

Discussion on the early identification and warning method of geological disasters in complex mountainous areas

Yanmei Wang Yanlin Qu

Yunnan Geological Engineering Second Investigation Institute Co., Ltd., Kunming, Yunnan, 650217, China

Abstract

Geological conditions in complex mountainous areas are highly variable, with pronounced terrain relief and fragmented rock-soil structures. Under the combined influence of intense rainfall, earthquakes, and engineering activities, geological hazards exhibit strong suddenness, high concealment, and complex evolutionary processes, posing significant challenges to hazard prevention and risk management. Focusing on the early identification and warning of geological hazards in complex mountainous regions, this study establishes an indicator and criterion system that incorporates geological structure, rainfall-hydrological conditions, and anthropogenic disturbances. On this basis, early warning methods and model development approaches for geological hazards based on threshold analysis and multi-factor coupling are further explored. The findings provide important practical value for regional disaster prevention and mitigation as well as engineering safety management.

Keywords

Complex mountainous areas; Geological hazards; Early identification; Early warning methods; Multi-source monitoring

复杂山区地质灾害早期识别与预警方法探讨

王艳梅 瞿燕林

云南地质工程第二勘察院有限公司, 中国·云南昆明 650217

摘要

复杂山区地质条件多变,地形起伏剧烈,岩土体结构破碎,在强降雨、地震及工程活动等因素共同作用下,地质灾害呈现出突发性强、隐蔽性高和演化过程复杂等特点,给灾害防治与风险管控带来较大挑战。本文围绕复杂山区地质灾害的早期识别与预警问题,通过构建涵盖地质结构、降雨水文及人为扰动等因素的识别指标与判据体系,进一步研究基于阈值分析和多因素耦合的地质灾害预警方法与模型构建思路,对区域防灾减灾和工程安全管理具有重要现实意义。

关键词

复杂山区; 地质灾害; 早期识别; 预警方法; 多源监测

1 引言

随着山区基础设施建设规模的不断扩大和人类活动强度的持续提升,复杂山区地质灾害的发生频率和影响范围呈现出明显上升趋势。滑坡、崩塌、泥石流等灾害往往受地质构造、地形地貌、水文气象及工程扰动等多因素共同控制,其孕灾、成灾过程具有明显的阶段性和不确定性。一旦灾害发生,不仅对人员生命安全构成威胁,也可能对交通、能源及重大工程设施造成严重破坏。然而,不同监测手段之间的协同应用、识别指标的科学构建以及预警模型的适用性仍有待系统研究。在此背景下,围绕复杂山区地质灾害早期识别与预警方法开展综合探讨,对于提升灾害防控的前瞻性和科

学性具有重要研究价值。

2 复杂山区地质环境特征及灾害类型分析

复杂山区通常具有地形起伏大、坡陡谷深、构造活动强烈等显著特征,地层岩性组合复杂,断裂、褶皱与节理裂隙发育程度高,岩土体完整性普遍较差。受地势高差影响,地表径流集中,降雨入渗条件差异明显,局部区域易形成地下水富集与软弱夹层并存的工程地质环境。在自然因素与人类工程活动叠加作用下,山区地质系统稳定性呈现出明显的空间非均质特征。滑坡、崩塌和泥石流是该类区域最为典型的地质灾害类型,其中滑坡多发于强风化岩体和残坡积层分布区,崩塌常见于陡峭岩质边坡及节理密集带,泥石流则集中出现在沟谷纵坡大、松散物源丰富且暴雨频发的流域。不同灾害类型之间在成因机制和演化过程上相互关联,使得灾害链效应显著增强,进一步加大了复杂山区地质灾害识别与防控的难度。

【作者简介】王艳梅(1985—),女,中国内蒙古锡林郭勒盟人,硕士,高级工程师,从事水文地质与工程地质方面的研究。

3 复杂山区地质灾害早期识别的关键技术体系

3.1 地质条件与地形地貌信息综合识别方法

地质条件与地形地貌信息是复杂山区地质灾害孕育和演化的基础控制因素,通过对地层岩性、地质构造及地形参数的综合分析,可以有效识别潜在不稳定区域。岩性组合差异决定了岩土体力学性质的空间分布特征,而断裂构造和节理裂隙则对坡体变形模式产生重要影响。地形坡度、坡向、相对高差等指标能够反映重力作用强度及地表径流路径,对灾害易发性具有直接指示意义。通过将工程地质调查成果与数字高程模型相结合,可实现对坡体几何形态和结构条件的精细化识别,从而在区域尺度上划分灾害高敏感区,为后续监测与预警提供可靠的空间基础^[1]。

3.2 多源监测数据在灾害早期识别中的应用

复杂山区地质灾害具有渐进变形与突发破坏并存的特征,单一监测手段难以全面反映灾害孕育过程。多源监测数据的综合应用能够从不同时空尺度捕捉灾害演化信息,有效提升早期识别能力。位移监测数据可揭示坡体变形速率及其变化趋势,地下水位与孔隙水压力数据反映水动力条件对岩土体稳定性的影响,降雨与气象数据则为灾害触发机制分析提供重要支撑。通过对多源数据进行时间序列分析和相关性判别,可以识别变形加速、应力集中等异常信号,实现对潜在灾害的提前识别,为预警决策提供量化依据。

