

矿山废弃地生态修复过程中的水土保持机制与优化方案

叶子嘉

青田县水利局

DOI:10.32629/etd.v7i1.22203

[摘要] 矿山开采造成大量废弃地,植被破坏与土壤结构退化引发严重水土流失,成为区域生态安全的重要威胁。本文系统分析了矿山废弃地水土流失的驱动机制,揭示了植被缺失、土壤物理性质恶化、地表径流系数升高的链式效应。在此基础上,从工程措施、植物措施和土壤改良三个维度阐述了生态修复过程中的水土保持协同机制,提出“地形重塑—基质改良—植被恢复—稳定维持”四阶段优化方案。研究表明,综合配置截排水工程与乡土植物群落可显著降低土壤侵蚀模数。研究成果为矿山废弃地生态修复提供理论依据与技术支撑。

[关键词] 矿山废弃地; 生态修复; 水土保持; 土壤改良; 植被恢复

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A

Soil and Water Conservation Mechanisms and Optimization Strategies in the Ecological Restoration of Abandoned Mine Lands

Zijia Ye

Qingtian County Water Resources Bureau

[Abstract] Mining activities have resulted in large areas of abandoned land. Vegetation destruction and soil structure degradation have caused severe soil erosion, posing a significant threat to regional ecological security. This study systematically analyzes the driving mechanisms of soil erosion on abandoned mine lands and reveals the chain effects of vegetation loss, deterioration of soil physical properties, and increased surface runoff coefficients. On this basis, the synergistic mechanisms of soil and water conservation during the ecological restoration process are examined from three dimensions: engineering measures, vegetation measures, and soil improvement. A four-stage optimization scheme of “terrain reshaping—substrate improvement—vegetation restoration—stable maintenance” is proposed. The results show that the integrated application of drainage and water-diversion engineering and native plant communities can significantly reduce the soil erosion modulus. The research findings provide a theoretical basis and technical support for the ecological restoration of abandoned mine lands.

[Key words] abandoned mine lands; ecological restoration; soil and water conservation; soil improvement; vegetation restoration

引言

矿产资源开发在支撑经济社会发展的同时,也造成了严重的生态环境问题。我国矿山废弃地面积已超过400万公顷,且以每年数万公顷的速度递增。露天开采剥离表土、排土场压占土地、尾矿库堆存废弃物,导致原生植被被彻底破坏,土壤结构严重退化,水土流失强度远超自然生态系统。矿山废弃地具有坡度大、土壤贫瘠、重金属含量高等特点,传统水土保持措施直接套用效果不佳。当前研究多聚焦于单一技术环节,缺乏对修复过程中水、土、植三者协同机制的整合分析。本文旨在揭示矿山废弃地水土流失的成因机制,构建多措施协同的水土保持

技术体系,提出分阶段优化方案,为矿山生态修复提供系统化解决方案。

1 矿山废弃地水土流失特征与驱动机制

1.1 矿山废弃地类型与水土流失特征

矿山废弃地按成因可分为排土场、尾矿库、采坑边坡和工业场地四类。排土场由剥离岩土堆筑而成,结构松散,孔隙率高达30%至45%,抗蚀性极差。尾矿库储存选矿尾砂,颗粒细小且常含残留药剂,遇水易形成流泥。采坑边坡坡度陡峭,岩体破碎,风化裂隙发育,为水土流失提供了物质基础。工业场地经过压实硬化,地表径流系数高,汇水集中。不同类型废弃地的水土流失

特征存在差异:排土场以沟蚀和面蚀为主,侵蚀模数可达每年每平方公里1万至3万吨;尾矿库以风蚀和细沟侵蚀为主,且存在溃坝风险;采坑边坡以重力侵蚀和坡面冲刷为主,易发生滑塌。识别不同类型废弃地的流失特征是制定针对性措施的前提^[1]。

