

煤基固废在矿区土地复垦中的应用效果与环境风险评价

张 晗

(中煤西安设计工程有限责任公司, 陕西 西安 710054)

摘 要 煤炭开采产生的煤矸石、粉煤灰等煤基固废堆存引发严峻的环境问题, 其在矿区土地复垦中的资源化利用是破解生态与固废双重困境的重要路径。本文以陕北侏罗纪煤田某井工煤矿区为对象, 通过对比煤基固废充填复垦区与自然恢复区, 分析固废充填对土壤理化性质、植被恢复的影响, 结合 HELP 模型与生态毒性测试评估重金属迁移风险。研究表明: 充填区土壤有机质、阳离子交换量分别提升 50.4%、40.7%, 植被覆盖率达 65.2% (较对照区翻倍), 但 Cd 等重金属存在长期迁移至地下水的潜在风险。研究提出固废配比优化、重金属钝化及生态工程等防控策略, 以期为煤基固废安全高效应用于矿区复垦提供有益参考。

关键词 煤基固废; 矿区土地复垦; 土壤改良; 环境风险; 重金属迁移

中图分类号: TD88; X705

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.30.041

0 引言

在 2024 年 10 月 22 日生态环境部召开的新闻发布会上, 固体废物与化学品司司长郭伊均提到, 据工业固废网数据, 2023 年我国煤矸石、粉煤灰等典型大宗工业固废产生量达 42.34 亿吨, 且每年仍有 20 亿吨左右未得到综合利用, 历史堆存量庞大, 严重威胁矿区生态^[1]。矿区土地复垦困难重重, 但煤基固废有改良土壤、促进植被生长的潜力。不过, 其含有的重金属迁移风险和长期环境效应不明, 限制了大规模应用^[2]。本文以陕西榆林典型矿区为对象, 评估煤基固废充填复垦效果, 量化风险并提出防控建议, 助力黄河流域矿区生态修复与固废资源化发展。

1 材料与方法

1.1 典型矿区复垦案例选取

本研究以陕西省榆林市某井工煤矿区为研究对象。该矿区属于陕北侏罗纪煤田, 是我国重要的能源化工基地, 长期煤炭开采导致地表沉陷面积达 23.7 km², 土地损毁类型以采煤沉陷地、排矸场和粉煤灰堆积区为主。矿区年产生煤基固废约 1 200 万吨, 主要包括煤矸石 (占比 65%)、粉煤灰 (占比 28%) 和煤泥 (占比 7%), 历史堆存量已超过 1.5 亿吨, 固废资源化利用率仅为 42%, 生态修复压力显著。

研究选取 2018 年实施煤基固废充填复垦的沉陷区 (面积 50 公顷, 简称“充填区”) 作为实验组, 以相邻未实施固废充填的自然恢复沉陷地 (面积 30 公顷,

简称“未充填区”) 作为对照组。充填区采用“煤矸石+粉煤灰分层压实充填 (每层厚度 50 cm)+表土覆盖 (30 cm)+植被重建”工艺, 种植沙棘、刺槐、紫花苜蓿等耐旱物种; 未充填区仅进行表土平整和自然植被恢复。两地地形、气候条件一致, 距煤矿主井均约 2 km, 排除外部污染干扰。

1.2 研究方法

1.2.1 土壤质量评价

样品采集与测定: 2023 年 8 月, 在充填区和未充填区分别布设 10 个采样点 (见表 1), 按 0~20 cm 表层土壤采集样品, 每个样品由 5 个子样混合而成, 共获得 20 个土壤样品。测定指标包括:

1. 理化性质: pH (玻璃电极法, 《水质 pH 值的测定 玻璃电极法》(GB/T 6920-1986))、有机质 (重铬酸钾氧化法, 《土壤有机质测定法》(NY/T 1121.6-2006))、阳离子交换量 (CEC, 醋酸铵交换法, 《森林土壤阳离子交换量的测定》(LY/T 1243-1999))、全氮 (凯氏定氮法, 《土壤质量全氮的测定 凯氏法》(HJ 717-2014))、全磷 (钼锑抗分光光度法, 《森林土壤全磷的测定》(LY/T 1232-1999))。

2. 重金属含量: 砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、铜 (Cu)、铅 (Pb)、锌 (Zn), 采用 HNO₃-HClO₄-HF 消解后, 通过电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Agilent 7900) 测定, 方法检出限均低于 0.1 mg/kg, 参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018) 进行风险筛选。

