涌浪的防控主要涵盖3个环节:滑坡源头整治、涌浪传播控制及岸坡冲击防护,通过物理手段干预滑坡涌浪的形成、传播和影响,具体包括滑坡整治措施、传播浪消减措施和爬坡浪防护措施.传播浪消减措施则通过修建防波堤(如斜坡式、直立式、浮式等)来反射、阻挡或耗散波浪能量,减少涌浪的传播强度,减缓涌浪对沿岸居民和基础设施的冲击.消浪手段通过多种工程技术措施和生态修复方法,系统性地削弱涌浪能量,减缓其对岸线的侵蚀,并在海岸灾害链中发挥阻断灾害传递的关键作用.具体方法有修建防波堤、消浪墙,使用消浪块体(如四脚空心方块),以及植被缓冲带(种植红树林、芦苇等)等(Dong *et al.*, 2024; 黄波林等,2025).修建防波堤和消浪墙等刚性结构能够直接拦截和分散波浪能量,而消浪块体(如四脚空心块)依靠其特殊几何形状与孔隙结构,有效耗散波浪动能,增强海岸抗波能力.植被缓冲带(如红树林、芦苇等)不仅能够通过植物根系的固土作用和枝叶的摩擦效应吸收波浪能量,还能促进泥沙沉积,形成天然屏障,增强岸线的抗侵蚀能力(Peng *et al.*, 2024a; Peng *et al.*, 2024b).同时,人工沙滩的建造通过增加岸线的缓冲空间,有效吸收和分散波浪冲击,降低涌浪对岸线的直接破坏.

在非工程措施方面,主要通过管理、规划和预警等手段间接降低风险,包括风险回避、风险保留、风险转移和损失控制(黄波林等,2025).风险回避通过合理规划和选址,避免在滑坡涌浪高发区建设居

民点和重要基础设施;风险保留则通过长期监测预警和地质灾害防治规划,动态管理尚未达到不可接受程度的风险;风险转移通过降险消减工程将不可控的涌浪风险转移为可控的工程失效风险;损失控制则通过预警、应急避险和灾后管理等措施,减少灾害发生时的损失。

涌浪灾害链防控在控制滑坡发生、减缓涌浪传播以及断链等方面仍面临挑战。现有措施大多围绕滑坡本体治理与局部岸线防护,缺乏对涌浪形成与传播全过程的系统性控制。工程措施虽然在一定程度上能通过修建防波堤、消浪墙和植被缓冲带等减少涌浪的传播强度,但这些措施尚不足以全面应对复杂涌浪灾害链,特别是在缺乏完善的库岸城镇消浪和预警系统时,涌浪对沿岸社区和基础设施的破坏仍不可忽视。涌浪的防控手段往往依赖于刚性结构,如防波堤和消浪墙,然而这些措施在极端气候或长时间侵蚀中可能逐渐失效,且成本较高。虽然非工程措施在风险管理与空间规划中发挥了一定作用,但对高风险区域的长期监测与预警机制仍显薄弱,难以及时应对快速演化的灾害情境。

7.3 堰塞坝灾害链风险防控

堰塞坝作为滑坡灾害链中的关键节点,具有突发性强、蓄水快、溃决破坏力大的特点。其防控需关注坝体本身的稳定与泄流能力,同时需要阻断灾害链的链式演化,避免次生灾害在空间和时间上进一步放大。

在工程手段方面,可采用坝体加固与防护(如加固河岸斜坡,建造检查坝),泄流与排水措施(如泄流槽开挖、爆破泄流、导流渠或临时分洪道,泵或虹吸排水)和侵蚀控制与监测(如控制决堤期间的侵蚀率、排水系统、坝体监测)等(Peng *et al.*, 2014)。在防控过程中可使用土石材料或混凝土增强坝体稳定性,并修建溢洪道或泄流槽以降低水位;通过人工挖掘泄流通道,快速释放湖水压力;也可通过爆破技术在坝体上形成泄流口,迅速降低水位;利用传感器实时监测坝体位移、渗流等参数,及时发现潜在隐患,为风险防控提供数据支持。

非工程措施方面,堰塞坝风险防控可通过系统性的风险评估、实时监测与预警机制、科学疏散预案以及公众教育等途径来实施。风险评估通过对堰塞坝的形成机制和溃决可能性进行科学分析,为防控决策提供依据(Zhang *et al.*, 2023);监测和预警系统通过建立实时水文应急监测和预警机制,及时

发布溃决风险信息,为应急响应争取时间(江炫融等, 2024);疏散预案通过制定详细的疏散计划,明确路线、避难场所和责任人,确保下游居民安全撤离;公众教育则通过宣传和培训,提高公众对堰塞坝风险的认知和自救能力。

然而,堰塞坝的灾害链往往涉及更长的时间和更广的流域范围,多数措施聚焦坝体局部治理,未形成涵盖上游滑坡、中游堰塞、下游泄洪的联动机制,难以有效阻断多灾种联动路径。尤其是在大流域范围内,堰塞坝灾害往往跨越行政与流域边界,现有防控体系缺乏统一调度与资源整合,难以应对大流域复合型灾害。此外,应急工程如泄流爆破或临时导流常需现场决策与快速实施,而当前方案多基于静态预设,难以及时响应灾害情境的突变。监测预警系统在技术集成和多部门共享方面尚未成熟,特别是在边远山区或数据稀缺区,传感器部署受限、模型精度偏低,影响防控决策的准确性与时效性。

8 总结及存在的问题

近年来,国内外学者围绕河谷滑坡灾害链的识别、危险性分析、易损性评估与风险防控展开了广泛研究。借助遥感监测、GIS空间分析、数值模拟及机器学习等技术,研究者系统探讨了灾害链各环节的成因机制及其相互作用,推动风险评估方法逐步由定性向定量、由静态向动态演化。然而,灾害链风险评估仍面临诸多挑战与不足。

当前河谷滑坡灾害链的识别与易发性分析多聚焦于局部灾害,主要通过遥感、GIS及机器学习技术识别潜在滑坡体和不稳定斜坡。然而,灾害链具有链式效应、时空动态性和高度不确定性,现有方法缺乏对整体灾害链易发性的系统性认知。大多数研究依赖静态数据,难以实现跨区域、大尺度的灾害链触发与演化监测。多灾种耦合、非线性演化及其复杂的时空交互常被忽视,致使评估难以全面反映灾害链的整体风险特征。

滑坡涌浪与堵江型灾害链的危险性评估多采用经验公式、物理模型、数学模型和机器学习等方法。然而,建模过程中常伴有简化假设与参数非均质性,灾害链的链式效应易被线性化处理,难以真实反映其动态演化特征。同时,由于现场观测数据缺乏,模型多依赖实验室或局部案例数据,导致结

果与实际灾害过程偏差较大。因此,当前研究在动态演化过程及级联效应刻画方面仍显不足,难以捕捉灾害链的复杂时空演变。

在易损性评估方面,现有研究多依赖历史案例或模拟数据,缺乏高精度实测资料支持,评估多基于假设或统计推断,且缺少统一的量化标准。间接损失(如心理创伤、产业链中断等)常被简化甚至忽略,导致总体易损性估值偏低。传统的单灾种评估方法难以揭示灾害链中的级联机制,缺乏物理—社会耦合框架下的量化模型,进而引发评估结果与实际情况的偏差。

尽管定量风险评估研究不断增多,但现有方法多以风险指数叠加或结偶方式处理灾害链各环节,未能系统考虑其相互作用与级联放大效应。前序灾害对后续灾害的触发影响常被忽略,灾害类型转换过程中的不确定性也未充分表征,导致结果存在系统性偏差。尤其在大尺度区域内,独立灾害与灾害链之间的关联性未被充分揭示,限制了对灾害链演化路径的预测能力。

灾害链防控的关键在于切断灾害传递路径,遏制级联效应的扩散。然而,现有防控技术尚未充分考虑多灾种耦合与灾害链演化过程,动态风险传播路径优化及应急响应机制仍未形成闭环,致使预案设计多停留于静态情景,难以应对快速演变的灾害链。特别是在兼顾局部与系统、经济性与安全性、独立灾害与链式演化的交互作用方面,防控策略局限性日益显现。此外,防控效果评价高度依赖于风险和易损性评估,受限于数据不足与模型精度,难以在灾害突发时提供及时、有效的干预支持。

9 结论及展望

本文系统综述了河谷滑坡灾害链的定义、分类及演化过程,将其划分为滑坡—涌浪、滑坡—堰塞坝与复合型3类,并从滑坡特性、运动路径及灾种耦合作用3方面归纳其主要不确定性因素,为成因分析提供了理论基础。在识别方法方面,从滑坡识别、潜在灾害链识别及已发生灾害链识别3个层次总结了技术路径,为灾害链早期识别与预警提供技术支撑;在风险评估方面,系统分析了易发性、危险性、易损性及风险评估现状,提出了多维度量化思路;最后,归纳了工程与非工程防控策略,为灾害链减灾实践提供了参考依据。

然而,当前研究仍存在以下关键不足:灾害链多灾种级联耦合机制及其非线性动态特征尚缺乏统一理论框架;识别与评估方法在时空异质性表达、多灾种协同建模等方面仍存在显著局限;危险性与易损性分析过度依赖简化模型与假设数据,尚未构建基于机理约束的统一量化体系;防控策略在动态调控、系统断链与效能评估方面尚处于探索阶段,难以应对复杂灾害情景下的综合治理需求。

