

矿山生态修复效益研究进展及展望

李 博^{1,2}, 田彦清^{3,4}

(1. 中国地质矿业有限公司,北京 100029;2. 北京化工大学 经济管理学院,北京 100029;
3. 中国五矿集团有限公司,北京 100010;4. 中国地质大学(北京)工程技术学院,北京 100083)

摘要: 矿山生态修复效益是预测和检验修复成效的重要方式,可为政府科学决策、社会资本参与修复治理、修复工程实践提供可靠决策支撑和有效监督依据。为探究矿山生态修复效益的研究热点及发展趋势,文章以 WOS 数据库和 CNKI 数据库为文献来源,采用文献计量学和 Citespace 软件从发文数量、学科分布、研究热点等方向进行文献分析,解读国内外研究重点,总结矿山生态修复效益研究存在的问题,并预测和分析未来研究方向和趋势。研究表明:矿山生态修复效益研究发文呈递增趋势,其中生态修复、环境保护、修复、矿山生态等为研究高频主题词,环境科学与工程、矿业工程、生态学为主要学科,生态修复、矿山修复、废弃矿山、循环经济等为当前研究热点;国内外矿山生态修复研究以生态功能恢复以及生态、经济、社会和综合效益分析为主;矿山生态修复效益评价主要集中在生态效益、经济效益、社会效益和综合效益评价方面,经济效益和生态效益多以定量指标为主,社会效益多以定性指标为主;当前研究仍存在尚未形成权威评价体系和动态分析机制、缺乏统一评价标准、部分计算模型和评价方法普及率和使用率不高等问题;未来矿山生态修复效益研究的必要性越来越凸显,需要加快研究和构建多维综合矿山生态修复效益评价体系,探索实施第三方机构评价模式,适时引入卫星遥感、物联网、人工智能、大数据、AI 等数智化技术的支持,助力矿山生态修复效益分析更加系统化、高效化、精准化。

关键词: 矿山;生态修复;效益评价;生态效益;经济效益;社会效益

中图分类号: TD88;X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2025)12-0011-10

doi: 10.13402/j.gejs.2025.12.145

Research progress and prospect of mine ecological restoration benefits

LI Bo^{1,2}, TIAN Yanqing^{3,4}

(1. China National Geological and Mining Corporation, Beijing 100029, China; 2. School of Economics and Management, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. China Minmetals Corporation, Beijing 100010, China; 4. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: The ecological restoration benefits of mines are an important way to predict and verify the effectiveness of restoration. They can provide reliable decision-making support and effective supervision basis for government scientific decision-making, social capital participation in restoration and governance, and restoration engineering practice. In order to explore the research hotspots and development trends of the ecological restoration benefits of mines, this paper takes the WOS database and CNKI database as the literature sources, and uses bibliometrics and Citespace software to conduct literature analysis from the perspectives of the number of published papers, discipline distribution, and research hotspots, to interpret the research focuses at home and abroad, summarize the existing problems in the research on the ecological restoration benefits of mines, and predict and analyze the future research directions and trends. The research shows that the number of

收稿日期: 2025-01-16

作者简介: 李 博(1985—),女,中级经济师,从事矿山生态修复及工程管理研究。

通信作者: 田彦清(1985—),男,高级工程师,从事矿山生态修复及安全管理研究。

published papers on the ecological restoration benefits of mines is increasing. Among them, ecological restoration, environmental protection, restoration, and mine ecology are the high-frequency research keywords. Environmental science and engineering, mining engineering, and ecology are the main disciplines. Ecological restoration, mine restoration, abandoned mines, and circular economy are the current research hotspots. The research on the ecological restoration of mines at home and abroad mainly focuses on the restoration of ecological functions and the analysis of ecological, economic, social and comprehensive benefits. The evaluation of the ecological restoration benefits of mines mainly focuses on ecological benefits, economic benefits, social benefits and comprehensive benefits. Economic benefits and ecological benefits are mostly based on quantitative indicators, while social benefits are mostly based on qualitative indicators. The current research still has problems such as the lack of an authoritative evaluation system and dynamic analysis mechanism, the lack of unified evaluation standards, and the low popularity and usage rate of some calculation models and evaluation methods. The necessity of future research on the ecological restoration benefits of mines is becoming increasingly prominent. It is necessary to accelerate the research and construction of a multi-dimensional comprehensive evaluation system for the ecological restoration benefits of mines, explore the implementation of a third-party institution evaluation model, and introduce the support of digital and intelligent technologies such as satellite remote sensing, the Internet of Things, artificial intelligence, big data, and AI in a timely manner to help make the analysis of the ecological restoration benefits of mines more systematic, efficient and accurate.