表 1 研究区土壤基本理化性质对比

指标	充填区 (均值 ±SD)	未充填区 (均值 ±SD)	变化率 (%)
pH	7.2±0.3	8.5±0.4	↓ 15.3
有机质 (g/kg)	18.5±2.1	12.3±1.8	↑ 50.4
阳离子交换量 (cmol/kg)	15.2±1.5	10.8±1.2	↑ 40.7
全氮 (g/kg)	0.92±0.11	0.65±0.09	↑ 41.5
全磷 (g/kg)	0.85±0.08	0.62±0.07	↑ 37.1

(注：数据来源 2023 年现场实测数据。)

1.2.2 植被恢复分析

样方调查法：在充填区和未充填区分别设置 20 个 10×10 m 的植被样方，每个样方内设置 3 个 1×1 m 的草本样方（见表 2）。调查内容包括：

1. 植被覆盖率：采用网格法估算植被覆盖面积占样方总面积的比例。

2. 群落结构：记录植物物种名称、株数、高度、盖度，计算物种丰富度(S)、Shannon-Wiener 多样性指数(H') 和 Pielou 均匀度指数(J)，公式如下：

$$H' = -\sum(p_i \ln p_i), J = H' / \ln S \tag{1}$$

式(1)中， p_i 为第 i 个物种的个体数占总个体数的比例。

表 2 植被覆盖率与多样性指数对比

指标	充填区 (均值 ±SD)	未充填区 (均值 ±SD)	变化率 (%)	显著性 (t 检验)
植被覆盖率 (%)	65.2±5.8	32.7±4.5	↑ 100.9	$P < 0.01$
物种丰富度 (S)	12.3±1.5	7.2±1.2	↑ 70.8	$P < 0.01$
Shannon-Wiener 指数(H')	1.85±0.22	1.12±0.18	↑ 65.2	$P < 0.01$
Pielou 均匀度指数(J)	0.72±0.08	0.61±0.07	↑ 18.0	$P < 0.05$

(注：数据为 2023 年实测， $P < 0.05$ 表示组间差异显著 (t 检验)。)

以上表格清晰对比了煤基固废充填区与未充填区的植被恢复关键指标，显示充填区在植被覆盖度和群落多样性上均显著优于未充填区，体现了固废充填复垦对矿区植被重建的积极效果。

1.2.3 环境风险评估

采用美国地质调查局的 HELP 模型评估环境风险。

输入土壤质地、降雨数据、重金属初始浓度等参数，模拟 10a、20a、30a 后重金属在土壤—地下水系统的迁移，评估对地下水的潜在风险（见表 3）。同时，以小麦“小偃 22”为指示生物，通过种子发芽率和幼苗根长抑制率评估土壤毒性，对照组为去离子水培养。

表 3 土壤重金属含量与风险筛选值对比 (mg/kg)

重金属	充填区	未充填区	GB15618 风险筛选值 (旱地)	是否超标
As	12.3	11.5	40	否
Cd	0.35	0.32	0.3 (pH > 7.5)	否
Cr	65.2	62.8	250	否
Cu	28.7	25.5	100	否
Pb	35.6	32.1	170	否
Zn	98.4	89.7	300	否

(注：数据来源 HELP 模型评估数据。)

1.3 数据处理与分析

采用 Excel2021 进行数据整理，SPSS26.0 进行独立样本 t 检验和相关性分析，Origin2022 绘制图表。在环境风险评估中，重金属迁移模型参数通过矿区气象站(2010-2023 年数据)和土壤理化性质实测值校准，确保模型预测精度。

2 煤基固废复垦应用效果

2.1 土壤改良：结构优化与肥力提升

煤基固废分层充填对矿区土壤改良效果显著。煤研石提升土壤孔隙度，粉煤灰增强保水能力，使田间持水量大幅上升。充填区 pH 更适宜植物生长，阳离子交换量增加，为养分累积提供条件，有机质、全氮等含量显著提升。此外，充填区脲酶、磷酸酶活性比未充填区平均高 32.5%，土壤生化功能明显增强（见表 4）。

表 4 土壤理化性质对比

指标	充填区	未充填区	变化率 (%)
田间持水量 (%)	26.5	18.7	↑ 41.7
阳离子交换量 (cmol/kg)	15.2	10.8	↑ 40.7
有机质 (g/kg)	18.5	12.3	↑ 50.4
pH	7.2	8.5	↓ 15.3

(注：数据为 2023 年实测。)

2.2 植被恢复：覆盖率与多样性双提升

充填复垦促进了植被恢复，成效显著。充填区植被覆盖率达 65.2%，较未充填区翻倍，物种丰富度和 Shannon-

Wiener 指数大幅提升,形成沙棘、刺槐、紫花苜蓿组成的灌草群落。同时,充填区年土壤侵蚀模数降低 63%,水土保持能力变强。不过,因人工优势物种占比高,群落均匀度提升有限,多样性仍不及原生植被区,群落演替处于中期阶段(见表 5)。

