

干旱区矿山水文地质循环重构对生态恢复的驱动机制研究

王利军

中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘察院 河北 邯郸 056004

摘要: 干旱区矿山开采破坏水文地质循环, 引发水质污染、生态风险等问题。本文剖析矿山开采对水文地质结构的破坏特征及水质污染风险, 阐述地下水补给优化、盐分平衡调控、土壤结构改良等重构路径与技术体系, 分析其对植被恢复、土壤碳氮磷循环、微生物群落演替的驱动效应, 并以新疆准东露天矿区为例验证。结果表明, 综合修复措施可恢复水文地质循环, 提升生态质量, 为干旱区矿区生态修复提供范例。

关键词: 干旱区; 矿山; 水文地质循环重构; 生态恢复; 驱动机制

引言: 干旱区水资源匮乏、生态环境脆弱, 矿山开采活动对其水文地质循环造成严重破坏, 引发地下水位下降、水质污染、土壤退化等一系列生态问题, 阻碍区域可持续发展。水文地质循环作为连接水、土壤、植被等生态要素的关键纽带, 其重构对生态恢复至关重要。研究干旱区矿山水文地质循环重构对生态恢复的驱动机制, 有助于揭示生态修复内在规律, 为干旱区矿区生态保护与修复提供理论依据和实践指导。

1 矿山开采对水文地质循环的破坏特征

1.1 水文地质结构破坏

矿山开采过程中, 无论是露天开采的剥离作业还是地下开采的巷道掘进, 都会对区域原有水文地质结构造成不可逆的破坏, 打破水文地质循环的稳定性。露天开采会直接剥离地表土层、风化岩层及含水层, 导致地下水隔水层、透水层连续性中断, 地下水径流通道被切断, 形成区域性地下水位下降漏斗, 使原本连贯的含水层碎片化、孤立化。地下开采则会引发岩层移动、顶板垮落, 形成大面积采空区, 采空区上方岩层产生裂隙, 不仅加速地下水的渗透流失, 还会改变地下水的补给、径流、排泄路径^[1]。另外, 开采过程中废渣堆放、采场开挖还会破坏地表径流系统, 导致地表汇流方向改变, 地表水与地下水的水力联系减弱, 部分区域出现地下水疏干、地表干涸等现象, 进一步加剧水文地质结构的紊乱, 破坏原有水文循环的动态平衡。

1.2 水质污染与生态风险

作者简介: 王利军, 1976年4月, 男, 汉族, 河北邯郸人, 本科学历, 高级工程师, 现任职中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘察院, 职务: 副院长, 主要研究方向为: 水文地质、工程地质、环境地质等领域。邮箱: wlj760418@163.com。

矿山开采活动会产生大量污染物, 引发区域水质污染, 进而带来一系列生态风险, 破坏水文地质循环的洁净性和生态承载能力。开采过程中产生的煤矸石、尾矿等固体废弃物, 经雨水淋溶后, 会将其中的重金属、硫化物、可溶性盐类等有害物质带入地表水和地下水, 导致水体pH值异常、重金属含量超标, 破坏水体原有化学平衡。同时, 地下开采疏干排水会将地下深层含高盐、高矿化度的水体带到地表, 与浅层淡水混合后, 降低水资源利用价值, 还会污染周边土壤。水质污染不仅会影响周边居民的饮用水安全, 还会导致水生生物死亡、植被枯萎, 破坏陆地和水生生态系统的完整性。污染水体的渗透会进一步加剧土壤盐碱化、退化, 形成“水质污染—土壤退化—生态破坏”的恶性循环, 对区域生态环境造成长期且难以修复的风险。

2 水文地质循环重构的关键路径与技术体系

2.1 地下水补给优化

地下水补给优化是水文地质循环重构的核心路径, 核心是通过人工干预与自然修复相结合的技术手段, 恢复地下水储量、重构地下水补给体系, 弥补矿山开采造成的地下水疏干损失。首先, 针对露天采场、地下采空区等关键区域, 采用植被覆盖、边坡固化等措施, 减少地表径流流失, 增加降水入渗量, 强化自然补给。其次, 推广人工补给技术, 如修建地下水回灌井、渗滤池, 将处理达标后的矿井水、地表水回灌至地下含水层, 定向补充地下水, 遏制地下水位下降漏斗扩大。同时, 优化区域水资源调配, 合理划定地下水开采禁区, 控制周边工农业地下水开采量, 保障地下水补给与排泄的动态平衡。通过修建截排水系统, 拦截地表污染物径流, 防止污染水体渗入地下, 确保地下水补给的洁净性, 为水文地质循环重构奠定基础^[2]。

