

Research on geological hazard risk assessment and ecological restoration technology

Zequan Ye^{1,2}

1. Hubei Key Laboratory of Resources and Eco-Environment Geology, Hubei Geological Bureau, Wuhan, Hubei, 430034, China

2. Hubei Provincial Geological Bureau Third Geological Brigade, Huanggang, Hubei, 438000, China

Abstract

The frequent occurrence of geological disasters has become a critical factor constraining ecological security and regional sustainable development. Systematic research and integrated innovation are urgently needed for risk assessment and ecological restoration technologies. This paper focuses on typical disaster types such as landslides, debris flows, and collapses, analyzing their causative mechanisms and spatial distribution characteristics. A comprehensive evaluation index system is established based on geological environment, climatic factors, and human activities, exploring risk modeling methods and disaster classification approaches driven by multi-source data. Meanwhile, considering ecosystem degradation characteristics, this study proposes restoration strategies integrating engineering stabilization and ecological reconstruction, constructing a systematic restoration model covering post-disaster assessment, vegetation rehabilitation, and sustainable management. The research findings enhance ecological recovery efficiency in disaster-prone areas and provide theoretical support and technical references for related disaster prevention and mitigation projects.

Keywords

geological hazards; risk assessment; multi-source data; ecological restoration; sustainable management

地质灾害风险评估与生态修复技术研究

叶泽全^{1,2}

1. 资源与生态环境地质湖北省重点实验室, 湖北省地质局, 中国·湖北 武汉 430034

2. 湖北省地质局第三地质大队, 中国·湖北 黄冈 438000

摘要

地质灾害频发已成为制约生态安全与区域可持续发展的关键因素, 其风险评估与生态修复技术亟需系统化研究与集成创新。本文聚焦滑坡、泥石流、崩塌等典型灾害类型, 分析其成因机制与空间分布特征, 构建以地质环境、气候因素、人类活动为基础的综合评价指标体系, 探讨多源数据驱动下的风险建模方法与灾害等级划分路径。同时, 结合生态系统退化特征, 提出基于工程固控与生态重建融合的修复技术策略, 构建涵盖灾后评估、植被恢复与可持续管理的系统化修复模式。研究结果有助于提升灾害区域生态恢复效率, 为相关防灾减灾工程提供理论支撑与技术参考。

关键词

地质灾害; 风险评估; 多源数据; 生态修复; 可持续管理

1 引言

地质灾害在山地、高原、丘陵等复杂地貌区域呈现高频次、多样化态势, 已对生态安全格局与人类生存空间构成长期威胁。随着城市化和基础设施建设向山区延伸, 地质灾害触发机制趋于复杂, 单一因素驱动的风险分析模式已无法满足实际需求。与此同时, 灾害造成的生态破坏具有累积性与长期性, 植被退化、水土流失和生态功能丧失等问题持续恶化, 亟需构建科学系统的修复路径。在此背景下, 本文围绕地质灾害的形成条件、风险评估体系和生态修复技术进行

深入研究, 力求从风险识别、动态更新到生态干预全过程实现系统集成与技术落地, 以期对灾害高风险区域的生态安全与土地资源可持续利用提供理论依据和方法支持。

2 地质灾害类型与成因分析

2.1 滑坡、泥石流、崩塌等典型灾害形态特征

滑坡表现为地表岩土体在重力作用下沿特定滑面失稳下滑, 具有体积大、位移快的特点, 常造成道路堵塞和建筑破坏。泥石流呈现高速流动性与强烈冲击性, 含水量高、固体颗粒丰富, 沿沟道迅速下泄, 冲毁力强。崩塌则以岩块、土块从陡峭坡面迅速坠落为主要特征, 发生时间短、破坏范围局部但威胁生命财产安全。三类灾害常因降雨、震动等外力诱发, 在山区地貌中尤为常见, 其灾后地貌变化剧烈, 给

