

• 自然灾害防治面临的挑战与应对 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0031

黄土高原地质灾害链治理面临的挑战与应对*

黄强兵¹ 彭建兵^{1,2**} 范文¹ 王新刚³ 朱武¹ 许领⁴
唐亚明⁵ 庄建琦¹ 冷艳秋¹ 马鹏辉¹ 康孝森¹

1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054
2. 中国地质大学(北京) 工程技术学院, 北京 100083
3. 西北大学 大陆演化与早期生命全国重点实验室, 西安 710069
4. 西安交通大学 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049
5. 中国科学院地球环境研究所 黄土科学全国重点实验室, 西安 710061

[摘 要] 黄土高原是我国“一带一路”核心区和重要的能源化工基地,也是黄河流域的重要生态屏障,为保障黄河安澜和华北平原地质安全、能源安全发挥了重大作用。全球气候变化背景下极端降雨事件频发,黄土高原地质灾害链风险加剧,如何科学治理黄土高原地质灾害链,是工程地质环境与灾害领域的重要课题。本文阐述了黄土高原地质灾害链的区域群发性、时间集中性、链式多样性、演化复杂性和工程危害大等特点,指出了黄土高原地质灾害链治理面临灾害链演化动力学机制不清、监测预警不精准、风险评估难度大和韧性防控技术体系不完善等4大挑战,然后从地质灾害链演化动力学机制、监测预警技术、灾情场景推演与风险评价、韧性防控技术体系和信息共享与智能决策服务平台等5个方面提出了具体应对策略,为我国黄土高原地质灾害链科学防控提供指导与参考。

[关键词] 黄土高原;地质灾害链;链生机理;监测预警;风险评估;韧性防控

黄土高原是中国乃至全球典型的黄土分布区,面积约64万平方千米,横跨青、甘、宁、内蒙古、陕、晋、豫7省区。该区域黄土堆积厚度大,一般为50~200米,最厚处可达300米以上,形成了独特的黄土地貌景观,包括塬、梁、峁、沟等多种形态。该地区属于半干旱气候区,生态环境脆弱,降水集中且多强降雨,加上黄土特殊水敏性、结构性等物理特性,已成为我国地质灾害最严重的地区之一。随着全球气候变化和人类活动加剧,我国降雨带逐渐北移,黄土高原地质灾害呈现出频率增加、强度增大、危害加重的趋势,且具有隐蔽性强、影响范围广、破坏性大的特点。据统计,我国每年约有30%的地质灾害发生在不到国土面积5%的黄土高原地区(图1),更严峻的是单一灾害往往不再孤立发生,而是形成具有因果关

系的灾害链,如滑坡—泥石流链、崩塌—滑坡—洪水—溃坝链等,造成更为严重的损失,近五年黄土高原因地质灾害导致的直接经济损失超过40亿元。

黄土高原是我国“一带一路”核心区,是“黄河流域生态保护和高质量发展”国家战略的关键区,是黄河流域的重要生态屏障,也是我国重要的煤油气—水电能源、化工基地,在保护黄河安澜以及华北平原安全、保障能源基地和粮食安全等方面发挥了重大作用^[1]。近年来,黄土高原强降雨诱发链生地质灾害风险加剧,威胁着黄土高原基础设施与人居安全,以及黄土高原能源基地运行及华北、华东能源供应安全。2021年中共中央、国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》明确指出“运用物联网、卫星遥感、无人机等技术手

收稿日期:2025-07-31; 修回日期:2025-09-16

* 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:dicexy_1@chd.edu.cn

本文受到国家重点研发计划项目(2023YFC3008400)的资助。

引用格式: 黄强兵,彭建兵,范文,等. 黄土高原地质灾害链治理面临的挑战与应对. 中国科学基金,2025,39(6):1030–1043.

Huang QB, Peng JB, Fan W, et al. Challenges confronting and coping strategies for the governance of geohazard chains on the loess plateau. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 1030–1043. (in Chinese)

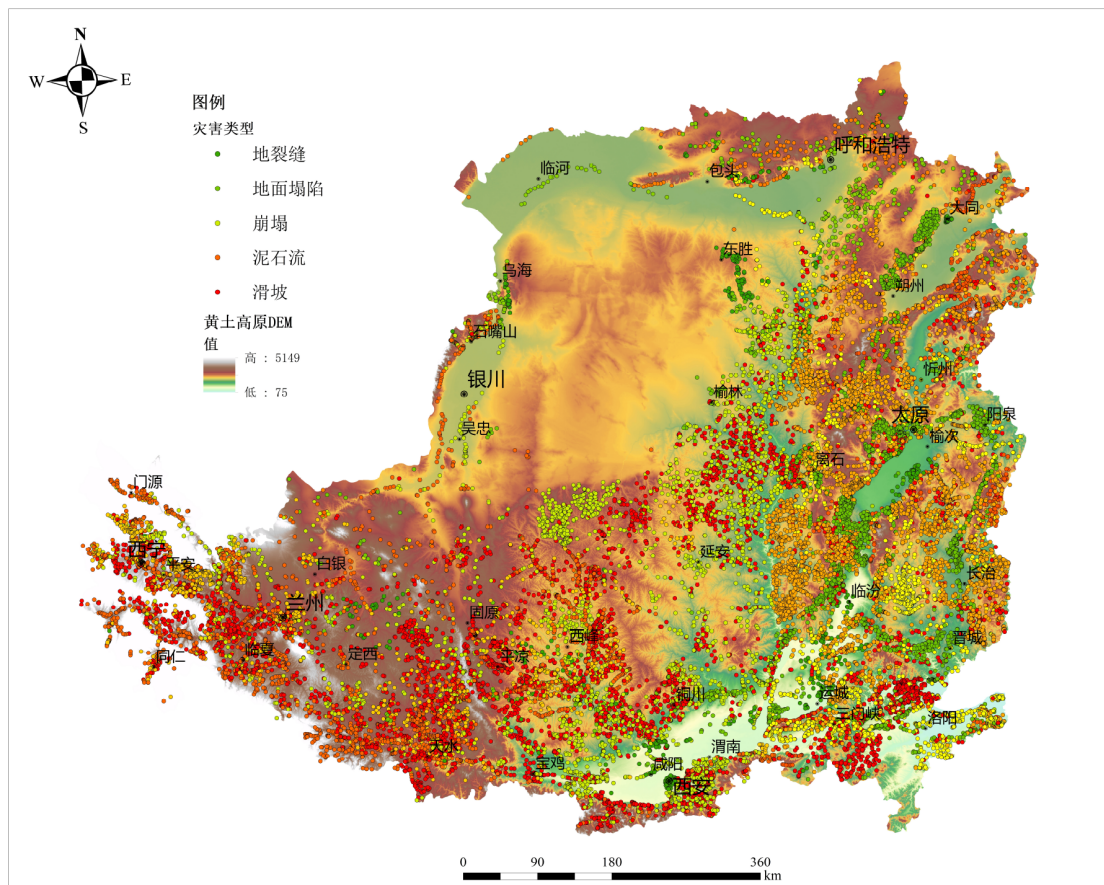


图1 黄土高原地质灾害的分布
Fig.1 Distribution of Geological Hazards in the Loess Plateau

段,强化对水文、气象、地灾、雨情、凌情、旱情等状况的动态监测和科学分析,搭建综合数字化平台,实现数据资源跨地区跨部门互通共享,建设“智慧黄河”。2025年国务院批复同意《黄河流域国土空间规划(2021—2035年)》,将强化黄河流域应对气候变化和极端天气的防灾减灾救灾纳入系统优化国土空间开发保护格局,全面提升国土空间韧性。

近年来,针对黄土高原突出的地质灾害问题,国内已建立了比较完善的地质灾害群测群防体系,围绕黄土高原地质灾害(链)开展了大量的研究工作,取得很多研究成果,但主要集中在单一黄土地质灾害层面,如黄土滑坡、黄土地裂缝及黄土洞穴等灾害的成因机理、监测与预警及风险防控,以及黄土重大工程防灾减灾^[2-13],缺乏对黄土地质灾害链的链式结构与成灾模式、多动力耦合地质灾害链的动力学机制、精准监测与协同预警以及韧性防控理论与技术方法的系统性研究,尚未形成黄土地质灾害链系统理论与防控技术体系。因此,黄土高原地质灾害链治理中存在“链生机制不清、预警精度不高、定量评估难度大和韧性防控体系不完善”的难题,导致链生灾害风险防控与智能化决策程度不足,制约了黄

土高原地质灾害防控水平,亟需从理论与技术层面解决黄土高原地质灾害链治理中面临的难题与挑战。如何科学诠释黄土高原地质灾害链演化规律及链生机制,如何基于物联网、信息融合及智能学习等现代化信息处理技术从多尺度、多时相、多角度智能识别与有效预警,并建立黄土链生灾害与工程风险定量评估方法和韧性防控技术体系,是当前我国学术界和工程界特别关注的热点与难点问题。

1 黄土高原地质灾害链的特点

黄土高原地质灾害链是指黄土分布区域内由一种或多种初始地质灾害诱发的一系列空间上相互关联、时间上相继发生、具有因果关系与链式结构的灾害序列过程。由于黄土特殊的物理力学性质,在强降雨等自然条件与人类活动双重作用下,黄土高原地质灾害链呈现出复杂多样的特征^[10]。大量的野外调查分析发现黄土高原地质灾害链具有区域群发性、时间集中性、链式多样性、演化复杂性和工程危害大等特点。

