

基于 AI 与大数据赋能视角下的矿山生态修复技术革新与实践进展

路向福 安嘉澍* 李金洛 冯舒佳

(商丘师范学院, 河南 商丘 476000)

摘要: 随着矿产资源开发强度的不断加大, 我国矿山的生态环境问题越来越严重, 传统生态修复技术在修复效率、监测手段、智能决策等方面存在很多缺陷。近些年来, 人工智能(AI)以及大数据技术的迅猛发展, 给矿山生态修复领域赋予了新的技术途径和治理形式。以AI和大数据技术赋能为视角, 对目前矿山生态修复的研究背景、主流方法及典型问题进行梳理, 主要对AI与大数据在生态损伤识别、动态监测、修复效果评价、智能决策支持等各方面的最新应用进展进行了综述。研究结果表明, 依靠遥感影像的深度学习算法、依靠知识图谱驱动的损伤识别系统、依靠大数据平台创建的全过程修复监管体系, 在多个矿山修复案例中已经实现示范应用。本文还对目前的技术在数据标准化、模型可解释性、跨区域适应性等各方面的挑战进行了分析, 并提出未来可以从多源异构数据融合、行业专用智能模型创建、政策和技术协同推进等方面入手, 实现矿山生态修复的数字化、智能化、精细化转型。研究可以给绿色矿业发展和生态文明建设提供技术支持以及理论借鉴。

关键词: 人工智能; 大数据; 矿山生态修复; 遥感监测; 智能决策

1 引言

矿产资源是国家经济发展的基础支撑, 在我国现代化进程中起着举足轻重的作用。长期以来, 粗放式开采、重资源消耗的模式也造成了严重的环境问题。到2022年底我国历史遗留矿山总数已超9万处, 大部分废弃矿山存在植被破坏、水土流失、土地荒漠化、重金属污染等生态退化问题^[1]。矿山生态破坏不仅会影响到区域生态安全和土地的可持续利用, 还会制约绿色低碳发展目标的实现, 所以推进矿山生态修复就成为了生态文明建设的重要环节。

传统的矿山生态修复大多依靠工程技术手段, 即土地复垦、坡面整治、植被重建、排水改造等, 这些方法虽然在一定程度上改善了矿区的生态环境, 但是也存在着周期长、成本高、效果评价难、缺少精细化监管等问题^[2]。伴随着科技的不断发展, 尤其是人工智能、大数据技术迅速发展, 给矿山生态修复注入新的活力。AI技术有模式识别、自主学习、智能决策等特点, 大数据可以对多源、多维、动态数据进行采集、存储、挖掘。两者相融可以给矿山生态系统赋予更为智能化、精准化的诊断、治理和评价途径, 由“经验驱动”转向“数据驱动”的治理方式^[3]。

目前, AI和大数据在生态环境保护领域的应用研究已经逐渐展开, 在污染源识别、生态系统服务价值评估、遥感影像分析等方面也取得了一定成果。但是将其系统应用于矿山生态修复领域还处在起步阶段, 缺少系统的理论框架和典型实践经验, 相关研究大多集中于某

作者简介: 路向福(2003-), 研究方向为矿山生态修复规划。

李金洛(2005-), 研究方向为算法型大数据分析。

冯舒佳(2007-), 研究方向为算法设计与应用。

通讯作者: 安嘉澍(2006-), 研究方向为工业软件设计。

一个环节的技术集成或者局部案例的分析。因此有必要从技术革新和实践应用的综合角度出发,对目前AI与大数据技术在矿山生态修复中的研究进展、关键技术路径、典型应用案例、未来发展趋势做系统的综述。

2 矿山生态修复的背景与现状

2.1 矿山生态破坏的典型特征

矿山开采活动属于土地资源强干扰型行为,它给生态系统造成的影响具备空间广、破坏大、修复难等特征。露天开采、堆矿排土、尾矿处理等过程中,常常造成地表植被严重破坏、土壤结构失衡、水体污染、地貌景观破碎,区域生态系统稳定性受到明显干扰^[4]。在煤矿、金属矿等典型的资源型地区,采动沉陷产生大量的塌陷地、水域以及废弃地,严重阻碍了土地的再利用和生态系统的恢复。另外由于矿山生态退化具有长期性、不可逆性等特点,矿区自然恢复能力差,必须依靠人为干预进行生态修复。矿山生态破坏常常和区域经济发展、环境政策、历史遗留问题交织在一起,修复治理过程要兼顾社会、经济、生态等多重目标,这也决定了它的技术路径具有很高的复杂性、系统性。