2.2 盐分平衡调控

盐分平衡调控是水文地质循环重构的关键环节，主要解决矿山开采引发的水体与土壤盐分失衡问题，避免盐分累积对水文循环和生态环境造成进一步破坏。矿山开采过程中，地下高矿化度水体疏干、废渣淋溶等会导致地表水体、土壤盐分含量升高，打破区域原有盐分平衡，引发土壤盐碱化、水体矿化度超标等问题。调控过程中，首先采用物理调控技术，如修建排盐沟、淋溶洗盐设施，通过淋溶、排水等方式，将土壤和水体中过量的可溶性盐类排出，降低盐分含量。其次，结合化学调控手段，施加改良剂，吸附土壤中游离盐分，促进盐分沉淀，减少盐分向水体迁移。同时利用生物调控技术，种植耐盐植被，通过植被蒸腾、吸收作用，调节土壤水分与盐分分布，降低土壤表层盐分累积。另外，建立盐分监测体系，实时跟踪水体、土壤盐分含量变化，动态调整调控措施，实现区域盐分收支平衡，保障水文地质循环的稳定性。

2.3 土壤结构改良

土壤结构改良在水文地质循环重构中扮演着不可或缺的重要支撑角色，其核心任务在于修复矿山开采所引发的土壤退化问题，全力恢复土壤的保水、保肥以及渗透能力，进而构建起“土壤—水体—植被”协同运作的水文循环载体。矿山开采活动犹如一场生态灾难，它会导致土壤被剥离、压实，还会带来严重的污染。这一系列破坏使得土壤孔隙度大幅减小，透气性变得极差，保水性也显著下降。更为严重的是，它破坏了土壤与地下水、地表水之间原本紧密的水力联系，让水文循环无法正常进行。在改良过程中，需多管齐下。先要彻底清理土壤中的废渣和污染物，将土地平整好，打破那层坚硬的压实层，以此增加土壤孔隙度。接着，施加有机肥、腐殖质等改良材料，改善土壤的理化性质，提升其保水保肥能力，促进土壤微生物活性的恢复。对于重度退化的土壤，则采用客土置换、土壤重构等技术，补充优质土壤，恢复土壤的剖面结构。另外，结合植被种植也至关重要，植被根系能像“锚”一样固定土壤，改善土壤的通气性和透水性，促进降水入渗和地下水蒸发蒸腾，打通土壤与水文循环的连接通道，为水文地质循环重构筑牢坚实的土壤基础。

3 水文地质循环对生态恢复的驱动效应

3.1 对植被恢复的驱动

水文地质循环的有效重构是促进矿区植被恢复的核心驱动因素之一。植被作为连接水文循环与生态环境的关键纽带，其生长态势紧密依赖于水文地质条件的改善状况。在矿山开采后，原本稳定的水文地质循环遭到破

坏，地下水位下降、地表径流紊乱，土壤水分严重不足，导致植被因缺水而枯萎死亡。而当实施水文地质循环重构措施后，地下水位逐步回升，地表径流量趋于稳定，土壤水分含量得以维持在适宜植被生长的范围。这就如同为植被种子萌发和根系生长提供了充足的水分“粮仓”，有效解决了矿山开采后植被因缺水而难以存活的关键问题。同时，重构后的水文循环就像一个高效的养分运输系统，能够携带土壤中的各类养分，精准定向地供给植被生长所需，极大地改善了植被生长的营养环境，使得植被的存活率和生长速率显著提升^[3]。水文地质条件的改善还会对区域微气候产生积极影响，增加空气湿度，减少地表蒸发，为植被生长营造出适宜的气候条件，促进草本、灌木等植被逐步恢复，最终形成稳定的植被群落。而植被恢复后，又会通过根系固土、截留降水等方式，进一步巩固水文地质循环的成果，减少水土流失，形成“水文循环改善—植被恢复—水文循环稳定”的良性循环。

3.2 对土壤碳氮磷循环的驱动

水文地质循环重构对于矿区土壤碳氮磷循环的恢复与稳定起着至关重要的驱动作用。土壤碳氮磷循环作为生态系统物质循环的核心环节，其运转效率高度依赖于稳定的水文条件。在矿山开采过程中，由于水文循环被严重扰乱，土壤碳氮磷的迁移与转化过程被中断，大量养分随之流失，导致土壤变得贫瘠不堪。然而，当水文地质循环得到改善后，稳定的土壤水分就如同为土壤微生物注入了“活力剂”，能够显著促进土壤微生物活性的提升。微生物通过分解土壤中的有机质，释放出碳、氮、磷等丰富的营养元素，为植被的生长提供了充足的养分支持，同时也促进了养分在土壤剖面中的合理分布。地表径流与地下水的良性循环，就像一个养分调配的“大管家”，能够携带养分在区域内进行迁移，有效弥补局部土壤养分不足的问题，实现养分的均衡分配。而且，稳定的水文条件还能减少土壤侵蚀现象的发生，降低碳氮磷养分的流失量，促进土壤有机质的累积，提升土壤肥力，推动土壤碳氮磷循环逐渐趋于稳定，为整个生态系统的恢复提供了坚实的物质支撑。

