

水工环地质灾害的防治策略研究

郑 峰

山东省地矿工程勘察院（山东省地质矿产勘查开发局八〇一水文地质工程地质大队） 山东 济南 250014

摘要：水工环地质灾害是当前生态安全与可持续发展的重大挑战。本研究系统梳理了水工环地质领域中滑坡、泥石流、地面塌陷及土壤与地下水污染等典型灾害类型，深入剖析其致灾因子与复合形成机制。基于多维度耦合理论，提出风险评估预警、工程与生态治理、政策法规完善等综合防治策略，为提升水工环地质灾害防控能力、保障区域生态安全提供科学支撑。

关键词：水工环；地质灾害；防治策略

引言：随着经济快速发展与人类工程活动日益频繁，水工环地质灾害频发，给人民生命财产安全、生态环境带来严重威胁。水工环地质涵盖水文、工程与环境地质多个方面，其引发的灾害具有复杂性、关联性与破坏性。准确识别灾害类型、明晰其形成机制，进而制定科学有效的防治策略迫在眉睫。本研究聚焦于此，旨在通过深入探究，构建全面、系统的防治体系，为水工环地质灾害防控提供理论支撑与实践指导。

1 水工环地质灾害类型与特征分析

1.1 灾害分类体系

(1) 水文地质灾害：地面沉降多发生于松散含水层分布区，因地下水过量开采导致孔隙压力降低、土体压缩，呈现缓慢累积性特征，易造成建筑物开裂、市政设施损毁；岩溶塌陷集中在碳酸盐岩发育区域，受地下水动力条件变化驱动，表现为突发性强、破坏范围集中的特点，常引发地表建筑物坍塌。(2) 工程地质灾害：滑坡多形成于坡度大于 15° 的岩土体边坡，受岩土体性质、结构面控制，呈现渐进式变形特征，降雨或地震易触发滑动，造成线路中断、工程损毁；泥石流由暴雨、冰雪融水引发，集中在沟谷发育区，具有流速快、携沙量大的特征，破坏力极强，可掩埋村落、摧毁基础设施^[1]。

(3) 环境地质灾害：土壤污染以点源污染和面源污染为主要形式，污染物通过大气沉降、废水灌溉等途径渗入土壤，表现为隐蔽性强、治理周期长的特征，危害农作物生长与人体健康；地下水污染多源于工业排污、垃圾填埋渗漏等，污染物在地下水中缓慢迁移扩散，具有难修复性，直接影响饮用水安全。

1.2 复合灾害形成机制

(1) 耦合作用模型：降水入渗作为初始触发因子，通过孔隙水压力升高降低土体抗剪强度，引发边坡滑动、地面塌陷等工程地质灾害；灾害导致岩土体结构破

坏、地表径流改道，进而使污染物随地下水扩散，诱发土壤污染、地下水污染等环境地质灾害，形成“自然触发—工程灾害—环境灾害”的链式耦合效应。(2) 典型案例：三峡库区蓄水后，水位周期性涨落使库岸岩土体反复干湿交替，孔隙度增加、强度衰减，引发边坡失稳滑坡；滑坡产生的松散堆积物在水流作用下参与库岸再造，改变局部水文地质条件，同时滑坡体中的污染物释放至水体，造成局部地下水污染，形成边坡失稳与库岸再造、水污染的交互复合灾害。

1.3 致灾因子识别

(1) 自然因子：地形地貌上，高山峡谷区坡度陡峭、沟谷发育，为滑坡、泥石流提供地形基础；气候条件中，暴雨、持续降雨是触发岩土体失稳的关键动力，极端温差则加剧岩土体风化开裂；地质构造方面，断裂、褶皱发育区岩土体完整性差，地下水易富集，增加灾害发生概率。(2) 人为因子：矿产开发中的露天采矿、地下采空活动破坏岩土体结构，引发地面塌陷；工程建设中道路修建、基坑开挖改变边坡应力平衡，诱发滑坡；土地利用变化中，过度开垦、植被破坏导致水土流失，降低岩土体稳定性，同时农业生产中的化肥农药使用、工业活动中的排污行为，直接加剧土壤与地下水污染。

2 水工环地质灾害的多维度耦合防治理论框架

2.1 时空维度耦合

(1) 短期应急响应与长期生态修复的衔接：短期应急聚焦灾害发生后的快速处置，如滑坡体临时加固采用沙袋堆砌、抗滑桩支护，地面塌陷区及时回填封堵，避免灾害进一步扩大；同时需同步规划长期生态修复，在边坡区域种植固土能力强的乡土植物（如紫花苜蓿、狗牙根），构建植被缓冲带，通过生物措施提升岩土体稳定性，在污染区域采用微生物修复、植物吸收等技术

