

煤矿区“井上-井下”一体化生态环境综合治理技术体系构建与效益评估

刘笑佟

内蒙古仲泰能源有限公司红庆河煤矿 内蒙古鄂尔多斯 017000

摘要: 本文以红庆河煤矿的实践为例,探讨了煤矿区“井上-井下”一体化生态环境综合治理技术体系的构建与效益评估。面对煤炭开采导致的生态环境破坏问题,传统末端治理模式存在明显局限性。研究提出了以地质保障为基础、水资源管理为核心、固废循环利用为纽带的一体化治理技术框架。通过分析红庆河煤矿的技术应用实践,证明该体系能够实现矿区生态环境的主动修复与资源高效利用,为绿色矿山建设提供了技术支撑和实践路径。评估结果显示,一体化技术体系实施后,矿区植被覆盖率显著提升,水资源综合利用率达到100%,煤矸石处置成本降低40%以上,实现了经济效益与生态效益的双赢。

关键词: 井上-井下一体化;生态修复;技术体系;效益评估;红庆河煤矿

引言

煤炭作为我国主体能源之一,其开采利用为经济社会发展提供动力支撑的同时,也带来了严峻的生态环境挑战。传统的末端治理模式难以从根本上解决煤炭开采引发的地表沉陷、水资源破坏、固废堆积等系列问题。“井上-井下”一体化治理理念的提出,标志着煤矿区生态治理思路的重大转变。这一理念强调井上工程建设与井下开采活动的协同性,注重开采前预防、开采中控制、开采后修复的全过程治理。然而,当前煤矿区生态环境治理仍面临技术体系不完善、效益评估不系统等挑战。一方面,现有技术多侧重于单一问题的解决,缺乏井上井下协同治理的系统性方案;另一方面,治理效益评估多关注短期经济收益,忽视生态效益的长期性与综合性。因此,构建完整的“井上-井下”一体化技术体系并建立科学的效益评估方法,成为推动绿色矿山建设的关键课题。本文基于红庆河煤矿的实践案例,系统阐述“井上-井下”一体化生态环境综合治理技术体系的构建路径,并对其综合效益进行评估,以期同类煤矿区的生态环境治理提供参考。研究旨在探索煤炭开采与生态环境保护协同发展的新路径,推动煤炭工业向绿色、低碳、可持续方向转型。

一、煤矿区“井上-井下”一体化生态环境综合治理技术体系构建

(一) 技术体系框架设计

煤矿区“井上-井下”一体化生态环境综合治理技

术体系的构建,需要从根本上改变传统先开采后治理的线性思维,建立一种全周期、多维度、协同式的治理新模式。这一体系以系统科学和生态学原理为指导,通过井上井下联动、多技术集成应用,实现资源开采与生态保护的平衡。

技术体系框架包含三个层次:感知层负责通过空-天-地一体化监测手段获取矿区生态环境数据;控制层基于数据分析结果进行决策支持;执行层由多个技术模块组成,负责具体治理任务的实施。三个层次相互衔接,形成闭环反馈系统,确保治理过程的动态优化。技术体系的特色在于其空间协同性与过程连续性。在空间上,通过井下矸石充填、保水开采等技术减少对地表环境的扰动,同时通过井上植被恢复、水资源循环利用等措施增强生态系统稳定性,形成垂直空间的协同保护机制。在过程上,将治理环节前置到规划设计阶段,贯穿煤炭开采全过程,实现从源头控制到末端修复的连续治理^[1]。

(二) 井上-井下协同治理关键技术

1. 地质保障与生态修复协同技术

通过构建“空-天-地-孔”一体化勘测体系,结合物探、钻探与历史数据融合分析,精准掌握矿区地质条件与生态本底状况。红庆河煤矿应用三维地震勘探与钻孔电视等技术,查清了北帮采空区分布及地质弱层发育规律,为后续治理提供了科学依据。在生态修复方面,创新提出“三期三圈”治理模式,即根据采前防治期、

采中控制期和采后营造期三个时期的特点，分别建设外围防护圈、周边常绿圈和中心美化圈。神东矿区的实践表明，该模式可有效降低开采活动对地表生态的干扰，植被覆盖率由3%–11%提升至64%以上。

