https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.293

西南山区泥石流防护工程结构与植生环境破坏机制浅析

石 豪[1],曾志雄[1*],董志浩[1],吴 帆[2],王 涛[1],刘珂孜[1],刘云峰[1],廖徐冉[1],唐朝生[1]

1. 南京大学地球工程与科学学院,江苏南京 210023
2. 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所,山地自然灾害与工程安全重点实验室,四川成都 610299

摘 要: 西南山区地质条件复杂,降雨量大且集中,泥石流灾害多发频发.虽然自20世纪以来已逐步构建体系化的防护系统,然而在极端天气事件增多和人类工程活动加剧的背景下防护工程面临严峻的挑战.为了阐明泥石流作用下"工程-生态"系统的协同破坏机制,通过对多处泥石流沟防护工程及植生环境进行了实地考察与取样测试,系统分析并总结了不同防护工程结构破坏机制,阐明了植生环境失效机理.基于现场实地调查与典型案例的综合分析,发现拦挡坝和排导槽等防护工程的破坏3种模式:受大质量泥石流冲击造成的结构断裂、细沙砾石长期磨蚀导致的表层骨料外露,以及基础被水流淘蚀引发的整体失稳.而泥石流对植被的作用包括直接与间接影响.直接作用主要是冲击造成的茎干断裂、拔出、表皮磨损,以及掩埋导致的根系衰竭与光合受阻;间接作用则源于堆积体破坏土壤结构、侵蚀引起养分流失,从而抑制种子萌发,导致植被退化.而且硬质工程可能加剧局部生态退化,而植被恢复则可有效增强工程结构的长期稳定性.基于上述机制,提出了"生态-工程"协同的泥石流防护工程设计原则,及"监测-模拟-评估-预警"智能防控框架.研究成果有望为西南山区泥石流的韧性防护与生态化治理提供理论依据和系统性技术路径,提升区域综合防灾能力,保障生命财产与生态安全.

关键词: 西南山区;泥石流;防护工程结构;植生环境;破坏模式;机制分析;工程地质.

中图分类号: P642.22 **文章编号:** 1000-2383(2026)10-4045-12 **收稿日期:** 2025-10-16

Damage Mechanisms of Debris Flow to Protection Structures and Vegetation in Mountainous Areas of Southwest China

Shi Hao[1], Zeng Zhixiong[1*], Dong Zhihao[1], Wu Fan[2], Wang Tao[1], Liu Kezi[1], Liu Yunfeng[1], Liao Xuran[1], Tang Chaosheng[1]

1. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*
2. *Key Laboratory of Mountain Hazards and Engineering Resilience, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu* 610299, *China*

Abstract: The southwestern mountainous region of China is characterized by complex geological conditions, and heavy and concentrated rainfall, leading to frequent debris flow disasters. Although a systematic protection framework has been developed since the last century, it now faces severe challenges due to increasing extreme weather events and intensive human engineering activities. This study aims to clarify the synergistic damage mechanisms of the "engineering-ecology" system under debris flow

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2024YFC3012703);国家自然科学基金青年基金项目(No. 42407278).

作者简介: 石豪(2003-),男,硕士研究生,主要从事地质灾害防治与风险控制方面的研究工作.ORCID:0009-0000-1142-0420. E-mail: 502025290065@smail.nju.edu.cn

* **通讯作者:** 曾志雄(1990-),男,博士,研究员,主要从事工程地质灾害与风险防控方面的研究. E-mail: zhixiongzeng@nju.edu.cn

引用格式: 石豪,曾志雄,董志浩,吴帆,王涛,刘珂孜,刘云峰,廖徐冉,唐朝生,2026.西南山区泥石流防护工程结构与植生环境破坏机制浅析.地球科学,51(10):4045-4056.

Citation: Shi Hao, Zeng Zhixiong, Dong Zhihao, Wu Fan, Wang Tao, Liu Kezi, Liu Yunfeng, Liao Xuran, Tang Chaosheng, 2026. Damage Mechanisms of Debris Flow to Protection Structures and Vegetation in Mountainous Areas of Southwest China. *Earth Science*, 51(10): 4045-4056.

impacts. Through field investigations and sample testing of multiple debris flow gullies and their vegetation environments, it systematically analyzed and summarized the failure mechanisms of various protection structures and elucidated the pathways of vegetation degradation. The field surveys and case study analyses reveal three primary failure modes for check dams and drainage channels: structural fracture from the impact of massive debris flows, surface abrasion and aggregate exposure from prolonged scouring by sediments, and overall instability due to foundation scour by water flow. The effects on vegetation are categorized into direct and indirect impacts. Direct impacts include stem breakage, uprooting and bark abrasion from the debris flow impact, and root asphyxiation and photosynthesis disruption from burial. Indirect impacts arise from the destruction of soil structure by deposits and nutrient loss from erosion, which inhibit seed germination and lead to vegetation degradation. Furthermore, the rigid structural measures may exacerbate local ecological degradation, whereas vegetation restoration can effectively enhance the long-term stability of engineering structures. Based on the above mechanisms, this study proposes specific principles for "ecology-engineering" design and presents an intelligent prevention and control framework integrating multi-source monitoring data and numerical simulation. The findings are expected to provide a theoretical basis and a systematic technical approach for resilient protection and ecological management of debris flows in the southwestern mountains, ultimately improving regional comprehensive disaster prevention capabilities and safeguarding human life, property, and ecological security.

Key words: southwestern mountainous region of China; debris flow; engineering structure; vegetation environment; damage pattern; mechanism analysis; engineering geology.

0 引言

川西、滇北、藏东南山区地处青藏高原向第二级地貌单元过渡带,是我国乃至全世界地质灾害发育最密集、活动最频繁、危害最严重的地区之一(孟晖等,2021).西南山区位于多板块挤压碰撞带,新构造运动活跃,持续地震活动破坏山体诱发大规模崩滑(刘传正和陈春利,2020;邬凯等,2025),使得山坡与沟谷中赋存了海量松散固体物源,为泥石流形成储备了充足物源.同时,山区城镇建设,交通干线铺设、矿山开采及伐木垦殖等强烈的人类工程活动,进一步破坏了地表植被与岩土结构的稳定性,不仅直接贡献了大量人工物源,还改变了天然沟道的水文路径与汇流条件,显著加剧了泥石流的活动频率与规模(Apon *et al.*,2024;Zhang *et al.*,2024).该区域地形高差巨大,为泥石流运动提供了强大势能条件(丁俊等,2004;万石云等,2013),泥石流冲出沟口后堵塞主河形成堰塞湖,一旦溃决所引发的突发性溃决洪水将沿河谷造成远距离、毁灭性二次灾害(冯玉涛和肖盛燮,2009;刘传正和王建新,2024).近年来,全球性气候变化导致该地区极端降雨事件频次与强度显著增加,显著降低泥石流启动门槛(唐川等,2005;Chen,2016).随着城镇、交通干线、能源设施不断向山区河谷与坡脚延伸,巨灾风险持续加剧(谢雨岑等,2025),该区域泥石流活动呈现高频发、强链生、巨灾化特征(黄海和龚诚,2024;张波等,2026),传统单一灾种防控已难以应对,亟需向全链条系统性防治转变.融合地球观测、现场监测、数值模拟与人工智能,服务泥石流动态风险评估与控制实践,统筹拦挡坝、排导槽、停淤场工程治理与物源区生态修复,守护人民群众的生命财产安全和国家重大工程战略的安全运行.