2.2 传统修复技术体系与其局限性

目前我国矿山生态修复实践主要依靠“工程治理+生态重建”模式,即通过地形地貌重塑、植被重建、排水系统构建、污染土壤治理等工程措施改善生态环境^[5]。这些方法在一些矿山治理项目中取得了一定的效果,主要在土地复垦、水土保持方面。但是随着修复规模的扩大和监管要求的提高,其传统技术体系逐渐治理成本高、周期长,大规模地貌重构、土壤改良和植被种植等工程需要投入大量的人力物力,实施周期长、财政负担重,修复模式单一。适应性差,大部分工程模式都没有针对具体的矿种、地貌类型、区域气候做适应性分析,容易造成“一刀切”的现象,影响修复效果,生态监测与评估滞后,修复效果主要依靠事后的评估,没有建立连续的、系统的生态监测体系,不能及时发现问题并进行调整。缺乏过程动态监管能力:从项目立项、实施到验收缺少高效的信息化监管手段,致使修复过程无法追溯,监管力度不够。

2.3 国家政策导向与行业发展趋势

近些年来,我国十分重视矿山生态修复工作,陆续出台一系列政策文件,包含《国土空间生态修复规划(2021-2035年)》、《自然资源部关于加强历史遗留矿山生态修复的指导意见》等,明确提出推进矿山生态修复的系统治理、源头治理、科技支撑。其中政策上多次提出要依靠遥感、大数据、人工智能等现代信息技术手段来提高修复效率和监管能力^[6]。“十四五”期间,山西、贵州、甘肃等资源型省份开始探索用数字技术辅助生态修复的新治理路径,开展生态损伤识别、修复项目全流程管控、修复效果远程评估等数字化试点项目。

3 AI与大数据技术的基本概念及其在生态修复中的潜力

3.1 人工智能与大数据技术概述

人工智能就是使计算机具有类似人的思维、学习、判断的能力的一门技术。核心就是机器学习、深度学习、模式识别、自然语言处理等子领域。依靠算法驱动、数据训练, AI 可以对大量的复杂数据加以分析,找出规律,预估趋向,帮忙决策。目前在图像识别、语义理解、无人驾驶等领域已经得到应用,其在环境科学、生态保护等方向的跨界融合也越来越深^[7]。大数据指的是不能用传统的数据库工具来捕捉、管理、处理的大量、复杂的数据集合。其典型特点就是体量大、种类多、处理快、价值密度低、真实性高。生态修复过程中大数据

包含遥感数据、GIS 数据、无人机影像、传感器实时数据、历史监测记录等，具有时间尺度广、空间分辨率高、数据类型多样等特点^[8]。人工智能和大数据技术相互配合，对生态环境中复杂的进程进行量化、建模、模拟，从而实现从数据获取、处理、分析、决策、反馈改善全过程智能化管理。

3.2 AI 与大数据在生态环境治理中的应用趋势

近年来，AI 和大数据在生态环境治理方面的应用取得明显成效，主要表现在如下几个方面。环境监测与预警系统建设：用遥感与深度学习算法来识别污染源的变化、植被的变化、土地退化的趋势，达到生态风险预警的目的^[9]。生态系统建模与服务价值评估：利用 AI 算法来建立生态服务函数模型，预测修复前后系统服务功能的变化。污染溯源与空间分析，用时空数据进行分析，找到污染源、追踪污染路径，提高监管的针对性和科学性。智慧监管平台的建设，各地推进“智慧环保”平台的建设，将 AI 嵌入到监测数据流当中，从而达到动态治理、多部门协同管理的目的。在此基础上，AI 与大数据给矿山生态修复的“智能识别、精准干预、动态评估”赋予了技术支撑，尤其适合解决数据繁杂、环境多变、评价困难的矿区治理问题。利用遥感影像和图像识别算法，实现矿区受损区域边界和类型的自动提取，得到损伤图谱，对修复过程进行实时监控，利用大数据平台融合现场感知设备、无人机航拍、卫星遥感等，实现修复状态的动态跟踪，利用历史案例和实时数据，训练 AI 模型辅助制定修复方案并调度。