未来研究应重点关注以下方向:

(1)发展多物理场耦合的跨尺度灾害链演化理论。灾害链的触发与传播涵盖从微观渗流、冻融循环到宏观地质破坏等多尺度过程,亟需构建跨尺度理论框架,揭示各尺度间的相互耦合机制。在非均质地质条件下,传统连续介质模型存在局限,未来应发展结合离散元、有限元与机器学习的多尺度模拟平台,以提升灾害链演化过程的模拟精度与适应性。

(2)建立大尺度多场连续监测和多源异构数据融合的识别和易发性体系。为克服地质灾害数据碎片化与模型泛化性不足问题,应聚焦于时空异质性数据融合理论的构建,尤其发展基于深度学习的多模态特征提取方法,提升识别精度与鲁棒性。同时,在监测层面,融合分布式光纤传感、卫星遥感、无人机与地面观测技术,实现对位移场、渗流场和微震等多参量的实时监控,构建“空—天—地—深”一体化灾害链动态感知与预警系统。

(3)构建数据—物理双驱动的灾害链全过程风险评估模型。突破传统数据驱动模型对未发生灾害场景预测的局限,亟需引入物理机理约束的机器学习框架,嵌入岩土本构模型与守恒定律,增强复杂环境下的模型泛化能力;同时利用实时监测数据动态修正物理参数,构建“预测—更新—反馈”的闭环风险评估系统。

(4)强化灾害链精确预警和系统化断链调控机制。灾害链断链和防治存在明显的区别,需加强灾害链精确预警和动态调控技术的发展,通过定量控制实现断链过程的精准调控。基于“关键节点控制”新思路,识别关键节点和能量传递路径,研发定向爆破、韧性缓冲结构等精准断链技术。同时,综合考虑灾害链的规模、能量传递、影响范围等因素,构建融合多源监测、动态评估与智能决策的灾害链防控系统,形成“识别—阻断—恢复”的全链条响应机制。

References

- Abad, L., Hölbling, D., Spiekermann, R., et al., 2022. Detecting Landslide-Dammed Lakes on Sentinel-2 Imagery and Monitoring Their Spatio-Temporal Evolution Following the Kaikōura Earthquake in New Zealand. *Science of the Total Environment*, 820: 153335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153335>
- Aboelata, M.A., Bowles, D.S., 2005. LIFESim: A Model for Estimating Dam Failure Life Loss. Logan. Proceedings of the International Symposium on Stochastic Hydraulics (ISSH). Nijmegen, The Netherlands.
- Abt, S.R., Wittier, R.J., Taylor, A., et al., 2010. Human Stability in a High Flood Hazard Zone. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 25(4): 881–90. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1989.tb05404.x>
- AGS, 2007. Commentary on Guideline for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for Land Use Planning. *Australian Geomechanics*, 42(1):37–57.
- Alexander, D., 2018. A Magnitude Scale for Cascading Disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30: 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.03.006>
- Barla, G., Paronuzzi, P., 2013. The 1963 Vajont Landslide: 50th Anniversary. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 46(6): 1267–1270. <https://doi.org/10.1007/s00603-013-0483-7>
- Brazdova, M., Riha, J., 2014. A Simple Model for the Estimation of the Number of Fatalities Due to Floods in Central Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(7): 1663–1676. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-1663-2014>
- Brown, C. A., Graham, W. J., 1988. Assessing the Threat to Life from Dam Failure. *Journal of the American Water Resources Association*, 24(6): 1303–1309. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1988.tb03051.x>
- Butt, M. J., Umar, M., Qamar, R., 2013. Landslide Dam and Subsequent Dam-Break Flood Estimation Using HEC-RAS Model in Northern Pakistan. *Natural Hazards*, 65(1): 241–254. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0361-8>
- Casagli, N., Ermini, L., 1999. Geomorphic Analysis of Landslide Dams in the Northern Apennine. *Chikei*, 20(3): 219–249.
- Casagli, N., Intrieri, E., Tofani, V., et al., 2023. Landslide Detection, Monitoring and Prediction with Remote-Sensing Techniques. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1): 51–64. <https://doi.org/10.1038/s43017-022-00373-x>
- Chai, H. J., Dong, Y., Li, S. X., et al., 2005. Analysis of Natural Rock Filled Dam Breakmode and Environmental Affections. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 16(2): 172–176 (in Chinese with English abstract).
- Chang, M., Luo, C. P., Wu, B. B., et al., 2022. Catastrophe Process of Outburst Debris Flow Triggered by the Landslide Dam Failure. *Journal of Hydrology*, 609: 127729. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127729>
- Chen, H. W., Chen, C. Y., Chuang, Y. H., 2024. Redundancy and Hierarchical Cluster Analyses for Characterizing Geomorphic Features Contributing to the Formation of Landslide Dams. *Landslides*, 21(11): 2845–2857. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02310-z>
- Chen, J. B., Chen, K. Y., Wang, G. Z., et al., 2019. Indirect Economic Impact Incurred by Haze Pollution: An Econometric and Input-Output Joint Model. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(13): 2328. <https://doi.org/10.3390/ijerph16132328>
- Chen, L. R., 2023. Failure Probability Analysis of Heterogeneous Reservoir Bank Slopes and Simulation of Induced Surge under Sudden Drop of Water Level (Dissertation). Nanchang University, Nanchang (in Chinese with English abstract).
- Chen, Q., Chen, L. X., Gui, L., et al., 2020. Assessment of the Physical Vulnerability of Buildings Affected by Slow-Moving Landslides. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(9): 2547–2565. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2547-2020>
- Chen, S. Z., Xu, W. Y., Shi, A. C., et al., 2023. Review of Hazard Chain of Landslide Surge for High Dams and Large Reservoirs. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 43(3): 83–93 (in Chinese with English abstract).
- Chen, X. J., Ren, S. P., Yao, K., et al., 2025. Large-Deformation Finite-Element Modeling of Seismic Landslide Runout: 3D Probabilistic Analysis with Cross-Correlated Random Field. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(1): 385–398. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.11.014>
- Cherkez, E. A., Kozlova, T. V., Shatalin, S. N., et al., 2021. Landslides at the North-Western Black Sea Coast (Ukraine) and the Engineering & Geological Effectiveness of Landslide Prevention Works. Third EAGE Workshop on Assessment of Landslide Hazards and Impact on Communities. European Association of Geosci-

- tists & Engineers, Odessa, Ukraine, 1—5. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215k1015>
- Clarke, S. L., Hubble, T. C. T., Miao, G., et al., 2019. Eastern Australia's Submarine Landslides: Implications for Tsunami Hazard between Jervis Bay and Fraser Island. *Landslides*, 16(11): 2059—2085. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01223-6>
- Costa, J. E., Schuster, R. L., 1988. The Formation and Failure of Natural Dams. *Geological Society of America Bulletin*, 100(7): 1054—1068. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1988\)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TFAFON>2.3.CO;2)
- Cui, P., Guo, J., 2021. Evolution Models, Risk Prevention and Control Countermeasures of the Valley Disaster Chain. *Advanced Engineering Sciences*, 53(3): 5—18 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Han, Y. S., Chen, X. Q., 2009. Distribution and Risk Analysis of Dammed Lakes Reduced by Wenchuan Earthquake. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 41(3): 35—42 (in Chinese with English abstract).
- Cui, P., Dang, C., Zhuang, J. Q., et al., 2012. Landslide-Dammed Lake at Tangjiashan, Sichuan Province, China (Triggered by the Wenchuan Earthquake, May 12, 2008): Risk Assessment, Mitigation Strategy, and Lessons Learned. *Environmental Earth Sciences*, 65(4): 1055—1065. <https://doi.org/10.1007/s12665-010-0749-2>
- Dai, C. L., Higman, B., Lynett, P. J., et al., 2020. Detection and Assessment of a Large and Potentially Tsunamiogenic Periglacial Landslide in Barry Arm, Alaska. *Geophysical Research Letters*, 47(22): e2020GL089800. <https://doi.org/10.1029/2020GL089800>
- Dai, K. R., Chen, C., Shi, X. L., et al., 2023. Dynamic Landslides Susceptibility Evaluation in Baihetan Dam Area during Extensive Impoundment by Integrating Geological Model and InSAR Observations. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 116: 103157. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103157>
- DeKay, M. L., McClelland, G. H., 1993. Predicting Loss of Life in Cases of Dam Failure and Flash Flood. *Risk Analysis*, 13(2): 193—205. <https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.1993.tb01069.x>
- Dong, J. J., Tung, Y. H., Chen, C. C., et al., 2011. Logistic Regression Model for Predicting the Failure Probability of a Landslide Dam. *Engineering Geology*, 117(1—2): 52—61. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.004>
- Dong, X. C., Huang, B. L., Qin, P. P., et al., 2024. Prevention and Control Methods for Typical Landslide-Induced Waves in the Baihetan Reservoir. *Geotechnical and Geological Engineering*, 42(7): 6655—6669. <https://doi.org/10.1007/s10706-024-02891-5>
- Dong, X. C., Yin, Y. P., Huang, B. L., et al., 2023. A 3D Slice-Based Analytical Calculation Formula for the Reservoir Landslide Velocity. *Landslides*, 20(10): 2095—2110. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02081-z>
- Du, B. H., 2006. Tangyanguang Landslide of Zhexi Reservoir: The First Large-Scale Landslide Occurred at Early Stage of Impoundment in China. In: Proceedings of the 2nd National Conference on Geotechnical and Engineering, 5(in Chinese with English abstract).
- Du, Z. H., Chen, X., Pan, H. Y., et al., 2025. Research Advances on Landslide-Induced Surge and Dam-Break Cascading Disasters near Dams. *China Water Resources*, (3): 50—57 (in Chinese with English abstract).
- Ermini, L., Casagli, N., 2003. Prediction of the Behaviour of Landslide Dams Using a Geomorphological Dimensionless Index. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(1): 31—47. <https://doi.org/10.1002/esp.424>
- Ermini, L., Casagli, N., Farina, P., 2006. Landslide Dams: Analysis of Case Histories and New Perspectives from the Application of Remote Sensing Monitoring Techniques to Hazard and Risk Assessment. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 45—52.
- Fan, H. J., 2019. Dam-Break Flood Simulation Based on DAMBRK at Guandi Hydropower Station. *Design of Hydroelectric Power Station*, 35(4): 18—22 (in Chinese with English abstract).
- Fan, R. L., Zhang, L. M., Shen, P., 2019. Evaluating Volume of Coseismic Landslide Clusters by Flow Direction-Based Partitioning. *Engineering Geology*, 260: 105238. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105238>
- Fan, X. M., Dufresne, A., Whiteley, J., et al., 2021. Recent Technological and Methodological Advances for the Investigation of Landslide Dams. *Earth-Science Reviews*, 218: 103646. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103646>
- Fan, X. Y., Zhang, R. X., Hu, X. B., 2020. Study on the Influence of Valley Topographic Parameter on the Moving Distance of Landslide. *Journal of Geomechanics*, 26(1): 106—114 (in Chinese with English abstract).
- Farhadi, A., Emdad, H., Rad, E. G., 2016. Incompressible SPH Simulation of Landslide Impulse-Generated Water Waves. *Natural Hazards*, 82(3): 1779—1802. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2270-8>