过去几十年,西南山区为抵御严峻的泥石流威胁,已逐步构建起一套防治工程体系,深度融合泥石流形成运动机理与沟道地形特征进行空间配置.在上游物源区布设重力坝、格栅坝与缝隙坝等拦挡工程,有效拦蓄粗大固体物源,削减峰值流量与规模(马东涛等,1997;石振明等,2022).在中下游流通与堆积区,建设排导槽、渡槽等排导工程,凭借坚固结构与精准纵坡调控流向,将泥石流安全输移至主河或停淤场,确保村镇、交通干线等关键设施免受冲击(石振明等,2022).同时,全流域范围内广泛构建谷坊、护岸、挡土墙等固坡稳沟工程,用于边坡加固与物源稳定,从源头控制松散物质补给(巫贵秋等,2025).该工程体系在多次重大泥石流事件中成效卓著,有效抵御常规规模灾害,显著减轻人员伤亡与经济损耗(Zheng *et al.*,2025).然而,随着近年来泥石流规模与强度加剧,这种以"硬防护"为主导的体系正面临前所未有的挑战(Yang *et al.*,2024;Ma *et al.*,2025).张文涛等(2021)和雷宏峰等(2025)调查发现极端气候与强震活动使得高频、高能、超常规模的极端泥石流频发,冲击强度屡屡突破既有工程设防标准,在超限荷载作用下,坝体基础遭受剧烈淘刷致整体失稳,主体工程结构破坏,凸显出现有工程体系在应对极端环境的韧性不足.

除了工程防护模式,生态修复理念正被系统整合与积极推广,治理策略由单纯“硬防护”向追求长效稳定的“生态－工程”综合模式转变(祁生文等,2004).由于西南山区海拔高、地形陡峭、坡度大,成土过程缓慢,土层普遍浅薄贫瘠,持水保肥能力弱,生态系统结构简单,抗干扰能力低,环境容量有限.原生植被一旦因自然或人为因素破坏,系统平衡即被打破,水土流失急剧加剧,生态系统迅速退化(赵磊磊等,2025;刘世梁等,2025).在集中强降雨作用下,这些裸露面不仅成为水土流失的主要策源地,其持续风化剥蚀、失稳滑塌不断产生新的松散固体物质,为新的泥石流灾害提供丰富物源(常鸣等,2019),形成“滑坡泥石流－植生环境破坏－水土流失－物源增加－泥石流加剧－再破坏”的恶性循环.因此,明确植生环境的失效机制,开展植生环境修复实践,建立长期稳定耐久植生环境系统是当前亟待解决的问题.而且,现阶段关于工程结构和植生环境在泥石流灾害链中的协同破坏机制与双向交互作用尚缺乏系统性研究,“生态－工程”协同治理模式缺乏坚实的理论基石与精准的设计指导.

基于此,本文针对西南山区典型泥石流灾害点进行了系统调查,分析泥石流成灾特征,调研泥石流作用下防护工程破坏特征,并对泥石流影响区土壤质量进行取样测试,实现防护工程结构破坏和植生环境失效模式科学分类,系统阐明工程结构破坏机理及植生环境的失效机制.所揭示破坏模式为下阶段利用人工智能技术(如深度学习图像识别)开展大范围的工程损害智能判识与快速评估奠定了坚实的分类学基础.研究成果有助于提升该地区泥石流的防治能力与治理效果,更有效地保障人民群众的生命财产安全与生态安全.

1　西南山区典型泥石流点调研与测试

1.1　典型泥石流灾害点调查

本文对四川12处典型滑坡泥石流灾害点进行系统调查,包括四川南部宜宾筠连县,西北部阿坝州小金县海子沟、汶川县七盘沟,甘孜州丹巴县沈足沟、邛山沟、南街沟、梅龙沟、金川县寨子沟、沙尔沟、八步里沟、石家沟、以及德阳绵竹市文家沟(图1).

典型滑坡泥石流灾害点地质条件如表1所示.宜宾筠连县位于四川盆地南缘向云贵高原过渡地带,受多期构造运动影响,岩层破碎,2025年2月8日沐爱镇金坪村发生以块石为主、方量约10万 m^3 的滑坡泥石流,坡度高达40°～60°,滑体厚10～20 m,宽约100 m,造成大量房屋掩埋和人员被困.阿坝州地处岷江、大渡河和青衣江水系分水岭,地质活动强烈,南端小金县海子沟落差大,高山水源和冰雪融水丰富,2024年7月19日发生泥石流,造成房屋、道路、土地、桥梁受损,汶川县七盘沟地形陡峻,物源丰富,2013年发生大规模泥石流,涌入岷江形成堰塞湖.甘孜州东部丹巴县地处青藏高原东南缘,水系发达,区内沈足沟于2025年7月发生泥石流,冲出物源20余万 m^3,邛山沟2003年发生特大泥石流,摧毁大量土地和居住区,梅龙沟2020年发生泥石流,引发多起次生灾害.阿坝州西南部金川县属高山峡谷地貌,八步里沟为强烈下切沟谷,物源储量高达210万 m^3/km^2,石家沟流域面积42.79 km^2,曾发生两次大规模泥石流.德阳绵竹市清平镇文家沟物源汇集,沟谷深切,纵坡大,2010年8月13日发生泥石流,造成7人死亡、5人失踪.

1.2　土壤质量测试与评价

土壤作为植被生长的基础介质,其结构破坏与养分流失不仅直接导致植生环境退化,还可能通过削弱根系固土能力,间接加剧边坡失稳与物源补给,进而影响防护工程的长期稳定性.在对典型泥石流灾害点的工程结构破坏模式进行系统调查后,为进一步揭示泥石流对植生环境的破坏机制及其对工程稳定性的影响,选取多个典型泥石流沟的影响区与未影响区进行土壤质量测试.本文选择海子沟、沈足沟、邛山沟、梅龙沟、八步里沟典型泥石流影响区内作为处理样地,影响区外作为对照样地,通过测定不同泥石流灾害链影响区内外土壤理化因子(共9种指标),并利用土壤肥力质量综合指数法对土壤肥力质量进行研究.按照五点取样法采集各样地0～20 cm土壤样品(去除土壤表层杂物)带回实验室,一部分采集的鲜土用于测定土壤物理性质,另一部分鲜土自然风干分别过2 mm、0.149 mm筛后装袋备用.