4 复杂山区地质灾害早期识别指标与判据构建

4.1 地质结构与岩土体稳定性识别指标

地质结构与岩土体稳定性是衡量复杂山区灾害风险的重要基础指标。在工程实践中,常以坡度角、岩体结构面间距、风化深度和抗剪强度参数作为判别依据。当自然边坡坡度超过 35° 且节理裂隙间距小于 0.5 m 时,岩体整体性显著降低,发生滑移破坏的概率明显上升。室内试验结果表明,强风化岩体的内摩擦角多分布在 $18^\circ \sim 25^\circ$,黏聚力集中于 $15 \sim 35\text{ kPa}$ 区间,与中风化岩体相比,抗剪强度下降幅度可达 30% 以上。结合现场调查数据,当潜在滑动面埋深介于 $3 \sim 8\text{ m}$ 且安全系数低于 1.15 时,可判定坡体处于不稳定或准不稳定状态,为早期识别提供明确量化依据。

4.2 降雨与水文因素影响下的识别指标

降雨与水文条件在复杂山区地质灾害触发过程中具有显著放大效应。统计分析表明,当连续降雨量超过 120 mm 或 24 h 降雨强度达到 30 mm 以上时,滑坡和泥石流发生频率明显增加。地下水位的快速抬升往往伴随孔隙水压力的显著变化,实测数据显示,坡体内孔隙水压力由 20 kPa 升高至 45 kPa 时,抗滑力可降低约 40% 。在沟谷型泥石流流域,当有效汇水面积大于 2 km^2 、沟道纵坡超过 15° 且降雨入渗系数高于 0.6 时,松散物质极易被激发形成灾害。通过将降雨历时、强度与水位变化幅度进行综合判定,可构建具有较强适用性的水文触发识别指标体系。

4.3 人为活动扰动下的灾害敏感性判据

工程建设和资源开发活动对复杂山区地质环境的扰动显著改变了原有稳定状态,成为灾害发生的重要诱因。边坡开挖高度超过 10 m 且未采取有效支护措施时,坡体应力重分布效应明显增强,变形速率可由原来的 $1 \sim 2\text{ mm/月}$ 上升至 $8 \sim 12\text{ mm/月}$ 。道路切坡施工中,当填挖方边坡坡率小于 $1:0.75$ 时,局部失稳风险显著增加。长期监测数据显示,在矿山或隧道施工影响区,地表沉降累计值达到 20 mm 以上时,周边滑坡发生概率明显高于未扰动区。通过对扰动强度、变形幅度及时间累积效应进行综合分析,可建立反映人为活动影响程度的灾害敏感性判据,为早期识别提供重要补充^[2]。

5 复杂山区地质灾害预警方法与模型构建

5.1 基于阈值分析的地质灾害预警方法

阈值分析方法通过对关键致灾因子变化区间的量化界定,实现对复杂山区地质灾害风险状态的快速判别。在实际应用中,降雨量、位移速率、地下水位和孔隙水压力是最具代表性的控制变量。当连续降雨量达到 100 mm 且雨强维持在 25 mm/h 以上时,浅层滑坡进入高敏感阶段,坡体位移速率由 0.5 mm/d 增大至 3 mm/d ,稳定状态明显削弱。针对中深层滑坡,当累计位移超过 20 mm 且位移加速度高于 0.2 mm/d^2 时,可判定滑坡由缓慢蠕变向加速变形阶段转化。地下水位在短时间内抬升 1.5 m 以上,孔隙水压力接近 40 kPa 时,抗剪强度折减效应显著增强。通过对单一阈值及其组合阈值的动态对比,可将灾害风险划分为低风险、关注、预警和危险等不同状态,为预警发布提供清晰、可操作的判定依据^[3]。

5.2 多因素耦合的灾害风险分级预警模型

复杂山区地质灾害往往由多种因素共同作用触发,单一阈值难以全面反映风险演化过程,多因素耦合模型能够有效整合地质、气象与工程扰动等信息。模型构建中通常引入坡度、岩性类别、降雨强度、累计位移和人为扰动指数等参数,并通过权重系数反映其相对重要性。经验分析表明,当坡度超过 35° 、强风化层厚度大于 6 m 、 24 h 降雨量达到 80 mm 且位移速率高于 2 mm/d 时,综合风险指数可达到 0.7 以上,灾害进入高风险等级。在中等风险区间内,风险指数多集中在 $0.4 \sim 0.6$ 之间,对应位移速率 $1 \sim 2\text{ mm/d}$ 和降雨量 $40 \sim 60\text{ mm}$ 。通过构建风险指数分级区间,并与现场监测结果进行校核,可实现对灾害风险等级的精细化预警,提高预警结果的稳定性与可靠性。