- Feng, Y. T., Xiao, S. X., 2009. Chain Mechanism and Optimized Control of Collapses, Landslides and Debris Flows. *Journal of Catastrophology*, 24(3): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- Feng, Z. Y., 2024. Stability Assessment and Breach Parameter Prediction of Landslide Dams Based on Machine Learning (Dissertation). Guizhou University, Guiyang (in Chinese with English abstract).
- Fritz, H. M., Hager, W. H., Minor, H. E., 2004. Near Field Characteristics of Landslide Generated Impulse Waves. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, 130(6): 287–302.
- Froehlich, D. C., 1995. Peak Outflow from Breached Embankment Dam. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 121(1): 90–97. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(1995\)121:1\(90\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(1995)121:1(90))
- Fu, B. J., Li, S., Ding, F. Y., et al., 2025. Research on Surface Particle Matter Identification of Barrier Dam Based on Deep Learning. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 53(2): 79–84 (in Chinese with English abstract).
- Fuchs, S., Heiss, K., Hübl, J., 2007. Towards an Empirical Vulnerability Function for Use in Debris Flow Risk Assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5): 495–506. <https://doi.org/10.5194/nhess-7-495-2007>
- Gao, J. G., 1986. Overview of Disaster Science. *Agricultural Archaeology*, (1): 281–297 (in Chinese).
- Gao, Y. J., Zhao, S. Y., Deng, J. H., 2020. Developing Law of Damming Landslide and Challenges for Disaster Prevention and Mitigation in the Three-River-Parallel Territory in the Tibetan Plateau. *Advanced Engineering Sciences*, 52(5): 50–61 (in Chinese with English abstract).
- Ge, W., Jiao, Y. T., Sun, H. Q., et al., 2019. A Method for Fast Evaluation of Potential Consequences of Dam Breach. *Water*, 11(11): 2224. <https://doi.org/10.3390/w11112224>
- Ge, W., Wang, X. W., Li, Z. K., et al., 2021. Interval Analysis of the Loss of Life Caused by Dam Failure. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 147(1): 04020098. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0001311](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0001311)
- Ghorbanzadeh, O., Gholamnia, K., Ghamisi, P., 2023. The Application of ResU-Net and OBIA for Landslide Detection from Multi-Temporal Sentinel-2 Images. *Big Earth Data*, 7(4): 961–985. <https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2031544>
- Guo, Z. J., Qin, B. Y., 1987. Brief Discussion on Disaster Physics. *Journal of Catastrophology*, 2(2): 25–33 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. Z., Chen, L. X., Yin, K. L., et al., 2020. Quantitative Risk Assessment of Slow-Moving Landslides from the Viewpoint of Decision-Making: A Case Study of the Three Gorges Reservoir in China. *Engineering Geology*, 273: 105667. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105667>
- Ha, S., Zhang, J. Q., Tong, S. Q., et al., 2016. Progress and Prospect of the Research on Disaster Chain. *Journal of Catastrophology*, 31(2): 131–138 (in Chinese with English abstract).
- He, S. Y., Li, L. Q., He, Y. H., 2023. A Review of Risk Zoning and Evaluation Methods for Landslide Geological Hazards. *Hunan Communication Science and Technology*, 49(4): 1–7, 17 (in Chinese with English abstract).
- Heidarzadeh, M., Miyazaki, H., Ishibe, T., et al., 2023. Field Surveys of September 2018 Landslide-Generated Waves in the Apporo Dam Reservoir, Japan: Combined Hazard from the Concurrent Occurrences of a Typhoon and an Earthquake. *Landslides*, 20(1): 143–156. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01959-8>
- Heller, V., Ruffini, G., 2023. A Critical Review about Generic Subaerial Landslide-Tsunami Experiments and Options for a Needed Step Change. *Earth-Science Reviews*, 242: 104459. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104459>
- Huang, B. L., 2014. Study on Water Wave Dynamics Analysis Method of Reservoir Landslide Surge Disaster (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Huang, B. L., Yin, Y. P., 2012. Method of Reservoir Geohazard Impulsive Wave Simulation Based on Wave Theory. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 39(4): 92–97 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B. L., Yin, Y. P., Li, B., et al., 2021. Study of Risk Assessment and Mitigation for Landslide-Induced Impulse Wave near Towns in Reservoir Areas. *Acta Geologica Sinica*, 95(6): 1949–1961 (in Chinese with English abstract).
- Huang, B. L., Yin, Y. P., Li, R. J., et al., 2023. Three-Dimensional Experimental Investigation on Hazard Reduction of Landslide-Generated Impulse Waves in the Baihetan Reservoir, China. *Landslides*, 20(9): 2017–2028. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02068-w>
- Huang, B. L., Yin, Y. P., Li, R. J., et al., 2025. Research

- Progress and Challenges of Landslide-Induced Impulse Wave Prevention and Control Engineering Measures. *Journal of Engineering Geology*, 33(1): 159–170 (in Chinese with English abstract).
- Huang, D. J., Yu, Z. B., Li, Y. P., et al., 2017. Calculation Method and Application of Loss of Life Caused by Dam Break in China. *Natural Hazards*, 85(1): 39–57. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2557-9>
- Huang, F. M., Xiong, H. W., Jiang, S. H., et al., 2024. Modelling Landslide Susceptibility Prediction: A Review and Construction of Semi-Supervised Imbalanced Theory. *Earth-Science Reviews*, 250: 104700. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104700>
- Huang, S., Wang, Z. G., Li, Y., et al., 2025. Impact Response of Dam Affected by Landslide Surge Based on Improved SPH Method. *Advanced Engineering Sciences*, 57(1): 120–131 (in Chinese with English abstract).
- Huang, Z. W., Dong, X. L., 1983. Experimental Study on Surge Waves Generated by Reservoir Bank Landslides. In: Institute of Water Resources and Hydropower Research, ed., Collected Scientific Papers of the Institute of Water Resources and Hydropower Research, Vol. 13: Hydraulics. Water Resources Press, Beijing (in Chinese).
- Huber, A., Hager, W. H., 1997. Forecasting Impulse Waves in Reservoirs. Proceedings of 19th Congress Des Grand Barrages, Florence, 993–1005.
- Issakhov, A., Abylkassymova, A., Issakhov, A., 2023. Numerical Study of the Dam-Break Flood over Natural Rivers with Macroscopic Rocks on Movable Beds. *Computers and Geotechnics*, 164: 105793. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105793>
- Jiang, Q., Chen, X. L., Xiao, J. J., et al., 2018. Discrete Element Numerical Simulation and Analysis of Yunnan Huangping Reservoir Areas Landslide and Its Failure Mode. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 29(3): 53–59 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, S. H., Xiong, W., Zhu, G. Y., et al., 2024. Probabilistic Analysis of Reservoir Landslides Considering the Spatial Variation of Seepage Parameters under the Conditions of Rainstorm and Sudden Drop of Water Level. *Earth Science*, 49(5): 1679–1691 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, X. R., Wang, J. W., Liu, X. B., et al., 2024. Summary of Application of Emergency Monitoring System in Disaster Control of Dammed Lake-Weir Dam. *Maritime Safety*, (8): 56–58 (in Chinese with English abstract).
- Jin, J. C., Chen, G., Meng, X. M., et al., 2022. Prediction of River Damming Susceptibility by Landslides Based on a Logistic Regression Model and InSAR Techniques: A Case Study of the Bailong River Basin, China. *Engineering Geology*, 299: 106562. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106562>
- Jonkman, S. N., Penning-Rowsell, E., 2008. Human Instability in Flood Flows. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(5): 1208–1218. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2008.00217.x>
- Jonkman, S. N., 2007. Loss of Life Estimation in Flood Risk Assessment: Theory and Applications (Dissertation). Delft University of Technology, Delft.
- Joshi, M., Kothiyari, G. C., Kotlia, B. S., 2024. Landslide Detection in Kinnaur Valley, NW India Using PS-InSAR Technique. *Physical Geography*, 45(2): 160–174. <https://doi.org/10.1080/02723646.2023.2202932>
- Ju, L. Y., Zhang, L. M., Xiao, T., 2023. Power Laws for Accurate Determination of Landslide Volume Based on High-Resolution LiDAR Data. *Engineering Geology*, 312: 106935. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106935>
- Kang, Y., Lu, Z., Zhao, C. Y., et al., 2023. Inferring Slip-Surface Geometry and Volume of Creeping Landslides Based on InSAR: A Case Study in Jinsha River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 294: 113620. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113620>
- Karantanellis, E., Marinos, V., Vassilakis, E., et al., 2020. Object-Based Analysis Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Site-Specific Landslide Assessment. *Remote Sensing*, 12(11): 1711. <https://doi.org/10.3390/rs12111711>
- Khalid, M. A., Ali, Y., 2020. Economic Impact Assessment of Natural Disaster with Multi-Criteria Decision Making for Interdependent Infrastructures. *Environment, Development and Sustainability*, 22(8): 7287–7311. <https://doi.org/10.1007/s10668-019-00499-x>
- Korup, O., 2004. Geomorphometric Characteristics of New Zealand Landslide Dams. *Engineering Geology*, 73(1–2): 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2003.11.003>
- Lee, C. H., Lo, P. H., Shi, H. B., et al., 2022. Numerical Modeling of Generation of Landslide Tsunamis: A Review. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 16(6): 2241001. <https://doi.org/10.1142/s1793431122410019>
- Lee, J. S., 2003. Uncertainties in the Predicted Number of Life Loss Due to the Dam Breach Floods. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 7(1): 81–91. <https://doi.org/10.1007/BF02841991>