采用烘干法测定土壤含水率(SMC),采用酸度计法pH值,采用环刀法测定容重(BD),采用重铬酸钾氧化－外加热法测定有机碳(TOC),采用半微量－凯式法测定全氮(TN),采用碱熔－钼锑抗比色法测定全磷(TP),采用碱熔－原子吸收分光光度法(AA7002原子吸收分光光度计)测定全钾(TK),采用双酸浸提－钼锑抗比色法测定有效磷(AP),采

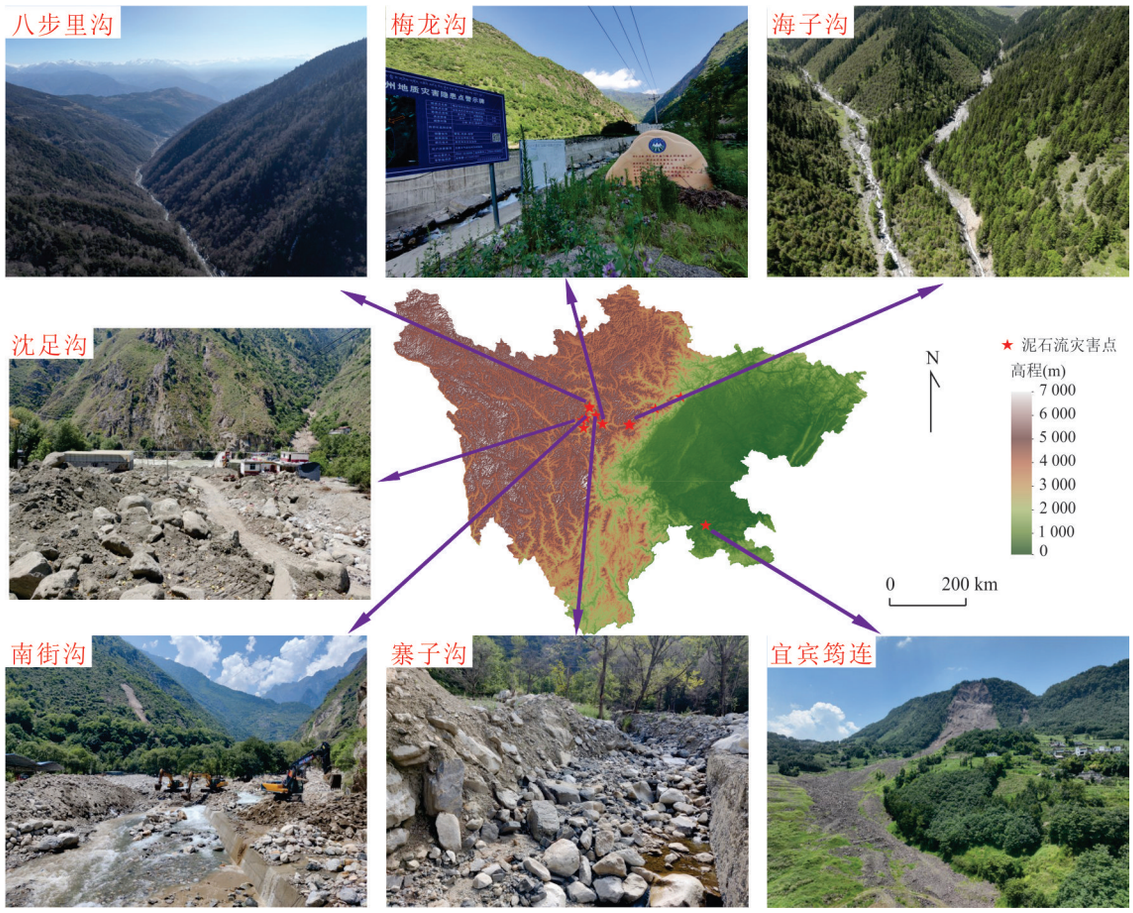

图 1 泥石流沟实地调查空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of debris flow gullies based on field survey

表 1 典型泥石流灾害点地质条件

Table 1 Geological conditions of typical debris flow hazard sites

地点	地质特征	地貌特征	物源条件	泥石流事件
宜宾筠连县金坪村	四川盆地南缘向云贵高原过渡带，多期构造活动致岩层破碎	“V”型冲沟，坡度高达40°～60°	块石为主，滑体厚10～20 m，宽约100 m，方量10万余m^3	2025年2月8日金坪村发生滑坡泥石流，造成房屋掩埋和人员被困
小金县海子沟	岷江、大渡河、青衣江水系分水岭，地质活动强烈	地势落差大，典型“龙抬头”沟谷	高山水源与冰雪融水补充，势能充足	2024年7月19日发生泥石流，造成房屋、道路、土地、桥梁受损
汶川县七盘沟	阿坝州东南部，地质作用强烈	主沟长15 km，11条支沟，叶脉状水网，地形陡峻	降水充沛，震后松散物源丰富	七盘沟2013年爆发大规模泥石流，涌入岷江形成堰塞湖
丹巴县沈足沟、邛山沟、梅龙沟	青藏高原东南缘，水系发达	地势西南高东南低，峡谷深切	物源丰富，水文条件复杂	沈足沟2025年7月发生泥石流，冲出20余万m^3；邛山沟2003年发生百年一遇泥石流；梅龙沟2020年发生泥石流，引发多起次生灾害
金川县寨子沟、沙尔沟、八步里沟、石家沟	大渡河上游，高山峡谷地貌，边坡稳定性差	主沟“U”型，支沟“V”型，强烈下切沟谷	物源丰富，类型多样	八步里沟物源储量210万m^3/km^2；石家沟1982和1992年发生两次大规模泥石流
绵竹市清平镇	地震导致山体破裂，岩石破碎	沟谷深切，纵坡大，上游瓢形汇水区，中部狭窄流通区	水源和松散固体物质丰富	2010年8月13日发生泥石流，造成7人死亡、5人失踪

用乙酸铵浸提－原子吸收分光光度法(AA7002原子吸收分光光度计)速效钾(AK),采用碱解扩散法测定碱解氮(AN).具体测定方法见严昶升(1998)和杜锟(2015),每个样品各进行3次测试,计算值为多点测试的平均值.

本文采用土壤综合指数进行土壤质量的综合评价.土壤因子变化具有连续性质,需要对各因子归一化后进行评价.对于土壤容重,采用降型分布函数归一化,而对于土壤含水量、及各项理化因子,采用升型分布函数.升型分布函数和降型分布函数的计算公式如下:

$$Q(x_i)=(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min}), \quad (1)$$

$$Q(x_i)=(x_{i\max}-x_{ij})/(x_{i\max}-x_{i\min}). \quad (2)$$

式中:$Q(x_i)$表示各土壤因子的隶属度值,x_{ij}表示各因子值,$x_{i\max}$和$x_{i\min}$分别表示第i项因子中的最大值和最小值.

根据加乘法则对各个土壤质量的指标值采用乘法进行合成,计算各土壤质量的综合指标值QI的计算公式如下:

$$W_i=\frac{\text{Component Capacity}_i}{\sum_{i=1}^{n}(\text{Component Capacity}_i)}, \quad (3)$$

$$QI=\sum_{i=1}^{n}W_i\times Q(x_i), \quad (4)$$

式中:W_i表示各因子的权重向量,$Q(x_i)$表示各因子的隶属度值,$\text{Component Capacity}_i$是第$i$个土壤质量因子的因子符合量.$QI$的计算采用容重、有机质、全氮、全磷、全钾、有效磷、速效钾、碱解氮.各土壤因子权重参照刘世梁等(2003)基于主成分分析所确定的权重值,分别取为容重(0.14)、有机质(0.13)、全氮(0.13)、全磷(0.1)、全钾(0.12)、有效磷(0.13)、速效钾(0.12)和碱解氮(0.13).参考刘世梁等(2003)的研究成果,QI值划分为3个肥力等级:高肥力(>70%)、中肥力(30%~70%)、低肥力(<30%),以更直观地反映泥石流影响区与未影响区的土壤肥力状况.

