

绿色矿山生态修复成效评估技术研究

王少雄^{1,2} 通旭芳² 杜佳洲² 武红艳² 崔 隼^{2*}

1.内蒙古伊泰京粤酸刺沟矿业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017100

2.内蒙古绿创环保科技有限公司 内蒙古 呼和浩特 010000

【摘要】：在“双碳”目标与生态文明建设深度融合的背景下，绿色矿山生态修复成为破解资源开发与环境保护矛盾的关键路径。本文以鄂尔多斯市酸刺沟煤矿采煤塌陷区为研究对象，针对干旱半干旱矿区生态修复成效评估难题，构建包含生态效益、经济效益、社会效益3个准则层、8个一级指标、30个二级因子的多层次评估指标体系。基于层次分析法确定指标权重，运用模糊综合评估法建立评估模型，定量分析修复前后生态系统质量变化。研究表明，酸刺沟煤矿修复后生态系统稳定性显著增强，但土壤重金属污染治理与生物多样性保护仍需加强。研究成果为干旱区绿色矿山生态修复提供了可复制的评估技术范式，助力实现“修复—评估—优化”的闭环管理。

【关键词】：绿色矿山；生态修复；成效评估；多层次模糊综合评估法

DOI:10.12417/2811-0722.25.09.032

引言

煤炭作为我国能源安全的“压舱石”，其开发利用在保障经济发展的同时，也引发了严重的生态问题。鄂尔多斯市作为全国重要能源基地，煤炭产量占全国1/6，长期高强度开采导致土地塌陷、植被破坏、水土污染等问题突出。党的二十大报告明确提出“推进各类资源节约集约利用”“深化矿山生态修复”，如何科学评估生态修复成效，成为破解“修复效果难量化、治理措施难优化”的关键。本文以鄂尔多斯酸刺沟煤矿为实证案例，构建适用于干旱区的评估技术体系，为绿色矿山建设提供理论支撑与实践参考。

1 指标体系构建原则

1.1 地域适配性原则

针对鄂尔多斯干旱半干旱气候特征，重点关注植被耐旱性、土壤保水能力、风沙防治效果等指标，如引入“植被成活率”“坡面渗透率”等特色因子，避免照搬湿润区评估标准。

1.2 三维协同原则

基于三重底线理论，构建“生态效益—经济效益—社会效益”三维评估框架，既涵盖植被覆盖度、土壤养分等生态指标，也包含失地农民再就业率、环保投资占比等社会经济指标，实现多目标均衡评估。

1.3 动态监测原则

结合矿区生态修复阶段性特征，设置“修复前塌陷土地深度”“修复后植被覆盖度”等对比指标，通过时序数据追踪修复效果，为动态调整治理方案提供依据。

2 评估指标体系构建

评估指标体系的构建是科学评价绿色矿山生态修复成效的核心基础，其科学性与合理性直接决定评估结果的准确性与有效性。本研究通过系统的文献研究、广泛的专家咨询以及深入的实地调研，从生态效益、经济效益和社会效益三个维度出发，构建起涵盖3个准则层、8个一级指标、30个二级因子的多层次评估指标体系（表1），旨在全面、精准地衡量绿色矿山生态修复的综合成效。

表1 评估指标体系

指标层	一级权重	因子层	二级权重	
资源利用情况	0.2156	煤矸石综合利用率	0.5000	
		矿井水综合利用率	0.5000	
地质安全隐患消除情况	0.1813	矸石自燃隐患	0.2000	
		边坡隐患	0.2000	
		塌陷土地深度（修复前）	0.3000	
		塌陷土地面积（修复后）	0.3000	
土壤质量改善情况	0.1402	土壤肥力	土壤有机质含量	0.074757
			土壤水解性氮含量	0.074757
			土壤有效磷含量	0.074757
			土壤速效钾含量	0.074757
			土壤酸碱度	0.074757
			土壤全氮	0.074757

作者简介：王少雄（1992—），硕士，中级工程师。研究方向：生态环境治理。

通讯作者信息：崔隼（1979—），硕士，正高工，研究方向：生态环境修复治理与评价。

鄂尔多斯市科技重大专项-基于NbS的美丽矿山生态修复治理与技术研究及工程示范（项目编号ZD20232317）。

		土壤	土壤全磷	0.074757
			土壤全钾	0.074757
			综合养分指数	0.057822
		土壤污染	镉含量	0.036583
			汞含量	0.036583
			砷含量	0.036583
			铅含量	0.036583
			铬含量	0.036583
			铜含量	0.036583
			锌含量	0.036583
			镍含量	0.036583
			综合污染指数	0.007214
			植被提升情况	0.1180
区域可持续发展与民生福祉提升情况	0.1614	公众满意情况	0.4828	
		失地农民再就业率(修复中、修复后)	0.5172	
土地利用与粮食生产效益情况	0.1835	土地利用	0.5000	
		新增可利用耕地率	0.5000	

