https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.095

青藏高原水电工程区泥石流物源演化机理与监测预警技术研究进展

张世殊,杨仲康,李青春

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司,四川成都 610031

摘 要: 青藏高原深切峡谷区的高强度水电开发已成为与构造运动、气候变化并列的重塑地表过程的第三驱动营力,其诱发的灾害链具有极高隐蔽性与突发性,对传统防灾理论构成了严峻挑战.针对这一极端复杂环境,基于一线工程实践与多学科理论演进,系统综述了从物源演化机理到物理预警技术的全链条研究进展.在物源生成机制方面,揭示了工程扰动对孕灾环境的人工重塑效应,指出工程弃渣与深部卸荷裂隙构成了对静态液化高度敏感的人造/隐性物源,显著改变了灾害发育的物质基础;在动力演化规律方面,阐明了多场耦合驱动下的非线性动力学机制,特别是高位冰岩崩的超长运动受控于颗粒摩擦生热引发的相变热力学自润滑效应,而气候暖湿化与震后效应则分别驱动了物源的垂直迁移与损伤再生;在监测预警技术方面,论证了从地表几何形变观测向内部物理场反演的范式跨越,确立了基于地震动信号的流体动力学参数反演技术在工程实践中的核心支撑作用.最后,面向未来的极端不确定性,提出了构建物理－数据双驱动的智能预测体系,并倡导工程防控从单纯的刚性对抗向全生命周期韧性新范式转变.

关键词: 青藏高原水电工程;工程扰动;多场耦合机制;物理预警;韧性防控;工程地质.

中图分类号: P642 **文章编号:** 1000－2383(2026)10－4079－18 **收稿日期:** 2025-09-05

Evolution Mechanisms and Monitoring-Early Warning Technologies for Debris Flow Source Materials in Hydropower Development Zones of Qinghai-Tibet Plateau: A Review

Zhang Shishu, Yang Zhongkang, Li Qingchun

PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu 610031, *China*

Abstract: Intensive hydropower development in the deeply incised valleys of the Qinghai-Tibet Plateau has emerged as a third geological driving agent, orchestrating surface reshaping processes alongside tectonic movements and climate change. The resulting disaster chains, characterized by high concealment and abruptness, pose severe challenges to traditional disaster prevention theories. Addressing this extremely complex environment, in this paper it provides a systematic review—grounded in frontline engineering practices and multidisciplinary theoretical evolution—of the full-chain research progress ranging from source material evolution mechanisms to physical early warning technologies.Regarding source generation mechanisms, the study reveals

基金项目: 国家重点研发计划项目(No.2023YFC3008305);国家自然科学基金资助项目(No.U22A20601);中国电力建设集团有限公司科技项目(No.P61124).

作者简介: 张世殊(1970－),男,博士,正高级工程师,岩土工程专业,主要从事工程勘察与地灾研究. ORCID:0009-0006-1734-563X. E-mail:1992070@chidi.com.cn

引用格式: 张世殊,杨仲康,李青春,2026.青藏高原水电工程区泥石流物源演化机理与监测预警技术研究进展.地球科学,51(10):4079－4096.

Citation: Zhang Shishu, Yang Zhongkang, Li Qingchun, 2026. Evolution Mechanisms and Monitoring-Early Warning Technologies for Debris Flow Source Materials in Hydropower Development Zones of Qinghai-Tibet Plateau: A Review. *Earth Science*, 51(10): 4079－4096.

the artificial reshaping effects of engineering disturbances on the disaster-gestating environment. It underscores that engineering spoil and deep unloading cracks constitute anthropogenic/hidden source materials highly sensitive to static liquefaction, thereby significantly altering the material basis of disaster development. In terms of dynamic evolution laws, the nonlinear dynamic mechanisms driven by multi-field coupling are elucidated. Specifically, the ultra-long runout of high-position ice-rock avalanches is controlled by a phase-change thermodynamic self-lubrication effect triggered by frictional heating, while climate warming-wetting and post-earthquake effects drive the vertical migration and damage regeneration of source materials, respectively. Concerning monitoring and early warning technologies, it demonstrates a paradigm shift from surface geometric deformation observation to internal physical field inversion. It establishes the core supporting role of hydrodynamic parameter inversion techniques based on seismic ground motion signals in engineering practice. Finally, facing future extreme uncertainties, this paper proposes the construction of a physics-data dual-driven intelligent prediction system and advocates for a transformative shift in engineering prevention and control: from simple rigid resistance to a new paradigm of lifecycle resilience.

Key words: hydropower engineering in Qinghai-Tibet Plateau; engineering disturbance; multi-field coupling mechanism; physical early warning; resilient prevention and control; engineering geology.

0 引言

在“西电东送”国家战略的纵深推进下,青藏高原及其周缘深切峡谷区已跃升为我国清洁能源开发的战略高地与主战场.随着金沙江、雅砻江、大渡河及雅鲁藏布江流域梯级水电站规划装机容量突破1.26亿kW(预计2030年)(黄隐锋等, 2025),工程建设正全面挺进高地应力、高地震烈度及高寒冰冻圈叠加的三高极端环境腹地.不同于低海拔区域的常规建设,该区域数百米级的高坝蓄水、深埋长隧洞开挖以及亿吨级的弃渣堆积,其强度与规模已实质性打破了原本脆弱的地质平衡.事实上,高强度的工程活动已演化为与地球内动力(构造隆升)、外动力(气候变化)并列的、重塑地表过程的第三驱动营力(郭长宝等, 2024).色东普沟冰岩崩碎屑流、金沙江白格滑坡堵江等典型灾变事件反映了该区域高位崩滑、堵江及次生灾害链的复杂演化特征.在此背景下,如何辨析自然驱动与工程扰动的作用及其耦合关系,揭示复杂环境下的物源演化与灾害链动力学机制,成为水电工程区灾害评价与监测预警面临的重要科学问题.

尽管近30 a来国内外在泥石流成因与防控领域成果丰硕,但审视青藏高原水电工程区的特殊性,现有理论体系在物源演化、动力机理、预警范式3个维度上仍存在显著的认知断层与技术瓶颈:(1)在物源认知层面,现有研究多聚焦于天然降雨引发的浅层滑坡或冰碛物,往往将工程活动简化为静态的外荷载,忽视了其作为物源制造者的动态角色(Liang *et al.*, 2023; Jin and Zhang, 2025).特别是对于工程弃渣这一人造物源,传统土力学模型未能充分揭示其间断级配与弱胶结特征导致的静态液化高敏感性(黄文祥, 2025;罗璟等, 2026);同时,对深埋开挖在高地应力区诱发的深部卸荷裂隙及其作为隐性物源的演化机制缺乏定量描述,导致对灾害链源头的认知存在盲区(张波等, 2026).(2)在机理认知层面,传统基于液-固两相流的动力学模型正面临黑箱化困境.现有理论难以解释高位远程冰川泥石流在极低坡度下的超长运动距离与异常高流动性(Xie *et al.*, 2026),究其根源,在于忽略了运动过程中的相变热力学机制,即颗粒剧烈摩擦生热导致固相冰迅速转化为液相水,进而产生基底润滑效应与超孔隙水压力(Jin *et al.*, 2025; Xie *et al.*, 2026).此外,关于强震后效应的研究多假设其随时间线性衰减(Jin and Zhang, 2025),而忽视了松散物源在库水消落与冻融循环作用下损伤愈合与水岩劣化的长效竞争机制,致使对全生命周期风险的误判(许彬, 2022; 姚闯闯, 2025).(3)在预警范式层面,一线工程仍大量依赖基于历史数据的降雨强度-历时(Intensity-Duration, I-D)统计阈值模型.然而,在气候暖湿化导致的非平稳环境与高位无人区无资料的双重约束下,统计模型面临严重的阈值漂移与失效风险(Zhao *et al.*, 2025).更为关键的是,现有监测手段多停留在地表几何形变的观测(如InSAR、GNSS),缺乏基于地震动/地声信号进行流体动力学参数(如流速、密度、动能)物理反演的能力(何思明等, 2024),难以实现从看图说话到透视机理的跨越.

鉴于此,本文旨在构建一个从扰动格局解析到物理预警反演的系统综述框架.文章首先突破单一自然过程视角,解析工程弃渣堆积、高地应力卸荷

与水库蓄水消落对地质环境的重塑作用,揭示工程－环境互馈下的物源再生机制;进而阐明冰岩相变热力学与强震损伤长效衰减多场耦合下的物源演化动力学,填补远程运动与长效风险的理论空白;在此基础上,系统评述监测技术从地表形变向内部物理场反演的代际演进,论证地震动信号在无资料区流态识别中的工程实践效能;最后,面向未来气候与工程运行的不确定性,提出物理模型与人工智能互馈的智能预测路径,并倡导从刚性对抗转向全生命周期韧性的工程防控新范式,以期为国家能源基地的地质安全保障提供科学依据与理论支撑.

1　数据来源与系统综述框架

本研究遵循系统综述范式,文献检索聚焦于西部大开发战略实施以来的水电建设高峰期(2000—2025年).依托 Web of Science 与 CNKI 核心数据库,以青藏高原/藏东南、工程扰动、冰岩泥石流及物理监测预警为核心词组构建检索矩阵.区别于传统文献计量学分析,本文最具实质性的突破在于构建了学术文献理论与一线工程实录的异构数据双重证据链.研究特别引入了金沙江、雅砻江及易贡藏布流域的原始勘测与灾害评估档案(含地质勘察报告、风险评估专报等资料),并确立了三高叠加、全链演化的样本筛选准则:即优先选取位于高地应力构造带、高寒冰冻圈与高强度工程扰动耦合区,且具备完整崩滑－堵江－溃决级联演化特征的典型案例.这一策略确保了分析样本在极端工况下的物理真实性与实际参考价值.

立足于工程实践与地球系统科学的交叉点,本文构建了扰动格局解析－演化机理重构－物理预警反演－韧性防控展望的递进式综述框架(图1).首先(扰动解析),突破单一自然地理视角,解析弃渣堆积、开挖卸荷与水库蓄水等工程营力对脆弱地质环境的立体重塑作用,从源头揭示人造/隐性物源的再生与复活机制;其次(机理重构),深入剖析冰岩相变热力学与强震损伤长效衰减在多场耦合维度下的非线性动力学规律,旨在填补高位远程运动机制与全生命周期长效风险演化的理论黑箱;进而(技术跨越),聚焦监测技术的代际演进,重点评述从地表几何形变观测向内部物理场反演(如地震动听诊、流体参数反演)的范式转移,论证物理判据在无资料区流态识别与临灾预警中的决定性效能;最后(范式革新),面向未来气候非平稳性与工程运行不确定性的双重挑战,探讨物理法则－人工智能互馈的智能预测路径,并倡导建立从刚性对抗转向全生命周期韧性的工程防灾新范式.

