

后安煤矿采煤沉陷区“工程-生物-化学” 协同复垦技术体系研究与工程实践

赵尚海¹, 周连春², 赵润¹, 谭诗², 赵伟¹, 古娜², 赵津², 赵文²

¹山西朔州平鲁区后安煤矿后安煤炭有限公司, 山西 朔州

²西昌学院土木与水利工程学院, 四川 西昌

收稿日期: 2025年12月13日; 录用日期: 2026年1月19日; 发布日期: 2026年1月26日

摘 要

后安煤矿作为典型干旱半干旱矿区, 长期开采引发大面积地裂缝与塌陷, 严重威胁生态安全与土地资源。本文系统总结了该矿复垦工程的实施经验, 累计治理面积达631.56 hm², 总投资约1.58亿元, 构建并实践了“工程-生物-化学”协同复垦技术体系。工程技术包括裂缝充填、塌陷坑治理、土地平整与梯田化改造; 生物技术筛选出油松、柠条、紫花苜蓿、披碱草、油菜等适生植物, 构建草灌乔结合的复垦植被群落, 累计栽植油松34,542株、柠条529,506株; 化学与微生物技术通过施用有机肥、硫酸亚铁调碱及微生物菌剂, 显著改良土壤结构。治理后, 植被覆盖率由15%提升至63%以上, 土壤有机质含量提高200%, 水土流失得到有效控制, 复垦区油菜花田更成为地方“网红景点”, 实现生态、经济与社会效益协同提升。研究提炼出可复制、可推广的“后安模式”, 为我国干旱半干旱矿区生态修复提供了系统技术路径与工程示范。

关键词

采煤沉陷区, 土地复垦, “工程-生物-化学”协同, 植被配置, 土壤改良, 后安模式, 生态修复

Research and Engineering Practice of the “Engineering-Biology-Chemistry” Collaborative Reclamation Technology System for the Coal Mining Subsidence Area of Hou'an Coal Mine

Shanghai Zhao¹, Lianchun Zhou², Run Zhao¹, Shi Tan², Wei Zhao¹, Na Gu²,
Jin Zhao², Wen Zhao²

文章引用: 赵尚海, 周连春, 赵润, 谭诗, 赵伟, 古娜, 赵津, 赵文. 后安煤矿采煤沉陷区“工程-生物-化学”协同复垦技术体系研究与工程实践[J]. 矿山工程, 2026, 14(1): 209-214. DOI: 10.12677/me.2026.141022

¹Hou'an Coal C., Ltd., Hou'an Mine, Shuozhou Shanxi²School of Civil Engineering and Water Conservancy, Xichang University, Xichang Sichuan

Received: December 13, 2025; accepted: January 19, 2026; published: January 26, 2026

Abstract

As a typical arid and semi-arid coal mine, Hou'an Coal Mine has suffered from large-scale ground fissures and collapses due to long-term mining activities, which pose a severe threat to ecological security and land resources. This paper systematically summarizes the implementation experience of the reclamation project in the mine, with a cumulative treatment area of 631.56 hectares and a total investment of approximately 158 million yuan, and establishes and practices the "Engineering-Biology-Chemistry" collaborative reclamation technology system. The engineering technologies include fissure filling, collapse pit remediation, land leveling and terrace reconstruction. Biotechnological methods were adopted to screen suitable plant species, including *Pinus tabuliformis*, *Caragana korshinskii*, *Medicago sativa*, *Elymus dahuricus*, and *Brassica napus*. A reclaimed vegetation community combining grasses, shrubs and arbors was constructed according to the habitat characteristics of the coal mining subsidence area; by the end of the project implementation period, a total of 34,542 *Pinus tabuliformis* plants and 529,506 *Caragana korshinskii* plants had been planted. Chemical and microbial technologies significantly improved soil structure through the application of organic fertilizers, ferrous sulfate for alkalinity adjustment and microbial inoculants. After remediation, the vegetation coverage rate increased from 15% to more than 63%, the soil organic matter content rose by 200%, and soil erosion was effectively controlled. Moreover, the rapeseed flower fields in the reclamation area have become a local "internet-famous scenic spot", realizing the coordinated improvement of ecological, economic and social benefits. This study refines the replicable and promotable "Hou'an Model", which provides a systematic technical approach and engineering demonstration for ecological restoration in arid and semi-arid coal mining areas in China.

