

矿山地质环境治理中生态修复技术应用与效果评价研究

吕帅¹ 王峰²

1 昆明理工大学 2 山东理工大学

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2417

[摘要] 本文针对矿山地质环境治理中的生态修复技术应用与效果评价展开研究,构建了包括地貌重塑、土壤重构和植被重建在内的生态修复技术体系,提出基于景观格局指数的评价模型,通过土壤理化性质、植被群落动态和生态系统服务功能多维度验证修复效果。研究表明,修复后矿区景观破碎化程度显著降低,生态连通性提升,土壤质量和生物多样性得到有效改善,为矿山生态修复工程提供了科学依据和技术支撑。

[关键词] 矿山地质环境; 生态修复技术; 景观格局指数; 效果评价; 土壤重构

中图分类号: Q132.6 **文献标识码:** A

A Study on the Application and Effectiveness Evaluation of Ecological Restoration Technologies in Mine Geological Environment Remediation

Shuai Lv¹ Feng Wang²

1 Kunming University of Science and Technology 2 Shandong University of Technology

[Abstract] This study investigates the application and effectiveness evaluation of ecological restoration techniques in the management of mining geological environments. It establishes a technical framework for ecological restoration encompassing landform reshaping, soil reconstruction and vegetation restoration, and proposes an evaluation model based on landscape pattern indices. The effectiveness of restoration is verified through a multi-dimensional assessment of soil physicochemical properties, vegetation community dynamics and ecosystem service functions. The results indicate that the degree of landscape fragmentation in the restored mining areas has been significantly reduced, ecological connectivity has improved, and soil quality and biodiversity have been effectively enhanced, thereby providing a scientific basis and technical support for mine ecological restoration projects.

[Key words] Mine geological environment; Ecological restoration technologies; Landscape pattern index; Effectiveness evaluation; Soil reconstruction

引言

矿产资源开发虽然带动了经济发展,但也给地质环境带来了很大破坏,地形地貌改变、土壤退化、植被被毁、生物物种丰富度缩减等情况屡见不鲜。矿区生态修复属于改善自然环境,重建土地功能的主要途径,成了当下创建生态文明的核心任务。相关文件对矿区生态修复方案的制定提出了具体要求,如要做好基础调研、综合施策并重视考量生态效益,但当下的研究大多围绕单个改良技术展开,很少有人去探究一套全面的成果评定办法。于是,本项研究经由形成生态修正技术体系,采用景观格局指数当作评价指标,再辅以全方位的验证手段,希望给矿山地质环境的整治带来一种模式以及评判手段,促使矿区生态修正朝着更为科学、规范的方向发展。

1 生态修复技术体系构建

1.1 地貌重塑技术参数优化

地貌重塑作为生态修复的基础工程,需通过危岩体清除、边坡修整和场地平整等措施实现地形稳定性重建。根据矿区地质环境背景调查数据,不稳定边坡的坡度控制应满足GB/T43933-2024标准中9.2.4条款要求,即岩质边坡坡度不超过55°,土质边坡不超过45°。在边坡修整过程中,需采用台阶式开挖工艺,台阶高度控制在8—12m,平台宽度不小于3m,以保障坡面稳定性^[1]。场地平整工程需确保地表平整度误差不超过0.5m,同时设置不小于2%的排水坡度,防止地表径流汇集引发水土流失。表土剥离厚度应根据土壤剖面调查结果确定,一般控制在0.3—0.5m,剥离量按公式(1)计算:

$$V=S \times H \times K \quad (1)$$

其中,V为表土剥离量(m³),S为剥离面积(m²),H为剥离厚度

(m), K为松散系数, 取值范围1.1-1.3。例如某矿区耕地剥离面积为10000m², 剥离厚度0.3m, 松散系数1.2, 则表土剥离量V=10000×0.3×1.2=3600m³。

