

Research on Emergency Prevention and Control Measures for Geological Disasters in Extreme Weather Conditions

Jilong Li

Sichuan Comprehensive Geological Survey Institute, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract

Extreme weather events have become increasingly frequent under global climate change, significantly increasing the risk of geological disasters and complicating emergency response efforts. Meteorological conditions such as heavy rainfall, high temperatures, droughts, and strong winds alter the mechanical properties of rock-soil materials and hydrological environments, triggering disasters including landslides, ground fissures, and surface soil erosion. To address the sudden and destructive nature of geological disasters under extreme weather conditions, it is crucial to establish a scientific and efficient emergency prevention system. This study systematically analyzes the disaster-causing mechanisms of extreme weather, identifies major disaster types, and proposes comprehensive prevention measures encompassing monitoring and early warning, engineering interventions, emergency response, and risk management to enhance disaster response capabilities and control levels.

Keywords

extreme weather; geological disasters; emergency prevention; risk management

极端天气下地质灾害应急防治措施研究

李冀龙

四川省综合地质调查研究所, 中国·四川成都 610000

摘要

全球气候变化背景下极端天气事件频发, 显著加剧地质灾害的发生风险与应急防治难度。暴雨、高温干旱及强风等气象条件通过改变岩土体力学特性与水文环境, 诱发滑坡、地面开裂、表土侵蚀等灾害。针对极端天气条件下地质灾害的突发性和破坏性特征, 需建立科学高效的应急防治体系。本研究系统分析极端天气致灾机理, 归纳灾害主要类型, 并提出包含监测预警、工程干预、应急响应与风险管理的综合防治措施, 以提升灾害应急响应能力与防控水平。

关键词

极端天气; 地质灾害; 应急防治; 风险管理

1 引言

近年来极端天气事件呈现频率增加、强度增强的趋势, 暴雨、高温干旱及强风等气象条件显著影响地质灾害的发生与发展过程。我国《“十四五”国家综合防灾减灾规划》明确提出需加强极端天气条件下地质灾害的应急防治能力建设。极端天气通过改变岩土体含水状态、渗透压力与力学强度, 直接诱发斜坡失稳、岩土体变形等灾害, 对人民生命财产安全构成严重威胁。当前亟需系统研究极端天气与地质灾害的耦合机制, 制定科学有效的应急防治策略, 为防灾减灾工作提供技术支撑与决策依据。

2 极端天气触发地质灾害的主要成因

极端天气事件通过多种复杂的物理力学过程对地质环境的稳定性产生了显著的影响。例如, 暴雨和持续性强降雨会导致岩土体迅速饱和, 孔隙水压力急剧上升, 而基质吸力则显著降低^[1]。这种变化会削弱岩土体的抗剪强度, 使其更容易发生变形和破坏。根据非饱和土力学理论, 水分的人渗会使土体遵循扩展的摩尔-库伦准则, 从而导致强度的衰减^[2]。

高温干旱时, 土壤水分蒸发致其收缩开裂, 形成渗流通道, 加速有机质分解, 破坏团聚结构, 降低稳定性。强风产生风蚀效应, 剥离表层土壤, 改变坡体荷载分布, 还通过风驱降雨增加雨滴侵蚀力。水文、力学和风蚀耦合作用致地质体失稳, 这是灾害发生本质原因^[3]。这些相互作用影响地质体稳定, 可能引发滑坡、泥石流等更严重灾害。所以, 了解相关物理力学过程对预防和减轻极端天气引发的地质灾害意义重大。

【作者简介】李冀龙(1988-), 男, 中国四川成都人, 本科, 工程师, 从事地质灾害防治研究。

3 极端天气条件下地质灾害的主要表现形式

3.1 暴雨激发型斜坡失稳与泥石流灾害

暴雨条件下高强度降雨持续入渗岩土体，使非饱和区快速饱和并引发基质吸力急剧消散，孔隙水压力显著提升。根据非饱和土力学原理，抗剪强度参数随饱和度增加呈现指数型衰减特征，导致斜坡稳定性系数骤降。浅层滑坡主要发育于残坡积层，表现为典型的圆弧形滑动破坏模式；深层滑坡则往往沿基岩结构面发生复合型破坏，具有多级滑移特征^[4]。同时地表径流汇集形成高能洪流，对坡面松散物质进行冲刷搬运，形成高密度泥石流流体（如图1）。这类灾害过程具有显著突发性和高速运动特征，其破坏力主要表现为冲击作用和淤埋效应，对山区居民聚居区和交通基础设施构成严重威胁，往往造成连锁性灾害效应。



