

• 自然灾害防治体系 •

DOI: 10.3724/BNSFC-2025-0037

复合链生重大地质灾害隐患识别理论与方法： 现状与展望^{*}

李振洪^{1,2**} 宋 闯^{1,2} 王玉峰³ 余 琛^{1,2} 张 文⁴
李为乐⁵ 张成龙^{1,2} 占洁伟^{1,2} 丁明涛^{1,2} 席江波^{1,2}
郭迪洲^{1,2} 朱 武^{1,2} 程谦恭³

1. 长安大学 黄土科学全国重点实验室, 西安 710054
2. 长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054
3. 西南交通大学 地球科学与工程学院, 成都 611756
4. 吉林大学 建设工程学院, 长春 130012
5. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 成都 610059

[摘 要] 复合链生重大地质灾害受多圈层交互与多动力耦合驱动, 呈现链式级联效应, 其隐患识别存在孕灾机理不清、技术协同不足、空间覆盖不全等挑战。地质灾害的链灾过程是一种熵减过程, 因此, 本文基于最小作用量原理, 阐明灾害链演化的物质—能量时空传递理论, 构建理论、技术与国家三个层面相协同的隐患识别体系: 理论层面解析风险源多物理场互馈耦合机制与空间域判识准则, 技术层面构建融合多源观测、地质力学与能量梯度的隐患识别体系, 国家层面通过数据共享与智能区划优化全域防灾布局。未来研究需进一步突破多圈层耦合建模与多物理场感知瓶颈, 提升复合链生重大地质灾害隐患识别精度, 推动地质灾害防控向智能化、全球化演进。

[关键词] 复合链生地质灾害; 隐患识别; 最小作用量原理; 多场耦合; 多源观测

复合链生地质灾害是由多圈层交互作用与多动力耦合驱动形成的级联灾害, 通常表现为不同灾种通过物质迁移、能量传递和系统扰动产生链式反应。此类灾害涉及的地质灾种包括地震、滑坡、崩塌、泥石流、地裂缝等, 在与气象、水文、生态等系统过程的相互作用中孕育、发展、成灾, 目前正成为防灾减灾领域的重大挑战^[1]。复合链生地质灾害具有演化过程复杂、突发性强、波及范围广、损失严重等特点^[2,3], 并且灾害间存在显著的“驱动—触发—放大”效应, 单一灾害识别与防灾手段往往难以全面反映其整体风险^[4]。例如, 强降雨触发山体滑坡, 滑坡体堵塞河道形成堰塞湖, 堰塞湖溃决又引发下游泥石流和洪灾, 这一过程构成了典型的复合

链生地质灾害^[5,6]。此外, 还有地震触发滑坡、液化形成的复合灾害链^[7]等。

随着全球变暖和极端气候问题的日益严峻, 地质灾害强度和频率逐年上升, 特别是复合链生重大地质灾害已成为许多国家面临的重大挑战^[8]。这类灾害通常造成严重人员伤亡和经济损失, 引发关键基础设施瘫痪或大规模社会功能中断, 形成跨系统、超出常规应对能力的灾难性后果。例如, 2022年2月15日巴西彼得罗波利斯受极端强降雨影响, 触发城市周边超300处滑坡, 滑坡体汇入狭窄河道形成泥石流并堵塞河道导致洪水改道冲入居民区, 造成超过200人死亡^[9]; 2023年10月3日, 印度南洛纳克冰湖受强降雨和气候变暖影响发生侧碛滑

收稿日期: 2025-08-08; 修回日期: 2025-09-20

^{*} 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: zhenhong.li@chd.edu.cn

本文受到国家自然科学基金重大项目 (41941019) 的资助。

引用格式: 李振洪, 宋闯, 王玉峰, 等. 复合链生重大地质灾害隐患识别理论与方法: 现状与展望. 中国科学基金, 2025, 39(6): 880–892.

Li ZH, Song C, Wang YF, et al. Theories and methods for identifying compound chain-associated major geohazard risks: Status and prospect. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(6): 880–892. (in Chinese)

坡—涌浪—溃坝,引发山洪爆发,冲毁下游房屋、道路、桥梁,造成55人死亡、77人失踪^[10]。我国近20年来复合链生重大地质灾害同样频发,如2008年5月12日汶川 M_w 7.9地震诱发了大量崩塌、滑坡,为泥石流灾害提供了丰富的松散固体物质,最终冲毁和掩埋了众多城镇和村庄^[11];2010年8月7日甘肃舟曲受强降雨影响,引发了特大滑坡泥石流,泥流堵塞白龙江形成堰塞湖,导致舟曲县城部分地区被淹^[12];2023年12月18日甘肃积石山 M_w 6.1地震触发3千米长的液化—泥流灾害,致使112栋房屋被冲毁掩埋,造成了重大的人员伤亡与经济损失^[13]。这些日益频发的复合链生重大地质灾害暴露出目前链生灾害隐患识别覆盖度和精度不足导致的隐患漏检严重、灾害防范不及时等问题。

复合链生地质灾害的孕灾过程受控于多圈层耦合作用与多动力协同驱动,其灾害隐患的物质迁移及能量转化过程呈现出高度的复杂性和动态耦合性。具体而言,岩石圈的结构弱面与应力积累为灾害提供孕育条件,水圈的渗流作用与孔隙水压变化往往触发失稳过程,大气圈的降雨、温度波动及极端气候事件加速能量输入与物质迁移,而生物圈及人类工程活动则在局部改变边坡稳定性和能量耗散路径。多圈层耦合建模的难点在于圈层机理差异显著、作用过程非线性突变、多动力协同复杂、观测数据不足以及多尺度统一计算困难。传统技术手段(如野外调查和地面监测)虽然能够获取局部信息,但在应对多圈层相互作用带来的非线性突变与多动力触发机制时,往往表现出效率低、成本高、覆盖范围有限及难以实现连续动态观测等局限性,尤其在复杂环境条件下,更难支撑对链生灾害隐患的精准识别。

近三十年来,以遥感为代表的灾害感知技术取得了长足进步,推动了地质灾害领域跨越式发展。日益增多的对地观测数据增强了对地质灾害的感知观测能力,也为地质灾害隐患识别研究打开了新窗口^[14,15]。Xu等^[16]系统阐述了各类遥感技术在地质灾害隐患识别的优势与局限性,强调了光学遥感在识别地震与暴雨诱发山体滑坡方面的优势。Mondini等^[17]提出一种基于光学遥感影像的滑坡隐患半自动识别方法,能够快速生成准确的灾害隐患编目。Liang等^[18]基于高精度光学遥感影像,利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)技术自动识别2017年九寨沟 M_w 7.0地震触发的山体滑坡,提高了灾害隐患识别的准确率。然而,光学遥感容易受天气影响,且主要呈现灾害形态特征,难以获取灾害体运动特征。以干涉合成孔径雷达(Interferometric Synthetic Aperture Radar, InSAR)为代表的雷达遥感技术不受天气影响,而且可以捕捉毫米级的地面形变^[19],

极大地提升了灾害隐患识别能力。李振洪等^[20,21]基于卫星雷达遥感技术,提出了基于多源对地观测的灾害隐患探测框架。Song等^[7]基于卫星雷达观测识别意大利中部地区地震加速滑坡,建立了全球首个地震加速滑坡编目。Cao等^[22]提出一种基于InSAR相位梯度的时间序列方法,识别了2016年 M_w 7.8Kaikōura地震触发的蠕变型滑坡。Chen等^[23]利用InSAR、像素偏移量追踪和数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)差分对河西走廊地质灾害隐患进行自动识别。考虑到不同遥感技术的优势,不少学者提出融合多源遥感进行灾害隐患识别。许强等^[24,25]提出构建“天—空—地一体化”的“三查”体系,结合多源数据的特性,进行隐患早期识别。黄海峰等^[26]提出基于孕灾机理与综合遥感相结合的方法进行地灾隐患识别,适用于高山陡坡和植被覆盖度高的区域。葛大庆等^[27]提出利用“形态、形变、形势”定性识别隐患位置、定量监测灾害体变形,并综合遥感动态监测,提升隐患识别能力。此外,随着人工智能技术的发展,基于机器学习/深度学习的地质灾害识别成为研究热点^[28]。Ma等^[29]详细梳理了深度学习在滑坡、泥石流、崩塌、雪崩、地震和火山六种典型灾害研究中的应用,并总结了常见的应用范式。Ghorbanzadeh等^[30]将深度学习模型与基于规则的对象图像分析(Object-Based Image Analysis, OBIA)集成框架应用于滑坡识别。Shi等^[31]提出了一种结合深度卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)和变化检测的新型遥感影像滑坡识别方法,显著提高大范围滑坡识别的处理性能。

