

开采扰动区土地复垦改良技术与矿区生态修复配套开采方案研究

奇 源

准格尔旗能源局 内蒙古 鄂尔多斯 017100

摘 要：矿产资源开发形成的大面积采空区、塌陷地和排土场，引发土地损毁、植被退化及水系破坏等连锁生态问题，严重制约矿区可持续发展。本文系统梳理了开采扰动区的土地损毁类型与生态环境问题，从地形重塑、基质改良、植被重建三个层面阐释了土地复垦改良的技术路径，在此基础上提出了“开采前—开采中—开采后”全生命周期的生态修复配套开采方案框架，重点分析了充填开采、减沉开采与边采边复技术的协同应用。研究表明，将生态修复融入开采全过程，是实现矿区绿色开发的关键途径，可为同类矿区的生态修复工程提供系统性的技术参考。

关键词：开采扰动区；土地复垦；生态修复；配套开采；边采边复

引言：矿产资源开发是国家经济发展的基础支撑，但高强度、大规模的开采活动对矿区土地资源和生态环境造成了强烈扰动。我国矿山开采累计损毁土地面积超过 400 万公顷，且以每年数万公顷的速度持续增加。开采扰动引发的地表塌陷、地裂缝、土壤退化、植被破坏及水土流失等问题相互叠加，形成复杂的生态退化格局，严重制约矿区及周边区域的可持续发展。本文从土地复垦改良技术与开采方案协同两个维度，系统探讨开采扰动区生态修复的可行路径与技术体系。

1 开采扰动区土地损毁特征与生态环境问题

1.1 开采扰动区的空间分异与损毁类型

矿山开采对土地资源的扰动具有明显的空间分异特征，可划分为采空区、塌陷区、排土场和工业场地四类典型扰动单元。采空区是地下开采形成的空洞区域，上覆岩层在重力作用下发生变形、破裂和垮落，形成“三带”——垮落带、裂隙带和弯曲下沉带。采空区的地表表现形式为塌陷盆地，其范围通常大于采空区投影面积，影响半径可达开采深度的 0.3~0.5 倍。塌陷区是采空区上覆岩层失稳后地表下沉形成的负地形单元，分为连续下沉盆地和非连续塌陷坑两种形态。连续下沉盆地边缘发育大量地裂缝，破坏地表径流和植被根系；非连续塌陷坑则形成突然性的地表陷落，破坏性更为剧烈。排土场是露天矿剥离物和井工矿矸石的集中堆存场所，压占大面积土地，改变原有地形和地表径流，排土场边坡存在滑坡和泥石流风险。工业场地包括选煤厂、储煤场、运输道路等设施，以土地压占和污染影响为主^[1]。

1.2 土壤退化与基质破坏

开采扰动对土壤的破坏体现为物理、化学和生物学三个层面的退化。物理退化表现为土壤结构性破坏、容重增大、孔隙度降低和持水能力下降。塌陷区地表变形导致土壤剖面紊乱，表土层被掩埋或剥蚀，土壤耕作层厚度减少；排土场堆积物以岩石碎块和深层土为主，缺少表土覆盖，粗骨物质含量高、保水保肥能力极差。化学退化表现为土壤 pH 值异常、养分失衡和盐分积累。煤炭开采过程中的酸性排水导致土壤酸化，金属矿山则可能引发重金属污染。生物退化反映在土壤微生物数量减少、酶活性降低和土壤动物种群衰退，土壤生态系统的自我恢复能力受到严重抑制。据统计，开采扰动区土壤有机质含量较未扰动区下降 40%~60%，速效氮和速效磷含量下降 50% 以上，土壤质量恢复自然过程需要数十年至数百年。

1.3 矿区生态系统退化特征

开采扰动区的生态系统退化是多因素叠加的复合过程。植被退化的直接表现为覆盖度下降和物种多样性减少，矿区植被覆盖度通常较周边未扰动区降低 40%~70%，敏感物种消失、群落结构趋于简化、优势种由地带性植被演替为耐性先锋种。水文系统的扰动是最具扩散性的生态影响，采煤塌陷导致地下水位下降形成疏干漏斗，影响范围可达开采区域数倍，同时塌陷裂缝切断地表径流，改变水系格局，加剧水土流失。采空区上覆岩层导水裂隙带沟通各含水层，造成地下水的串层污染。矿区景观格局的破碎化则是更宏观的生态效应，采矿活动将连续的自然景观切割为孤立的生态斑块，景观连通性降低，影响物种迁移和生态流的正常运转。

