

• 自然灾害防治面临的挑战与应对 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0109

特殊环境下重大工程扰动灾害链:现状与挑战*

祁生文^{1,2**} 郭松峰^{1,2} 李永超^{1,2} 郭忻怡^{1,2} 鲁 晓^{1,2}
崔颖慧^{1,2} 郭叶霞³ 张斌龙⁴ 熊 峰⁵

1.中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化与环境演变全国重点实验室,北京 100029

2.中国科学院大学 地球与行星科学学院,北京 100049

3.中北大学 环境与安全工程学院,太原 030051

4.青海大学 土木水利学院,西宁 810016

5.合肥工业大学 土木与水利工程学院,合肥 230009

[摘 要] 随着我国重大工程向青藏高原、黄土高原等特殊环境区域及深地、深海、极地领域推进,工程扰动诱发的灾害链成为威胁工程安全与生态保护的核心挑战。本文整合国内外典型案例、理论成果与技术实践,从三个维度展开分析:明确区域(断层活化、水库诱发地震等)、地表(崩塌、滑坡等)、地下(岩爆、突涌水等)三类工程扰动灾害链的划分,揭示特殊岩土、气候—构造耦合、工程扰动(切坡、蓄水等)的协同孕灾机制;剖析多营力(内动力、外动力、工程营力)非线性耦合与多场(应力场、渗流场、温度场)互馈的致灾机理,梳理工程扰动灾害风险评价方法;总结工程扰动灾害链监测预警与防控技术进展,指出多系统耦合理论缺失、极端环境防控不足等瓶颈。研究表明,特殊环境下工程扰动灾害链具有“级联放大、时空关联”特征,未来需强化多场多尺度耦合理论与智能化、绿色化技术集成,构建全链条防控体系。成果可完善现有防控理论框架,为CZ铁路、YJ梯级水电等重大工程在防灾减灾方面提供理论支撑,提升我国重大工程防灾减灾能力。

[关键词] 重大工程扰动;灾害链;孕灾机理;风险评价;监测预警与防控

当前我国经济社会处于迈向高质量发展的关键阶段,基础设施建设正从传统平原地区向青藏高原、黄土高原等特殊环境区域纵深推进,重大工程的布局与建设规模实现跨越式增长。这一发展趋势既是国家“一带一路”倡议、新时代西部大开发及“双碳”目标落地的战略保障,也对工程安全与生态保护提出了前所未有的挑战。以青藏高原为例,第二次青藏高原综合科学考察数据显示,1910—2024年,该区域公路、铁路等线状工程总长度增幅达370倍,截至2023年,该区域大型水电工程增至778座,工程已广泛覆盖构造活跃带、高寒冻土区等复杂地质单元。黄土高原地区作为我国重要能源基地,在

资源开发与城镇化建设的双重需求推动下,重大工程活动强度持续增加。自1980年以来,该区域原煤产量整体呈稳定增长趋势,2023年突破9亿吨大关,大规模采矿活动形成的采空区已对周边地质环境造成显著扰动。此外,针对黄土高原沟壑纵横、可利用建设用地有限的特点,2012年启动的“平山造城”“治沟造地”工程规划新建城区面积达218.5平方千米,此类大规模土方工程直接改变了黄土高原原有的坡体平衡,进一步加剧了灾害风险。与此同时,习近平总书记明确指出,“向地球深部进军是我们必须解决的战略科技问题”,“在深海、深空、深地、深蓝等领域积极抢占科技制高点”。从深地塔科1井

收稿日期:2025-10-14; 修回日期:2025-12-09

* 本文根据国家自然科学基金委员会第410期“双清论坛”讨论的内容整理。

** 通信作者,Email:qishengwen@mail.iggcas.ac.cn

本文受到第二次青藏高原综合科学考察重大工程扰动灾害及风险专题(2019QZKK0904)的资助。

引用格式: 祁生文,郭松峰,李永超,等. 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,2025,39(6):1044–1057.

Qi SW, Guo SF, Li YC, et al. Disaster chains induced by disturbances in major projects under special environments: State of art and challenges. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 1044–1057. (in Chinese)

(钻探深度超10 000米)的地质探索,到南极秦岭站的极地科考保障,再到“深海一号”超深水大气田的商业化开采,这些工程不仅面临极端环境的考验,其建设运维过程中对地质环境的扰动更可能诱发新型灾害链,凸显了特殊环境下灾害防控研究的战略紧迫性。

需要注意的是,特殊环境区域往往面临高海拔、低温、干热、高温、昼夜温差大、盐渍侵蚀、沙尘频发等复杂环境问题,且普遍存在地质条件复杂、自然环境恶劣、生态系统脆弱等突出特征^[1]。在这类区域开展大规模工程建设与运营活动,极易对工程周边区域产生强烈扰动,打破原有地质环境与生态系统的稳定平衡,进而诱发各类工程扰动灾害。该类灾害核心特征在于其“工程扰动”与“链式灾害”效应。不同于常规环境下的单一自然灾害,特殊环境中,开挖、蓄水、堆载等工程行为会通过改变应力场、渗流场、温度场,触发“原生灾害—衍生灾害”等连锁反应^[2-7]。如1963年意大利瓦伊昂水库蓄水后,孔隙水压力升高导致库岸岩体抗剪强度降低,诱发大规模滑坡,在水库中激起巨大涌浪,最终造成下游2 600余人死亡,该案例揭示了工程扰动与特殊地质环境耦合致灾的毁灭性后果。在国内,如2003年三峡库区千将坪滑坡,由水库蓄水扰动诱发,滑坡体积达2 400万立方米,造成24人死亡,直接摧毁千将坪集镇及大量基础设施,且导致334省道长约2.2 km的路段被毁^[8]。2010年舟曲泥石流,因三眼峪沟公路切坡扰动松散物源,经强降雨触发后形成特大泥石流堵塞河道并形成堰塞湖,导致舟曲县城三分之一区域被淹没,1 765人死亡^[9]。上述案例均表明,特殊环境下工程扰动灾害链的演化过程涉及能量传递、灾种转换等复杂机制,且随着灾害链的延伸,其影响范围与破坏强度均呈指数增长趋势。

本文首先给出重大工程扰动灾害链的定义,进而系统梳理了特殊环境下该类灾害链的类型与孕灾环境基底,在此基础上深入揭示其致灾机理,系统分析核心风

险的评价体系与方法,继而梳理当前监测预警与韧性防控技术体系,最终凝练该领域面临的核心科技挑战,并展望未来研究的重点方向与关键思路。重大工程扰动灾害链的研究不仅有助于完善特殊环境下重大工程扰动灾害链理论体系,还能为CZ铁路、YJ梯级水电、西北能源基地等国家重大工程的规划、设计、施工、运维提供科学支撑,为我国特殊环境下重大工程的高质量发展筑牢防灾减灾屏障。

1 重大工程扰动灾害链类型与孕灾环境

1.1 重大工程扰动灾害链类型

重大工程作为国家能源开发、基础设施建设与国防安全保障的核心载体,涵盖资源开采、工农业设施建设、跨区域基建等多元领域,其全生命周期(规划、设计、施工、运维)均需通过工程措施实现对自然环境的改造与利用。从类型上划分,重大工程包括重大水电工程(大I型、大II型)、铁路工程、重大公路工程(国道、高速)、重大采矿工程、重大城镇口岸、国防基地工程、重大油气开采等。这些工程项目在建设过程中常伴随切坡开挖、水库蓄水、地下开挖、弃渣堆载等高强度工程扰动行为,极易打破地质环境原有的平衡状态。

重大工程扰动灾害链,是指人类工程活动扰动地质环境,导致工程地质体、应力场、渗流场及温度场等要素发生变化,进而引发的危及工程安全的灾害链,既包括工程建设与运维过程中诱发形成的灾害链,也涵盖对工程产生危害的自然灾害链。基于扰动形式与荷载变化,可将其划分为区域灾害、地表灾害和地下灾害三大类(图1)。上述工程扰动具体包括:水电工程修建引发的切坡、水库蓄水及少量地下开挖扰动;公路工程修建带来的切坡、弃渣堆载扰动;铁路工程修建产生的地下开挖与切坡扰动;采矿工程修建造成的地下开挖扰动及弃渣堆载扰动等。其中,水库蓄水扰动表现为蓄水后水体加载、渗透弱化断层,引发区域灾害中的断层活化,进而