2　工程扰动下的地质环境响应与灾变模式

2.1　水电梯级开发的走廊效应与立体扰动格局

青藏高原东缘深切峡谷区的水电开发已呈现出显著的全流域梯级化特征,工程活动正由离散的建设行为演化为重塑区域地质环境稳定性的关键营力.宏观空间上,沿金沙江、雅砻江等深大断裂带密布的水电梯级与高易发泥石流沟呈现出高度重叠的灾害－工程走廊效应.这种高强度的梯级开发将天然河流转变为库首－库尾相连的阶梯水体,从根本上重构了流域的水文地质边界与能量排泄通道.细观尺度上,一线工程调查揭示(李崇标等,2015),高强度的工程扰动构建了点－线－面的立体致灾网络:坝址枢纽与高位弃渣场构成高应力集中的扰动奇点,进场道路与输电线路形成切割坡体抗滑结构的切割线,而库区消落带则形成大范围水岩劣化作用的劣化面.在深切峡谷的极大起伏地形下(图2a),这种立体扰动效应在垂直地带上被非线性放大:数亿立方米的土石方开挖与填筑不仅改变了微地貌,更通过改变产汇流条件和固体物质补给(人造物源)(侯伟鹏等,2023)(图2b),使工程营力跃升为与构造运动、气候变化并列的第三大区域致灾驱动因子.

2.2　工程营力驱动下的物源演化动力学与典型成灾模式

在青藏高原深切峡谷区,高强度的水电开发已超越单纯的外部荷载,异化为重塑地质环境稳定性的关键内变量.工程扰动通过强制改变岩土体的物质组构、应力路径及水力边界,诱发了物源的非线性演化与再生.本文结合金沙江、雅砻江流域典型案例,解析3种主控动力学模式(图3).

2.2.1　工程弃渣人造物源的静态液化与阈值漂移机制　不同于天然沉积土体经历漫长地质年代形成的稳定结构,工程弃渣表现为典型的间断级配与弱胶结二元特征(黄文祥,2025).这种由巨石骨架与细粒土基质混杂且未经充分压实的结构,致使其内部大孔隙网络高度发育(刘兴荣等,2018)(图3b).从非饱和土力学视角审视,弃渣体在自然干燥

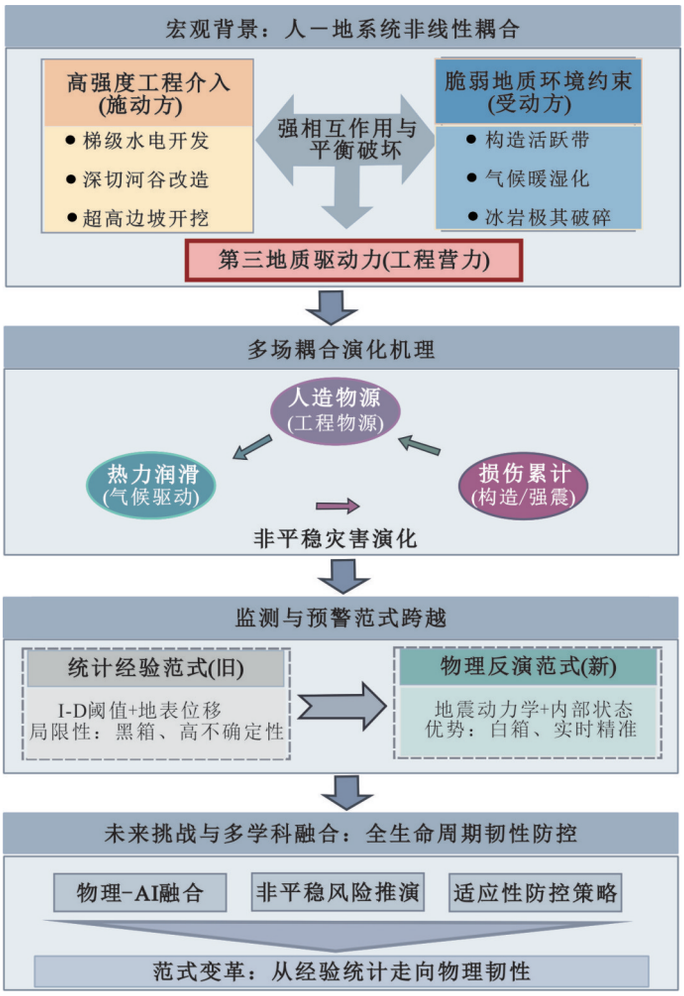

图 1 逻辑架构与技术路线图

Fig.1 Logical framework and technical roadmap

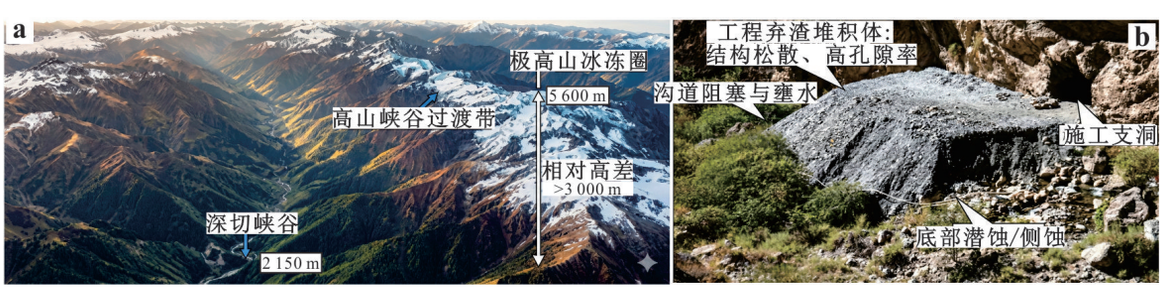

图 2 青藏高原水电工程区典型地形环境与工程扰动特征

Fig. 2 Typical topographic setting and engineering disturbance features in hydropower development areas of the Qinghai-Tibet Plateau

a. 藏东南深切峡谷地形特征；b. 工程弃渣堆积与沟道堵塞形态

状态下主要依靠基质吸力维持表观稳定(Zhang *et al.*, 2026b).然而,一旦遭遇强降雨或冰雪融水入渗,基质吸力将迅速丧失,有效应力急剧衰减;与此同时,宽级配结构极易引发内部细颗粒的潜蚀迁移,破坏土体骨架的亚稳定性,诱发静态液化(Zhang *et al.*, 2025a).这一物理过程导致弃渣体在远低于天然沟道的降雨阈值下即可发生流态化突变(Jiang *et al.*, 2025).金沙江与易贡藏布流域相关水电工程调查资料涉及工程弃渣堆积及沟道泥石流物源特征(李崇标等,2015;巫德斌等,2022).在一

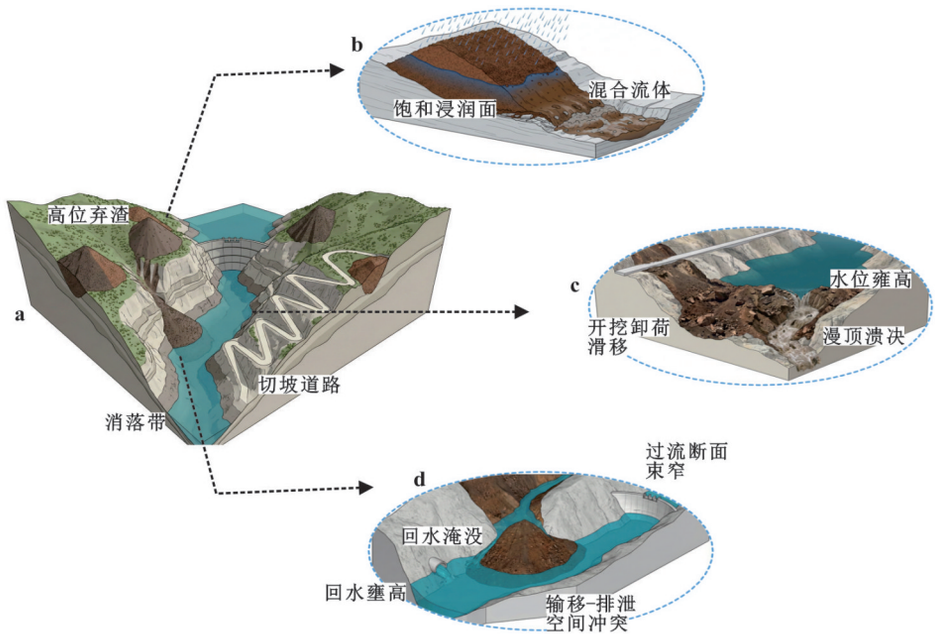

图 3　水电工程点－线－面立体扰动格局与致灾模式

Fig.3　Three-dimensional point-line-surface disturbance pattern and hazard-inducing modes in hydropower engineering

a.点－线－面立体扰动模型;b.弃渣加载模式:降雨激发的揭底起动机制;c.开挖卸荷模式:边坡失稳－堰塞溃决链式过程;d.空间冲突模式:回水淹洞与大坝冲击效应

定地形与渗流条件下,工程弃渣堆积可能改变沟道局部水动力条件及松散物源的启动阈值.在新增物源补给与降雨径流的共同作用下,部分原本活动性较弱的沟道可能出现泥石流活动增强,甚至形成较大规模的泥石流.

2.2.2　高地应力区开挖卸荷损伤演化与立体空间冲突效应　在青藏高原特有的高地应力环境下,工程深开挖诱发的卸荷效应不再局限于表层,而是向深部传递的应力路径旋转与损伤演化过程(巫德斌等,2022).侧向约束的瞬态解除打破了原生应力平衡,导致高能储岩体发生卸荷回弹.不同于低应力区的简单剪切破坏,该区域岩体表现为垂直于卸荷面的张拉－劈裂破坏,形成具有显著深度的张剪混合型松动圈(张永双等, 2025)(图 3c),为崩滑灾害提供了深部贯通的破裂边界.更为致命的是深切峡谷区特有的立体空间冲突:导流洞、厂房及施工营地等硬工设施受地形限制,被迫挤占有限的河谷空间,与地质灾害链在空间上高度重叠.易贡藏布流域相关水电工程的山地灾害影响评价结果表明,这种空间冲突可能会产生显着的束窄效应,即高位崩滑体在运动过程中无法像在开阔地带那样耗散能量,而是受对岸山体与工程设施约束发生能量聚集,极易诱发滑坡－堵江－溃决－冲击的级联放大效应(图 3d),将单一的坡面灾害转化为流域性的系统灾难.

2.2.3　水库蓄水运行期的多场耦合劣化机制　水库蓄水对库岸稳定性的重塑是一个涉及热－水－力－化(THMC, Thermo-Hydro-Mechanical-Chemical)全耦合的深部流变过程.库水入渗不仅产生宏观物理上的浮托力与软化效应,更伴随着微观矿物的化学溶蚀与有效应力场的重分布(余德彬等,2021).其中,最具破坏性的工况发生于库水位骤降期(Chen *et al.*, 2023):当库水位下降速率大于坡体内孔隙水压力的消散速率时,坡体内将形成显著的孔压滞后效应,产生指向坡外的强大剩余动水压力,直接驱动库岸岩土体失稳.金沙江梯级电站(Zhou *et al.*, 2025)的长期监测揭示,库岸再造并非一次性的破坏,而是在水位周期性涨落驱动下,地质体经历表层松弛－深部流变－疲劳损伤的全生命周期演化过程.对于深厚覆盖层或倾倒变形体,这种多场耦合劣化机制往往导致灾害具有显著的时间滞后性(姚闯闯, 2025),使得工程运行期的长效稳定性维护面临严峻挑战.

