

水工环地质条件下的矿山环境保护与生态修复技术研究

于素红

河南省地质局地质灾害防治中心 河南 郑州 450000

摘要：随着矿产开发加剧，矿山环境问题凸显。本文聚焦水工环地质条件下的矿山环境保护与生态修复技术。阐述了可持续发展、水土保持生态修复、生物多样性及循环经济等理论基础。详细介绍了地质环境监测、水资源保护与利用等矿山环境保护技术，以及地形整理与重塑、植被恢复等矿山生态修复技术。最后探讨了该领域智能化技术应用、多技术融合、注重碳汇功能提升及生态修复产业化等发展趋势，旨在为矿山环境保护与生态修复提供理论支持与技术参考，推动矿山可持续发展。

关键词：水工环地质；矿山环境；生态修复；可持续发展

引言：在矿业开发进程中，水工环地质条件对矿山环境产生着深远影响，矿山开采引发的地质灾害、水资源污染、土壤退化等问题日益凸显，严重威胁着区域生态环境与可持续发展。矿山环境保护与生态修复成为亟待解决的关键课题。水工环地质条件下的矿山环境复杂多变，涉及地质、水文、生态等多方面因素，其保护与修复工作需综合运用多学科理论与技术。深入研究相关技术，不仅有助于减轻矿山开采对环境的破坏，还能促进生态系统的恢复与重建，实现资源开发与环境保护的协调共进，具有重要的现实意义。

1 水工环地质条件下矿山环境保护与生态修复的理论基础

1.1 可持续发展理论

可持续发展理论涵盖可持续经济、生态与社会三方面，强调人类发展需兼顾经济效率、生态和谐与社会公平。在水工环地质条件下的矿山环境中，该理论要求矿山开发不能以牺牲环境为代价，需平衡资源利用与生态保护。例如，通过合理规划开采规模与方式，避免过度开采引发地质灾害与生态破坏，同时注重矿山废弃物的综合利用，实现资源的高效循环，为矿山区域的长期稳定发展提供保障，推动经济、社会与环境的协调共进。

1.2 水土保持生态修复理论

水土保持生态修复理论基于生态系统自我修复能力。在水土流失的矿山区域，通过人工辅助措施，如封山禁牧、退耕还林（草）等，减少外界干扰，激发自然界固有的再生力量，促进植被持续生长与演替。例如，在矿山边坡种植耐旱、耐瘠薄的先锋植物，逐步改善土壤条件，增强土壤保水保肥能力，恢复受损生态系统的功能，建立与自然条件相适应、经济社会可持续发展相协调的良性生态系统，有效防治水土流失。

1.3 生物多样性理论

生物多样性包括遗传、物种、生态系统与景观多样性，是生态系统稳定与服务功能的基础。在水工环地质条件下的矿山生态修复中，保护生物多样性至关重要。丰富的生物种类能增强生态系统的抵抗力和稳定性，提高其生产力。例如，修复后的矿山生态系统，多种植物为动物提供栖息地，微生物参与土壤养分循环，共同维持生态平衡。通过植被恢复、保护自然生境等措施，保护生物多样性，可实现生态系统的多重功能，为人类提供生态、经济和文化服务，促进矿山可持续发展^[1]。

2 水工环地质条件下的矿山环境保护技术

2.1 地质环境监测技术

地质环境监测技术是矿山环境保护的“耳目”，通过多手段、多参数实时追踪地质环境动态。综合运用卫星遥感、无人机航测与地面传感器网络，构建“空天地”一体化监测体系，精准获取地形地貌、岩土体位移、地下水位等数据。采用高精度GPS与InSAR技术监测地表沉降与边坡变形，结合地质雷达探测地下空洞隐患；通过布设地下水监测井，定期分析水质指标（如pH、重金属含量），评估污染扩散趋势。数据传输依托物联网技术实现实时回传，经GIS平台处理后生成可视化风险图谱，为灾害预警与决策提供科学依据。监测频率根据地质条件动态调整，对重点区域实施24小时连续监测，确保及时发现潜在风险。技术核心在于“全覆盖、高精度、智能化”，通过长期数据积累构建地质环境演变模型，为矿山可持续发展提供基础支撑。

2.2 水资源保护与利用技术

水资源保护与利用技术聚焦矿山开采全流程的水资源高效管理。针对矿井水，采用“清污分流+分质处理”模式：源头通过保水开采工艺减少地下水渗入，井下设

置截流沟实现污水与清水分流；含悬浮物矿井水经沉淀、过滤后回用于防尘洒水，高盐矿井水通过反渗透脱盐处理后用于工业冷却，实现近零排放。地表水保护方面，构建人工湿地与生态拦截沟，利用植物吸附与微生物降解净化径流中的重金属与酸性物质，恢复区域水文循环。雨水收集系统通过集水槽与储水池储存降水，经简单处理后用于绿化灌溉，缓解矿山用水压力。技术关键在于“源头减量、过程控制、末端循环”，通过水资源梯级利用与生态修复协同，实现开采活动与水环境承载力的动态平衡。

