采煤沉陷区水土环境演化与复垦生态效应评估研究

王海东

山西金地源地质科技有限公司　山西　晋中　030600

摘　要：煤炭资源长期高强度开采造成大面积地表沉陷，改变矿区原有水土资源格局，引发土壤退化、水体污染、生态系统破碎等一系列环境问题，严重制约矿区生态可持续发展。本文聚焦采煤沉陷区水土环境演变特征，系统梳理区域生态受损核心问题，搭建多维度生态效应评估体系，量化分析土地复垦工程的修复成效。研究表明，采煤沉陷的地质扰动会造成水土环境系统性退化，标准化复垦治理可有效修复水土结构、恢复生态功能、提升区域环境承载力。研究对矿区沉陷治理、水土生态修复及土地复垦工程建设具有重要应用价值。

关键词：采煤沉陷区；水土环境；环境演化；土地复垦；生态效应评估

引言

煤炭是我国工业发展的主体能源，长期资源开采形成的大面积沉陷区，持续破坏区域地形地貌与水土生态结构，造成土地闲置、水质恶化、生物多样性锐减等问题，矿区生态修复压力持续增大。本文结合矿区生态治理实际现状，围绕沉陷区水土环境演化规律与复垦修复效果展开研究，通过问题剖析与效应评估，探索科学的矿区生态修复路径，对采煤沉陷区综合治理体系的完善有着积极作用。

1 采煤沉陷区水土环境与复垦概述

1.1 采煤沉陷区形成机制

煤炭地下开采会打破地下岩体原始应力平衡，煤层采空后上覆岩层失去支撑，逐步发生垮落、断裂与弯曲沉降，自下而上形成垮落带、裂隙带与弯曲下沉带，岩层变形持续向地表传导，引发不均匀沉降、地表开裂与局部塌陷，最终形成不同规模的采煤沉陷区。沉陷发育状态受煤层赋存条件、开采工艺、地质结构及开采年限等多重因素制约，浅埋深、厚煤层及高强度机械化开采区域沉陷发育更快、破坏范围更大，地质构造复杂、岩体稳定性差的矿区易出现不规则沉陷，进一步加剧地表地貌破碎化。从发育周期来看，采煤沉陷可划分为活跃期、稳定期与自然恢复期，开采作业阶段地表变形剧烈、水土环境破坏严重，停采后岩体应力逐步重组，地表变形趋于稳定，而单纯依靠自然风化、泥沙沉积与植被演替的修复过程周期漫长、效果有限，难以彻底恢复原有生态功能，必须通过人工复垦干预提升矿区生态修复效率与整体质量。

1.2 沉陷区水土环境基本特征

水土环境是矿区生态系统的核心载体，采煤沉陷带来的地质扰动会全面改变区域水土资源空间分布与理化属性，从土壤与水体两大维度造成持续性生态损伤。地质塌陷与地表裂缝会破坏完整土壤剖面，造成耕作层土体流失、生土裸露，打乱原有土壤结构，使得土壤容重提升、孔隙度减小，透水保水能力大幅弱化，无法满足植被生长基本需求。破碎地形还会加剧降雨冲刷，引发大面积水土流失，造成土壤有机质及各类养分持续流失，土壤肥力逐年衰退，低洼积水区域易产生盐分累积，诱发土壤盐碱化与板结，彻底损毁土地生产价值[1]。同时，沉陷变形会破坏区域水利设施与径流体系，水系连通性断裂，造成局部干旱与局部内涝并存，地下裂隙形成渗漏通道导致地下水位下降、水资源锐减，滞水水体自净能力不足，各类污染物持续富集，引发水质恶化、水生生态退化。

1.3 采煤沉陷区复垦治理内涵与类型

采煤沉陷区土地复垦是矿区生态修复的核心举措，依托工程整治、土壤改良、生态修复等多元技术手段，对受损沉陷土地与破损水土环境开展系统性治理，能够有效恢复土地利用功能与生态系统稳定性，缓解区域土地闲置、生态退化、水土污染等突出问题，统筹提升土地资源价值与生态服务水平，实现生态、经济与社会效益协同发展，助力矿区绿色可持续转型。结合治理目标与土地利用方向，沉陷区复垦可分为三类，其中生态复垦多用于重度沉陷、耕作价值较低的区域，依靠地形平整、植被重建等措施重构矿区生态系统；农业复垦针对轻、中度沉陷耕地，通过水土整治修复耕地生产能力，稳固区域耕地资源储备；建设用地复垦集中在城镇与交