1.1 区域群发性

黄土高原地质灾害链在空间上具有显著的区域群

发性特征^[14],集中分布于黄土塬边、深切沟谷及基岩山地与黄土过渡带,这些区域地形高差大、沟壑密度高,为灾害链提供了有利地形条件。地质灾害链空间分布与地貌单元和人类活动强度密切相关,不同地貌与人类活动区域因特定的地质条件和外界触发因素,常在特定区域上形成多类型、多点位同步发生的灾害联动效应,主要表现为以下分异特征:

(1)在厚层黄土分布区(如陕北洛川、陇东董志塬周边等),巨厚层黄土易因雨水入渗引发大面积自重增加与强度骤降,先出现多点同步的落水洞(湿陷),进而诱发滑坡;部分滑坡体堵塞沟道形成堰塞湖,湖水溃决后又会裹挟沿途松散物形成黄土泥石流,最终演变为“落水洞(湿陷)—滑坡—堰塞湖—洪水—泥石流”的链式灾害。由于厚层黄土分布连续,单个降雨过程即可触发数十平方千米范围内的成群灾害,呈现“一灾起、多灾连”的群发性特征。

(2)在黄土塬边区(如甘肃董志塬、陕西渭北台塬、洛川塬周边等),因属平坦塬面与深切沟谷的过渡带,长期受沟谷溯源侵蚀与重力卸荷影响,坡体稳定性极差。黄土塬边因耕地开垦、道路切坡等活动进一步破坏坡体平衡,易引发成片崩塌并堆积于沟谷,在后续降雨中转化为泥石流;同时,塬边多个相邻坡段因相似的地形与应力状态,常在短时间内连续发生崩塌,形成“崩塌—泥石流”的集群式灾害链,单个塬边区域单次灾害可涉及十余处坡体。

(3)在黄土沟壑密集区(如晋西吕梁山、陕北黄土丘陵区),因地表被密集沟谷切割,破碎地形使汇流路径短、水流冲刷力强。强降雨时,坡面黄土被高速径流裹挟形成面蚀,大量松散物质汇入沟道后迅速形成泥石流,而沟谷两侧坡体在泥流掏蚀作用下发生滑坡,进一步补给泥石流物源,形成“坡面侵蚀—泥石流—滑坡”灾害链。因黄土沟壑网络相互连通,一处沟谷发生灾害后,相邻沟谷会因汇水条件联动响应,短时间内形成数十条沟谷同步暴发灾害链的群发态势。

(4)在人类灌溉和工程建设区(如关中平原边缘灌溉区、陕甘晋蒙能源基地),人类活动成为灾害链群发的关键诱因。农田集中灌溉使地下水位上升,导致黄土层

软化,引发成群的灌溉型滑坡;采矿开挖与道路切坡则直接破坏坡体结构,诱发崩塌与顺层滑坡。这些人工扰动区域内,灾害常以工程点为中心呈集群分布,如煤矿区周边,采矿引发的滑坡可能堵塞河道形成堰塞湖,溃决后引发的洪水又会冲蚀周边农田,触发更多灌溉滑坡,形成“人类工程—滑坡—洪水—次生滑坡”的复合型灾害链,且因工程分布密集,单次灾害可波及数个乡镇。

整体上,黄土高原地质灾害链的群发性受控于“厚层黄土物质基础+沟壑切割地貌格局+极端降水/人类扰动触发”的三元耦合机制,不同地貌单元灾害链存在显著的区域集中特性。

1.2 时间集中性

黄土高原地质灾害链的时间集中性特征显著,这与季节性气候触发、人类活动密切相关。在季节尺度上,6~9月的汛期是灾害链爆发的高峰,此阶段受东亚季风影响,强降雨集中,雨水沿黄土垂直节理快速入渗,使土体抗剪强度骤降,极易触发“滑坡—泥石流”灾害链。而人类活动加剧了时间集中性,如甘肃黑方台、陕西泾阳南塬4~5月灌溉集中期,因农田漫灌引发的“湿陷—滑坡”灾害链占比达全年的50%,呈现出自然与人为因素叠加的时间集聚特征。此外,黄土高原地质灾害链与地震活动也具有一定耦合关系,强震后存在3~5年的灾害链活跃期,地震导致黄土体裂隙发育,使雨水入渗效率提升,次生灾害链频发。

1.3 链式多样性

黄土高原地质灾害链在演化过程中呈现多灾种连锁递进特点,常以落水洞(裂缝)、塌陷、滑坡、崩塌为起始,派生黄土泥石流、堰塞湖溃决等灾害,呈现“强降雨—湿陷—崩塌/滑坡/泥流—堰塞湖(堵河)—溃坝”等多灾种交叉组合的链式特征,这种链式多样性源于地质环境的复杂性 with 触发因素的交互作用^[15],呈现出多动力驱动、多类型、多路径影响的链式形态(见表1)。从灾害链启动方式来看,黄土地质灾害链的主要动力触发因素为水动力、地震动力、人类动力和复合动力四大类,有自然驱动的“强降雨(地震)—滑坡—泥石流”经典链条,也有人为扰动主导的“切坡—崩塌—堰塞湖”序列。从灾害链种类组合上来看,常见的黄土地质灾害链组合形式有

表1 黄土地质灾害链链式多样性
Table 1 Diversity of Loess Geological Hazards Chain

灾害启动方式	灾害链组合类型	物质转化路径	地貌位置
水动力/地震动力/ 人类动力/复合动力	崩塌—滑坡—泥流灾害链, 塌陷—滑坡—泥流灾害链, 滑坡—堰塞湖—溃决灾害链, 湿陷—地面沉降—地裂缝—崩塌—滑坡—泥流灾害链, 塌陷—崩塌—滑坡—泥流灾害链, 塌陷—地裂缝—滑坡—泥流灾害链和滑坡—滑坡灾害链等	黄土层内物质转化, 黄土—基岩物质转化	斜坡区崩滑流灾害链, 场地区湿陷—地面沉降—地裂缝灾害链

注:人类动力指的是人类生产、建设、资源开发及土地利用等各类活动对地质环境的改造力或作用力。

崩塌—滑坡—泥石流灾害链、塌陷—滑坡—泥石流灾害链、滑坡—堰塞湖—溃决灾害链、湿陷—地面沉降—地裂缝—崩塌—滑坡—泥石流灾害链、塌陷—崩塌—滑坡—泥石流灾害链、塌陷—地裂缝—滑坡—泥石流灾害链和滑坡—滑坡灾害链等七大类。从物质转化路径上来看,同一物源可衍生多元灾害,如黄土崩塌物既可能被雨水浸泡成泥石流,也可能在强震作用下转化为碎屑流;而在黄土—基岩边坡区,边坡上缘黄土崩滑体可与下端基岩共同演化为黄土泥石流。从灾害链发生的地貌位置来看,既有斜坡区的崩滑流灾害链,也有场地区的湿陷—地面沉降—地裂缝灾害链,但前者发生频率高、突发性强、工程危害大,应是黄土地质灾害链防控的重点,而后者在降雨与开挖施工、管道渗流等其他因素耦合作用下致灾也不可忽视。因此,考虑到黄土高原地质灾害链的链式多样性,其综合治理需针对不同链条特征制定差异化策略。

1.4 演化复杂性

黄土高原地质灾害链的演化过程呈现出高度的复杂性^[16,17],这种复杂性源于多要素的非线性耦合与动态反馈机制。首先,从地质体内部作用来看,黄土的多孔隙结构使其在水—力作用下呈现复杂响应,即雨水入渗时,表层黄土先发生湿陷变形,深层土体则因孔隙水压力骤升引发剪切破坏,这种垂向分层的力学差异,导致同一坡体不同深度有可能同时启动滑坡与崩塌,形成“表层滑移—深层垮塌”的立体式演化。其次,触发因素的交互作用加剧了黄土地质灾害链演化的不确定性,如当强降雨与地震叠加时,雨水既直接软化土体,又通过震动增加孔隙水压力,使“地震—滑坡—泥石流”链的演化速度远远快于单一因素;而人类灌溉与采矿等的复合扰动,会形成地下水位异常梯度带,诱发坡体在干旱期仍发生缓变型滑移,打破传统的“早稳雨滑”规律。另外,演化过程中的动态反馈进一步放大了黄土灾害链的复杂性,如滑坡产生的巨大振动可能触发相邻沟谷的共振效应,使原本稳定的坡体突然失稳,而泥石流冲刷沟谷形成的负压区,又会反向侵蚀坡脚土体,催生新一轮崩塌,这种“灾害—环境—再灾害”的循环反馈,使得单一灾害链常衍生出3~5级次生分支,最终形成相互交织的灾害链网络。此外,不同时空尺度的黄土地质灾害链式过程嵌套更添复杂性,如一场强降雨引发的小时级泥石流,可能叠加在百年尺度的沟谷溯源侵蚀过程中,而人类活动加剧造成的年际尺度地下水位变化,又会重塑灾害链的启动阈值,使得黄土地质灾害链演化路径呈现出多尺度耦合特征。