【作者简介】叶泽全 (1994-), 中国湖北黄冈人, 本科, 助理工程师, 从事环境地质研究。

生态系统和人类活动带来巨大压力,需通过精细识别与分类加以防控。

2.2 地质结构、水文气候与人类活动的综合诱发机制

地质结构中的断裂构造、岩性组合与层理倾向直接影响斜坡稳定性,弱岩层发育区域更易形成滑坡带。水文气候条件如年降雨量大于 1500 毫米、连续降雨超过 72 小时则显著降低岩体抗剪强度,加剧渗透压力。人类活动方面,开挖边坡、高陡切坡、植被破坏等均对自然坡体造成扰动,形成隐患源。交通建设与矿产开发使地层裸露和结构松动,改变地下水动态,易导致重力失衡。多重因素在空间和时间尺度上叠加作用,使地质灾害呈现突发性与持续性并存的复合演化趋势。

2.3 灾害发生的空间分布规律与风险演化趋势

地质灾害在丘陵、山区与高原交接地带密集分布,尤其在高差大于 300 米、坡度超过 25 度区域形成高风险带。以西南、华南为例,其地貌起伏大、岩性破碎、水系密布,灾害事件频次高于年均 50 次,影响面积超过 15 万平方公里。随着极端气候事件增加与土地利用强度提升,灾害风险向城市边缘与交通干线沿线扩展。多灾种叠加地带呈现风险链联动趋势,泥石流常与滑坡耦合形成复合灾害。未来,灾害空间分布将随人类活动扩展而重构,风险区需动态监测与系统评估。

3 地质灾害风险评估指标体系构建

3.1 风险识别单元划分与评价因子选取

地质灾害风险识别需以地貌单元为基础划分评价单元,结合 DEM 数据、土地利用图与水文信息形成空间网格。评价因子选取涵盖地形坡度、地层岩性、构造特征、降雨强度、植被覆盖度、人口密度与工程干扰程度等七类参数。指标构建强调量化与区域适应性,对不同灾种采用针对性因子组合。各因子间需考虑独立性与相关性,通过主成分分析与敏感性测试确定权重影响。评价单元划定标准基于 30 米或 90 米栅格精度,适应遥感与地理信息系统集成处理需求,保障模型运行效率与结果空间表达精度。

3.2 多源数据驱动下的灾害易发性模型构建

灾害易发性模型依托遥感影像、地质调查、气象数据与历史灾害记录等多源数据,通过多变量逻辑回归、支持向量机与信息量法进行建模分析。模型构建强调变量空间一致性与数据时间序列完整性,采用 30 年内的灾害事件进行训练与验证。权重确定引入熵权法与模糊综合评价,提升模型客观性与适应性。建模过程中引入高程、坡度、曲率等数字高程模型派生因子,并融合工程活动分布数据构建动态扰动图层。最终模型输出为灾害易发性等级图,划分为五级风险区,服务区域规划与建设选址评估。

3.3 风险分级评价方法与空间制图技术路径

风险评价采用灾害易发性、潜在损失与承灾体脆弱度叠加分析的综合模型,采用 AHP 层次分析与层级赋值方法构建权重矩阵。风险等级划分标准结合灾害影响频率与经济

损失潜值,设定高、中、高中、低四个等级。空间制图采用 ArcGIS 平台,集成栅格计算、叠加分析与制图符号标准化流程。图层设计要求比例尺统一、分类界限清晰,并与土地利用、行政区划进行叠加展示。地图产品需具备决策辅助功能,提供分区治理建议与动态风险更新接口,实现灾害管理的可视化表达与信息服务功能集成,图 1 为地质灾害危险性评估标准与流程。