- Li, C. H., Guo, C. B., Zhang, G. Z., et al., 2021. A Landslide Volume Calculation Method Based on LiDAR Topography and Slip Surface Reconstruction: A Case Study of Deda Ancient Landslide in Batang County of Sichuan Province. *Geological Bulletin of China*, 40(12): 2015—2023 (in Chinese with English abstract).
- Li, N. J., Hu, X. L., Zheng, H. C., et al., 2024a. A Novel back Analysis Framework for the Probabilistic Risk Assessment of Subaerial Landslide-Induced Tsunami Hazard. *Engineering Geology*, 343: 107801. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107801>
- Li, S., Peng, M., Gao, L., et al., 2024b. A 3D SPH Framework for Simulating Landslide Dam Breaches by Coupling Erosion and Side Slope Failure. *Computers and Geotechnics*, 175: 106699. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106699>
- Li, X., Chen, H. Y., Chen, X. Q., et al., 2024c. Experimental Study on the Stability of Noncohesive Landslide Dams Based on Seepage Effect. *Engineering Geology*, 341: 107708. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107708>
- Li, Y. C., 2021. Identification and Evolution of the Paleolandslide Dam Events in the Suwalong Reach of the Upper Jinsha River (Dissertation). Jilin University, Changchun (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. S., 1986. A Discussion of Disaster System and Disaster Science. *Journal of Catastrophology*, 1(1): 7—11 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z. H., Nadim, F., Huang, H. W., et al., 2010. Quantitative Vulnerability Estimation for Scenario-Based Landslide Hazards. *Landslides*, 7(2): 125—134. <https://doi.org/10.1007/s10346-009-0190-3>
- Liang, Y. Y., Peng, M., Liu, L., et al., 2025. System Reliability Analysis of Multi-Slip Surface Slopes Based on Geological Structure Detection. *Earth Science*: 1—17. (2025—04—18) (in Chinese with English abstract).
- Liao, H. M., Yang, X. G., Xu, F. G., et al., 2018. A Fuzzy Comprehensive Method for the Risk Assessment of a Landslide-Dammed Lake. *Environmental Earth Sciences*, 77(22): 750. <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7946-9>
- Liao, Q. L., Li, X., Li, S. D., et al., 2005. Occurrence, Geology and Geomorphology Characteristics and Origin of Qianjiangping Landslide in Three Gorges Reservoir Area and Study on Ancient Landslide Criterion. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(17): 3146—3153 (in Chinese with English abstract).
- Lin, M. L., Chen, T. W., 2020. Estimating Volume of Deep-Seated Landslides and Mass Transport in Basihan River Basin, Taiwan. *Engineering Geology*, 278: 105825. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105825>
- Lind, N., Hartford, D., Assaf, H., 2004. Hydrodynamic Models of Human Stability in a Flood. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 40(1): 89—96. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01012.x>
- Liu, C. Z., Wang, J. X., 2024. Research on Classification of Collapse, Landslide and Debris Flow Disaster Chains. *Journal of Engineering Geology*, 32(5): 1573—1596 (in Chinese with English abstract).
- Liu, G. L., Ma, L. H., 2024. Research Status and Prospect of Landslide Surge Climb in Reservoir Area. *Technology Innovation and Application*, 14(27): 115—118 (in Chinese).
- Liu, J. Y., Lin, C. Y., Chen, Y. I., et al., 2020. The Source Detection of 28 September 2018 Sulawesi Tsunami by Using Ionospheric GNSS Total Electron Content Disturbance. *Geoscience Letters*, 7(1): 11. <https://doi.org/10.1186/s40562-020-00160-w>
- Liu, N., Cheng, Z. L., Cui, P., et al., 2013. Dammed Lake and Risk Management. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Liu, Q., Huang, D. L., Zhang, B., et al., 2024. Developing a Probability-Based Technique to Improve the Measurement of Landslide Vulnerability on Regional Roads. *Reliability Engineering & System Safety*, 244: 109918. <https://doi.org/10.1016/j.res.2023.109918>
- Liu, Z. Z., Chen, Q., Li, X., et al., 2023. A Review of the Research on the Failure Potential of Landslide Dams Caused by Overtopping and Seepage. *Natural Hazards*, 116(2): 1513—1538. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05726-9>
- Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., 2020. On the Landslide Tsunami Uncertainty and Hazard. *Landslides*, 17(10): 2301—2315. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01429-z>
- Løvholt, F., Pedersen, G., Harbitz, C. B., et al., 2015. On the Characteristics of Landslide Tsunamis. *Philosophical Transactions Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences*, 373(2053): 20140376. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0376>
- Luo, P., Xu, W. Z., Pu, W., et al., 2025. Study on Instability Process and Surge Wave on the No. 1 Bank Slope of Jiaoding Peak in the Three Gorges Reservoir Area. *Water Resources and Power*, 43(3): 65—68, 50 (in Chinese with English abstract).

- Ma, P. H., Peng, J. B., 2022. On Loess Geohazards Chain (2). *Journal of Natural Disasters*, 31(3): 15—24 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Z. M., 2024. Study on the Accessibility and Vulnerability of Rail-Sea Intermodal Transport in the New Land-Sea Passage in Western China (Dissertation). Chongqing Jiaotong University, Chongqing (in Chinese with English abstract).
- Mahmoud, A. A., Wang, J. T., Jin, F., 2020. An Improved Method for Estimating Life Losses from Dam Failure in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34(8): 1263—1279. <https://doi.org/10.1007/s00477-020-01820-1>
- Meena, S. R., Soares, L. P., Grohmann, C. H., et al., 2022. Landslide Detection in the Himalayas Using Machine Learning Algorithms and U-Net. *Landslides*, 19(5): 1209—1229. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01861-3>
- Merghadi, A., Yunus, A. P., Dou, J., et al., 2020. Machine Learning Methods for Landslide Susceptibility Studies: A Comparative Overview of Algorithm Performance. *Earth-Science Reviews*, 207: 103225. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103225>
- Mergili, M., Jaboyedoff, M., Pullarello, J., et al., 2020. Back Calculation of the 2017 Piz Cengalo-Bondo Landslide Cascade with r.avaflow: What We can do and What we Can Learn. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(2): 505—520. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-505-2020>
- Mu, P., Wang, P. Y., Han, L. F., et al., 2020. Navigation Safety Thresholds of Ships Exposed under Impulse Waves Induced by Landslides in Three Gorges Reservoir Areas. *Port & Waterway Engineering*, (3): 74—80 (in Chinese with English abstract).
- MWR (Ministry of Water Resources), 2009. Standard for Classification of Risk Grade of Landslide Lakes. SL 450—2009. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, Beijing.
- Nian, T. K., Wu, H., Chen, G. Q., et al., 2018. Research Progress on Stability Evaluation Method and Disaster Chain Effect of Landslide Dam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 37(8): 1796—1812 (in Chinese with English abstract).
- Nikolakopoulos, K. G., Kyriou, A., Koukouvelas, I. K., et al., 2023. UAV, GNSS, and InSAR Data Analyses for Landslide Monitoring in a Mountainous Village in Western Greece. *Remote Sensing*, 15(11): 2870. <https://doi.org/10.3390/rs15112870>
- Nirandjan, S., Koks, E. E., Ye, M. Q., et al., 2024. Review Article: Physical Vulnerability Database for Critical Infrastructure Hazard Risk Assessments: A Systematic Review and Data Collection. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24(12): 4341—4368. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-4341-2024>
- Noda, E., 1970. Water Waves Generated by Landslides. *Journal of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division*, 96(4): 835—855. <https://doi.org/10.1061/awhcar.0000045>
- Okuyama, Y., Hewings, G. J., Sonis, M., 2004. Measuring Economic Impacts of Disasters: Interregional Input-Output Analysis Using Sequential Interindustry Model. In: Okuyama Y., Chang, S. E., eds., *Modeling Spatial and Economic Impacts of Disasters*. Springer, Heidelberg, 77—101.
- Pan, J. Z., 1980. Anti-Sliding Stability and Landslide Analysis of Buildings. Water Resources Press, Beijing (in Chinese).
- Peng, D., 2024. Formation Conditions and Slip Distance Prediction of Typical Loess Earthquake Landslide (Dissertation). Institute of Engineering Mechanics, China Earthquake Administration, Harbin (in Chinese with English abstract).
- Peng, J. B., Cui, P., Zhuang, J. Q., 2020. Challenges to Engineering Geology of Sichuan-Tibet Railway. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 39(12): 2377—2389 (in Chinese with English abstract).
- Peng, M., Li, S., Gao, L., et al., 2024a. A Novel Local-Drag-Force-Based Approach for Simulating Wave Attenuation by Mangrove Forests Using a 3D-SPH Method. *Ocean Engineering*, 306: 118001. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118001>
- Peng, M., Zhang, J. L., Zhu, Y., et al., 2024b. Experimental Study on Wave Attenuation and Stability of Ecological Dike System Composed of Submerged Breakwater, Mangrove, and Dike under Storm Surge. *Applied Ocean Research*, 151: 104144. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2024.104144>
- Peng, M., Zhang, L. M., 2012a. Breaching Parameters of Landslide Dams. *Landslides*, 9(1): 13—31. <https://doi.org/10.1007/s10346-011-0271-y>
- Peng, M., Zhang, L. M., 2012b. Analysis of Human Risks Due to Dam-Break Floods: Part I: A New Model Based on Bayesian Networks. *Natural Hazards*, 64(1): 903—933. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0275-5>
- Peng, M., Zhang, L. M., Chang, D. S., et al., 2014. Engineering Risk Mitigation Measures for the Landslide