3　物源演化多场耦合机理研究进展

3.1　高频冻融损伤累积与冰水相变启动机制

青藏高原水电工程区(特别是藏东南雅鲁藏布

江下游、金沙江上游)独特的强辐射、大温差极端气候特征,决定了其物源演化并非受控于高纬度地区的单一季节性冻结,而是受控于极高频的日冻融循环与剧烈的相变动力学过程.现有研究表明,该区域物源的演化遵循微观热疲劳造源—细观相变润滑—宏观流态化启动的跨尺度非线性演进路径(Liu *et al.*, 2024).

3.1.1 高频冻融热疲劳驱动的微观结构劣化与表层剥落机制 不同于深部岩土体的稳态季节性冻结,高原地表浅层岩土体在日间强烈短波辐射与夜间长波辐射降温的交替驱动下,频繁穿越0摄氏度等温线,诱发了显著的热疲劳效应(Liu *et al.*, 2024)(图4a).微观物理机制揭示(Zhang *et al.*, 2026a),含云母、石英等层状矿物的岩石对此尤为敏感,矿物颗粒间各向异性的热膨胀系数差异导致微裂隙在无水条件下即可萌生,随后夜间裂隙水结冰产生的冰劈作用进一步驱动裂隙尖端扩展(Zhang *et al.*, 2026a).CT扫描实证数据证实了这一损伤累积的非线性特征(Jiang *et al.*, 2024):针对西藏昌都砂岩的测试显示,随着冻融循环次数增加,岩石内部优势孔隙半径从初始的100 μm区间演化至200~400 μm,主导孔隙比例激增3.2~6.4倍,标志着微裂纹网络从孤立走向拓扑贯通(Jiang *et al.*, 2024)(图4c).对于广泛分布的冰碛土,SEM图像进一步证实了冻胀力迫使颗粒发生旋转与重排,致使颗粒接触模式从稳定的面—面接触退化为不稳定的点—面或点—点接触(屈永龙, 2020)(图4b).这种微观尺度的结构性疲劳在宏观上表现为显著的表层效应,导致高位陡峻岩坡发生持续的洋葱皮式剥落,为沟道源源不断地输送了富含裂隙、结构松散的新鲜物源,形成了高原特有的砂流碎石坡景观.

3.1.2 水分迁移与冰岩相变热力学耦合的物源启动机制 在物源启动机制的认知上,学术界正经历从经典体积膨胀理论向现代水分迁移与相变动力学的范式转移(Murton *et al.*, 2006).早期的静水压力理论侧重于水结冰产生约9%体积膨胀引发的冻胀力,然而这难以阐释开放系统中的持续破坏现象(屈永龙, 2020; Xiao *et al.*, 2024);现代研究证实,由冷生吸力驱动的未冻水向冻结锋面迁移并形成分凝冰,构成了岩土体结构损伤与破坏的主导机制.针对色东普沟等典型高位灾害,Pudasaini(2022)与Wang *et al.*(2023)基于通用多相质量流模型揭示了其本质是一个热—流—固全耦合的相变过程.当高位冰岩体失稳运动时,剧烈的颗粒剪切摩擦将机械能高效转化为内能,触发摩擦生热—相变—润滑的热力学反馈回路.该过程不仅通过潜热吸收调节温度场,更关键的是,相变产生的液态水在不排水条件下急剧积聚,形成超孔隙水压力与基底连续水膜(Peng *et al.*, 2022)(图4d).最终,在灾变效应层面,这种自润滑效应导致物源体底部抗剪强度瞬间归零,发生类似静态液化的流变突变.这一机制科学解释了此类灾害为何能在少雨甚至无雨条件下实现热力自发启动,并以极低摩擦角维持超长距离的高速流态化运动(Peng *et al.*, 2022).该发现标志着灾害预测模型必须从单一的降雨阈值向引入内能方程与相变参数的综合物理模型跨越.

3.1.3 微观损伤积累向宏观失稳演化的跨尺度机制 尽管目前已在微观损伤表征与宏观动力学模拟方面取得长足进展,但连接二者的细观桥梁仍是研究的盲区.现有的离散元模型(DEM)虽能复现温度波动—裂纹萌生—结构转变的过程,但往往基于简化的物理假设,缺乏对相变潜热与能量耗散的精细化耦合,导致对启动速度与流态转化临界点的预测存在显著偏差(He *et al.*, 2023).此外,如何建立从微观孔隙度演化(如孔径增大至临界阈值)到宏观边坡失稳概率之间的定量映射关系(Pudasaini, 2022),实现从事后机理分析到事前临界预警的跨越,仍是制约高原水电工程区减灾的关键科学难题.

3.2 强震—高地应力耦合损伤与物源长效演化机制

青藏高原腹地(如雅鲁藏布江缝合带、金沙江构造带)兼具高地应力锁固与强震动力解锁的二元力学属性,决定了该区域物源的演化机制显著区别于一般高烈度山区.强震不仅制造了显性的同震滑坡,更通过深部岩体的动静应力耦合效应制备了巨量隐性物源(Li *et al.*, 2023),并在工程扰动与气候营力的长期驱动下,呈现出独特的再生性与链式放大特征.

3.2.1 深部岩体震裂—松动损伤累积与隐性物源制备 不同于汶川地震中浅表层岩体的脆性崩落,高原深切峡谷区的物源生成本质上是高地应力卸荷(静力背景)与强震动力冲击(动力诱因)的非线性耦合过程(图5a).彭建兵(2025)提出的互馈灾害效应理论指出,强震动力作为一种低周疲劳荷载,叠加于既有的河谷高地应力卸荷带之上,导致岩体

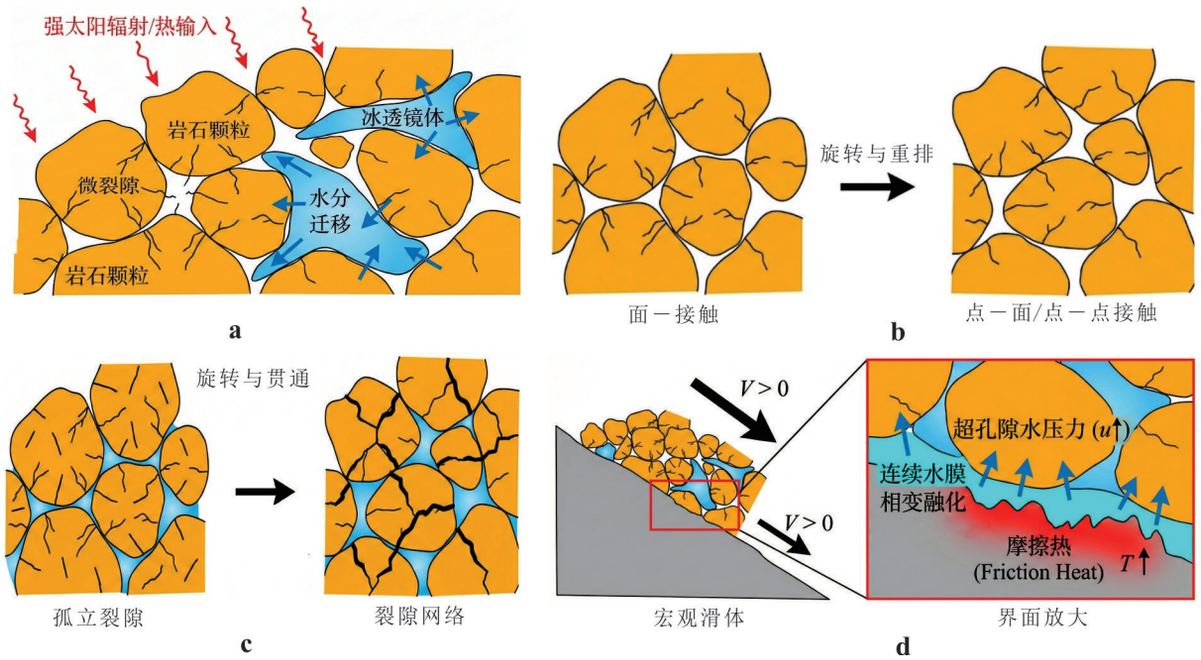

图 4　冻融损伤累积与相变热力学启动耦合机制

Fig.4　Coupled mechanisms of freeze-thaw damage accumulation and phase-transition-driven thermodynamic initiation

a.微观热疲劳与冻胀扩容;b.颗粒接触模式退化;c.宏观裂隙网络贯通;d.摩擦生热与相变润滑

破坏模式发生质变.在米林 Ms 6.9级地震等典型案例(Li *et al.*, 2023)中,高储能的硬脆性岩体(特别是缝合带构造混杂岩)在地震波反复剪切下,由传统的剪切破坏主导转变为张剪混合破坏,甚至在锁固段发生爆发式的动力溃屈(尹凤玲等, 2018; 李浩文等, 2026).这种动力响应导致岩体内部微裂隙发生大规模不连续扩展,形成了深厚的震裂松动圈.尽管这些发生内伤的岩体在震后初期维持了表观稳定,但其实质已转化为对水动力极度敏感的隐性物源.统计规律表明(李为乐, 2019),震后物源的空间分布受 PGA(地面峰值加速度)与断裂密度的双重控制,二者的高值重叠区构成了隐性物源富集的损伤荷载中心,为后续灾害链提供了充足的物质本底.

3.2.2　水库诱发地震与工程动静荷载叠加的解锁机制　在水电工程建设与运行期,人类活动正异化为激活隐性物源的关键变量,特别是水库诱发地震(Reservoir-Induced Seismicity, RIS)已成为高坝大库不可忽视的致灾触发因子(姚闯闯, 2025).虽然目前关于高原水库库底动水压力的直接监测数据尚显匮乏,但基于有效应力原理的数值反演表明(图 5b):随着库水位大幅抬升,孔隙水压力沿断裂带向深部扩散,通过降低断层面的有效正应力,极易诱发处于临界应力状态的断层发生渗透活化(张永双等, 2025).这种流－固－震耦合效应往往导致震源浅、频度高的诱发性地震,直接冲击库岸两侧的松动堆积体(巫德斌等,2022).此外,工程开挖与爆破产生的瞬态动力场与深部高地应力卸荷场形成复杂的动静叠加效应(罗璟等, 2026).地震波在人工卸荷裂隙面发生反射与折射,造成应力波能量的局部聚焦,导致围岩产生二次损伤网络(薛翊国等, 2026).这种工程扰动实际上起到了催化剂作用,加速了深部震裂岩体从锁固态向松动态的跨越(尹凤玲等, 2018),使得震后地质灾害的发生时间窗口显著前移.