1.2 水土流失的驱动机制

矿山废弃地水土流失是自然因素与人为扰动叠加的结果。从植被因素看,原生植被被彻底清除,地表裸露,失去了植物截留降雨和根系固土的保护作用。植被覆盖率低于15%时,土壤流失量较覆盖率达到70%时增加5至8倍。从土壤因素看,机械压实与爆破扰动破坏了土壤团聚体结构,容重增至每立方厘米1.6至1.9克,入渗速率下降至自然土壤的30%至50%,地表径流系数由0.1升至0.5以上。从地形因素看,排土场边坡角度常在35至45度之间,超过自然休止角,为径流加速和沟蚀发育提供了动力条件。从降雨因素看,短历时高强度暴雨是诱发严重水土流失的直接驱动力。四个因素相互耦合,形成“植被缺失—土壤退化—径流增加—侵蚀加剧”的恶性循环。

1.3 生态修复对水土流失的调控机理

生态修复通过重建植被系统和恢复土壤功能,从源头上遏制水土流失。植被的地上部分通过冠层截留、茎干阻滞和枯落物覆盖,削弱降雨动能,减少溅蚀。研究表明,乔灌草复合群落的降雨截留率可达25%至40%。植被的地下根系通过穿插缠绕作用提高土壤抗剪强度,根土复合体的抗冲性较素土提高1.5至3倍。土壤有机质含量随植被恢复而增加,促进团聚体形成,改善入渗性能。当植被覆盖率超过60%时,坡面径流系数可降至0.2以下。此外,生态修复通过增加地表粗糙度、延长汇流路径,降低了径流流速和输沙能力。因此,生态修复的本质是以生物措施驱动土壤—植被系统正向演替,重建水土保持功能。

2 水土保持协同机制分析

2.1 工程措施与植物措施的协同

工程措施为植物措施创造基础条件,植物措施巩固工程措施的效果。截排水沟、挡土墙、谷坊等工程构筑物能够调控坡面水文过程,削减洪峰流量,减少冲刷。工程措施使边坡稳定系数从1.05提升至1.30以上,为植物生长提供了安全环境。植物措施通过根系锚固和加筋作用,提高了工程结构的整体稳定性。例如,在挡土墙后种植深根性灌木,根系伸入墙后填土,增强了墙体的抗倾覆能力。研究表明,工程与植物联合措施的拦沙效率较单一工程措施提高20%至35%。两者的协同还体现在施工时序上:先实施工程构筑物控制大尺度地形,后进行植被恢复细化微地形。工程措施提供的是“刚性防护”,植物措施提供的是“柔性防护”,刚柔结合构成了多层次水土保持体系。

2.2 土壤改良与植被恢复的协同

矿山废弃地土壤普遍存在养分匮乏、结构不良、酸碱失衡等问题,直接种植植物难以成活,必须先进行土壤改良。施加有机肥、绿肥或生物炭可快速提升土壤有机质含量,改善团聚体结构,增加入渗能力^[2]。研究显示,每公顷施用30吨有机肥后,土壤容重降低12%至18%,饱和导水率提高2至3倍。土壤改良为植被恢

复提供了适宜的立地条件,而植被恢复反过来促进土壤进一步改良。植物枯落物分解增加土壤有机质,根系分泌物促进微生物活性,根系的穿插作用改善土壤孔隙结构。这种正反馈机制驱动土壤质量持续提升。建议采用“先改良后恢复、边恢复边改良”的策略,在种植穴内进行局部改良以降低工程量,随着植被生长逐步扩大改良范围。

2.3 水文调控与减蚀效应的协同

水文调控是矿山废弃地水土保持的核心环节。坡面水文过程包括降雨截留、地表填洼、入渗、径流形成与汇流等环节。通过微地形改造(鱼鳞坑、水平阶、反坡梯田)增加地表粗糙度,延长径流停留时间,促进入渗。鱼鳞坑可使坡面径流系数从0.55降至0.30,径流流速降低40%至60%。截排水沟系统将坡面径流分级拦截、有序疏导,避免径流集中冲刷。植草沟兼具排水与过滤功能,可沉淀泥沙70%以上。水文调控措施与减蚀效应之间存在定量关系:径流流速降低50%,输沙能力降低约85%;径流深减少30%,土壤流失量减少约50%。因此,通过水文调控削减径流动能和径流量,是实现水土保持的根本途径。

