

黄土高原矿区土地复垦研究进展

张玉梁

陕西农业发展集团有限公司榆林分公司, 陕西 西安

收稿日期: 2025年6月15日; 录用日期: 2025年7月8日; 发布日期: 2025年7月16日

摘要

黄土高原作为我国重要的生态屏障和能源基地, 面临水土流失、土地损毁及生态退化等严峻挑战。尽管退耕还林还草等工程显著提升了植被覆盖率并减少了入黄泥沙量, 但仍存在水资源超载、修复模式单一及管护缺失等问题, 导致部分区域陷入“浅绿陷阱”。针对矿区土地复垦, 我国已发展出分层剥离-交错回填、微地形改造及物理-化学-生物协同改良等技术体系, 使复垦土壤有机质含量在3~5年内恢复至采矿前水平的70%以上, 微生物修复技术, 分区治理策略与智慧监测技术进一步推动了生态修复从“工程增绿”向“适水增效”转型。未来需突破耐旱-重金属复合抗性植物培育、优化微生物-植物协同体系, 并建立市场化生态补偿机制和“生态大脑”决策平台, 以实现黄河流域矿区生态系统的长效恢复, 为全球干旱半干旱区土地复垦提供中国方案。

关键词

黄土高原, 土地复垦, 土壤重构, 分区治理, 生态修复

Research Progress on Land Reclamation in Mining Areas of the Loess Plateau

Yuliang Zhang

Shaanxi Agricultural Development Group Co., Ltd. Yulin Branch, Xi'an Shaanxi

Received: Jun. 15th, 2025; accepted: Jul. 8th, 2025; published: Jul. 16th, 2025

Abstract

The Loess Plateau, a critical ecological barrier and energy base in China, faces severe challenges such as soil erosion, land degradation, and ecosystem deterioration. Although initiatives like the Grain for Green program have significantly increased vegetation coverage and reduced sediment flow into the Yellow River, persistent issues like water resource overexploitation, monotonous restoration models, and inadequate post-restoration management have led to a “shallow green trap”

in some regions. For land reclamation in mining areas, China has developed integrated technical systems, including stratified stripping-interlaced backfilling, micro-topographic reconstruction, and physicochemical-biological synergistic remediation. These approaches have restored soil organic matter to over 70% of pre-mining levels within 3~5 years. Advances in microbial remediation, zonal governance strategies, and smart monitoring technologies are further shifting ecological restoration from “engineering-driven greening” to “water-adaptive and efficiency-focused” practices. Future priorities include breeding drought- and heavy metal-resistant plants, optimizing plant-microbe synergies, and establishing market-oriented ecological compensation mechanisms alongside an “ecological brain” decision-making platform. These efforts aim to achieve long-term ecosystem recovery in mining areas across the Yellow River Basin, offering a Chinese paradigm for global arid and semi-arid land reclamation.

Keywords

Loess Plateau, Land Reclamation, Soil Reconstruction, Zonal Governance, Ecological Restoration

Copyright © 2025 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. 土地复垦背景与生态挑战

黄土高原作为全球最大的黄土沉积区(64 万平方公里), 横跨黄河中上游, 是我国生态安全屏障的核心构成。该区域承担着三重战略使命: **水土保持**(历史贡献黄河 90%泥沙量)、**北方风沙防线**(抵御三大沙漠南侵)及**能源农业基地**(煤炭储量占全国 60%, 旱作农业养育人地矛盾突出)。然而, 其先天生态脆弱性与人类活动叠加, 形成系统性危机——土层疏松多孔、抗蚀性弱, 年均土壤侵蚀模数达 5000~15000 吨/平方公里, 露天采矿诱发塌陷、滑坡等地质灾害, 仅陕西黄河流域遗留废弃矿山 388 处, 损毁土地 2650 公顷, 宛如大地“生态疤痕”[1][2]。

1999 年启动的**退耕还林还草工程**虽推动植被覆盖率从 31.6%跃升至 65%, 入黄泥沙量锐减至 2 亿吨/年, 却陷入深层矛盾: (1) **水资源超载**: 人工林蒸散耗水超降雨量 120%, 庆阳小流域监测显示退耕区产水能力下降 90%, 土壤有效水储量仅为自然草地的 54%, 触发“浅绿陷阱”[3]; (2) **修复模式僵化**: 70%项目依赖“梯田+刺槐”单一模式, 陕西榆林人工林区草本多样性不足原生状态 35%, 金钊团队证实其土壤水分消耗量超自然恢复区 3 倍; (3) **系统性治理缺位**: 约 60%复垦工程验收后管护缺失, 导致修复草地 10 年后退化率达 40%[4], 且流域上游生态用水与中下游工农业需水冲突加剧, 2024 年渭河流域爆发用水争端。