2 土地复垦改良核心技术

2.1 地形重塑与土壤重构技术

地形重塑和土壤重构是土地复垦的基础工程,目标是恢复土地的生产功能和生态功能。地形重塑根据规划用途确定最终的地表形态——农业用地要求平坦规整,林草用地允许适度的地形起伏,建设用地则需要高标准压实。地形重塑优先利用开采过程中剥离的表土,按照“采前剥离、分类堆存、采后回覆”的原则进行管理。表土是极其稀缺的生态资源,每公顷自然土壤的形成需要数百年时间,因此表土剥离厚度一般不小于 30cm,单独堆存并采取水土保持措施防止养分流失。土壤重构是地形重塑后的关键工序,包括覆土厚度确定、土壤剖面构建和障碍层次处理。覆土厚度根据复垦用途确定,耕地一般要求覆土厚度 50cm 以上,林草地 30~50cm。当表土资源不足时,可采用“客土改良”或“基质替代”策略——利用粉煤灰、煤矸石、城市污泥等工业废弃物与少量表土混合,配制人工土壤基质。煤矸石富含硅、铝、铁等矿物质,粉碎后可改善土壤质地;粉煤灰具有多孔结构和较高的 pH 值,适用于酸性矿区的土壤改良。

2.2 基质改良与肥力恢复技术

土壤基质改良是解决复垦土地贫瘠化、酸化和盐渍化的核心措施。物理改良以深翻松土、掺沙改黏和施用有机物料为主,重点解决土壤板结和通透性差的问题。化学改良的核心是调节土壤 pH 和补充养分——酸性土壤施用石灰中和酸度,促进养分有效性;盐碱化土壤施用石膏置换钠离子,降低钠吸附比。施肥是基质改良中最直接有效的措施,采用有机肥与化肥配合施用,快速提升土壤肥力水平。试验表明,施用有机肥 30t/hm² 可使复垦土壤有机质含量在 3 年内提高 5~8g/kg。生物改良是基质改良的高效手段,包括接种丛枝菌根真菌促进植物磷素吸收、种植固氮植物提高土壤氮素水平、施用微生物菌剂加速有机质分解等。在黄土高原矿区复垦实践中,采用“有机肥+菌根真菌+豆科牧草”的联合改良模式,复垦第 3 年植被覆盖度达到 60% 以上,第 5 年达到 80% 以上,土壤有机质恢复至未扰动水平的 70% 以上。

2.3 植被重建与群落构建技术

植被重建是土地复垦的最终环节,也是生态修复成效的直观体现。适生植物筛选是植被重建的前提——筛选原则包括:耐旱耐贫瘠、生长迅速、根系发达、固土能力强。优先选用乡土物种,因乡土物种对当地气候和土壤条件具有天然适应性,且不会引发外来物种入

侵风险。先锋植物首选豆科牧草(紫花苜蓿、沙打旺)和禾本科草类(披碱草、羊草),在快速覆盖地表后为后续乔灌木的入侵创造条件。植被群落构建应遵循“草本先行—灌草结合—乔灌草立体配置”的演替路径,这一路径本质上模拟了自然植被演替的规律,但通过人为加速缩短了演替时间。在坡度大于 25° 的排土场边坡,优先配置根系深、固土能力强的灌木(沙棘、柠条、紫穗槐),与浅根性草本形成立体防护体系。在平台区域可发展经济林果或能源植物,兼顾生态效益与经济效益^[2]。植被配置模式方面,采用行间混交和块状混交,避免纯林造成的单一化和生态稳定性不足。黄土高原矿区复垦实践表明,“灌草搭配、豆禾混播”的配置模式,可使矿区植被覆盖度恢复至未扰动区域的 85% 以上,群落物种多样性达到周边自然群落的 70% 以上。

3 生态修复配套开采方案设计

3.1 全生命周期生态修复理念

传统矿区开发模式为“先开采、后修复”,这种线性模式存在三方面根本缺陷:修复滞后导致损毁面积和程度持续扩大,修复成本随时间推移呈指数增长,错过生态恢复的最佳窗口期。全生命周期生态修复理念将生态修复融入矿山开发的全过程,强调“开采前规划、开采中控制、开采后修复”的闭环管理思路,其核心内容包括:开采前开展生态本底调查和敏感性评价,确定生态保护目标;开采中实施减损开采工艺和动态复垦措施,控制生态损毁范围和强度;开采后开展系统修复和长期监测,确认生态功能恢复效果。全生命周期理念的提出,标志着矿区生态管理从被动应对向主动调控转变。

3.2 减沉开采与充填开采技术

减沉开采是从源头控制地表沉陷损害的关键技术路径,其核心原理是通过减少采空区空间或控制上覆岩层移动来降低地表变形幅度。充填开采是最有效的减沉手段,利用充填材料将采空区充填密实,支撑上覆岩层、控制地表下沉。充填开采的地表下沉系数可控制在 0.05~0.15 之间,远小于传统垮落法的 0.6~0.8。膏体充填技术以煤矸石、粉煤灰、水泥等为原料制备膏状浆体,泵送至采空区充填,兼具“固废处置+地表减沉”双重功效。条带开采通过限制采宽和保留足够宽度的支撑煤柱控制地表变形,采出率控制在 30%~50%,地表下沉系数可控制在 0.1~0.3。协调开采通过合理安排工作面开采顺序和推进方向,使各工作面产生的下沉盆地相互叠加抵消,达到减小最终变形值的目的^[3]。