2.4 时间尺度上的协同演进

水土保持效果随修复时间呈动态变化。修复初期(0至2年),工程措施主导,植物措施尚未发挥显著作用,水土流失仍较严重。修复中期(3至5年),植物进入快速生长期,植被覆盖度达到50%以上,根系网络初步形成,水土流失量显著下降,较初期减少60%至80%。修复后期(5年以上),植被群落趋于稳定,枯落物层积累形成,土壤有机质含量恢复至自然土壤的70%以上,水土保持功能基本达到自我维持状态。不同阶段的措施配置应各有侧重:初期以工程措施和土壤改良为主,中期以植物配置和抚育管理为主,后期以监测维护和群落调控为主。理解这一时间演替规律,有助于合理安排修复时序和资源配置^[3]。

3 生态修复过程中水土保持优化方案

3.1 地形重塑与微地形改造

地形重塑是矿山废弃地生态修复的基础工序。对于排土场,应按“逐层压实、边坡放缓”原则进行整形,最终边坡角控制在25度以下,平台宽度不小于5米,形成“台阶式”地形。台阶内侧设置排水沟,防止坡面径流直接冲刷。对于采坑边坡,应清除危岩、削坡减载,坡面整理为鱼鳞状或锯齿状,增加微地形起伏。微地形改造技术包括鱼鳞坑、水平阶、反坡梯田和生态袋挡坎等。鱼鳞坑适用于坡度25至35度的坡面,坑间距1.5至2米,品字形布置,单坑容积0.2至0.5立方米。水平阶适用于坡度15至25度的坡面,阶面宽度1.5至3米,反坡坡度5至8度。反坡梯田适用于土质边坡,田面宽2至4米,反坡3至5度,可有效拦蓄径流。地形重塑的目标是将坡长控制在50米以内,坡度控制在25度以下,径流路径长度缩短40%以上。

3.2 截排水系统优化设计

截排水系统应遵循“高水高排、低水低排、分级拦截、就近入渗”的原则。坡顶设置截水沟,拦截坡上来水,设计标准按20年一遇24小时最大降雨量确定。截水沟断面采用梯形或矩形,

底宽0.4至0.6米,深0.5至0.8米,砌石或混凝土衬砌。坡面设置纵向排水沟,间距40至60米,与截水沟和平台排水沟连通。平台内侧设置横向排水沟,坡度不小于0.5%。在沟道出口或侵蚀沟头位置设置消力池或谷坊,消减径流能量。对于坡度较缓的坡面,可采用植草排水沟替代混凝土衬砌沟道,植草沟宽1至1.5米,深0.3至0.5米,沟底种植耐淹禾草,兼具排水与过滤功能^[4]。截排水系统应留有溢流通道,防止超标准降雨导致系统失效。优化后的截排水系统可拦截85%以上的坡面径流,将峰值流量削减50%至70%。

3.3 土壤改良与基质配比

矿山废弃地土壤改良需针对具体障碍因子。对于养分贫瘠的排土场,采用“有机肥+保水剂+菌剂”复合改良方案:每公顷施腐熟有机肥30至50吨,保水剂30至60公斤,丛枝菌根真菌菌剂20至40公斤。对于酸性的金属矿山尾矿库,采用“石灰+有机肥+膨润土”改良方案:石灰用量每公顷3至6吨,调节pH至6.5至7.5。对于盐碱化的废弃地,采用“石膏+有机肥+深翻”改良方案。基质配比应模拟自然土壤的层次结构,在排土场表层覆盖30至50厘米的熟土或人工配制土壤。人工基质的推荐配比为:土料50%至60%,有机物料20%至30%,煤矸石碎屑15%至20%,保水材料2%至5%。添加粉煤灰或膨润土可改善质地,增加保水保肥能力。改良后土壤应达到以下指标:容重每立方厘米1.2至1.4克,有机质含量大于每千克15克,pH值6.0至8.0,入渗速率大于每小时30毫米。