2　防护工程结构破坏模式与特征

通过12个泥石流灾害点防护工程结构进行调查,根据泥石流发生后工程结构破坏特点,可以分为冲击损伤、剪切磨蚀、冲刷掏空三类.泥石流发生后高速度、大质量的固液混合体会对结构物产生瞬时、高强度动荷载冲击(王东坡等,2024),剧烈动力过程具有峰值高、历时短、作用频繁的特点,对结构的强度和稳定性构成极致考验.与剧烈的冲击破坏不同,剪切磨蚀破坏是相对"温和"但持续渐进性破坏模式,高浓度泥石流体在流经工程结构表面时,大量细沙砾石粗大卵石固体颗粒对结构表面产生的机械磨损.冲刷掏空破坏是持续水流和大量泥砂的流体对结构物基础及周边地基进行反复的、渐进性的侵蚀与剥离"釜底抽薪",导致上部结构失去有效支承而失稳破坏.

2.1　冲击损伤破坏

西南地区泥石流防护工程结构常见冲击破坏模式,通过实地调查可主要归纳为两类,并通过典型现象直观呈现(图2),主要有:(1)排导槽进出口断裂.如图2a所示,排导槽进出口段作为结构刚度变化过渡区,最易产生应力集中,高速泥石流在此发生剧烈碰撞和流向改变,产生巨大的冲击力和离心力,导致底板翘起、侧墙剪断或整体从主体结构上断裂分离;(2)刚性结构裂缝扩展,在巨大冲击下混凝土结构原有微裂缝会扩展贯通形成可见的宏观裂缝,如图2b中拦挡坝体上所清晰呈现的贯穿性裂缝.同时,表面混凝土在砾石、块石的反复高速撞击下,层层剥落骨料外露,钢筋保护层丧失加速内部钢筋的锈蚀,最终导致结构整体承载能力彻底失效.

防护工程结构冲击作用过程可以分为动荷载冲击,集中荷载点作用和多次疲劳冲击.当高容重、富含巨大块石的黏性泥石流以极高速度冲击建筑物,瞬间产生极大的压强,冲击力大小与流速平方成正比,巨大的动荷载直接作用于结构面,导致结构发生变形、开裂乃至失稳.同时,泥石流体中携带的特大漂石在高速运动流体裹挟下,如同出膛的炮弹对结构形成集中的点冲击,产生巨大压强直接撞碎混凝土表面,导致远大于流体均匀面冲击的局部破损.此外,山区泥石流活动频繁,工程结构会遭受多年多次重复冲击,在这种反复的动力荷载作用下,材料内部会产生微裂纹并不断扩展,即使单次冲击未造成致命破坏但累积的疲劳损伤会显著降低结构的强度和刚度,最终在某次事件中发生脆性破坏.

2.2　剪切磨蚀破坏

西南山区防护工程结构的剪切磨蚀破坏是应该渐进但危害巨大的过程,其典型特征如图3所示,主要包括:(1)起皮与剥落,在泥石流压力和颗粒的反复作用下,骨料可能变得松动并被"拔出",或内部微裂纹扩展使得水泥砂浆成片地起皮、剥落(图

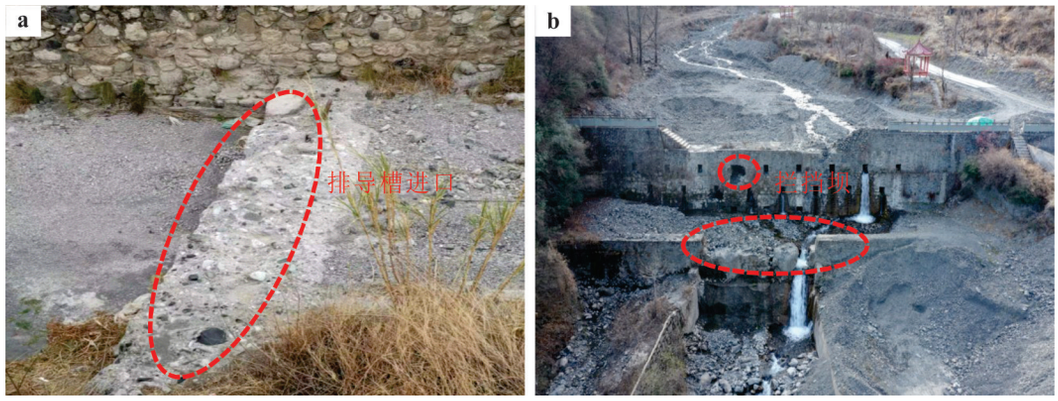

图 2 防护工程冲击损伤破坏特征

Fig. 2 Impact damage characteristics of engineering structures

a. 排导槽进出口断裂;b. 拦挡坝裂缝扩展

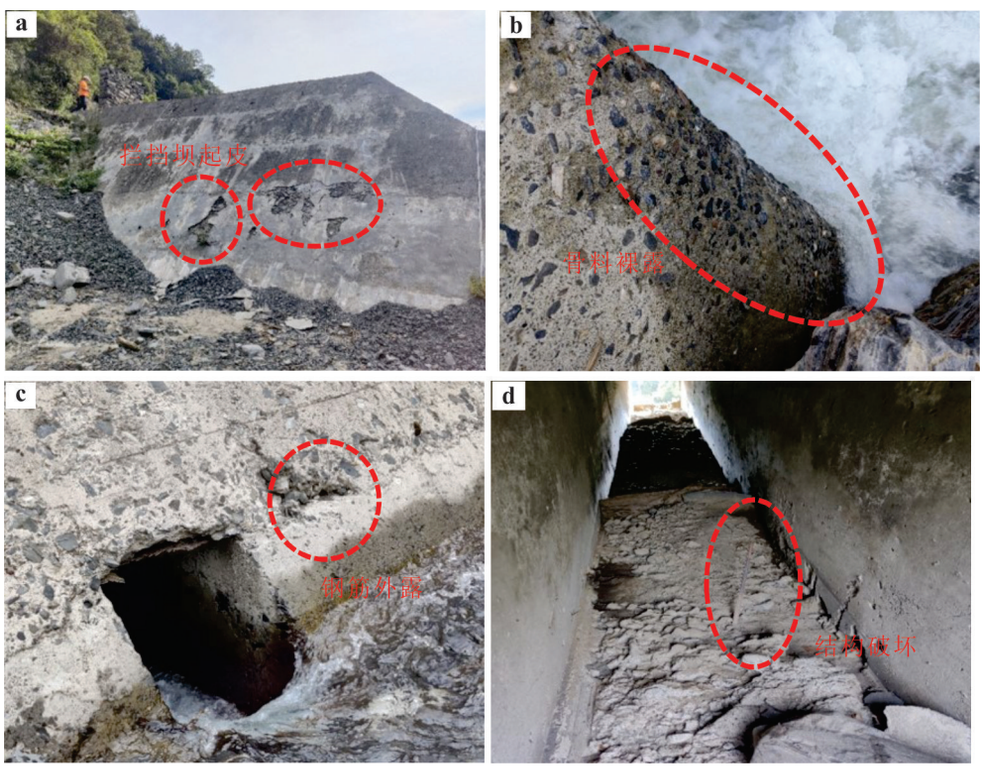

图 3 防护工程结构剪切磨蚀破坏

Fig. 3 Shear-abrasion damage of engineering structures

a. 起皮与剥落;b. 粗骨料暴露;c 钢筋外露;d. 结构破坏

3a);(2)表面粗糙化与骨料裸露,随着水泥砂浆保护层逐渐被磨去,内部的粗骨料(石子)清晰地凸显出来,平整混凝土表面变得异常粗糙,图 3b 正是这一阶段的典型写照;(3)截面尺寸持续减薄,长期的、大规模的磨蚀使排导槽底板有效厚度不断减小,显著削弱结构刚度及抗弯、抗剪承载力,同时保护层被磨蚀殆尽内部钢筋直接暴露发生锈蚀(图 3c),最终导致整体结构性破坏(图 3d).