Key words: mine; ecological restoration; benefits evaluation; ecological benefits; economic benefits; social benefits

矿产资源开发为社会经济发展创造了巨额财富^[1-3]。同时,全球范围内持续扩大的矿业活动带来了占用大量土地资源、污染周边环境等一系列生态恶化问题,引发社会各界高度重视并亟需治理解决^[4-5]。矿山生态修复作为生态文明建设的关键措施,旨在解决矿产资源开发后遗留的环境问题,消除地质隐患,恢复受损的自然生态系统,被赋予了推动社会文明进步的重大使命^[6]。党的十八大以来,围绕国家生态安全保障战略,我国核查全国历史遗留废弃矿山并统筹推动修复治理,连续部署实施 5 批 80 个历史遗留废弃矿山生态修复示范工程,累计完成修复治理矿山面积超过 320 000 hm²,有效改善了矿区生态状况和周边人居环境^[7]。矿山生态修复效益分析是预测和检验修复成效的重要方式,对于政府的支持和投入、资本的介入和支撑力度、项目承建方的参与积极性和效益预测等保障修复项目成功实施起到至关重要的作用。

当前,国内外学者从生态效益^[8-11]、社会效益^[12-14]、经济效益^[15-17]等视角出发,采用定性、定量或综合评估等方式对矿山生态修复效益进行分析研究^[18-20],取得了一定的研究成果。但当前社会各界对矿山修复的重要性和必要性认识不平衡,修复效益研究存在局限性,严重影响和制约了绿色矿山建设进程和执行力。本文通过文献计

量学和 Citespace 软件,基于矿山生态修复相关研究的发文数量、学科分布及研究热点,对国内外研究现状进行梳理和解读,并分析存在的问题,展望未来研究方向和趋势,以期为矿山生态修复效益的研究和工程实践提供有益参考。

1 矿山生态修复效益的文献信息

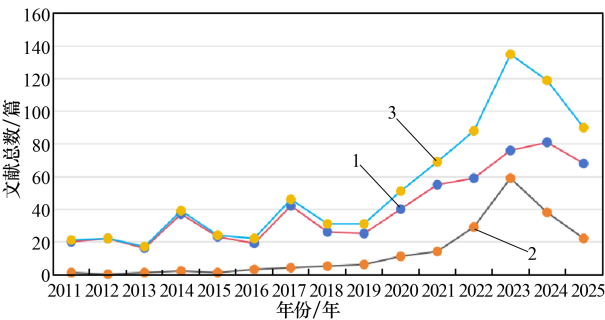
1.1 文献来源及检索

基于文献计量学,在 Web of Science (WOS) 和 China National Knowledge Internet (CNKI) 上检索主题词矿山生态修复效益,检索时间为 2011 年至 2025 年。为确保搜索结果精准性和可靠性,选择数据库分别为:WOS 核心库和中国知网高级检索。校核检索结果,剔除不相关文献后,共筛选出文献 805 篇,其中 WOS 和 CNKI 分别为 609 篇和 196 篇。

1.2 发文年份及数量

按照发文年份和发表数量针对矿山生态修复效益研究成果进行统计并绘制折线图,如图 1 所示。由图可见,文献总数呈增长趋势。其中,国外文献呈现波动式增长;国内 2014 年以前相关研究较少,在中央环保督察后,2022 年矿山修复效益研究骤增,并于 2023 年达到峰值。发文数量持续攀升的情况表明,矿山生态修复效益研究仍处于成长阶段,尤其是废弃矿山生态修复效益分析