图1 暴雨引发山体滑坡引起的泥石流

3.2 持续高温引发岩体热破裂与干旱开裂

长期高温干旱环境导致岩土体水分剧烈蒸发，引发收缩变形与体积变化。岩石体在温度梯度作用下产生差异膨胀效应，不同矿物相间热膨胀系数的差异在晶界处产生热应力集中，促使微裂隙萌生并扩展贯通^[5]。土体干缩作用形成垂直方向的裂隙网络，这些裂隙不仅破坏土体结构完整性，更为后续流体运移提供优势通道。在膨胀土分布区域，干湿循环作用导致反复胀缩变形，显著降低土体长期强度。高温环境还加速有机质分解过程，破坏土壤团聚结构，降低抗侵蚀能力。这类灾害主要表现为地裂缝持续扩展和渐进式地面沉降，对道路路基、管道工程等线性基础设施产生持续性破坏，往往引发难以修复的结构性损伤。

3.3 强风作用导致的表土侵蚀与植被破坏

强风条件产生显著风蚀作用，通过对地表颗粒物质的搬运作用改变地形地貌。植被覆盖度较低的区域易形成风蚀洼地，表层细颗粒物流失导致土壤结构退化。风力对坡面植被产生机械破坏作用，乔木倾倒后根系固土功能丧失，形成新的侵蚀源。风驱降雨现象改变降水特性，增大雨滴动能和溅蚀能力，加剧坡面侵蚀过程（如图2）。在突出地形部位，风力与重力共同作用促使危岩体失稳，增加崩塌风险。这类灾害主要表现为表层土壤持续流失和植被覆盖度下降，

进而引发水土保持功能退化，形成正反馈式的生态环境恶化过程，最终加剧区域地质灾害发生风险。



图2 强风侵蚀的土地效果图

4 极端天气地质灾害应急防治体系构建

4.1 构建监测预警体系，提升灾害识别能力

构建空天地一体化的立体监测网络是提升地质灾害应急防治能力的重要基础。在空间监测层面，合成孔径雷达干涉测量（InSAR）技术利用雷达波的相位干涉原理，能够实现毫米级的地表形变监测，其监测精度可达1~2mm，覆盖范围达数百平方公里。新一代卫星星座显著提高了重访频率，使监测周期缩短至3~5天。全球导航卫星系统（GNSS）连续运行基准站网络通过接收多频段卫星信号，可提供精确到毫米级的三维位移场数据，特别适用于捕捉滑坡体的缓慢蠕变过程。

在地面监测层面，分布式光纤传感技术（DTS）通过布设在滑坡体内的传感光纤，可实时监测应变分布和温度场变化特征，其空间分辨率可达米级。微震监测网络则通过布设高灵敏度地震仪，捕捉岩体内部破裂产生的弹性波信号，从而识别潜在滑动面。水文监测要素包括土壤体积含水量、基质吸力与孔隙水压力的动态变化过程，采用时域反射计（TDR）和张力计进行连续观测，采样频率可达每分钟一次。气象监测整合气象雷达数据和自动雨量站网络，提供降雨时空分布的高分辨率数据，时间分辨率可达5分钟。监测数据经物联网实时传至云平台，用深度学习算法挖掘形变、水文与气象参数间非线性关联规律，建立基于时间序列分析的灾害预警模型。预警系统考虑区域地质条件空间异质性，针对不同岩土类型和斜坡结构设动态阈值，实现从区域到单体灾害预警的多级响应机制。系统输出含风险等级划分、危险区时空演变预测和预警时效概率评估，为应急决策提供量化支持。

4.2 研发快速加固技术，增强工程防治效能

针对不同类型地质灾害的成灾机理，需要采取差异化的应急工程治理措施。对于滑坡灾害，采用预应力锚索快速加固系统，通过高压注浆工艺增强锚固段抗力，锚索预应力

可达到 1000kN 以上。微型抗滑桩群采用振动沉管工艺快速成桩, 桩径通常为 300~500mm, 桩长 8~12m, 形成组合抗滑结构体系。排水系统包括水平排水孔和真空预压排水装置, 水平排水孔间距 2~3m, 孔径 100mm, 可有效降低滑动面孔隙水压力。

对于泥石流灾害, 柔性防护网系统采用高强度钢丝绳编织而成, 其能量吸收能力可达 5000~8000kJ, 网孔尺寸一般为 300×300mm。消能挡墙设计考虑流体冲击力与淤积荷载, 采用阶梯式消能结构, 墙高 3~5m, 基础埋深 2~3m。针对地面开裂灾害, 采用纳米硅酸盐注浆材料, 其颗粒粒径为 50~100nm, 渗透系数可达 10^{-8} cm/s 级, 能有效填充微裂隙。土工格室加固系统采用高密度聚乙烯材料, 格室高度 100~200mm, 通过三维约束作用提高土体整体性。所有应急工程实施前需进行快速稳定性分析, 采用极限平衡法与有限元数值模拟相结合的方法评估安全系数, 要求最小安全系数不低于 1.05。工程材料选择需考虑环境适应性, 包括耐腐蚀锚索、抗紫外线土工合成材料等, 确保应急工程在恶劣环境下的耐久性。施工过程中采用实时监测技术, 包括测斜仪、应力计等, 确保工程质量和安全。