面对挑战, 分区治理与技术革新成为破局关键。周卫健院士提出“塬区固沟保塬, 坡面退耕还林还草, 沟道拦蓄整地, 沙区固沙还灌草”的 26 字方略[5], 将高原划分为三大单元差异化施策: 黄土塬区聚焦雨洪积蓄(塬面保护率 >42%), 丘陵沟壑区推行梯田-坝系联动(沟坡治理率 >30%), 风沙区实施草方格固沙(沙化治理 >36%)。同步发展的智慧化技术——如甘肃构建的“天-空-地监测网”(遥感识别精度 $0.25\text{ m}^2 + 50$ 参数实时回传)和微生物驱动修复(接种 AM 真菌使沙棘成活率从 45%提至 82%)——正推动治理范式从“工程增绿”向“适水增效”转型, 为全球干旱半干旱区生态修复提供中国方案[6]。我国矿区土地复垦研究始于 20 世纪 80 年代, 经过四十余年的发展, 已从最初的简单覆土绿化逐步发展为涵盖土壤修复、植被重建、生态功能恢复等多维度的系统性工程。随着《土地复垦条例》(2011 年)和《土壤污染防治法》(2019 年)等法规政策的实施, 我国矿区土地复垦工作逐步走向规范化、科学化。在实践过

程中，针对不同矿区的生态环境特点，国内学者和工程技术人员探索出一系列具有中国特色的复垦技术和管理模式，取得了显著成效，但仍面临诸多挑战。

2. 土地复垦与改良技术

2.1. 土壤重构与改良技术研究进展

土壤重构是矿区土地复垦的基础环节。我国学者针对不同类型的矿山破坏特征，研发了多种土壤重构技术。对于露天煤矿，普遍采用“分层剥离、交错回填”的工艺，将表土、心土、底土分别堆放，回填时按原土层顺序恢复。在山西平朔安太堡露天煤矿的复垦实践中，该技术使得复垦土壤的有机质含量在5年内从不足5 g/kg 提升到15 g/kg 以上[7]。

(1) 表土层保护与重构技术

表土层保护作为土壤重构的首要环节，已形成“分层剥离 - 分类贮存 - 定向回填”的技术体系。山西平朔露天煤矿的工程实践表明，采用该技术体系可使复垦土壤有机质含量在3~5年内恢复至采矿前水平的70%以上[8]。关键技术参数包括：剥离厚度控制在30~50 cm，贮存期不超过6个月，堆放坡度小于30°，并通过添加秸秆等覆盖物维持土壤微生物活性。在回填过程中，采用渐进式分层压实工艺，确保土壤容重维持在1.25~1.35 g/cm³ 的最佳范围。

(2) 土壤剖面重构技术

针对露天矿区采用“心土 - 过渡层 - 表土”的逆向回填工艺，通过振动压实(压实度85%~90%)与自然沉降相结合的方式重建土壤剖面；井工矿沉陷区实施“挖深垫浅”立体修复，重点考虑地下水位恢复与土壤层次配置；尾矿库区构建“客土层(≥50 cm) - 隔离层 - 改良层”复合结构，采用土工格栅等新型材料阻隔重金属迁移[9]。

(3) 微地形改造技术

Table 1. Comparison of advantages and disadvantages of different reclamation techniques