泥石流磨蚀作用过程可以分为磨料磨蚀和侵蚀磨损.当泥石流以较高速度流经排导槽底板、侧壁或坝体表面时,由于流体层与结构表面巨大的速度梯度,悬浮和跃移在流体中的大量细小颗粒对混凝土表面进行持续的刮削、研磨,优先磨蚀掉较软的水泥砂浆,使坚硬的粗骨料逐渐暴露出来.同时,磨蚀过程中,泥石流体中砾石、卵石等较粗颗粒会不断侵蚀结构表面,引发微观层面的脆性断裂或塑



图 4　防护工程结构冲刷掏空破坏

Fig. 4　Scour-induced hollowing damage of engineering structures

a. 排导槽基底局部悬空;b. 拦挡坝基底冲蚀;c. 护岸坡脚失稳

性变形,一些带有棱角的尖锐颗粒会在剪切力作用下剥落,加剧结构材料流失.

2.3　冲刷掏空破坏

冲刷掏空破坏直接危及防护工程的基础稳定,其破坏特征如图 4 所示:(1)排导槽基底局部悬空,如图 4a 所示,槽体下方地基遭受持续性淘刷,部分区段基底与下部地基脱离,形成明显空洞与支承缺失,槽体在自重与上部荷载共同作用下产生显著纵向弯曲裂缝,发生结构性折断;(2)拦挡坝基底冲蚀失稳,一旦坝趾基础遭掏空(图 4b),不仅有效抗滑面积大幅削减,更形成潜在临空面,导致坝体在水压力与自重分力耦合作用下发生向下游的整体滑移或倾覆;(3)护岸与挡墙坡脚失稳,护岸结构前缘或坡脚地基被淘空后(图 4c),墙后土压力显著增大且分布失衡,墙身发生前倾位移,引发墙体倾覆或连续性坍塌.

泥石流冲刷作用分为地基渐次侵蚀、局部淘刷、支承失效与应力重分布.泥石流携带大量泥砂,流经坝基、排导槽基础或护岸坡脚时,渗入并冲刷地基土壤,将细颗粒不断带走,在地基中形成初始的渗流通道或空腔.而且,在结构物与地基的连接处(如坝趾、槽底边缘)、地形突变处或基础存在局部缺陷的区域,水流极易形成漩涡,漩涡中心压力低、流速高,产生强大的抽吸效应像“水刀”一样,能快速剥离、冲刷带走地基材料,扩大已有的空腔,形成指向结构物下方的冲刷坑.随着基础下方的土体被不断掏空,结构物底部原本均匀分布的支承力会变得高度不均,导致结构物的全部荷载被迫重新分布,集中压在剩余的有效支承面上,使其承受远超设计值的压应力和剪应力,同时结构自身内部也会产生巨大的附加弯矩和扭矩,最终引发开裂、不均匀沉降乃至整体性的倾覆或滑移.值得说明是,工程措施在实现防护功能的同时可能改变局部过程,引发新的失稳风险.以拦挡坝为例,其在有效拦截粗大固体物源后,常导致下游水体含沙量骤减,形成“清水下泄”效应(Yuan *et al.*, 2022; Cui *et al.*, 2024).这种高能、少沙水流对下游沟床及边坡的冲刷侵蚀能力显著增强,淘蚀已稳定的岸坡坡脚,破坏原有植被的立地条件.

3　植生环境失效模式与机理

除了工程结构破坏,泥石流发生后会直接或间接影响物源区、流通区、堆积区的植生环境.其中,直接影响包括物理冲击破坏和淹没掩埋破坏,而间接破坏主要通过破坏堆积区土壤结构和削弱物源区土壤养分.物理冲击破坏是泥石流体巨大动能与冲击力对流域植生系统最为直接和剧烈的机械性摧毁,其强度与流速平方、容重成正比.淹没掩埋破坏则并非依赖瞬时冲击,而是高浓度泥石流体势能减小而停积在流通区后形成的深厚覆盖层,从物理隔绝与生物化学两个维度剥夺植被生存基础,导致植生群落崩溃与生态系统功能衰竭.土壤结构破坏则是泥石流停积后一项深远且顽固的后遗症,对其覆盖区的原始土壤剖面和孔隙系统进行劣化重构,使得土壤物理性质恶化,扼杀土壤生态功能.物源区土壤养分流失是泥石流灾害对表层土壤的物理剥离,对区域植生系统历经漫长岁月才积累形成的“营养库”和“种子库”进行的一场毁灭性扫荡.

3.1　物理冲击破坏

西南地区泥石流发生后,植生环境冲击破坏特征表现为:(1)乔木基部横向断裂(图 5a),林木成片倒伏,断口参差不齐,残留树桩可见冲击凹坑与撕裂痕迹;(2)浅根植被整体消失,灌草群落被彻底剥离,地表残留拔根坑洞与裸露基质(图 5b);(3)表皮结构磨蚀,幸存树木迎流面树皮大面积脱落,木质部外露,树干密布刻划痕(图 5c),冠层枝叶殆尽,呈



图 5 植被物理冲击破坏

Fig. 5 Physical impact damage to vegetation

a. 乔木脆性断裂;b. 连根拔起;c. 表皮结构磨蚀



图 6 植被淹没覆盖破坏

Fig. 6 Submergence-induced damage to vegetation

a. 物理隔绝与根系窒息;b. 淹没掩埋光合作用中断;c. 系统功能瘫痪

现“白骨化”景观.

泥石流对植生环境物理冲击破坏主要受固体颗粒粒径控制,细颗粒导致磨蚀,巨型漂石则引发集中点荷载冲击.其力学作用过程可分为剪切与弯矩破坏、拔根破坏、表面磨蚀与刻蚀损伤.高速泥石流冲击乔木时,树干迎流面承受极高动压,背流面因绕流产生涡旋负压,形成巨大弯矩与剪切力作用于根系固定点上方,一旦超过材料极限强度,树干瞬间发生脆性断裂,表现为齐根或中段折断.当植被在流体正面冲击与冠层摩擦产生的强大拉拽力作用下,根系—土壤复合体抗拉强度被超越,植株被整体抽离,卷入洪流(Liu *et al.*,2024).此外,泥石流中高速运动的沙石颗粒对植被表面进行持续击打与磨削,造成树皮破损、枝叶剥离,形成层与输导组织暴露,不仅直接损伤植株更为病虫害入侵与生理衰退提供通道.

3.2 淹没掩埋破坏

泥石流淹没掩埋植生系统,植生生态响应表现为:(1)土壤结构劣化与根系功能衰竭,堆积体呈现板结化、粘质化,透气性与渗透性急剧下降,根系窒息(图 6a);(2)光合作用中断与碳饥饿,掩埋植被冠层受损(图 6b),光合产能不足,呈现叶片黄化、枝枯梢秃症状,最终碳耗尽死亡;(3)系统功能瘫痪,被掩埋植被在厌氧环境中缓慢分解,土壤生物活性趋零,生态系统服务功能完全崩溃,形成难以自然恢复的退化区域(图 6c).