1.5 工程危害大

黄土地质灾害链带来的灾害效应严重影响着黄土

高原铁路、公路、机场、能源管道等大规模基础设施的建设与安全运营,已经成为制约黄土高原相关国策落实的“瓶颈”难题^[5],黄土高原地质灾害链对工程的影响极具破坏性,其链式叠加效应甚至对区域工程体系造成系统性重创。在交通工程领域,“滑坡—泥石流”链式作用可瞬间摧毁关键设施,强降雨引发滑坡体掩埋铁路轨道后,后续泥石流持续冲刷桥墩导致桥梁垮塌,而堰塞湖溃决形成的洪水会进一步冲毁数千米外的公路路基,形成“点破坏—线中断—网瘫痪”的灾害链效应,单次事件可造成交通动脉中断数月,如2022年兰新高铁九家湾段灾害事件、2025年陇海铁路沿线灾害事件等。能源工程因链式灾害损失也尤为惨重,煤矿区的“地面塌陷—裂缝—滑坡”灾害链,会造成井下巷道变形、设备损毁,而输油管道在滑坡或滑坡—泥石流灾害链的作用下,极易发生破裂泄漏等次生灾害,且修复周期长、经济损失巨大。城乡建(构)筑物同样难以幸免,如2024年8月9日志丹强降雨诱发灾害链,崩塌物砸毁坡脚房屋后,后续洪水浸泡周边建筑地基,导致成片房屋开裂倒塌,而部分区域堰塞湖积水还会引发区域性地下水位上升,造成远郊建筑出现不均匀沉降,形成“单点倒塌—连片损毁—区域隐患”的扩散式破坏。这种多类型工程交叉受损的态势,凸显了黄土高原地质灾害链对工程系统的致命威胁。

2 治理面临的挑战

黄土高原地质灾害链的发生与黄土特殊的土性(水敏性、结构性等)、地质构造、地形地貌、气象水文条件以及人类工程活动加剧密切相关,由于其链生成灾机理十分复杂,涉及多灾种叠加放大、多过程转化,导致黄土地质灾害链监测预警不精准、多场景与风险定量评估难度大,而当前的韧性防控技术体系尚未形成,给我国黄土高原地区地质灾害链的治理带来了严峻挑战。

2.1 机制理论挑战:黄土地质灾害链形成演化动力学机制不清

以往关于黄土高原地质灾害(链)的研究大多聚焦单一类型灾害的启动与运动过程,而对多灾种时空演化和碰头、叠加、链生放大效应的理论研究较为薄弱,主要有以下三个方面有待突破:

2.1.1 黄土地质灾害链的时空演化规律

目前关于黄土地质灾害的研究成果更多是针对单一灾种如崩塌、滑坡和泥石流,而灾害链方面的研究主要集中在单个灾害链的黄土湿陷、黄土裂缝、黄土沉降和黄土洞穴等现象^[17],缺乏对黄土灾害链链式结构的整体把握,对黄土地质灾害链的时空演化规律尚不明确,零散的研究主要集中在湿陷沉降—地裂缝—崩滑转

化机制、滑坡泥石流转化机制这两个方面^[18-21]。因此,如何厘清黄土高原地质灾害链的时空分布特征及其与水动力、构造动力、地质动力、人类工程扰动等孕灾要素之间的互馈关系,建立黄土地质灾害链生的孕灾—成灾时空演化模型,揭示黄土地质灾害链的时空演化规律,是黄土地质灾害理论研究的科学问题与重大难题,也是认识黄土高原地质灾害链演化并开展灾害链场景推演与风险评估的前提与基础。

2.1.2 黄土地质灾害链物态突变判识与动力学机制

黄土是一种特殊的易灾土体,具有强烈的灾变敏感性,主要表现为极强的水敏性、脆弱的结构性、独特的强度衰减性、复杂的劣化过程以及对动力扰动敏感等方面,这造成了黄土灾害常呈链式形态演化,表现出多样性、随机性和差异性,但目前对于黄土地质灾害链的动力学机制尚不明晰。如何探究强降雨作用下黄土宏—细—微观多尺度灾害体变形过程与规律,建立灾害体物态突变判识方法,从而揭示强降雨作用下黄土高原地质灾害链的触发、启动及传递或运移动力学机制,是当前黄土地质灾害理论研究的又一科学问题。

2.1.3 黄土地质灾害链成灾放大效应与链生演进机理

黄土高原生态环境脆弱,在内外动力、重大工程扰动等多因素耦合作用下,黄土地质灾害链的链式类型多、演化过程异常复杂,这导致当前黄土高原链生灾害的气候—地质—地表—水文—人类工程多动力耦合作用过程不清,缺少全过程联动的长时间序列放大效应与演进机理的系统研究,已成为制约黄土地质灾害链研究取得理论突破的瓶颈。如何揭示黄土链生灾害成灾放大效应与演进机理,构建长时序多动力耦合作用下黄土链生灾害的链生阶段判识与致灾效应定量评价的方法体系,是黄土地质灾害链理论研究的第三个科学问题,也是实现黄土灾害链精准预测与全过程韧性防控的重要理论基础。

2.2 预警技术挑战:黄土地质灾害链监测预警不精准

融合多尺度、多时相、多角度、多属性的观测信息,并基于物联网、信息融合及智能学习等现代化信息处理技术,是当前国内外地质灾害隐患识别与监测预警的研究热点^[22]。然而,黄土高原地质灾害链具有多灾种碰头、叠加、链生、放大等特点,现有的隐患识别与监测预警技术面临着隐患识别特征不清、预警指标不明等挑战。

2.2.1 机理—数据双驱动的智能识别框架仍不健全

机理与数据双驱动的黄土链生灾害隐患智能识别展现出了一定的潜力,但在识别图谱、识别模型和灾害编目方面还存在挑战:(1)识别图谱方面,目前基于多源

遥感的黄土单灾种隐患指标体系已初步建立,但多灾种叠加和多动力耦合作用下的黄土链生灾害隐患指标体系不明确、隐患识别图谱未成型^[23];(2)识别模型方面,在遥感大数据和深度学习网络的支持下,目前的黄土链生灾害隐患智能识别模型可解释性较差,黄土链生灾害识别率偏低^[24,25];(3)隐患编目方面,黄土高原地区现有链生灾害编目多针对已发生灾害事件进行人工解译,编目智能化水平低且信息单一,黄土链生灾害隐患编目完备程度较低。

2.2.2 时空演化视角下的灾害链协同监测机制不足

多源异构传感协同监测技术在单灾害体上得到广泛应用,但在黄土链生灾害监测中存在两方面的技术挑战:(1)协同性问题,黄土链生灾害转化机制多变,监测技术难以清晰地识别链生灾害的隐患特征,不同数据源的分散和准确性差异需要有效整合,监测协同性差^[26];(2)可靠性问题,黄土高原地区恶劣天气频发,观测环境复杂,给监测信息的精准获取带来挑战,亟需克服复杂条件和极端天气影响,获取黄土链生灾害重点部位关键监测参数^[27]。

2.2.3 黄土链生灾害精准预警模型尚处起步探索期

目前,黄土链生灾害预警主要集中于少数几个典型实例的调查研究,在预警指标的选择、预警模型的建立等方面仍缺乏系统性的研究:(1)预警指标方面,黄土地质灾害链的发生与地层岩性、地质构造、持续降雨、地形坡度、坡向、沟槽密度、地表覆盖、土地开发等多种因素相关,目前的预警缺少对这些指标的定量分析,导致预警指标不明^[28];(2)预警模型方面,目前黄土链生灾害预警模型未考虑多个预警指标间的耦合关系,难以实现复杂场景的链生灾害精确预警;(3)多级预警方面,多级预警体系是以不同时间尺度的信息为基础,分别关注数月、数天和数小时的时间跨度,通过综合考虑多种因素,确保在灾害发生前提供充分的预警信息,以减轻可能的灾害影响。目前的黄土链生灾害预警以静态为主,尚未基于实时动态数据进行。

2.3 评估方法挑战:黄土地质灾害链多场景推演与风险精准评估难度大

黄土高原地区地质灾害链演化路径多变、链式机理复杂,给灾害链多场景推演与风险精准评估带来诸多挑战。这一难题的根本原因在于孕灾环境高度异质、致灾因子演化路径多变、承灾系统时变性强,以及多源、多尺度关键数据的严重缺失。当前主流评估方法在多场景适应性、动态响应能力及不确定性表达等方面均存在显著不足,难以满足复杂灾害链全过程、多情景、高精度评估的需求。

2.3.1 灾害链过程非线性耦合显著,传统模型刻画能力不足

黄土具有湿陷性、结构疏松、节理裂隙发育等特殊物理性质,在强降雨条件下极易诱发滑坡、崩塌等地质灾害。同时,黄土高原地貌破碎、水系发育复杂,地表水与地下水交互路径多变,导致降雨入渗、坡体失稳、沟道侵蚀等过程高度耦合,灾害链演化路径呈现显著非线性与不确定性^[29]。传统基于经验统计或简化物理假设的模型如SHALSTAB、SINMAP、TRIGRS等,在刻画多因子耦合机制、模拟链式演化路径方面能力有限,难以反映灾害链中“滑坡—泥石流—堰塞湖”等复杂级联过程的动力学特征^[14,17]。此外,现有模型多聚焦于单一灾种或静态情景,缺乏对多灾种耦合演化机制的动态建模能力,难以支撑灾害链全过程的精准推演。

2.3.2 数值模拟受限于初始条件缺失,精度与可靠性难以保障

黄土高原地区地质灾害链的数值模拟面临初始边界条件难以获取、模型结构过度简化等瓶颈^[30]。当前常用有限元、离散元数值模型及基于物理过程的水文—力学耦合模型如GEO-STUDIO、RAMMS等,在模拟坡体稳定性、泥石流运动过程方面具有一定优势,但对地下水位、节理结构、初始孔压、土体非均质性等关键参数的依赖性极强,而黄土高原区相关观测数据严重匮乏,导致模拟结果存在较大不确定性^[31]。统计推演模型如贝叶斯网络、逻辑回归、随机森林等虽具有较强的区域适应性和泛化能力,但在极端事件预测、灾害链级联过程动态演化建模方面表现不足,难以有效刻画灾害链中“触发—传播—放大”机制。随着极端气候事件和工程扰动频率增加,灾害链演化路径的不确定性显著增强,传统模型在动态响应与情景推演方面的局限性日益凸显。