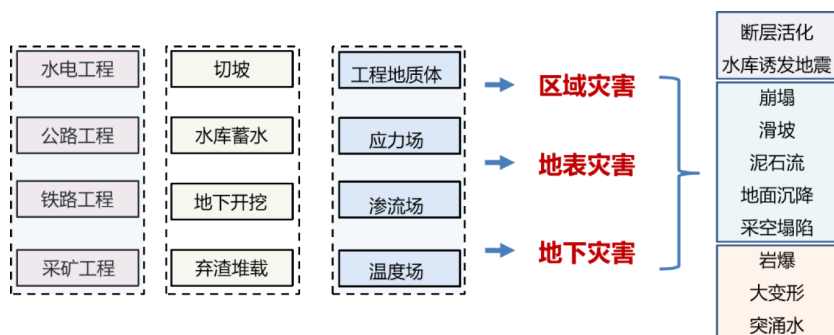


图1 重大工程扰动灾害链类型

Fig.1 Types of Disaster Chains Caused by Major Engineering Disturbances

诱发水库地震,典型案例有印度科伊纳水库地震和新丰江水库地震。切坡扰动易导致滑坡、崩塌、泥石流等地质灾害,在水电工程中多发生于蓄水初期和库水位波动期,如意大利瓦依昂水库滑坡;在公路与铁路工程中,则集中于切坡区域或隧道洞口,如G318线帕隆藏布峡谷段位于板块碰撞带,山体破碎,相关灾害频发。地下开挖扰动在西南山区等高地应力区域,易诱发岩爆、大变形等地下灾害;在岩溶地区或存在地下含水层的区域,可能出现突涌水灾害,如雅鲁藏布江缝合带附近的CZ铁路巴玉隧道岩爆、祁连山褶皱带的兰新铁路乌鞘岭隧道大变形,以及岩溶地区的贵南高铁朝阳隧道突水^[10]。采矿工程中大面积地下开采,会诱发地面沉降、采空塌陷等地质灾害,少数情况下还会引发矿震等区域灾害,如波兰莱格尼卡—格沃古夫铜矿区矿震、美国俄克拉荷马州地震群及辽宁抚顺老虎台矿震。弃渣堆载扰动易引发滑坡,若遇暴雨激发,可能进一步诱发泥石流,典型案例包括深圳光明滑坡、甘肃天水至定西高速公路弃渣场泥石流。

1.2 重大工程扰动灾害链孕灾环境

1.2.1 区域物质条件为重大工程扰动灾害链提供了本底差异

从区域物质条件来看,我国特殊岩土的地域性分布特征为重大工程扰动灾害链提供了差异化的“孕灾本底”。(1)青藏高原沿区域缝合带和活动断层广泛分布的构造混杂岩以及构造破碎岩是极具区域特点的致灾本底条件,这类岩体岩性复杂、强度不均、结构破碎、软弱面发育^[11]。其分布区域的工程地基或隧道围岩的物理力学性质在短距离内变化剧烈,均匀性极差,难以准确勘测,极易导致工程边坡失稳或隧道洞壁坍塌。(2)中东部平原的软土具有高压缩性、低强度、透水性差的特点,易导致地基发生长期沉降和失稳问题,威胁工程建设。(3)黄土高原的湿陷性黄土具有大孔隙、垂直节理发育的特征,遇水后易发生突发性湿陷变形,引起建筑物不均匀沉降和边坡失稳^[12,13]。(4)东南沿海丘陵地区的红层具有上硬下软、裂隙发育的特点,容易产生地基不均匀沉降和边坡失稳^[14]。(5)云贵高原地区广泛发育由化学沉积岩形成的岩溶地貌,地下溶洞、溶隙的存在易引发地面塌陷和水库渗漏问题^[15]。(6)高海拔和高纬度地区的冻土存在冻胀和融沉现象,影响工程建设^[14,16]。

1.2.2 构造地貌格局为重大工程扰动灾害链提供了内驱动力

构造地貌格局作为重大工程扰动灾害链的“内驱动力”,通过塑造地形高差、控制构造活动强度,为灾害链的形成提供了能量基础。我国地势三级阶梯的宏观格

局是构造地貌控制灾害分布的核心体现:第一级阶梯(青藏高原)平均海拔在4 000 m以上^[17],受印度板块与欧亚板块碰撞挤压,区内地壳持续隆升^[18]。强烈的构造活动使岩体储存了巨大的构造势能与重力势能。这使得岩体接近于临界平衡状态,任何工程扰动(如开挖边坡、隧道掘进、水库蓄水)都可能诱发超大规模、高位远程的岩崩、滑坡和碎屑流,其运动距离和破坏范围远超普通山区。第二级阶梯(黄土高原、云贵高原等)为高原向盆地的过渡带,高差显著,重力势能集中释放,导致该区域灾害链类型最丰富,发生频率最高,与人类工程活动的交互作用最强烈。如黄土高原地区因工程开挖形成的人工高陡边坡,在降雨入渗作用下,易发生大规模滑坡。第三级阶梯(东部平原丘陵)处于沉降堆积地带,地势平缓,重力势能减弱,是中国人口最密集、经济最发达的区域。区内覆盖深厚的风化残积土,其稳定性依赖土粒间的结合力和植被根系的加固。在人类工程扰动及强降雨入渗作用下,可引发地面沉降、浅层滑坡和坡面泥石流等问题。

1.2.3 气候变化为重大工程扰动灾害链提供了外驱动力

气候变化作为重大工程扰动灾害链的“触发器与放大器”,通过改变降水格局、气温分布与海平面高度,显著提升工程扰动的致灾风险。根据《中国气候变化蓝皮书(2025)》,1961—2024年我国地表平均气温升温速率达 $0.31\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,2024年地表平均气温较常年值高出 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$,极端降水与高温事件频次也逐年增长^[19]。

降水格局改变直接激发滑坡、泥石流等灾害。极端强降水事件的增多使工程扰动形成的不稳定边坡更易失稳^[19];降雨季节反常打破岩土体含水量平衡,使基于历史数据的灾害预警阈值失效^[20]。温度升高造成冻土退化,引发热融滑塌、融沉,直接威胁工程稳定性,永久冻土融化甚至可能引发大规模的山体失稳,这对青藏高原及高海拔地区的工程影响尤为剧烈^[21,22];冰川持续退缩会暴露大量新鲜破碎的冰碛物与基岩,为泥石流、滑坡灾害储备了丰富物源;同时,冰川融水持续汇入冰湖使其规模不断扩张,冰碛坝稳定性逐渐降低。一旦冰碛坝溃决,将迅速形成破坏力极强的冰湖溃决洪水或泥石流,对下游桥梁、水电站、道路及居民聚集区造成毁灭性冲击,严重威胁重大工程安全与人员生命财产安全^[23]。

在沿海地区,海平面上升与风暴潮对海岸带工程构成双重威胁,直接影响我国沿海经济发达地区。一方面,海平面上升会加剧海岸侵蚀,淹没沿海低地,对上海、天津等软土城市威胁更突出,既抬高地下水位加剧沉降与防洪压力^[24],还因海水入侵侵蚀地下淡水层,影

响地基稳定性^[25]。另一方面,风暴潮与台风/飓风叠加,破坏力显著提升,威胁海堤、跨海大桥等重大工程安全^[26,27]。

2 重大工程扰动灾害链致灾机理与风险评价

2.1 重大工程扰动灾害链致灾机理

重大工程扰动灾害链的致灾机理,本质是地球内动力、外动力与人类工程营力的非线性耦合过程,而非单一因素的孤立作用,其中工程营力指人类工程活动(如开挖、蓄水、堆载)对地质环境产生的作用力,是诱发灾害链的人为驱动因素。这一过程通过改变地质体的物理力学特性,破坏地质环境的平衡状态,逐步触发“工程扰动—强度劣化—灾变启动—链式传导”的完整链条,其核心逻辑在于多源动力的协同叠加与多场(应力场、渗流场、温度场)的互馈作用,最终导致灾害的级联放大。

2.1.1 气候—构造耦合控灾机制

我国幅员辽阔,气候带分异显著,地质构造复杂多样,共同奠定了灾害链差异化的孕灾本底。构造活动作为“内生动力”,控制灾害的宏观分布;气候因素(主要是降水)作为“外生动力”,以动态周期性作用弱化地质体力学性能,触发灾害。二者通过多尺度非线性耦合机制共同控制灾害发生。例如,在构造活动强烈区,岩体裂隙发育形成降水入渗优势通道,极端降雨渗入后软化结构面、提升孔隙水压力,大幅降低岩体抗剪强度,进而触发地质灾害或加速地质灾害发生。

河流下切是探究气候变化和构造运动耦合致灾的重要窗口,构造抬升驱动河流下切,气候波动通过改变径流量、泥沙输移量调节下切与侧蚀强度,既影响河谷两侧斜坡稳定状态和演化过程,也制约深切河谷区重大工程布局。以青藏高原澜沧江断裂带典型小流域为基本单元的研究表明,流域内河流阶地的形成、河床加积和下切过程具有明显的气候和构造效应。在气候效应作用下,大量的冲洪积物被不断冲进沟道进行堆积,抬高河床,在 $10^2\sim 10^5$ 年的时间尺度上滞缓构造抬升作用下的河流下切过程,而构造抬升效应在超过 10^6 年的时间尺度上持续控制河流下切过程。气候短周期的多次加积滞缓构造长周期的下切,是河流下切速率“Sadler”效应产生的原因^[28]。