淹没掩埋破坏呈现多进程耦合链式特点:物理隔绝与根系窒息、厌氧环境与生化毒害、能量代谢途径中断.泥石流堆积后细颗粒堵塞土壤孔隙,形成致密不透气层阻隔大气—土壤气体交换,根系耗氧呼吸导致根区环境急剧缺氧迫使植被进行无氧代谢,能量产出效率低下,积累乳酸、乙醇等毒性中间产物,引发根系坏死.持续缺氧促使土壤微生物群落向厌氧菌群演替,代谢产生硫化氢、甲烷、有机酸及还原性金属离子等物质,破坏根系膜结构、抑制酶活性,形成“生化绞杀”效应.同时,植物冠层被固体物质覆盖导致光合作用完全终止,生命活动的能量来源被彻底切断,植被依赖储存养分维持代谢,最终因能量枯竭而死亡.

3.3 堆积区土壤结构破坏

泥石流堆积后,原有土壤生态功能衰竭:(1)孔隙堵塞与功能丧失(图 7a),原本疏松多孔的土壤变得紧实,雨水难以下渗,同时空气无法进入,土壤呼吸作用受阻,二氧化碳等废气积聚,形成厌氧环境;(2)致密不透水层形成,紧实的土层结构阻碍上下水系的连通(图 7b),在上方形成滞水层,使植物根

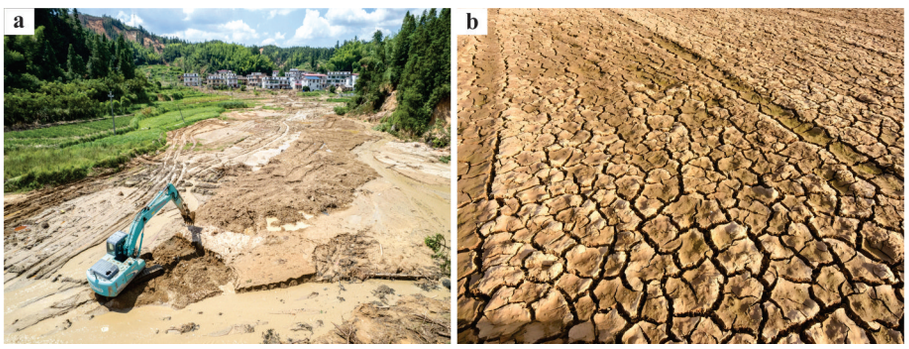

图 7　堆积区土壤结构破坏

Fig. 7　Destruction of soil structure in the debris flow accumulation area

a. 孔隙阻塞;b. 结构板结

表 2　泥石流影响区和未影响区土壤养分含量

Table 2　Soil nutrient contents in debris-flow affected and non-affected areas

取样点		pH	BD (g/cm^3)	TOC (g/kg)	TN (g/kg)	TP (g/kg)	TK (g/kg)	AP (mg/kg)	AK (mg/kg)	AN (mg/kg)
海子沟	影响区	8.66	1.72	6.42	0.39	0.23	17.75	2.73	5.86	38.27
	未影响区	7.32	1.73	9.42	1.28	0.74	12.32	8.23	15.75	111.99
沈足沟	影响区	8.51	1.68	5.15	0.43	0.28	17.46	3.82	5.15	29.91
	未影响区	8.44	1.68	10.05	1.03	0.80	17.08	8.99	12.03	85.18
邛山沟	影响区	8.04	1.74	5.56	0.48	0.25	19.74	2.81	6.12	41.77
	未影响区	7.91	1.78	10.54	1.34	1.00	13.48	8.35	12.35	89.55
梅龙沟	影响区	8.23	1.67	4.41	0.38	0.25	14.72	3.34	6.70	46.63
	未影响区	7.96	1.75	7.93	1.09	0.88	16.23	9.00	11.84	109.34
八步里沟	影响区	8.70	1.66	7.54	0.43	0.30	15.65	2.95	7.45	44.28
	未影响区	8.46	1.65	12.27	1.32	0.69	13.85	10.29	11.87	105.58

系处于水淹缺氧状态,在干旱时下层水分又无法通过毛细作用向上补给;(3)根系发育受阻,地表形成灰白色或浅黄色的坚硬壳层,根系无法穿透坚硬的板结层,影响种子萌芽生根、抗逆性极差.

土壤结构破坏机理源于泥石流物质的独特组成和物理化学过程:细颗粒侵入与孔隙堵塞沉积物分选与致密层形成、物理结皮与化学粘结.泥石流体中富含大量的黏粒和粉砂停积后在重力排水和水分蒸发的过程中,随水分子向下迁移,填充、堵塞土壤中原有的非毛管孔隙,阻碍土壤中空气与水分快速移动通道.同时,在沉积过程中,粗颗粒(沙、砾石)会先沉降,而较细的黏土颗粒会悬浮在水中,最终在表层集中沉降下来,随着水分的蒸发,密集的片状黏土颗粒紧密排列,形成一个连续、不透水、不透气的坚硬壳层.此外,泥石流中的黏土矿物在干湿交替过程中吸水膨胀、失水收缩,加剧了土壤的紧实度,同时携带的化学物质或铁锰氧化物会将周围的颗粒更牢固地粘结在一起,使板结壳层更加坚硬.

3.4　物源区土壤养分流失

通过对海子沟、沈足沟、邛山沟、梅龙沟、八步里沟泥石流影响区和未影响区取样测试,得到泥石流影响区和未影响区土壤理化性质如表 2 所表示.地表在经过泥石流侵蚀后,出露深层颜色浅淡的母质或基岩风化碎屑,有机质含量低,氮、磷、钾等主要养分严重亏缺,碳土壤微生物数量和多样性锐减.由公式(1)~(3)计算得到土壤质量综合指数如图 8 所示.由于大量植被覆盖,根系分泌物、植物残体等促进土壤养分增加,泥石流沈足沟和八步里沟未影响区相较其他取样点土壤肥力高.泥石流在形成和运动过程中,强大的剪切力对整个流域坡面进行刮铲和剥蚀,侵蚀最宝贵的数十厘米厚的表层腐殖质层,同时,泥石流不直接溶解和冲刷走了土壤溶液中植物可直接吸收的速效养分,导致土壤供氮能力断崖式下跌.泥石流发生后土壤质量综合指数急剧降低,特别是海子沟和沈足沟,泥石流发生后质量

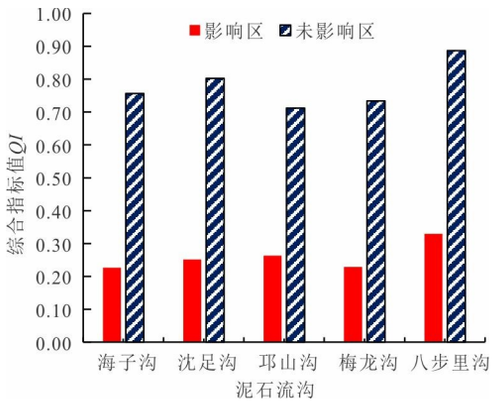

图 8 泥石流影响区和未影响区综合土壤质量指数

Fig. 8 Soil quality index in debris-flow affected and non-affected areas

综合指数降低近 70%，幸存或新萌发的植物幼苗立地于极度贫瘠基质上，生长停滞、叶片失绿、抗逆性极差，大量死亡，使得植被自然恢复演替过程陷入停滞甚至中断．植物根系是固持浅层土体、增强斜坡抗剪强度的关键，植被恢复失败，根系固土能力丧失，裸露松散的物质在降雨入渗和重力作用下，为下一次泥石流活动提供新的物源，形成了泥石流破坏、养分流失与植被消亡、新泥石流的恶性循环．