2.3.3 风险评估方法静态性强,难以动态反映承灾体脆弱性

当前主流风险评估方法多基于静态暴露度与简化脆弱性模型,如基于历史灾情的经验模型、基于土地利用类型的暴露度评估模型和基于建筑结构类别的脆弱性曲线(如HAZUS模型)等,难以反映承灾体在不同灾害强度下的动态响应特征^[31]。黄土高原典型承灾对象如土坯房、山区道路、淤地坝等,其结构脆弱性关系尚不明确,缺乏系统的本构模型与破坏阈值研究。同时,社会经济数据如人口分布、建筑密度及基础设施布局等更新滞后,难以支撑动态风险评估需求。此外,灾害发生的时间概率、强度空间分布、影响范围等存在显著不确定性,这些不确定性在评估链条中不断放大,导致评估结果可信度降低,难以有效支撑灾害风险分区与应急管理决策^[32-33]。

2.3.4 多源异构数据融合难,监测与验证体系薄弱

数据获取困难与数据质量低是制约黄土地质灾害链模拟与评估的核心瓶颈之一。高精度地质填图、土工参数、地下水动态、土壤含水率等关键观测数据严重缺失,InSAR、GNSS、地面传感器等监测网络覆盖范围有限,导致模型校准与验证缺乏有效支撑。同时,多源异构数据如遥感数据、地质勘察数据、气象水文数据及社会经济数据等在时空尺度、格式标准、精度等级等方面存在显著差异,给数据融合与集成应用带来巨大挑战^[34]。此外,灾害链演化过程涉及坡体—沟道—流域多尺度耦合,现有监测体系多以单点、单灾种为主,缺乏面向灾害链全过程的协同观测与验证平台,严重制约了多场景推演模型的可靠性提升与实用化推广。

2.4 防控对策挑战:黄土地质灾害链全过程韧性防控技术体系不完善

2.4.1 源头削链—过程断链—末端消链全过程关联的韧性防控技术缺乏

黄土高原强降雨引发的崩塌—滑坡—泥石流灾害链,具有突发性强、不确定性大和复杂程度高等特点,因此对工程防灾设计提出了更高要求。近年来工程韧性理念已被应用于城市基础设施韧性提升与地下空间如地铁隧道的智能建造、防灾减灾等结构工程领域的优化设计^[35-37]。在工程地质领域,韧性理念已用于指导泥石流灾后恢复重建、降雨滑坡灾害的韧性评估和滑坡灾害风险的韧性管理,以及边坡防护工程的韧性设计等^[38-41],但缺少地质灾害链源头、过程及末端“全链条”韧性防控技术的系统研究。如何研发从源头上削链(即抑制灾害链发生)、从过程上拦截(即切断传播途径)和从末端上消链(即消除灾害链对工程系统的影响)等关键技术,实现工程系统的结构鲁棒性与可恢复性提升,是当前黄土高原地质灾害链韧性防控的关键挑战。

2.4.2 绿色防护材料与生态韧性修复技术有待深入

黄土崩塌—滑坡—泥石流灾害链多源于沟道上游斜坡或边坡的失稳,当前考虑植被根系力学加固效应的生态护坡理论得到广泛推广,但也出现了前期养护管理困难、成本高和“年年种新草”的尴尬情况^[42],于是黄土改良剂如水泥、石灰、粉煤灰、固体废弃物、高吸水树脂、聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)、瓜尔豆胶、各种纤维聚合物及土壤固化剂等逐渐应用于黄土改良^[43-47],以改善边坡土体渗透性能,提高土体强度和水稳性,增强坡面土体抵抗径流侵蚀和冲刷的能力^[48,49]。这些改良剂在常温下与土壤发生一系列物理化学反应,可胶结土粒和填充土壤空隙,从而改善土壤的强度、耐久性等工程性质^[50],但没有注重生态效应,缺乏自我更新能力,以致因

用的时效性与持续性较差,形成的生态系统效应较漫长。近些年,新兴的基于微生物诱导碳酸钙沉淀技术(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)的生态友好型岩土降渗加固技术在工程地质领域掀起了一股研究热潮,拓展了地质工程问题防治技术的范畴^[51-53]。如何将MICP技术与目前主流黄土改良剂相结合,研发既改善土体工程性质又提升边坡生态效应的新型改良材料,与植被护坡技术协同作用,创新黄土边坡和淤地坝的绿色防控方法和综合处治技术,实现黄土地质灾害链全时段、可持续的绿色韧性防控,仍需要进一步的理论探索和实践检验。

2.4.3 人—地—工程相协调的韧性防控技术体系尚不完善

近年来黄土高原平山造城、治沟造地和固沟保塬三大重大工程实施,加之能源、交通工程建设规模之大,前所未有的。而黄土高原地区地质灾害链频发且强度大,以往“三控”和“三防”技术体系仍集中于提升单一自然灾害种、单个工程和多灾种单工程的韧性^[9]。在防控技术体系及防控模式建立方面,尚未考虑自然灾害—工程灾害—人居安全三位一体深度融合,也尚未考虑构建自然灾害—工程灾害—人—地表地质过程等多方面指标综合体系,缺乏一套系统的黄土高原丘陵沟壑区全流域链生灾害韧性防控范式。如何在单一自然灾害种、单个工程韧性防控评价指标体系的基础上,基于“压力—状态—响应”多维度模型,考虑地质灾害链—工程灾害(链)—人—地表地质过程等多方面因素,建立黄土高原地质灾害链韧性防控综合评价指标体系,并利用深度学习技术和模糊综合评价理论,构建多指标特征及多情景模式下地质灾害链防控韧性评价模型,实现地质灾害链防控韧性水平快速评估,最终建立黄土地质灾害链“人—地—工程”相协调的控水—控滑移—控侵蚀—控溃决—控灾变的“五控”韧性防控技术体系,是当前迫切需要研究解决的重大技术难题。

3 应对策略

为科学应对黄土高原区域群发性、高耦合性、多突发性与跨区域传播特征日益突出的复杂地质灾害链,应加强地质灾害链演化机制、监测预警、风险评估和韧性防控及智能化决策服务方面的研究工作。

3.1 突破链生灾害演化动力学机制理论瓶颈

突破地质灾害链的成因、演化动力学等基础理论是科学应对黄土高原地质灾害链的重要基础。针对黄土链生灾害时空演化和多灾种碰头放大效应与机制不清的难题,未来应加强以下四个方面的研究(图2):(1)摸

清黄土高原地质灾害链的本底信息,建立黄土地质灾害链孕灾环境和承灾体数据库,明晰强降雨驱动下链生灾害的关键孕灾要素,阐明气候(强降雨)—地质—地表—水文—人类工程多动力与重大链生灾害之间的内在联系,揭示黄土链生灾害的发育特征与成灾模式;(2)阐明黄土地质灾害链的时空分布特征与气候(强降雨)—地质—地表—水文—人类工程扰动等各孕灾要素之间的互馈关系,构建链生灾害的孕灾—成灾时空演化模型,揭示黄土链生灾害的时空演化规律;(3)开展野外现场、室内力学试验与模型试验研究工作,从宏—细—微观多尺度揭示黄土灾害体变形过程与规律,建立基于宏—细—微观多尺度灾害体物态突变判据,揭示黄土高原链生灾害动力学机制;(4)构建地质体—灾变体—工程体的地质模型与数学力学模型,揭示气候—地质—地表—水文—人类工程多动力耦合作用下黄土链生灾害多灾种碰头、叠加、链生、致灾放大效应和链生演进机理,建立长时序、多动力耦合作用下黄土链生灾害的链生阶段判识与致灾效应定量化评价体系。

3.2 攻关多灾种—多灾链协同监测预警新技术

在气候—地质—地表—水文多动力耦合作用下,黄土高原地质灾害链具有关联性、层次性和复杂性的特点,现有的单灾种隐患识别和监测预警技术存在识别特征不清、监测指标不明、预警精度不高和系统集成不足的问题,制约了黄土高原链生灾害防控水平,亟需攻关多动力耦合作用下的黄土链生灾害精准监测预警技术(图3):(1)研究灾害隐患多尺度指标体系和识别图谱,建立机理与数据双驱动的隐患识别模型,实现黄土链生灾害隐患编目;(2)研发顾及灾害时空演化过程的协同监测网络,实现全链条、多要素集成的灾害信息智能感知;(3)构建降雨强度、降雨历时、地形地貌、地层岩性等多层次关联预警指标,研发贝叶斯框架下的多过程耦合预警模型,实现黄土链生灾害多级精准预警;(4)研发具备云建模、云存储、云预警的高精度黄土链生灾害实时监测预警云平台,实现集终端运行状态远程监控、多区域云平台实时监测、远程视频监控和智能预警等多功能于一体的监测预警智能管理系统。

3.3 创新多场景—多灾种的场景推演与风险评估技术

在传统地质灾害模拟与评估体系基础上,引入大数据、机器学习与大语言模型等新兴技术,为破解黄土高原地质灾害多场景推演与风险精准评估难题提供了新的路径。未来可从以下三个方面着手开展研究工作(图4):(1)研发多场景—多灾种异构数据融合技术。面对黄土灾害链孕育机制的高复杂性与强非线性演化特征,需在深化物理机制理解的同时,借助数据驱动模