2.1.2 工程扰动致灾机理

人类工程活动对孕灾环境的扰动是诱发并加剧重大工程扰动灾害链的核心驱动因素。工程扰动主要形式可归为露天开挖、水库蓄水、地下开挖/爆破、弃渣堆载等四类,各类形式通过改变地质环境平衡状态,触发差

异化的灾变过程。

露天开挖是交通、水利工程中最常见的扰动模式。天然条件下的边坡处于自然平衡稳定状态,而开挖改变坡形,打破边坡内部原有应力平衡,使应力场发生调整,在新形成的临空面表层一定深度内发生卸荷回弹,岩土体内部出现裂隙,导致表层岩土体松散破碎,抗风化、侵蚀能力及强度显著下降,边坡稳定性逐渐降低^[10]。这些裂隙逐渐发展,当在岩体内部形成贯通面时,坡体整体失稳破坏^[13]。

水库蓄水通过水位变动打破库岸边坡原有平衡,进而可能引发岸坡失稳或古滑坡复活^[29]。水库蓄水致灾过程可大致划分为三个阶段^[30]:(1)蓄水初期,即蓄水后1~2年(正常蓄水阶段),水库淹没使岸坡岩土体含水量增加,孔隙水压力升高,有效应力降低,削弱坡体抗剪强度。水位快速上升时形成的指向坡内的渗流压力利于库岸边坡的稳定,而水位下降时指向坡外的渗流压力不利于坡体稳定^[31]。(2)蓄水后3~4年(稳定运行阶段),水位周期性升降尤其是水位快速下降成为水库滑坡发育的主控因素,同时蓄水导致的库岸变形破坏为降雨的入渗提供了通道,二者协同加剧灾害。(3)蓄水5年后(长期适应阶段),岸坡逐步适应水位周期性波动,降雨成为灾害发育的主控因素。前两个阶段的滑坡碎屑堆积在坡脚,进而增强坡体抗滑能力,使岸坡灾害发生频率大幅降低,甚至低于蓄水前,岸坡最终达到新的平衡状态。

隧道、地下洞室、矿产开采等地下工程开挖以及工程爆破活动引起的扰动应力演化、地应力卸载、动静应力叠加、裂隙扩展等过程是深部围岩灾变失稳的重要原因^[32-35]。开挖会引起应力重分布,进而导致应力集中,使得围岩破裂范围扩大,破裂程度加剧,同时开挖后的持续卸荷会进一步凸显围岩的渐进破坏特征^[36]。Guo等^[37]研究发现,开挖卸荷后高储能硬脆性岩体破坏的裂纹贯通发生于强度跌落段,且工程扰动会加剧岩体破坏程度,使破坏形式由剪切破坏主导转变为张剪混合破坏。工程爆破是瞬时、高强度的“动力冲击”过程,其产生的应力波在围岩中传播,直接导致围岩产生新的裂隙网络,形成潜在破坏面,并可能在爆破瞬间发生崩落等动力破坏^[38,39];爆破后一段时间,由于损伤岩体的力学性能劣化,在静载作用下可能发生延时塌方或大变形。

弃渣堆载指工程建设中产生的土石方废弃物在特定区域的堆放。当荷载超过边坡岩土体的承载能力时,可能导致边坡失稳;当荷载超过下伏地基的承载能力时,将导致下伏软弱层(如软土)剪切破坏,引发地基失稳。此外,松散弃渣自稳能力较差,外力扰动下极易发

专门的、系统性的方法体系。现有评价方法多聚焦单一灾种(如滑坡、泥石流),通过确定性系数法、极限平衡法等开展易发性、危险性与易损性评估,虽能满足单一灾害的风险研判需求,但难以适配灾害链“级联性、传导性”的核心特征。这类方法往往将灾害链各环节解耦计算,既无法量化原生灾害向次生及衍生灾害的传递概率,也难以覆盖多灾种在时空维度的关联效应,同时忽视了灾害链非线性演化的动态特征与不确定性,难以实现全链条风险的精准刻画^[6,7]。基于此,建议构建分工程阶段的差异化、精细化评价体系^[45]。

3 重大工程扰动灾害链监测预警与防控技术

重大工程扰动灾害链监测预警与防控技术对于保障工程施工和运行安全、减少人员伤亡和财产损失、提升区域防灾减灾能力具有重要意义。随着CZ铁路、YJ梯级水电、青藏高原及西部大型矿区等活动构造区重大工程建设规模的扩大,在全球气候变化导致自然灾害频发的背景下,重大工程扰动灾害链的复杂性、突发性与破坏性日益突出,传统的单一灾害防控手段已难以适配“链式演化、级联放大”的灾害特征,亟需构建多源信息融合、智能分析决策、全链条系统防控的监测预警与防控技术体系,以破解特殊环境下工程安全保障的关键难题。针对这些难题,本节提出了面向重大工程扰动灾害链的创新监测平台以及用于提高工程韧性的防控装置,为复杂环境下重大工程的安全建设和平稳运行提供技术支撑。

3.1 重大工程扰动灾害链监测与预警技术

近年来,国内外学者围绕重大工程扰动灾害链的监测与预警技术开展了系统研究,相关成果在重大水电、深部采矿、深埋隧道等领域得到广泛应用^[46]。随着卫星遥感、无人机遥感、北斗导航系统、物联网等技术的快速发展^[47,48],重大工程扰动灾害监测取得了显著进展,监测精度与覆盖范围显著提升。但受限于不同监测技术的维度差异与指标异质性,多源传感器数据的融合存在数据校准难、信息冗余度高、特征提取不一致等问题,导致多源技术的协同性显著不足^[48,49]。这一现状直接导致现有监测与预警系统在覆盖范围、监测精度、风险识别能力等方面存在短板,系统的全面性与可靠性亟待提升。

重大工程扰动灾害链预警主要从诱发因素监测和灾害体变形监测两个方面展开。其中,重大工程扰动灾害链诱发因素主要包括外部因素和内部因素,外部因素主要以降水和地震动作用为主,内部因素则包括裂隙水压力和应力改变。针对降水量与裂隙水压力这两大关

键致灾因子,主要通过布设雨量计、渗压计等设备,设定临界雨量阈值与孔隙水压力阈值,进而构建预警模型,实现对灾害诱发条件的动态监控与早期信号识别^[50,51];灾害体变形监测则可以通过在时间尺度上将灾害变形划分为“缓慢变形—加速变形—失稳破坏”等不同阶段^[52],建立融合位移量与位移速率的综合判据,以精准捕捉灾害体变形演化规律,为分级预警提供量化依据。

目前监测预警中常用的合成孔径雷达干涉测量(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)技术,虽能实现大范围形变监测,但在高精度监测方面仍存在误差,难以满足重大工程对细微形变的捕捉需求。监测数据与工程风险评估模型的耦合深度不足,多数情况下仅实现“数据展示”而非“智能研判”,未能充分发挥形变、渗压监测数据在风险研判中的支撑作用。此外,在工程运行期的核心应用场景,如形变监测和风险源早期预警中,遥感监测技术普遍存在定量化分析能力薄弱、时空分辨率难以满足工程需求、“天—空—地”多尺度监测体系协同性不足等难题^[53-55]。

针对以上瓶颈,在公路工程领域已有研究团队研发山区公路典型地质灾害协同感知与预警关键技术^[56],为重大工程扰动灾害链监测防治工作奠定了基础。但现有技术体系在多源信息深度融合、自动化处理链构建以及实时风险识别能力方面仍有待提升。

为此,部分研究者提出构建融合全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)的多传感器集成系统,通过整合“天—空—地”多维度监测数据,建立一体化实时监测体系,提升灾害预警的连续性与可靠性^[57]。在此基础上,创新搭建了GNSS实时监测平台,涵盖前端数据采集、稳定数据传输、高效数据处理及智能预警发布四大功能模块(图3),实现了从原始数据采集、高精度解算到形变信息提取与风险分析的全自动、近实时处理^[58,59],有利于为重大工程扰动灾害链的风险识别、形变预测及应急响应提供关键技术支撑。

以信息化与监测预警技术为核心,该平台体系涵盖防灾减灾的日常管理和近实时监测,为重大工程安全运行和长期稳定提供有力保障。在该创新性平台体系指引下,重大工程扰动灾害链防治将向科学化、系统化与规范化发展。