2. 水资源保护与利用技术

创新构建的“四水统筹”技术模式（三水保护、三级处理、三种利用、三水管理），有效破解了煤炭开采与水源的矛盾。红庆河煤矿率先采用超膜反渗透和蒸发结晶分盐技术，将矿井水处理至地表水Ⅲ类标准，回用于井下生产、地面洗选和绿化养护，剩余部分用于农业灌溉，实现了水资源的100%综合利用。矿井水处理技术不断迭代升级，从简单的絮凝沉淀发展到现在的“预处理+A2/O生化+深度除磷”多级协同处理工艺。神东矿区建成6套除氟、除盐系统，日处理利用矿井水15.3万吨，满足了十万人生活、数万公顷生态、千亿元产值的用水需求。

3. 固废循环利用与能源结构优化技术

固废处理方面，突破了传统的“运输–堆放”模式，发展了“井下充填+井上利用”的循环经济模式。红庆河煤矿应用矸石离层注浆技术，将矸石破碎后通过输送

泵注入地下离层空间，实现了“产煤不堆矸”的生态目标。该技术不仅解决了矸石外排问题，还有效缓解了采煤导致的地面沉陷，达到了“保水采煤”的水生态环境管理目标。红庆河煤矿利用屋顶、绿化带等区域建设分布式光伏项目，总容量达14.3MW，年发电量2000万度，绿电替代比例约11.52%。同时，探索“地热+”多能互补系统，将浅层地热能与太阳能、空气能及储能技术耦合，为矿区供热、制冷、供热水提供清洁能源，显著降低了碳排放^[2]。

二、红庆河煤矿应用案例与数据图表分析

（一）红庆河煤矿概况与治理历程

红庆河煤矿位于内蒙古鄂尔多斯市，是国家煤炭工业“十二五”规划建设项目，井田面积约1,400公顷，年设计生产能力为1,200万吨。矿区地处生态脆弱区，水资源匮乏，生态环境承载力低，这决定了其必须走绿色开采之路。红庆河煤矿的治理历程可分为三个阶段：初期（2013–2016年）以基础设施建设为主，同步建成矿井水深度处理系统；中期（2017–2021年）重点构建循环经济体系，实施矸石离层注浆项目；近期（2022年至今）致力于系统优化升级，建设分布式光伏项目，完善一体化治理体系。

（二）技术应用成效与数据评估

红庆河煤矿通过实施“井上–井下”一体化治理技术体系，在生态环境改善和资源高效利用方面取得了显著成效。下表1关键数据可以直观反映技术应用效果：

水资源管理方面，采用“预处理+膜浓缩+蒸发结晶”工艺，使成品水达到地表水Ⅲ类标准。形成了“矿井水–处理–回用–灌溉”的完整循环链条，实现了水资源消耗与再生的平衡。

固废处理方面，红庆河煤矿创新应用矸石离层注浆技术，自2021年11月项目建成以来，已稳定运行超一年，累计处理煤矸石量达设计能力。该技术将矸石破碎制浆后回注至采空区，既避免了地面堆存造成的土地占用和环境污染问题，又有效支撑了地层，减缓了地表沉降。

能源结构优化方面，红庆河煤矿分布式光伏项目全部建设完成后，年发电量可达2000万度，相当于节约标煤约2400吨，减排二氧化碳约1.8万吨。光伏项目与矿区生态修复相结合，板上发电、板下种植，实现了土地立体化增值利用。