剖析植生环境失效机制，不仅在于理解其退化过程，更在于发掘植被在灾害防治系统中的积极潜力．科学的植被恢复可为防护工程结构形成有效的正反馈，形成构建了一种“生态－工程”协同范式．例如在拦挡坝体周边、排导槽侧墙回填区等关键力学部位，培育具有发达深根系的乡土灌木，其根系网络能显著提高根－土复合体的抗剪强度，增强工程边坡的抗冲刷能力(Boldrin *et al.*, 2017; Munirwan *et al.*, 2025; 石振明等, 2025)．此外，选育耐淹、耐贫瘠的先锋植物物种，可提升植生系统在灾后扰动中快速自我恢复能力．

4 结论

本研究实地调查了宜宾筠连县、阿坝州小金县、甘孜州丹巴县、金川县以及德阳绵竹市典型泥石流灾害点，厘清了西南山区泥石流形成与运动特征，系统分析总结了泥石流防护工程结构破坏模式，通过取样测试揭示了泥石流发生后植生环境失效机制，主要得到以下结论：

(1)拦挡坝和排导槽等防护工程结构破坏表现为 3 种模式：由瞬时、大质量固液泥石流物冲击损伤引起的结构断裂，由多次泥石流中细沙砾石持续机械磨损引起的表层磨蚀和骨料外露，以及持续水流和泥沙对结构基础及周边土体冲刷侵蚀导致的结构失稳．

(2)泥石流对植生环境的影响分为直接和间接两类．直接作用包括泥石流高速运动冲击造成茎干横向断裂、整体拔出和表皮磨蚀，以及泥石流停积淹没掩埋引起的根系功能衰竭与光合作用中断．而间接作用分为泥石流堆积体对土壤结构破坏以及泥石流侵蚀搬运引起土壤养分流失，影响种子萌芽生根，迫使植被消亡．

(3)工程结构与植生环境具有明显的双向交互作用，防护工程结构的建设可能引发的“清水下泄”生态负效应，而植被恢复可提供的“生物加固”等工程正反馈．

(4)本文阐明的泥石流防护工程结构与植生环境的破坏机制，可以为研发新型补强加固以及植生环境构筑材料提供理论依据，通过工程与生态措施的功能性弥补、空间合理配置，构建刚柔并济的复合防护体系．同时，典型破坏模式为后续构建基于人工智能的视觉识别模型提供了可靠的标准样本，通过天空地协同监测获取实时数据，融合数值模拟－机器学习实现工程损害智能判识与快速评估．

References

Apon, M., Notoka, K., Chang, C. N., et al., 2024. Analysis of an Anthropogenically-Induced Landslide with Emphasis on Geological Precursors. *Results in Earth Sciences*, 2: 100020. https://doi. org/10.1016/j.rines.2024.100020

Boldrin, D., Leung, A. K., Bengough, A. G., 2017. Root Biomechanical Properties during Establishment of Woody Perennials. *Ecological Engineering*, 109: 196－206. https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.05.002

Chang, M., Dou, X. Y., Tang, C., et al., 2019. Hazard Assessment of Typical Debris Flow Induced by Rainfall Intensity. *Earth Science*, 44(8): 2794－2802(in Chinese with English abstract).

Chen, C. Y., 2016. Landslide and Debris Flow Initiated Characteristics after Typhoon Morakot in Taiwan. *Landslides*, 13(1): 153－164. https://doi. org/10.1007/s10346-015-0654-6

Cui, Z. W., Li, P., Wang, T., et al., 2024. Influence of Check Dams on Water and Sediment Processes and Deposition Patterns under Simulated Rainfall Conditions. *Geoderma*, 441: 116758. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116758

Ding, J., Wei, L. W., Lai, S. M., et al., 2004. Urban Geological Hazard and Countermeasures of Control in Southwest of China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 15(S1): 119－122, 146(in Chinese with English abstract).

Du, K., Yan, S. W., Zhang, G. S., et al., 2015. Soil Quality Evolution Characteristics of Debris Flow Waste-Shoal Land in Different Deposit Periods in Jiangjia Gully. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 21(4): 762－769(in Chinese with English abstract).

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).

Huang, H., Gong, C., 2024. Spatial-Temporal Evolution of Geohazard Chain Participated by Glacier and Snow in Zhibai Gully, SE Tibetan Plateau. *Earth Science*, 49(10): 3784－3798(in Chinese with English abstract).

Lei, H. F., Wu, X., Luo, P., 2025. A Study of Enhancing the Protection of Longitudinally Laid Pipelines in Gullies against Mountain Torrents and Debris Flow under Extreme Weather Conditions. *Pipeline Protection*, 2(2): 43－50(in Chinese with English abstract).

Liu, C. Z., Chen, C. L., 2020. Research on the Origins of Geological Disasters in China. *Geological Review*, 66(5): 1334－1348(in Chinese with English abstract).

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, F. C., Qi, S. W., Qi, S. L., et al., 2024. In-Situ Horizontal Extrusion Test of Herbaceous Root-Soil with Different Root Types. *Journal of Earth Science*, 35(3): 918－928. https://doi. org/10.1007/s12583-022-1661-x

Liu, S. L., Fu, B. J., Chen, L. D., et al., 2003. Comparison of Two Quantitative Methods in Assessing Soil Quality in Different Land Uses. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 12(5): 422－426(in Chinese with English abstract).

Liu, S. L., Yang, Z. F., Cui, B. S., et al., 2005. Effects of Road on Landscape and Its Ecological Risk Assessment: A Case Study of Lancangjiang River Valley. *Chinese Journal of Ecology*, 24(8): 897－901(in Chinese with English abstract).

Ma, D. T., Qi, L., Wu, H., 1997. An Approach to Debris Flow Disaster and Its Prevention Countermeasures in Guanjiagou Gully. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 8(4): 94－101(in Chinese with English abstract).

Ma, Y., Asai, M., Su, B., et al., 2025. A Two-Point Three-Phase Resolved Coupling Framework for Modeling Boulder-Laden Debris Flows. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.06.021

Meng, H., Zhang, R. L., Shi, J. S., et al., 2021. Geological Environment Safety Evaluation. *Earth Science*, 46(10): 3764－3776(in Chinese with English abstract).

Munirwan, R. P., Milasafarah, S., Sungkar, M., et al., 2025. Effectiveness of Elephant Grass Roots in Improving Soil Shear Strength for Slope Reinforcement. *Results in Engineering*, 27: 106369. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106369

Qi, S. W., Liu, F. C., Xu, M. Z., et al., 2024. Preliminary Study on Principles and Methods of Ecological Geotechnical Engineering Coordinated Disaster Reduction for Small Watersheds. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 43(2): 1－14(in Chinese with English abstract).

Shi, Z. M., Wu, B., Zheng, H. C., et al., 2022. State of the Art on Prevention and Control Measures and Impact Model for Debris Flow. *Earth Science*, 47(12): 4339－4349(in Chinese with English abstract).

Shi, Z. M., Zhu, X., Liu, M. M., et al., 2025. Research on Shear Resistance of Rooted Soil under Freeze-Thaw Cycles Based on DEM. *Earth Science*, 50(10): 3761－3775 (in Chinese with English abstract).