3.2 重大工程防控技术与工程韧性提升

相较于监测预警的“被动响应”,采用适当的工程防控技术提升工程本身的韧性也是灾害防控的关键一环。工程韧性是指系统在面对外部干扰(如灾害)时,抵抗、吸收、适应并从其影响中恢复的能力,包括通过风险管理保护和恢复其基本结构和功能^[60]。工程防控的核心

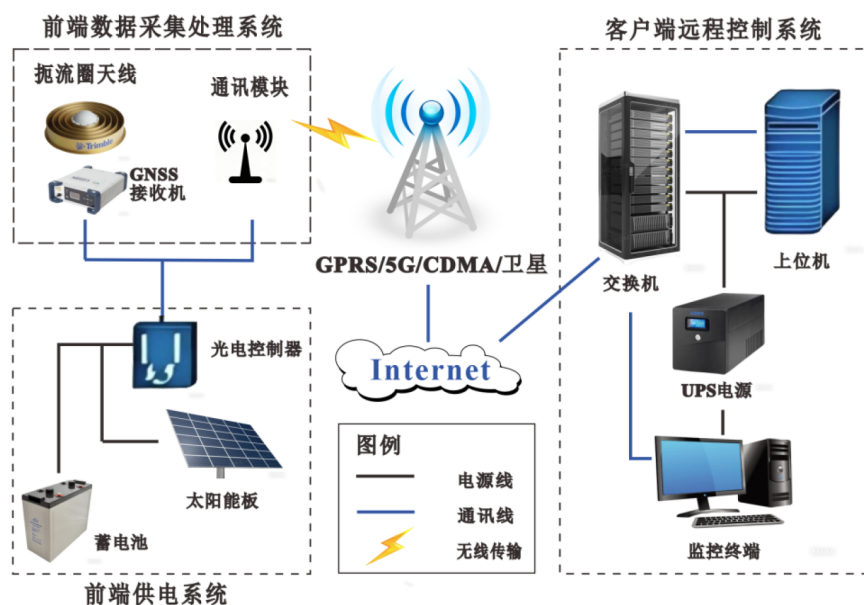


图3 活动构造区岩质边坡GNSS监测系统架构图

Fig.3 GNSS Monitoring System Architecture Diagram for Rock Slope in Active Tectonic Zone

则在于通过灾害预防、风险识别、应急响应以及系统恢复与适应能力的提升,来增强工程整体的抗扰动和恢复力。目前,通过工程防控增强工程韧性的理念已在煤炭开采、铁路建设等领域得到广泛应用^[61-63],并在优化施工管理、提高工程质量和增强工程抗灾能力方面发挥了积极作用。

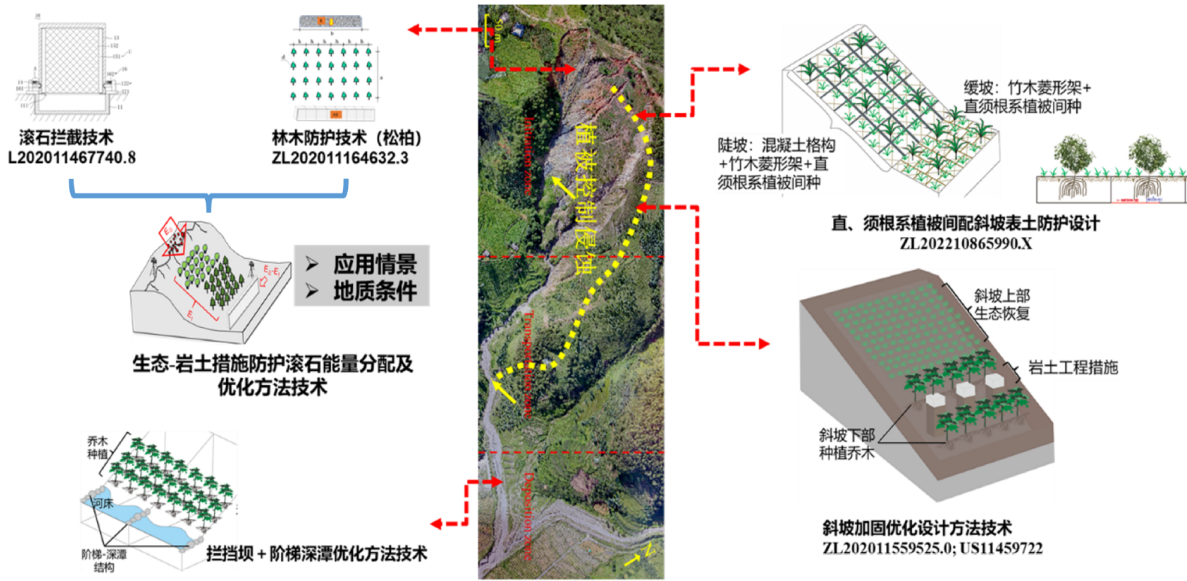
针对工程扰动的表层风化岩体因雨水冲刷易诱发灾变的实际工程问题,孙乔宝等^[64]基于团聚凝胶与阳离子交换原理,研发出抗冲刷保水稳固剂与错台竹木格构梁协同应用的长效低碳修复技术。该技术可在风化岩体颗粒间形成致密膜状结构,通过优化地质体的结构强度与水理特性,显著提升边坡表层抵御雨水冲刷的能力。王文生等^[65]通过对植物根系的力学作用分析,建立了草本植物根系的加筋力学模型及木本深根植物的锚固力学模型。相较于传统挡土墙、桩板墙、浆砌片石护坡等技术^[66],该技术不仅克服了重型刚性防护施工效率低、开挖边坡临时防护不及时、降雨冲刷易引发滑塌等问题,还具备显著的经济与生态效益,有利于达成活动构造区工程扰动边坡灾变防控与长期稳定性维持的双重目标。

绿色防控技术是破解“工程建设与生态保护矛盾”的关键路径,其核心在于通过生态工程与岩土工程的协同,实现人类活动与自然环境的和谐共处^[67]。20世纪60年代,高速公路建设起步较早的美国、日本及欧洲部分发达国家和地区,已率先将生态保护与恢复举措纳入高速公路建设范畴,为工程建设中的生态保护实践奠定了基础。从20世纪90年代开始,我国公路工程边坡防护

技术从传统方法逐步向生态防护方法转变^[68],至21世纪初,我国关于绿色施工、绿色防控技术的研究逐渐增多。随着社会经济的发展和我国特殊环境下重大基础设施建设规模不断扩大,传统单一的岩土工程措施在工程稳定性保障方面虽然取得了一定成效,但在生态环境保护方面仍存在不足。祁生文等学者逐渐突破已有重大工程边坡防护中“岩土工程措施为主、生态工程措施为辅”理念的局限,针对生态工程措施与岩土工程措施协同的绿色减灾关键技术问题,提出了生态工程措施协同减灾防护的新思路(图4)^[69-74]。通过系统研究边坡治理防护的关键技术参数、方法和模式,建立了生态工程措施防灾减灾的评价方法。

为解决山区岩质边坡深层失稳防控难题,有学者对传统防护结构在复杂工况下的局限性展开专项攻关。传统岩土工程中常用的锚杆装置,在地震等动载荷作用下难以有效抑制边坡变形破坏,易出现锚杆拉断或与孔壁滑脱等失效问题。这不仅无法满足坡体抗震稳定性需求,也难以实现结构—坡体的协同动力响应,成为制约特殊环境下重大工程边坡深层防护效果的关键技术瓶颈。徐敏等^[75]采用ABAQUS有限元软件,对伞状抗拔锚与抗拔桩的原位抗拔试验开展数值模拟,评估桩锚结构性能;Mei等^[76]则基于实验室模型试验,开展原位静力荷载试验,通过试验数据与模型结果的对比较证,为伞状抗拔锚在实际工程中的应用准确性与技术价值提供了科学依据。

现有研究虽对伞状抗拔锚的受力特性和工程适用性提供了重要参考,但在应对强震作用下的岩质边坡深

图4 山地公路边坡绿色调控系统集成技术体系^[70-74]Fig.4 Comprehensive Integrated Technology System for Green Regulation and Control of Mountain Road Slopes^[70-74]

层防护需求方面仍显不足,亟需更具吸能能力和动力适应性的装置。为此,Guo等^[77]创新地提出了伞状结构吸能锚杆装置,该装置在动静载荷下均具备较高强度与延展率,同时能通过增加阻抗实现吸能效果;该研究构建了一套强震区边坡深层防治结构动力响应规律评估流程(图5),可兼顾桩锚结构安全性、坡体抗震稳定性及桩锚结构—坡体动力响应三者需求。