虽然目前灾害感知技术和人工智能技术持续推动地质灾害隐患识别的发展,但在复杂自然环境下,复合链生重大地质灾害依然存在隐患“识不全、测不准”、区域技术资源不均衡及识别时效性延迟、多源对地观测技术协同性弱和广域灾害隐患识别智能化程度低等问题^[32-34]。究其原因,是链生灾害的孕灾过程伴随着多圈层多动力的相互作用,使得灾害隐患体物质传输与能量转换机制不明确,增加了隐患识别的难度。为此,迫切需要深入理解复合链生地质灾害的孕灾本质机制,把握其多类型、多发性、链生性的灾害特征,建立完备的“天—空—地”一体化复合链生重大地质灾害隐患识别体系和智能分析系统,以期着力解决多圈层—多动力作用下灾害隐患物质传输与能量转换机制及空间域精准识别这一重大科学问题,进而提高地质灾害防范能力。

1 复合链生地质灾害隐患识别体系科学构想

复合链生地质灾害在多圈层—多动力作用下孕育发生,受物质传输与能量转换机制控制(图1)。从系统

熵变的角度来看,地质灾害的发生都是地质体从不稳定向稳定发展的过程,是一种熵减过程,遵循物理学中提出的最小作用量原理,因此,地质灾害隐患识别体系的建设应从第一性原理出发,以最小作用量原理揭示灾害链孕育的本质,即物质—能量跨尺度非线性传递过程中,系统通过“最优路径”实现能量耗散与稳态平衡。该原理从能量的角度出发,统一解释灾害链的三大特征:蝴蝶效应(微扰非线性放大)、灰犀牛效应(能量积聚突破阈值)和黑天鹅效应(跨介质链式溃散),阐明复合链生地质灾害成灾与链灾演化的能量临界状态分异规律的物理数学机制。以该理论为基础,通过观测应力场、应变场、温度场等多物理场参数,重点解析场间互反馈耦合机制,进而构建复合链生地质灾害隐患识别体系。

1.1 隐患识别理论的科学构思

复合灾害链的孕育与演化本质上是物质—能量在时空尺度上的非线性传递过程。从第一性原理出发,通过最小作用量原理能够揭示灾害链动力学的普适性规律,并建立其与蝴蝶效应、灰犀牛效应及黑天鹅效应的关联机制。研究表明,灾害链的突发性、累积性与超预期性特征可归结为能量—物质传输路径在临界阈值下的分异行为,其数学本质满足变分原理中的极值条件,即自然界倾向于选择“最优路径”实现能量耗散与系统稳态的平衡^[35]。

具体而言,灾害链蝴蝶效应^[36]表现为初始微扰通过非线性动力学机制被逐级放大。例如,斜坡岩体裂隙中微小渗流触发孔隙压力—应力耦合反馈,最终导致滑坡灾害链的发生,该过程可通过耦合偏微分方程刻画,其解的特性印证了最小作用量路径对微小扰动的敏感性。灾害链灰犀牛效应源于高概率隐患的长期能量积聚,如泥石流物源区受人类工程扰动或强降雨影响,突破摩擦锁固阈值,进而诱发泥石流^[37],实质为其作用量极小值对应能量耗散速率与储存速率的动态均衡点,该点一旦失衡即触发灾变。灾害链黑天鹅效应则与罕见的多尺度能量链式溃散相关。例如,冰岩崩塌体动能冲击冰川湖引发涌浪—溃坝—泥石流链式灾害,该过程的关键在于跨介质能量传递:固体崩塌体的重力势能与动能在入水瞬间转化为湍流动能,并通过水体与空气的界面作用引发次生波动与气泡动力学效应;涌浪对坝体和边坡的冲击又将水动力能进一步转化为结构破坏能量与泥石流动能。不同介质(岩体—水—土体)在能量传递过程中表现出显著的非线性与界面效应,如能量聚集与快速耗散的交替使得能量演化轨迹呈现混沌特征^[38]。因此,虽然整体过程难以精确预测,但其临界状态仍受制于作用量变分的全局极值约束^[39],这为跨介

质灾害链的理论建模提供了可追踪的物理边界。

上述分析表明,最小作用量原理通过统一描述灾害链的确定性规律与随机性表现,为复合灾害链识别提供了物理可解释的数学框架,对相关案例的研究^[40,41],亦印证了自然界“简单性孕育复杂性”的发展规律。

1.2 隐患识别技术的实现路径

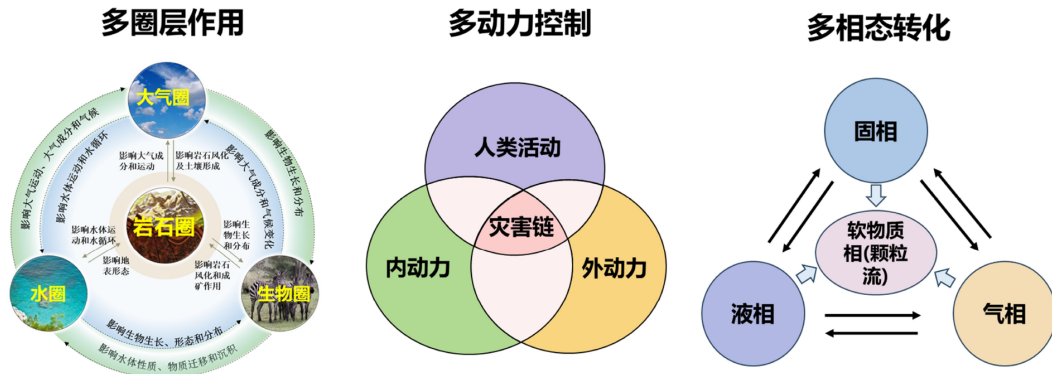
复合链生重大地质灾害的演化本质源于物质运输与能量转换的跨尺度耦合过程,其隐患识别需提前梳理物理过程与观测量的有机统一。例如,表征物体受质量分布影响时引力作用物理过程的观测量为重力场;反映物体受外力或温度变化时的内部力学/变形响应物理过程的观测量为应力场/应变场;表征系统内热能的分布,反映热传导、对流、辐射等传热机制物理过程的观测量为温度场;表征系统内水汽的分布,反映蒸发、扩散等传质机制物理过程的观测量为湿度场;表征区域人类活动强度的空间分布,反映资源开发、工程建设等社会经济行为对自然系统干预机制的观测量为人类营力场。通过观测重力场、应力场、应变场、温度场、湿度场、人类营力场等多物理场,进一步聚焦多物理场的跨介质互反馈耦合机制,揭示其通过能量传递、物质运移与动力响应的协同作用驱动灾害链演化的内在规律。结合遥感观测、原位传感等技术,构建多源异构数据的感知—融合—辨析框架,量化物理场异常阈值与时空关联特征,最终实现灾害隐患空间域精准判别。

1.3 理论—技术—国家三大体系建设

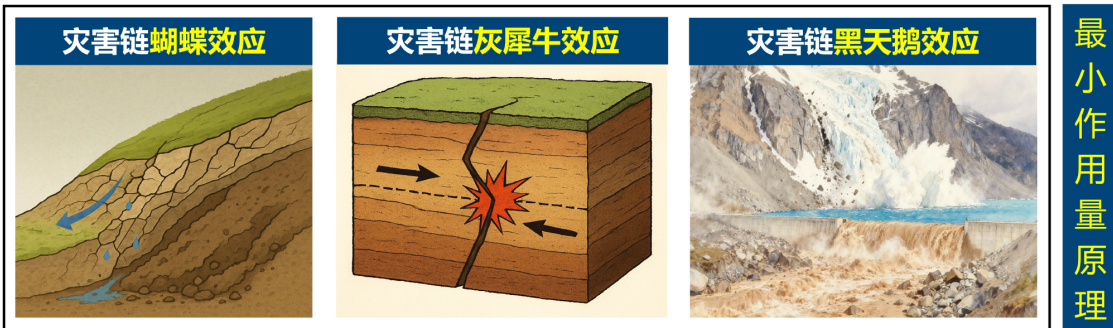
基于复合链生重大地质灾害隐患识别的科学构想与实现路径,本文提出理论体系、技术体系和国家体系三大体系支撑灾害隐患识别。理论体系为隐患识别提供科学内核,揭示灾害演化的物理本质与规律;技术体系基于理论构建技术方法,实现复合链生重大地质灾害隐患精准感知辨析;国家体系依托理论指导与技术支持,统筹宏观战略布局与标准化治理。理论驱动技术进步,技术赋能国家治理,而国家需求与实践反馈反哺理论与技术迭代,共同构建“基础研究—技术应用—国家服务”一体化的灾害防控生态系统。