4.3 优化应急响应机制, 完善风险评估体系

地质灾害风险评估需要建立多参数耦合的综合评价体系。在致灾因子分析方面, 重点考虑降雨入渗过程对边坡稳定性的影响, 采用非饱和渗流理论计算孔隙水压力分布, 结合极限平衡分析法计算斜坡稳定性系数。承灾体脆弱性评估包括结构物抗灾能力和人口分布特征, 采用高分辨率遥感影像解译与实地调查相结合的方法获取暴露度数据, 建立包含建筑结构类型、使用年限、人口密度等参数的数据库。

建立极端天气情景库, 包括不同重现期(10年、50年、100年)降雨强度和持续时间组合, 通过数值模拟预测灾害发生概率。采用概率风险评估方法, 计算年度期望损失值, 为防灾规划提供依据。应急响应机制采用四级预警模式(蓝、黄、橙、红), 根据风险等级启动相应预案。跨部门协同指挥系统整合气象、地质、应急管理等部门的数据, 建立统一的空间信息平台, 实现数据共享与实时更新。应急资源调配采用 GIS 空间分析技术, 基于道路网络、地形高程等数据, 优化救援物资储备点布局与运输路线, 确保 30 分钟内到达受灾区域。建立应急响应效能评估体系, 包括响应时间、资源到位率、人员疏散效率等指标, 通过事后评估持续改进应急流程。同时建立应急演练制度, 每季度开展一次综合演练, 检验应急预案的可操作性。

4.4 加强社区参与机制, 提高公众防灾意识

提升公众防灾意识需要建立系统化的教育培训体系。针对不同受众群体设计差异化的教育方案, 包括学生、社区居民、企业员工等。虚拟现实技术构建沉浸式灾害场景模拟系统, 使参与者体验灾害发生过程与应急避险措施, 模拟场景包括滑坡、泥石流等主要灾害类型。科普材料编制考虑文化程度差异, 采用图文结合、多语言版本的形式, 内容涵盖灾害识别、预警信号理解、避险方法等。

群测群防网络为社区配备简易监测设备, 包括倾斜仪、裂缝计和雨量筒, 培训居民进行日常观测与数据记录, 建立定期报告制度。预警信息发布采用多渠道传播模式, 包括手机短信、广播、社交媒体、社区喇叭等, 确保信息传递的及时性与全覆盖。社区应急预案明确避险路线、安置场所和物资分配方案, 每半年组织一次实战演练。建立志愿者培训体系, 教授基本的搜救技巧和医疗救护知识, 培训内容包括伤员搬运、止血包扎、心肺复苏等。建立防灾知识考核机制, 通过定期测试评估培训效果, 对合格者颁发防灾技能证书。同时建立激励机制, 对防灾工作突出的社区和个人给予表彰奖励, 形成积极参与防灾工作的良好氛围。

5 结语

极端天气条件下地质灾害防治面临前所未有的挑战, 灾害成因复杂且突发性强。通过深入研究气象-地质耦合机制, 明确暴雨、高温、强风等不同气象条件致灾规律, 可为应急防治提供理论依据。构建空天地一体化监测预警网络、研发快速应急工程技术、完善风险评估体系及提升社会防灾能力, 形成全方位防控策略。未来需加强多学科交叉研究, 发展智能预警技术, 优化应急资源配置, 全面提升极端天气地质灾害的防治效能与应急响应水平, 保障社会经济可持续发展与人民生命财产安全。

参考文献

- [1] 雷天浩. 矿山地质灾害应急勘查与防治措施研究[J]. 世界有色金属, 2022, (23):109-111.
- [2] 李叶倩, 王小燕. 松江区举行极端天气下城市运行保障综合演练暨“119”消防宣传月主题活动[J]. 上海安全生产, 2024, (12):12-13.
- [3] 尹冉. 北京“23·7”公路水毁灾害分析及防治措施研究[J]. 市政技术, 2024, 42(8):119-129.
- [4] 叶茜, 孟玥. 为群众撑起“安全伞”——河南省地质局地质灾害防治中心助力地质灾害防治工作侧记[J]. 资源导刊, 2023, (17):46-46.
- [5] 吴博. 深圳市地质灾害监测预警方法研究[D]. 吉林大学, 2024.