3.2.3　震后物源再生性演化与灾害链级联放大效应　关于震后物源的长期演化规律,学术界长期存在水力消亡论与构造再生论的观点分野.基于汶川地震经验的水力消亡论(Jin and Zhang, 2025)认为,随着细颗粒流失与植被恢复,泥石流活动性将随时间呈指数衰减(约 10～20 a 趋于背景值).然而,针对青藏高原腹地的最新研究确立了物源再生的新范式(图 5c).祁生文等(2024, 2025)指出,在高原特有的高频冻融与构造活跃双重环境下,深部震裂松动岩体(隐性物源)会不断发生物理风化与崩解,持续补充新鲜的细颗粒物质,导致物源呈现再生性特征.这

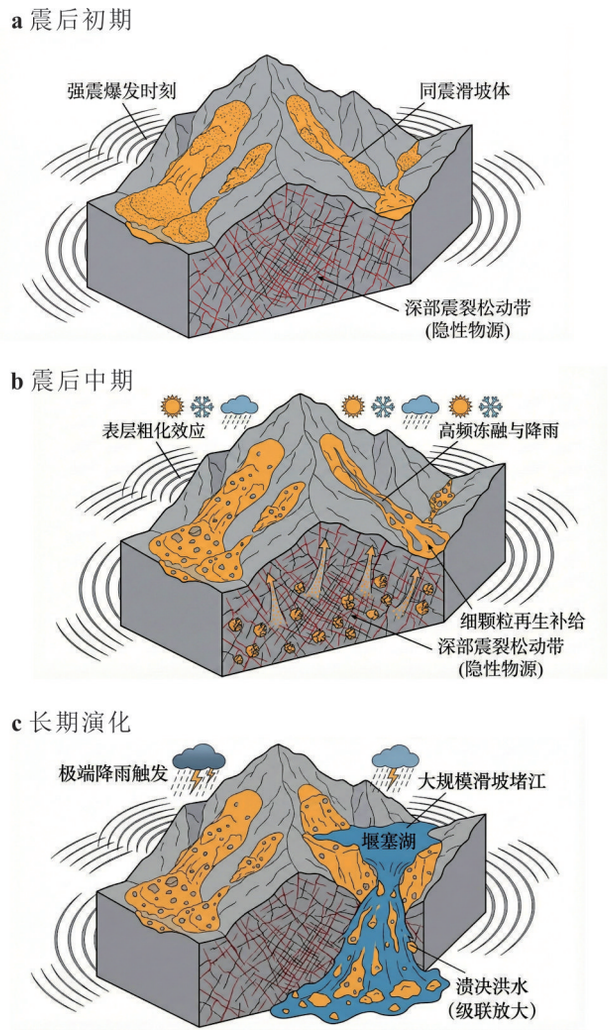

图 5 震后物源震裂－再生机制与长效非线性演化模式

Fig.5 Post-earthquake fracturing-regeneration mechanisms and long-term nonlinear evolution patterns of source materials

a.震后初期:强震动力破坏与深部损伤制备;b.震后中期:高频冻融驱动下的物源再生与间歇性活动;c.长期演化:极端工况触发的灾害链级联放大

意味着高原震后泥石流的活跃期可能远超预期,呈现出间歇性复活而非单调衰减的演化趋势(祁生文等, 2025).在此背景下,灾害表现出显著的滑坡－堵江－溃决级联放大效应.以雅鲁藏布江色东普沟为例,震后松散物源一旦启动,极易堵塞干流形成堰塞湖,随后的溃决洪水通过沿程侵蚀铲刮沟床及震后堆积物,实现流量与输沙率的成倍放大(堵溃效应)(李浩文等, 2026).这种由隐性损伤制备－工程气候触发－链式级联放大构成的长效非线性演化机制,是青藏高原水电工程区面临的最大地质安全挑战.

3.3 气候驱动下的冰冻圈物源时空迁移与非平稳演化

在青藏高原暖湿化加剧的背景下,升温速率达0.34 ℃/10 a(约为全球均值2倍),这种显著的海拔依赖性增温直接驱动了泥石流物源系统突破传统的时空界限(Wang *et al.*, 2024).物源演化正经历从低位沟道向极高海拔垂直攀升的空间迁移,以及从单一降雨激发向相变热力驱动的动力机制转变.这种非平稳性演化,致使基于历史统计规律的工程设防体系面临严峻的失效风险.

3.3.1 零度等温线抬升驱动的高位物源垂直迁移与电梯效应 气候变暖最显著的地质效应是零度等温线与雪线的持续抬升,这导致泥石流物源区不再局限于中低海拔的沟道堆积区,而是呈现向海拔4 000～6 000 m冰冻圈核心区垂直迁移的电梯效应(Wang *et al.*, 2024).随着冻融界限的爬升,原本处于冻结稳态的高海拔岩土体进入剧烈的冻融循环窗口,导致高位陡峭岩壁发生大规模的冻胀致裂与岩体劣化以及不连续扩展(Zhao *et al.*, 2023).更为关键的是,冰川的加速退缩(如雅鲁藏布江色东普沟冰川在40 a内退缩46%)暴露了巨量新鲜、未固结的冰前/侧碛物(赵富萌, 2024).这些刚脱离冰川压覆的松散物质缺乏植被保护与长期固结,处于极不稳定的临界力学状态.色东普沟源区位于海拔6 000 m左右的冰岩崩频发(集水区峰值达7 782 m)表明巨量隐蔽物源正富集于极高海拔的冰川前缘(万佳威等, 2024).这种垂直迁移不仅增加了物源的势能梯度,更因高海拔区难以开展常规地面监测,形成了现有空－地监测体系的盲区.

3.3.2 灾害演化非平稳性与基于历史统计的工程设防失效风险 气候变化与物源迁移的叠加,宣告了工程水文学中平稳性假设面临严峻的适用性危机.现有的水电工程防洪与排导设计主要基于历史水文数据的统计规律(如P-III型曲线)(巫德斌等, 2022),然而,气候暖湿化导致的降雨强度－历时－频率(Intensity-Duration-Frequency, IDF)曲线漂移,叠加极端降雨与冰雪融水的双源驱动效应,使得极端洪峰与泥石流规模的重现期显著缩短(罗璟等, 2026),现有设防标准面临极高的低估风险.此外,灾害链的级联放大效应进一步加剧了这种非平稳性.以2023年锡金冰湖溃决为例(Qu *et al.*, 2025),高能水流沿程铲刮裹挟沟道物源,导致流量与输沙率成倍增加.这种跨流域、跨灾种的能量传

递与规模倍增,往往突破单一工程点的防御极限(祁生文等, 2024; 彭建兵, 2025).因此,面对未来非平稳的灾变趋势,亟需建立适应气候变化的动态风险评估体系,将全生命周期内的气候极端化情景与冰冻圈退缩趋势纳入工程设计的边界条件.

4　适应高原环境的监测预警技术演进

4.1　响应物源演化机理的多元感测技术

针对青藏高原水电工程区高位隐蔽、冻融损伤、突发性强的灾变演化特征,传统基于地表几何位移的监测体系已难以满足对灾害孕育全过程的物理感知需求.当前的监测技术正经历从地表几何形变观测向内部物理场演化探测的范式跨越,旨在通过捕捉深部驱动因子(孔压/应力)、状态响应(频率/刚度)及流体动力图谱(地震波/次声),构建响应物源演化机理的多元立体感测体系(图 6),其适用性评价结果见表 1.

4.1.1　驱动因子监测:孔隙水压力与水热耦合的深部原位感知　物源的失稳往往始于看不见的深部渗流侵蚀与水热场演化.针对堰塞体或松散堆积体内部的渗流场重构,单纯的地表位移监测存在显著的时间滞后性(Roering *et al.*, 2015).现代监测技术通过原位埋入式传感器构建深部感知,直接捕捉驱动失稳的水力学前兆(图 6a).实证研究表明(Li *et al.*, 2024),预先埋设于沟床或坝体深部的孔隙水压力传感器,能够精准记录上覆流体引起的基底压力脉动,重构沟床内部渗透侵蚀的演化过程(Yang *et al.*, 2024).更为关键的是,渗流驱动下的内部结构调整往往伴随着微观的能量释放.监测数据显示(Khan *et al.*, 2020),在蓄水或降雨入渗阶段,高频(>50 Hz)地震动信号的异常突增,是坝体或物源内部因渗流导致细颗粒迁移、潜蚀及沉降变形的直接指示信号.这种高频微震监测有效弥补了传统点式孔压计空间分辨率的不足.此外,针对高原复杂电磁环境下的抗干扰需求,光纤光栅技术(Höttges *et al.*, 2024)正被引入深部多场感知领域,通过研发应变－渗压一体化传感器,实现了对深部微形变与水力梯度的同步高精度捕捉(Höttges *et al.*, 2024),为揭示降雨－渗流－力学耦合致灾机制提供了关键的物理数据支撑.

4.1.2　状态响应监测:固有频率听诊与分布式光纤的损伤量化　在冻融循环与强震损伤的双重作用下,物源体从稳定到失稳本质上是一个刚度衰减与损伤累积的非线性过程(Zhang *et al.*, 2026a).对于难以直接接近的高位危岩体,基于动力学的固有频率听诊技术已成为识别其临界状态的核心判识手段(贾艳昌等, 2017).Yan *et al.*(2026)研究建立了物源体固有振动频率与稳定状态的定量映射关系:沟壁崩滑物源体在稳定阶段,其固有频率往往保持在特定高值(如～33 Hz);随着裂隙贯通、锁固段失效及边界约束弱化,频率呈现非线性衰减;在临界失稳或启动瞬间,固有频率会发生灾变式突降(如降至 2 Hz 左右的极小值).Feng *et al.*(2025)利用集成微机电系统(MEMS)加速度计的一体化监测仪,可精准捕捉这一微观动力学征兆,从而实现对物源健康度的实时量化诊断.与此同时,针对青藏高原沿线铁路、公路等长距离线性工程,分布式声波传感(Distributed Acoustic Sensing,DAS)技术利用光纤作为神经网,解决了传统点式监测存在的空间盲区问题.DAS 技术能够全天候采集沿线岩土体的微破裂声发射信号与微弱振动(Malik *et al.*, 2026),填补了地下深部感知的盲区,有力支撑了天－空－地－深一体化全域感知体系的构建,显著提升了对大范围隐蔽性物源损伤演化的识别精度.