该系统从理论、技术与国家三个层面构建复合灾害链隐患认知与防控框架:理论上,以多物理场互反馈耦合为核心,揭示能量—物质跨场耦合规律,结合工程地质结构控制与波谱响应特征以及灾害链多场耦合与空间判识机制,形成“微观作用—宏观表征、静态特征—动态传播”的全链条认知;技术上,以风险源动态识别为主线,依托多物理场感知与辨析、地质力学与对地观测解析及基于能量梯度的空间域识别与智能区划,实现灾害演化建模与隐患精准分区;国家层面,通过数据共享与

问题发现: 多圈层-多动力作用下 灾害多相态转化机制不明, 造成隐患识别困难



物理过程: 灾害链物质运输与能量转换过程遵循最小作用量原理



理论构思: 基于多物理场互馈耦合机制构建灾害隐患精准判识体系

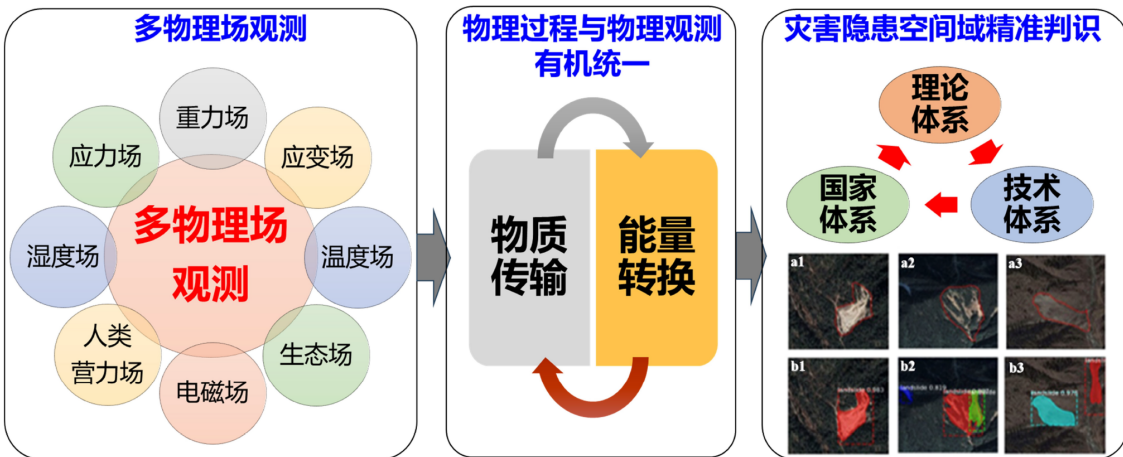


图1 复合链生重大地质灾害隐患识别体系科学构想

Fig.1 Scientific Concept for a Compound Chain-associated Major Geohazard Risk Identification System

标准制定构建统一灾害数据库,支撑全国灾害链隐患智能区划与重大工程科学规划,并实现数据与模型的动态迭代更新,提升国家整体防灾减灾韧性。

2 复合链生地质灾害隐患识别理论体系

在复合链生地质灾害隐患识别理论体系中(图2):

理论一聚焦多物理场互馈耦合驱动地质灾害演化,构建多尺度动态本构模型,揭示临界互锁机制,形成多场感知—互馈耦合—临界辨识的隐患识别理论体系;理论二聚焦多尺度工程地质结构,系统查明微观—细观—宏观结构面空间展布规律与交互效应,揭示不同级次结构对地质体变形破坏的递进耦合控制机制和波谱响应特征,

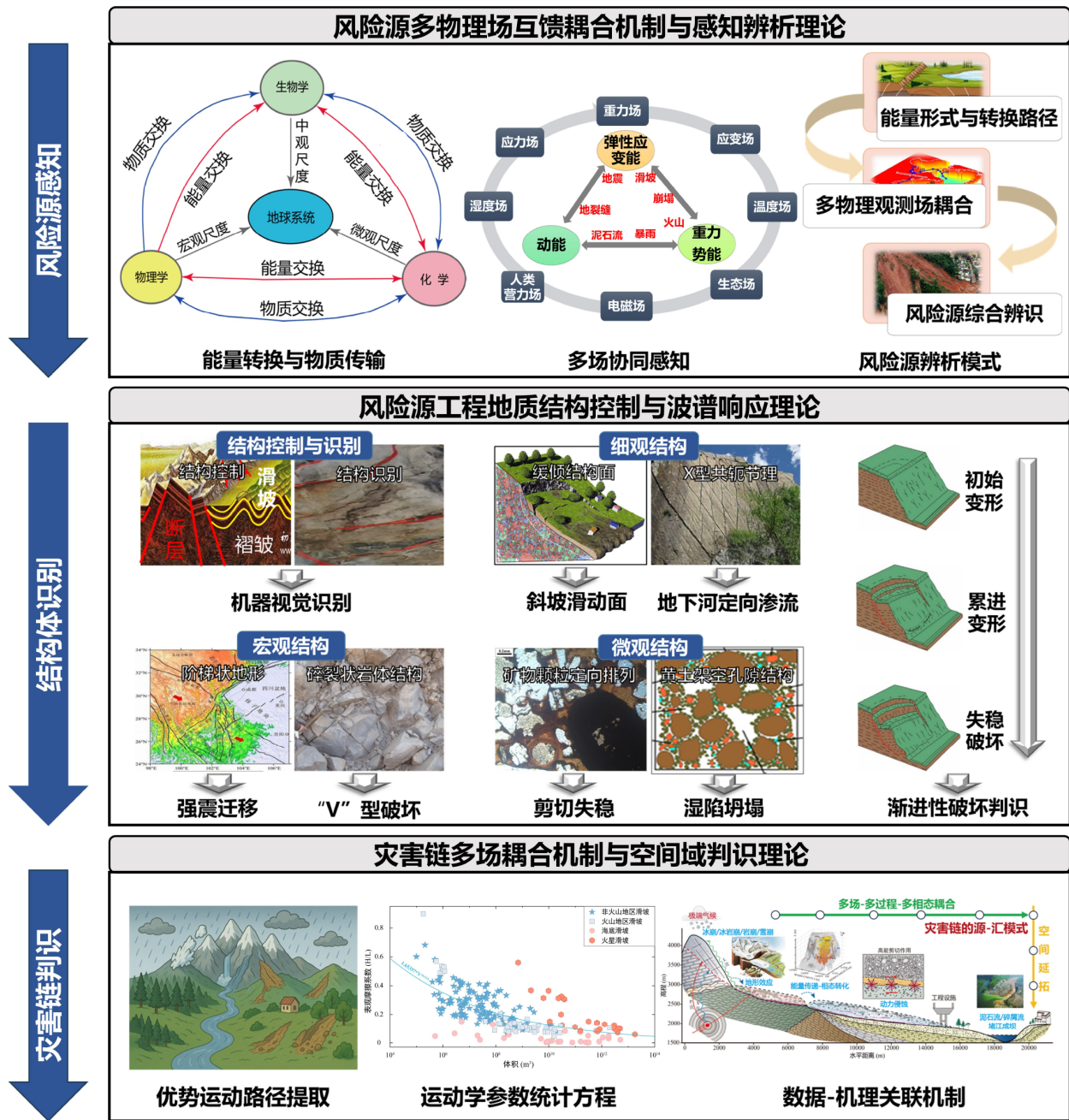


图2 复合链生地质灾害隐患识别理论体系

Fig.2 Theoretical Framework for Compound Chain-associated Major Geohazard Risk Identification