3.3 矿山生态修复适配的 AI 模型与数据需求

根据矿山生态修复的特殊性，AI 和大数据的应用要考虑高空间异质性、高环境扰动性、多阶段修复过程的复杂性。当前研究中常用的 AI 模型有支持向量机 (SVM)、随机森林 (RF)：SVM 和 RF 都适合用于植被恢复预测、土地利用识别、生态恢复能力分类。首先是卷积神经网络 (CNN)。在遥感图像识别方面表现较好，可以用于矿山边坡变化识别、水土流失区域检测；然后是循环神经网络 (RNN) 和长短期记忆网络 (LSTM)，适合于多时序数据分析，例如生态指标变化趋势预测；最后是图神经网络 (GNN) 和知识图谱构建。可以用来建立生态损伤因果关系网络，辅助空间推理和语义关联的识别。从数据需求来看，AI 与大数据技术的使用需要高质量、多源、多尺度的数据支撑。典型的数据类型如下表 1 所示。

数据类型	数据来源	应用方向
遥感影像数据	卫星遥感、无人机航拍	地貌变化识别、植被覆盖监测
地理空间数据	GIS 平台、DEM、土地利用图	空间建模、修复适宜性分析
生态监测数据	土壤、气象、水质监测站	修复成效评价、污染溯源
项目过程数据	修复方案、施工记录、政策数据	智能辅助决策、过程管理

表 1 数据类型表

4 AI 和大数据在矿山生态修复技术中的应用进展

随着遥感技术、物联网、AI 算法、大数据平台的不断发展，矿山生态修复也由原来的“人力+工程”模式向现在的“数据驱动+智能管理”模式转变。目前 AI 和大数据已经在矿山生态修复的关键环节中得到应用，主要在生态损伤识别、动态监测、成效评估、辅助决策等几个方面取得了重要突破，推动了矿山修复由静态治理向全过程智能治理转变。

4.1 基于遥感与 AI 的矿区生态损伤智能识别

生态损伤识别是生态修复的前提,传统方法主要是依靠人工巡查和卫星图判读,效率低、主观性强。AI 技术,尤其是图像识别类算法的应用,使得遥感数据的智能化处理成为可能。研究显示,依靠卷积神经网络(CNN)的遥感影像识别模型,可以对矿区遥感图像里的塌陷、裸地、尾矿库这些重要受损区域展开自动分类,空间边界提取以及面积统计^[10]。另外近几年来兴起的知识图谱(Knowledge Graph)技术也被应用到生态损伤语义分析和空间推理当中。金等人创建了地理知识图谱、空间推理、生态识别模型,把地理实体(山体、水体、裸地)和语义关系融合起来,从而对煤矿区生态损伤类型和演化路径实施智能识别,提升了识别的准确性以及解释性。

4.2 基于大数据平台的修复过程动态监测与监管

修复过程监测对于保证治理质量、效果来说,起着重要的保障作用。利用集成式大数据平台,可以将遥感影像、地面传感器、无人机图像、气象数据等多源数据融合起来进行分析,从而达到全过程监测、多维监管的目的。贵州、山西等省已建立矿山生态修复大数据监管平台,对修复项目从立项、施工到验收的全过程进行可视化监管。该类平台有修复过程动态对比的功能,通过遥感数据的时序处理来生成修复前后对比的图像。风险预警系统功能,结合AI 算法分析修复进度偏差、地质灾害风险等,提前发出预警;生态指标可视化功能,建立生态修复指标体系,实现修复效果可量化管理。

4.3 生态修复适宜性分析与 AI 建模预测

矿山修复不是“盲目治理”,而应该根据地形、土壤、气候、生物群落特征做科学的适宜性分析。近些年来,研究者利用 AI 建模方法(随机森林、支持向量机等)创建生态修复适宜性模型,对矿区各个区域的恢复潜力实施分类预估,从而给分区治理和资源调配赋予支撑。金典等人利用机器学习的方法,对采煤沉陷区耕地恢复潜力进行建模,将矿区分为高、中、低三类适宜区,实现修复资源的精准投入和规划。大大提高了修复策略的科学性以及执行效率。