4.1.3　流体动力监测:地震动信号的物理图谱解码　当高位隐蔽物源转化为流体运动时,由于高寒缺电、地形恶劣及流体冲击力极大,传统接触式设备(如泥位计)往往面临存活难与数据中断的困境.非接触式地震动与次声波监测技术利用地层与大气作为传输介质,实现了远距离的安全感知(吕夫侠, 2024)(图 6b).不同性质的流体在频域上具有独特的物理图谱:白龙江流域的长期监测证实(杨云鹏, 2024),清水或挟沙洪水主要激活 5～20 Hz 的低频段;而高含沙水流与泥石流由于粗颗粒对沟床的剧烈撞击与摩擦,会显著激活 20～80 Hz 的高频段,且能量幅值增加 3.5～6.1 dB .通过分析地震动信号的功率谱密度(Power Spectral Density,PSD)演化特征(如典型的纺锤形包络),不仅可以精准区分洪水与泥石流,还能基于能量－参数关系定量反演流体的流速、密度及动能(何思明等, 2024).这种技术不仅克服了视觉盲区与恶劣天气的影响,更通过物理参数的反演,为下游工程提供了关于是什么流体、规模多大、破坏力如何的关键动力学信息,是解决高原极端环境下预警时效性与准确性难题的核心技术突破.

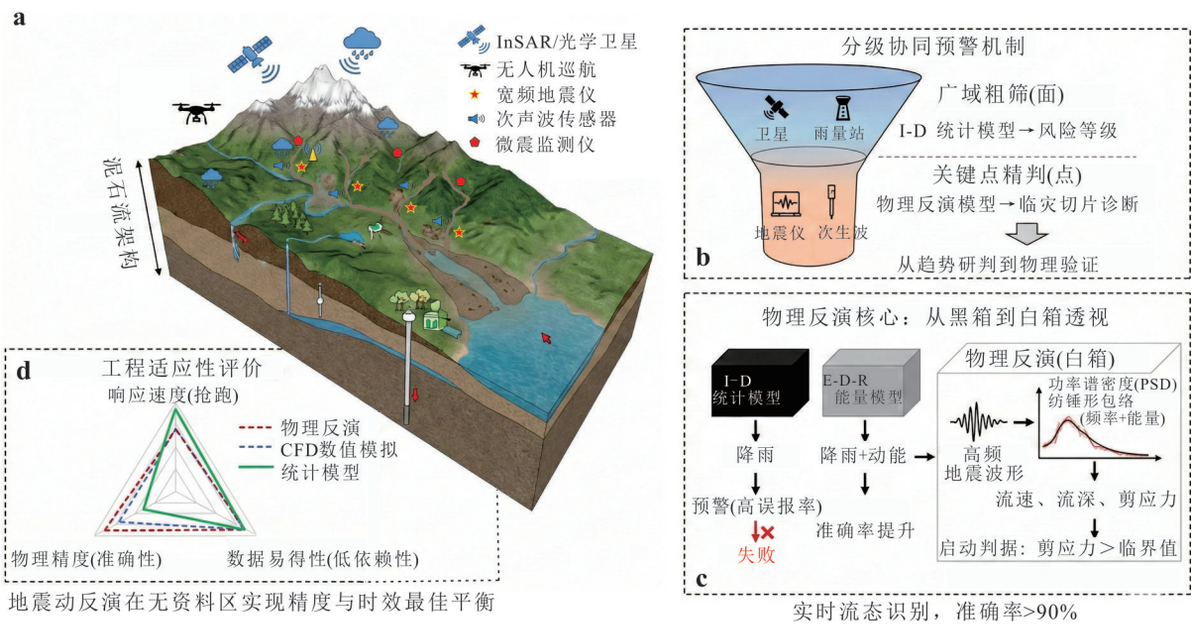

图 6 面向动力学反演的空－地－深立体物理感测架构与分级协同预警机制

Fig.6 Integrated aerial-ground-subsurface physical sensing architecture for dynamics-based inversion and hierarchical coordinated early warning

a. 立体监测部署架构；b. 分级协同预警漏斗；c. 物理反演核心；d. 工程适应性三元博弈

表 1 青藏高原水电工程区多元立体监测技术体系与适应性评价

Table 1 Multidimensional monitoring technology system and adaptability assessment for hydropower engineering areas on the Qinghai-Tibet Plateau

监测维度	核心技术手段	物理表征对象与量化指标	高原工程适应性与优势
驱动因子监测	①埋入式孔隙水压力传感器	基底压力脉动：直接记录上覆流体引起的动态孔压变化，重构沟床内部渗透侵蚀场(Yang *et al.*, 2024)	克服滞后性：直接捕捉深部驱动源，解决了地表位移监测对深部渗流响应的时滞性难题
	②高频微震监测	细颗粒迁移能量：捕捉＞50 Hz的高频信号，指示因渗流导致的内部潜蚀、管涌及沉降变形(Khan *et al.*, 2020)	微观结构预警：弥补了传统点式孔压计的空间盲区，提前识别肉眼不可见的内部结构损伤
	③光纤光栅	多场耦合参数：同步捕捉深部微形变(应变)与水力梯度(渗压)(Höttges *et al.*, 2024)	强抗干扰：光信号传输免疫高原强电磁干扰，适用于大坝深部及长距离信号传输
状态响应监测	①MEMS 固有频率听诊	刚度衰减与损伤累积：建立频率－状态映射：稳定期：~33 Hz，临界失稳期：突降至 ~2 Hz(Feng *et al.*, 2025)	解决了高位危岩体人力难至的监测难题，实现对物源健康度的实时量化诊断
	②分布式声波传感	全域微破裂信号：利用光纤神经网效应，捕捉沿线岩土体的微破裂声发射信号(Malik *et al.*, 2026)	消除空间盲区：构建天－空－地一体化感知，解决铁路、公路等长距离线性工程的隐蔽物源漏测问题
流体动力监测	①非接触式地震动监测	流体物理图谱：洪水，激活 5~20 Hz 低频段，泥石流：激活 20~80 Hz 高频段(粗颗粒撞击)，能量幅值：泥石流较洪水增加 3.5~6.1 dB，呈典型纺锤形包络(吕夫侠, 2024; 杨云鹏, 2024)	全天候透视与参数反演：①非接触式避免设备被高能流体冲毁；②盲区透视：克服夜间/浓雾等视觉盲区，定量反演流速、密度及动能

4.2 预警模型的效能演进与工程适应性评价

尽管青藏高原水电工程区的空－天－地一体化监测网已初具规模，但工程实践中有数据、无预警或预警误报的现象仍时有发生.本节打破对单一模型的平面罗列，聚焦于预警技术从统计经验向物理反演的范式演进逻辑，通过多模型效能的深度比

对,剖析其在高原特殊环境下的适应性瓶颈与工程应用挑战,详情见表2.

4.2.1　统计范式的机理脱节与效能瓶颈　传统的降雨强度－历时(I-D)阈值模型虽然在低海拔湿润区应用成熟,但在青藏高原腹地却面临系统性失效的困境(Liu, 2023).实证数据揭示了这一严峻现实, Li *et al.*(2025)基于大规模数据集的对比研究显示,传统统计模型在复杂山区的预警准确率跌至0.54,极高的误报率导致一线施工人员产生严重的警惕性疲劳.究其根源,在于统计阈值与高原特殊物源演化机理的严重脱节(Liu, 2023).一方面,传统模型未能有效表征震裂损伤的非线性特征.正如3.2节所述,强震与卸荷效应导致物源启动阈值显著降低,若忽略前期有效降雨对震后松散堆积体的饱和软化作用,模型将难以识别降雨量虽小但土体已达临界饱和的隐蔽状态,从而导致对群发性泥石流的系统性漏报(Liang *et al.*, 2023).另一方面,关键热力驱动因子的缺失是其致命短板.针对3.3节揭示的非降雨触发型(无雨启动型)冰岩灾害,受克劳修斯－克拉珀龙关系(Yang *et al.*, 2025)控制,气温升高直接驱动相变润滑;而I-D模型因缺乏气温与融雪变量,在面对色东普沟等由高温融雪或冰岩相变触发的灾害时,其适用性显著下降(侯伟鹏等, 2023; 杨友刚和雷世兵, 2024).此外,输入端的数据偏差进一步加剧了这一缺陷——高原雨量站稀疏,依赖GPM等卫星降水产品的插值数据在干旱河谷区误差极大(Chen *et al.*, 2023; 赵富萌, 2024),致使统计模型的物理基础从源头上面临严峻的置信度危机.

4.2.2　从能量修正向内部反演的物理范式跨越　为突破统计模型的黑箱限制与数据依赖,新一代预警技术致力于引入明确的物理机制,实现了从外部相关性统计到内部因果性反演的代际跨越(Feng *et al.*, 2025).这一进阶过程呈现出清晰的技术进化链条.阶段一:半物理能量修正.针对统计模型物理意义不明的问题,E-D-R(Energy-Duration-Rainfall)模型(Zhang *et al.*, 2025b)引入了降雨动能指标,以更物理地表征降雨对物源的侵蚀驱动作用.实证数据显示,这种半物理模型的预警准确率显著提升至0.76,证明了即使是引入单一物理因子,也能有效修正统计偏差(Zhao *et al.*, 2025).阶段二:全物理流态反演(图6c).作为物理预警技术的前沿高地,该阶段旨在突破黑箱限制,实现对流体性质的透明化解析(何思明等, 2024; 吕夫侠, 2024).区别于传统地震学仅关注波形特征,杨云鹏(2024)建立的动力学反演模型,不再纠结于复杂的外部气象条件,而是直接解析流体运动中颗粒碰撞产生的高频地震波.基于能量辐射机制,该模型可实时反演流速、流深及无量纲基底剪应力并确立了明确的物理判据.即当基底剪应力超过颗粒启动的临界阈值

表2　青藏高原典型泥石流预警模型的效能演进、数据依赖与工程适应性

Table 2　Performance evolution, data dependence, and engineering adaptability of typical debris-flow early-warning models on the Qinghai-Tibet plateau

预警模型范式	物理机理与精度	数据与参数依赖性	计算与响应时效	工程适用性评价
传统统计范式(I-D模型)	黑箱统计/低精度(0.54)缺失热力与震后损伤因子,物理机制脱节(Li *et al.*, 2025)	高依赖(历史数据)需长序列历史水文数据率定,受制于高原站点稀疏性	简单代数运算,无算力门槛	流域级面状粗筛成本低但误报高,仅适用于大范围区域风险趋势研判
能量修正范式(E-D-R模型)	半物理修正/中精度(0.76)引入动能指标修正统计偏差,但未完全突破黑箱(Zhang *et al.*, 2025b; Zhao *et al.*, 2025)	中依赖(降雨监测)仍需外部气象数据,对无雨启动型灾害无效	快,增加少量物理计算,满足实时性	统计模型的改良版适用于有一定水文资料基础的区域,精度略优于传统模型
全耦合数值模拟(热－流－固)	全流态模拟/理论高精度基于流体力学方程,机理完备(Peng *et al.*, 2022; 张利民, 2026)	极高依赖(岩土参数)面临参数黑洞:高海拔源区本构参数无法获取,输入端不确定性大	慢、面临算力瓶颈:高精度计算耗时＞灾害演化时间,无法临灾预警	事后复盘与评估适用于灾后机理分析或风险区划,不具备临灾预警现场应用能力
物理反演范式(地震动反演)	白箱透视/高精度(＞90%)基于颗粒碰撞能量辐射,建立无量纲剪应力判据(Chmiel *et al.*, 2021; 杨云鹏, 2024)	低依赖(物理守恒)无需历史资料,无需源区参数,基于通用力学定律	实时信号级毫秒响应,具备分钟级抢跑能力	关键工点点状精判,解决无资料区与隐蔽性难题,适用于大坝、营地等核心目标的精准诊断

时判定流体性质发生质变，确认为泥石流（何思明等，2024）.在具有相似高寒冰川特征的瑞士Illgraben流域类比验证中，此类物理分类器的预警成功率超过90%（漏报率控制在10%以内）（Chmiel *et al.*，2021）.这一突破的革命性意义在于摆脱了对长序列历史数据的依赖，利用通用的颗粒力学守恒定律，为缺乏水文资料的高原无资料区提供了一种高精度的实时诊断方案.