2.3 土壤污染防治技术

土壤污染防治技术以“阻断迁移、降低毒性、恢复肥力”为目标，构建多层次防控体系。源头防控通过封闭矿坑、尾矿库防渗处理（如铺设HDPE膜）减少污染物下渗；过程阻断采用化学稳定化技术，向污染土壤中添加石灰、磷酸盐等抑制剂，使重金属转化为难溶态，降低生物有效性。末端修复结合生物与工程手段：植物修复选用超积累植物（如蜈蚣草）吸收重金属，微生物修复投加功能菌株分解有机污染物或转化重金属形态；工程措施包括客土置换与深翻耕，快速降低表层污染负荷。修复后需添加有机肥与微生物菌剂改善土壤结构，为植被重建提供条件。技术选择需要综合污染类型、土壤性质与修复周期，优先采用环境友好型方案，实现污染治理与生态功能恢复的双重目标。

2.4 地质灾害防治技术

地质灾害防治技术遵循“预防为主、综合治理”原则，构建“监测-预警-工程-生态”四位一体防控体系。监测预警依托高精度GPS、裂缝计等设备实时监测岩土体位移，结合数值模拟模型评估灾害风险等级，通过短信、APP等多渠道发布预警信息。工程治理针对不同灾害类型采取差异化措施：滑坡防治采用抗滑桩、挡土墙等支挡结构，结合地下排水系统降低孔隙水压力；泥石流防治构建拦砂坝与排导槽，控制泥石流规模与流向；地面沉降通过注浆加固与回填充复恢复地层稳定性。生态修复结合植被恢复与土壤生物工程，种植深根植物固土，铺设三维植被网增强坡面稳定性，逐步恢复生态系统服务功能。技术实施需要兼顾短期安全与长期效益，通过动态调整治理方案，实现灾害风险可控与生态功能持续提升^[2]。

3 水工环地质条件下的矿山生态修复技术

3.1 地形整理与重塑技术

地形整理与重塑技术是矿山生态修复的基础环节，旨在恢复因开采活动破坏的地形地貌，为后续生态重建

提供稳定载体。技术核心包括：通过地质调查与三维测绘，明确场地高程、坡度及地质结构特征，结合生态修复目标制定科学规划；针对采空区塌陷地，采用分层回填与压实技术，利用矿渣、建筑废料等材料填充空洞，形成稳定基底；对陡坡边坡实施削坡减载、阶梯式开挖，降低坡度并增强稳定性；重塑过程中同步构建排水系统，通过设置截洪沟、排水盲沟等工程，防止水土流失与二次灾害。技术实施需兼顾地形稳定性与景观协调性，采用生态护坡材料（如三维植被网、土工格室）增强坡面抗侵蚀能力，最终形成与自然地貌相融合的修复效果，为植被生长与生态系统恢复奠定空间基础。

3.2 植被恢复技术

植被恢复技术通过重建植物群落恢复矿山生态系统功能，关键在于筛选适配物种与优化配置模式。针对重金属污染土壤，优先选用超积累植物（如蜈蚣草、遏蓝菜）与耐性植物（如狗牙根、紫穗槐）组合种植，利用植物吸收、固定重金属，降低土壤毒性；对贫瘠土壤，采用客土置换与土壤改良技术，添加有机肥、生物炭等材料提升肥力，再种植先锋物种（如黑麦草、沙打旺）快速覆盖地表，防止水土流失。恢复过程中注重乔灌草立体搭配，形成稳定群落结构，增强生态系统抵抗力；同时结合保水剂、覆盖物等辅助措施，提高植物成活率与生长速度。技术实施需分阶段推进，从短期快速覆盖到长期群落演替，逐步实现生态系统的自我维持与功能提升。

3.3 微生物-植物联合修复技术

微生物-植物联合修复技术整合微生物降解与植物修复优势，形成协同增效的污染治理体系。微生物通过分泌有机酸、酶等物质活化土壤中难溶性重金属，降低其生物有效性；部分功能菌株（如硫酸盐还原菌、铁还原菌）可参与重金属形态转化，减少迁移风险。植物则通过根系吸收、固定重金属，并通过蒸腾作用促进污染物在土壤-植物系统中的迁移。联合修复中，微生物与植物形成共生关系：微生物改善土壤环境，增强植物抗逆性；植物根系为微生物提供栖息场所与碳源，促进其繁殖。技术实施需筛选适配的微生物-植物组合，如搭配耐重金属植物与解磷菌、固氮菌，通过接种菌剂与种子包衣技术实现同步定殖；结合生物炭、腐殖酸等载体材料，可提高微生物存活率与修复效率，适用于大面积中低度污染土壤的修复。