- Dams Induced by the 2008 Wenchuan Earthquake. *Engineering Geology*, 180: 68–84. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.03.016>
- Peng, M., Zhao, Q. X., Li, S., et al., 2025. Two-Phase SPH Simulation of Granular Landslide-Tsunamis Processes Considering Dynamic Seepage. *Earth Science*: 1–13. (2025–06–11) (in Chinese with English abstract)
- Peramuna, P. D. P. O., Neluwala, N. G. P. B., Wijesundara, K. K., et al., 2024. Review on Model Development Techniques for Dam Break Flood Wave Propagation. *WIREs Water*, 11(2): e1688. <https://doi.org/10.1002/wat2.1688>
- Priest S., Wilson T., Tapsell S., et al., 2007. Building a Model to Estimate Risk to Life for European Flood Events—Final Report. European Commission: Flood Hazard Research Centre. <https://doi.org/T10-07-10>
- Qin, P. P., 2023. Study on Landslide-Induced Wave Analysis and Hazard Mitigation Plan of Wangjiashan Landslide in the Baihetan Reservoir Area(Dissertation). China Three Gorges University, Yichang (in Chinese with English abstract).
- Reiter, P., 2001. Loss of Life Caused by Dam Failure: The RESCDAM LOL Method and Its Application to Kyrkosjarvi Dam in Seinajoki. PR Water Consulting Ltd., Helsinki.
- Ruffini, G., Heller, V., Briganti, R., 2019. Numerical Modelling of Landslide-Tsunami Propagation in a Wide Range of Idealised Water Body Geometries. *Coastal Engineering*, 153: 103518. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103518>
- Russell, A. A., 1840. A Tour through the Australian Colonies in 1839: With Notes and Incidents of a Voyage Round the Globe, Calling at New Zealand and South America. Kessinger Legacy Reprints, Whitefish, MT.
- Saba, S. B., Ali, M., Ali Turab, S., et al., 2023. Comparison of Pixel, Sub-Pixel and Object-Based Image Analysis Techniques for Co-Seismic Landslides Detection in Seismically Active Area in Lesser Himalaya, Pakistan. *Natural Hazards*, 115(3): 2383–2398. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05642-y>
- Sabeti, R., Heidarzadeh, M., 2022. A New Empirical Equation for Predicting the Maximum Initial Amplitude of Submarine Landslide-Generated Waves. *Landslides*, 19(2): 491–503. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01747-w>
- Sathiparan, N., 2020. An Assessment of Building Vulnerability to a Tsunami in the Galle Coastal Area, Sri Lanka. *Journal of Building Engineering*, 27: 100952. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.100952>
- Scheidegger, A. E., 1973. On the Prediction of the Reach and Velocity of Catastrophic Landslides. *Rock Mechanics*, 5(4): 231–236. <https://doi.org/10.1007/BF01301796>
- Sestras, P., Badea, G., Badea, A. C., et al., 2025. A Novel Method for Landslide Deformation Monitoring by Fusing UAV Photogrammetry and LiDAR Data Based on Each Sensor's Mapping Advantage in Regards to Terrain Feature. *Engineering Geology*, 346: 107890. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107890>
- Shan, Y. B., Chen, S. S., Zhong, Q. M., 2020. Rapid Prediction of Landslide Dam Stability Using the Logistic Regression Method. *Landslides*, 17(12): 2931–2956. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01414-6>
- Shen, D. Y., Shi, Z. M., Peng, M., et al., 2020. Longevity Analysis of Landslide Dams. *Landslides*, 17(8): 1797–1821. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01386-7>
- Shen, D. Y., Shi, Z. M., Peng, M., et al., 2024. Efficient Risk Assessment of Landslide Dam Breach Floods in the Yarlung Tsangpo River Basin. *Landslides*, 21(11): 2673–2694. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02309-6>
- Shen, D. Y., Shi, Z. M., Peng, M., et al., 2019. Stability Estimation of Landslide Dams. In: Proceedings of 2019 National Conference on Engineering Geology. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. M., Cheng, S. Y., Zhang, Q. Z., et al., 2020. A Fast Model for Landslide Dams Stability Assessment: A Case Study of Xiaogangjian (Upper) Landslide Dam. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 18(2): 95–100, 146 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. M., Ma, X. L., Peng, M., et al., 2014. Statistical Analysis and Efficient Dam Burst Modelling of Landslide Dams Based on a Large-Scale Database. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 33(9): 1780–1790 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Z. M., Peng, M., Shen, D. Y., et al., 2023. Rapid Hazard Assessment and Emergency Disposal of Landslide Dam. Tongji University Press, Shanghai (in Chinese).
- Shi, Z. M., Shen, D. Y., Peng, M., et al., 2021a. Research Progress on Rapid Hazard Assessment of Landslide Dams Caused by Landslides and Avalanches. *Advanced Engineering Sciences*, 53(6): 1–20 (in Chinese with English abstract).