3.3 边采边复技术体系

边采边复是将土地复垦与开采活动同步推进的技术模式，突破了“开采结束才复垦”的传统时序。其技术逻辑建立在采动地表移动规律的科学认知之上——开采过程中地表下沉具有可预测性，在地表变形尚未达到最终值之前，即可开展超前复垦作业。边采边复的技术要点包括：在开采区地表变形尚未稳定时超前覆土，利用尚未完全沉陷的过渡地形进行初步植被恢复；在已稳定区域直接进行高标准复垦，缩短土地闲置时间。边采边复的核心优势在于大幅缩短了修复周期——传统复垦模式下，开采结束后需等待3~5年地表稳定方可复垦，加上植被恢复3~5年，总修复周期长达6~10年；而边采边复可将修复周期压缩至3~5年，同步降低了修复成本。

4 典型案例与工程实践

4.1 黄土高原矿区“边采边复”实践

黄土高原某井工煤矿位于生态脆弱区，采用“边采边复”模式开展生态修复。开采前开展三维地震勘探和生态本底调查，编制全生命周期生态修复规划。开采中以“采煤—充填—复垦”一体化作业为核心，采用膏体充填开采技术控制地表下沉，同时利用井下矸石充填减少矸石地面排放。工作面回采结束后3个月内完成地形重塑和表土回覆，当年雨季完成草本播种，次年完成灌木栽植。复垦区植被覆盖度从不足20%提升至75%以上，土壤侵蚀模数下降60%，实现了开采与复垦的良性循环。

4.2 内蒙古草原区露天矿排土场生态恢复

内蒙古某露天煤矿排土场面积达800公顷，土壤贫瘠、pH值9.0以上。复垦采用“地形重塑—隔盐层铺设—表土回覆—植被重建”四步流程：坡面放缓至25°以下保障边坡稳定，排土场平台覆土厚度50cm，采用“灌草乔”立体配置构建植被系统。排土场平台发展沙棘能源林和苜蓿草产业，边坡以灌草固土为主。复垦5年后排土场植被覆盖度达70%，局部区域恢复放牧功能，实现了生态效益与经济效益的统一。

4.3 案例经验总结

综合分析上述典型案例，成功的矿区生态修复呈现出三个共性规律。一是“规划先行”——将生态修复目标、技术路线和实施节点纳入矿山开发总体规划，在开采启动前即明确全生命周期的生态管理方案，避免“先破坏、后补救”的被动局面。二是“技术配套”——不同开采方式和损毁类型对应差异化的复垦技术组合，塌陷区侧重于充填减沉与地形重塑，排土场聚焦于基质改良与边坡稳定，必须因地制宜匹配技术措施，单一手段难以应对复杂生态问题^[4]。三是“边采边复”——将复垦作业嵌入开工工序，利用地表沉陷的可预测性实现超前覆土与动态修复，大幅压缩修复周期、降低修复成本。三者的有机结合，构成了矿区生态修复的系统解决方案，缺一不可。

结束语

开采扰动区土地复垦与生态修复是协调矿产资源开发与生态环境保护关系的核心命题。本文揭示了开采扰动区土地损毁的空间分异规律与生态系统退化机制，明确了地形重塑、基质改良和植被重建三类复垦技术的适用条件与关键参数，构建了以减沉控制、动态复垦和系统恢复为主线的全周期配套开采方案框架。矿区生态修复的成功实施，依赖于开采前科学规划、开采中动态调控与开采后系统恢复的有机衔接，以及充填减沉、边采边复等技术的协同配套。未来应着力推进监测智能化、修复精准化与评估动态化，以技术创新驱动矿区生态保护与绿色开发的协同共进。

参考文献

- [1] 王利群, 袁浩, 吴尚哲, 等. 基于生态修复理念的矿山土地复垦技术与应用[J]. 西部资源, 2024(5): 128-130.
- [2] 刘文峰, 周保精. 矿区土地复垦及生态修复研究进展[J]. 能源科技, 2023, 21(5): 12-15.
- [3] 赵建业, 王旭影, 蒋福祯, 等. 高寒矿区排土场土壤重构及植被恢复关键技术[J]. 能源与环保, 2025, 47(11): 1-7.
- [4] 范静涛, 陈伯恒, 李悦, 等. 矿山生态修复土壤重构技术——从固体废物利用到生态恢复[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(6): 2077-2087.