3.4 碳汇计量与生态修复结合技术

碳汇计量与生态修复结合技术将碳增汇目标融入矿山生态修复全过程，通过量化生态系统碳汇能力优化修

复方案。技术首先构建碳汇计量体系，通过样地调查与模型模拟，测算修复前后的植被生物量、土壤有机碳含量等参数，结合遥感与GIS技术实现区域尺度碳汇动态监测；修复设计中优先选择高碳汇树种（如刺槐、侧柏）与固碳能力强的草本植物，通过乔灌木立体配置提升单位面积碳储量；同步实施土壤改良措施（如添加生物炭、秸秆还田），增强土壤碳封存能力。技术实施需建立碳汇交易衔接机制，将修复产生的碳汇量转化为经济收益，形成“生态修复-碳汇增值-资金反哺”的良性循环；长期监测数据可修正碳汇模型，提高计量精度，为矿山生态修复的碳汇功能评估与政策制定提供科学依据。

3.5 三维地质建模辅助修复技术

三维地质建模辅助修复技术利用计算机图形学与地质统计学方法，构建矿山区域高精度三维地质模型，为生态修复提供空间分析与决策支持。技术通过整合钻孔数据、地质测绘、遥感影像等多源信息，可视化呈现地层结构、岩土体分布、地下水流向等关键要素，精准定位污染源与地质灾害隐患点；模型可模拟修复措施（如地形重塑、植被配置）对地质环境的影响，优化设计方案：例如，通过模拟不同回填材料的压实效果选择最优方案，或预测植被根系对边坡稳定性的增强作用调整种植密度。此外，模型支持动态更新，结合实时监测数据修正参数，实现修复过程的精准管控；开发用户友好的交互平台，便于技术人员直观理解地质条件与修复效果，提升修复工程的科学性与效率^[3]。

4 水工环地质条件下矿山环境保护与生态修复的发展趋势

4.1 智能化技术应用

智能化技术正深度融入矿山环境保护与生态修复全流程。借助物联网、大数据与人工智能，构建“感知-分析-决策”一体化系统：传感器网络实时采集地质、水文、生态数据，通过机器学习模型预测污染扩散趋势与地质灾害风险，动态优化修复方案。无人机与卫星遥感实现大范围、高频次监测，结合三维建模技术可视化修复效果，提升管理效率。智能装备（如自动喷播机、无人植保机）的应用，降低了人工成本，提高了修复精度与施工安全性。未来，智能化将推动矿山生态修复向精准化、自主化方向演进。

4.2 多技术融合发展

矿山生态修复需突破单一技术局限，形成“地质-水利-生态-工程”协同体系。地质调查与数值模拟结合，明确污染源分布与地质结构特征；水文技术（如人工湿地、生态拦截沟）与生物修复（微生物-植物联合）联动，实现水-土协同治理；工程措施（如抗滑桩、挡土墙）与生态护坡融合，兼顾稳定性与生态功能。此外，碳汇计量技术通过量化生态系统固碳能力，为修复效果评估提供新维度。多技术融合将提升修复系统的整体效能与可持续性。

4.3 生态修复产业化发展

矿山生态修复正从政府主导转向市场化、产业化运作。通过政策引导与资金扶持，吸引社会资本参与修复项目，形成“投资-建设-运营”一体化模式。探索“生态修复+产业开发”路径，如结合土地复垦发展现代农业、林业或生态旅游，实现修复成本与经济效益的平衡。同时，完善技术标准与评估体系，推动修复技术成果转化与规模化应用，培育专业化修复企业与服务市场。产业化发展将提升修复效率，降低社会成本，形成可持续的矿山生态治理生态圈^[4]。

结束语

在水工环地质复杂条件下，矿山环境保护与生态修复技术已成为协调资源开发与生态安全的关键支撑。通过地质环境监测、水资源保护、土壤污染防控及地质灾害治理等技术的集成应用，可有效降低开采活动对生态系统的扰动；而地形重塑、植被恢复、微生物-植物联合修复等生态工程手段，则为受损环境重建了自我维持能力。未来，随着智能化监测、多技术融合及碳汇功能提升等方向的深化探索，矿山生态修复将迈向精准化、可持续化新阶段，为全球矿产资源开发与生态保护协同发展提供中国方案与技术范式。

参考文献

- [1]陈宇翔.矿山地质环境治理策略与土地复垦技术探讨[J].环境工程学报,2022(6):88-92.
- [2]赵婉如.矿山环境地质灾害防治与生态保护治理研究[J].矿业安全与环保,2023(1):55-59.
- [3]陈晓蕾.矿山可持续发展策略与环境保护体系的构建[J].资源开发与市场,2022(3):77-81.
- [4]郭雅婷.废弃矿山生态修复技术实践与案例分析[J].地质通报,2023(2):99-104.