建立多尺度地质结构控制—识别与渐进性破坏判识准则;理论三量化灾害体链灾演化优势路径特征,提出基于数据驱动的灾害链运动学参数普适性预测方程,构建数据—机理双驱动灾害链空间域判识理论模型。

2.1 风险源多物理场互馈耦合机制与感知辨析理论

风险源多物理场互馈耦合机制与感知辨析理论是复合链生地质灾害隐患识别的核心支撑,旨在通过揭示多物理场(应力场、温度场、湿度场等)的互馈耦合机制,结合智能感知与辨析技术,实现对灾害风险源的精准识别。其创新性体现在将物理机理与数据驱动方法深度

融合,突破传统单一场分析的局限,为灾害链生过程的早期识别和主动防控提供理论基础。

(1) 风险源多物理场互馈耦合机制

聚焦地质灾害演化过程中多物理场的非线性相互作用,如降雨渗流导致孔隙水压力升高,进而削弱岩土体强度并诱发滑坡。通过构建多场耦合数学模型(如耦合Biot渗流方程与弹塑性本构关系^[42]),定量解析应力—渗流—化学等场的交互效应,揭示灾害链生的临界条件与级联规律(如地震动→裂隙扩展→渗透率突变→滑坡的链式反应),攻克跨尺度耦合建模与复杂非线性方

程的高效求解。

(2) 基于多物理场的风险源感知辨析理论

通过“天—空—地”一体化观测网络获取多源异构数据,结合物理信息神经网络(Physics-Informed Neural Networks, PINNs)等混合模型,实现风险源的动态感知与智能辨析。其核心是融合物理机制与AI算法,解决数据时空分辨率差异(如形变与其他物理参数融合)与精准动态识别的算力瓶颈,最终构建“观测—耦合模型反馈—识别”的闭环体系,推动灾害防控从经验统计向机理驱动的模式转型。

2.2 风险源工程地质结构控制与波谱响应理论

风险源工程地质结构控制是从不同尺度深入探索地质结构特征及其对地质体行为的影响。微观层面,研究聚焦于矿物颗粒排列、微小孔隙结构等特征,揭示这些微观因素如何影响风险源的基础性质。细观尺度上,通过分析如节理、裂隙、孔隙等地质现象,理解风险源在中等尺度下的变形与破坏机制。宏观尺度则关注断层、褶皱、滑坡等大型地质构造,探讨它们如何控制风险源的整体稳定性和灾害发生。此外,结合机器视觉等现代技术,地质结构的识别与分类能力得到提升,为风险源的深入研究提供了更广阔的视角、更丰富的数据保障和更强大的算法支持。这些研究共同构建了风险源工程地质结构控制与识别的理论框架,对重大地质灾害隐患识别具有重要意义。

波谱响应理论从地球物理场与地质体相互作用的角度,解析风险源的物理属性变化与外部激发信号的动态响应特征。地质体内部结构与成分差异会改变电磁波、地震波等波动传播的相位、振幅与频率特性,形成可识别的波谱信号。例如,在斜坡渐进性失稳破坏前,累积变形阶段的地表微小位移可通过InSAR干涉相位变化捕捉;岩土体含水率变化引起的介电常数变化会反映在探地雷达反射波衰减特征中。通过建立风险源地质参数(如形变速率、孔隙度、含水率、渗透性、剪切强度)与不同波谱参数(如雷达干涉相位、地震波速度、电磁波阻抗等)的定量反演模型,揭示风险源“地质参数—波谱参数—风险状态”的响应映射关系,为风险源状态的早期感知识别,特别是渐进性破坏识别提供理论支撑。

2.3 灾害链多场耦合机制与空间域判识理论

灾害链多场耦合机制与空间域判识理论是实现复合链生灾害潜在危害范围有效判识与能级区划的重要前提,该理论体系的核心是阐明复合链生灾害成灾与链灾演化过程中所涉及的多场、多相态、多过程耦合作用机制,厘清多场—多过程—多相态耦合作用下的灾害链动力学行为,定量刻画复合链生灾害运动演化的优势运

动路径,实现灾害链空间域能级分布特征的精准判识。其创新性体现在将动力学机理与数据模型相关联,突破了传统风险区划模型参数单一、内在机理不清的难题,为灾害链空间域风险分布的早期判识提供了理论基础。

(1) 复合链生灾害多场耦合作用模式与内在力学机制研究

聚焦于我国三大阶梯不同内外动力地质背景下重大复合链生灾害的成灾与链灾过程,阐明复合链生灾害中多灾种并发、多灾链汇聚的耦合作用类型,揭示这些作用类型背后的能量与物质传递机制。灾害链的本质是能量和物质在岩石圈、水圈、大气圈等圈层间的跨介质传递与放大,这些复合链生过程的发生会导致系统脆弱性增强效应。通过构建多场—多过程—多相态耦合作用下的多灾种汇聚链生动力学模型,厘清灾害链内部不同相态间的临界转化条件与阈值,阐明不同阶段的灾害体能量交换规律,是实现复合链生灾害动力学行为定量刻画的关键。

(2) 多运动路径控制下的复合链生灾害空间域精准判识研究

复合链生灾害常常呈现出复杂的运动路径特征,如何量化灾害体链灾演化优势路径特征,阐明复杂运动路径对复合链生灾害动力学行为的影响机制,是实现复合链生灾害空间域能级分布有效判识的关键。因此,亟需通过多源数据有效融合和理论模型优化,提出基于数据驱动灾害链运动学参数普适性预测方程;研发有效的灾害链空间场快速解析与建模技术,构建基于AI算法和机理模型双驱动的灾害链空间域判识理论模型,实现灾害链空间域危害能级分布的有效推演,量化灾害链的演化路径与能量的时空分布特征,实现灾害链空间域危害范围与危害能级的早期预判。

3 复合链生地质灾害隐患识别技术体系

复合链生地质灾害的发生演化过程往往表现为多因素耦合、多阶段传递和多尺度作用,其隐患识别依赖跨时空、跨物理场的系统化技术支撑。因此,本文围绕“感知—解析—区划”的技术主线,构建了复合链生地质灾害隐患识别的整体技术体系。具体包括:首先,通过多物理场感知与辨析技术,突破传统单一监测手段的局限,实现风险源动态信息的高精度获取与实时解译;其次,依托地质力学与对地观测解析技术,从结构特征与力学响应两方面揭示风险源的形成机理与演化规律;最后,基于能量梯度理论,提出灾害链空间域识别与智能区划方法,以实现对于隐患区的动态划分与风险等级评估。三个技术模块既各有侧重,又层层递进,共同构成

一个“数据驱动—机理解析—智能区划”的闭环识别框架,为复合链生地质灾害防控体系的建立提供理论依据与技术支撑。

3.1 风险源多物理场感知与辨析技术

风险源多物理场感知与辨析技术旨在通过多源异构传感网络与智能分析手段,实现对灾害风险源多物理场动态演化的高精度观测与精准辨析。其突破传统单一观测技术的局限,通过“天—空—地”一体化观测体系与物理机理驱动的数据分析算法,构建“感知—传输—解译—识别”的全链条技术体系,为灾害链生过程的早期识别提供(近)实时、可靠的数据支撑。技术难点在于多源数据时空融合、弱信号增强提取以及边缘计算环境下的实时解译。

(1)多物理场智能感知技术

通过构建多模态传感器协同观测网络,实现地质灾害体多场参量的立体化捕获。重点包括:1)研发新型原位传感器(如基于光纤光栅的应变—渗压一体化传感器、分布式声波监测设备),提升复杂环境下微变形、孔隙水压等关键参数的监测精度;2)构建“卫星遥感—无人机—地面传感网”的三维观测体系,解决单一观测手段时空分辨率不足问题;3)开发自适应采样与边缘计算技术,针对滑坡前兆微破裂信号(如次声波、地电阻率突变)实现低功耗、高灵敏的实时感知。技术突破点在于传感器抗干扰设计(如消除温度漂移影响)与异构网络的自组织传输优化。

