

矿山生态修复全流程管理数字化应用研究

金言

(中国建筑材料工业地质勘查中心安徽总队, 安徽 合肥 230000)

[摘要] 随着全球矿产资源的不断开采,大量矿山因资源枯竭或经济原因被废弃,导致了土地荒废、生态破坏和环境污染。然而,当前矿山生态修复工作面临修复理念滞后,固守“末端治理”模式,技术手段单一、集成度低,管理模式上重建设轻维护、监管体系薄弱、监管系统薄弱等多重现实困境,难以满足现代生态修复的需求。本文以“设计-施工-监测-维护”全过程管理周期为研究主线,系统探讨了数字化技术驱动下的矿山修复管理模式重构,并通过内蒙古扎赉诺尔、河北智能监测平台等实践案例,验证了物联网、大数据、人工智能等技术手段在矿山修复全过程中的有效性。该模式为矿山生态修复提供了科学化、精准化的解决方案,具有显著的实践价值与行业推广潜力。

[关键词] 矿山修复; 全流程管理; 数字化技术; 智能决策; 多源数据融合

[中图分类号] TD67 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)05-0009-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.05.002

0 引言

矿产资源作为人类社会工业化进程的基石,推动了经济增长、科技革新,提升了人类的生活质量。但随着工业化浪潮的持续扩张,矿产资源的无序开发与长期积累的环境问题逐渐出现,引发了生态破坏、水土流失、空气污染、地质灾害等一系列的环境危机,也导致了土地资源浪费等社会经济矛盾^[1-2]。

党的十八大以来,发展绿色矿业、建设绿色矿山相继纳入《中华人民共和国国民经济和社会发展第十三个五年规划纲要》《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》等国家战略规划。中共中央、国务院印发的《关于加快推进生态文明建设的意见》(中发[2015]12号)和《关于全面推进美丽中国建设的意见》(中发[2023]17号)均对矿山生态修复作出专项部署。

特别是原国土资源部等五部委联合印发的《关于加强矿山地质环境恢复和综合治理的指导意见》(国土资发[2016]63号),系统构建了“预防为主、防治结合”的工作机制,明确了“谁开发谁保护、谁破坏谁治理、谁投资谁受益”的责任体系,推动建立矿山地质环境动态监测制度和“新老矿山统筹治理”的长效机制^[3]。然而,当前矿山生态修复工作普遍面临效率低、成本高、适应性差等瓶颈,难以满足现代生态修复的需求。要突破这一瓶颈,亟需将生态修复从末端治理转向全流程管控,从单一技术应用升级为多技术协同的智慧化治理,并建立覆盖“设计-施工-监测-维护”的全过程管理机制,而各种数字化手段的兴起与应用,正好为矿山生态修复提供了突破性解决方案。

本文以“设计-施工-监测-维护”全过程管理周期为研究主线,系统探讨了集成遥感、物联网、大数据、人工智能等数字化技术驱动下的矿山修复管理模式重构。全流程数字化提升了修复工程的科学性、适应性与可持续性,也为破解当前治理困境提供了技术支撑与方法路径。

1 当前矿山生态修复治理困境

1.1 修复理念

矿山生态修复工作目前面临着多重的治理困境。根据《全国矿产资源规划(2021—2025年)》披

[收稿日期] 2025-06-07

[作者简介] 金言(1992—),女,工程师,主要从事水工环地质调查与评价工作。

[引用格式] 金言. 矿山生态修复全流程管理数字化应用研究[J]. 绿色矿冶, 2025, 41(5): 9-13.

JIN Yan. Research on digital application of whole-process management in mine ecological restoration[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(5): 9-13.

露的数据显示,有 62% 的矿山仍固守“末端治理”模式,未能将生态修复前置融入矿产资源开发全流程,导致治理成本倍增而效果锐减。

1.2 技术手段

根据自然资源部国土空间生态修复司发布的《中国矿山生态修复报告(2023 年)》,目前修复技术普遍呈现碎片化、治理短期化的特征,仅 12% 项目实现多技术协同应用,难以应对复杂矿山生态系统的修复需求,特别是“水-土-气-生”的多介质复合污染。数字化技术渗透率不足 20%,技术缺陷严重制约治理效能。目前矿山修复技术手段情况见表 1。