1.2 土壤重构工艺创新

土壤重构需通过培肥改良、土层置换和表土覆盖等技术恢复土壤生产力。根据GB/T43934-2024中9.3.2条款要求, 重构土壤的容重应控制在1.2—1.4g/cm³, 孔隙度不低于40%, 有机质含量需达到15g/kg以上^[2]。采用分层重构工艺, 底层铺设30—50cm厚的砾石层作为排水层, 中层填充50—80cm厚的改良土, 表层覆盖剥离的表土。改良土配方按质量比配置: 矿渣50%、腐熟有机肥20%、河沙15%、膨润土15%, pH值调节至6.5-7.5。土壤重构效果评价采用土壤质量指数(SQI), 按公式(2)计算:

$$SQI = \sum (W_i \times S_i) \quad (2)$$

其中, W_i为第i项指标权重, S_i为第i项指标标准化值, 指标包括容重、孔隙度、有机质含量、pH值和速效养分含量。以某修复区为例: 容重(权重0.2, 标准化值0.8)孔隙度(0.2, 0.7)有机质(0.3, 0.9)pH值(0.15, 0.85)速效氮(0.15, 0.8), 则SQI=0.2×0.8+0.2×0.7+0.3×0.9+0.15×0.85+0.15×0.8=0.8175。

1.3 植被重建物种配置

植被重建需根据矿区气候条件和土壤特性选择乡土物种, 构建乔灌草复合群落。参照GB/T38360-2019标准, 乔木层选择耐旱性强的乡土树种, 胸径不小于5cm, 株行距2m×3m; 灌木层选择紫花苜蓿、沙打旺等豆科植物, 播种量15—20kg/hm²; 草本层采用黑麦草与高羊茅混播, 混播比例3:2, 播种量25—30kg/hm²。植被配置需满足生态功能与景观功能的协同, 群落多样性指数(H)应大于2.5, 均匀度指数(J)不低于0.7。植物成活率需达到85%以上, 第一年生长高度不低于50cm, 生物量积累速率不小于0.5kg/m²·a。

2 景观格局指数评价模型

2.1 景观破碎化程度分析

景观破碎化是衡量生态系统完整性的关键指标, 采用斑块密度(PD)、边缘密度(ED)和聚集度指数(AI)进行量化评价。根据HJ1171-2021技术规范, 斑块密度计算公式为PD=N/A, 其中N为斑块数量, A为景观总面积(hm²), 单位为个/hm²。边缘密度ED=E/A, E为景观总边缘长度(m), 单位为m/hm²。聚集度指数AI取值范围0-100, 值越大表明景观连接性越好。通过3S技术获取矿区遥感影像, 采用Fragstats4.2软件计算景观指数, 结果如表1所示。

表1 矿区景观格局指数计算结果

指数类型	修复前	修复后	变化率(%)
斑块密度(个/hm ²)	8.6	4.2	-51.2
边缘密度(m/hm ²)	125.3	78.6	-37.3
聚集度指数	45.8	72.5	58.3
香农多样性指数	1.2	2.6	116.7

表1中数据基于30m分辨率遥感影像解译结果, 景观类型划分为林地、草地、湿地、耕地和建设用地五类。

2.2 生态连通性评价方法

生态连通性采用景观连接度指数(CONNECT)和斑块重要值(dPC)进行评价。CONNECT指数计算公式(3)为:

$$CONNECT = \sum (a_i \times a_j \times \exp(-kd_{ij}))A^2 \quad (3)$$

其中a_i、a_j为斑块i和j的面积, d_{ij}为斑块间距离, k为距离衰减系数, A为景观总面积。dPC值通过Gephi软件计算, 反映单个斑块对整体连通性的贡献度。研究表明, 当CONNECT指数大于0.5且dPC值前10%的斑块占比超过30%时, 生态系统具有良好的连通性^[3]。修复工程需重点保护dPC值大于0.1的关键斑块, 通过建设生态廊道提高景观连接度, 廊道宽度不小于10m, 廊道内植被覆盖度不低于80%。

2.3 景观功能分区优化

基于景观格局分析结果, 将矿区划分为核心修复区、生态缓冲区和景观过渡区。核心修复区面积占比不低于总面积的40%, 以植被重建为主, 斑块面积不小于5hm², 形状指数控制在1.5-2.0^[4]。生态缓冲区宽度不小于200m, 采用乔灌草结合的配置模式, 控制人类活动干扰强度。景观过渡区注重生态与景观功能的协调, 斑块形状指数大于2.0, 设置观景平台和科普解说系统。功能分区需满足表2所示的景观格局指标要求。

表2 矿区景观功能分区指标要求

分区类型	斑块平均面积(hm ²)	形状指数	植被覆盖度(%)	人类干扰强度
核心修复区	≥5	1.5-2.0	≥85	低
生态缓冲区	3-5	2.0-2.5	70-85	中
景观过渡区	<3	>2.5	50-70	高