(2)多场数据融合与智能辨析技术

通过物理机理与人工智能的深度融合,解决多源异构数据的关联解译难题。多源异构数据融合的难点主要体现在以下几个方面。首先,不同观测手段所获取的数据在空间分辨率、时间尺度与观测精度上差异显著,例如,InSAR能够提供大范围的高空间分辨率形变信息,但时间分辨率较低,而地下水位或孔隙水压监测具有高时间分辨率却受限于点位观测;其次,不同物理场数据之间存在量纲、噪声特性与不确定性的差异,例如,地电阻率数据与应力场参数之间的耦合机制并非线性可加,而是受到复杂的边界条件和材料非均质性控制,传统的统计学方法难以捕捉这种非线性关联。针对这些难点,本研究提出的核心内容包括:1)建立物理场耦合约束下的深度学习框架,如将渗流扩散方程嵌入Transformer模型^[43],提升InSAR形变数据与地下水位数据的联合反演精度;2)开发灾害链生关联度量算法,通过构建多场耦合度指数(如应力—渗流协同系数),识别从单一灾害到链生灾害的转化临界点;3)搭建云端—边缘端协同的解译平台,利用联邦学习实现观测数据的实时建模与风

险动态评估。该技术体系最终实现机理模型与数据驱动的双引擎驱动,攻克多时空尺度数据的标准化对齐与实时解译的算力分配优化,为构建新一代地质灾害防治体系提供关键技术支撑。

3.2 风险源地质力学与对地观测解析技术

针对风险源的地质力学解析技术体系是以地质体结构分布特征为核心切入点,通过多种方式精准刻画地质体的空间形态与结构特征,明确其几何参数与空间展布规律。在此基础上,综合运用极限平衡法、弹性、弹塑性、塑性力学等分析方法^[44,45],深入剖析地质体在不同条件下的应力状态、变形特性及破坏机制,揭示其力学响应规律。通过整合地质体几何特征与力学分析结果,系统识别并评估潜在风险源,准确判断地质灾害发生的可能性与危害程度。这一技术体系为地质灾害隐患识别提供了科学依据与技术支撑。

地质灾害风险源对地观测技术体系包括“天—空—地—内”一体化观测网络与智能解析平台。观测网络整合InSAR形变监测、全球卫星导航系统(Global Navigation Satellite System, GNSS)实时位移追踪、航空影像和机载LiDAR高精度地形重建等对地观测技术,结合地面传感器网络(如位移计、分布式光纤传感器、地声传感器、孔隙水压计等)与地球物理勘探(地震反射、电磁法等),实现风险源地表形变、地下结构与岩土体参数的立体感知。未来需要进一步发展低轨卫星星座与无人机实时观测互补的动态感知系统,突破复杂条件下多源数据时空分辨率瓶颈。智能解析平台依托有限元、离散元等数值模拟方法构建地质体力学模型,融合机器学习算法与数据同化技术,动态反演风险源稳定状态并预测演化趋势,形成“数据驱动建模—物理约束验证—智能解析识别”的全链条风险源智能解析技术闭环。

3.3 基于能量梯度的灾害链空间域识别与智能区划技术

复合链生地质灾害隐患的空间域识别与智能区划建立在对灾害链能量梯度演化机制的深入理解基础上,其核心是需要实现灾害链能量梯度演化过程的精准刻画,通过量化灾害链能量场的空间分布特征,建立能量梯度与灾害演化之间的定量关系。本文提出一种融合多源数据与先进信号处理技术的智能区划方法,旨在通过能量重构与耗散分析,实现灾害体空间域能级分布的有效划分。具体技术方案如下:

(1)多源数据融合与预处理

首先,整合GNSS地表形变数据、InSAR遥感监测数据、无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)高分辨率影像以及地质体内部监测数据,构建多维度、多尺度的灾

害监测数据集。针对数据噪声问题,采用小波分解重构技术实现信号去噪,保留有效频段信息;通过主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)等降维方法消除冗余特征,提升数据质量;进一步利用傅里叶时域—频域转换技术,提取灾害演化过程中的周期性特征,为能量梯度分析奠定基础。

(2) 灾害能量重构与梯度演化模型

基于赫尔默特方差分析优化多源数据权重^[46],建立能量场耦合模型。通过量化不同物理场(如应力场、渗流场、温度场)的相互作用,重构灾害链能量空间分布。具体来说,建立了包含弹性应变能、孔隙水压能和热能的综合计算模型。然后基于改进的赫尔默特方差分量估计法,精确计算三维能量梯度场,通过求解散度有效识别能量聚集区。例如,针对青藏高原古巴滑坡,融合InSAR形变与地质数据,成功重构了滑坡的能量场分布^[41]。结合地质力学原理,解析能量梯度演化过程中的关键节点(如锁固段破裂、滑面形成),揭示灾害链的阶段性特征。例如,滑坡灾害链的能量梯度可表现为“积累—传递—释放”三阶段模式,其空间域分布受控于岩土体强度异质性及外部动力扰动^[47]。

(3) 致灾解耦与智能区划技术

提出基于能量耗散的致灾解耦量化方法,通过计算能量耗散率与最小耗能路径,识别灾害链的优势发展方

向。具体来说,构建能量耗散率矩阵,应用图论中的Dijkstra算法求解最小耗能路径^[48]。然后利用机器学习算法(如随机森林、支持向量机)训练能量梯度特征与灾害危险性等级的映射关系,生成空间域能级分区图^[49,50]。该区划结果不仅反映当前能量状态,还可以设置不同工况(如不同强度降雨、地震扰动),通过数值模拟软件定量模拟灾害链的启动、运动与堆积过程,实现从“静态隐患识别”到“动态过程预测”的跨越,极大提升风险管理的预见性和主动性^[51]。

4 复合链生地质灾害隐患识别国家体系

我国地域单元复杂,地形高差变化显著,复合链生灾害呈现出明显的地域特色(如图3中的青藏高原、黄土高原和东南丘陵)。因此,在复合链生地质灾害隐患识别国家体系建设中,亟需构建不同关键地域单元的复合链生灾害智能区划体系,并据此在国家重大工程规划建设阶段实现重大灾害隐患精准识别,助力国家重大工程防灾减灾。此外,国家体系还需协同建设灾害数据分级分类共享机制与标准规范体系,为我国复合链生重大地质灾害防治提供数据、制度与技术全方位支撑。

4.1 全国复合灾害链隐患区划

当前,我国在复合链生灾害隐患智能区划方面的研究尚处于起步阶段,灾害链隐患能级判识度低,严重制

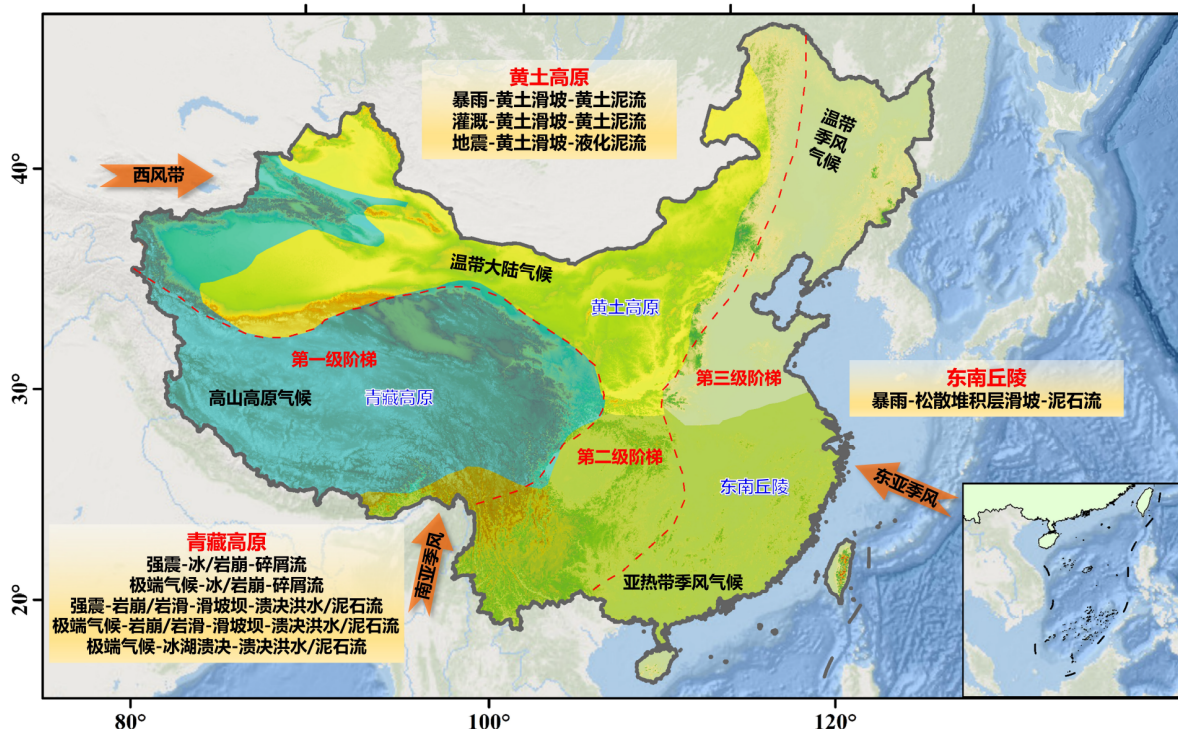


图3 我国不同地域单元复合链生灾害空间分布特征(基于审图号:GS (2024) 0650标准地图绘制)