表 1 目前矿山修复技术

类型	技术措施	成效	问题
物理修复	客土覆盖、地形重塑等	快速改善地表形态	每公顷平均耗资大,存在二次水土流失风险 人工绿化难以精准
生物修复	带种修复、微生物修复等	部分区域可获得改善	匹配复杂的地形,微生物修复容易受环境参数波动影响
化学修复	钝化剂施用等	短期内可固定污染物	修复周期长、药剂残留等

1.3 管理模式

在管理模式方面,约 78% 的修复项目因缺乏全生命周期管控体系,仍存在“重建设轻维护”的现象;另外,监管系统薄弱,现有技术规范缺少生态效益量化指标等,也导致了修复工程容易陷入“表面绿化”的误区。自然资源部发布的《中国矿产资源报告 2022》显示,目前省级监测平台覆盖率仅 58%,全国还有 23 个省份尚未建立修复效果后的评估制度,治理成果难以持续。

1.4 资金保障

在资金保障方面,历史遗留矿山治理资金缺口达 3 800 亿元,而现行土地复垦基金计提标准为 15 元/t,与实际治理成本还存在 40% 以上的资金缺口,在实际治理过程中这一标准远远无法满足需求,难以覆盖实际产生的各项成本,严重制约了治理工作的有效推进^[4-5]。这些治理问题叠加在一起,使得我国矿山生态修复综合达标率长期停滞在 65% ~ 70%,与《“三区两线”矿山生态修复工程意见》设定的 85% 目标存在显著差距。特别是目前治理模式对生态系统整体性的忽视,使得很多已修复区域在三年内出现了次生环境问题^[6]。矿山生态修复治理困境如图 1 所示。

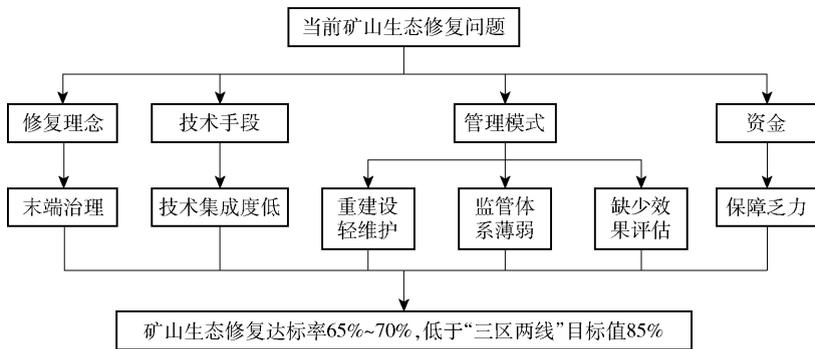


图 1 矿山生态修复治理困境

2 全流程管理数字化转型

2.1 数字化技术原理

随着全球矿业绿色转型的推进,数字化技术已成为矿山生态修复领域的重要驱动力。依托 5G 通信、物联网传感、大数据分析 with 人工智能算法等数字化技术,构建起以“感知-分析-决策-优化”为核心逻辑的技术体系,推动矿山修复从传统粗放模式向全生命周期精细化管理进行转变。相较于传统修复模式,数字化技术展现出多维度的效能提升,其核心优势主要体现在提升精准化治理,革新全流程效率

和长效可持续管理三个方面^[7-8]。数字化技术手段如图 2 所示。

2.2 数字化技术应用优势

2.2.1 设计阶段

在矿山修复的初期,设计阶段可以通过遥感与无人机技术,全方位获取矿区地表形态、植被恢复进度等关键信息,利用地理信息系统与三维建模技术生成矿区立体影像,精准定位水土流失、岩层裸露等问题区域,为制定修复方案提供可视化的数据支持,同时辅助设计人员对地表形态、土壤特性、植被分布等要素进行叠加分析,坡度大于 25° 的破碎边坡,可