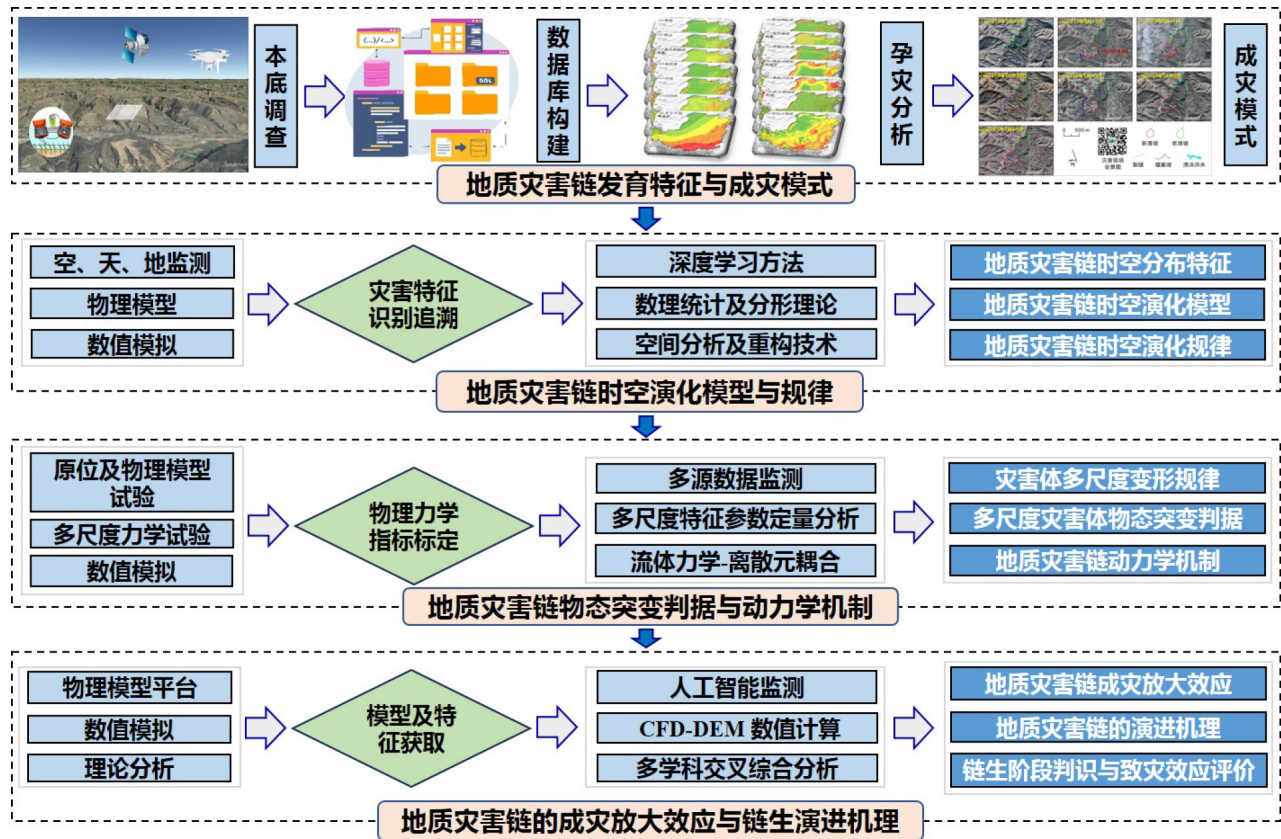


图2 黄土高原地质灾害链时空演化动力学机制研究策略

Fig.2 Research Strategy on the Spatio-temporal Evolution Dynamics Mechanism of Geological Hazards Chain in the Loess Plateau

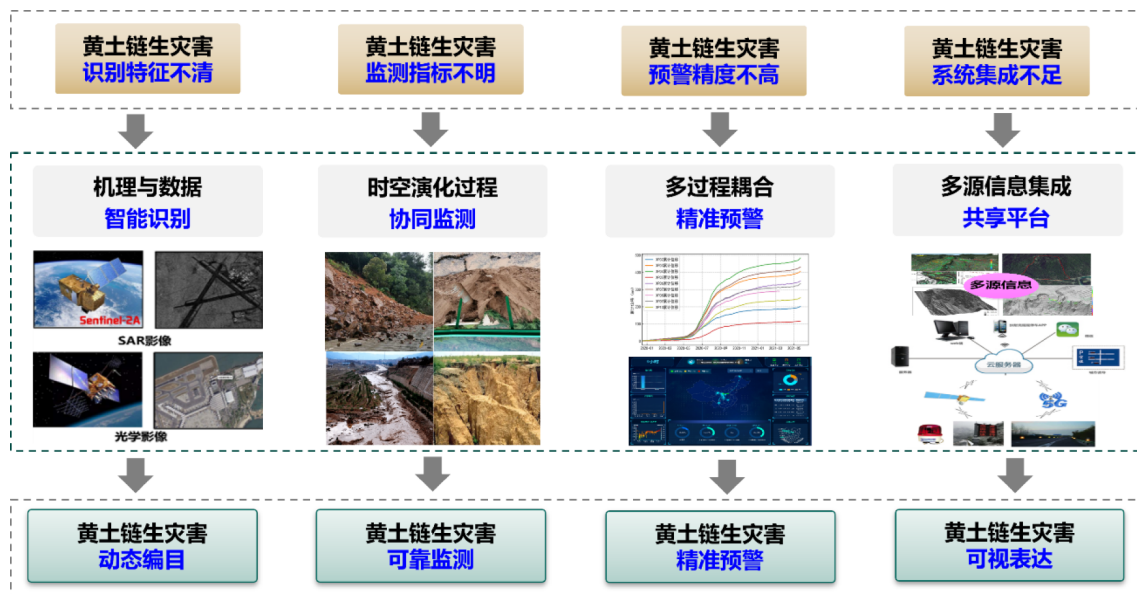


图3 多灾种—多灾链协同监测预警技术研发策略

Fig.3 Research and Development Strategy for Collaborative Monitoring and Early Warning Technology of Multi-hazard Types and Multi-hazard Chains

型构建地质灾害链的典型演化路径,提升对多源扰动条件下灾害链响应过程的动态模拟能力。而实现这一目标的关键在于多源异构数据的融合,通过整合地质、水

文、气象、遥感、工程活动等多维信息,构建覆盖灾害链全过程的时空数据库,并结合InSAR、无人机等高分观测手段,全面感知孕灾环境与灾害链演化过程。进而通

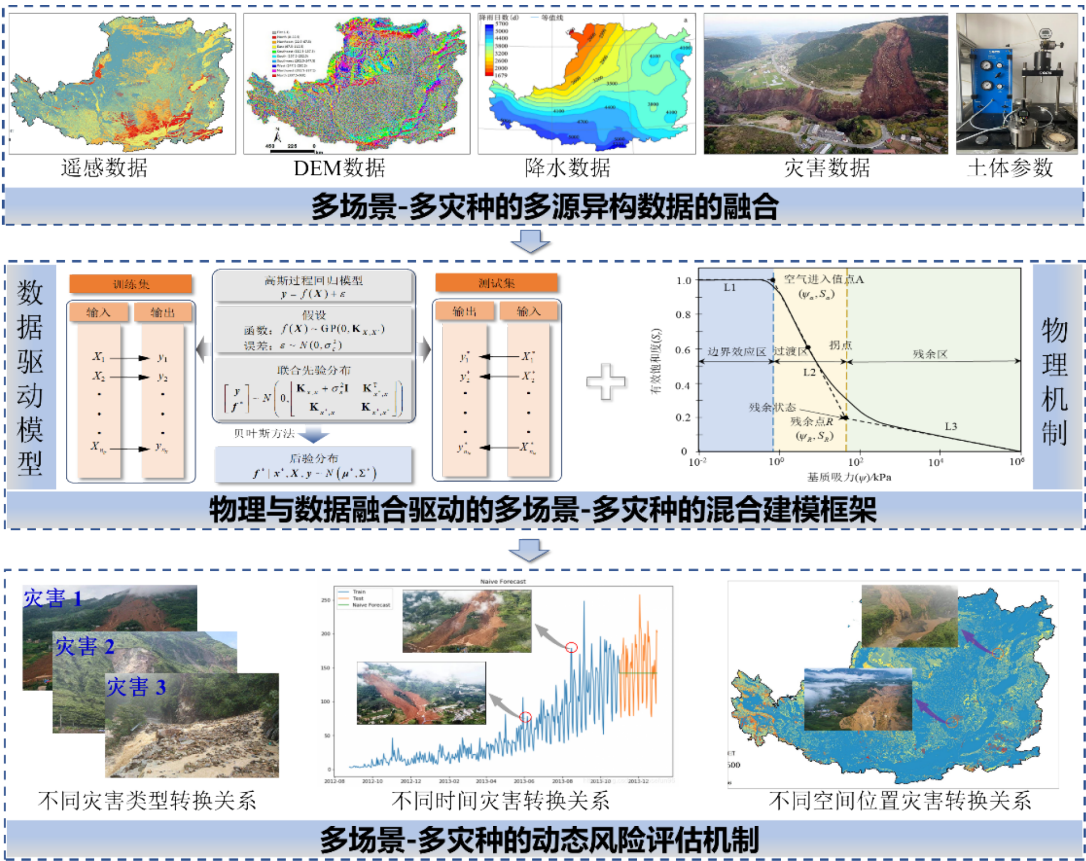


图4 多场景—多灾种的场景推演与风险评估方法

Fig.4 Scenario Deduction and Risk Assessment Method for Multiple Scenarios and Hazards