Fig.3 Spatial Distribution Characteristics of Compound Chain-associated Major Geohazards across Different Regional Units in China (Map Drawn Based on the Standard Map with the Review Number:GS (2024) 0650)

约着城镇规划和重大工程规划的灾害安全风险防控。如何基于有效的复合链生灾害多场耦合机制与空间域判识理论,通过多源数据与人工智能技术,合理考虑地域单元特点,实现灾害链演化路径的智能推演与场景构建,从而服务决策优化,是当前复合链生灾害智能区划面临的关键难题。聚焦我国地域特色,亟需突破多圈层耦合动力学模型、灾害链断链减灾技术以及跨领域协同防控体系的研究,构建不同关键地域单元的复合链生灾害智能区划体系。

(1) 青藏高原高寒高海拔复合链生灾害隐患智能区划体系

青藏高原以其最年轻的隆升年龄、最复杂的形成机制、最活跃的构造活动、最显著的环境效应等成为全球地球科学研究的关注焦点^[52]。受研究区强震活动、极端降雨、气候变化、工程活动等影响,青藏高原重大复合链生灾害高发频发,形成的与地震、降雨、气候、工程活动密切相关的典型灾害链包括岩崩/岩滑/冰崩/冰岩崩—碎屑流、岩崩/岩滑—滑坡坝—溃决洪水/泥石流、冰湖溃决—溃决洪水/泥石流等。然而,青藏高原重大复合链生灾害隐患识别技术仍相对匮乏,严重制约了青藏高原高质量发展的地质安全。面向构造—气候—工程扰动多动力作用下青藏高原灾害链高/突发且链式放大效应显著的问题,亟需研发集多源感知与机理分析的广域风险源等级判识系统,实现考虑多过程—多相态耦合动力学机理的风险源链式演进空间域能级智能分区,提出构造—气候—工程扰动多场景下的青藏高原重大灾害隐患“源—汇”空间域危害能级智能判识指标与模型,构建适用于高寒高海拔重大链式灾害隐患的“多源感知与空间域危害能级智能区划”体系。

(2) 黄土高原群发性复合链生灾害隐患智能区划体系

黄土高原处在特殊构造与环境背景下,导致研究区地表侵蚀强烈、人类工程活动显著,是群发性地质灾害、山洪泥石流等重大灾害的高易发区^[13,53],形成的典型灾害链包括暴雨/灌溉—黄土滑坡—黄土泥流、地震—黄土滑坡—液化泥流等。面向黄土高原风成黄土堆积且水土流失严重的地貌特征,聚焦强震、极端降雨等作用下群发性灾害链致灾模式不清、识别技术不足的现状,亟需研发集多源感知系统与AI融合技术的群发性地质灾害隐患智能识别体系。

(3) 东南丘陵极端降雨复合链生灾害隐患智能区划体系

东南丘陵地处我国东部沿海地带,人类工程活动强烈,极端降雨气候显著。受极端降雨事件影响,近年来

群发性极端降雨诱发地质灾害呈现出显著的增强、增大现象^[54,55],容易形成暴雨—松散堆积层滑坡—泥石流这一典型灾害链。针对极端气候与人类活动加剧背景下东南丘陵气象—强降雨—地质链生灾害迅速增长的趋势,亟需建立集群式多传感器卫星星座和航空器巡检系统,研制地球表层灾害信息感知与深部物理参数量测传感器,构建灾害隐患的“高精度、高动态、量化”风险超前诊断与精准识别体系。

4.2 国家工程规划

随着我国经济建设的快速发展,国家“一带一路”、区域协调与城乡发展等重大战略持续推进实施,川藏廊道重大交通工程、南水北调、西气东输、平山造城、高速铁路、大型水电项目等各类重大工程的建设持续进行。这些重大工程项目的构架为促进经济发展带来机遇,但是也带来前所未有的重大工程灾变威胁。由地震、暴雨、台风等诱发的滑坡、泥石流、高位远程崩滑流等组成的各类复合链生地质灾害隐患严重影响着上述重大工程的规划、建设实施及运营维护。

(1) 在青藏高原地区,重大交通廊道工程、大型水电工程,以及大量公路桥梁隧道的规划、建设以及安全运营等,面临构造—气候—工程扰动等多因素作用下高寒高海拔重大链式灾害隐患。

(2) 在黄土高原地区,南水北调、矿山生态修复与治理、西延高铁安全运营、平山造城、平沟固塬等重大工程的开展,面临黄土堆积和水土流失造成的群发性地质灾害、山洪泥石流等威胁。

(3) 东南丘陵地区覆盖湘、赣、闽、粤、桂等省份,是我国“一带一路”倡议中“海上丝绸之路”的重要枢纽区域。围绕国家战略和区域协调发展需求,该区域实施了一系列重大交通工程,涵盖高铁、高速公路、区域互联互通及农村路网优化等领域,然而该区域地形复杂,生态脆弱,面临极端降雨及台风诱发的各类地质灾害。

因此,在国家重大工程规划建设中,亟需根据复合链生地质灾害隐患智能区划,精准识别形成重大威胁的灾害隐患,助力工程安全建设与长期防灾减灾。

4.3 数据共享与标准制定

在复合链生地质灾害隐患识别的国家体系构建中,数据共享与标准制定是破解跨部门协同壁垒、提升灾害治理效能的核心支撑。针对当前“灾害数据分散化、协同壁垒化,跨域流通效率低,共享应用难落地”的突出问题,需构建“分级分类管理—跨部门协同—全链条共享”的灾害数据开放机制。首先,建立统一灾害数据分类分级体系,依据数据的业务属性、敏感程度及应用场景,明确数据资源的层级划分与权限边界,对涉及国家安全、

商业秘密及个人隐私等的高敏感数据,严格执行国家信息安全等级保护制度,采用加密存储、访问控制与数据脱敏等技术手段,确保保密数据在共享过程中全程受控、安全可靠,既保障核心数据安全,又释放共享数据价值。同步推进跨行业数据标准化建设,制定统一的数据格式规范,解决多源数据在采集、存储、传输环节的技术异构问题,形成覆盖灾害全链条的标准化数据底板。最后,搭建跨部门数据协同平台,构建“中央—区域—地方”三级数据汇聚与分发架构。平台建设应遵循“数据不出域、可用不可见”的原则,通过安全多方计算、联邦学习等隐私计算技术,在保护原始数据的前提下实现数据价值流通,实现多领域数据的实时同步与动态更新。在技术实现层面,可依托区块链技术构建数据确权与安全共享机制,在保障数据主权的前提下实现跨域流通,特别是利用智能合约设定不同密级数据的访问权限、使用范围和操作日志留痕,建立数据共享全过程审计与溯源机制,解决传统数据共享中存在的隐私泄露与权责不清问题。

针对灾害链识别中“标准规范跨场景适配性不足、技术流程不统一、多源数据难协同”的瓶颈,需制定“体系化框架—标准化流程—场景化适配”的重大复合灾害链隐患识别标准指南。首先,在构建涵盖多灾种耦合互馈机制、空间域判识方法的理论框架基础上,明确灾害链隐患识别的核心要素与逻辑范式,为技术研发与应用提供顶层设计遵循。其次,建立统一的技术流程标准,对数据采集频率、观测指标阈值等关键环节进行规范化定义,解决不同区域、不同部门技术应用分歧的问题,推动形成可复制、可推广的标准化作业流程。最后,强化标准的场景化适配能力,针对黄土高原、青藏高原等不同区域特征,制定差异化的识别指标体系,确保标准在复杂地质环境与多样化治理需求中的精准落地。