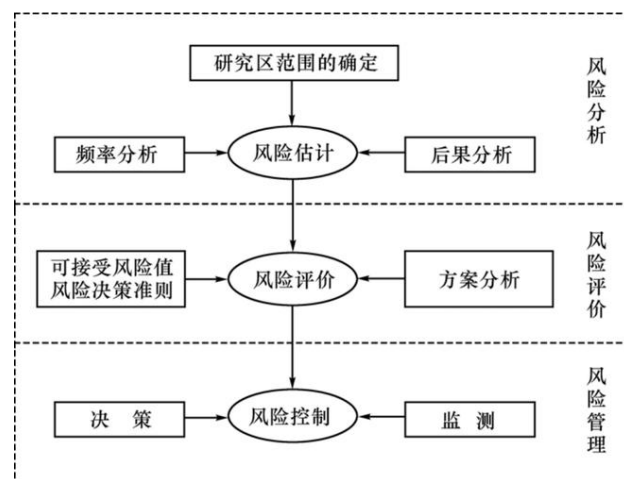


图 1 地质灾害危险性评估标准与流程

4 地质灾害监测预警与动态风险更新机制

4.1 多参数实时监测网络的构建与数据采集

监测系统部署在海拔高于 800 米、年降雨量超过 1200 毫米的地质灾害高风险区域,传感器布点密度为每平方公里不小于 5 个。网络采集参数包括降雨强度、地表位移、地下水位、孔隙水压力与土壤含水率,采样周期控制在 15 分钟以内。数据传输采用 4G 及北斗通信链路,保障高山沟谷区域数据不中断。监测平台融合激光测距、雷达干涉、光纤测变等技术,实现毫米级位移监测精度。系统集成预警阈值设定、实时报警与历史趋势回溯功能,为动态风险预报与响应决策提供高频数据支撑。

4.2 风险动态更新模型的耦合方法与应用场景

风险更新模型集成时间序列变化数据与空间分布信息,通过贝叶斯网络与马尔可夫链建模灾害概率演化。耦合模型每日处理数据量不低于 120MB,包含来自监测点的变形速率、雨量累积、地表湿度等参数。模型更新周期设定为 48 小时内完成一次权重重构,结合最新数据修正灾害触发概率。应用场景涵盖交通干线工程建设、旅游景区运行、山地城镇安全评估等典型环境。通过地理信息系统实现模型结果可视化,动态展示灾害风险等级变化,支持区域精细治理与调度优化。

4.3 早期预警系统的触发机制与响应机制设计

预警系统设定多级响应机制,一级响应阈值为连续 3 小时降雨量超过 50 毫米且地表位移速率达到 2 毫米每小时。触发机制基于数据联动算法,参数异常触发预警信号,系统

平均响应时间控制在 60 秒以内。预警信息通过短信、广播、应急平台同时发布,覆盖区域人口超过 5 万人。响应机制结合地质灾害防御预案,分布式部署指令下达节点,5 分钟内完成预警信息下发与应急资源调度启动。系统运行稳定性由冗余服务器和电源保障,年平均故障率低于 0.5%,具备应对突发灾害的应急联动能力与反馈追踪机制。

5 地质灾害区生态环境退化特征分析

5.1 灾害扰动对土壤、水体和植被系统的破坏效应

滑坡和泥石流造成土壤剥离深度达到 0.6 米以上,表层土壤有机质含量下降 30%,0 至 20 厘米土壤层失水率超过 50%。水体受到泥沙淤积影响,河道断面平均缩减 35%,水体浊度上升至原值的 4 倍,溶解氧含量下降至 2.1 毫克每升,水生生态系统净初级生产力下降 40%。植被系统覆盖率在灾害影响区下降幅度普遍超过 60%,草本植物群落密度由每平方米 120 株锐减至 45 株,地被层植被多样性指数下降至 0.32。破坏形成裸露面与侵蚀面总面积达到 180 平方公里,生态系统服务功能显著退化,区域环境承载力大幅下降。

5.2 生态系统结构与功能失衡的典型表现

生态系统结构遭受扰动后表现出群落层次紊乱、种间关系素弱的特点,乔灌木比例由 1:2:7 转变为 1:1:3,生物量分布向下层集中。物种组成单一化趋势明显,植物功能群由原有的 13 类下降为 5 类,授粉昆虫种类减少至原有数量的 38%,捕食性节肢动物数量下降 62%。功能方面,水源涵养能力降低,年蓄水能力下降 7200 万立方米,土壤固碳能力从每年 2.3 吨下降至 0.9 吨,净初级生产力由年均 680 克碳每平方米下降至 420 克。能量流动网络简化,生态系统自我修复周期由 3 年延长至 8 年,功能失衡影响生态安全底线。