过训练深度学习模型识别灾害链中关键驱动因子,实现灾害链演化趋势的快速模拟与场景识别。(2)搭建基于融合物理与数据驱动的多场景—多灾种混合建模框架。一方面,保留多场耦合的数值模拟能力以确保物理约束的可信性;另一方面,引入机器学习方法对复杂系统的高阶交互与参数敏感性进行建模,实现模型结构的自适应调整与高效计算。同时,将不确定性量化方法嵌入模拟全流程,对初始条件、模型参数与边界设定等关键环节的不确定性进行系统评估,提升推演结果的稳定性与风险表达的可信度。(3)建立多场景—多灾种动态风险评估机制。实时集成最新监测与社会经济数据,动态更新承灾体特征、暴露水平与脆弱性参数,并依托大语言模型强大的语义解析能力,从文献、专家知识与实时数据中构建高维知识图谱,提升模型的可解释性与辅助决策能力。最终构建“多源感知—智能建模—动态评估”的风险评估与管控体系,为黄土高原地质灾害链的前瞻性识别与科学决策提供精准、高效、可追溯的技术支撑。

3.4 建立人—地—工程相协调的韧性防控技术体系

黄土高原地质灾害链表现出区域性群发、链式多样

和演化复杂性,韧性防控是黄土地质灾害链治理面临的一大难题。尤其是对于黄土高原沟道流域的湿陷—崩塌—滑坡—泥石流—溃坝这类典型而突出的地质灾害链,目前未能从全链条、全过程进行综合治理,且人—地—工程协调性体现不足。应加强以下三个方面的研究(图5):(1)研发黄土地质灾害链源头削链—过程断链技术。结合黄土高原水文地质与气候条件,因地制宜,融合植物根系锚固、生物纤维加筋、微生物固化土性改良及生物营养等方法,研发基于新材料—新方法的黄土链生灾害削链技术,提升流域沟道坡面生态自修复能力,从源头上削弱与抑制灾害链的演进发展。其次,优化地表防渗阻陷、坡面排水系统与坡型设计及沟道流域淤地坝系空间布局,研发湿陷处置、边坡稳固和沟道拦挡的地质灾害链过程解耦消能断链技术。(2)研发黄土地质灾害链的末端消链关键技术。开展黄土高原地质灾害链与城市工程系统互馈研究,系统揭示灾害链与城市工程系统互馈致灾机理,建立灾害链与工程系统互馈致灾预测与灾情快速评价方法,研发基于工程系统抗灾鲁棒性提升的地质灾害链末端消链关键技术,全面提升城市工程系统的抗灾韧性。(3)建立基于人—地—工程相协

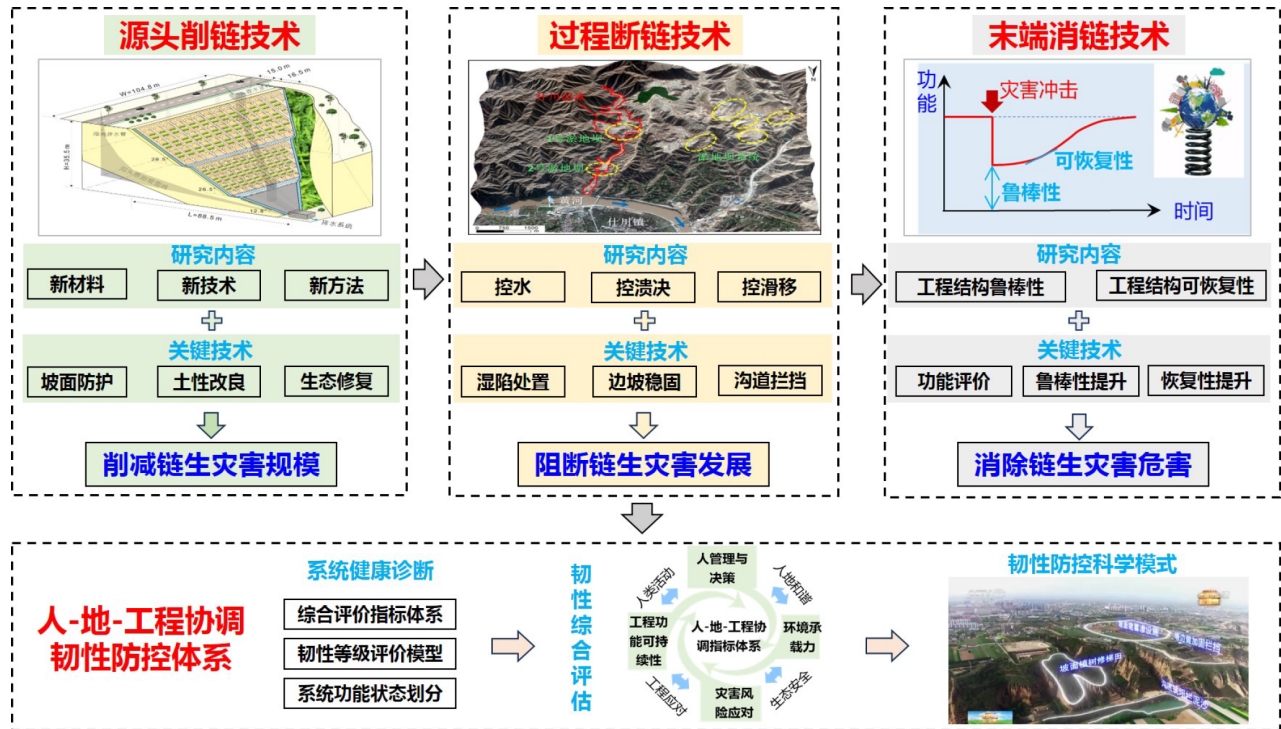


图5 人—地—工程相协调的韧性防控技术体系构建思路与应对策略

Fig.5 Construction Ideas and Response Strategies for a Resilient Prevention and Control Technology System that Coordinates Human Environment Engineering

调的黄土地质灾害链韧性防控技术体系。在黄土地质灾害链演化机制及其与工程系统互馈致灾的基础上,构建链生灾害健康诊断指标体系、韧性防控综合评价指标体系和防控韧性评价模型,提出黄土高原沟道流域上游边坡“控水—控侵蚀—控变形”、流域淤地坝“控溃决”和下游城镇基础设施密集区工程系统“控灾变”的“人—地—工程”协调的韧性防控科学范式,形成黄土高原地质灾害链人—地—工程相协调的韧性防控技术体系。

3.5 构建灾害信息共享与智能决策服务平台

灾害信息共享与智能决策服务平台搭建能够打破信息孤岛、优化资源调配,推动跨部门协同,构建全民防灾网络,形成“监测—预警—响应—处置”闭环,是黄土地质灾害链科学应对策略的关键环节。具体需要从以下三个方面开展工作(图6):(1)研发关系/对象数据库结构,构建完整的地理信息数据平台。基于GIS空间分析系统,实现野外采集数据实时传输和多人数据集成,建立气候—水文—地质—地貌—人类工程活动—承灾体全要素实时动态数据库。在统一平台上建设多门类、多维度黄土链生灾害时空数据池,支持链生灾害全生命周期管理。(2)研发黄土地质灾害链风险信息融合技术。从触发机制复杂性和诱发因素多元化方面,分析地形地貌、地质岩性、环境变化、人类活动、降雨融雪等与灾害链发生之间的关系,构建易发性、危险性及风险评估体

系。研发地质灾害链多源信息融合技术,优化逻辑回归、人工神经网络、随机森林等机器学习模型,进行特征选择和超参数优化,使用GIS方法实现风险评估各要素自动提取,实现大区域自动化评估并进行比较。(3)搭建识别—评估—防控—决策信息共享技术平台。将黄土高原地质灾害链发育背景、精准监测与协同预警、场景推演与风险评估、韧性防控体系数据化和信息化,建立强降雨作用下黄土地质灾害链风险防控决策模型;搭建地质灾害链风险识别—定量评估—韧性防控—智能决策全过程信息共享技术平台系统,并进行软硬件兼容性检验,建立黄土地质灾害链数据—模型—知识一体化的群测群防技术方法体系,进而实现基于实际应用场景的风险防控高效管理与智能化服务。

4 结语

黄土高原地质灾害链机理与致灾过程十分复杂,治理难度大,尽管目前研究已经取得了一些成果,但依然任重道远。黄土地质灾害链宏—细—微观多尺度演化致灾机理、基于多场多尺度与人工智能的监测预警、气候变化驱动灾害链风险智能评价以及新型防护材料、生态与工程协同防护的韧性防灾减灾技术是我国黄土高原地质灾害链治理研究领域未来的主要研究方向。尤其是在全球气候变化、降雨带北移的背景下,黄土高原地质