通过数据共享机制与标准规范体系的协同建设,可有效打通“数据采集—分析研判—决策应用”全链条的堵点,推动我国复合链生灾害隐患识别从碎片化、经验化向系统化、标准化、智能化转型,为国家灾害防治体系现代化提供坚实的制度与技术支撑。

5 总结与展望

复合链生重大地质灾害隐患识别理论与方法的构建,是应对多圈层交互作用与多动力耦合驱动下灾害链式反应的关键突破。本文从复合链生重大地质灾害的物理本质出发,提出以“物质—能量跨尺度传递”为核心的灾害隐患识别理论框架,揭示复合链生重大地质灾害系统通过“最优路径”实现能量耗散与稳态平衡。这一

理论突破为灾害链的动力学建模提供了普适性规律,且其与蝴蝶效应、灰犀牛效应、黑天鹅效应之间存在关联机制。在此基础上,本文构建了“理论—技术—国家”三位一体的隐患识别体系:理论体系聚焦多物理场互馈耦合机制、工程地质结构控制与波谱响应理论以及灾害链多场耦合判识理论,实现了从微观作用到宏观表征、从静态特征到动态传播的全链条认知;技术体系通过多物理场感知、地质力学解析与能量梯度智能区划技术,形成了“观测—建模—判别”的递进式技术链条;国家体系依托数据共享、智能区划与工程规划,推动了灾害防控从局部治理向全域统筹的范式转变。

未来复合链生地质灾害隐患识别研究需进一步突破多圈层耦合机制解析与智能化预测技术瓶颈。在理论层面,需深化能量—物质跨介质传输的定量表征研究,尤其是临界阈值下多物理场协同响应的非线性动力学模型构建,对跨圈层界面(如岩—土—水—气耦合界面)的物质交换与能量转换机制开展精细化研究。因此,需结合分形理论、复杂网络分析等方法,揭示灾害链级联效应的空间分异规律与时间序列特征。在技术层面,亟待发展遥感、物联网、地质勘探等多源异构数据的高效融合算法,强化人工智能技术在隐患动态推演中的应用。例如,基于深度学习的多场耦合预测模型与数字孪生平台构建,实现隐患“孕育—触发—扩散”全过程的动态模拟与识别预测。此外,需突破广域灾害隐患识别的算力限制,研发边缘计算与云平台协同的轻量化智能分析系统。在国家体系方面,应加快构建标准化的灾害数据共享机制,推动“天—空—地”观测资源的全域整合,并建立隐患识别技术的地方适应性评价体系,解决区域技术资源不均衡问题。展望未来,可探索量子传感、太赫兹遥感等新兴技术在地质结构探测中的应用潜力,同时加强灾害链与社会经济系统的耦合研究,发展“自然—人文”双驱动的风险防控范式。通过跨学科协作与国际合作,最终形成“机理透明、技术智能、识别精准”的复合链生地质灾害隐患识别体系,为全球可持续发展提供安全保障。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Bradley K, Mallick R, Andikagumi H, et al. Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation. *Nature Geoscience*, 2019, 12(11): 935—939.
- [3] Zhang Z, Liu M, Tan YJ, et al. Landslide hazard cascades can trigger earthquakes. *Nature Communications*, 2024, 15: 2878.

- [4] 张勤,赵超英,陈雪蓉. 多源遥感地质灾害早期识别技术进展与发展趋势. 测绘学报,2022,51(6):885—896.
Zhang Q,Zhao CY,Chen XR. Technical progress and development trend of geological hazards early identification with multi-source remote sensing. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2022,51(6):885—896. (in Chinese)
- [5] Fan XM,Yang F,Siva Subramanian S,et al. Prediction of a multi-hazard chain by an integrated numerical simulation approach:The Baige landslide,Jinsha River,China. *Landslides*,2020,17(1):147—164.
- [6] Chong Y,Chen G,Meng XM,et al. Formation mechanism and quantitative risk analysis of the landslide-induced hazard chain by an integrated approach for emergency management:A case study in the Bailong River basin,China. *Catena*,2023,233:107522.
- [7] Song C,Yu C,Li ZH,et al. Triggering and recovery of earthquake accelerated landslides in Central Italy revealed by satellite radar observations. *Nature Communications*,2022,13:7278.
- [8] Patton AI,Rathburn SL,Capps DM,et al. Ongoing landslide deformation in thawing permafrost. *Geophysical Research Letters*,2021,48(16):e2021GL092959.
- [9] Alcântara E,Marengo JA,Mantovani J,et al. Deadly disasters in southeastern south America:Flash floods and landslides of February 2022 in petrópolis,Rio de Janeiro. *Natural Hazards and Earth System Sciences*,2023,23(3):1157—1175.
- [10] Sattar A,Cook KL,Rai SK,et al. The Sikkim flood of October 2023: Drivers,causes,and impacts of a multihazard cascade. *Science*,2025,387(6740):eads2659.
- [11] Zhang S,Zhang LM,Glade T. Characteristics of earthquake- and rain-induced landslides near the epicenter of Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*,2014,175:58—73.
- [12] 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.
- [13] Song C,Chen B,Li Y,et al. Amplified coseismic loess failure and postseismic landslide acceleration triggered by the 2023 Jishishan, China earthquake. *Engineering Geology*,2025,352:108074.
- [14] Elliott JR. Earth observation for the assessment of earthquake hazard, risk and disaster management. *Surveys in Geophysics*,2020,41(6):1323—1354.
- [15] Metternicht G,Hurni L,Gogu R. Remote sensing of landslides:An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*,2005,98(2/3):284—303.
- [16] Xu Q,Zhao B,Dai KR,et al. Remote sensing for landslide investigations:A progress report from China. *Engineering Geology*,2023,321:107156.
- [17] Mondini AC,Guzzetti F,Reichenbach P,et al. Semi-automatic recognition and mapping of rainfall induced shallow landslides using optical satellite images. *Remote Sensing of Environment*,2011,115(7):1743—1757.
- [18] Liang RB,Dai KR,Shi XL,et al. Automated mapping of M_s 7.0 Jiuzhaigou earthquake (China) post-disaster landslides based on high-resolution UAV imagery. *Remote Sensing*,2021,13(7):1330.
- [19] Hooper A,Zebker H,Segall P,et al. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*,2004,31(23):L23611.
- [20] 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. Interferometric synthetic aperture radar for deformation mapping:Opportunities,challenges and the outlook. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2022,51(7):1485—1519. (in Chinese)
- [21] 李振洪,宋闯,余琛,等. 卫星雷达遥感在滑坡灾害探测和监测中的应用:挑战与对策. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):967—979.
Li ZH,Song C,Yu C,et al. Application of satellite radar remote sensing to landslide detection and monitoring:Challenges and solutions. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2019,44(7):967—979. (in Chinese)
- [22] Cao YM,Hamling I,Massey C,et al. Slow-moving landslides triggered by the 2016 M_w 7.8 kaikōura earthquake,New Zealand:A new InSAR phase-gradient based time-series approach. *Geophysical Research Letters*,2023,50(4):e2022GL102064.
- [23] Chen B,Li ZH,Song C,et al. Automatic detection of active geohazards with millimeter-to-meter-scale deformation and quantitative analysis of factors influencing spatial distribution:A case study in the Hexi Corridor,China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,2024,131:103995.
- [24] 许强,董秀军,李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):957—966.
Xu Q,Dong XJ,Li WL. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2019,44(7):957—966. (in Chinese)
- [25] 许强. 对地质灾害隐患早期识别相关问题的认识与思考. 武汉大学学报(信息科学版),2020,45(11):1651—1659.
Xu Q. Understanding and consideration of related issues in early identification of potential geohazards. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2020,45(11):1651—1659. (in Chinese)
- [26] 黄海峰,薛蓉花,赵蓓蓓,等. 孕灾机理与综合遥感结合的三峡库首顺层岩质滑坡隐患识别. 测绘学报,2022,51(10):2056—2068.
Huang HF,Xue RH,Zhao BB,et al. The bedding rock landslide identification in the head area of the Three Gorges Reservoir combined with disaster pregnant mechanism and comprehensive remote sensing method. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*,2022,51(10):2056—2068. (in Chinese)
- [27] 葛大庆,戴可人,郭兆成,等. 重大地质灾害隐患早期识别中综合遥感应用的思考与建议. 武汉大学学报(信息科学版),2019,44(7):949—956.
Ge DQ,Dai KR,Guo ZC,et al. Early identification of serious geological hazards with integrated remote sensing technologies: Thoughts and recommendations. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*,2019,44(7):949—956. (in Chinese)
- [28] Amatya P,Kirschbaum D,Stanley T,et al. Landslide mapping using