Keywords

Coal Mining Subsidence Area, Land Reclamation, "Engineering-Biological-Chemical" Collaborative, Vegetation Configuration, Soil Improvement, Hou'an Model, Ecological Restoration

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Open Access

1. 引言

我国作为全球最大的煤炭生产国与消费国,煤炭资源的长期大规模开采在支撑国民经济发展的同时,也引发了严重的矿区生态环境问题,其中以采煤沉陷区对土地资源的损毁最为突出[1]。据统计,我国因采矿活动破坏的土地累计超过 400 万 hm^2 ,且每年仍在新增,这些沉陷区普遍存在地表裂缝、塌陷、水土流失与植被退化等现象,严重威胁区域生态安全与人居环境[2]。在此背景下,推动绿色矿山建设、加强矿区生态修复已成为践行“绿水青山就是金山银山”理念、实现矿业可持续发展的必然要求[3]。

山西省是我国重要的能源基地,其生态健康状况对于黄河流域生态保护和高质量发展战略至关重要。然而,该省地处干旱半干旱过渡带,生态本底脆弱,大规模煤炭开采加剧了水土流失和土地荒漠化进程,使得矿区生态修复工作面临严峻挑战[4]。山西省朔州市平鲁区后安煤炭有限公司后安煤矿(以下简称“后

安煤矿”)是区域内一个典型的开采多年的大型矿井。长期的井下采煤活动导致井田范围内形成了大面积的采空区,并在地表诱发了显著的地裂缝与局部塌陷。这些地质灾害不仅破坏了土地资源的完整性和农业生产功能,更对矿区及周边居民的生命财产安全构成了直接威胁[5]。

与我国东部湿润区矿区相比,后安煤矿所在的区域具有其独特的复杂性和治理难度:其一,气候条件恶劣,年均降水量仅 424 mm,而年蒸发量高达 2118.4 mm,水分盈亏失衡严重,植被自然恢复能力极差;其二,土壤基质贫瘠,土壤有机质含量普遍低于 1%,且 pH 值多大于 8.0,存在明显的钙积层,严重制约植物根系生长与养分吸收;其三,地质动态不稳定,采空区的持续沉降导致地裂缝与塌陷反复生成,使得治理靶区处于动态变化之中。这些因素共同构成了后安煤矿沉陷区复垦的特殊性与艰巨性,也意味着照搬其他地区的复垦技术往往难以奏效。

因此,针对后安煤矿采煤沉陷区开展系统性的复垦技术研究,不仅是企业履行社会责任、响应国家绿色矿山建设号召的必然要求,更是探索干旱半干旱矿区生态修复技术路径、保障区域生态安全的迫切需求。本研究基于后安煤矿实施的复垦工程实践,旨在系统构建并验证一套适用于本地条件的“工程-生物-化学”协同复垦技术体系,评估其生态、经济与社会综合效益,以为后安矿区乃至整个黄河流域类似条件矿区的生态修复提供可复制、可推广的技术样板与实践经验。

2. 项目区域概况与问题诊断

后安煤矿位于山西省朔州市平鲁区东南部,行政区划隶属陶村乡管辖。该矿区属于典型的黄土高原丘陵地貌,项目区属温带大陆性季风气候,年均降水量仅 424 毫米,且降水时空分布极不均匀,主要集中在 7~9 月;年均蒸发量高达 2118.4 毫米,干燥度达 4.99,属于典型的干旱半干旱地区。无霜期约 115 天,初霜期一般在 9 月上旬,终霜期在次年 4 月下旬,植物生长期较短。

该地区主要生态环境问题如下:

(1) 地表变形问题突出

长期的地下煤炭开采在井田范围内形成了大面积的采空区,导致地表出现了严重的地质灾害。据现场调查与监测数据显示,矿区地表发育了大量的地裂缝与塌陷坑。地裂缝和塌陷坑严重破坏了地表的完整性和稳定性。这些地表变形不仅直接损毁了土地资源,还对矿区基础设施和周边村庄构成了严重安全隐患。

(2) 土壤质量严重退化

项目区土壤类型主要为栗钙土和黄土母质,存在严重的土壤退化问题:一是土壤贫瘠,采样分析显示土壤有机质含量普遍低于 1%,全氮含量不足 0.05%,有效磷含量极低,土壤肥力严重不足;二是土壤碱化,土壤 pH 值多在 8.0~8.5 之间,存在明显的钙积层,严重制约植物根系生长与养分吸收;三是土壤结构不良,表层土壤容重偏高,孔隙度低,保水保肥能力差[6]。

(3) 植被生态系统受损

受采矿活动影响,项目区原生植被遭到严重破坏。治理前植被覆盖率仅约 15%,且以耐旱耐贫瘠的蒿类等草本植物为主,群落结构简单,生物多样性低,生态系统服务功能严重退化。植被的自然恢复能力因干旱缺水、土壤贫瘠等多重因素而受到极大限制。