通沿线区域，通过地基加固、环境整治等手段改造破损土地，实现沉陷土地资源的高效资源化再利用。

2 采煤沉陷区水土环境与复垦现存问题分析

2.1 水土环境演化引发的核心问题

长期采煤沉陷扰动会诱发矿区水土环境持续性退化与生态系统损伤，是制约矿区生态修复的核心瓶颈。地质塌陷破坏了土壤剖面完整结构，造成表层耕作土流失、土壤理化性质恶化，土体保水保肥能力下降，在水土流失与次生盐碱化的叠加影响下，土地肥力与生产能力持续衰退，土壤贫瘠化问题逐年加剧。同时，采煤活动产生的重金属不断在土壤中富集，形成长期隐蔽性污染，抑制植被生长并通过食物链传播，带来较大生态安全风险。沉陷变形同时破坏区域水系格局，造成地表水网断裂、水系连通性失效，水资源空间分配失衡，区域干旱与内涝问题交替出现，地下裂隙引发的渗漏问题导致地下水位下降、水资源储量锐减，静态滞水区域污染物持续累积，水体各项指标超标，水质持续恶化，彻底破坏水生态系统平衡。水土环境的全面退化进一步造成原生植被消亡、植被覆盖度降低、群落结构单一，动植物栖息地受损导致生物多样性流失，生态链条断裂，系统自我修复能力大幅丧失，若无人工复垦干预，矿区生态退化趋势将持续加剧且无法自然逆转。

2.2 沉陷区复垦治理工作现存短板

当前采煤沉陷区复垦治理工作整体存在规划不完善、技术体系不成熟、管护机制不健全等诸多短板，严重影响矿区生态修复整体质量。多数地区的复垦治理缺乏全域统筹规划，普遍存在治理碎片化、模式同质化的问题，多针对局部破损区域开展整改，未结合区域沉陷特征、水土受损情况与资源条件制定差异化方案，照搬通用治理模式的现象较为普遍，忽视地域气候、地质及生态差异，导致复垦措施适配性不足。同时，治理工作普遍重工程表层整治、轻深层次生态修复，忽视水土协同治理与生态系统重构。此外，现有复垦技术精准化与集成度不足，缺少分级分类的适配技术体系，传统治理手段难以应对不同等级沉陷区的污染与退化问题，复合型生态修复技术应用不足，造成土壤恢复缓慢、植被存活不稳、水质改善效果有限等问题。复垦工程还普遍存在重建设、轻管护的现象，常态化水土监测、植被养护、生态运维机制缺失，监管制度不完善，极易出现生态退化反弹、人为破坏等问题，导致复垦成果难以长期维持，投入与实际生态效益无法匹配。

2.3 水土环境监测体系存在不足

采煤沉陷区水土环境动态监测是复垦治理成效研判的基础，但现阶段监测体系建设滞后，难以支撑复垦工程全过程管控。很多矿区监测点位布设较为随意，点位密度不足，未能依据沉陷分区、水土受损程度进行差异化布设，监测数据空间代表性偏弱。监测指标选择较为单一，大多只监测基础土壤理化指标与常规水质参数，对重金属迁移、土壤微生物群落、地下水长期动态变化等指标监测频次不足，难以完整捕捉水土环境演化过程[2]。监测周期安排不合理，多数项目仅在工程竣工前后开展短期采样检测，缺少长时序连续性监测，无法识别水土环境缓慢变化以及复垦后期潜在污染反弹风险。同时监测数据共享机制缺失，监测资料分散在不同部门，数据整合分析难度大，难以把监测结果反馈到复垦方案调整中，降低监测数据对生态治理的支撑作用。

3 采煤沉陷区复垦生态效应评估研究

3.1 生态效应评估体系构建

结合采煤沉陷区水土环境演化规律与复垦治理核心目标，本次研究遵循科学性、系统性、可操作性原则，从水土环境修复、植被生态恢复、生态功能提升、社会效益改善四个维度搭建多层次、全方位的复垦生态效应评估体系，体系共选取 12 项核心量化指标，其中水土环境维度涵盖土壤肥力、土壤侵蚀强度、水体水质、地下水水位，植被生态维度包含植被覆盖度、群落丰富度、植被存活率，生态功能维度包括生态涵养能力、生物多样性、土地利用率，社会效益维度涵盖区域生态稳定性、土地资源承载力，可全面覆盖复垦治理的核心修复内容，研究整体采用定量与定性相结合的分析方法，通过野外实地采样、实验室检测、遥感影像解译、数据统计分析等方式获取各项指标原始数据，运用层次分析法科学界定各指标权重，结合综合评分法计算生态效应综合分值，将修复成效划分为优秀、良好、一般、较差四个等级，能够精准量化判定复垦工程的实际修复水平，切实保障评估结果客观、精准、贴合矿区实际。

3.2 复垦水土环境修复效应评估

水土环境修复是采煤沉陷区复垦工程的核心成效，直接决定矿区生态恢复的整体质量，大量矿区治理实践数据表明，标准化、系统化的复垦工程可有效逆转水土环境退化趋势。土地平整、土方回填等工程措施能够修复破损的土壤剖面，恢复土层结构完整性，有效降低地表土壤侵蚀强度，从源头遏制水土流失问题，土壤改良、有机肥施加、生态固土等修复手段可有效优化土壤孔隙度、酸碱度等理化性质，提升土壤有机质与养分含量，多数复垦区域土壤肥力较治理前提升 30%~60%，

