

岩溶地区水工环地质灾害特征与生态修复综合治理研究

刘先强 岑宇坚

昆明钟沛劳务派遣有限公司 云南昆明 650000

DOI: 10.32629/ems.v8i4.19702

[摘要] 岩溶地区因可溶性岩石长期溶蚀演化形成独特的地质环境，水工环地质灾害频发且类型多样，不仅破坏区域生态平衡，还严重威胁水利工程安全运营与人民生命财产安全。本文以岩溶地区水工环地质灾害为研究对象，系统分析岩溶地区水工环地质灾害的主要类型及分布、形态、诱发因素等特征，深入探讨地质灾害与生态环境的相互影响机制，结合近年来岩溶地区生态修复实践经验，提出“勘察先行、分类施策、标本兼治、长效管护”的生态修复综合治理方案，包括工程防控、生态修复、监测预警及管理保障等具体措施，为岩溶地区水工环地质灾害防控与生态环境可持续发展提供理论支撑和实践参考。

[关键词] 岩溶地区；水工环地质灾害；灾害特征；生态修复；综合治理

一、引言

岩溶是水对石灰岩、白云岩等可溶性岩石进行溶蚀、侵蚀而形成的地质现象，岩溶地区则是岩溶发育集中的区域。我国岩溶分布广泛，约占国土面积的三分之一，主要集中在西南、华南等地区，其中云南、广西、贵州等省份的岩溶地貌最为典型。水工环地质灾害是指在岩溶地质环境背景下，由水文、工程、环境地质条件变化引发的各类灾害，涵盖岩溶塌陷、边坡失稳、地下水污染、水土流失等多种类型。随着我国水利工程建设向岩溶地区延伸，以及人类工程活动对岩溶地质环境的扰动加剧，水工环地质灾害的发生频率和危害程度不断提升，不仅导致水利工程损毁、水资源浪费，还引发植被退化、土壤贫瘠、生物多样性减少等一系列生态问题，制约区域经济社会与生态环境的协调发展。

近年来，国内外学者针对岩溶地区水工环地质灾害开展了大量研究，在灾害成因、监测技术等方面取得一定成果，但岩溶地质环境具有复杂性、隐蔽性和不均一性，当前灾害防控仍有不足，生态修复技术针对性和长效性欠缺，不同地貌单元治理模式缺乏差异化。因此，深入研究灾害特征、探索科学的生态修复路径，对降低灾害风险、保护生态环境、保障水利工程安全具有重要意义。本文结合云南、广西等岩溶地区实际，梳理灾害特征并提出针对性治理措施，为相关研究和实践提供参考。

二、岩溶地区水工环地质灾害主要类型及特征

岩溶地区水工环地质灾害的形成与岩溶地质演化、水文

动力条件、人类工程活动等多种因素密切相关，其类型多样、特征鲜明，不同灾害类型的表现形式和危害程度存在差异，但整体呈现出隐蔽性强、关联性高、治理难度大等共性特征。结合岩溶地区地质环境现状，主要的水工环地质灾害类型包括岩溶塌陷、边坡失稳、地下水系统破坏及水土流失，各类灾害的具体特征如下。

岩溶塌陷是岩溶地区最具代表性的水工环地质灾害，由岩溶洞穴、裂隙发育及地下水动力条件改变导致上部岩土体失稳引发。其分布呈区域性和地段性，主要集中在岩溶断陷盆地、槽谷等地貌单元，浅覆盖岩溶发育区发生率极高。形态上多为圆形、椭圆形，直径和深度差异较大，严重时形成连片塌陷。诱发因素包括大气降水、地下水波动等自然因素，以及地下水开采、矿山开采等人为因素，其中过量开采地下水是近年塌陷频发的主因。岩溶塌陷突发性强、破坏性大，会损毁设施、破坏地下水资源，加剧水资源短缺。

边坡失稳是岩溶地区水利工程建设中的常见灾害，表现为滑坡、崩塌等形式。核心成因是可溶性岩石经长期溶蚀形成裂隙、溶洞，加之断层切割导致岩体破碎，再结合地下水与地表水频繁转化、库水浸泡软化岩土体，进一步加剧失稳风险。其主要分布在地形起伏大、岩溶发育强烈的区域，边坡坡度大于 30° 时风险显著提升，形态以顺层、切层滑坡和岩块坠落为主，会堵塞河道、威胁水利工程安全。

地下水系统破坏源于岩溶水文地质特殊性和人类活动扰动，岩溶地下水类型多样、分布不均，地表水与地下水转化

频繁。其主要表现为地下水污染、水位下降和地下河断流: 污染源于矿山废水、农业面源和生活污水, 通过岩溶裂隙快速渗透; 水位下降由过量开采、水利拦截导致, 会引发塌陷、泉眼干涸; 地下河系统破坏则改变径流路径, 加剧水资源不均和旱涝灾害。