Tang, C., 2005. Susceptibility Spatial Analysis of Debris Flows in the Nujiang River Basin of Yunnan. *Geographical Research*, 24(2): 178－185, 322(in Chinese with English abstract).

Wan, S. Y., Li, H. H., Hu, J., 2013. Hazard Zoning of Landslide and Debris Flow Disasters in Yunnan Province. *Journal of Catastrophology*, 28(2): 60－64(in Chinese with English abstract).

Wang, D. P., Liao, C. X., Qu, H. N., et al., 2024. Study on Dynamic Response of Debris Flow Impact on Check Dam with Sediments. *Earth Science*, 49(3): 1017－1027 (in Chinese with English abstract).

Wu, G. Q., Xiang, L. Z., Lei, Q. Q., et al., 2025. Risk Assessment of Urban Debris Flow Based on Deformation Analysis: Taking Lijiegou Debris Flow Disaster Chain as an Example. *Science Technology and Engineering*, 25(19): 7963－7977(in Chinese with English abstract).

Wu, K., Yi, X.B., Fu, X.D., et al., 2025. Development, Evolution Characteristics and Disaster Movement Process of Geological Hazards on Mountainous Trunk Highways Under the Lushan Earthquake. *Earth Science*(in Chinese with English abstract)(Online First).

Xie, Y. C., Luo, X. L., Niu, Z. P., et al., 2025. Disaster Damage Characteristics and Causation Analysis of the "7•20" Mountain Torrent and Debris Flow in Hanyuan,

Sichuan. *Journal of Catastrophology*, 40(4): 157－164 (in Chinese with English abstract).

Yan, C.S., 1998. Research Methods of Soil Fertility. Agricultural Press, Beijing (in Chinese).

Yang, C., Tie, Y. B., Zhang, X, Z., et al., 2024. Analysis of Debris Flow Control Effect and Hazard Assessment in Xinqiao Gully, Wenchuan M_s 8.0 Earthquake Area Based on Numerical Simulation. *China Geology*, 7(2): 248－263. https://doi.org/10.31035/cg2023144

Yuan, S. L., Li, Z. B., Chen, L., et al., 2022. Influence of Check Dams on Flood Hydrology across Varying Stages of Their Lifespan in a Highly Erodible Catchment, Loess Plateau of China. *CATENA*, 210: 105864. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105864

Zhang, B., Wang, F. W., Sheng, P., et al., 2026. Research Progress on Influence Patterns of Endogenic and Exogenic Dynamics on Geological Hazards in Southeast Tibet Plateau. *Earth Science*, 51(4): 1264－1286(in Chinese with English abstract).

Zhang, L. L., Zhang, J. Q., Ming, Z. Y., et al., 2024. Effects of Changing Spatial Scale on Debris-Flow Hazard Assessment: A Case Study in the Dadu River Basin, China. *Science of the Total Environment*, 954: 176482. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176482

Zhang, W. T., Liu, J. F., You, Y., et al., 2021. Analysis and Evaluation of the Treatment Effect of the Geotechnical Engineering of Debris Flow: Case of Xingfu Gully in Wolong. *Journal of Catastrophology*, 36(3): 208－214 (in Chinese with English abstract).

Zhao, L. L., Luo, Z. F., Sun, Y. Y., 2025. Ecological Control and Vegetation Restoration on Rocky Desertification in Southwest Karst Area. *Forestry Construction*, 43(1): 62－66(in Chinese with English abstract).

Zheng, H., Ding, M. T., Huang, T., et al., 2025. Benefit Evaluation of Geotechnical Projects for Debris Flow Prevention and Control Based on Projection Pursuit in Wenchuan County, SW China. *Journal of Earth Science*, 36(2): 700－716. https://doi. org/10.1007/s12583-022-1730-1

中文参考文献

常鸣, 窦向阳, 唐川, 等, 2019. 降雨驱动泥石流危险性评价. 地球科学, 44(8): 2794－2802.

丁俊, 魏伦武, 赖绍民, 等, 2004. 我国西南地区城市地质灾害与防治对策. 中国地质灾害与防治学报, 15(S1): 119－122, 146.

杜锟, 严思维, 张广帅, 等, 2015. 蒋家沟泥石流滩地不同堆积时期土壤肥力质量演变特征. 应用与环境生物学报, 21(4): 762－769.

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.

黄海, 龚诚, 2024. 藏东南地区直白沟冰雪型地质灾害链时空演化特征. 地球科学, 49(10): 3784－3798.

雷宏峰, 吴夏, 罗鹏, 2025. 极端天气条件下管道顺沟敷设段山洪泥石流防护提升. 管道保护, 2(2): 43－50.

刘传正, 陈春利, 2020. 中国地质灾害成因分析. 地质论评, 66(5): 1334－1348.

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.

刘世梁, 傅伯杰, 陈利顶, 等, 2003. 两种土壤质量变化的定量评价方法比较. 长江流域资源与环境, 12(5): 422－426.

刘世梁, 杨志峰, 崔保山, 等, 2005. 道路对景观的影响及其生态风险评价: 以澜沧江流域为例. 生态学杂志, 24(8): 897－901.

马东涛, 祁龙, 吴宏, 1997. 关家沟泥石流灾害及其防治对策研究. 中国地质灾害与防治学报, 8(4): 94－101.

孟晖, 张若琳, 石菊松, 等, 2021. 地质环境安全评价. 地球科学, 46(10): 3764－3776.

祁生文, 刘方翠, 徐梦珍, 等, 2024. 小流域生态－岩土协同减灾原理与方法初探. 水力发电学报, 43(2): 1－14.

石振明, 吴彬, 郑鸿超, 等, 2022. 泥石流防治措施与冲击力研究进展. 地球科学, 47(12): 4339－4349.

石振明, 朱鑫, 刘毛毛, 等, 2025. 基于离散元的冻融循环作用下根土复合体抗剪特性研究. 地球科学, 50(10): 3761－3775.

唐川, 2005. 云南怒江流域泥石流敏感性空间分析. 地理研究, 24(2): 178－185, 322.

万石云, 李华宏, 胡娟, 2013. 云南省滑坡泥石流灾害危险区划. 灾害学, 28(2): 60－64.

王东坡, 廖承兴, 瞿华南, 等, 2024. 坝后淤积条件下泥石流冲击拦挡坝动力响应研究. 地球科学, 49(3): 1017－1027.

巫贵秋, 向灵芝, 雷青青, 等, 2025. 基于形变分析的城镇泥石流风险评价: 以立节沟泥石流灾害链为例. 科学技术与工程, 25(19): 7963－7977.

邬凯, 易雪斌, 付晓东, 等, 2025.芦山地震作用下山区干线公路地质灾害发育演化特征及成灾运动过程.地球科学(网络首发).

谢雨岑, 骆晓龙, 牛志攀, 等, 2025. 四川汉源“7•20”山洪泥石流灾损特征及成因分析. 灾害学, 40(4): 157－164.

严昶升, 1998. 土壤肥力研究方法. 北京: 农业出版社.

张波, 汪发武, 盛鹏, 等, 2026. 藏东南地质灾害的内外动力影响模式研究进展. 地球科学, 51(4): 1264－1286.

张文涛, 柳金峰, 游勇, 等, 2021. 泥石流岩土防治工程治理效果分析与评价: 以四川汶川卧龙幸福沟为例. 灾害学, 36(3): 208－214.

赵磊磊, 罗志锋, 孙永玉, 2025. 西南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复. 林业建设, 43(1): 62－66.