表 1. 各复垦技术优缺点比较

技术类型	优点	缺点
物理复垦技术 (地形重塑、客土回填等)	1. 见效快(3~6 个月完成基础修复) 2. 技术成熟，标准化程度高 3. 适用于各类矿区条件 4. 可快速控制水土流失(减少 70%以上)	1. 成本高(1.5~3 万元/亩) 2. 仅改善表层土壤(0~50 cm) 3. 需大型机械设备支持 4. 生态功能恢复有限
化学改良技术 (钝化剂、调理剂等)	1. 针对性强(可同步改良 pH 和重金属) 2. 效果持久(5~8 年) 3. 适合大面积快速应用	1. 可能产生二次污染 2. 破坏土壤微生物平衡 3. 需定期补充药剂 4. 受气候条件影响大
生物修复技术 (植物/微生物修复)	1. 生态友好无污染 2. 成本较低(0.3~0.8 万元/亩) 3. 可持续改善土壤质量 4. 促进生物多样性	1. 见效慢(3~5 年) 2. 受环境条件限制 3. 技术要求高 4. 需长期管护
综合复垦技术 (物理 + 化学 + 生物)	1. 修复效果最优 2. 兼顾短期和长期效益 3. 适应复杂修复需求	1. 成本最高(2~5 万元/亩) 2. 技术复杂度高 3. 管理难度大

现代微地形改造技术已从经验设计发展为基于生态水文学的精细化设计体系。通过耦合数字地形分析(DTA)与水文过程模型(如 SWAT)，可实现径流路径的精准预测与调控。研究表明，采用0.5 m × 0.5 m 高精度 DEM 数据建立的微地形模型，可使径流调控效率提升15%~20% [10]。最新发展的机器学习算法

能够自动优化微地形单元的空间配置,在陕北某矿区应用中使水土保持效益提高 25%。近年来涌现出多种创新性微地形结构:①“阶梯-洼地”复合系统:通过交替布置蓄水单元(直径 1~1.5 m,深 0.6 m)与种植带,形成局域水循环系统;②螺旋式导流槽:采用对数螺旋线设计,有效延长径流路径 3~5 倍;③智能渗蓄系统:植入土壤湿度传感器与可控排水装置,实现动态水分调控。现场监测显示,这些新型结构使植被恢复周期缩短 30%~40%。各类技术优缺点见表 1。

2.2. 土壤改良技术

2.2.1. 国内矿区复垦土地改良研究进展

中国作为典型的人均耕地资源匮乏国家,农业用地需求压力显著高于国际平均水平。这一特殊国情决定了我国土地复垦工作具有双重使命:既要实现矿区生态修复,更需确保复垦耕地的质量提升,体现对土地资源的集约化利用理念。

在矿区土地复垦研究领域,我国起步较晚但发展迅速。20 世纪 50 年代末的初步探索阶段,土地复垦率尚不足 1%。直至 80 年代,随着《土地复垦规定》和《环境保护法》的相继颁布,复垦率在十年间跃升至 12%,标志着该领域研究进入快速发展期。1999 年《土地管理法》的实施进一步强化了耕地保护制度,而 2011 年《土地复垦条例》的出台则推动了复垦工作的科学化、规范化进程。2019 年《固体废物污染环境防治法》修订草案的通过,将清洁生产和循环经济理念纳入矿区环境治理体系。面对土地资源约束,我国创新性地采用了“超前式治理”模式,通过补偿设计机制对采矿塌陷区进行综合治理。值得注意的是,采矿活动会显著破坏区域碳平衡,在“双碳”战略目标驱动下,学界围绕矿区低碳土地利用、碳源构成及减排策略等方向展开了系统性研究。2012 年启动的中德低碳土地利用合作项目,为我国生态型土地整治提供了重要借鉴。当前矿区治理已形成“四少一多”(少占地、少损毁、少排放、多造地、多碳汇)的新型发展范式。

从 20 世纪末单一的耕地恢复,到如今融合生态农业、景观旅游、碳汇功能等多元目标的综合复垦模式,我国矿区治理理念实现了质的飞跃。在技术层面,已形成物理、化学、生物及联合改良等系统化土壤重构方法体系,RS/GIS/GPS 等现代技术也逐步应用于露天煤矿改良实践。尽管取得显著进展,但在基础理论认知、技术标准体系、资金保障机制、核心技术研发等方面仍存在提升空间,亟待通过多学科交叉创新实现突破。

2.2.2. 改良技术

矿区土壤复垦改良技术是矿区生态修复的核心环节,其技术体系已从单一的物理改良发展为物理-化学-生物协同的综合性改良方案。在物理改良方面,主要通过机械深松、容重调控和微地形重塑等技术改善土壤结构特性。研究表明^[11],采用振动式深松机(作业深度 60~80 cm)配合有机物料回填,可使土壤孔隙度显著提高 35%~50%,有效改善土壤的通气透水性。在化学改良方面,针对矿区土壤普遍存在的酸化、盐渍化和重金属污染等问题,开发了复合调理剂、缓释型改良剂和纳米材料等新型改良产品。其中,以工业副产物为主体的多功能调理剂(施用 3~5 t/ha)可同步调节土壤 pH 值(改良幅度 1.5~2.0 个单位)和钝化重金属(有效态降低 40%~60%),展现出良好的应用效果。生物改良技术则通过引入功能微生物、超富集植物和土壤动物等生物因子,重建土壤生态系统。例如,筛选出的重金属耐受菌 *Pseudomonas putida* CZ1 配合生物炭载体,可使土壤酶活性提高 2~3 倍,显著促进养分转化。