4.4 基于深度学习的植被恢复与水体监测

植被恢复是矿山修复的重要目标之一,传统监测方法大多采用人工样方和 NDVI 分析,存在精度不够、效率低下的缺点。遥感影像结合深度学习算法可以实现植物群落类型的自动识别、覆盖度的自动估算、变化趋势的自动追踪,实现植被恢复的高精度、自动化监测。另外利用多源遥感数据融合和深度学习分析,可以实现矿区水体污染状况、水文连通性恢复情况动态监测。LSTM 模型被用来预测矿区地表径流变化趋势,给水文调控和生态安全保障提供数据支持。

4.5 生态修复成效评价的智能化与指标体系构建

生态修复成效评价属于闭环管理的一个环节。传统的评价方式大多是事后人工评分或者生态指标计算,周期长、主观性大。AI 算法可以利用多源数据来建立评价模型,对修复效果进行空间可视化展示和趋势预测。袁静芳等提出建立生态质量、系统稳定性、服务功能三个方面的指标体系,将遥感、实地监测、政策目标结合起来,对生态修复进行量化评价,并用机器学习回归模型预测未来生态趋势。这些方法给矿山修复项目的验收、对比、优化提供技术支持。

参考文献：

- [1] 张进德, 杨利亚, 田磊, 等. 矿山生态修复技术方法研究与展望[J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(04):16-25.
- [2] 郭冬艳, 杨繁, 高兵, 等. 矿山生态修复助力碳中和的政策建议[J]. 中国国土资源经济, 2021, 34(10):50-54.
- [3] 许晓明, 胡国峰, 邵雁, 等. 我国矿山生态修复发展状况及趋势分析[J]. 矿产勘查, 2022, 13(Z1):309-314.
- [4] 李超凡, 尹岩, 郝凤明, 等. 碳中和背景下矿山生态修复的文献计量分析[J]. 土壤通报, 2023, 54(04):955-965.
- [5] 袁静芳, 刘晓曼, 张文国, 等. 基于中国知网的生态修复评价热点与趋势的可视化分析[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(07):817-826.
- [6] 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(06):2077-2087.
- [7] 胡亮, 贺治国. 矿山生态修复技术研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(04):40-45.
- [8] 李远航. 武安市白沙村矿山生态地质环境综合治理模式研究[D]. 中国地质大学(北京), 2020.
- [9] 陈森强. 遥感生态指数在矿山生态修复监测中的应用[J]. 资源导刊, 2024, (04):29-32+37.
- [10] 么洪波. 大数据技术在生态环境监测中的应用价值与策略研究[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(06):86-88.

Technological Innovation and Practical Progress in Mine Ecological Restoration from the Perspective of AI and Big Data Empowerment

LU Xiangfu, AN Jiashu, LI Jinluo, FENG Shujia

(Shangqiu Normal University, Shangqiu, Henan 476000, China)

Abstract: With the continuous intensification of mineral resource development in China, ecological issues in mining areas have become increasingly prominent. Traditional ecological restoration technologies exhibit significant limitations in restoration efficiency, monitoring methods, and intelligent decision-making. In recent years, the rapid development of artificial intelligence (AI) and big data technologies has introduced new technical pathways and governance models for mine ecological restoration. From the perspective of AI and big data empowerment, this paper systematically reviews the current research background, mainstream methods, and typical challenges in mine ecological restoration. It focuses on summarizing the latest application advancements of AI and big data in ecological damage identification, dynamic monitoring, restoration effect evaluation, and intelligent decision support. The study reveals that deep learning algorithms based on remote sensing imagery, damage identification systems driven by knowledge graphs, and comprehensive restoration supervision systems built on big data platforms have been successfully implemented in multiple mine restoration cases. The paper also analyzes current technical challenges in data standardization, model interpretability, and cross-regional adaptability, proposing future efforts should focus on multi-source heterogeneous data integration, construction of industry-specific intelligent models, and coordinated policy-technology advancement to achieve digital, intelligent, and refined transformation in mine ecological restoration. This research provides technical support and theoretical references for green mining development and ecological civilization construction.

Keywords: Artificial intelligence; Big data; Mine ecological restoration; Remote sensing monitoring; Intelligent decision-making