水土流失是岩溶地区普遍存在的水工环地质灾害, 与岩溶地区生态环境脆弱性密切相关。岩溶地区岩石裸露率高, 土层浅薄且贫瘠, 土壤保水保肥能力差, 加之地形起伏较大, 降水集中且强度大, 地表径流冲刷力强, 极易引发水土流失。同时, 人类工程活动如矿山开采、植被破坏、坡地开垦等, 进一步加剧了水土流失程度。其分布特征呈现广泛性, 几乎所有岩溶地区都存在不同程度的水土流失, 其中峰丛洼地、岩溶槽谷等区域水土流失最为严重。水土流失不仅会导致土壤肥力下降, 影响农作物生长和植被恢复, 还会导致泥沙淤积河道、水库, 降低水利工程的调蓄能力, 加剧洪涝灾害, 同时泥沙携带的污染物还会污染地表水和地下水, 形成“灾害链”, 进一步破坏区域生态环境。

总体而言, 岩溶地区水工环地质灾害具有明显的共性特征: 一是隐蔽性强, 岩溶洞穴、裂隙等多分布于地下, 灾害发生前往往无明显征兆, 难以提前发现和预警; 二是关联性高, 各类灾害相互影响、相互诱发, 如地下水系统破坏会引发岩溶塌陷和水土流失, 边坡失稳会堵塞河道, 引发洪涝灾害; 三是治理难度大, 岩溶地质环境复杂, 灾害成因多样, 且生态环境脆弱, 治理后易复发, 需要长期投入和管护。

三、岩溶地区水工环地质灾害与生态环境的相互影响

岩溶地区水工环地质灾害与生态环境之间存在密切的相互作用关系, 地质灾害的发生会破坏生态环境, 而生态环境的退化又会加剧地质灾害的发生, 形成恶性循环, 严重制约区域可持续发展。明确二者的相互影响机制, 是开展生态修复综合治理的前提和基础。

水工环地质灾害对生态环境的破坏主要体现在三方面: 一是损毁地表植被, 加剧水土流失, 破坏生态平衡; 二是污染水资源, 影响水生生物生存, 减少生物多样性; 三是损毁土地资源, 导致土壤贫瘠, 制约农业和区域发展。广西岩溶峰丛山区因矿山开采引发塌陷和水土流失, 就曾出现植被大面积死亡、土地严重退化的现象。

生态环境退化会进一步加剧水工环地质灾害: 植被退化使岩土体失去根系固定, 抗冲刷、风化能力下降, 易引发水土流失和边坡失稳; 土壤退化无法有效涵养水源, 地下水补给减少、水位波动加剧, 诱发岩溶塌陷; 生态系统破坏导致水文循环失衡, 加剧旱涝灾害和各类地质灾害。云南岩溶地区因过度开垦、植被破坏, 就形成了“植被破坏—水土流失—地质灾害—生态退化”的恶性循环。

此外, 人类工程活动在二者的相互作用中起到了推波助澜的作用。水利工程建设、矿山开采、地下水开采等人类活动, 一方面直接扰动岩溶地质环境, 诱发水工环地质灾害; 另一方面, 这些活动会破坏植被、污染土壤和水资源, 导致生态环境退化, 进而加剧地质灾害的发生。因此, 要实现岩溶地区水工环地质灾害的有效防控和生态环境的持续改善, 必须打破二者的恶性循环, 构建“灾害防控—生态修复—长效管护”的良性互动机制。

四、岩溶地区水工环地质灾害生态修复综合治理方案

岩溶地区水工环地质灾害生态修复综合治理的核心目标是“防控灾害、修复生态、保障安全、促进发展”, 需坚持“勘察先行、分类施策、标本兼治、长效管护”的原则, 结合岩溶地区地质环境特征和灾害类型, 整合工程防控、生态修复、监测预警、管理保障等多种措施, 构建全方位、多层次的综合治理体系, 实现地质灾害防控与生态环境修复的协同推进。

勘察先行是岩溶地区水工环地质灾害综合治理的基础, 只有全面掌握地质环境条件和灾害特征, 才能制定针对性的治理措施。首先, 开展全面的水工环地质勘察, 采用遥感调查、水文与生态监测、实验测试等多种技术手段, 查明岩溶地区可溶性岩石分布、岩溶发育程度、地下水类型及补径排条件、岩土体性质等地质环境要素; 其次, 对地质灾害进行全面排查和风险评估, 明确灾害类型、分布范围、危害程度、诱发因素, 划分灾害风险等级, 建立地质灾害数据库, 为综合治理方案的制定提供科学依据; 最后, 结合水利工程建设、矿山开采等人类工程活动的实际情况, 分析人类活动对地质环境和生态系统的影响, 预判灾害发展趋势, 为治理措施的优化调整提供支撑。例如, 在广西岩溶峰丛山区, 研究团队通过“天—空—地”一体化调查手段, 查明受损区域的地质环境特征和灾害类型, 为生态修复方案的制定提供了精准数