当前矿区土壤复垦改良正朝着技术集成和智能化的方向发展。一方面,通过整合“土-水-植”协同改良系统,实现土壤理化性质、水分状况和植被群落的同步改善。山西某矿区的实践表明,该集成技术可在 3 年内使土壤生产力恢复至农田水平的 90%。另一方面,基于物联网的智能监测平台可实时监测土壤 pH 值、EC、重金属含量等关键指标,为精准改良提供数据支撑。此外,矿区固体废弃物的资源化

利用也成为研究热点,如开发的煤矸石-污泥-秸秆复合改良剂,既解决了固废处置问题,又将改良成本降低了30%~40% [12]。然而,矿区土壤复垦改良仍面临长期效果维持、极端气候适应性和经济可行性等挑战。未来研究应重点关注智能响应型改良材料的研发、微生物组定向调控技术的优化以及全生命周期评价体系的建立,以推动矿区土壤改良技术向更高效、更精准的方向发展。

(1) 物理改良

在矿区生态修复实践中,物理改良技术因其普适性强、操作简便等优势,成为各类矿区土地复垦的基础性措施。作为土壤重构的关键环节,该方法通过改变基质的物理性状,不仅直接决定着复垦区的地形地貌特征,还对后续生态系统的演替方向产生深远影响。

当前主流的物理改良技术体系包括表土回填、基质覆盖、场地平整及固化处理等方法。这些技术能迅速改善土壤结构,有效阻隔污染物扩散,并为植被重建创造有利的生长环境。然而,其应用存在明显的局限性:一方面处理效率与成本效益比偏低,难以满足大规模污染场地的治理需求;另一方面无法实现矿区土壤资源的价值化利用。在众多物理改良方法中,分层表土回填技术因其显著的生态效益而得到广泛应用。该技术要求采矿前系统剥离并保存0~60 cm的原位表土(分0~30 cm和30~60 cm两层),待开采完成后进行精准回填,从而最大限度保留土壤生物群落和肥力特征。表土回填对控制风蚀水蚀、促进植被恢复具有显著效果。通过对比实验证实,10~30 cm的回填厚度即可显著提升植被覆盖度;15 cm的回填层已能满足基本生态修复需求。值得注意的是,该技术在应用中面临诸多挑战:复杂的施工流程(涉及表土剥离、临时贮存及二次转运等环节)导致管理成本居高不下;对于山区矿区而言,土源短缺问题尤为突出,部分企业不得不采用异地客土覆盖方案,进一步增加了运输成本。这些因素严重制约了技术的推广适用性。从系统工程角度看,物理改良技术主要致力于实现三大目标:(1) 建立有效的侵蚀防控体系;(2) 在改善土壤结构的同时缓解压实胁迫;(3) 构建适合生态重建的基础环境条件。这些目标的达成,为后续化学-生物联合修复奠定了必要的物理基础。

(2) 化学改良

化学改良技术作为矿区土壤修复的重要手段,其核心在于通过外源添加物的调控作用,重建受损土壤的化学平衡体系。该技术主要针对矿区土壤普遍存在的三大问题:酸碱失衡、重金属毒害和养分匮乏,通过定向调节土壤pH值、钝化重金属活性以及补充营养元素等途径,为植被重建创造适宜的化学环境。