4.2.3 精度－数据－时效的工程适应性三元博弈

尽管物理模型在理论精度上优势明显，但在青藏高原水电工程区的工程应用中，不同模型面临着极具地域特征的落地挑战.这实际上是一场关于精度、数据广度与响应时效的三元博弈（图6d）.矛盾①：数据广度与参数深度的冲突.统计模型的优势在于计算极简，适合大尺度区域普查，但其赖以生存的降雨监测网在高原极度稀疏（Zhao *et al.*，2025）；全耦合物理模型（如侵蚀－淤积泥石流动力学模型）虽然机理完备，但面临参数黑洞——高位冰岩崩源区多位于海拔5 000 m以上的无人区，获取详细的岩土体本构参数（如内摩擦角、粘聚力）几乎不可能，导致模型因输入参数的不确定性而失效（张利民，2026）.相比之下，基于地震动的反演模型因无需历史数据率定且参数获取相对独立，展现出最佳的适应性.矛盾②：高精度模拟与实时预警的效能悖论.面对启动时间极短（分钟级）的高位崩滑灾害，预警系统的核心在于争夺“黄金时间”窗口.高精度的计算流体力学/离散单元法数值模拟面临严重的算力瓶颈（Peng *et al.*，2022；Wang *et al.*，2023），计算耗时往往长于灾害演化时间，难以满足实时预警需求.

鉴于单一模型难以同时满足高原工程对覆盖广度与响应速度的双重需求，未来的预警体系不应是非此即彼的选择，而应构建统计模型做广域粗筛（面）－物理反演做关键点精判（点）的分级协同模式（图6b）.即利用改进的统计模型进行流域尺度的风险分级与趋势研判，而在大坝、营地等关键工点部署地震动监测阵列，利用物理反演技术实现临灾阶段的精准切片诊断，以在成本可控的前提下实现预警效能的最大化.

5 未来挑战与跨学科融合方向

尽管当前学术界在物源演化机理与物理预警方面已取得长足进展，但审视青藏高原水电工程区极高能势位、强震后效应、气候非平稳性三元叠加的极端环境，现有理论体系仍面临严峻的适用性危机.未来的研究亟需突破单一学科边界，构建深部机理揭示－物理智能预测－韧性防控范式的跨学科融合体系（图7）.

5.1 从液－固两相流向广义多相变热力学的机理跨越

针对前文所述的高位冰岩崩－泥石流灾害链（如色东普沟），现有动力学模型多基于简化的液固两相流假设，忽略了超高速运动过程中的机械能－热能－相变能转化机制，难以解释灾害体体积异常放大与流态化突增的物理本质.未来的核心突破在于构建涵盖热－水－力全耦合的广义多相流数值框架（如改进的通用多相质量流模型）.关键在于引入内能守恒方程，量化颗粒剧烈碰撞与摩擦产生的热能如何消耗相变潜热，从而驱动固相冰瞬间转化为液相水（万佳威等，2024；张利民，2026）（图7左翼）.这种相变产生的自润滑效应是导致高位灾害远程运动的决定性因素.此外，针对未来气候情景下的阈值漂移难题，需利用气象学动力降尺度技术，将全球气候模式的宏观预测转化为流域尺度的动态气象边界条件（Chmiel *et al.*，2021；赵富萌，2024），解决非平稳气候背景下物源热力解锁的预测难题.

5.2 从静态库岸稳定向强震－工程全生命周期互馈的风险延拓

针对青藏高原东缘高地应力区的水电工程，必须直面水库诱发地震（RIS）与震后长效风险这一核心盲区.未来的攻关重点在于：（1）解析深部构造活化机制.在深切峡谷区，高坝蓄水产生的高水头压力与构造高地应力叠加，使得断层处于临界失稳状态.亟需建立三维渗流－应力－损伤耦合模型，确定断层从稳态锁固转向渗透活化的临界水力阈值，科学评估RIS风险（李为乐，2019；Zhao *et al.*，2023）.（2）揭示物源全生命周期演化规律.针对震后松散堆积体（隐性物源），需构建涵盖损伤愈合与水岩劣化竞争机制的长效演化模型（图7右翼）.重点解析震后20～50 a工程运行期内，在库水位消落与冻融循环双重驱动下，物源体物理力学参数的非线性衰减规律（Chen *et al.*，2023；Jin and Zhang，2025），填补从同震灾害向全生命周期风险预测的

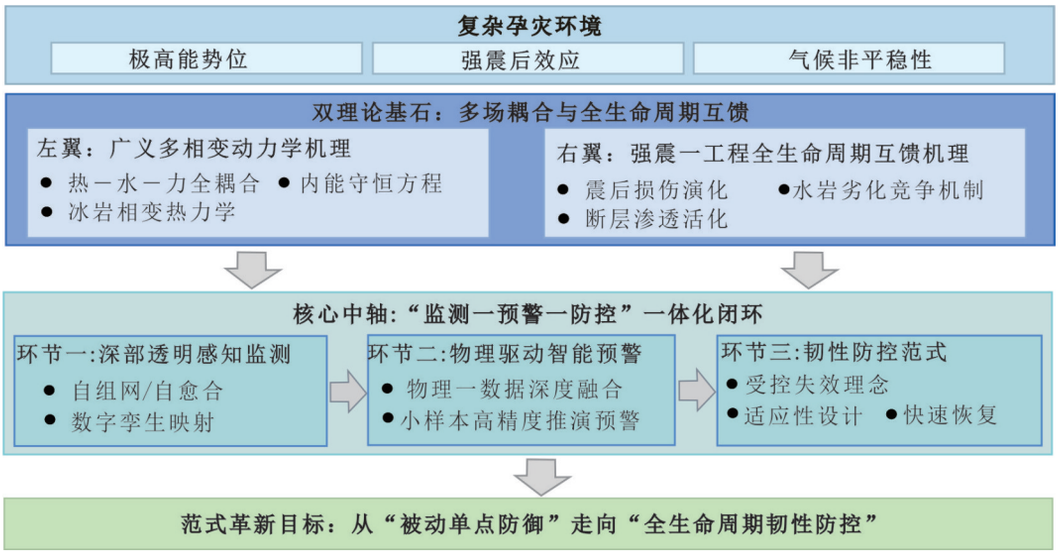

图 7　青藏高原水电工程区灾害防控未来技术架构与韧性范式

Fig.7　Future technological architecture and resilience paradigm for disaster prevention and control in hydropower development zones of the Qinghai-Tibet Plateau

理论空白.

5.3　从刚性对抗向物理–AI 互馈与韧性防控的范式转型

为解决上述高度非线性的多场耦合难题,单纯的数据驱动在高原小样本、无资料、高噪声区面临严重的泛化瓶颈.技术与管理范式的双重革新方向建议如下:在技术层面向物理驱动人工智能(Physics-Informed Neural Networks,PINN)演进.突破传统黑箱神经网络的局限,将纳维－斯托克斯(Navier-Stokes)方程、相变控制方程作为物理约束嵌入神经网络的损失函数(Guo *et al.*, 2025).这种物理法则＋稀疏监测数据的深度融合模式(图 7 核心引擎),能够在缺乏历史数据的极端区域,将前端离散的传感器数据实时映射为连续的数字孪生物理场,在无资料区实现从单点观测向全域高精度推演的根本性跨越;在管理层面确立全生命周期韧性的新范式.面对 RIS 和极端气候等不可消除的深度不确定性风险,工程防控设计需从追求绝对安全的刚性对抗转向韧性工程(吕雅兰等, 2025),并建立基于受控失效的设计理念(如允许拦挡结构发生局部破坏但维持系统整体功能),从根本上提升工程系统在极端冲击下的鲁棒性、适应性与快速恢复能力.

6　结论

(1)阐明了工程－构造－气候三元强驱动下的非平稳物源生成机制.研究表明,青藏高原水电工程区的灾害演化已实质性突破单一自然地质过程的边界.工程营力作为与内动力、外动力并列的第三驱动力,通过大规模开挖卸荷与弃渣堆积,深度重塑了地质体的损伤演化与物源再生过程.人造物源(工程弃渣)的间断级配特征致使其具备极高的静态液化敏感性,而气候暖湿化驱动的零度等温线抬升诱发了高海拔岩土体的冷生胶结解锁与垂直迁移.这种人造物源与天然高位物源的时空耦合,致使灾害驱动机制从传统的单源降雨激发向温控－雨控双源驱动发生结构性转折,动摇了基于历史静态数据的物源平稳性假设在极端环境下的适用性基础.

(2)揭示了冰岩相变热力学与震后损伤长效演化的多场耦合动力学规律.针对高位远程灾害与震后长效风险的机理认知瓶颈,构建了清晰的跨尺度物理演化链条:①在启动与运动阶段,剧烈的颗粒摩擦将机械能转化为内能,触发冰岩相变热力学反馈回路,产生的液相水膜通过超孔隙水压力效应实现基底自润滑,这是固相崩塌转化为液相流态并实现超长距离运动的物理根源;②在长效演化阶段,强震动力解锁与高地应力卸荷的耦合,在深部岩体中孕育了具有动态再生特征的震裂损伤网络,导致震后灾害演化呈现出区别于线性衰减的振荡式活跃与长尾效应.

(3)确立了从地表几何表征向内部物理场反演

监测预警与防控范式的根本性跨越.面对非平稳环境下的监测盲区与统计模型适用性瓶颈,监测技术正经历向内部物理场反演的代际演进,即利用地震动信号与深部多场感测技术,精准解析灾害体内部的流速、密度及动能演化,为无资料区的临界流态识别提供了关键性物理判据.未来的防控体系应致力于将物理守恒定律嵌入数据驱动模型,并革新绝对安全的刚性理念,转向适应极端不确定性的全生命周期韧性防灾新范式.