3.3 对微生物群落演替的驱动

水文地质循环重构是驱动矿区土壤微生物群落演替的关键因素。微生物群落作为土壤生态系统的核心组成部分，其群落结构与功能直接受到水文条件的深刻影响。在矿山开采活动中，地下水疏干、水质污染等问题频发，导致土壤微生物的生存环境急剧恶化。原本具有优势的微生物群落逐渐消失，微生物多样性大幅降低，进而严重影响土壤的物质转化、养分循环等重要功能。但是，当

水文地质循环得到改善后,稳定的土壤水分和适宜的水质条件就如同为微生物打造了一个舒适的“家园”,能够为微生物提供良好的生存环境,有力地促进微生物群落的恢复与演替。随着水分条件的不断优化,那些耐干旱、耐污染的微生物逐渐被适宜正常水文条件的有益微生物所替代,微生物群落的多样性不断增加,群落结构也趋于复杂稳定。同时,水文循环携带的丰富养分能够为微生物生长提供充足的“食物”,促进微生物的繁殖,提升微生物的活性。这不仅增强了微生物对土壤污染物的降解能力,还提高了其对养分的转化能力,推动微生物群落朝着有利于生态恢复的方向不断演替,为矿区生态系统的稳定奠定了坚实的微生物基础。

4 案例验证:新疆准东露天矿区生态修复实践

4.1 研究区概况

新疆准东露天矿区位于新疆昌吉回族自治州准东经济技术开发区,地处欧亚大陆腹地,属于典型的温带大陆性干旱气候,降水稀少、蒸发强烈,年平均降水量不足150mm,年平均蒸发量超过2000mm,区域水资源匮乏,水文地质条件复杂。该矿区是我国重要的煤炭生产基地,露天开采规模大、开采年限长,长期的开采活动对区域水文地质循环造成了严重破坏,出现地下水位下降、地表干涸、土壤盐碱化、植被退化等问题,生态环境脆弱。研究区地势较为平坦,地表主要为戈壁荒漠植被,土壤类型以灰漠土、棕钙土为主,土壤贫瘠、保水性差。矿区地下水主要为潜水和承压水,含水层厚度不均,开采后形成了大面积地下水位下降漏斗,部分区域地下水疏干,地表水与地下水水力联系基本中断,水质也受到一定程度的污染,为生态修复带来了巨大挑战,是研究矿山水文地质循环重构与生态修复的典型区域。

4.2 修复措施与效果

针对新疆准东露天矿区水文地质破坏与生态退化问

题,结合区域干旱少雨的气候特点,构建了“水文地质循环重构+生态修复”的综合修复体系,实施了一系列针对性修复措施,取得了显著成效。在地下水补给优化方面,修建地下水回灌系统,将处理达标后的矿井水回灌至地下含水层,同时种植耐旱植被,增加降水入渗量,有效遏制了地下水位下降趋势,地下水位平均回升0.8-1.2m。在盐分平衡调控方面,修建排盐沟、淋浴设施,施加土壤改良剂,降低土壤与水体盐分含量,区域土壤含盐量平均下降30%以上,水体矿化度恢复至适宜范围。在土壤结构改良方面,清理矿区废渣,平整土地,施加有机肥与客土置换,改善土壤理化性质,土壤孔隙度提升15%-20%,保水保肥能力显著增强。通过以上措施,矿区水文地质循环逐渐恢复稳定,植被覆盖率从修复前的不足5%提升至35%以上,土壤碳氮磷循环趋于稳定,微生物多样性显著增加,实现了“水文修复—生态改善”的良性循环,为干旱半干旱地区露天矿区生态修复提供了可行的实践范例。

结束语

干旱区矿山水文地质循环重构对生态恢复意义重大。通过地下水补给优化、盐分平衡调控、土壤结构改良等措施,可有效恢复水文地质循环,驱动植被恢复、土壤碳氮磷循环稳定及微生物群落良性演替。新疆准东露天矿区的实践验证了综合修复体系的可行性。未来需进一步加强相关研究,完善技术体系,以应对不同干旱区矿区的复杂情况,推动干旱区矿山生态修复事业持续发展。

参考文献

- [1]代万庆.杨树沟锰矿地质水文孔应用气举反循环进行抽水试验的实践[J].中国锰业,2022,40(3):104-109,116.
- [2]刘瑞.水文地质因素对矿山地质的影响及对策初探[J].中国金属通报,2023(9):225-227.
- [3]王忠禹,佟智强,宋立东,等.延边地区矿山“地质-生态”修复模式研究[J].中国矿业,2025,34(z2):110-113.