在改良材料选择方面,已形成有机-无机复合改良体系。无机改良剂以石灰、粉煤灰、磷酸盐等为代表,其中石灰因其显著的酸性中和与重金属钝化双重功效,在氧化型矿区应用尤为广泛。然而,在强酸性环境中,石灰存在溶解流失的问题,导致改良效果持续性不足。相比之下,有机改良材料(如生物固体、腐熟堆肥、绿肥等)不仅能调节土壤理化性质,还可通过改善土壤团粒结构、增强微生物活性等途径实现长效改良。值得注意的是,近年研究发现,将生物炭与传统改良剂复合使用,可显著提高重金属固定化效率,并减少营养元素的淋失损失。从作用机理看,这些改良材料主要通过三种途径发挥作用:(1) 离子交换与沉淀反应,如磷酸盐与重金属形成难溶性化合物;(2) 表面络合作用,通过功能基团固定重金属离子;(3) 缓冲体系构建,维持土壤pH值稳定。实践表明,针对不同类型矿区土壤(如酸性矿渣、碱性粉煤灰等),需要采用差异化的改良剂组合方案,才能实现最佳的生态修复效果。这也对改良材料的筛选与配比优化提出了更高要求。

(3) 生物改良

在矿区生态修复领域,生物改良技术因其环境友好性和可持续性优势日益受到重视。该技术体系主要包含四个维度的改良策略:土壤动物调控、植物修复、微生物活化以及植物-微生物协同修复,形成了多层次的生物修复网络(图1)。

土壤动物在矿区改良中扮演着关键角色,尤其是蚯蚓等大型土壤动物通过其独特的生态功能促进系

统恢复。蚯蚓活动不仅能优化矿区土壤的物理结构(如增加孔隙度和透气性),还能通过生物富集作用降低重金属活性,同时加速有机质循环,显著提升表层土壤肥力。这种生物驱动过程为矿区生态系统的功能重建提供了自然解决方案。植物修复技术展现出独特的生态价值,其通过三种机制实现污染治理:(1) 植物提取——直接吸收转移污染物;(2) 根系固定——抑制污染物扩散;(3) 降解转化——分解有机污染物。这种绿色修复方式不仅成本效益显著,还能同步实现碳汇功能和景观重建。最新研究证实,适生植物能有效提升矿区土壤有机质含量达 30%~50%,并显著改善微生物群落结构。

特别值得关注的是植物-微生物共生体系在尾矿治理中的应用突破。某些超富集植物与根际微生物形成协同代谢网络,可将重金属解毒效率提升 40%以上。这种生物联合修复模式代表了矿区污染治理的新方向,其核心在于构建自维持的生态循环系统,而非简单的污染物转移。随着合成生物学的发展,定制化生物修复组合将成为未来研究重点。

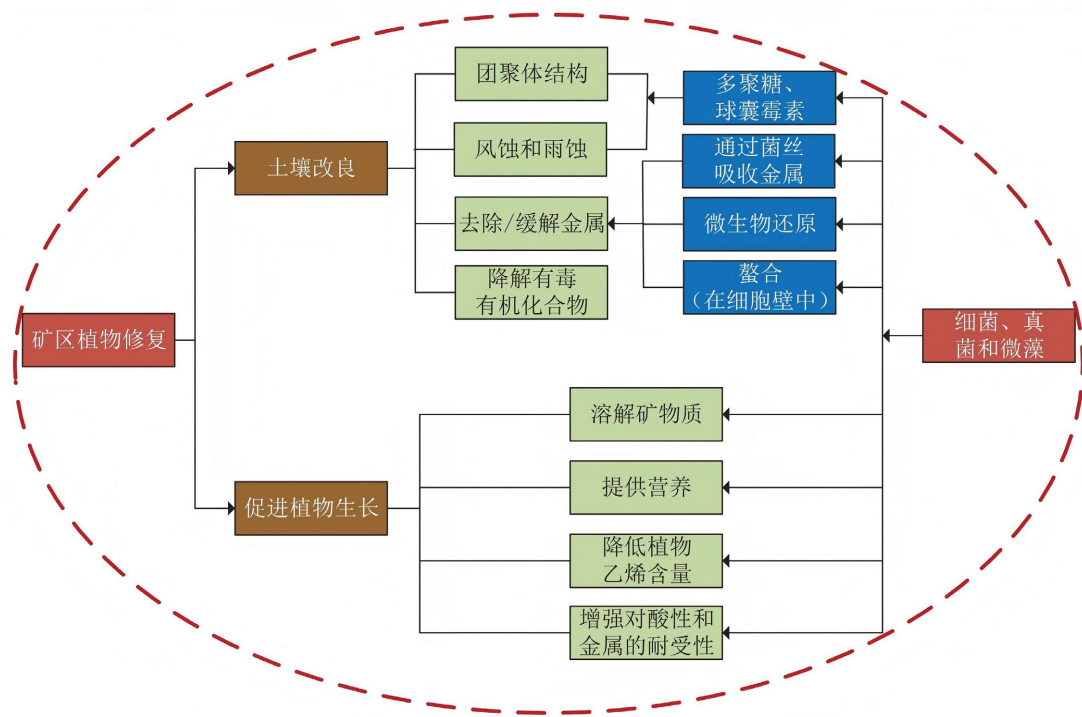


Figure 1. Contribution of microorganisms to the phytoremediation of mine tailings[13]
图 1. 微生物对尾矿植物修复的贡献[13]