- Shi, Z. M., Zhou, M. J., Peng, M., et al., 2021b. Research Progress on Overtopping Failure Mechanisms and Breaching Flood of Landslide Dams Caused by Landslides and Avalanches. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 40(11): 2173—2188 (in Chinese with English abstract).
- Shugar, D. H., Jacquemart, M., Shean, D., et al., 2021. A Massive Rock and Ice Avalanche Caused the 2021 Disaster at Chamoli, Indian Himalaya. *Science*, 373(6552): 300—306. <https://doi.org/10.1126/science.abh4455>
- Singh, A., Anand, V., Durga Rao, K. H. V., et al., 2025. Unveiling the Catastrophic Landslide-Induced Flash Flood in Teesta River, Sikkim: Insight from South Lhonak Glacial Lake. *Landslides*, 22(3): 837—855. <https://doi.org/10.1007/s10346-024-02378-7>
- Singh, K. P., Snorrason, A., 1984. Sensitivity of Outflow Peaks and Flood Stages to the Selection of Dam Breach Parameters and Simulation Models. *Journal of Hydrology*, 68(1—4): 295—310. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90217-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90217-8)
- Sivertun, Å., Vaghani, V., 2007. Cascade or Domino Effects in Flood Impact Analysis in GIS. In: Proceedings of the Third IASTED International Conference on Environmental Modelling and Simulation (EMS), 97—102.
- Slingerland, R. L., Voight, B., 1979. Occurrences, Properties, and Predictive Models of Landslide-Generated Water Waves. Rockslides and Avalanches, 2-Engineering Sites. Elsevier, Amsterdam: 317—394. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-41508-0.50017-x>
- Song, C., Kwan, M. P., Song, W. G., et al., 2017. A Comparison between Spatial Econometric Models and Random Forest for Modeling Fire Occurrence. *Sustainability*, 9(5): 819. <https://doi.org/10.3390/su9050819>
- Song, Y. F., Cao, Y. B., Fan, W., et al., 2023. Probabilistic Early Warning Model for Rainfall-Induced Landslides Based on Bayesian Approach. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(3): 558—574 (in Chinese with English abstract).
- Song, Y. Y., Hao, L. N., Yan, L. H., et al., 2022. Application of the Support Vector Machine in Landslide Identification. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 58(6): 727—734 (in Chinese with English abstract).
- Sun, M. P., Liu, S. Y., Yao, X. J., et al., 2014. The Cause and Potential Hazard of Glacial Lake Outburst Flood Occurred on July 5, 2013 in Jiali County, Tibet. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 36(1): 158—165 (in Chinese with English abstract).
- Swanson, F., Graham, R., Grant, G., 1985. Some Effects of Slope Movements on River Channels. International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. Tsukuba, Japan, 273—278.
- Tacconi, S. C., Segoni, S., Casagli, N., et al., 2016. Geomorphic Indexing of Landslide Dams Evolution. *Engineering Geology*, 208: 1—10. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.04.024>
- Tacconi, S. C., Vilimek, V., Emmer, A., et al., 2018. Morphological Analysis and Features of the Landslide Dams in the Cordillera Blanca, Peru. *Landslides*, 15(3): 507—521. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0888-6>
- Van Der Meer, J. W., Allsop, N. W. H., Bruce, T., et al., 2016. EurOtop-Manual on Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures: An Overtopping Manual Largely Based on European Research, But for Worldwide Application. <https://www.overtopping-manual.com/>
- Varnes, D. J., 1984. Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice. Unesco, Paris.
- Vinodh, T. L. C., Tanaka, N., 2020. A Unified Runup Formula for Solitary Waves on a Plane Beach. *Ocean Engineering*, 216: 108038. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108038>
- Walder, J. S., O'Connor, J. E., 1997. Methods for Predicting Peak Discharge of Floods Caused by Failure of Natural and Constructed Earthen Dams. *Water Resources Research*, 33(10): 2337—2348. <https://doi.org/10.1029/97WR01616>
- Waldmann, N., Vasskog, K., Simpson, G., et al., 2021. Anatomy of a Catastrophe: Reconstructing the 1936 Rock Fall and Tsunami Event in Lake Lovatnet, Western Norway. *Frontiers in Earth Science*, 9: 671378. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.671378>
- Wang, H. B., Wu, S. R., Shi, J. S., et al., 2013. Qualitative Hazard and Risk Assessment of Landslides: A Practical Framework for a Case Study in China. *Natural Hazards*, 69(3): 1281—1294. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-0008-1>
- Wang, H. C., Chen, G. M., Cao, X. X., et al., 2024. Review of Research on the Effect of Landslide Surge on Hydraulic Structures in High Dams and Large Reservoirs. *Journal of China Three Gorges University (Natural Sciences)*, 46(4): 35—43 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. J., Xiao, L. L., Ward, S. N., 2021. Tsunami Squares Modeling of Landslide Tsunami Generation Considering the 'Push Ahead' Effects in Slide/Water

- Interactions: Theory, Experimental Validation, and Sensitivity Analyses. *Engineering Geology*, 288: 106141. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106141>
- Wang, M. L., Tian, Y., Wang, P. Y., et al., 2025. Study on the Pattern of Surge Climbing under the Condition of Moving Water in Three-Dimensional Rock Landslides. *Hydro-Science and Engineering*, (1): 111–119 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. Y., Han, L. F., Yu, T., et al., 2016. Effects of Landslide Generated Impulse Waves on Ship Impact Force for Pile Wharf. *Journal of Harbin Engineering University*, 37(6): 878–884 (in Chinese with English abstract).
- Wang, R. B., Wang, Y. Z., Xu, W. Y., et al., 2025. Numerical Simulation of the Formation and Propagation of Landslide-Induced Waves: A Case Study of the RM Dam Reservoir (Southwest China). *Landslides*, 22(7): 2347–2362. <https://doi.org/10.1007/s10346-025-02491-1>
- Wang, S. S., Tong, L. Q., 2016. Susceptibility Assessment of Landslide-Damming Based on Valley Transverse Profile Morphological Characteristics. *Geography and Geo-Information Science*, 32(5): 97–102, 109 (in Chinese with English abstract).
- Wang, T., Xiao, M. L., Luo, Y., 2021. Method of Calculating Critical Volume of Landslide-Damming Based on PFC Numerical Experiment. *Water Resources and Power*, 39(8): 157–160 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. K., Tang, H. M., Huang, J. S., et al., 2022. A Comparative Study of Different Machine Learning Methods for Reservoir Landslide Displacement Prediction. *Engineering Geology*, 298: 106544. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106544>
- Wang, Y., Cao, Y., Xu, F. D., et al., 2024. Reservoir Landslide Susceptibility Prediction Considering Non-Landslide Sampling and Ensemble Machine Learning Methods. *Earth Science*, 49(5): 1619–1635 (in Chinese with English abstract).
- Westoby, M. J., Glasser, N. F., Brasington, J., et al., 2014. Modelling Outburst Floods from Moraine-Dammed Glacial Lakes. *Earth-Science Reviews*, 134: 137–159. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2014.03.009>
- Wolter, A., Gasston, C., Morgenstern, R., et al., 2022. The Hapuku Rock Avalanche: Breaching and Evolution of the Landslide Dam and Outflow Channel Revealed Using High Spatiotemporal Resolution Datasets. *Frontiers in Earth Science*, 10: 938068. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.938068>
- Wu, H., Nian, T. K., Shan, Z. G., 2023. Research Progress on Formation and Evolution Mechanism and Risk Prediction Method of Landslide Blocking River and Dam. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 42(S1): 3192–3205 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H., Nian, T. K., Shan, Z. G., et al., 2023. Rapid Prediction Models for 3D Geometry of Landslide Dam Considering the Damming Process. *Journal of Mountain Science*, 20(4): 928–942. <https://doi.org/10.1007/s11629-022-7906-z>
- Wu, H., Shi, A. C., Ni, W. D., et al., 2024. Numerical Simulation on Potential Landslide-Induced Wave Hazards by a Novel Hybrid Method. *Engineering Geology*, 331: 107429. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107429>
- Wu, H., Trigg, M. A., Murphy, W., et al., 2022. A New Global Landslide Dam Database (RAGLAD) and Analysis Utilizing Auxiliary Global Fluvial Datasets. *Landslides*, 19(3): 555–572. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01817-z>
- Xu, F. X., 2020. A Rapid Evaluation Model of the Stability of Landslide Dam. *Journal of Natural Disasters*, 29(2): 54–63 (in Chinese with English abstract).
- Xu, L. F., Meng, X. W., Xu, X. G., 2014. Natural Hazard Chain Research in China: A Review. *Natural Hazards*, 70(2): 1631–1659. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0881-x>
- Xu, Q., Fan, X. M., Huang, R. Q., et al., 2009. Landslide Dams Triggered by the Wenchuan Earthquake, Sichuan Province, South West China. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68(3): 373–386. <https://doi.org/10.1007/s10064-009-0214-1>
- Xu, W. J., 2012. Numerical Study on Factors Influencing Reservoir Surge by Landslide. *Journal of Engineering Geology*, 20(4): 491–507 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. J., 2023. Research Advances in Disaster Dynamics of Landslide Tsunami. *Journal of Engineering Geology*, 31(6): 1929–1940 (in Chinese with English abstract).
- Xu, W. J., Zhou, Q., Dong, X. Y., 2022. SPH-DEM Coupling Method Based on GPU and Its Application to the Landslide Tsunami. Part II: Reproduction of the Vajont Landslide Tsunami. *Acta Geotechnica*, 17(6): 2121–2137. <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01387-3>
- Xue, Q., Dong, Y., Zhang, M. S., et al., 2025. Discussion on Refined Identification, Verification, Prevention and