随着我国重大工程建设逐步向西部特殊环境推进,以及西部大开发等国家发展战略的持续实施,特殊环境重大工程在国家基建项目中占比日益提高。不断完善多源信息融合、智能化、系统化的监测预警与防控技术体系,有利于减少因工程扰动导致的环境变化所引起的链式地质灾害问题,更有利于保障我国重大工程施工和运行过程中的安全性。未来既要进一步深化对各类灾害作用机制与演化规律的基础研究,为优化现有防治技术、开发新型防护材料与结构提供坚实的理论支撑,也要大力推动科技创新与技术集成应用,加速天—空—地—体一体化监测网络的全面覆盖与深度融合,全方位提升我国重大工程扰动灾害链防治的整体能力与水平,为国家重大战略实施与经济社会可持续发展筑牢安全屏障。

4 重大工程扰动灾害链研究面临的科技挑战与未来方向

4.1 科技挑战与需求

重大工程扰动灾害链涉及“自然营力—工程活动—地质体响应”的复杂交互,与单灾种研究“聚焦孤立灾

害、简化影响因素”的模式差异显著。当前该领域研究既受核心理论瓶颈制约,又面临重大工程实践的迫切需求,具体体现为两大核心理论瓶颈与六大工程实践难题。

4.1.1 核心理论瓶颈

单灾种研究常割裂自然营力与工程活动的关联,或仅关注地质体宏观失稳结果。而灾害链“级联放大、多源驱动”的特征,使其必须突破这种简化思维,当前核心理论瓶颈主要体现在以下两方面:

(1) 内外动力与人类营力共同驱动下地质体结构演化机制不清。单灾种研究多孤立分析内动力、外动力或工程营力的作用,而灾害链的孕育本质是三者协同驱动。当前研究对地质体“微观裂隙萌生—中观结构面贯通—宏观地质体破碎”的跨尺度演化路径认知不足,制约了灾害链形成机理的系统揭示。

(2) 气候—构造—地貌—重大工程多系统时空耦合与互馈理论缺失。单灾种研究多聚焦单一系统与灾害的关联,而灾害链的触发与演化是多系统时空协同的结果。气候变化通过改变水文地质条件激活构造脆弱带,与工程扰动共同产生链式灾害效应,其时空耦合关系与反馈机制尚无完善的理论框架及定量表征体系。

4.1.2 重大工程实践难题

我国CZ铁路、YJ梯级水电等重大工程向特殊环境纵深推进,上述理论瓶颈直接转化为工程防控难题,其中六大场景需求最为突出:

(1) 高寒山区重大交通工程灾害链生理与韧性防控难题。对应CZ铁路等高寒山区重大交通工程,该区

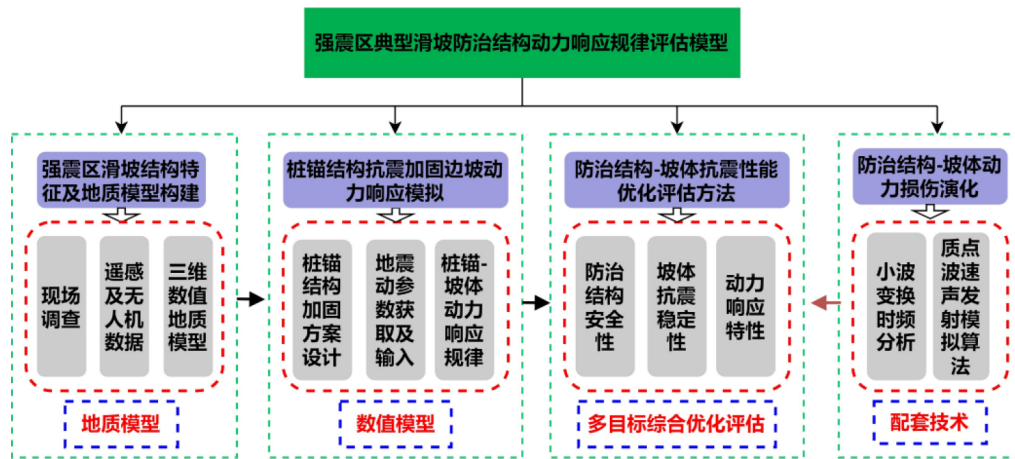


图5 典型滑坡防治结构动力响应规律评估模型

Fig.5 Evaluation Model for Dynamic Response Law of Typical Landslide Prevention and Control Structures

域面临“冻融循环—冰川活动—强烈构造—极端气候—剧烈工程扰动”多动力耦合环境,灾害呈现显著链生性与并发性特征。因“内外动力与人类营力共同驱动下地质体结构演化机制不清”,当前对灾害链生机理的认知不足,亟需明晰多动力耦合下灾害链的触发与演化规律,构建具备高适应性与快速恢复功能的韧性交通生命线防控系统,解决现有措施针对性与抗灾韧性不足的问题。

(2) **流域梯级水库地质体联动响应与长期稳定性预测难题。**聚焦澜沧江、金沙江等流域梯级水库工程,核心问题为库水周期性涨落与地质体的复杂相互作用,引发地质体表—浅—深圈层的联动响应。受“多系统时空耦合与互馈理论缺失”制约,无法充分揭示渗流驱动下“应力—渗流—温度”多场耦合响应规律,亟需突破地质体时效变形与长期稳定性预测瓶颈,精准预判库区地质体的长期演化趋势,保障梯级水库安全运维。

(3) **西北干旱区极端条件下重大工程扰动灾害链预警与防控难题。**针对西北干旱区重大工程,“极端干旱—强降雨—工程扰动”叠加模式易诱发高频灾害链。因“地质体结构演化机制不清”,无法量化干旱导致的岩土体裂隙发育与强降雨入渗的耦合致灾效应,亟需建立适配该区域的链生灾害预测模型,构建系统化防控技术体系,解决极端条件下灾害预警滞后、防控措施单一的问题。

(4) **东南丘陵强降雨下工程扰动灾害链监测预警难题。**对应东南丘陵交通与海岸带工程,在台风—降雨—波浪等多源激励下,边坡—路基—海岸带结构易出现协同失稳。受“多系统时空耦合理论缺失”影响,难以构建精准的协同响应模型,亟需突破多源荷载叠加效应量化技术,建立边坡—路基—结构一体化响应模型,提升

复杂场景下灾害的超前识别与精准预警能力。

(5) **深地工程扰动灾害链风险精准预测与智能防控难题。**针对深部隧道、地下厂房等深地工程,“高应力—高渗压—强卸荷—工程活动”多因素易诱发岩爆、围岩大变形、突涌水等灾害。因“多动力耦合下地质体演化机制不清”,无法实现灾害风险的精准识别与预测,亟需构建集“监测—预警—决策—控制”于一体的智能防控体系,解决深地环境下灾害突发、防控难度大的问题。

(6) **气候变化下极地工程扰动灾害链机制与风险预测难题。**聚焦极地科考站、资源开发等工程,核心问题围绕“气候变暖—冻土退化—工程热扰动”三元耦合过程。因“多系统时空耦合与互馈理论缺失”,无法量化三者叠加的致灾效应,亟需突破极端环境下灾害机理研究的瓶颈,构建适配极地极端低温、强辐射环境的灾害机理模型与风险评估方法,为极地工程安全推进提供理论支撑。

上述理论瓶颈与工程难题相互关联,明确了“多系统耦合量化模型”“跨尺度结构演化监测”“智能化风险预警”等未来研究方向,为后续技术研发与理论创新提供了清晰靶标。

4.2 未来发展方向

面向国家重大战略需求,未来应围绕“机理突破—智能感知—韧性防控”三条主线协同推进。

在理论上,构建多场、多尺度、多过程耦合的灾害链演化理论体系,揭示地球内外动力与工程扰动的非线性作用机制,建立考虑结构时效损伤的本构模型;融合“天—空—地”一体化观测手段,基于数字孪生与深度学习算法建立可视化观测系统,解析灾害链孕育、触发与演化的关键控制参数与时空规律,为精准预测奠定基础。

在技术上,重点突破两类核心技术:一是地质体透

明化与智能预警技术,通过多源感知与人工智能算法实现灾害链的实时监测、超前识别、智能决策与预警;二是绿色韧性防控技术,研发自感知、自修复、低碳环保的新型功能材料与结构体系,提升工程系统在极端环境下的抗扰动能力与恢复能力。

最终,推动重大工程扰动灾害链防控模式由“被动响应”向“主动防控”、由“单一工程治理”向“智能—生态—工程协同调控”转变,构建“精准感知—智能预警—自适应防控”一体化的新型重大工程安全保障体系,为国家重大工程的安全建设与长期运营提供坚实科技支撑。