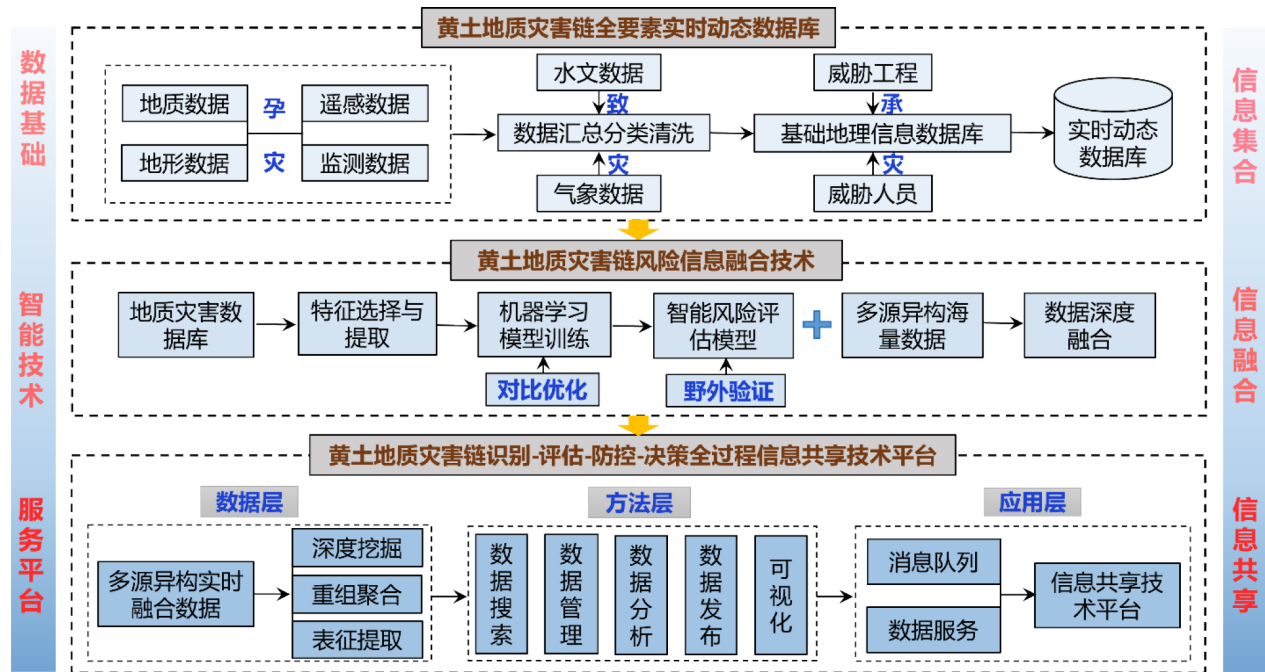


图6 黄土地质灾害链风险识别—定量评估—韧性防控—智能决策全过程信息共享平台框架图

Fig.6 Framework Diagram of the Information Sharing Platform for the Entire Process of Risk Identification, Quantitative Assessment, Resilience Prevention and Control, and Intelligent Decision-making in the Loess Geological Hazards Chain

灾害链风险显著增加,科学防控难度大,是我国工程地质与环境学科研究领域的重大难题与挑战。科学诠释黄土高原地质灾害链演化动力学机制,研发多灾种—多灾链协同的监测预警技术、场景推演与风险评估技术方法,建立基于人—地—工程相协调的韧性防控技术体系,构建链生灾害信息共享与智能化决策服务平台,实现从“被动减灾”到“主动防灾、智能化防灾”的根本性转变,切实提高黄土高原地质灾害链防控水平,为黄土高原人居安全与国家能源供应安全提供重要保障。本文从理论、技术和应用层面系统梳理总结了当前黄土高原地质灾害链治理面临的挑战,并从灾害链机理、监测预警、风险评估和韧性防控及智能化决策等方面提出了应对策略,为当前乃至未来我国黄土高原地质灾害链的科学防控提供指导与参考。需要指出,本文主要聚焦黄土高原地区日趋常态化的强降雨或极端降雨气候事件诱发的黄土地质灾害链问题,而地震概率性事件诱发的地质灾害链问题并未具体涉及,应对策略框架也基本适用。

参考文献

- [1] 安芷生,周卫健,刘彦随,等. 黄土高原生态屏障建设的创新路径与展望. 中国科学院院刊,2025,40(6):969—979.
An ZS,Zhou WJ,Liu YS,et al. Innovative pathways and perspectives for construction of ecological barriers on Loess Plateau. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2025,40(6):969—979. (in Chinese)
- [2] 彭建兵,王启耀,门玉明,等. 黄土高原滑坡灾害. 北京:科学出版社,2019.
- [3] 彭建兵,卢全中,黄强兵,等. 汾渭盆地地裂缝灾害. 北京:科学出版社,2017.
- [4] 彭建兵,李庆春,陈志新,等. 黄土洞穴灾害. 北京:科学出版社,2008.
- [5] 彭建兵,林鸿州,王启耀,等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路. 工程地质学报,2014,22(4):684—691.
- [6] 王家鼎,许元珺,张登飞,等. 黄土振动促渗效应研究. 中国科学(地球科学),2021,51(5):763—782.
- [7] 张茂省,李同录. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [8] 范文,邓龙胜,于渤,等. 极端降雨下黄土体灾变机制与滑坡风险防控. 地球科学与环境学报,2025,47(3):285—312+282.
- [9] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [10] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [11] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [12] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [13] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [14] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [15] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [16] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [17] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [18] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [19] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [20] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [21] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [22] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [23] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [24] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [25] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [26] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [27] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [28] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [29] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [30] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [31] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [32] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [33] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [34] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [35] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [36] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [37] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [38] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [39] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [40] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [41] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [42] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [43] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [44] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [45] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [46] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [47] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [48] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [49] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [50] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [51] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [52] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [53] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [54] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [55] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [56] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [57] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [58] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [59] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [60] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [61] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [62] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [63] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [64] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [65] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [66] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [67] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [68] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [69] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [70] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [71] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [72] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [73] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [74] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [75] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [76] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [77] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [78] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [79] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [80] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [81] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [82] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [83] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [84] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [85] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [86] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [87] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [88] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [89] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [90] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [91] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [92] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [93] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [94] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [95] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [96] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [97] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [98] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [99] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.
- [100] 范文,邓龙胜,于渤,等. 黄土滑坡诱发因素及其形成机理研究. 工程地质学报,2011,19(4):530—540.

- [9] 许强,陈婉琳,蒲川豪,等. 基于自然的解决方案在黄土高原重大工程灾变防控中的理论与实践. 工程地质学报,2022,30(4):1179—1192.
Xu Q, Chen WL, Pu CH, et al. Theoretical and practical approach based on nature-based solutions in disasters control of major engineering in loess plateau. *Journal of Engineering Geology*, 2022, 30(4): 1179—1192. (in Chinese)
- [10] Peng JB, Fan ZJ, Wu D, et al. Heavy rainfall triggered loess—mudstone landslide and subsequent debris flow in Tianshui, China. *Engineering Geology*, 2015, 186: 79—90.
- [11] 兰恒星,彭建兵,祝艳波,等. 黄河流域地质地表过程与重大灾害效应研究与展望. 中国科学:地球科学,2022,52(2):199—221.
Lan HX, Peng JB, Zhu YB, et al. Geological and surficial processes and major disaster effects in the Yellow River Basin. *Science China Earth Sciences*, 2022, 52(2): 199—221. (in Chinese)
- [12] 祁生文,侯晓坤,于永堂,等. 压实黄土场地湿陷沉降机理与黄土高原平山造城适宜性. 科学通报,2023,68(14):1844—1860.
Qi SW, Hou XK, Yu YT, et al. Collapse and subsidence mechanism of compacted loess and suitability of mountain bulldozing and city creation projects in the Loess Plateau of China. *Chinese Science Bulletin*, 2023, 68(14): 1844—1860. (in Chinese)
- [13] Guo ZY, Huang QB, Liu Y, et al. Model experimental study on the failure mechanisms of a loess-bedrock fill slope induced by rainfall. *Engineering Geology*, 2023, 313: 106979.
- [14] 马鹏辉,彭建兵. 论黄土地质灾害链(一). 自然灾害学报,2022,31(2):1—11.
Ma PH, Peng JB. On Loess Geohazards Chain i. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(2): 1—11. (in Chinese)
- [15] 姜程,霍艾迪,朱兴华,等. 黄土水力侵蚀-滑坡-泥流灾害链的研究现状. 自然灾害学报,2019,28(1):38—43.
Jiang C, Huo AD, Zhu XH, et al. Research status of loess hydraulic erosion-landslide-mudflow chain. *Journal of Natural Disasters*, 2019, 28(1): 38—43. (in Chinese)
- [16] 朱兴华,彭建兵,同霄,等. 黄土地区地质灾害链研究初探. 工程地质学报,2017,25(1):117—122.
Zhu XH, Peng JB, Tong X, et al. Preliminary research on geological disaster chains in loess area. *Journal of Engineering Geology*, 2017, 25(1): 117—122. (in Chinese)
- [17] 马鹏辉,彭建兵. 论黄土地质灾害链(二). 自然灾害学报,2022,31(3):15—24.
Ma PH, Peng JB. On Loess Geohazards Chain ii. *Journal of Natural Disasters*, 2022, 31(3): 15—24. (in Chinese)
- [18] Tu XB, Kwong AKL, Dai FC, et al. Field monitoring of rainfall infiltration in a loess slope and analysis of failure mechanism of rainfall-induced landslides. *Engineering Geology*, 2009, 105(1—2): 134—150.
- [19] Zhang FY, Wang GH, Kamai T, et al. Undrained shear behavior of loess saturated with different concentrations of sodium chloride solution. *Engineering Geology*, 2013, 155: 69—79.
- [20] Fan XM, Xu Q, Scaringi G, et al. A chemo-mechanical insight into the failure mechanism of frequently occurred landslides in the Loess Plateau, Gansu Province, China. *Engineering Geology*, 2017, 228: 337—345.
- [21] Wang XG, Hu S, Lian BQ, et al. Formation mechanism of a disaster chain in Loess Plateau: A case study of the Pucheng County disaster chain on August 10, 2023, in Shaanxi Province, China. *Engineering Geology*, 2024, 331: 107463.
- [22] 李振洪,朱武,余琛,等. 影像大地测量学发展现状与趋势. 测绘学报,2023,52(11):1805—1834.
Li ZH, Zhu W, Yu C, et al. Development status and trends of imaging geodesy. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2023, 52(11): 1805—1834. (in Chinese)
- [23] 许强,崔圣华,黄维,等. 面向工程地质领域的滑坡知识图谱构建方法研究. 武汉大学学报(信息科学版),2023,48(10):1601—1615.
Xu Q, Cui SH, Huang W, et al. Construction of a landslide knowledge graph in the field of engineering geology. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2023, 48(10): 1601—1615. (in Chinese)
- [24] Wu ZR, Ma PF, Zheng Y, et al. Automatic detection and classification of land subsidence in deltaic metropolitan areas using distributed scatterer InSAR and Oriented R-CNN. *Remote Sensing of Environment*, 2023, 290: 113545.
- [25] Zeng TR, Wu LY, Hayakawa YS, et al. Advanced integration of ensemble learning and MT-InSAR for enhanced slow-moving landslide susceptibility zoning. *Engineering Geology*, 2024, 331: 107436.
- [26] Sestras P, Badea G, Badea AC, et al. A novel method for landslide deformation monitoring by fusing UAV photogrammetry and LiDAR data based on each sensor's mapping advantage in regards to terrain feature. *Engineering Geology*, 2025, 346: 107890.
- [27] 朱武,张勤,朱建军,等. 特大滑坡实时监测预警与技术装备研发. 岩土工程学报,2022,44(7):1341—1350.
Zhu W, Zhang Q, Zhu JJ, et al. Real-time monitoring and early warning technology for huge landslides. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2022, 44(7): 1341—1350. (in Chinese)
- [28] Ma ZJ, Mei G. Forecasting landslide deformation by integrating domain knowledge into interpretable deep learning considering spatiotemporal correlations. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2025, 17(2): 960—982.
- [29] Chen DH, Yuan RM, Wang P, et al. Preliminary study on the development characteristics and formation mechanism of the Zhongchuan Town liquefaction landslide-mudflow-blockage disaster chain induced by the 2023 Jishishan Earthquake in Gansu Province. *Landslides*, 2024, 21(10): 2467—2480.
- [30] Li ZH, Zhou FJ, Han XD, et al. Numerical simulation and analysis of a geological disaster chain in the Peilong valley, SE Tibetan Plateau. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(4): 3405—3422.
- [31] 张继权,荣广智,李天涛,等. 多致灾因子诱发地质灾害链综合风险评估技术. 中国减灾,2022,18(7):23—26.
Zhang JQ, Rong GZ, Li TT, et al. Comprehensive risk assessment technology of geological disaster chain induced by multiple disaster-causing factors. *Disaster Reduction in China*, 2022, 18(7): 23—26. (in Chinese)
- [32] Fan XM, Scaringi G, Korup O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 2019, 57(2): 421—503.
- [33] Yao SY, Lei Y, Liu DZ, et al. Assessment risk of evolution process of disaster chain induced by potential landslide in Woda. *Natural Hazards*,