- Control Models for Geo-Hazards Risk. *Northwestern Geology*, 58(2): 66—79 (in Chinese with English abstract).
- Yan, Y. Q., Guo, C. B., Zhang, Y. N., et al., 2024. Comprehensive Evaluation and Prediction of Potential Long-Runout Landslide in Songrong, Tibetan Plateau: Insights from Remote Sensing Interpretation, SBAS-InSAR, and Massflow Numerical Simulation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(5): 198. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03682-1>
- Yang, C. M., Chang, J. M., Hung, C. Y., et al., 2022. Life Span of a Landslide Dam on Mountain Valley Caught on Seismic Signals and Its Possible Early Warnings. *Landslides*, 19(3): 637—646. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01818-y>
- Yang, H. Y., Xu, X. N., Jiang, T., et al., 2025. Study on Hazard Determination Method of Major Landslide-Dammed Lake Disaster Chains Considering Multi-Factors. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 46(5): 27—33 (in Chinese with English abstract).
- Yang, L., Wang, H. L., Xu, W. Y., et al., 2025. Research on Equivalent Volume Calculation of Pressure Foot of Landslide with Circular Sliding Surface and Design of Its Cross-Section. *Engineering Mechanics*, 42(2): 108—117 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. Y., Chen, H. Q., Qi, X. B., et al., 2023. Prediction Model for the Landslide Movement Distance Induced by Earthquake Based on the Reliability Theory. *Geological Survey of China*, 10(3): 102—109 (in Chinese with English abstract).
- Yavari-Ramshe, S., Ataie-Ashtiani, B., 2016. Numerical Modeling of Subaerial and Submarine Landslide-Generated Tsunami Waves—Recent Advances and Future Challenges. *Landslides*, 13(6): 1325—1368. <https://doi.org/10.1007/s10346-016-0734-2>
- Ye, R. Q., Li, S. Y., Guo, F., et al., 2021. RS and GIS Analysis on Relationship between Landslide Susceptibility and Land Use Change in Three Gorges Reservoir Area. *Journal of Engineering Geology*, 29(3): 724—733 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Du, J., Wang, Y., 2008. Analysis of Surge Triggered by Dayantang Landslide in Shuibuya Reservoir of Qingjiang River. *Rock and Soil Mechanics*, 29(12): 3266—3270 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K. L., Zhang, Y., Wang, Y., 2022. A Review of Landslide-Generated Waves Risk and Practice of Management of Hazard Chain Risk from Reservoir Landslide. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(2): 1—12 (in Chinese with English abstract).
- Yin, K., Chen, L., Ma, F., et al., 2018. Practice and Thinking of Landslide Risk Management Considering Their Secondary Consequences in the Three-Gorges Reservoir, China. *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. Boca Raton: CRC Press: 2097—2105. <https://doi.org/10.1201/9781315375007-254>
- Yin, Y. P., 2008. Researches on the Geo-Hazards Triggered by Wenchuan Earthquake, Sichuan. *Journal of Engineering Geology*, 16(4): 433—444 (in Chinese with English abstract).
- Yin, Y. P., Li, B., Zhang, T. T., et al., 2021. The February 7 of 2021 Glacier-Rock Avalanche and the Outburst Flooding Disaster Chain in Chamoli, India. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 32(3): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Yu, H., Wang, J. A., Chai, M., et al., 2014. Review on Research Methods of Disaster Loss Accumulation and Amplification of Disaster Chains. *Progress in Geography*, 33(11): 1498—1511 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, P., Wang, S., Sun, X. P., et al., 2022. Probabilistic Hazard Assessment of Landslide-Induced River Damming. *Engineering Geology*, 304: 106678. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106678>
- Zengaffinen-Morris, T., Urgeles, R., Løvholt, F., 2022. On the Inference of Tsunami Uncertainties from Landslide Run-out Observations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(4): e2021JC018033. <https://doi.org/10.1029/2021JC018033>
- Zhai, G. F., Fukuzono, T., Ikeda, S., 2006. An Empirical Model of Fatalities and Injuries Due to Floods in Japan. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(4): 863—875. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb04500.x>
- Zhang, J., Li, C. Q., Wang, S. Y., et al., 2024. Deformation and Stability Analysis of the Ancient Da'ao Landslide Revealed by InSAR and Model Simulation. *Landslides*, 21(4): 829—844. <https://doi.org/10.1007/s10346-023-02181-w>
- Zhang, Q., Huang, B. L., Zheng, J. H., et al., 2021. Prediction and Analysis of Surge Generated by Crushing Failure Collapse of Columnar Dangerous Rock Mass. *Rock and Soil Mechanics*, 42(10): 2845—2854 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Zhao, C. Y., Chen, X. R., 2022. Technical

- Progress and Development Trend of Geological Hazards Early Identification with Multi-Source Remote Sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 51(6): 885—896 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., 2022. Risk Analysis of Landslide Surge in Wuxia Section of Three Gorges Reservoir Area(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. C., 2024. Research on Coupled Analysis and Risk Assessment of Factors Influencing Earth-Rock Dam Failure Based on Intelligent Algorithms(Dissertation). Xi'an University of Technology, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. L., Wu, X. M., Xiao, E. S., et al., 2023. Research and Practice of Key Technologies for Landslide Dam Development and Utilization—A Case in Hongshiyang Landslide Dam Water Conservancy Project. *River*, 2(3): 251—262. <https://doi.org/10.1002/rvr.2.51>
- Zhao, T., Zhang, S. C., He, X. N., et al., 2024. Improved DeepLabV³⁺ Model for Landslide Identification in High-Resolution Remote Sensing Images after Earthquakes. *National Remote Sensing Bulletin*, 28(9): 2293—2305 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, D. L., Xie, H., Wei, F. Q., et al., 2013. Discussion on Mountain Hazards Chain. *Journal of Mountain Science*, 31(3): 314—326 (in Chinese with English abstract).
- Zhong, Q. M., Wang, L., Shan, Y. B., et al., 2023. Review on Risk Assessments of Dammed Lakes. *Frontiers in Earth Science*, 10: 981068. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.981068>
- Zhong, Q. M., Wu, H., Shan, Y. B., et al., 2024. Numerical Simulation of Baige Landslide Barrier Dam Formation Process Based on Material Point Method. *Yangtze River*, 55(4): 25—31, 43(in Chinese with English abstract).
- Zhou, G. G. D., Roque, P. J. C., Xie, Y. X., et al., 2020. Numerical Study on the Evolution Process of a Geohazards Chain Resulting from the Yigong Landslide. *Landslides*, 17(11): 2563—2576. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01448-w>
- Zhou, J. W., Chen, M. L., Li, H. B., et al., 2019. Formation and Movement Mechanisms of Water-Induced Landslides and Hazard Prevention and Mitigation Technologies. *Journal of Engineering Geology*, 27(5): 1131—1145 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, J. W., Chen, M. L., Qu, J. K., et al., 2023. Research and Prospect on Disaster-Causing Mechanism and Prevention-Control Technology of Reservoir Landslides. *Advanced Engineering Sciences*, 55(1): 110—128 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, X. H., Peng, J. B., Tong, X., et al., 2017. Preliminary Research on Geological Disaster Chains in Loess Area. *Journal of Engineering Geology*, 25(1): 117—122 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 柴贺军, 董云, 李绍轩, 等, 2005. 大型天然土石坝的溃坝方式及环境效应分析. *地质灾害与环境保护*, 16(2): 172—176.
- 陈李蓉, 2023. 水位骤降下非均质库岸边坡失稳概率分析及诱发的涌浪模拟(硕士学位论文). 南昌: 南昌大学.
- 陈世壮, 徐卫亚, 石安池, 等, 2023. 高坝大库滑坡涌浪灾害链研究综述. *水利水电科技进展*, 43(3): 83—93.
- 崔鹏, 郭剑, 2021. 沟谷灾害链演化模式与风险防控对策. *工程科学与技术*, 53(3): 5—18.
- 崔鹏, 韩用顺, 陈晓清, 2009. 汶川地震堰塞湖分布规律与风险评估. *四川大学学报(工程科学版)*, 41(3): 35—42.
- 杜伯辉, 2006. 柘溪水库塘岩光滑坡: 我国首例水库蓄水初期诱发的大型滑坡. 见: 第二届全国岩土与工程学术大会论文集(上册), 武汉: 928—932.
- 杜镇瀚, 陈祥, 潘洪月, 等, 2025. 近坝库岸滑坡涌浪—溃坝链生灾害研究进展. *中国水利* (3): 50—57.
- 范鸿杰, 2019. 基于DAMBRK的官地水电站溃坝洪水模拟研究. *水电站设计*, 35(4): 18—22.
- 樊晓一, 张睿骁, 胡晓波, 2020. 沟谷地形参数对滑坡运动距离的影响研究. *地质力学学报*, 26(1): 106—114.
- 冯玉涛, 肖盛燮, 2009. 崩滑流地质灾害链式机理及其优化防治. *灾害学*, 24(3): 22—26.
- 冯震宇, 2024. 基于机器学习的堰塞坝稳定性评估与溃决参数预测(硕士学位论文). 贵阳: 贵州大学.
- 付兵杰, 李书, 丁凡桢, 等, 2025. 基于深度学习的堰塞坝表层颗粒物质识别研究. *工程勘察*, 53(2): 79—84.
- 高建国, 1986. 灾害学概说. *农业考古* (1): 281—297.
- 高云建, 赵思远, 邓建辉, 2020. 青藏高原三江并流区重大堵江滑坡孕育规律及其防灾挑战. *工程科学与技术*, 52(5): 50—61.
- 郭增建, 秦保燕, 1987. 灾害物理学简论. *灾害学*, 2(2): 25—33.
- 哈斯, 张继权, 佟斯琴, 等, 2016. 灾害链研究进展与展望. *灾害学*, 31(2): 131—138.
- 何世阳, 李立青, 何亚辉, 2023. 滑坡地质灾害风险区划评价方法研究综述. *湖南交通科技*, 49(4): 1—7, 17.
- 黄波林, 2014. 水库滑坡涌浪灾害水波动力学分析方法研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 黄波林, 殷跃平, 2012. 基于波浪理论的水库地质灾害涌浪数值分析方法. *水文地质工程地质*, 39(4): 92—97.