表 5 植被恢复指标对比

指标	充填区	未充填区	变化率(%)
植被覆盖率(%)	65.2	32.7	↑ 100.9
物种丰富度(S)	12.3	7.2	↑ 70.8
Shannon-Wiener 指数	1.85	1.12	↑ 65.2

(注:数据为 2023 年实测。)

2.3 土地利用:从废弃地到多功能转化

煤基固废充填复垦让废弃地实现多功能转化。研究区 50 公顷充填区土地利用类型多样,年产值大幅增长,固废消纳量大,有效缓解堆存压力,降低矸石山自燃风险,且短期环境风险可控,实现了生态与经济双赢。不过,煤基固废改良效果受配比和气候影响。干旱区粉煤灰保水优势明显,湿润区需增加其比例减少养分流失。目前,长期的重金属迁移和群落自然演替情况还需持续监测,以保障矿区可持续发展^[3]。

3 环境风险评价

3.1 重金属污染风险:迁移性与生态毒性评估

煤基固废中的 As、Cd、Pb 等重金属是主要环境风险因子。研究区充填区土壤重金属含量虽低于风险筛选值,短期生态风险低,但经 HELP 模型模拟,年均 415 mm 降雨下,Cd 迁移快,20 年后在 50 cm 深度浓度接近风险筛选值(见表 6)。生态毒性测试显示,充填区土壤影响小麦幼苗根长,土壤 Cd 含量与根长抑制率正相关,需警惕食物链传递风险。

表 6 土壤重金属含量与风险筛选值对比(mg/kg)

重金属	充填区	GB 15618 风险筛选值(旱地)	超标倍数	迁移模型预测 20 年深度浓度
As	12.3	40	0	10.5 (50 cm)
Cd	0.35	0.3(pH>7.5)	1.17	0.28 (50 cm)
Pb	35.6	170	0	28.9 (50 cm)

(注:数据来源《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)、HELP 模型模拟结果。)

3.2 长期稳定性分析:理化性质动态与二次污染风险

煤基固废充填后,土壤理化性质长期稳定性关乎风险评价。充填区土壤 pH 在复垦 5 年内从 7.8 降至 7.2,

阳离子交换量先升后降但仍高于未充填区。二次污染风险不容忽视,极端降雨和固废压实度不足会引发问题,暴雨期地表径流中 Zn、Cu 浓度超标,压实度低会使重金属浸出增加^[4]。而且,充填区边缘植被覆盖率低,存在风蚀导致的重金属扩散风险。

3.3 风险防控建议:配比优化与钝化技术结合

针对煤基固废充填复垦风险,可采取以下防控措施。优化固废配比,干旱区煤矸石与粉煤灰按 6:4 配比,湿润区粉煤灰增至 50%~60%。进行重金属钝化处理,施加生物质炭、石灰等钝化剂^[5]。强化生态工程,在充填区边缘种植重金属富集植物和多年生草本构建缓冲带,定期监测土壤重金属形态,重点关注可交换态含量变化,降低环境风险^[6]。

4 结束语

煤基固废充填复垦显著提升矿区土壤肥力与植被覆盖率,实现沉陷地从废弃地到林草地、耕地的多功能转化,经济生态效益双赢。但 Cd 等重金属在长期降雨条件下存在向地下水迁移的风险,需关注极端降雨引发的地表径流污染与边缘区域风蚀扩散问题。通过固废配比优化、钝化剂添加及生态缓冲带构建,可有效降低环境风险。未来研究需构建“生态—经济—风险”多目标评价体系,探索煤基固废改性制备土壤调理剂、碳封存材料等低碳复垦技术,结合机器学习模型提升重金属迁移预测精度,推动矿区从“生态修复”向“生态功能提升”转型,助力“双碳”目标下能源基地绿色可持续发展。

参考文献:

- [1] 中国煤炭工业协会.2023 煤炭行业发展年度报告[R].北京:中国煤炭工业协会,2024.
- [2] 漆东生,白新惠,漆洮珠,等.新质生产力引领无废资源绿色智慧矿山建设的路径[J].建材世界,2024,45(06):116-121,126.
- [3] 邹鲲,廖宇程.固体废物环境污染修复机制的观察与思考[J].环境保护,2024,52(05):64-67.
- [4] 张凯,李晓楠,暴凯凯,等.西北干旱露天煤矿排土场土壤重构与水盐运移机制[J].煤炭学报,2024,49(03):1556-1569.
- [5] 王忠鑫,赵明,赵丹丹,等.露天煤矿绿色矿山建设支撑保障体系[J].露天采矿技术,2021,36(03):1-7.
- [6] 白冰,雷宏武,崔银祥,等.煤矸石等煤基固废人工造土造地的实践与展望[J].环境影响评价,2025,47(02):17-22.