(4) 水土流失严重

项目区地形破碎,坡度较大,加之植被覆盖率低,土壤抗蚀性差,导致水土流失严重。在强降雨条件下,地表径流冲刷强烈,进一步加剧了土壤养分流失和土地退化进程。

3. “工程-生物-化学”协同复垦技术体系

基于对项目区生态环境问题的系统诊断,本研究构建并实践了一套针对干旱半干旱采煤沉陷区的“工

程-生物-化学”协同复垦技术体系。该体系以工程技术为基础创造立地条件，以生物技术为核心恢复生态系统功能，以化学与微生物技术为保障快速改善土壤环境，三者协同作用，实现了沉陷区的高效治理与生态重建。

3.1. 工程技术体系

工程技术是沉陷区治理的基础，旨在消除地质灾害、重塑稳定地形并构建基础功能设施。

(1) 地表变形治理

针对地裂缝与塌陷坑，采用分级治理策略：对于小型裂缝采用机械碾压复平；对于中大型裂缝及塌陷坑，则实施“开挖-回填-压实”工艺。工程累计完成裂缝充填及塌陷坑回填土方量共 458.87 万 m³，有效消除了地表变形隐患。

(2) 地形重塑与土壤重构

通过“削高填低”实现挖填方平衡，累计完成土地平整 63.6 万 m³。针对项目区降水特征，实施了“梯田化+内倾式”地形改造：沿等高线修整梯田，田面内倾 5°~8°，配套田坎边坡防护，显著提升了雨水拦蓄效率。同时，实施表土剥离与回覆工程，累计完成挖填方超 200 万 m³，最大限度地保护了土壤资源。

(3) 配套设施建设

修建田间道 5.393 km 与生产路 5.392 km，建设浆砌石排洪沟 218.62 m、谷坊坝 17 座，形成了完善的道路交通与排水防洪系统，为后续土地利用与管护提供了基础设施保障。

3.2. 生物技术体系

生物技术是生态恢复的核心，通过构建适生的植物群落，实现生态系统的自我维持与功能恢复。

(1) 适生植物筛选与配置

Table 1. Characteristics and configuration modes of main suitable plants
表 1. 主要适生植物特性及配置模式

类型	品种	特性	应用场景	种植参数
乔木	油松	耐旱(-30°C)、深根系(2~3 m)	边坡/搬迁旧址	株距 2 m，坑径 0.6 m
灌木	柠条	固氮、抗旱(降水量 200 mm 可存活)	陡坡(>25°)	穴播，穴距 30 cm
草本	紫花苜蓿	改良土壤(根瘤菌)、再生性强	平地复垦区	条播，行距 30 cm
经济作物	油菜	景观效益 + 榨油收益	平整耕地	轮作(油菜-燕麦)

基于对当地气候、土壤条件的深入分析，筛选出油松(*Pinus tabulaeformis*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)和油菜(*Brassica napus*)等极具适生性的植物种，详见表 1 所示。这些植物表现出优异的抗旱、耐瘠薄和耐盐碱特性。

(2) 群落构建与生态功能强化

采用“草灌乔结合、长短效益兼顾”的配置模式，构建了多层次、多功能的复垦植被群落。特别创新了“柠条固氮+苜蓿酸解活化磷素+油菜经济产出”的协同改良模式：柠条通过根瘤固氮每年提供约 180 kg/(hm²·a)；紫花苜蓿分泌有机酸溶解钙积层，释放被固定的磷素；油菜则利用活化后的养分实现经济产出。这种配置不仅加速了土壤改良，还实现了生态与经济效益的双赢。

3.3. 化学与微生物技术体系

化学与微生物技术是快速改善土壤环境的保障，通过外部输入直接调节土壤理化性质和生物活性。

(1) 土壤改良剂应用

针对土壤贫瘠和碱化问题，分期施用精制有机肥(腐熟牛羊粪)，显著提升了土壤有机质含量。对 pH>8.5 的重点区域，施用硫酸亚铁稀释后喷施(浓度 0.5%)，有效降低了土壤碱性。

(2) 微生物菌剂引入

采用枯草芽孢杆菌与根瘤菌复合菌剂，在播种前进行拌种处理。微生物菌剂的引入加速了有机质分解，促进了养分循环，增强了植物抗逆性，为植被快速建立创造了有利的土壤微生态环境。

3.4. 协同机制与实施成效

三大技术体系并非简单叠加，而是形成了有机的协同机制：工程技术为生物技术提供了稳定的立地条件；生物技术通过植被恢复巩固了工程成果并逐步改善土壤；化学与微生物技术则加速并优化了这一改善进程。

4. 工程实施与成效评估

(1) 工程实施概况

本项目采用“分期治理、滚动发展”的实施策略，自 2020 年 5 月至 2022 年底，历时近三年完成了三期综合治理工程。累计治理面积达 631.56 公顷，总投资约 1.58 亿元，形成了完整的沉陷区治理技术体系和应用模式，如表 2 所示。