- 2024,120(1):677—700.
- [34] Losacco N, Cotecchia F, Santaloia F, et al. Multi-source data analysis for conceptual modelling of slow landslide mechanisms: Application to the Pianello hillslope in the Daunia Appenines. *Engineering Geology*, 2025, 355: 108255.
- [35] 顾祥林, 余倩倩, 姜超, 等. 城市土木工程基础设施韧性提升理论与方法. *工程力学*, 2023, 40(3): 1—13.
Gu XL, Yu QQ, Jiang C, et al. Theory and method of resilience enhancement of urban civil engineering infrastructures. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(3): 1—13. (in Chinese)
- [36] 陈湘生, 喻益亮, 包小华, 等. 基于韧性理论的盾构隧道智能建造. *现代隧道技术*, 2022, 59(1): 14—28.
Chen XS, Yu YL, Bao XH, et al. Intelligent construction of Shield Tunnels based on resilience theory. *Modern Tunnelling Technology*, 2022, 59(1): 14—28. (in Chinese)
- [37] Huang QB, Gou YX, Peng JB. Disaster prevention and structural resilience of metro tunnels crossing active ground fissures in Xi'an, China. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2025, 162: 106665.
- [38] Gan L, Wang YY, Lin ZY, et al. A loss-recovery evaluation tool for debris flow. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2019, 37: 101165.
- [39] Zhang XW, Song J, Peng J, et al. Landslides-oriented urban disaster resilience assessment—A case study in ShenZhen, China. *Science of the Total Environment*, 2019, 661: 95—106.
- [40] Tian NM, Lan HX. The indispensable role of resilience in rational landslide risk management for social sustainability. *Geography and Sustainability*, 2023, 4(1): 70—83.
- [41] Zhou C, Huang C, Chen YD, et al. Development of a novel resilient anchor cable and its large shear deformation performance. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2023, 163: 105293.
- [42] Wang N, Jiao JY, Jia YF, et al. Seed persistence in the soil on eroded slopes in the hilly-gullied Loess Plateau region, China. *Seed Science Research*, 2011, 21(4): 295—304.
- [43] Zhang ZQ, Jing YL. Mechanical properties of road base with roadbood EN-1. *Advanced Materials Research*, 2011, 255: 3366—3370.
- [44] Ghadakpour M, Choobbasti AJ, Kutanaei SS. Experimental study of impact of cement treatment on the shear behavior of loess and clay. *Arabian Journal of Geosciences*, 2020, 13(4): 184.
- [45] Gao YY, Qian H, Li XY, et al. Effects of lime treatment on the hydraulic conductivity and microstructure of loess. *Environmental Earth Sciences*, 2018, 77(14): 529.
- [46] Ma WJ, Wang BL, Wang X, et al. Experimental study on mechanical properties of modified loess. *Water Resour Hydropower Eng*, 2018, 49(10): 150—156.
- [47] Hou YF, Li P, Wang JD. Review of chemical stabilizing agents for improving the physical and mechanical properties of loess. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(12): 9201—9215.
- [48] Kukal SS, Kaur M, Bawa SS, et al. Water-drop stability of PVA-treated natural soil aggregates from different land uses. *Catena*, 2007, 70(3): 475—479.
- [49] Cheng YJ, Tang CS, Pan XH, et al. Application of microbial induced carbonate precipitation for loess surface erosion control. *Engineering Geology*, 2021, 294: 106387.
- [50] Xue C, Wang XG, Lian BQ, et al. Research on the mechanism of composite improvement of loess based on quantitative analysis of microstructure and mechanical strength. *Construction and Building Materials*, 2023, 379: 131215.
- [51] Soon NW, Lee M, Khun TC, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of residual soil through microbial-induced calcite precipitation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2014, 140(5): 04014006.
- [52] Jiang NJ, Soga K. The applicability of microbially induced calcite precipitation (MICP) for internal erosion control in gravel-sand mixtures. *Géotechnique*, 2017, 67(1): 42—55.
- [53] Sun XH, Miao LC, Wang HX, et al. Bio-cementation for the mitigation of surface erosion in loess slopes based on simulation experiment. *Journal of Soils and Sediments*, 2022, 22(6): 1804—1818.

Challenges Confronting and Coping Strategies for the Governance of Geohazard Chains on the Loess Plateau

Qiangbing Huang¹ Jianbing Peng^{1, 2*} Wen Fan¹ Xingang Wang³ Wu Zhu¹ Ling Xu⁴
Yaming Tang⁵ Jianqi Zhuang¹ Yanqiu Leng¹ Penghui Ma¹ Xiaosen Kang¹

1. College of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Continental Evolution and Early Life, Northwest University, Xi'an 710069, China

4. School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

5. State Key Laboratory of Loess Science, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Science, Xi'an 710061, China

Abstract Loess Plateau is a core region for the implementation of China's Belt and Road Initiative (BRI) and an important energy and chemical industry base, as well as a crucial ecological barrier in the Yellow River Basin, and serve as a vital safeguard to reduce the flooding and geohazard risks of the Yellow River and the geological and energy security of the North China Plain. With the frequent occurrence of heavy rainfall events under global climate change, the risk of geological hazard chains on Loess Plateau has intensified. How to scientifically deal with geohazard chains on Loess Plateau in China

* Corresponding Author, Email: dicexy_1@chd.edu.cn

has become an important issue in the field of engineering geological environment and disasters. This paper briefly elucidates the characteristics of geohazard chains on Loess Plateau, including regional group occurrence, temporal concentration, chain diversity, evolutionary complexity, and significant engineering hazards, and outlines four major challenges in governing geological hazard chains on Loess Plateau: unclear evolutionary dynamics mechanisms of hazard chains, imprecise monitoring and early warning systems, difficulties in risk assessment, and an underdeveloped resilience-based prevention and control technology system. Furthermore, specific response strategies are proposed from five aspects, namely, (1) breakthrough in the theoretical bottleneck of evolutionary dynamic mechanisms of geological hazard chains, (2) advancing novel synergistic monitoring and early warning technologies for multi-hazard and hazard chains, (3) innovating scenario simulation and risk assessment technologies for multi-scenario and multi-hazard applications, (4) establishing a coordinated human-land-engineering resilience-based prevention and control technology system, (5) building a disaster information sharing and intelligent decision support service platform. These strategies aim to provide guidance and reference for the scientific prevention and control of geological hazard chains on China's Loess Plateau.

Keywords Loess Plateau; geohazard chains; chain generation mechanism; monitoring and early warning; risk assessment; resilience prevention and control

彭建兵 中国科学院院士, 长安大学教授、博士生导师, 中国地质大学(北京)地质安全研究院院长, 陕西省黄河科学研究院院长, 国家973计划和国家自然科学基金重大项目首席科学家, 李四光地质科学奖获得者。以第一完成人获国家科学技术进步奖二等奖1项、省部级科技成果奖一等奖4项。入选Elsevier全球高被引学者和前2%顶尖科学家行列。

黄强兵 长安大学教授、博士生导师, 入选自然资源部科技创新领军人才, 陕西省“三秦英才”特支计划科技领军人才, 国家重点研发计划项目负责人。主要从事黄土地质灾害防治及重大工程防灾减灾、城市工程地质领域的研究工作, 主持国家重点研发计划项目、国家自然科学基金重大专项课题和面上项目等项目20余项。获国家科学技术进步奖二等奖1项, 省部级科学技术奖一等奖2项。

(责任编辑 贾祖冰 张强)