5 结论与建议

本文首先界定了重大工程扰动灾害链的概念,根据其特征将其划分为区域、地表和地下三大类,并进一步细分为若干亚类。在此基础上,揭示了重大工程扰动灾害链的致灾本质——地球内动力、外动力与人类工程营力的非线性耦合过程,而非单一因素的孤立作用,并进一步探讨了气候—构造耦合控灾机理与工程扰动致灾机理。同时,系统梳理了重大工程扰动灾害链的风险评价方法体系,指出当前聚焦单一灾种的评价方法难以适配灾害链“级联放大、时空关联”的核心特征。随后,总结了监测预警技术与防控技术的研究进展。最后,明确了当前研究面临的核心瓶颈,如多系统时空耦合理论缺失、极端环境防控技术不足等,并为后续深化多场多尺度耦合机制研究、研发智能化防控装备指明方向。该研究对完善我国特殊环境下重大工程防灾减灾理论框架、提升工程安全保障能力具有重要意义。

研究成果可直接为国家重大工程(CZ铁路建设运维、YJ梯级水电开发、西北能源基地建设等)提供理论支撑与技术参考,助力降低工程建设与运维阶段的灾害损失。

致谢 感谢姚檀栋院士、吴福元院士、崔鹏院士、彭建兵院士、张培震院士、肖文交院士、丁林院士、赖远明院士、唐辉明院士、汪双杰院士、朱立新研究员、赵国堂正高级工程师、韩子夜正高级工程师等专家在第二次青藏高原综合科学考察重大工程扰动灾害及风险专题立项、执行过程中给予的指导。

参考文献

- [1] 崔鹏,王岩,张国涛,等. 气候变化灾害风险防范:现状、挑战与科学问题. 气候变化研究进展,2025,21(4):449—460.
Cui P,Wang Y,Zhang GT,et al. Climate change disaster risk prevention:Current status,challenges and scientific issues. Progress

- in Climate Change Research,2025,21(4):449—460. (in Chinese)
- [2] 张成恭,黄鼎成,韩文峰,等. 人类活动与诱发地质灾害. 地质灾害与防治,1990,1(2):3—10.
Zhang XG,Huang DC,Han WF,et al. Human activities and induced geological disasters. Journal of Geological Hazards and Control,1990,1(2):3—10. (in Chinese)
- [3] 唐春安. 东北矿区资源开采诱发的工程地质灾害与环境损伤特征. 地球科学进展,2004,19(3):490—494.
Tang CA. Characteristics of engineering geological disasters and environmental damage induced by resource exploitation in northeast mining areas. Advances in Earth Science,2004,19(3):490—494. (in Chinese)
- [4] 彭建兵,崔鹏,庄建琦. 川藏铁路对工程地质提出的挑战. 岩石力学与工程学报,2020,39(12):2377—2389.
Peng JB,Cui P,Zhuang JQ. Challenges posed by the Sichuan-Tibet Railway to engineering geology. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2020,39(12):2377—2389. (in Chinese)
- [5] 彭建兵,张永双,黄达,等. 青藏高原构造变形圈-岩体松动圈-地表冻融圈-工程扰动圈互馈灾害效应. 地球科学,2023,48(8):3099—3114.
Peng JB,Zhang YS,Huang D,et al. Interactive disaster effects among tectonic deformation zone,rock mass loosening zone,surface freeze-thaw zone and engineering disturbance zone on the Qinghai-Tibet Plateau. Earth Science,2023,48(8):3099—3114. (in Chinese)
- [6] 张帅,宋家乐,詹良通,等. 论地质-环境灾害链:现象、过程及原理. 中国科学:地球科学,2025,55(10):3217—3237.
Zhang S,Song JL,Zhan LT,et al. On geo-environmental hazard chains:Phenomena,processes and principles. Science China:Earth Sciences,2025,55(10):3217—3237. (in Chinese)
- [7] 彭铭,王悦,马晨议,等. 河谷滑坡灾害链风险评估及防控研究进展. 地球科学,2025,50(10):3723—3760.
Peng M,Wang Y,Ma CY,et al. Research progress on risk assessment and prevention of valley landslide hazard chains. Earth Science,2025,50(10):3723—3760. (in Chinese)
- [8] 殷跃平,彭轩明. 三峡库区千将坪滑坡失稳探讨. 水文地质工程地质,2007(3):51—54.
Yin YP,Peng XM. Failure mechanism on Qianjiangping landslide in the Three Gorges Reservoir region. Hydrogeology & Engineering Geology,2007(3):51—54. (in Chinese)
- [9] Tang C,Rengers N,van Asch TWJ,et al. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city,Gansu Province,northwestern China. Natural Hazards and Earth System Sciences,2011,11(11):2903—2912.
- [10] 祁生文,李永超,宋帅华,等. 青藏高原工程地质稳定性分区及工程扰动灾害分布浅析. 工程地质学报,2022,30(3):599—608.
Qi SW,Li YC,Song SH,et al. Reionalization of engineeng geological stability and distribution of eneeneering disturbance disasters in Tibetan Plateau. Journal of Engineering Geology,2022,30(3):599—608. (in Chinese)
- [11] 张永双,王冬兵,李雪,等. 青藏高原构造混杂岩带的孕灾地质基因与重大工程地质问题研究. 地质学报,2024,98(3):992—1005.
Zhang YS,Wang DB,Li X,et al. Research on hazard prone geological genes and maior engineering geological problems in tectonic melange belts of Tibetan Plateau. Acta Geologica Sinica,2024,98(3):992—1005. (in Chinese)

- [12] 王小军. 黄土地区高速铁路建设中的重大工程地质问题研究——以郑西客运专线为例. 兰州:兰州大学,2008.
- Wang XJ. Study on the great and important engineering geological problems for high-speed railway construction in loess area-illustrated with Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line. Lanzhou:Lanzhou University,2008. (in Chinese)
- [13] 彭建兵,王启耀,庄建琦,等. 黄土高原滑坡灾害形成动力学机制. 地质力学学报,2020,26(5):714—730.
- Peng JB, Wang QY, Zhuang JQ, et al. Dynamic formation mechanism of landslide disaster on the Loess Plateau. Journal of Geomechanics, 2020, 26(5): 714—730. (in Chinese)
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程勘察通用规范. 北京:中国标准出版社,2022.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. General Code for Engineering Investigation. Beijing:Standards Press of China,2022. (in Chinese)
- [15] 秦正峰,许琦,贾敏,等. “一带一路”岩溶区编图与特征分析. 中国岩溶,2025,44(3):645—656,668.
- Qin ZF, Xu Q, Jia M, et al. Mapping and characteristic analysis of karst areas along the Belt and Road. Carsologica Sinica, 2025, 44(3): 645—656, 668. (in Chinese)
- [16] 《工程地质手册》编委会. 工程地质手册. 5版. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- Geological Engineering Handbook Editorial Board. Geological Engineering Handbook (Fifth Edition). Beijing:China Architecture & Building Press,2018. (in Chinese)
- [17] 蒋捷,杨昕. 基于DEM中国地势三大阶梯定量划分. 地理信息世界, 2009,16(1):8—13.
- Jiang J, Yang X. Quantitative segmentation of the three gradient terrain of China based on DEM. Journal of Spatio-temporal Information, 2009, 16(1): 8—13. (in Chinese)
- [18] 邓起东,张培震,冉勇康,等. 中国活动构造基本特征. 中国科学:地球科学,2002,32(12):1020—1030,1057.
- Deng QD, Zhang PZ, Ran YK, et al. Basic characteristics of activity structure in China. SCIENTIA SINICA Terrae, 2002, 32(12): 1020—1030, 1057. (in Chinese)
- [19] 中国气象局. 中国气候变化蓝皮书(2025). 北京:科学出版社,2025.
- China Meteorological Administration. Blue Book on Climate Change in China 2025. Beijing:Science Press,2025. (in Chinese)
- [20] 赵彬如,陈恩泽,戴强,等. 基于水文-气象阈值的区域降雨型滑坡预测研究. 测绘学报,2022,51(10):2216—2225.
- Zhao BR, Chen EZ, Dai Q, et al. Study on prediction of regional rainfall-induced landslides based on hydrometeorological threshold. Acta Cartographica et Sinica, 2022, 51(10): 2216—2225. (in Chinese)
- [21] 李永强. 青藏铁路运营期多年冻土区路基工程状态研究. 兰州:兰州大学,2008.
- Li YQ. Study on state of subgrade engineering in permafrost region during operation period of Qinghai-Tibet railway. Lanzhou:Lanzhou University,2008. (in Chinese)
- [22] 林峻岑,李国玉,高凯,等. 高密度电法探测输电线路塔基周边多年冻土分布. 森林工程,2025,41(5):1092—1100.
- Lin JC, Li GY, Gao K, et al. Permafrost distribution detection near transmission line tower foundations by electrical resistivity tomography. Forest Engineering, 2025, 41(5): 1092—1100. (in Chinese)
- [23] 郭光剑,杨威,王伟财,等. 藏东南冰川快速退缩与冰湖灾害科学考察报告. 北京:科学出版社,2023.
- Wu GJ, Yang W, Wang WC, et al. Scientific investigation report on rapid glacier retreat and glacial lake disasters in southeastern Tibet. Beijing:Science Press,2023. (in Chinese)
- [24] 李加林,王艳红,张忍顺,等. 海平面上升的灾害效应研究——以江苏沿海低地为例. 地理科学,2006,26(1):87—93.
- Li JL, Wang YH, Zhang RS, et al. Disaster effects of sea level rise-a case of Jiangsu coastal lowland. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 87—93. (in Chinese)
- [25] 刘杜娟. 中国沿海地区海水入侵现状与分析. 地质灾害与环境保护, 2004,15(1):31—36.
- Liu DJ. The situation and analysis of salinity intrusion in coastal areas, China. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2004, 15(1): 31—36. (in Chinese)
- [26] 黄金池. 中国风暴潮灾害研究综述. 水利发展研究,2002,2(12):63—65.
- Huang JC. A review of research on storm surge disasters in China. Water Resources Development Research, 2002, 2(12): 63—65. (in Chinese)
- [27] 谭丽荣,陈珂,王军,等. 近20年来沿海地区风暴潮灾害脆弱性评价. 地理科学,2011,31(9):1111—1117.
- Tan LR, Chen K, Wang J, et al. Assessment on storm surge vulnerability of coastal regions during the past twenty years. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(9): 1111—1117. (in Chinese)
- [28] Wang XL, Clague JJ, Frattini P, et al. Effect of short-term, climate-driven sediment deposition on tectonically controlled alluvial channel incision. Geology, 2024, 52(1): 17—21.
- [29] Qi SW, Yan FZ, Wang SJ, et al. Characteristics, mechanism and development tendency of deformation of Maoping landslide after commission of Geheyan reservoir on the Qingjiang River, Hubei Province, China. Engineering Geology, 2006, 86(1): 37—51.
- [30] Tang FJ, Qi SW, Guo SF, et al. The influence of reservoirs on landslide erosion. Remote Sensing, 2025, 17(4): 569.
- [31] 祁生文,李永超,刘春玲,等. 横断山区水电工程扰动灾害及风险分析. 工程地质学报,2024,32(3):729—759.
- Qi SW, Li YC, Liu CL, et al. Risk of disturbance disasters of hydropower project in Hengduan mountains. Journal of Engineering Geology, 2024, 32(3): 729—759. (in Chinese)
- [32] Cai M. Influence of stress path on tunnel excavation response—Numerical tool selection and modeling strategy. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(6): 618—628.
- [33] 严鹏,卢文波,单治钢,等. 深埋隧洞爆破开挖损伤区检测及特性研究. 岩石力学与工程学报,2009,28(8):1552—1561.
- Yan P, Lu WB, Shan ZG, et al. Detecting and study of blasting excavation-induced damage of deep tunnel and its characters. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1552—1561. (in Chinese)
- [34] 王明洋,范鹏贤,李文培. 岩石的劈裂和卸载破坏机制. 岩石力学与工程学报,2010,29(2):234—241.
- Wang MY, Fan PX, Li WP. Mechanism of splitting and unloading failure of rock. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(2): 234—241. (in Chinese)
- [35] 张兰,孙中光. 爆破动荷载作用下深埋隧道失稳破坏模拟研究. 煤矿