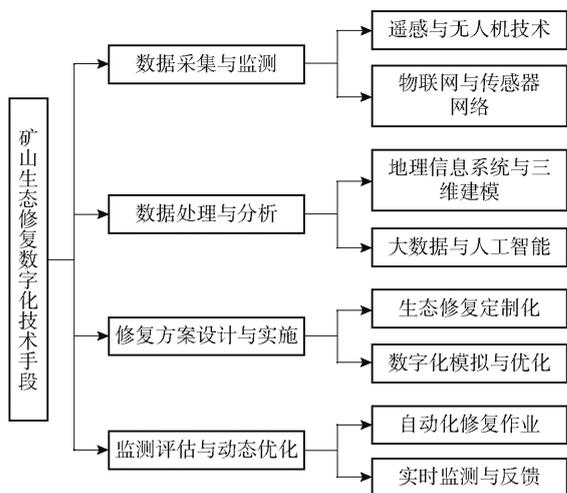


图2 数字化技术手段

采用生态袋固坡与抗逆植物组合技术,平缓区域则优先考虑采用土壤改良与先锋植物群落构建,有助于设计人员评估不同修复方案的环境效应^[9-11]。

2.2.2 施工阶段

在废弃矿山实施生态修复的关键阶段,依托虚拟现实技术,对修复方案进行推演,对复杂地形进行施工机械可达性分析,自动生成最优作业路径,优化施工方案;同时通过智能监测设备,在修复区域构建实时感知系统,持续采集湿度、酸碱度等关键参数,与气象站的相关数据进行综合分析,帮助管理人员及时调整灌溉、施肥等养护措施,从而提升工作效率^[12-13]。

2.2.3 监测阶段

在废弃矿山生态修复后期的监测阶段,可利用卫星遥感与无人机航拍技术构建出监测网络,自动提取植被覆盖度、生物量等关键生态参数,反馈给管理人员;同时将大数据与人工智能技术进行协同应用,从大量监测数据中提取规律,推动修复达标率由传统模式的70%提升至95%以上^[14-15]。

2.2.4 维护阶段

在废弃矿山生态修复结束后的维护阶段,可以依托集成智能灌溉系统与多源传感网络的相互配合,利用土壤温湿度传感器、气象监测站等实时数据采集装置,建立可以闭环调控的水肥管理系统,方便管理人员远程操作与决策,降低人工成本,提升植被成活率。

2.3 国内外发展现状

在国内外实践方面,矿山修复的数字化技术应用呈现阶梯式发展特征。欧美发达国家在矿山修复智慧化领域具有先发优势,技术应用成熟,为全球矿

山修复智能化转型提供了重要参考。发达国家如美国、德国等较早建立了矿山修复的数字化管理体系,美国更是通过立法要求矿山企业建立全周期监测系统,利用卫星遥感技术实现修复效果的动态评估,修复项目数字化覆盖率超过60%。而我国矿山修复的智能化进程虽起步稍晚,但发展迅速,目前国内已有超过12%的矿山修复项目进行了多技术协同应用的尝试。

3 全流程管理实践案例

3.1 扎赉诺尔矿区数字化生态修复工程

内蒙古呼伦贝尔的扎赉诺尔矿区,被当地百姓称为寸草不生的“人造天坑”。技术团队通过采集矿区及周边区域水、土、气、动植物、微生物等万余种自然数据进行比对分析,植入生态数据库进行分析。同时通过现场测绘、数值模拟与评估规划设计等步骤,对露天矿闭坑的边坡稳定、场地平整修复、生态恢复问题进行评估,提出了“边坡控制-场地平整修复-生态恢复-基础设施建设”的矿山生态修复联合技术方案,并应用“3S”技术对扎赉诺尔露天矿进行修复。通过大数据技术的精细化指导,扎赉诺尔矿区修复周期缩短40%,植被覆盖率从原来的不足20%增长到90%以上,草产量显著提高,形成可复制的数字化修复模板。

3.2 河北省矿山地质生态环境智能监测平台

河北省矿山地质生态环境智能监测平台作为省内首个矿山生态治理数字化平台,于2022年2月正式启动试运行。其中移动端应用作为该平台的重要创新点,在施工阶段发挥了重要作用。该应用可以将矿区影像资料、植被恢复情况等现场数据实时传输至管理平台,帮助管理人员及时调整养护措施。监管部门也能通过相关的监测数据,建立起与矿山现场的实时通讯渠道,方便实现对矿山治理进程的远程可视化监管。在试运行首年,该平台完成了全省700处各类矿山的基础数据采集工作。通过系统化整合各类调查数据,初步构建起覆盖全省的矿山生态修复动态数据库,不仅实现了矿山修复过程的全程可追溯管理,更为规范矿山生态修复工作标准、优化国土空间生态修复策略提供了可靠的技术支撑。