土壤板结、盐碱化等突出问题得到有效缓解[3]。与此同时，水系疏通、坑塘整治、生态护坡等水环境治理措施能够重构区域地表径流体系，恢复水系连通性，彻底解决局部内涝、局部干旱的水资源失衡问题，水体生态净化、污染源管控等措施可有效降解水体中重金属、有机物等污染物，提升水体透明度与自净能力，复垦后区域地表水、地下水水质可提升 1 至 2 个等级，满足生态用水与农业灌溉用水标准，地下渗漏通道的封堵修复也能有效遏制地下水资源流失，促使地下水位稳步回升，显著提升区域水资源涵养能力，实现矿区水土环境的系统性改善。

3.3 复垦植被与生物生态效应评估

植被重建与生物多样性恢复是生态复垦的核心目标，也是生态修复成效最直观的体现，复垦治理过程中通过筛选本土耐旱、耐贫瘠、抗污染的优质植被品种，构建乔灌草复合型立体植被群落，能够快速实现裸露土地绿化覆盖，大幅提升区域植被覆盖度，相关统计数据表明，完成系统化生态复垦的矿区植被覆盖度较治理前提升 40%~70%，彻底改善了地表裸露、植被稀疏的生态现状，且相较于单一植被种植模式，复合型植被群落具备更强的结构稳定性与环境适配性，可有效规避后期植被大面积退化、枯萎等问题，保障植被生态系统长效稳定[4]。植被生态环境的持续优化能够为区域动植物营造良好的栖息繁衍空间，有效推动矿区生物多样性恢复，复垦治理后矿区各类草木植物物种不断丰富，昆虫、鸟类及小型哺乳动物种群逐步回归栖息地，有效修复了断裂的生态链与食物链，持续增强生态系统自我调节能力，同时植被发达的根系可长期发挥固土保水、涵养水源的作用，持续巩固水土修复成效，形成水土改善、植被恢复、生态提质的良性循环，推动沉陷区生态系统逐步向健康稳定的原生生态状态稳步演替。

3.4 复垦综合生态效益与优化方向

综合评估结果表明，科学规范的土地复垦工程可实现矿区生态、资源、社会效益的协同提升，在生态层面能够彻底扭转水土退化、生态破碎化的发展趋势，重构稳定健康的矿区生态系统，有效降低水土流失、地质灾害、水土污染等生态风险，在资源层面可盘活大量闲置破损的沉陷土地，恢复土地生产、生态涵养、景观服务等功能，显著提升区域土地与水资源利用效率，在社会层面能够有效改善矿区恶劣的人居生态环境，推动矿区产业绿色转型，为区域生态文明建设与可持续发展提供坚实支撑，同时当前矿区复垦治理依旧存在精细化不足、技术适配性弱、管护机制不完善等短板[5]。因此未来沉陷区生态治理需聚焦精准化、系统化、长效化发展方向，依据沉陷等级与水土受损特征制定差异化治理方案，实现分类施策与精准修复，持续推进生态修复技术创新，推动工程治理与生物修复技术深度融合，全面提升水土污染治理与生态重构质量，建立常态化水土监测、植被养护、成果监管机制，稳固筑牢复垦治理成果，持续推动采煤沉陷区水土生态环境实现高质量修复。

结束语

综上所述，煤炭开采引发的地表沉陷会扰动地下地质结构，诱发土壤退化、水体污染、生态系统破碎等一系列水土环境问题，严重破坏矿区生态平衡，制约区域长远发展。土地复垦是沉陷区生态治理的核心手段，可有效修复破损水土环境、重建植被群落、恢复区域生态功能，具备显著的综合生态效益。通过系统分析沉陷区水土演化规律与复垦治理短板，搭建科学的生态效应评估体系，明确了精准复垦的治理价值。未来需持续优化复垦模式、完善技术与管护体系，实现采煤沉陷区水土生态的长效修复与资源可持续利用。

参考文献

[1] 张地伟, 韩金伟. 采煤沉陷区水土资源评价及生态修复技术实践研究 [J]. 煤炭技术,2024,43(6):120-124.

[2] 袁亮, 徐良骥. 高潜水位采煤沉陷区资源化、能源化、功能化利用构想与实践 [J]. 煤炭学报,2024,49(1):65-74.

[3] 张如光. 采煤沉陷区矿山地质环境生态修复方法和绿化方案浅析 [J]. 新潮电子,2025,(7):205-207.

[4] 杨利平. 采煤沉陷对土壤生态修复的影响 [J]. 能源科技,2021,19(3):27-29.

[5] 李科心, 曹新款, 代卿亚, 等. 采煤沉陷区生态阈值响应机制及生态修复区识别 [J]. 金属矿山,2026,(2):194-202.