据支撑。

分类施策是提升治理效果的关键,需针对不同灾害制定差异化措施。岩溶塌陷采用“防控结合”模式,轻度区域回填植被、中度区域注浆加固、重度区域避让整治,同时严控地下水开采稳定水位。边坡失稳采用削坡减载、锚杆支护等工程措施,搭配固土植被形成双重防护。地下水系统破坏需加强水资源管控、严控污染、保护地下河系统。水土流失采用工程与生物措施结合,修建梯田、截水沟减少冲刷,种植乡土植被提升植被覆盖率,恢复生态功能。

标本兼治要求既要解决当前的地质灾害问题,也要从根本上修复生态环境,打破灾害与生态退化的恶性循环。一方面,通过工程措施快速防控地质灾害,减少灾害造成的损失;另一方面,通过生态修复措施,恢复植被覆盖、改善土壤质量、修复水文循环,从根本上提升岩溶地区生态环境的稳定性和抗干扰能力,减少地质灾害的发生。例如,在矿山开采引发的地质灾害区域,首先通过注浆加固、场地整治等工程措施防控岩溶塌陷和边坡失稳,然后通过土壤改良、植被种植等生态措施,恢复地表植被和土壤肥力,改善生态环境,实现“治灾”与“治生态”的同步推进。同时,注重生态修复的可持续性,优先选用乡土树种、native 植被,避免引入外来物种,确保植被能够适应岩溶地区的地质环境,提高植被存活率;采用生态友好型工程措施,减少工程建设对生态环境的扰动,实现工程防控与生态修复的协同发展。

长效管护是保障综合治理效果的重要支撑,岩溶地区水工环地质灾害治理和生态修复是一项长期工程,需要建立完善的长效管护机制,确保治理措施落地见效、长期坚持。首先,建立健全管理责任制,明确地方政府、相关部门、企业的职责,将地质灾害防控和生态修复工作纳入绩效考核,形成“政府主导、部门协同、企业负责、公众参与”的管理体系;其次,加强监测预警体系建设,构建“天-空-地”一体化生态监测网络,对地质灾害、地下水水位、植被覆盖、土壤质量等进行实时监测,建立预警机制,及时发现灾害隐患,发出预警信息,采取防控措施;最后,加强宣传教育,提高公众对岩溶地区水工环地质灾害危害和生态保护重要性的认识,引导公众参与地质灾害防控和生态修复工作,形成

全社会共同参与的良好氛围。同时,建立生态修复成效评价体系,定期对治理区域的地质灾害防控效果、生态环境恢复情况进行评估,根据评估结果优化调整治理措施,确保综合治理工作持续推进、取得实效。

五、结论与展望

岩溶地区水工环地质灾害类型多样、特征鲜明,主要包括岩溶塌陷、边坡失稳、地下水系统破坏和水土流失,具有隐蔽性强、关联性高、治理难度大等共性特征,其发生与岩溶地质环境、水文动力条件、人类工程活动密切相关,且与生态环境形成恶性循环,严重制约区域经济社会与生态环境的协调发展。针对岩溶地区水工环地质灾害的特点和生态环境现状,本文提出的“勘察先行、分类施策、标本兼治、长效管护”的生态修复综合治理方案,通过工程防控、生态修复、监测预警、管理保障等多种措施的整合应用,能够有效防控地质灾害、修复生态环境,打破二者的恶性循环,实现地质灾害防控与生态环境修复的协同推进。

随着生态文明建设推进,岩溶地区灾害治理和生态修复面临更高要求。未来需深化地质环境与灾害的耦合机制研究,提升防控精准度;研发推广高效环保的生态修复技术,优化差异化治理模式;加强跨区域协同治理,整合资源共享技术;完善法律法规和政策体系,加大资金投入,确保长效管护落地。通过持续研究实践,逐步解决灾害问题,实现生态改善与区域可持续发展。

[参考文献]

[1]李娟,王浩,张磊.岩溶地区水工环地质灾害特征及防控对策[J].中国地质灾害与防治学报,2023,34(2):89-96.

[2]陈丽,赵阳,李建明.广西岩溶峰丛山区生态修复关键技术及应用[J].中国岩溶,2024,43(3):456-463.

[3]张强,刘敏,王丽.云南高原岩溶塌陷发育特征及生态修复综合治理研究[J].地质通报,2025,44(1):123-130.

作者简介:刘先强,1996年7月,汉族,籍贯云南云县,助理工程师;

岑宇坚,1995年8月,汉族,籍贯广西梧州,助理工程师。