3 案例分析

3.1 研究区概况

酸刺沟煤矿位于准格尔旗,属典型干旱半干旱矿区,年均降水量 418.6mm,蒸发量达 2500mm,生态环境脆弱。矿区总面积 49km²,修复前因为区域生态本底脆弱,土地重度退化,植被覆盖度仅 14.7%,土壤沙化严重。2018 年启动生态修复工程,采用“客土改良+耐旱植被种植+水土保持工程”综合修复模式。

3.2 技术路线

3.2.1 前期准备与资料收集

首先组建由生态学、地质学、经济学、社会学等多领域专家构成的研究团队。团队成员凭借各自专业知识,收集与目标矿山相关的多方面资料,包括矿山开采历史、地质环境条件、生态破坏现状、区域社会经济发展情况等。同时,广泛查阅国内外同类矿山生态修复案例,借鉴其成功经验与技术手段,为后续评估工作奠定理论与实践基础。

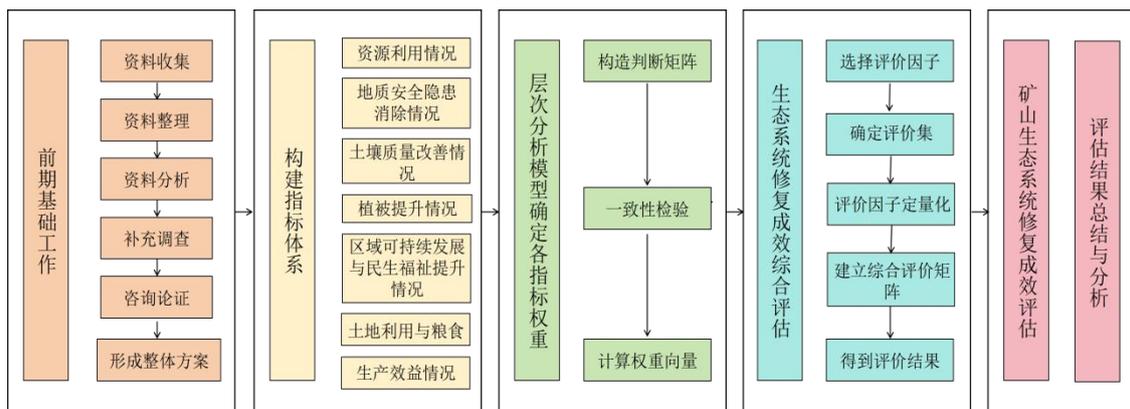


图 1 技术路线

3.2.2 数据采集与处理

结合先进调查手段开展数据采集工作。利用遥感技术获取矿山大范围的地形地貌、植被覆盖等宏观数据;运用无人机进行低空高分辨率拍摄,获取更精细的矿区影像,辅助分析景观格局变化、植被分布等情况。对于土壤、植被等微观指标,通过实地样方调查、土壤采样分析等传统方法获取数据,如采集 0-20cm 表层土样测定土壤养分及重金属含量,设置标准样方统计植物物种多样性。

3.2.3 评估指标体系构建

依据井工煤矿对生态环境影响的特点,选取资源利用情况、景观质量情况、水土保持质量情况、地质安全隐患消除情况、土壤质量改善情况、植被状况提升情况、区域可持续发展与民生福祉提升情况、土地利用与粮食生产效益情况共 8 个一

级指标。每个一级指标下进一步细化为若干二级因子,形成多层次评估指标体系。

3.2.4 确定指标权重

运用层次分析模型确定各指标因子的权重。将评估目标分解为目标层、准则层(8 个一级指标)和方案层(二级因子),邀请专家依据 1-9 标度法对同一层次元素进行两两比较,构造判断矩阵。通过计算判断矩阵的最大特征根、一致性指标和一致性比率,进行一致性检验,保证判断矩阵的合理性。在判断矩阵通过检验后,采用方根法等方法计算权重向量,从而确定每个指标因子在评估体系中的相对重要程度。

3.2.5 综合评估模型应用

采用多层次模糊综合评估法,结合确定的指标权重和采集处理后的数据,对酸刺沟煤矿开展生态系统修复成效评估。先

确定评估集，如“优”“良”“中”“差”四个等级；然后计算各指标的隶属度，构建隶属度矩阵；最后利用权重向量与隶属度矩阵进行模糊运算，得出生态修复成效的综合评估结果，并对各准则层、指标层得分进行分析，明确修复工作的优势与不足。