3.3 广西省废弃矿山生态修复管理信息系统

广西省在矿区环境治理领域积极探索数字化的解决方案,研发了省级的废弃矿山生态修复管理信

息系统,采用卫星遥感监控手段,通过“网络与实地结合”的方式进行检查和记录,对全区关闭矿区的常态化维护、现场勘察、成效评定、审核归档实施闭环管控。通过分类分级治理、全链条跟踪、省市县三级联动督导的创新模式,成功搭建起涵盖环境数据、治理业务、工作流程、工程项目四位一体的综合管理架构。其所属的柳州市更是率先创建了国土空间生态修复监管平台。以地理信息资源整合平台为基础框架,依托立体实景模型构建空间基底,通过收集矿区地质环境整治项目的即时监测信息,实施从立项到验收的全生命周期动态跟踪,显著提升了治理工程的精准度和实施效率,为全国矿区生态修复数字化转型提供了有益借鉴。

3.4 贵州省清镇市废弃矿山数字化应用

贵州省清镇市为满足矿山修复维护阶段的特殊需求,依托卫星影像与无人机倾斜摄影测量相结合的技术,建立了动态更新的数据支撑体系,对57个矿区的历史影像数据库,包括地形地貌、植被覆盖、水土保持等相关数据进行影像对比,并将维护工程进度与三维模型进行动态关联,以实现生态修复进程的可视化追踪。同时设置三级预警机制,根据2023年监管数据显示,其监管系统累计发出预警信号127次,其中94%的隐患在监测数据偏离维护目标值15%时就完成了处置。清镇市通过维护阶段的数字化维护管理,研究区植被覆盖度从修复初期的58%提升至82%,水土流失相关数值以及早期修复工程的年均维护成本明显下降,维护投入产出比提升76%,为矿山生态修复的全周期数字化管理提供了可复制、可推广的实践范式。

4 应用前景与挑战

4.1 应用前景

4.1.1 政策红利

矿山数字化技术为行业带来了多维度的变革动力,其核心优势集中体现在生产效能跃升、安全管理质变、生态修复精准化以及决策科学化四个方面。“十四五”生态环境规划明确要求2025年前建成50个数字化修复示范基地,在国家矿山安监局、应急管理部、国家发展改革委、工业和信息化部、科技部、财政部、教育部联合印发的《矿山智能化建设指导意见》中,也明确将数字化修复纳入绿色矿山考核体系。部分省份对采用数字化修复的矿山给予财政补贴,补贴比例最高可达投资额的30%。在新修订的

《矿产资源法》中,更是将数字化修复纳入矿山开采许可前置条件。

4.1.2 市场需求

在全球绿色转型加速的背景下,矿山修复数字化应用的市场需求大幅度增长。这一趋势由ESG投资标准深化、“一带一路”市场拓展等多重因素共同推动,形成价值重构的产业新格局。据商务部《对外投资合作报告》显示,东南亚、非洲等“一带一路”沿线国家待修复矿山面积超45万 hm^2 ,有超2000亿元的市场空间。中国方案凭借“技术输出+工程承包+数字服务”的创新模式,压缩修复成本,缩短施工周期,成功抢占了大量的市场份额。这种技术溢价与成本优势的双重竞争力,推动了中国矿山修复服务出口额从2020年的37亿元增长至2023年的152亿元。而国内市场需求则呈现明显的结构化特征,大型国企聚焦“数字化+碳中和”战略,中小企业则倾向采购SAAS化服务。数字化技术从成本中心转化为价值创造中心,预计到2025年,中国矿山修复数字化服务市场规模将突破600亿元,形成涵盖硬件研发、数据服务、碳汇交易的完整产业生态。

4.2 挑战

通过遥感、地理信息系统、物联网、大数据、人工智能等技术的融合应用,在矿山生态修复全流程管理实践中已展现出显著优势,但实际应用仍面临多重制约,数据孤岛、技术成熟度不足与人才资金瓶颈是主要的制约因素。首要困境体现在标准体系缺失,矿山信息化建设初期缺乏顶层设计与行业规范,不同厂商无序竞争,导致大量系统兼容性极差和“信息孤岛”现象的产生。另外,数字化修复所需的三维地质建模、生态过程模拟等技术仍处于发展阶段,数字化转型需要多学科交叉应用,传统施工队伍适应数字化技能转型困难,复合型技术人才缺口巨大。同时,设备改造、传感器网络部署等初期投资费用巨大,项目过分依赖外部资金支持等因素,也严重影响智慧化平台的推广应用,这些都需要进行系统性解决。