3.4 植被恢复与群落配置

植被恢复遵循“乡土优先、乔灌木结合、速生与慢生搭配”的原则。根据立地条件选择适宜植物种类:坡顶和平台种植乔木,如刺槐、侧柏、紫穗槐;坡面种植灌木和草本,如荆条、胡枝子、沙打旺、披碱草;侵蚀沟道种植根系发达的柳条或沙柳。群落配置模式分为三种:沟坡防护型配置乔灌木复合结构,乔灌木比例约为2:3:5;快速覆盖型以草本为主,辅以灌木,播量增加30%;生物多样性提升型增加植物种类至15种以上,形成近自然群落。种植密度应根据坡度调整:坡度小于15度时,乔木每公顷800至1200株,灌木每公顷1500至2500株;坡度15至25度时,乔木每公顷500至800株,灌木每公顷1000至1500株;坡度大于25度时,宜采用喷播技术,灌草混合种子用量每公顷80至120公斤。喷播基材配比为:壤土60%,有机质20%,纤维15%,粘合剂3%,保水剂2%。

3.5 分阶段实施方案

将生态修复过程划分为四个阶段。第一阶段为地形重塑与工程措施阶段,工期3至6个月,完成坡面整形、截排水沟建设、挡土墙施工和微地形改造。第二阶段为基质改良与土壤重构阶段,工期2至3个月,完成表土覆盖、有机肥施用、土壤调理剂添加和微生物接种。第三阶段为植被恢复与初期养护阶段,工期18至24个月,完成植物种植、无纺布覆盖、浇水施肥和补植补种。第四阶段为稳定维持与监测评估阶段,长期实施,包括植被抚育、侵蚀监测、设施维护和群落调控。各阶段之间应留有重叠期,避免工序断层^[5]。每个阶段设置关键控制指标:第一阶段控制坡面平整度和沟道密度;第二阶段控制土壤理化指标达标率;第三阶段控制植被覆盖度和成活率;第四阶段控制土壤侵蚀模数和生物多样性指数。采用适应性管理方法,根据监测结果动态调整后续措施。

4 结束语

矿山废弃地水土保持的本质是通过重建植被—土壤系统恢复坡面水文调节功能。本文阐明了工程、植物、土壤改良三类措施的协同机理,构建了四阶段实施框架,明确了各阶段的关键控制指标与配置参数,研究结果对指导矿山生态修复工程实践具有直接参考价值。综合配置截排水系统、土壤改良与乡土植物群落,可有效控制水土流失。未来应加强修复效果的长效追踪,发展近自然恢复技术,并将水土保持功能纳入矿山生态修复成效评估的核心指标。

【参考文献】

- [1]彭东海.矿山废弃地水土保持生态恢复与重建对策分析[J].山西水土保持科技,2021(3):33-36.
- [2]宋莎莎.矿山废弃地生态修复关键技术研究[J].中国金属通报,2025(17):80-82.
- [3]马多荣,章宝宁.基于生态系统服务价值的水土保持生态补偿机制构建与效益评估[J].生态与资源,2025(10):91-93.
- [4]刘峰.矿山废弃地生态修复技术研究[J].中国金属通报,2022(10):192-194.
- [5]黄肖祖未,刘伟,刘晓文.生态产品价值提升的矿山废弃地生态修复及优化研究[J].环境科学与管理,2021,46(12):146-150.

作者简介:

叶子嘉(1996--),女,汉族,浙江人,本科,助理工程师,研究方向:水利水电工程。