- 安全,2019,50(2):219—222,227.
- Zhang L,Sun ZG. Simulation study on instability and failure of deep-buried tunnels under blasting dynamic loads. *Safety in Coal Mines*, 2019,50(2):219—222,227. (in Chinese)
- [36] 谢和平,张茹,任利,等. 川藏铁路深埋隧道围岩灾变分析与思考. *工程科学与技术*,2022,54(2):1—20.
- Xie HP,Zhang R,Ren L,et al. Analysis and thoughts on surrounding rock mass catastrophe of deep-buried tunnels along Sichuan-Tibet Railway. *Advanced Engineering Sciences*,2022,54(2):1—20. (in Chinese)
- [37] Guo SF,Qi SW,Zhan ZF,et al. Numerical study on the progressive failure of heterogeneous geomaterials under varied confining stresses. *Engineering Geology*,2020,269:105556.
- [38] 陶明,徐源泉,赵瑞. 深部岩体爆破开挖围岩动态破坏机理研究. *工程爆破*,2024,30(5):143—152.
- Tao M,Xu YQ,Zhao R. Study on dynamic failure mechanism of surrounding rock in blasting excavation of deep rock mass. *Engineering Blasting*,2024,30(5):143—152. (in Chinese)
- [39] Zhao R,Tao M,Xiang GL,et al. Blasting induced dynamic stress concentration and failure characteristics of deep-buried rock tunnel. *Journal of Central South University*,2024,31(7):2321—2340.
- [40] Yin YP,Li B,Wang WP,et al. Mechanism of the December 2015 catastrophic landslide at the Shenzhen landfill and controlling geotechnical risks of urbanization. *Engineering*,2016,2(2):230—249.
- [41] 胡瑞林,范林峰,王珊珊,等. 滑坡风险评价的理论与方法研究. *工程地质学报*,2013,21(1):76—84.
- Hu RL,Fan LF,Wang SS,et al. Theory and method for landslide risk assessment-current status and future development. *Journal of Engineering Geology*,2013,21(1):76—84. (in Chinese)
- [42] 王跃跃. 广东省郁南县滑坡灾害风险评价方法研究. 武汉:中国地质大学,2024.
- Wang YY. Study on landslide disaster risk evaluation method in Yunan county,Guangdong Province. Wuhan:China University of Geosciences,2024. (in Chinese)
- [43] 邱海军. 区域滑坡崩塌地质灾害特征分析及其易发性和危险性评价研究——以宁强县为例. 西安:西北大学,2012.
- Qiu HJ. Study on the regional landslide characteristic analysis and hazard assessment:A case study of Ningqiang county. Xi'an:North-west University,2012. (in Chinese)
- [44] 吴树仁,石菊松,王涛,等. 地质灾害活动强度评估的原理、方法和实例. *地质通报*,2009,28(8):1127—1137.
- Wu SR,Shi JS,Wang T,et al. Geohazard activity intensity evaluation: Theory,methods and practice. *Geological Bulletin of China*,2009,28(8):1127—1137. (in Chinese)
- [45] 中国科学院地质与地球物理研究所. 山区公路斜坡地质灾害风险评价规范. 北京:中国标准出版社,2023.
- Institute of Geology and Geophysics,Chinese Academy of Sciences. Code for geohazard risk assessment of mountain highway slope. Beijing:Standards Press of China,2023. (in Chinese)
- [46] Wang YS,Zheng GP,Wang X. Development and application of a goaf-safety monitoring system using multi-sensor information fusion. *Tunnelling and Underground Space Technology*,2019,94:103112.
- [47] Weng MC,Lin CH,Shiu WJ,et al. Towards a rapid assessment of highway slope disasters by using multidisciplinary techniques. *Landslides*,2022,19(3):687—701.
- [48] Hussain MA,Chen ZL,Zheng Y,et al. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithm validated by persistent scatterer In-SAR technique. *Sensors*,2022,22(9):3119.
- [49] Tzouvaras M,Danezis C,Hadjimitsis DG. Small scale landslide detection using sentinel-1 interferometric SAR coherence. *Remote Sensing*,2020,12(10):1560.
- [50] Mirus BB,Becker RE,Baum RL,et al. Integrating real-time subsurface hydrologic monitoring with empirical rainfall thresholds to improve landslide early warning. *Landslides*,2018,15(10):1909—1919.
- [51] Pang SH,Sun XM,Wang SY,et al. A multi-parameter monitoring system and early warning model for rainfall-induced landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*,2024,83(8):312.
- [52] 许强,汤明高,徐开祥,等. 滑坡时空演化规律及预警预报研究. *岩石力学与工程学报*,2008,27(6):1104—1112.
- Xu Q,Tang MG,Xu KX,et al. Study on spatio-temporal evolution law and early warning of landslides. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,2008,27(6):1104—1112. (in Chinese)
- [53] 李子阳,戴济群,黄对,等. 水利工程卫星遥感监测技术应用与展望. *水科学进展*,2023,34(5):798—811.
- Li ZY,Dai JQ,Huang D,et al. Application and prospect of satellite remote sensing monitoring technology in water conservancy projects. *Advances in Water Science*,2023,34(5):798—811. (in Chinese)
- [54] 李振洪,朱武,余琛,等. 雷达影像地表形变干涉测量的机遇、挑战与展望. *测绘学报*,2022,51(7):1485—1519.
- Li ZH,Zhu W,Yu C,et al. Opportunities,challenges and prospects of interferometric synthetic aperture radar for surface deformation measurement. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2022,51(7):1485—1519. (in Chinese)
- [55] Ge XT,Yang Y,Chen JH,et al. Disaster prediction knowledge graph based on multi-source spatio-temporal information. *Remote Sensing*, 2022,14(5):1214.
- [56] 崔玉萍,刘春,侯芸,等. 山区公路典型地质灾害协同感知与预警关键技术及应用. 北京市,中国公路工程咨询集团有限公司,2023-03-23.
- [57] 朱淳,龚逸非,宋盛渊,等. 滑坡多源监测技术及预警模型研究进展与展望. *西南交通大学学报*,2025,60(6):1373—1389.
- Zhu C,Gong YF,Song SY,et al. Progress and prospects of landslide multi-source monitoring technology and early warning model. *Journal of Southwest Jiaotong University*,2025,60(6):1373—1389. (in Chinese)
- [58] 杨丽. 基于GNSS技术的地质灾害监测平台研究与实现. 大众科技, 2021,23(10):7—10.
- Yang L. Research and implementation of geological disaster monitoring platform based on GNSS technology. *Popular Science & Technology*, 2021,23(10):7—10. (in Chinese)
- [59] 王叙乔. 普适性GNSS用于滑坡实时监测质量控制与云平台构建. 西安:长安大学,2023.
- Wang XQ. Quality control of universal GNSS for real-time landslide monitoring and construction of cloud platform. Shaanxi:Chang'an University,2023. (in Chinese)
- [60] Rathnayaka B,Siriwardana C,Robert D,et al. Improving the resilience