3.3 指标数据获取与处理

3.3.1 生态指标

在生态指标的数据获取与处理过程中，综合运用先进的遥感技术、传统的实地调查方法以及专业的软件分析手段，确保数据的准确性与科学性，从而精准衡量绿色矿山生态修复成效。

1) 植被恢复指标

本研究采用无人机遥感与标准样地调查相结合的综合评估方法，定量分析矿区生态修复效果。在无人机遥感方面，搭载多光谱传感器获取高分辨率影像数据，基于归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）模型，对矿区植被覆盖度进行精确量化。

2) 土壤改良指标

为全面评估矿区生态修复对土壤质量的影响，本研究采用实地采样与实验室分析相结合的方法。采集的土壤样品经预处理后，送往专业实验室进行分析。在实验室中，运用原子吸收光谱仪（AAS）、元素分析仪等设备，精确测定土壤关键理化指标，包括有机质含量、氮（N）、磷（P）、钾（K）等主要养分含量，以及重金属元素（如镉（Cd）、汞（Hg）、砷（As））的含量。检测分析结果表明，修复工程实施后，土壤有机质含量较修复前显著提高了77%，表明土壤肥力状况得到显著改善。

3.3.2 经济与社会指标

1) 资源综合利用与土地生产能力指标

该矿实现了煤矸石100%综合利用率，所有洗选矸石均用于井下采空区回填，形成矿区内部资源闭环，彻底规避地表堆存环境风险；在水资源管理方面，对大塔水源地、南坪沟供水井严格预留保护煤柱以保障水源安全，矿井涌水经处理站全流程净化达标后，100%回用于洗煤、抑尘、生态修复及生活杂用等环节，全面杜绝外排。矿井水回用率提升至100%的实践，显著降低地下水体污染风险，同步达成水资源可持续循环目标。上述固体废物资源化与水资源集约化管控成效，完全契合绿色矿山建设对“减量化、资源化、无害化”的核心要求。2) 民生改善与可持续发展指标

本研究在生态修复项目完成后组织开展了问卷调查，调查对象包括项目员工、业主单位负责人、项目监理人员及附近村民代表等，旨在系统了解公众对生态修复成效的主观评价。共

计发放问卷20份，回收有效问卷20份。统计结果表明，其中40%的受访者表示“非常满意”，45%的受访者表示“满意”，总体满意度达到85%。该结果表明，酸刺沟煤矿生态修复工程在提升环境质量、改善居民生活条件等方面成效显著，赢得了较高的社会认可度，也为后续修复项目提供了良好的社会反馈基础。

3.4 评估结果分析

3.4.1 准则层得分对比

通过计算分别得到每个评价因子权重 W 和模糊隶属度矩阵 R 后，采用合适的模糊变换合成算子 \odot 进行模糊变换合成，最后得到酸刺沟矿山研究区生态系统质量及修复成效评估的模糊综合评价结果 S 。

$$S = W \odot R = \{W_1, W_2, \dots, W_m\} \odot \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & R_{n3} & R_{n4} \end{bmatrix}$$

经计算得出，修复前酸刺沟矿山研究区生态系统质量及修复成效综合评价值为57.202，修复后酸刺沟矿山研究区生态系统质量及修复成效综合评价值为78.256。修复后生态系统质量及修复成效综合评价值较修复前显著提升37%，修复成效显著。

4 结论与建议

4.1 结论

经过系统的生态修复工作，酸刺沟矿山在生态环境质量、土地利用效率、地质安全控制等方面取得了显著成效。修复前，矿区面临土壤退化、水土流失、生态系统功能丧失等多重问题，整体生态环境质量处于较低水平。通过实施土地整治、土壤改良、植被恢复等综合修复措施，生态系统结构与功能逐步恢复，生态安全和资源利用状况均显著改善，体现出修复工程的阶段性成果和良好趋势。

4.1.1 雷达图对比分析

修复后，雷达图各项指标表现明显提升，生态系统整体功能趋于协调化和系统化。其中，“资源利用情况”已接近满分水平，“土壤质量改善情况”“区域可持续发展与民生福祉提升情况”等指标提升幅度显著，生态安全与资源环境协同状况得到有效改善。通过雷达图对比可见，系统修复措施对矿区生态系统结构和功能重建起到了关键支撑作用，生态质量实现由弱转强的阶段性跃升。