(4) 联合改良

矿区土壤污染治理面临多重挑战: 污染程度差异大、理化性质复杂、修复目标多元。针对这一现状, 单一修复技术往往存在明显局限性, 难以同时实现经济性、高效性和可持续性的统一。为此, 我国矿区生态修复正逐步建立起“多技术协同、分阶段治理”的新型技术范式, 通过不同修复技术的有机整合, 形成系统化解决方案。

当前主流的联合修复技术体系主要包括以下四类: (1) 化学-生物协同系统: 将化学稳定化与生物降解有机结合; (2) 物理-化学复合技术: 实现基质重构与污染物固定的协同; (3) 微生物-植物共生体系: 强化根际微域修复功能; (4) 工程-生态联合方案: 整合物理阻隔与生物修复优势。在这些技术组合中, 化学-植物联合修复展现出独特优势。其核心技术路径包括: 首先采用环境友好型改良剂(如海泡石、沸石等)进行原位稳定化处理。研究表明, 这类矿物材料能显著提升植物修复效率, 如苏银萍[14]发现海泡

石可使短毛蓼对 Mn 的富集效率提升 35%以上。王静雯团队[15]则证实, 适量 EDTA 的添加能增强鱼腥草对多种重金属的复合富集能力, 其中对 Pb 的富集系数可提高 2~3 倍。微生物-植物联合修复则通过三重机制发挥作用: (1) 微生物代谢改变重金属赋存形态; (2) 根际微环境调控提升污染物生物有效性; (3) 植物-微生物协同降解有机污染物。Zhu 等[16]的田间试验表明, 将 DDT 降解菌与东南景天联用, 可使复合污染土壤中 Cd 和 DDT 的去除率分别达到 31.1%和 53.6%。这种生物协同效应主要源于微生物对植物生长的促进作用及其对污染物的转化能力。最新研究发现, 特定功能微生物(如植物促生菌、重金属抗性菌等)可通过分泌植物激素、产生铁载体等途径, 显著提升修复植物的生物量和抗逆性[17]。这些联合修复技术的创新应用, 为矿区污染治理提供了“稳定-去除-恢复”的系统解决方案, 既确保了短期风险管控, 又实现了长期生态重建, 展现出良好的应用前景。各类改良技术的优缺点见表 2。

Table 2. Comparison of soil improvement techniques
表 2. 土壤改良技术比较

改良技术	主要方法	优点	缺点	适用场景
物理改良	1. 客土置换	1. 见效快(3~6 个月)	1. 成本较高(1~2 万元/亩)	1. 急需恢复生产的矿区
	2. 深耕松土	2. 直接改善土壤结构	2. 治标不治本	2. 表层土壤严重破坏区域
	3. 有机物料添加	3. 技术简单易操作	3. 可能破坏原有生态系统	
化学改良	1. 酸碱调节剂	1. 针对性强	1. 可能产生二次污染	1. 重金属污染土壤
	2. 钝化剂	2. 效果显著(重金属钝化率 40~70%)	2. 需定期施用	2. 酸碱失衡土壤
	3. 复合改良剂	3. 适合大面积应用	3. 影响土壤微生物	
生物改良	1. 植物修复	1. 生态友好	1. 见效慢(2~5 年)	1. 长期修复项目
	2. 微生物修复	2. 成本低(0.2~0.5 万元/亩)	2. 技术要求高	2. 生态敏感区
	3. 土壤动物引入	3. 可持续改良	3. 受气候影响大	
联合改良	物理 + 化学 + 生物组合	1. 综合效果最好 2. 长短效益兼顾 3. 适用范围广	1. 成本最高(2~4 万元/亩) 2. 技术复杂 3. 管理难度大	