References

Chen, M. L., Yang, X. G., Zhou, J. W., 2023. Spatial Distribution and Failure Mechanism of Water-Induced Landslides in the Reservoir Areas of Southwest China. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(2): 442－456. https://doi. org/10.1016/j. jrmge.2022.04.004

Chmiel, M., Walter, F., Wenner, M., et al., 2021. Machine Learning Improves Debris Flow Warning. *Geophysical Research Letters*, 48(3): e2020GL090874. https://doi.org/10.1029/2020gl090874

Feng, L., Xin, B. Y., Xiang, X. K., et al., 2025. Near-Real-Time Seismic Monitoring Improves Deep-Seated Landslides Early Warning, Jiuxianping, China. *Engineering Geology*, 355: 108231.https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.108231

Guo, C. B., Wu, R. A., Zhong, N., et al., 2024. Large Landslides along Active Tectonic Zones of Eastern Tibetan Plateau: Background and Mechanism of Landslide Formation. *Earth Science*, 49(12): 4635－4658 (in Chinese with English abstract).

Guo, J. T., Zhu, H., Yang, Y. J., et al., 2025. Advances in Physics-Informed Neural Networks for Solving Complex Partial Differential Equations and Their Engineering Applications: A Systematic Review. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 161: 112044.https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.112044

He, C., Liu, E. L., He, S. M., et al., 2023. On the Supraglacial Rock Avalanches: Thermo-Hydro-Mechanical Analysis Considering Ice-Water Phase Transition. *Geomorphology*, 422: 108550. https://doi. org/10.1016/j.geomorph.2022.108550

He, S.M., Zhang, Z., Yan, S.X., et al., 2024. Disaster Seismology. *Mountain Research*, 42(5): 591－606 (in Chinese with English abstract).

Höttges, A., Rabaiotti, C., Facchini, M., 2024. A Ground-Breaking Distributed Fiber-Optic Pressure Sensor for Geohydraulic Applications. *Procedia Structural Integrity*, 64: 1613－1620. https://doi. org/10.1016/j. prostr.2024.09.416

Hou, W. P., Yu, G. A., Yue, P. S., 2023. Development and Geomorphic Characteristics of a Typical Debris Flow Fan in Alpine Valley: A Case Study of the Tianmo Gully in the Parlung Tsangpo Basin, Southeast Tibet, China. *Mountain Research*, 41(4): 532－544 (in Chinese with English abstract).

Huang, W. X., 2025. Change Plan for Anning Mainline Waste Disposal Site of Yunnan Central Water Diversion Phase Ⅱ Supporting Project. *Yunnan Water Power*, 41(12): 136－139 (in Chinese with English abstract)

Huang, Y.F., Yang, L.H., Song, X.F., et al., 2025. Development of the Spatial Distribution Dataset of Large and Medium-Sized Hydropower Stations in the Qinghai-Tibet Plateau (2024). *Global Change Research Data Publishing & Repository*, 9(4): 382－386(in Chinese).

Jia, Y. C., Xie, M. W., Chang, S. X., et al., 2017. A Model for Evaluation of Stability of Sliding- and Falling-Type Dangerous Rock Blocks Based on Natural Vibration Frequency. *Rock and Soil Mechanics*, 38(7): 2149－2156 (in Chinese with English abstract).

Jiang, L. F., Gao, S. R., Yin, X. T., et al., 2025. Engineering Properties of Engineering Excavation Waste and Evaluation Method for Instability Risk Zoning of Spoil Ground. *Results in Engineering*, 27: 106433.https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.106433

Jiang, Y., Lu, X. S., Liu, Z. M., et al., 2024. Experimental Study on the Engineering Properties and Failure Mechanism of Moraine in Southeast Tibet under Freeze-Thaw Cycles Conditions. *Engineering Failure Analysis*, 163: 108551. https://doi. org/10.1016/j. engfailanal.2024.108551

Jin, W., Zhang, G. T., 2025. Controls on Spatiotemporal Heterogeneity and Evolution of Debris Flows along a Traffic Corridor Affected by the Strong Wenchuan Earthquake. *CATENA*, 259: 109356. https://doi. org/10.1016/j.catena.2025.109356

Jin, Y. T., Wang, H. S., Liu, Y. P., et al., 2025. Numerical Study on High-Speed Train Derailment Caused by Debris Flow Deposition: A Case Study in China. *Engineering Failure Analysis*, 181: 109960.https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2025.109960

Khan, A., Gupta, S., Gupta, S. K., 2020. Multi-Hazard Disaster Studies: Monitoring, Detection, Recovery, and Management, Based on Emerging Technologies and Optimal Techniques. *International Journal of Disaster Risk*

Reduction, 47: 101642. https://doi. org/10.1016/j. ijdrr.2020.101642

Li, C.B., Liu, Y.P., Wang, H., 2015. Investigation Report on Debris Flow Development Characteristics and Engineering Impacts in the Yebatan Hydropower Station Project Area: CD228 KX-15-4(8). PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu (in Chinese).

Li, C. J., Hu, Y. X., Fan, G., et al., 2024. Exploring Debris Flow Deposit Morphology in River Valleys: Insights from Physical Modeling Experiments. *Engineering Geology*, 332: 107465. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2024.107465

Li, H. W., He, K., Li, B., et al., 2026. Topographic Amplification Effect of Strong Earthquake Ground Shaking in the Yarlung Tsangpo Grand Canyon: A Case Study of the 2017 Milin *M*S6.9 Earthquake. *Acta Geologica Sinica*, 100(4): 1506－1518 (in Chinese with English abstract).

Li, J. Y., Zhou, B. G., Wei, W., et al., 2023. Source, Attenuation, and Site Response of the Namche Barwa Area, Southeastern Tibetan Plateau, SW China, Derived from Seismic Data of the 2017 Mainling *M*S 6.9 Earthquake Sequence. *Journal of Asian Earth Sciences*, 257: 105854.https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2023.105854

Li, W. L., 2019. Study on Distribution Law and After-Effect of Coseismic Geological Disasters of Typical Strong Earthquakes. Chengdu University of Technology, Chengdu(in Chinese with English abstract).

Li, Y. J., Zhang, J., Jarsve, K. T., et al., 2025. Debris Flow Forecasting: Disastrous Rainfall Threshold Matters. *Landslides*, 22(7): 2461－2474. https://doi. org/10.1007/s10346-025-02492-0

Liang, X. Y., Ge, Y. G., Zeng, L., et al., 2023. Debris Flow Susceptibility Based on the Connectivity of Potential Material Sources in the Dadu River Basin. *Engineering Geology*, 312: 106947. https://doi. org/10.1016/j. enggeo.2022.106947

Liu, T. J., Zhang, M., Zou, D. J., et al., 2024. Analysis and Zonation of Freeze-Thaw Action in the Chinese Plateau Region Considering Spatiotemporal Climate Characteristics. *Engineering*, 42: 308－325. https://doi. org/10.1016/j.eng.2024.04.016

Liu, X. R., Cui, P., Wang, F., et al., 2018. Study on the Threshold Motion Mechanism of Engineering Slag Debris Flow with Different Particle Size Grading Conditions. *Journal of Engineering Geology*, 26(6): 1593－1599 (in Chinese with English abstract).

Liu, Z. F., 2023. Evaluation of Rainfall Thresholds Triggering Debris Flows in Western China with Gauged- and Satellite-Based Precipitation Measurement. *Journal of Hydrology*, 620: 129500.https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129500

Lü, F. X., 2024. Study on the Initiation Recognition of Gully Debris Flow Source Materials Based on Dynamic Characteristic Indicators (Dissertation). University of Science and Technology Beijing, Beijing (in Chinese with English abstract).

Lü, Y.L., Cui, S.H., Pei, X.J., et al., 2025. Exploration of Durability Evaluation for Ecological Remediation Engineering in Geological Hazard Governance. *Earth Science* (Online First)(in Chinese with English abstract).

Luo, J., Pei, X.J., Bai, Z.X., et al., 2026. A Hierarchical Multi-Factor Coupled Regional Preliminary Site Selection Method for Transportation-Project Spoil Disposal in Western Mountainous Areas. *Earth Science* (in Chinese with English abstract) (Online First).

Malik, A., Pao, W., Mohamad, H., 2026. Distributed Acoustic Sensing (DAS) in Multiphase Flow Monitoring: A Systematic Review. *Flow Measurement and Instrumentation*, 109: 103238. https://doi. org/10.1016/j. flowmeasinst.2026.103238

Murton, J. B., Peterson, R., Ozouf, J. C., 2006. Bedrock Fracture by Ice Segregation in Cold Regions. *Science*, 314(5802): 1127－1129. https://doi. org/10.1126/science.1132127

Peng, D. L., Zhang, L. M., Jiang, R. C., et al., 2022. Initiation Mechanisms and Dynamics of a Debris Flow Originated from Debris-Ice Mixture Slope Failure in Southeast Tibet, China. *Engineering Geology*, 307: 106783. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106783

Peng, J. B., 2025. Modernization of the Natural Disaster Prevention and Control System: A Paradigm Shift from Passive Response to Proactive Prevention. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 863 (in Chinese with English abstract).

Pudasaini, S. P., 2022. A Non-Hydrostatic Multi-Phase Mass Flow Model. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 147: 104204. https://doi. org/10.1016/j. ijnonlinmec.2022.104204

Qi, S. W., Guo, S. F., Li, Y. C., et al., 2025. Disaster Chains Induced by Disturbances in Major Projects under Special Environments: State of Art and Challenges. *Bulletin of National Natural Science Foundation of China*, 39(6): 1044－1057 (in Chinese with English abstract).

Qi, S. W., Li, Y. C., Liu, C. L., et al., 2024. Risk of Dis-

turbance Disasters of Hydropower Project in Hengduan Mountains. *Journal of Engineering Geology*, 32(3): 729－759 (in Chinese with English abstract).

Qu, G., Li, S. W., Li, C. H., et al., 2025. Comprehensive Analysis of the Catastrophic October 4th 2023 Glacial Lake Outburst Flood in the South Lhonak Lake, Sikkim Himalayas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60: 102578.https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102578

Qu, Y. L., 2020. Study on Mechanical Properties and Constitutive Model of Clay Coarse-Grained Soil in Cold Region under Freeze-Thaw Cycle (Dissertation). Chang'an University, Xi'an (in Chinese with English abstract).

Roering, J. J., MacKey, B. H., Handwerger, A. L., et al., 2015. Beyond the Angle of Repose: a Review and Synthesis of Landslide Processes in Response to Rapid Uplift, Eel River, Northern California. *Geomorphology*, 236: 109－131. https://doi. org/10.1016/j. geomorph.2015.02.013

She, D.B., Wang, T., Xiao, M.Y., 2021. Research on the Influence of Mountain Hazards in Glacier Areas on the Zixia Hydropower Station Project on Xiaqu River, Tibet. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu (in Chinese).

Wan, J. W., Gao, H. Y., Gao, Y., et al., 2024. Research on the Characteristics of the Sedongpu Glacial Debris Flow and River-Damming Hazards, Occurred in April 15 and May 14, 2024, in Xizang, China. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 35(6): 24－32 (in Chinese with English abstract).