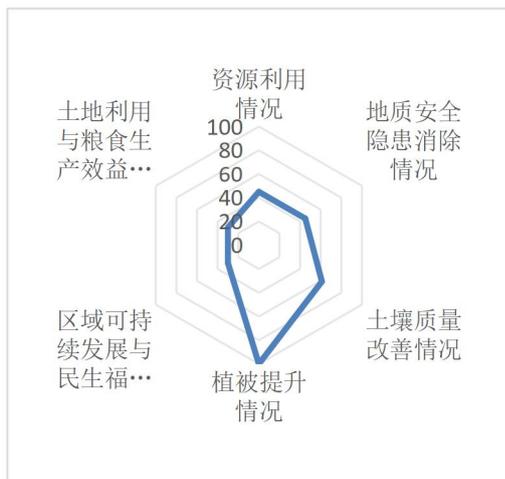


图2 矿山生态系统质量及修复成效评价分析图（修复前）

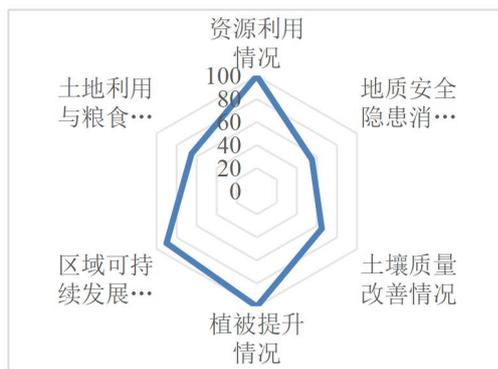


图3 矿山生态系统质量及修复成效评价分析图（修复后）

4.1.2 修复成效总体评价

修复实施以来，项目通过土壤改良、植被重建、水资源调控、边坡稳定及环境风险控制等综合措施，有效推动了生态系统结构重建与功能恢复。修复后，矿区土壤质量、植被覆盖率、生态功能及资源利用效率均呈现出良好改善趋势。

4.2 建议

(1) 持续提升资源利用效率

虽然资源利用情况在修复后已大幅提升，接近最优水平，

但仍需进一步推动资源循环利用与精细化管理。例如，应在煤矸石综合利用、废弃土地再开发、矿井水处理回用等方面拓展资源利用路径，提升矿山单位面积生态产出率，同时加快绿色低碳转型进程。

(2) 加强土壤质量改良与巩固

图中显示土壤质量改善虽有提升，但仍处中等偏上水平，尚未实现全面恢复。建议进一步采用科学施肥、种植固氮植物、添加有机肥和生物菌剂等措施促进土壤团粒结构形成，提升有机质含量与微生物活性，建立长期、稳定的土壤肥力支撑系统。

(3) 深化地质安全隐患排查与工程加固

修复后地质安全情况虽有所改善，但仍存在一定隐患。应重点加强边坡稳定性评估、矸石堆放区温度与气体监测、地表沉降动态跟踪等，构建“技术+预警+应急”三位一体的综合治理机制，确保修复区地质环境安全长期稳定。

(4) 推动植被重建多样性与生态功能融合

虽然植被恢复程度显著提高，但应进一步从“覆盖率”向“生态功能”转变。建议引入本土乡土种、耐旱固沙植物和多年生草本、灌木结合的群落结构，提升植被群落稳定性与抗干扰能力。同时应加强后期养护与生境管理，推动生态系统向自然演替方向演进。

(5) 注重生态修复与区域发展协同

雷达图中“区域可持续发展与民生福祉提升”虽有改善，但提升幅度有限。建议后续在生态修复基础上引入生态农业、生态旅游、清洁能源等产业，激活矿区“生态-经济-社会”耦合机制，实现生态恢复与区域绿色发展共赢。同时强化居民参与和技能提升，提高修复带来的就业覆盖面和社会回馈效益。

综上所述，酸刺沟绿色矿山修复成效已初步显现，但生态修复仍处于关键推进阶段，后续应通过技术优化、系统管理与多方协同进一步提升生态系统质量与稳定性，打造示范性矿区生态修复典范。

参考文献：

- [1] 沈庆波.六盘水市矿山环境治理中植被恢复的生态效益评估[J].黑龙江国土资源,2025,23(04):21-28.
- [2] 杨丛铭,袁颖,侯明华,等.张家口尚义县废弃矿山修复生态效益评估研究[J].河北地质大学学报,2022,45(06):116-121.
- [3] 秦静,李国清,侯杰,等.矿山生态效益评估模型及其应用[J].矿业研究与开发,2022,42(11):208-214.
- [4] 谷从楠.基于 DEA 算法的矿山修复生态效益评估模型[J].安徽地质,2022,32(01):67-71.
- [5] 叶立新.生态评估理论下的地质环境修复治理方法拟定措施分析[J].世界有色金属,2020,(01):283+285.