未来有可能成为学术研究的重点和热点。



1—WOS; 2—CNKI; 3—总量。

图 1 矿山修复效益研究文献年度分布

1.3 研究主题频数统计分析

对检索的 2011 年至 2025 年期间矿山生态修复效益类 805 篇论文梳理分析发现,相关高频主题词如表 1 所示。其中,生态修复、environmental protection、restoration、mining、矿山生态等主题词出现频率较多。国内外研究重点有所差异,国外更偏重于生态环境研究,国内更关注矿山本身的研究。

表 1 文献中有关矿山修复效益的高频主题词统计

序号	国内高频词	词频	国外高频词	词频
1	生态修复	97	environmental protection	89
2	矿山生态	53	restoration	77
3	矿山生态修复	41	mining	65
4	废弃矿山	35	ecological remediation	37
5	矿山废弃地	10	mine restoration	29
6	修复治理	8	sustainable development	27
7	矿山废弃地	8	ecological environment	24
8	成效评估	7	remote sensing	21
9	效益评价	7	assessment	19
10	修复研究	7	soil	16

1.4 研究热点分析

关键词作为论文的核心概括,其出现频率越高,表明词关键词在共现图谱网络中越重要。将检索的 196 篇中文文献进行数据格式化转化并导入 Citespace,利用 Citespace 对文献关键词共现情况进行计量和可视化分析。Citespace 依据网络结构和聚类的清晰度计算出模块值 Q 值以及平均轮廓值 S 值来表征聚类效果的好坏,分析可靠度,当 Q 值大于 0.3 时表示聚类结构显著,当 S 值大于 0.5 时表示聚类合理, S 值大于 0.7 表示聚类高效率且有说服力。本次分析得到模块值 $Q=0.842\ 2$ 以及平

均轮廓值 $S=0.956\ 9$,说明该聚类高效率且有说服力。生成关键词聚类图 2 所示。圆圈越大表明相关内容发展时间越久、相关研究越多。连线表明关键词之间具有相互联系,连线越多说明关键词与其他关键词之间交互越紧密。结合高频主题词统计分析发现,该领域研究热点主要为生态修复、矿山修复、废弃矿山、循环经济、生态效益、矿山、修复、治理措施等。

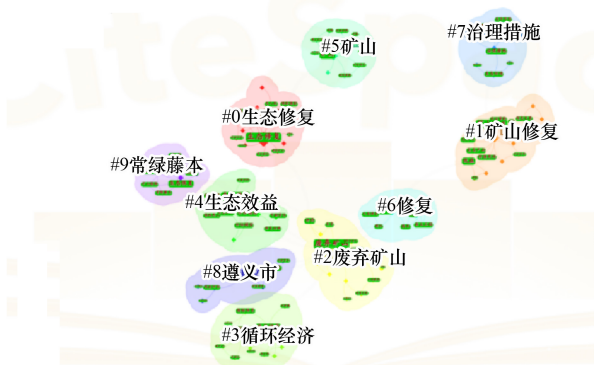


图 2 关键词的共现图谱

1.5 学科知识结构分析

矿山生态修复效益涉及多学科交叉研究,通过对 2011 年—2025 年文献检索结果进行学科分布排序可以得知,环境科学与工程占比最高,在 WOS 和 CNKI 文献中分别占比达 20% 和 58%,如图 3 和图 4 所示。在 CNKI 文献中,学科排名前五的分别为环境科学与工程、矿业工程、工业经济、建筑科学与工程和地质学;在 WOS 文献中,学科排名前五的分别为 Environmental science and engineering、Biological science、Geological sciences 和 Economics,同时 geographical science、agricultural economy 等其他学科占比达 42%,多学科与矿山生态修复的融合与联动趋势越来越凸显,有助于促进学科间发展与完善。