Wang, H., Wang, B. B., Cui, P., et al., 2024. Disaster Effects of Climate Change in High Mountain Asia: State of Art and Scientific Challenges. *Advances in Climate Change Research*, 15(3): 367－389. https://doi. org/10.1016/j.accre.2024.06.003

Wang, T. F., Huang, T. S., Shen, P., et al., 2023. The Mechanisms of High Mobility of a Glacial Debris Flow Using the Pudasaini-Mergili Multi-Phase Modeling. *Engineering Geology*, 322: 107186. https://doi. org/10.1016/j.enggeo.2023.107186

Wu, D.B., Liu, Y.B., Zhao, C., et al., 2022. Thematic Study on the Assessment of the Impact of Mountain Hazards in Glacier Areas on the Yalong Hydropower Station Project on Yigong Zangbo River, Tibet. PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu (in Chinese).

Xiao, D., Zhao, X. Y., Fidelibus, C., et al., 2024. Effects of Freeze-Thaw Cycles on Sandstone in Sunny and Shady Slopes. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 16(7): 2503－2515. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.12.023

Xie, S., Lai, Y. M., Wu, L. Z., 2026. Process of a Rock Avalanche-Debris Flow in the Southeast Tibetan Plateau. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 18(4): 2743－2756. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.07.024

Xu, B., 2022. Study on the Dynamic Damage and Instability Mechanism of Bedding Reservoir Bank Slopes under the Influence of Rock Mass Deterioration in Hydro-Fluctuation Belt (Dissertation). Chongqing University, Chongqing (in Chinese with English abstract).

Xue, Y. G., Qu, J. K., Peng, J. B., et al., 2026. Main Unfavorable Geological Conditions and Gigantic Engineering Geological Problems of the Lower Reaches of the Yarlung Zangbo River. *Geoscience*, 40(1): 1－30 (in Chinese with English abstract).

Yan, Y. H., Wang, C. Y., Sui, Q. R., et al., 2026. Investigation on the Damage-Fracture Evolution and Early Warning of Instability Precursors in Locked Rock Slopes. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 143: 105504. https://doi. org/10.1016/j.tafmec.2026.105504

Yang, K., Zhou, X., Ma, X. G., et al., 2025. A Physically-Refined Regional Climate Model for the Tibetan Plateau. *Science Bulletin*, 70(23): 4070－4079. https://doi.org/10.1016/j.scib.2025.10.035

Yang, Y. G., Lei, S. B., 2024. Gigantic Engineering Geological Problems and Counter-Measures of Hydropower Development in Yigongzangbu Basin of Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 32(5): 1759－1770 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. P., 2024. Study on the Dynamic Mechanism and Early Warning of Outburst Debris Flow Based on Seismic Ground Motion Monitoring (Dissertation). Lanzhou University, Lanzhou (in Chinese with English abstract).

Yang, Y. P., Chen, G., Meng, X. M., et al., 2024. Characteristics of the Impact Pressure of an Outburst Debris Flow: Insights from Experimental Flume Tests. *Engineering Geology*, 330: 107428.https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107428

Yao, C. C., 2025. Study on the Spatiotemporal Evolution Law of Bank Collapse in the Initial Stage of Reservoir Impoundment in High Mountain and Deep Gorge Areas (Dissertation). Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing (in Chinese with English abstract).

Yin, F. L., Han, L. B., Jiang, C. S., et al., 2018. Interaction between the 2017 *M*6.9 Mainling Earthquake and

the 1950 *M*8.6 Zayu Earthquake and Their Impacts on Surrounding Major Active Faults. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(8): 3185－3197 (in Chinese with English abstract).

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. M., 2026. Coping with Risks of Geological Hazard Chains. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 48(1): 1－14 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Q., Liu, Y., Dai, F., 2026a. Deterioration of Flawed Sandstone after Freeze-Thaw Treatment Considering Frost Heave Pressure. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 18(1): 92－112. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.01.005

Zhang, Z. H., Guo, Y. H., Li, L., et al., 2026b. Effect of Construction Activities-Altered Soil Bulk Density on Spoil Heap Rill Erosion and Morphological Characteristics. *Soil and Tillage Research*, 258: 107026. https://doi.org/10.1016/j.still.2025.107026

Zhang, Q. Y., Zhang, Y. Y., Chen, D. K., et al., 2025a. Effect of Rainfall Intensity and Gravel Content on Hydraulic Characteristics and Hydraulic Parameters on Soil Erosion of Spoil Heaps: Laboratory Experiments with Simulated Rainfall. *International Soil and Water Conservation Research*, 13(2): 301－318. https://doi. org/10.1016/j.iswcr.2025.02.005

Zhang, S. L., Guo, X. J., Cheng, J. Y., et al., 2025b. Rainfall Thresholds of Debris Flows Built with Assistance of Artificial Intelligence in a Small Catchment. *Journal of Hydrology*, 660: 133440. https://doi. org/10.1016/j.jhydrol.2025.133440

Zhang, Y. S., Ren, S. S., Guo, C. B., et al., 2025. Application of Geomechanics in Risk Prevention and Control for the Geosafety of Major Projects on the Tibetan Plateau. *Journal of Geomechanics*, 31(5): 926－939 (in Chinese with English abstract).

Zhao, B., Su, L. J., Xu, Q., et al., 2023. A Review of Recent Earthquake-Induced Landslides on the Tibetan Plateau. *Earth-Science Reviews*, 244: 104534. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104534

Zhao, F. M., 2024. Study on the Development Characteristics and Susceptibility Prediction of Glacial Debris Flows in Southeastern Tibet under the Background of Climate Change(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y., Li, Y. J., Zheng, J. Y., et al., 2025. A New Rainfall Intensity-Duration Threshold Curve for Debris Flows Using Comprehensive Rainfall Intensity. *Engineering Geology*, 347: 107949.https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2025.107949

Zhou, J., Tang, M. G., Zhang, Q. F., et al., 2025. Comparison Study of Active Landslides in Four Giant Cascade Hydropower Station Reservoir Areas on the Jinsha River, China. *Geomorphology*, 491: 110033. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.110033

中文参考文献

郭长宝, 吴瑞安, 钟宁, 等, 2024. 青藏高原东部活动构造带大型滑坡成灾背景与灾变机制. 地球科学, 49(12): 4635－4658.

何思明,张振,闫帅星,等,2024. 灾害地震学. 山地学报, 42(5): 591－606.

侯伟鹏, 余国安, 岳蓬胜, 2023. 典型高山峡谷泥石流堆积扇发育过程及特征: 以藏东南帕隆藏布流域天摩沟为例. 山地学报, 41(4): 532－544.

黄文祥, 2025. 滇中引水二期配套工程安宁干线弃渣场变更方案. 云南水力发电, 41(12): 136－139.

黄隐锋,杨丽虎,宋献方,等,2025. 青藏高原大中型水电站分布数据集(2024)研发. 全球变化数据学报, 9(4): 382－386.

贾艳昌, 谢谟文, 昌圣翔, 等, 2017. 基于固有振动频率的滑移式和坠落式危岩块体稳定性评价模型研究. 岩土力学, 38(7): 2149－2156.

李崇标,刘云鹏,王皓,2015. 叶巴滩水电站工程区泥石流发育特征及其工程影响调查报告:CD228 KX-15-4(8). 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都.

李浩文, 贺凯, 李滨, 等, 2026. 雅鲁藏布大峡谷强震地震动地形放大效应: 以 2017 年米林 *M*S6.9 地震为例. 地质学报, 100(4): 1506－1518.

李为乐, 2019. 典型强震同震地质灾害分布规律及后效应研究(博士学位论文). 成都: 成都理工大学.

刘兴荣, 崔鹏, 王飞, 等, 2018. 不同粒径级配条件下工程弃渣泥石流启动机理研究. 工程地质学报, 26(6): 1593－1599.

吕夫侠, 2024. 基于动力学特征指标的沟谷型泥石流物源体启动识别研究(博士学位论文). 北京: 北京科技大学.

吕雅兰, 崔圣华, 裴向军, 等, 2025. 地质灾害生态化治理工程耐久性评估指标研究. 地球科学(网络首发).

罗璟, 裴向军, 白占雄, 等, 2026. 西部山区大型交通工程弃渣场多因素耦合层次递阶区域选址方法. 地球科学(网络首发).

彭建兵, 2025. 自然灾害防治体系现代化: 从被动应对到主动防控的范式转型. 中国科学基金, 39(6): 863.

祁生文, 郭松峰, 李永超, 等, 2025. 特殊环境下重大工程扰动灾害链: 现状与挑战. 中国科学基金, 39(6): 1044－1057.

祁生文, 李永超, 刘春玲, 等, 2024. 横断山区水电工程扰动灾害及风险分析. 工程地质学报, 32(3): 729－759.

屈永龙, 2020. 冻融循环下寒区黏质粗粒土的力学特性及其本构模型研究(博士学位论文). 西安: 长安大学.

佘德彬,王涛,肖淼元,2021. 西藏霞曲紫霞水电站冰川区山地灾害对工程影响研究. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都.

万佳威, 高浩源, 高杨, 等, 2024. 西藏色东普沟2024年两期冰川泥石流堵江灾害发育特征研究. 中国地质灾害与防治学报, 35(6): 24－32.

巫德斌,刘永波,赵程,等,2022. 西藏易贡藏布某水电站冰川区山地灾害对工程影响评价专题研究. 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 成都.

许彬, 2022. 消落带岩体劣化影响下顺层库岸边坡动力损伤及失稳机理研究(博士学位论文). 重庆: 重庆大学.

薛翊国, 渠敬凯, 彭建兵, 等, 2026. 雅鲁藏布江下游主要不良地质条件与重大工程地质问题. 现代地质, 40(1): 1－30.

杨友刚, 雷世兵, 2024. 青藏高原易贡藏布流域水电开发重大工程地质问题及对策. 工程地质学报, 32(5): 1759－1770.

杨云鹏, 2024. 基于地震动监测的溃决型泥石流动力机制与早期预警研究: 以白龙江流域为例(博士学位论文). 兰州: 兰州大学.

姚闯闯, 2025. 高山峡谷区水库蓄水初期塌岸时空演化规律研究: 以白鹤滩水库为例(博士学位论文). 北京: 中国地质科学院.

尹凤玲, 韩立波, 蒋长胜, 等, 2018.2017年米林6.9级地震与1950年察隅8.6级地震的关系及两次地震对周边活动断层的影响. 地球物理学报, 61(8): 3185－3197.

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.

张利民, 2026. 地质灾害链风险防控. 岩土工程学报, 48(1): 1－14.

张永双, 任三绍, 郭长宝, 等, 2025. 地质力学在青藏高原重大工程地质安全风险防控中的应用. 地质力学学报, 31(5): 926－939.

赵富萌, 2024. 气候变化背景下藏东南冰川泥石流灾害发育特征和易发性预测研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.