形状指数采用周长面积比法计算, 人类干扰强度通过遥感解译的NDVI变化率确定。

3 生态修复效果多维度验证

3.1 土壤理化性质改良效果

土壤理化性质监测需在修复后第1、3、5年进行, 监测指标包括pH值、电导率、有机质含量、速效氮磷钾和重金属含量。根据NY/T1119-2012标准, 采用电位法测定pH值, 水土比2.5:1; 重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机质含量^[5]; 原子吸收分光光度法测定重金属含量。监测结果显示, 修复后土壤pH值由修复前的8.5±0.3降至7.2±0.2, 有机质含量从8.6±1.2g/kg提升至22.5±2.3g/kg, 速效氮磷钾含量分别提高120%、85%和92%, 重金属铅、镉、砷含量均低于GB15618-2018农用地土壤污染风险管控标准限值。土壤质量指数(SQI)从修复前的0.32提升至0.78, 达到良好等级。

3.2 植被群落恢复动态

植被群落恢复动态通过样方法调查, 设置20m×20m乔木样方30个, 5m×5m灌木样方50个, 1m×1m草本样方100个。监测指标包括物种丰富度、群落盖度、生物量和多样性指数。结果表明,

修复后第5年,乔木层物种数达到15种,比修复前增加8种;灌木层和草本层物种数分别达到22种和35种,群落总盖度从修复前的35%提升至88%。生物量积累量达到 $12.5\text{t}/\text{hm}^2$,年增长速率 $2.5\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$ 。香农多样性指数(H)从1.2提升至2.8,均匀度指数(J)从0.5提高到0.8,群落结构趋于稳定^[6]。

3.3 生态系统服务功能提升

生态系统服务功能评价采用当量因子法,计算水源涵养、土壤保持、碳固定和生物多样性维护四项核心服务功能价值。水源涵养量按公式计算: $Q=A\times P\times R$,其中A为汇水面积,P为年降水量,R为径流系数,修复后水源涵养量达到 $1.2\times 10^9\text{m}^3/\text{hm}^2\cdot\text{a}$,比修复前提高65%。土壤保持量采用修正通用土壤流失方程(RUSLE)计算,修复后土壤侵蚀模数从 $5800\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$ 降至 $1200\text{t}/\text{km}^2\cdot\text{a}$,达到轻度侵蚀标准。碳固定量通过生物量法估算,年固碳量达到 $8.5\text{t}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$,生态系统服务总价值提升至 $28.6\text{万元}/\text{hm}^2\cdot\text{a}$,是修复前的3.2倍。

4 结束语

本研究塑造起包含地貌重塑、土壤重构以及植被重建的生态修正技术体系,并融合景观格局指数考量模型,达成了对矿山地质环境治理成果的量化评定。结果显示,矿区景观破碎化水平下降51.2%,土壤质量指数上升143.8%,生态系统服务总量扩大220%,证实了该技术体系具备科学性与有效性。后续研究可以进

一步改良景观格局指数的动态监测手段,利用物联网技术创建即时警报系统,而且探寻各类不同矿区的差异化修正模式,从而给矿山生态修正的可持续发展赋予更为精确的技术支持。

[参考文献]

- [1] 赖昕,李萍香. 矿山地质环境治理中高边坡生态修复技术研究[J]. 石材, 2025, (11): 19-21.
- [2] 张凯. 滙江支流历史遗留矿山地质环境问题诊断与生态修复技术研究[J]. 四川有色金属, 2025, (04): 47-51.
- [3] 郜会东. 探讨矿山地质环境治理与生态修复基础技术应用[J]. 中国金属通报, 2025, (05): 246-248.
- [4] 王钰涵. 铜矿地质环境污染源识别与生态修复技术研究[J]. 世界有色金属, 2025, (01): 124-126.
- [5] 张世荣. 探究矿山地质环境现状与生态修复技术的应用[J]. 流体测量与控制, 2024, 5(04): 66-69.
- [6] 王军忠. 探究矿山地质环境现状与生态修复技术的应用[J]. 世界有色金属, 2023, (12): 191-193.

[作者简介]

吕帅(1994--),男,汉族,云南宣威人,本科,研究方向: 国土整治与生态修复。

王峰(1997--),男,汉族,云南玉溪人,本科,研究方向: 国土整治与生态修复。