5.3 生态退化区划定与生态敏感区识别技术

生态退化区划定采用遥感影像与植被指数分析法,基于 NDVI 低值区和裸地扩展速率,划定退化核心区域面积为 320 平方公里,年扩展速率达 5.4%。通过遥感变化检测技术,识别出植被覆盖率下降超过 35% 的斑块结构,结合地形、坡度和土地利用数据形成敏感性评价图层。生态敏感区识别采用多因子权重叠加法,构建 8 类指标参与综合分析,其中坡度大于 30 度、年降雨量大于 1600 毫米区域易敏感区占比为 42%。敏感区动态监测模型集成 MODIS、Landsat 与无人机航测数据,监测分辨率达到 10 米级,形成高精度预警图谱。

6 生态修复技术路径与综合治理策略

6.1 基于原位稳定的工程固控与植被恢复集成技术

生态修复强调工程措施与生物恢复同步推进,在不破坏原生地貌的前提下通过锚固、挡墙与柔性支护技术稳定地质体,控制坡体位移与地表径流。原位稳定技术如锚杆抗滑桩系统可将坡体位移速率控制在 2 毫米每年以内,同时在坡面设置拦挡带控制泥沙流失速率在 10% 以下。在稳定基础上实施植被恢复,通过喷播技术与保水基质复合施工,使草本植物发芽率超过 85%,3 个月内实现地表绿色覆盖率达

60%。本土灌木混播配置提升植被抗逆性与群落稳定性,形成乔灌木立体植被系统,显著提高地表固碳、保水与抗侵蚀能力,最终实现灾后生境结构初步重建。

6.2 退化生态系统重建的地貌调控与生态调适方法

退化系统修复聚焦微地形再造与功能区分布优化,通过人工地貌调控改变水文路径与养分迁移方向,实现生态过程重构。工程手段包括坡面微地形雕刻、生态沟渠布设与生境单元隔断,构建小流域内部水土保持格局。在空间格局重塑基础上导入生态调适技术,引导物种演替与群落稳定,通过种子库重建与真菌接种提升群落演替速率。利用本地优势种与先锋种进行分期栽培,形成 3 年内逐步替代、5 年内建成封育系统的修复路线。多层次植被结构增强能量捕获与生态互补作用,生态系统自我调节功能逐步恢复,生态过程再稳定性显著增强。

6.3 灾后生态系统监测评估与可持续管理模式构建

灾后生态恢复过程需建立全过程动态监测系统,涵盖物种恢复、生物量变化、水文稳定性与土壤质量等核心指标。采用高分遥感与无人机航测结合的方法,每季度采集一次图像数据,分辨率不低于 1 米级,自动分析地表植被指数与裸地变化趋势。生态监测平台嵌入数据管理、异常预警与恢复评价模块,通过生态服务功能评分法构建动态评价指标库。可持续管理模式强调制度与技术双重保障,建立基于修复单元的责任管理机制,结合生态补偿政策与村域共建路径,推动生态成果共享与管护长效运行。通过政策引导、公众参与与技术支撑融合,构建长期稳定、可复制的生态修复管理体系。

7 结语

地质灾害风险评估与生态修复技术的系统研究对于提升灾害防控能力与生态安全水平具有重要意义。通过科学构建评估指标体系与预警机制,可实现对风险区域的精准识别与动态管理,为应急响应与工程部署提供决策支撑。生态修复路径的深入探索,不仅有助于提升受损地区的环境承载力,也推动了区域生态系统结构与功能的逐步恢复。在多源数据融合、技术集成应用和制度保障协同推动下,灾后生态治理正逐步走向科学化、规范化与可持续化的综合发展阶段。

参考文献

- [1] 吴杰.矿山地质灾害风险评估方法研究——以摩天冲磷矿为例[J].湖南有色金属,2025,41(03):79-81+114.
- [2] 郑玄.地质灾害风险评估与预警机制优化研究[J].农业灾害研究,2025,15(04):311-313.
- [3] 刘遗平,郭鑫,林深.环境地质灾害风险评估与预警系统在水工程项目中的应用[J].资源信息与工程,2025,40(02):95-98.
- [4] 徐翔宇,周夏飞,曹国志,徐泽升.基于DPSIR模型的地质灾害次生突发水污染风险评估方法构建研究[J].环境科学与管理,2025,50(04):168-173.