5.3 动态监测条件下的预警模型修正方法

在长期监测过程中,地质环境条件和外部诱因不断变化,预警模型需要依托动态数据进行持续修正,以保证预测结果的适用性。动态修正方法通常基于时间序列分析,对位移、降雨和水位等指标的变化趋势进行滚动更新。当监测周

期内位移速率由 1.2 mm/d 上升至 3.5 mm/d 且加速度连续 3 d 保持正值时,模型参数需相应提高变形因子的权重比例。降雨条件发生显著变化时,当月累计降雨量由 120 mm 增至 200 mm,模型中降雨阈值应同步调整 10% ~ 20%。通过引入最近 30 d 监测数据对历史参数进行再拟合,可有效降低预测偏差,使预警提前量稳定在 12 ~ 24 h 范围内。动态修正机制的应用,使预警模型能够随环境变化不断自我调整,增强复杂山区地质灾害预警的时效性和准确性^[4]。

6 复杂山区地质灾害早期识别与预警体系的实施路径

6.1 监测网络与数据采集体系建设

复杂山区地质灾害早期识别与预警体系的有效运行,依赖于覆盖合理、层级清晰的监测网络与稳定可靠的数据采集体系。监测布设需结合地形起伏、地质构造分布及灾害易发区划结果,形成以重点隐患点为核心、沟谷与坡面为延伸的立体化监测格局。通过在高陡边坡、滑坡体前缘及沟口等关键部位布设位移、裂缝、地下水位和降雨监测设备,可实现对灾害孕育过程的连续感知。监测频率应与灾害活动特征相匹配,在平稳期保持日尺度采集,在强降雨或变形活跃阶段提升至小时尺度。数据采集过程中需兼顾稳定性与完整性,通过冗余布设和自动校核机制降低数据缺失与误差累积风险,为后续识别与预警分析提供可靠的数据基础。

6.2 预警信息发布与响应机制构建

预警信息发布与响应机制是连接技术系统与防灾实践的重要环节,其科学性直接影响预警效果的转化效率。预警信息应基于风险等级划分结果,采用分级发布方式,使不同层级管理部门和受威胁群体能够清晰理解风险状态。信息内容需突出时间、空间和风险等级等关键要素,避免模糊表述造成误判或恐慌。预警发布渠道应实现多样化配置,通过信息平台、移动终端和现场提示设施等方式形成互补,确保复杂山区信息传递的连续性和可达性。在响应机制方面,应将预警等级与应急措施进行对应衔接,使人员转移、交通管控和工程防护等措施具备明确的触发条件,从而提高预警信息的执行效率和防灾实效。

6.3 早期识别与预警方法在区域防灾中的应用管理

早期识别与预警方法在区域防灾中的应用,需要通过

制度化实现长期稳定运行。相关管理体系应将地质灾害识别与预警工作纳入区域防灾规划与工程建设管理之中,使技术成果转化为常态化工作内容。通过建立隐患点动态更新机制,将监测与预警结果及时反馈至风险区划和防治措施调整中,可持续提升区域防灾能力。应用管理过程中需注重技术方法与地方实际条件的适配性,在山区城镇、交通干线和重点工程周边形成差异化管理策略。通过对预警效果的定期评估与总结,不断优化识别参数和管理流程,使复杂山区地质灾害早期识别与预警体系在区域防灾实践中发挥稳定、长效的支撑作用^[5]。

7 结语

复杂山区地质灾害具有成灾机理复杂、演化过程隐蔽和突发性强等特点,对区域安全和工程运行构成长期威胁。围绕地质环境特征、早期识别技术、识别指标与预警模型等方面展开系统研究,有助于从源头上提升灾害风险管控的科学性与前瞻性。通过将多源监测手段、定量判据和动态修正模型有机结合,可有效增强地质灾害预警的准确性与时效性,使防灾工作由被动应对向主动防控转变。实践表明,只有在完善监测网络、规范预警流程和强化应用管理的基础上,早期识别与预警体系才能在复杂山区持续发挥作用,为区域防灾减灾决策提供可靠支撑,并为保障生命财产安全和工程稳定运行奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 周航,陈明浩,张广泽,陈伟,张营旭,李嘉雨.复杂山区铁路站房“天空地井试信”综合勘察技术[J].铁道技术标准(中英文),2025,7(04):63-68.
- [2] 易邦进,吴帆,傅涛,黄成,钟成.SBAS/PS-InSAR技术在复杂山区地质灾害探测中的对比研究——以云南省福贡县为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2022,40(06):54-61.
- [3] 杨绪波,廖芳茂,金鑫,胡朝旭,谢伟.综合地质勘察方法在复杂地质山区选线中的应用[J].公路交通技术,2022,38(03):38-45.
- [4] 韩若飞,常乐,李永红,姚健康.陡峭复杂地形山区滑坡地质灾害监测研究[A].国家安全地球物理丛书(十七)——生态环境与地球物理[C].2021:183-190.
- [5] 郭晨,许强,董秀军,刘小莎,余金星.复杂山区地质灾害机载激光雷达识别研究[J].武汉大学学报(信息科学版),2021,46(10):1538-1547.