5 结束语

矿山生态修复智慧化平台的发展历程,本质上是技术创新与制度创新相互促进的过程。随着技术标准进程加速和政策支持力度增强,智慧化平台有望突破当前应用瓶颈,其价值将超越单纯的技术

工具层面,逐步发展为矿山绿色转型的核心引擎。这不仅需要持续的技术创新,更需要建立跨学科协作机制、培育新型技术人才、完善市场化运作模式。当技术赋能与制度保障形成合力时,智慧化平台才能真正实现从效率提升到治理变革的跨越,为矿山生态系统重建开辟更可持续的发展路径。

[参考文献]

- [1] 孙浩翔,张鑫,聂兴信,等.我国矿山生态修复的发展现状及废弃矿山治理模式研究[J].采矿技术,2025,25(1):201-208.
- [2] 魏中凯.废弃露天矿山生态修复治理现状及发展趋势研究[J].能源与环保,2023,45(1):45-51.
- [3] 樊笑英,姜杉钰,杜雪明.我国矿山生态保护与修复政策体系研究[J].上海国土资源,2024,45(2):205-209,215.
- [4] 苏杭,王佩,黎鹏.历史遗留废弃矿山生态修复治理研究[J].乡村科技,2025,16(5):140-144.
- [5] 高云峰,徐友宁,祝雅轩,等.矿山生态环境修复研究热点与前沿分析——基于VOSviewer和CiteSpace的大数据可视化研究[J].地质通报,2018,37(12):2144-2153.
- [6] 慕鹏勇,陈运启,贾焱森,等.智能化矿山数据治理实践

- 与策略研究[J].自动化应用,2024,65(15):269-271.
- [7] 王鹏,杨林,张冬阳,等.矿山智能化数据战略研究[J].中国煤炭,2023,49(10):1-10.
 - [8] 李全生,刘举庆,李军,等.矿山生态环境数字孪生:内涵、架构与关键技术[J].煤炭学报,2023,48(10):3859-3873.
 - [9] 陈春,谭壮.无人机航摄在矿山生态环境修复治理中的应用[J].北京测绘,2024,38(2):227-232.
 - [10] 王雪峰,刘奔,李者,等.无人机倾斜摄影测绘在矿山生态修复中的应用[J].露天采矿技术,2023,38(6):31-35.
 - [11] 张秉鹏.无人机航测技术与GIS系统在矿山修复领域的应用[J].山西焦煤科技,2024,48(7):47-50.
 - [12] 张呈彬,杨欢,王艺龙,等.基于高分辨率遥感数据的矿山环境监测[J].绿色矿冶,2025,41(4):55-62.
 - [13] 张智龙,谢凯迪,曹呈功.基于AI大数据处理平台结合智能网联设备的一体化矿山智慧施工方案[J].工程机械,2024,55(5):198-202,263.
 - [14] 张勇,王焜飞,郭斌,等.绿色矿山遥感监测方法研究[J].绿色矿冶,2025,41(1):71-76,87.
 - [15] 司洪涛,朱冬雪,严有龙,等.西南丘陵山区矿山地质环境监测体系建设研究[J].绿色矿冶,2024,40(5):75-80.

Research on Digital Application of Whole-Process Management in Mine Ecological Restoration

JIN Yan

(Anhui Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry, Hefei 230000, China)

Abstract: With the continuous exploitation of global mineral resources, a large number of mines have been abandoned due to resource depletion or economic reasons, resulting in land abandonment, ecological damage and environmental pollution. However, the current mine ecological restoration work is faced with multiple practical difficulties, such as lagging restoration concept, sticking to the “end treatment” model, single technical means, low integration, heavy construction and light maintenance in management mode, weak supervision system and weak supervision system, which are difficult to meet the needs of modern ecological restoration. This paper took the whole process management cycle of “design-construction-monitoring-maintenance” as the main line of research, systematically discussed the reconstruction of mine repair management mode driven by digital technology, and verified the effectiveness of Internet of Things, Big Data, Artificial Intelligence and other technical means in the whole process of mine repair through practical cases such as Zhalainguoer in Inner Mongolia and Hebei intelligent monitoring platform. This model provides a scientific and accurate solution for mine ecological restoration, which has significant practical value and industry promotion potential.

Key words: mine restoration; whole process management; digital technology; intelligent decision-making; multi-source data fusion