- 黄波林,殷跃平,李滨,等,2021.库区城镇滑坡涌浪风险评价与减灾研究.地质学报,95(6):1949—1961.
- 黄波林,殷跃平,李仁江,等,2025.滑坡涌浪综合防控工程措施研究进展与挑战.工程地质学报,33(1):159—170.
- 黄帅,王中根,李昱,等,2025.基于改进 SPH 方法的滑坡涌浪对大坝结构冲击响应规律.工程科学与技术,57(1):120—131.
- 黄种为,董兴林,1983.水库库岸滑坡激起涌浪的试验研究.见:水利水电科学研究院,编,水利水电科学研究院科学研究论文集第 13 集(水力学).北京:水利出版社:157—170.
- 蒋权,陈希良,肖江剑,等,2018.云南黄坪库区滑坡运动及其失稳模式的离散元模拟.中国地质灾害与防治学报,29(3):53—59.
- 蒋水华,熊威,朱光源,等,2024.暴雨及水位骤降条件下渗流参数空间变异的水库滑坡概率分析.地球科学,49(5):1679—1691.
- 江炫融,王军威,刘熹彬,等,2024.应急监测系统在堰塞湖—堰塞坝灾害治理的应用综述.水上安全(8):56—58.
- 李彩虹,郭长宝,张广泽,等,2021.基于激光雷达(LiDAR)的地形与钻探滑面重构滑坡体积计算方法:以四川省巴塘县德达古滑坡为例.地质通报,40(12):2015—2023.
- 李永超,2021.金沙江上游苏洼龙河段早期滑坡堵江事件识别及演化研究(博士学位论文).长春:吉林大学.
- 李永善,1986.灾害系统与灾害学探讨.灾害学,1(1):7—11.
- 梁姚颖,彭铭,刘璠,等,2025.基于地质结构探测的多滑面边坡系统可靠度分析.地球科学:1—17.(2025—04—18).
- 廖秋林,李晓,李守定,等,2005.三峡库区千将坪滑坡的发生、地质地貌特征、成因及滑坡判据研究.岩石力学与工程学报,24(17):3146—3153.
- 刘传正,王建新,2024.崩塌滑坡泥石流灾害链分类研究.工程地质学报,32(5):1573—1596.
- 刘郭林,马联华,2024.库区滑坡涌浪爬高研究现状与展望.科技创新与应用,14(27):115—118.
- 刘宁,程尊兰,崔鹏,等,2013.堰塞湖及其风险控制.北京:科学出版社.
- 罗鹏,许万忠,蒲文,等,2025.三峡库区轿顶峰¹岸坡失稳过程及涌浪风险研究.水电能源科学,43(3):65—68,50.
- 马鹏辉,彭建兵,2022.论黄土地质灾害链(二).自然灾害学报,31(3):15—24.
- 马志明,2024.西部陆海新通道铁海联运可达性与脆弱性研究(硕士学位论文).重庆:重庆交通大学.
- 牟萍,王平义,韩林峰,等,2020.滑坡涌浪灾害下三峡库区船舶航行安全阈值.水运工程(3):74—80.
- 年廷凯,吴昊,陈光齐,等,2018.堰塞坝稳定性评价方法及灾害链效应研究进展.岩石力学与工程学报,37(8):1796—1812.
- 潘家铮,1980.建筑物的抗滑稳定和滑坡分析.北京:水利出版社.
- 彭达,2024.典型黄土地震滑坡形成条件及滑距预测(博士学位论文).哈尔滨:中国地震局工程力学研究所.
- 彭建兵,崔鹏,庄建琦,2020.川藏铁路对工程地质提出的挑战.岩石力学与工程学报,39(12):2377—2389.
- 彭铭,赵庆新,李爽,等,2025.考虑动态渗流的散粒体滑坡—涌浪过程两相 SPH 模拟.地球科学:1—13.(2025—06—11).
- 秦盼盼,2023.白鹤滩库区王家山滑坡涌浪分析及减灾方案研究(硕士学位论文).宜昌:三峡大学.
- 沈丹祎,石振明,彭铭,等,2019.堰塞坝稳定性快速评估.2019 年全国工程地质学术年会论文集,北京:357—364.
- 石振明,程世誉,张清照,等,2020.堰塞坝稳定性快速评估模型:以小岗剑(上)堰塞坝为例.水利与建筑工程学报,18(2):95—100,146.
- 石振明,马小龙,彭铭,等,2014.基于大型数据库的堰塞坝特征统计分析与溃决参数快速评估模型.岩石力学与工程学报,33(9):1780—1790.
- 石振明,彭铭,沈丹祎,等,2023.堰塞坝危险性快速评估与应急处置.上海:同济大学出版社.
- 石振明,沈丹祎,彭铭,等,2021a.崩滑型堰塞坝危险性快速评估研究进展.工程科学与技术,53(6):1—20.
- 石振明,周明俊,彭铭,等,2021b.崩滑型堰塞坝坝顶溃决机制及溃坝洪水研究进展.岩石力学与工程学报,40(11):2173—2188.
- 水利部.堰塞湖风险等级划分标准[S].SL 450-2009.北京:中华人民共和国水利部,2009.
- 宋宇飞,曹琰波,范文,等,2023.基于贝叶斯方法的降雨诱发滑坡概率型预警模型研究.岩石力学与工程学报,42(3):558—574.
- 宋雨洋,郝利娜,严丽华,等,2022.支持向量机在滑坡识别中的应用.兰州大学学报(自然科学版),58(6):727—734.
- 孙美平,刘时银,姚晓军,等,2014.2013 年西藏嘉黎县“7·5”冰湖溃决洪水成因及潜在危害.冰川冻土,36(1):158—165.
- 汪华晨,陈光明,曹学兴,等,2024.高坝大库滑坡涌浪对水工建筑物作用力研究综述.三峡大学学报(自然科学版),46(4):35—43.
- 王梅力,田野,王平义,等,2025.动水条件下三维岩质滑坡涌浪爬高规律研究.水利水运工程学报(1):111—119.
- 王平义,韩林峰,喻涛,等,2016.滑坡涌浪对高桩码头船舶

- 撞击力的影响. 哈尔滨工程大学学报, 37(6): 878—884.
- 王珊珊, 童立强, 2016. 基于河谷横剖面形态特征的滑坡体堵江易发性评价研究. 地理与地理信息科学, 32(5): 97—102, 109.
- 王焘, 肖明砾, 罗渝, 2021. 基于PFC数值试验的滑坡堵江临界方量计算. 水电能源科学, 39(8): 157—160.
- 王悦, 曹颖, 许方党, 等, 2024. 考虑非滑坡样本选取和集成机器学习方法的水库滑坡易发性预测. 地球科学, 49(5): 1619—1635.
- 吴昊, 年廷凯, 单冶钢, 2023. 滑坡堵江成坝的形成演进机制及危险性预测方法研究进展. 岩石力学与工程学报, 42(增刊1): 3192—3205.
- 徐凡献, 2020. 一种滑坡堰塞坝稳定性的快速评估模型. 自然灾害学报, 29(2): 54—63.
- 徐文杰, 2012. 滑坡涌浪影响因素研究. 工程地质学报, 20(4): 491—507.
- 徐文杰, 2023. 库岸滑坡涌浪链生灾害动力学研究进展. 工程地质学报, 31(6): 1929—1940.
- 薛强, 董英, 张茂省, 等, 2025. 地质灾害风险精细化识别、核查及防控模式探讨. 西北地质, 58(2): 66—79.
- 杨华阳, 许向宁, 蒋涛, 等, 2025. 考虑多因素的重大滑坡堵江灾害链危险性判别方法. 水利水电快报, 46(5): 27—33.
- 杨玲, 王环玲, 徐卫亚, 等, 2025. 滑坡圆弧滑面等效压脚方量及压脚断面设计研究. 工程力学, 42(2): 108—117.
- 杨明钰, 陈红旗, 祁小博, 等, 2023. 基于可靠度理论的地震滑坡运动距离预测模型. 中国地质调查, 10(3): 102—109.
- 叶润青, 李士焱, 郭飞, 等, 2021. 基于RS和GIS的三峡库区滑坡易发程度与土地利用变化的关系研究. 工程地质学报, 29(3): 724—733.
- 殷坤龙, 杜娟, 汪洋, 2008. 清江水布垭库区大堰塘滑坡涌浪分析. 岩土力学, 29(12): 3266—3270.
- 殷坤龙, 张宇, 汪洋, 2022. 水库滑坡涌浪风险研究现状和灾害链风险管控实践. 地质科技通报, 41(2): 1—12.
- 殷跃平, 2008. 汶川八级地震地质灾害研究. 工程地质学报, 16(4): 433—444.
- 殷跃平, 李滨, 张田田, 等, 2021. 印度查莫利“2·7”冰岩山崩堵江溃决洪水灾害链研究. 中国地质灾害与防治学报, 32(3): 1—8.
- 余瀚, 王静爱, 柴玫, 等, 2014. 灾害链灾情累积放大研究方法进展. 地理科学进展, 33(11): 1498—1511.
- 张勤, 赵超英, 陈雪蓉, 2022. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势. 测绘学报, 51(6): 885—896.
- 张全, 黄波林, 郑嘉豪, 等, 2021. 柱状危岩体压溃式崩塌产生涌浪预测分析. 岩土力学, 42(10): 2845—2854.
- 张宇, 2022. 三峡库区巫峡段滑坡涌浪灾害风险分析研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 张雨春, 2024. 基于智能算法的土石坝溃坝影响因素耦合分析及风险评估研究(硕士学位论文). 西安: 西安理工大学.
- 赵通, 张双成, 何晓宁, 等, 2024. 改进的DeepLabV³⁺模型用于震后高分遥感影像滑坡识别. 遥感学报, 28(9): 2293—2305.
- 钟敦伦, 谢洪, 韦方强, 等, 2013. 论山地灾害链. 山地学报, 31(3): 314—326.
- 钟启明, 吴昊, 单熠博, 等, 2024. 基于物质点法的白格滑坡堰塞坝形成过程数值模拟. 人民长江, 55(4): 25—31, 43.
- 周家文, 陈明亮, 李海波, 等, 2019. 水动力型滑坡形成运动机理与防控减灾技术. 工程地质学报, 27(5): 1131—1145.
- 周家文, 陈明亮, 瞿靖昆, 等, 2023. 水库滑坡灾害致灾机理及防控技术与展望. 工程科学与技术, 55(1): 110—128.
- 朱兴华, 彭建兵, 同霄, 等, 2017. 黄土地区地质灾害链研究初探. 工程地质学报, 25(1): 117—122.