Table 2. Statistical overview table of the implementation of the three-phase project
表 2. 三期工程实施概况统计表

工程阶段	治理时间	治理面积(hm ²)	投资金额(万元)	主要工程内容
第一期	2020 年	260.8555	6148.44	裂缝充填、耕地复垦、林地建设、村庄搬迁复垦
第二期	2021 年	162.4964	4897.67	土壤重构、植被重建、排水系统工程
第三期	2022 年	208.2100	4731.69	地裂缝填充、土壤培肥、植被优化配置
合计	-	631.5619	15777.80	-

工程实施过程中，创新性地建立了“动态监测 - 精准识别 - 快速治理”的闭环管理机制。通过布设 110 个沉降观测点并结合无人机定期巡查，实现了对治理效果的实时监控和新发地质灾害的快速响应。以 2024 年 5 月监测到的塌陷治理为例，从发现到完成治理仅用时 18 天，体现了该机制的高效性。

(2) 生态效益评估

通过三期工程的系统实施，项目区生态环境得到根本性改善。具体生态效益指标对比如表 3 所示：

Table 3. Comparison of main ecological benefit indicators
表 3. 主要生态效益指标对比

评估指标	治理前	治理后	提升幅度
植被覆盖率	15%	63%	+320%
土壤有机质含量	0.6%	1.8%	+200%
地表径流侵蚀模数 t/(km ² ·a)	5000	800	-84%
土地利用率	42%	89%	+112%

植被恢复方面，累计栽植油松 34,542 株、杨树 29,168 株，穴植柠条 529,506 株，撒播紫花苜蓿与披碱草等草本植物超百公顷，形成了草灌乔结合的稳定植被群落。土壤改良方面，通过增施有机肥 4257.18

吨、施用硫酸亚铁 127.72 吨,并结合微生物菌剂,显著改善了土壤理化性质。水土保持方面,梯田化改造配合植被恢复,使地表径流大幅减少,土壤侵蚀得到有效控制。

(3) 经济效益分析

本工程在取得显著生态效益的同时,也产生了可观的经济效益。复垦耕地共计 4187 亩,通过土地整治新增高标准耕地 800 亩,预计每年可产生农业收益约 1077 万元。同时,通过缩短征地补偿周期、节省工程治理成本等途径,累计可产生间接经济效益 8464 万元。

特别值得一提的是,复垦区打造的“油菜花海”已成为当地的“网红景点”,吸引了大量游客,带动了生态旅游发展,为当地农民创造了新的收入来源,实现了“绿水青山”向“金山银山”的转化。

(4) 社会效益评价

工程的社会效益同样显著。首先,通过系统治理地裂缝与地面塌陷,彻底消除了采空区对矿区及周边村民的生命财产威胁。刘高登村、杏园村的整体搬迁与旧址复垦,让居民远离地质灾害风险区,入住新建的庭院式二层楼房,人居环境得到根本性改善。

其次,项目的实施为当地创造了大量就业岗位,帮助约 100 名员工实现稳定就业,按人均年薪 8.5 万元计算,每年产生的薪资性收入及相关间接效益约为 850 万元。此外,复垦土地的农业利用和旅游开发为当地经济发展注入了新的活力,有效改善了矿群关系,促进了社区和谐稳定。

(5) 技术模式推广价值

本项目形成的“后安模式”模式的实践表明,“工程-生物-化学”协同复垦技术体系特别适用于干旱半干旱矿区的生态修复,其核心创新点——多技术融合的沉陷区稳定性评估体系、本地化植被配置与土壤协同改良技术、动态监测与智能反馈治理机制——为同类地区的生态修复提供了可复制、可推广的技术模板。

参考文献

- [1] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复 30 年: 回顾、反思与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(1): 25-35.
- [2] 卞正富. 我国煤矿区土地复垦与生态重建研究[J]. 资源·产业, 2005, 7(2): 18-24.
- [3] 王月祥, 麻洁琼. 践行“两山”理论的生动样本——山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司坚持绿色发展、积极履行社会责任纪实[J]. 中国煤炭工业, 2022(10): 30-33.
- [4] 张玉梁. 黄土高原矿区土地复垦研究进展[J]. 土壤科学, 2025, 13(3): 125-132.
- [5] 王月祥, 曹俊. 绿色为基生态立企——山西朔州平鲁区后安煤炭有限公司忠实践行“两山”理论、积极履行社会责任纪实[J]. 中国煤炭工业, 2021(9): 40-43.
- [6] 李晋川, 白中科, 柴书杰, 等. 平朔露天煤矿土地复垦与生态重建技术研究[J]. 科技导报, 2009, 27(17): 30-34.