- object-based image analysis and open source tools. *Engineering Geology*, 2021, 282: 106000.
- [29] Ma ZJ, Mei G. Deep learning for geological hazards analysis: Data, models, applications, and opportunities. *Earth-Science Reviews*, 2021, 223: 103858.
- [30] Ghorbanzadeh O, Shahabi H, Crivellari A, et al. Landslide detection using deep learning and object-based image analysis. *Landslides*, 2022, 19(4): 929—939.
- [31] Shi WZ, Zhang M, Ke HF, et al. Landslide recognition by deep convolutional neural network and change detection. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2021, 59(6): 4654—4672.
- [32] Liu XJ, Zhao CY, Yin YP, et al. Refined InSAR method for mapping and classification of active landslides in a high mountain region: Deqin County, southern Tibet Plateau, China. *Remote Sensing of Environment*, 2024, 304: 114030.
- [33] Kim J, Coe JA, Lu Z, et al. Spaceborne InSAR mapping of landslides and subsidence in rapidly deglaciating terrain, Glacier Bay National Park and Preserve and vicinity, Alaska and British Columbia. *Remote Sensing of Environment*, 2022, 281: 113231.
- [34] Zeng P, Feng B, Dai KR, et al. Can satellite InSAR innovate the way of large landslide early warning? *Engineering Geology*, 2024, 342: 107771.
- [35] Martini M, D'Agostino V, Piton G. Geomorphic activity and related large wood recruitment during debris flows and debris Floods; Storm Alex in the Vésudie valley (France). *Catena*, 2025, 257: 109180.
- [36] Lorenz E. Deterministic nonperiodic flow. *Universality in Chaos*. CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742; CRC Press, 2017: 367—378.
- [37] Chen NS, Tian SF, Zhang Y, et al. Soil mass domination in debris-flow disasters and strategy for hazard mitigation. *Earth Science Frontiers*, 2021, 28(4): 337—348.
- [38] Nozue Y, Fukahata Y. Influence of the 2011 Tohoku-Oki earthquake on the strain-rate field around the Noto Peninsula. *Earth, Planets and Space*, 2025, 77(1): 80.
- [39] Chen KJ, Wei GG, Milliner C, et al. Super-shear ruptures steered by pre-stress heterogeneities during the 2023 Kahramanmaraş earthquake doublet. *Nature Communications*, 2024, 15: 7004.
- [40] Liu YP, Song C, Li ZH, et al. Numerical investigation of large-slope planar failure considering entrainment effects; New insights into the 2009 JWS event. *Engineering Geology*, 2025, 346: 107901.
- [41] Li ZH, Chen B, Liu YP, et al. Long-term three-dimensional deformation monitoring and risk assessment of the Guba landslide, Tibetan Plateau. *Science China Earth Sciences*, 2025, 68(10): 3288—3305.
- [42] Tang T, Heddal O, Cardiff P. On finite volume method implementation of poro-elasto-plasticity soil model. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2015, 39(13): 1410—1430.
- [43] Han K, Xiao A, Wu E, et al. Transformer in transformer. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2021, 34: 15908—15919.
- [44] Ouyang WH, Liu SW, Liu K, et al. Efficient numerical implementation of limit equilibrium method for stability analysis of unsaturated soil slopes using Gaussian integral. *Acta Geotechnica*, 2024, 19(9): 5933—5945.
- [45] Scheibert J, Galland O, Hafver A. Inelastic deformation during sill and laccolith emplacement: Insights from an analytic elastoplastic model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2017, 122(2): 923—945.
- [46] Koch KR, Kusche J. Regularization of geopotential determination from satellite data by variance components. *Journal of Geodesy*, 2002, 76(5): 259—268.
- [47] 程谦恭, 王玉峰, 林棋文, 等. 喜马拉雅造山带高速远程滑坡动力学机理研究的思考. *地质学报*, 2024, 98(11): 3238—3254.
- Cheng QG, Wang YF, Lin QW, et al. Consideration on dynamics of rock avalanches in the Himalayan orogenic belt. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(11): 3238—3254. (in Chinese)
- [48] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269—271.
- [49] Pourghasemi HR, Rahmati O. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? *Catena*, 2018, 162: 177—192.
- [50] Liu K, Huang XL, Xu L. Characterization of the mass transport and energy conversion of a rapid long-runout loess landslide using the finite-discrete element method. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2025, 130(3): e2024JF008032.
- [51] Ouyang C, Zhao W, An H, et al. Early identification and dynamic processes of the ridge-top rockslide in Shuicheng, Guizhou, China. *Landslides*, 2021, 18(3): 1107—1123.
- [52] Royden LH, Burchfiel BC, van der Hilst RD. The geological evolution of the Tibetan Plateau. *Science*, 2008, 321(5892): 1054—1058.
- [53] Xu Q, Pu CH, Wang XC, et al. Revealing terrestrial uplift in large-scale land creation areas on the Loess Plateau using InSAR time series data. *Engineering Geology*, 2025, 347: 107946.
- [54] Yang GL, Zhao LH, Qin YG, et al. Clustered landslides induced by rainfall in Jiangwan Town, Shaoguan City, Guangdong Province, China. *Landslides*, 2025, 22(4): 1325—1338.
- [55] Du BY, Wang Y, Fang ZC, et al. Assessing the impact of precipitation variability on landslide hazards in urbanized regions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2025, 136: 104360.

Theories and Methods for Identifying Compound Chain-associated Major Geohazard Risks: Status and Prospect

Zhenhong Li^{1, 2*} Chuang Song^{1, 2} Yufeng Wang³ Chen Yu^{1, 2} Wen Zhang⁴
Weile Li⁵ Chenglong Zhang^{1, 2} Jiewei Zhan^{1, 2} Mingtao Ding^{1, 2} Jiangbo Xi^{1, 2}
Dizhou Guo^{1, 2} Wu Zhu^{1, 2} Qiangong Cheng³

1. State Key Laboratory of Loess Science, Chang'an University, Xi'an 710054, China

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

3. Faculty of Geosciences and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China

4. College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun 130012, China

5. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract Compound chain-associated major geohazards are driven by multi-sphere interactions and multi-dynamic coupling, exhibiting cascading chain effects. The identification of potential hazards faces challenges such as unclear disaster-forming mechanisms, insufficient technological synergy, and incomplete spatial coverage. Since the disaster-chain process of geological hazards represents an entropy-reducing process, this study, based on the Principle of Least Action, elucidates the matter-energy transmission theory in time and space during disaster-chain evolution, and establishes a three-level hazard identification system coordinated across theoretical, technical, and national dimensions. At the theoretical level, the system analyzes the multi-physical-field feedback coupling mechanisms of risk sources and formulates spatial-domain identification criteria. At the technical level, it develops a hazard identification framework integrating multi-source observations, geological mechanics, and energy gradients. At the national level, it optimizes full-scale disaster prevention layouts through data sharing and intelligent zoning. Future research should further overcome the bottlenecks in multi-sphere coupling modeling and multi-physical-field sensing, enhance the precision of hazard identification for compound chain-induced major geohazards, and promote the evolution of geological disaster prevention and control toward greater intelligence and globalization.

Keywords compound chain-associated geohazards; hazard identification; principle of least action; multi-field coupling; multi-source observation

李振洪 长安大学教授、副校长,黄土科学全国重点实验室副主任, GEO中国专家工作组防灾减灾组组长,国家自然科学基金川藏铁路重大项目、科学技术部国家重点研发计划项目首席科学家。主要从事影像大地测量与地质灾害及生态环境监测方面的研究。发表学术论文360余篇。获自然资源科学技术奖一等奖、夏坚白测绘事业创业与科技创新奖等奖项。

(责任编辑 贾祖冰 张强)

* Corresponding Author, Email: zhenhong.li@chd.edu.cn