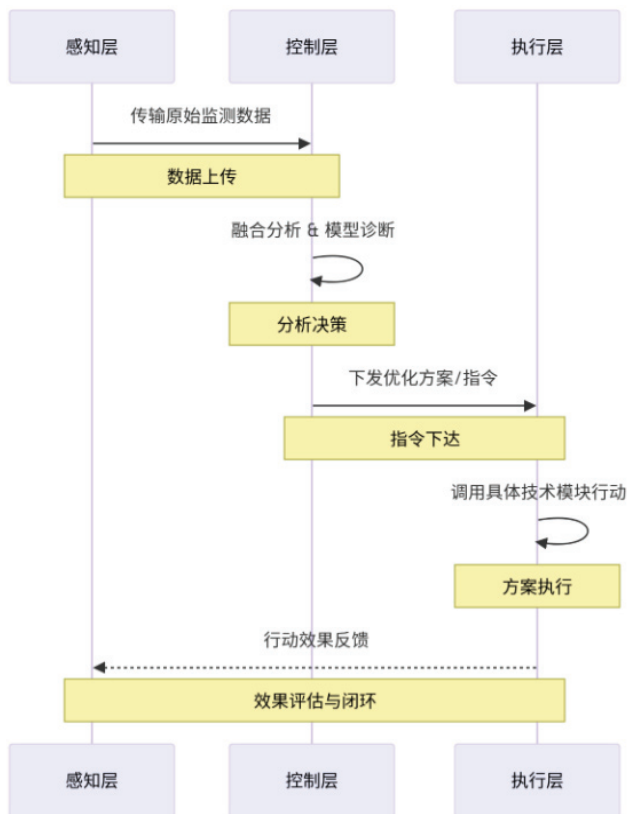


图1 井上–井下一体化生态环境综合治理技术体系框架

表1 红庆河煤矿一体化治理技术应用成效统计

指标类别	具体指标	治理前情况	治理后成效	变化率
水资源利用	矿井水综合利用率	低于60%	达到100%	提升40%以上
	日处理矿井水量	未系统处理	15.3万吨/日	-
固废处理	煤矸石综合处置率	临时堆存	100%井下充填	提升至100%
	地面沉陷控制率	无明显控制	下沉降低50%以上	显著提升
能源结构	清洁能源占比	传统能源为主	光伏发电替代11.52%	减少碳排放下调
	分布式光伏规模	无	14.3MW	年发电2000万度
生态修复	植被覆盖率	低于10%	64%以上	提升约50个百分点