逐步降解污染物,实现“应急控险—生态修复—风险管控”的全周期衔接,避免短期处置引发新的生态问题。

(2)空间尺度上从点源治理到流域管控的升级:传统点源治理仅针对单个灾害点(如某一滑坡体、某一污染井)开展局部整治,难以解决区域关联性灾害问题。流域管控需整合水文、地质、环境数据,构建流域尺度灾害风险评估体系,例如在长江上游流域,统筹考虑支流边坡稳定性与干流水质安全,通过建立流域内矿山开采、工程建设的协同管控机制,统一制定防灾标准,实现从“单点治理”到“全域防控”的转变,减少跨区域灾害传递风险^[2]。

2.2 学科维度耦合

(1)地质工程学+环境科学+管理学:地质工程学通过钻探取样、室内试验获取岩土体参数,利用极限平衡法、数值模拟开展边坡稳定性评价,确定灾害易发区域;环境科学基于污染物迁移规律,采用渗透反应墙、生物滤池等技术控制土壤与地下水污染扩散;管理学则结合风险评估结果,制定差异化政策工具,如对高风险区域实施开发限制政策,对污染企业推行排污许可与生态补偿制度,三者协同形成“技术评估—污染治理—政策保障”的闭环体系,提升防治措施的科学性与可操作性。(2)跨学科方法:系统动力学模型可整合自然、人为多因子,模拟灾害链式反应过程(如降水—滑坡—水污染的动态关联),预测不同防治方案的长期效果;多目标优化算法能在经济效益、生态效益、安全效益之间寻找最优平衡点,例如在边坡治理中,通过算法优化抗滑工程规模与植被恢复面积,实现“成本最低—稳定性最高—生态影响最小”的综合目标,为跨学科防治提供量化决策支持。

2.3 技术维度耦合

(1)传统监测与新型技术融合:水准仪可精准测量地面沉降量,测斜仪实时监测边坡深层位移,但其覆盖范围有限、人工成本高;InSAR技术通过卫星遥感实现大范围(如县域、流域)地表形变监测,精度可达毫米级,物联网则通过布设传感器网络,实时采集土壤含水率、地下水位、污染物浓度等数据,三者融合构建“点—线—面”立体监测网络,既保留传统技术的高精度优势,又通过新型技术拓展监测广度与实时性,及时捕捉灾害前兆信息。(2)数值模拟与大数据分析结合:FLAC3D可模拟岩土体应力应变变化,预测边坡失稳时间与范围;MODFLOW能模拟地下水流动与污染物迁移路径,为污染防控提供依据;大数据分析则整合历史灾害数据、实时监测数据、气象数据,通过机器学习算法识

别灾害发生规律,优化数值模拟参数,例如结合近30年降雨与滑坡数据,修正FLAC3D中降雨入渗系数,提升模拟预测精度,为防治工程设计与应急决策提供更可靠的技术支撑。

3 水工环地质灾害的防治策略体系构建

3.1 风险评估与预警策略

(1)三级预警体系构建:蓝色预警对应“潜在风险”,当监测数据显示岩土体微小变形(如边坡位移速率 $< 2\text{mm}/\text{天}$)或地下水水位小幅波动时,通过短信、社区公告等方式向区域内企业、居民发布风险提示,指导开展隐患排查;黄色预警为“较高风险”,若位移速率达 $2\text{--}5\text{mm}/\text{天}$ 或出现局部土体开裂,启动乡镇级应急响应,暂停高风险区域户外作业,组织应急队伍待命;红色预警即“极高风险”,当位移速率 $> 5\text{mm}/\text{天}$ 或监测到明显滑动迹象,立即启动县级及以上应急预案,疏散受威胁群众,封闭交通线路,同时协调消防、医疗等部门进驻现场,形成“分级响应、精准管控”的预警机制^[3]。

(2)基于机器学习的灾害预测模型:针对西南山区地形复杂、降雨集中的特点,收集该区域近20年滑坡案例数据(含地形坡度、岩土体类型、降雨强度、植被覆盖率等12项特征指标),采用随机森林算法构建预测模型。模型通过历史数据训练,可自动识别关键致灾因子(如日降雨量 $> 150\text{mm}$ 、坡度 $> 30^\circ$ 时滑坡风险骤增),结合实时气象数据与InSAR监测数据,实现未来72小时滑坡发生概率预测,预测准确率达85%以上。在云南昭通、四川雅安等试点区域,模型提前48小时成功预警3起中小型滑坡,为人员转移争取了宝贵时间。

3.2 工程治理技术体系

(1)结构措施:抗滑桩适用于深层滑坡治理,采用钢筋混凝土浇筑,桩长深入稳定岩层 $3\text{--}5\text{m}$,通过阻挡滑坡体滑动传递力,提升边坡稳定性,如三峡库区某滑坡治理工程中,布设直径 1.2m 的抗滑桩28根,使边坡安全系数从1.05提升至1.3;格构加固针对浅层滑坡,采用浆砌石或混凝土格构梁与锚杆组合,将坡面岩土体分割为小块,限制其变形,常用于公路边坡治理;排水系统优化通过增设截水沟、盲沟,加速坡体地表水与地下水排出,减少孔隙水压力,在贵州六盘水某矿区,优化后的排水系统使边坡地下水位平均下降 1.8m ,土体抗剪强度提升15%。(2)生态措施:植被护坡选择耐旱、固土能力强的乡土植物(如云南松、紫花苜蓿),通过根系缠绕与枝叶截留,降低水土流失,在重庆武隆某滑坡区,植被覆盖度从治理前的35%提升至70%,边坡年位移量减少90%;微生物固土技术利用芽孢杆菌、放线菌等微生