- of critical infrastructures; Evidence-based insights from a systematic literature review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2022, 78: 103123.
- [61] Xu XZ, Liu YM, Liu K, et al. Pathways to enhance engineering resilience of railway engineering projects with intelligent construction technology: A perspective based on risk governance. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2025: 1—33.
- [62] 袁亮. 深部采动响应与灾害防控研究进展. *煤炭学报*, 2021, 46(3): 716—725.
- Yuan L. Research progress on deep mining response and disaster prevention and control. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(3): 716—725. (in Chinese)
- [63] Dinh LTT, Pasman H, Gao XD, et al. Resilience engineering of industrial processes: Principles and contributing factors. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2012, 25(2): 233—241.
- [64] 孙乔宝, 周应新, 李志清, 等. 云南公路边坡非饱和和特殊土低碳修复关键技术研究与应用. 云南省, 云南省公路开发投资有限责任公司, 2015-04-29.
- [65] 王文生, 杨晓华, 谢永利. 公路边坡植物的护坡机理. *长安大学学报 (自然科学版)*, 2005, 25(4): 26—30.
- Wang WS, Yang XH, Xie YL. Slope protection mechanism of plants on highway slopes. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2005, 25(4): 26—30. (in Chinese)
- [66] 高民欢. 在公路路基边坡防护中刚性防护与柔性防护的应用范围及特点. *交通标准化*, 2003(9): 67—70.
- Gao MH. Application scope and characteristics of rigid protection and flexible protection in highway subgrade slope protection. *Communications Standardization*, 2003(9): 67—70. (in Chinese)
- [67] 赵志明, 吴光, 王喜华. 工程边坡绿色防护机制研究. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(2): 299—305.
- Zhao ZM, Wu G, Wang XH. Study on green protection mechanism of engineering slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(2): 299—305. (in Chinese)
- [68] 谭少华, 汪益敏. 高速公路边坡生态防护技术研究进展与思考. *水土保持研究*, 2004, 11(3): 81—84.
- Tan SH, Wang YM. Research progress and thinking on ecological protection technology of expressway slope. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 81—84. (in Chinese)
- [69] 祁生文, 刘方翠, 徐梦珍, 等. 小流域生态-岩土协同减灾原理与方法初探. *水力发电学报*, 2024, 43(2): 1—14.
- Qi SW, Liu FC, Xu MZ, et al. Preliminary study on principles and methods of ecological-geotechnical engineering coordinated disaster reduction for small watersheds. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2024, 43(2): 1—14. (in Chinese)
- [70] 孙娟娟, 王学良, 袁鸿鹄, 等. 一种可调节的坡面崩塌滚石防护装置: 中国, ZL202011467740.8. 2021-10-29.
- [71] 王学良, 刘海洋, 孙娟娟. 松柏林和人工构筑物组合拦截崩塌过程中能量分配的测算方法及系统: 中国, ZL202011164632.3. 2021-09-21.
- [72] 刘方翠, 祁生文, 郑博文, 等. 一种直、须根系植被间配的斜坡表土防护设计方法: 中国, ZL202210865990.X. 2023-03-31.
- [73] 许超, 薛雷, 崔远, 等. 一种抗滑桩加固边坡的优化设计方法及系统: 中国, ZL202011559525.0. 2021-08-31.
- [74] Xue L, Xu C, Cui Y, et al. Optimal design method and system for slope reinforcement with anti-slide piles: US, US11459722B2. 2022-10-04.
- [75] 徐敏, 宋林辉, 周峰, 等. 新型伞状抗拔锚现场试验与数值模拟. *岩土力学*, 2009, 30(S1): 24—28.
- Xu M, Song LH, Zhou F, et al. Field test and numerical simulation of new umbrella-shaped anti-pull anchor. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(S1): 24—28. (in Chinese)
- [76] Mei GX, Xu M, Song LH, et al. In-situ tests on new umbrella-shaped anti-float anchors. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(6): 892—896.
- [77] Guo SF, Qi SW, Zhang SS, et al. Energy-absorbing rock bolt device with umbrella-shaped structure: US, US 11268383B2. 2022-03-08.

Disaster Chains Induced by Disturbances in Major Projects under Special Environments: State of Art and Challenges

Shengwen Qi^{1, 2*} Songfeng Guo^{1, 2} Yongchao Li^{1, 2} Xinyi Guo^{1, 2} Xiao Lu^{1, 2}
Yinghui Cui^{1, 2} Yexia Guo³ Binlong Zhang⁴ Feng Xiong⁵

1. State Key Laboratory of Lithospheric and Environmental Coevolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. College of Earth and Planetary Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China
3. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China
4. College of Civil Engineering and Hydraulic Engineering, Qinghai University, Xining 810016, China
5. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

Abstract As China's major projects advance into special environmental regions such as the Qinghai-Xizang Plateau and the Loess Plateau, as well as frontier fields including deep earth, deep sea, and polar regions, disaster chains induced by engineering disturbances have become a core challenge threatening project safety and ecological protection. This paper integrates typical domestic and international cases, theoretical achievements, and technical practices, and conducts analysis from three dimensions: it clarifies the classification of engineering disturbance-induced disaster chains into three types, regional (fault activation, reservoir-induced earthquakes), surface (collapses, landslides, etc.), and underground (rock

* Corresponding Author, Email: qishengwen@mail.iggcas.ac.cn

bursts, water intrusions, etc.), and reveals the synergistic disaster-breeding mechanisms involving special rock and soil, climate-tectonic coupling, and engineering disturbances (slope cutting, water storage, etc.); it analyzes the disaster-causing mechanisms of nonlinear coupling of multiple forces (endogenic forces, exogenic forces, engineering forces) and mutual feedback of multiple fields (stress field, seepage field, temperature field), and sorts out risk assessment methods; it summarizes the progress of monitoring, early warning, and prevention and control technologies for engineering-disturbed disaster chains, and points out bottlenecks such as the lack of multi-system coupling theory and insufficient technology for extreme environment prevention and control. The study shows that disaster chains induced by engineering disturbances under special environments are characterized by “cascading amplification and spatiotemporal correlation”. In the future, it is necessary to strengthen the research on multi-field and multi-scale coupling theory and the integration of intelligent and green technologies to build a full-chain prevention and control system. The results can provide theoretical support for major projects such as mountainous area railways and large river basin cascade hydropower projects in terms of disaster prevention and safety control, and enhance the disaster prevention and mitigation capacity of China’s major projects.

Keywords major project disturbance; disaster chain; disaster-breeding mechanism; risk assessment; risk prevention

祁生文 中国科学院地质与地球物理研究所研究员、地质工程学科中心主任。入选中共中央组织部第四批国家“万人计划”和科学技术部中青年科技创新“领军人才”。中国地质学会第二届会士, 兼国际工程地质与环境学会(IAEG)副主席、国际地质灾害与减灾协会(ICGdR)副理事长、中国岩石力学与工程学会副理事长、中国地质学会工程地质专业委员会秘书长等职务。长期从事岩体工程地质力学研究与教学工作。主持第二次青藏高原科考地质环境与灾害任务、国家自然科学基金青年科学基金项目(A类)、重大项目、重点项目等项目20余项。获国际地质灾害与减灾协会科学成就奖, 以第一完成人获中国岩石力学与工程学会自然科学奖一等奖、中国公路学会科技进步奖一等奖、自然资源科学技术奖一等奖各1项。

(责任编辑 贾祖冰 张强)