3. 结论与展望

黄土高原矿区土地复垦研究经过多年探索, 已形成系统化的技术体系与治理模式, 取得了显著成效。在技术层面, 基于周卫健院士提出的“26 字方略”构建的分区治理框架成效显著, 微生物修复技术使沙棘成活率提升至 82%, 空天地一体化监测网络实现了复垦工程的数字化管控; 在政策实践方面, 山水工程累计投资 35 亿元治理矿山 112 座, “光伏 + 修复”模式使土地收益达到传统农业的 8 倍, 展现了良好的生态经济效益。这些成果为黄土高原矿区生态修复提供了重要的理论支撑和实践范例。

展望未来, 黄土高原矿区土地复垦研究仍需在多个方面持续深化。技术研发应着力突破耐旱-重金属复合抗性植物培育、微生物-植物协同修复体系优化等关键难题; 机制创新需重点建立市场化生态补偿和完善长效管护制度; 智慧化发展要加快构建矿区“生态大脑”决策平台, 推动数字孪生等新技术应用; 区域协作则应建立黄河流域复垦协同机制, 积极参与制定国际矿区修复标准。随着“山水林田湖草沙”一体化治理理念的深入实践, 黄土高原矿区复垦必将从单一技术攻关迈向系统治理新阶段, 为全球资源型地区生态修复贡献更多中国智慧和方案。这一过程不仅将改善区域生态环境, 更将为资源开发与生态保护的协调发展探索出新路径。

参考文献

[1] 张强, 邵明安. 黄土高原土壤侵蚀与生态重建[J]. 生态学报, 2021, 41(3): 789-800.
[2] 国家统计局. 中国能源统计年鉴 2023[M]. 北京: 中国统计出版社, 2023.

- [3] 张光辉, 刘国彬. 黄土高原植被恢复的土壤水分效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 1-10.
- [4] 金钊, 邵明安. 黄土高原人工林水分利用与生态效应[J]. 生态学报, 2022, 42(5): 1678-1689.
- [5] 周卫健. 黄土高原生态修复分区治理理论与技术体系[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [6] 李新荣, 赵文智. 干旱区微生物生态修复技术及应用[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(8): 1021-1034.
- [7] 胡振琪, 肖武. 中国矿区土地复垦技术进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(4): 1489-1503.
- [8] Shrestha, R.K. and Lal, R. (2021) Carbon Sequestration in Reclaimed Mine Soils. *Critical Reviews in Plant Sciences*, **40**, 243-279.
- [9] Hu, Z. and Xiao, W. (2022) Key Technologies for Land Reclamation in Opencast Coal Mines of China. *International Journal of Coal Science & Technology*, **9**, 1-15.
- [10] Chen, Y., Li, X. and Liu, X. (2023) High-Resolution Digital Terrain Analysis for Micro-Topography Design in Mining Areas. *Journal of Hydrology*, **617**, Article ID: 129035.
- [11] Zhang, W., Hu, Z.Q., et al. (2023) Effects of Subsoiling Depth and Organic Amendment on Soil Physical Properties in Reclaimed Mine Soils. *Land Degradation & Development*, **34**, 456-470.
- [12] Chen, Y., Liu, G., et al. (2023) Pseudomonas Putida CZ1-Loaded Biochar Enhances Enzyme Activities and Nutrient Cycling in Reclaimed Soils. *Applied Soil Ecology*, **181**, Article ID: 104642.
- [13] 赵鹏, 史兴萍, 尚卿, 等. 矿区复垦地土壤改良研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 1-14.
- [14] 苏银萍. 改良剂及肥料对短毛蓼修复 Mn 污染土壤的影响[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 广西师范大学, 2014.
- [15] 王静雯, 伍钧, 郑钦月, 等. EDTA 对鱼腥草修复铅锌矿区重金属复合污染土壤的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 62-66.
- [16] Zhu, Z., Yang, X., Wang, K., Huang, H., Zhang, X., Fang, H., et al. (2012) Bioremediation of Cd-DDT Co-Contaminated Soil Using the Cd-Hyperaccumulator Sedum Alfredii and DDT-Degrading Microbes. *Journal of Hazardous Materials*, **235**, 144-151. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.033>
- [17] Cao, X.F. and Liu, L.P. (2015) Using Microorganisms to Facilitate Phytoremediation in Mine Tailings with Multi Heavy Metals. *Advanced Materials Research*, **1094**, 437-440. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1094.437>