物分泌的黏结物质,改良土壤结构,增强土体团聚性,在陕西汉中某黄土边坡试点中,微生物处理后的土壤黏聚力提升20%,抗蚀性增强25%。(3) 创新技术:3D打印地质模型基于钻探数据与遥感影像,采用树脂材料1:500比例打印边坡、岩溶区等复杂地质体模型,直观呈现岩土体分层、裂隙分布等特征,辅助工程师制定治理方案。在湖南张家界某岩溶塌陷治理中,通过3D模型精确定位塌陷通道,指导注浆加固工程,使治理成本降低18%,工期缩短20天^[4]。

3.3 环境修复与可持续发展策略

(1) 污染场地修复技术:化学淋洗适用于重金属污染土壤,采用EDTA、柠檬酸等淋洗剂定向去除镉、铅等污染物,在湖南郴州某有色金属矿区,淋洗后土壤镉含量从3.2mg/kg降至0.3mg/kg,达到农用地标准;生物修复利用蚯蚓、蜈蚣等土壤动物及超富集植物(如蜈蚣草)吸收降解污染物,在江西赣州某农药污染场地,蜈蚣草种植6个月后,土壤有机磷含量降低65%,且无二次污染。(2) 生态廊道建设与土地复垦模式:在流域尺度构建生态廊道,连接碎片化绿地与湿地,如长江中游某灾害多发区,建设宽50-100m的植被廊道,提升区域生态连通性,同时通过土地复垦,将废弃矿坑、塌陷区改造为生态公园、光伏电站,在安徽淮北某矿区,复垦后的土地种植油用牡丹,既实现生态修复,又为当地创造年人均2000元的经济收益。(3) 碳汇林业在灾后重建中的应用:在滑坡、塌陷治理后的区域种植杉木、马尾松等碳汇树种,构建碳汇林基地,吸收二氧化碳的同时提升生态效益。在四川汶川地震灾后重建中,20万亩碳汇林年均固碳量达8万吨,既改善区域生态环境,又通过碳交易为后续灾害防治筹集资金,形成“生态修复—碳汇增收—防灾保障”的良性循环^[5]。

3.4 政策法规与管理机制

(1) 完善《地质灾害防治条例》实施细则:细化各级政府、部门防治职责,明确矿山企业、工程建设单位的主体责任,如规定新建工程需开展地质灾害危险性评估,未达标者不得开工;建立灾害防治“黑名单”制

度,对违规排污、未落实防治措施的企业,限制其项目审批与融资,2024年某省依据细则,对12家违规矿山企业实施停产整顿,罚款总额达5000万元。(2) 推行“河长制+地质灾害责任人”双轨管理:将流域内地质灾害防治纳入河长制考核,由河长统筹协调水利、自然资源、环保等部门,同时为每个灾害隐患点配备专职责任人,负责日常监测、预警信息传递,在浙江钱塘江流域,双轨管理实施后,隐患点巡查频次提升至每周2次,预警信息传达效率提高40%。(3) 建立灾害防治基金与保险联动机制:设立省级地质灾害防治基金,资金来源于财政拨款、企业捐赠、碳交易收益等,用于应急处置与生态修复;推行地质灾害保险,由政府补贴50%保费,居民、企业自愿参保,灾害发生后保险公司快速赔付,在福建、广东等省份,保险机制已累计赔付灾害损失1.2亿元,减轻了政府与群众的经济负担。

结束语

水工环地质灾害防治是一项长期且艰巨的任务,关乎生态安全与民生福祉。本研究针对水工环地质灾害,从成因分析到防治策略制定进行了全面探索,所提出的综合防治体系具有一定科学性与实用性。但地质环境不断变化,新问题随时可能出现。未来,我们需紧跟时代步伐,持续创新防治技术,强化跨部门、跨领域协作,不断完善防治策略,为水工环地质灾害的有效防控筑牢坚实防线。

参考文献

- [1]董世尧.水工环地质技术在矿山地质灾害防治中的应用[J].世界有色金属,2023,(12):210-212.
- [2]张龙生.水工环地质技术在矿山地质灾害防治中的应用分析[J].世界有色金属,2023,(04):205-207.
- [3]王文庆.地质灾害治理中水工环地质技术的应用探讨[J].西部资源,2022,(04):185-186.
- [4]封进勃.水工环地质技术在矿山地质灾害防治中的应用[J].工程技术研究,2022,7(14):225-227.
- [5]宋杨.水工环地质技术在地质灾害防治工程中的应用[J].世界有色金属,2022,(14):187-189.