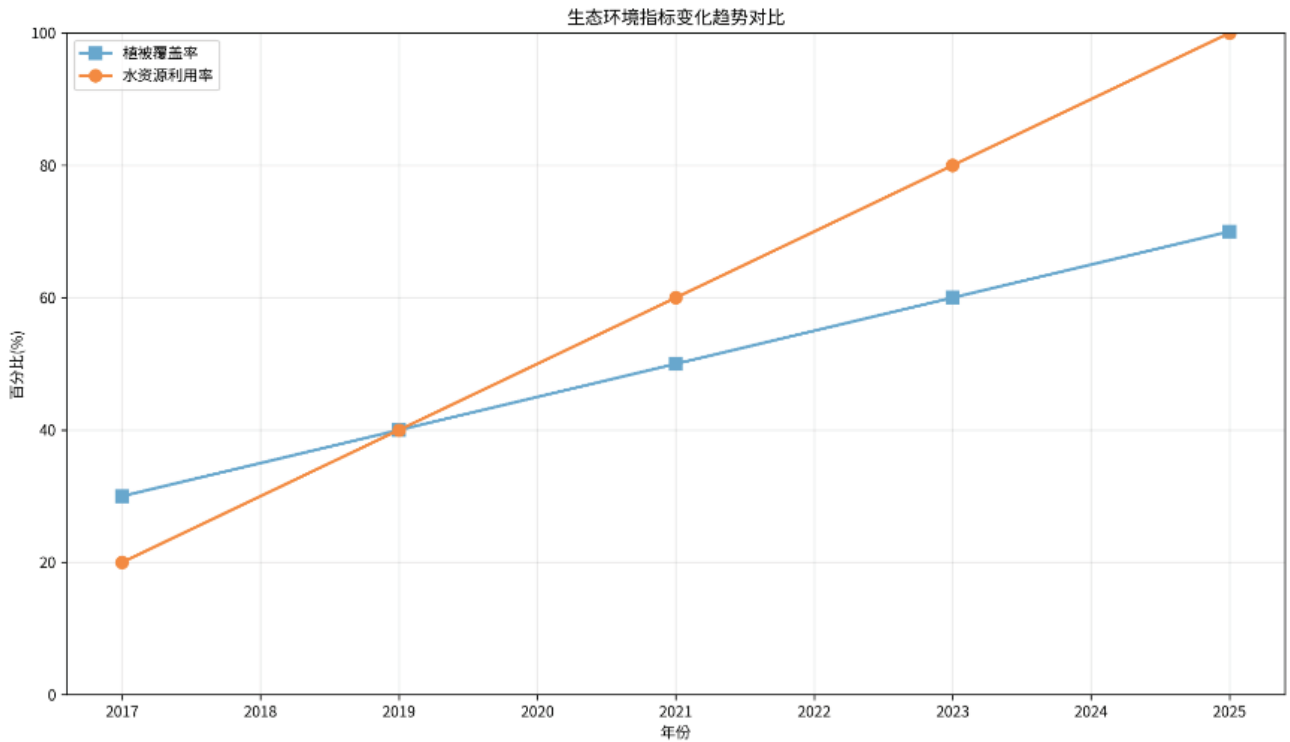


图2 红庆河煤矿2017-2025年生态环境改善趋势图

植被覆盖率从2017年的30%稳步增长至2025年的70%，呈现出持续改善的趋势。水资源利用率从2017年的20%显著提升至2025年的100%，显示出水资源利用效率的大幅提高。

(注：图表数据基于红庆河煤矿实际治理成效绘制)

三、效益评估模型与结果分析

(一) 经济效益评估

“井上-井下”一体化技术体系的实施，为红庆河煤矿带来了显著的经济效益。首先，水资源循环利用系统年节约新水取用成本约350万元，减少废水处理外排费用约180万元。其次，矸石离层注浆技术避免了矸石外运和堆存成本，按传统处置方式每吨矸石处理成本约25元计算，年节约固废处置费用约600万元。此外，分布式光伏项目年发电收益约800万元，且减少了外购电

支出。综合考虑各项收益与投入，红庆河煤矿一体化治理项目的静态投资回收期约为5.2年，内部收益率达到15.8%，远高于行业基准收益率。这表明一体化治理技术体系不仅具有环境效益，还能产生良好的经济价值，打破了“环保只投入不产出”的传统观念。

(二) 环境效益评估

环境效益评估采用生态足迹法和生态系统服务价值评估法进行量化分析。结果表明，红庆河煤矿实施一体化治理后，每年可减少生态足迹约1,200全球公顷，主

要体现在碳足迹和水足迹的降低。生态系统服务价值年增值约2,800万元,主要包括水源涵养、土壤保持、固碳释氧和生物多样性保护等功能价值的提升。具体而言,水资源循环利用使矿区水资源消耗减少约30%,矿井水氟化物、氯化物、硫酸盐含量远低于地表水三类标准。矸石井下充填避免了地面堆存造成的土地占用和环境污染,受扰动土地复垦率高达100%。植被恢复工程每年可吸收二氧化碳49.39吨、释放氧气35.67吨,消减二氧化硫6.82吨、吸附粉尘4,510.5吨。清洁能源替代年减少碳排放约1.8万吨,相当于种植24000棵成年冷杉树的碳吸收量。

(三) 社会效益评估

一体化治理技术体系的实施带来了多方面的社会效益。首先,改善了矿工工作环境,提高了安全生产水平,职工满意度调查显示幸福指数达95%。其次,矿区环境改善提升了企业形象,增强了利益相关方的认可度,为企业创造了无形价值。此外,红庆河煤矿的绿色发展模式为当地创造了420个就业岗位,促进了区域经济发展。

矿区处理后的矿井水用于农业灌溉,支持了当地农业发展;生态修复区向公众开放,成为科普教育和休闲游憩的场所,实现了企业与社区的共赢。

四、结论与建议

研究表明,一体化治理技术体系通过井上井下协同、多技术集成,能够有效解决煤炭开采导致的生态环境问题,实现经济效益、环境效益和社会效益的统一。“井上-井下”一体化生态环境综合治理技术体系代表了煤矿区生态治理的发展方向。随着技术的不断进步和实践的深入推广,这一体系将为煤炭工业绿色低碳发展和生态文明建设提供有力支撑。

参考文献

- [1]丁汇锋,邱守文,杜永良,刘贵荣,张新平.红庆河煤矿绿色矿山建设实践[J].中国煤炭,2023,49(S1):103-106.
- [2]余华婷.红庆河煤矿超长走向开采条件下地表沉降对生态环境影响规律研究[D].辽宁大学,2023.