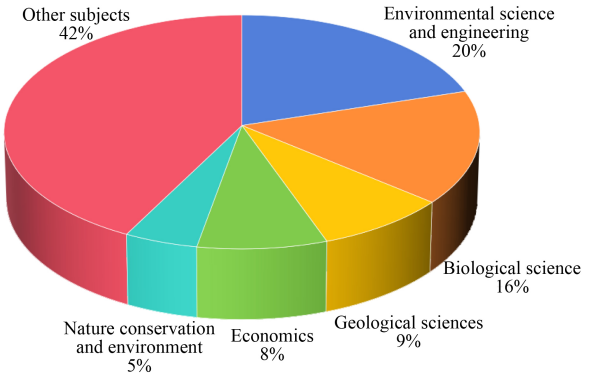


图 3 WOS 中的文献学科统计

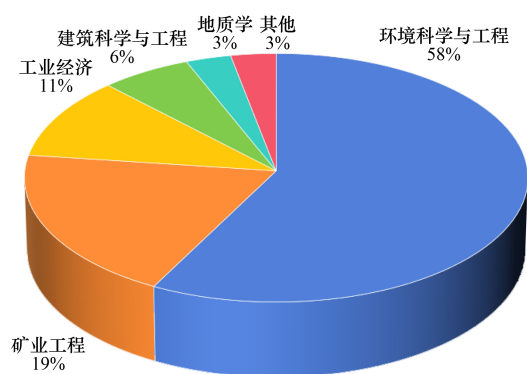


图 4 CNKI 中的文献学科统计

2 矿山生态修复效益的研究重点解读

2.1 国外研究现状

国外矿山修复源于 20 世纪 20 年代,很多发达国家在矿山治理理论、技术和实践中总结了丰富经验,并积累了有关矿山修复效益研究的成果^[21-24],但现有研究以生态功能恢复和生态效益评估居多,偶有其他内容引入效益评价中^[25-28]。

在研究内容上,生态修复效益方面的学术研究较为广泛,其指标多侧重于物种多样性、土壤植被覆盖状况、大气与水质等方面。ODUM^[21]、VLADO 等^[29]、KENTULA 等^[30]、建立群落能量、生物多样性、生态功能与结构等评价指标体系,并跟踪和实证研究。国际生态协会基于生态系统的结构功能自维持水平、抗干扰能力和与周边系统的物质能量交换等 3 项核心维度,构建了 9 个具体指标的生态修复质量评估体系^[31]。在评价方法上,大部分研究都是以相关价值的量化来体现生态修复的经济价值。COSTANZA 等^[32]采用替代成本法、市场价格法等方式,将生态功能价值量化为经济效益价值。PEARCE 等^[33]以支付意愿(WTP)作为评价生态效益经济价值的计量方法。

经济效益评价研究属于当前国外学者研究稍多的方面,其计算多以替代成本法、市场价格法、支付意愿等方式,由多个变量衡量或综合评价。DAMIGOS 等^[34]着重以环境经济效益进行废弃地复垦所产生的效益研究。HUBER^[35]在自然资源价值理论启发下提出生态补偿付费观点。MISHRA 等^[36]借助地理信息系统和成本效益分析法,构建矿区治理成本与后续收益的核算模型。EKO 等^[37]将碳交易市场机制纳入评估体系,通过比对分析

土地复垦阶段的碳排放与碳封存价值来评估其经济效益。通过梳理分析发现,针对不同的修复对象和各类异型地质环境状况所采取的经济效益衡量方式有所不同,效果的评估呈现多样性,评价标准也相对较为宽泛。

社会效益评价研究成果较少,现有的研究内容主要集中在社会服务功能、群众满意度等方面。CAIRNS^[38]突出社会服务功能在修复中的作用,通过增设社会的需要和优先事项来优化完善以往生态修复评价模式。BESTLMEYER^[39]从经济成本、利益相关者的满意度等方面对废弃矿山修复效益进行评估。

此外,其他综合因素也被引入评价维度。比如,OB I 从生态学、社会经济、物理化学理化性质等角度构建效益评价体系。KELLY 等^[40]基于土壤单元评估,通过量化矿区与邻近参照地之间的土壤和植被因子的差异来评判修复质效。PALMER 等^[41]提出多维评价体系,从动态引导、生态修复、复原力、无持久伤害等方面评价修复模式。还有部分学者提出废弃矿山修复既要重视自然生态价值,也要重视文化生态服务价值,将文化生态服务纳入评价效益中^[42-43]。另有研究将蚁群算法、机器学习等引入矿区生态修复效益评价中,通过优化指标与公式来提升评价精准度^[44-46]。由此可见,学者对矿山修复效益的评价已经从生态、社会、经济、文化等多个角度拓展开来,未来研究内容将会越来越多样性,跨学科和跨界交叉融合研究凸显的态势得到进一步印证。

2.2 国内研究现状

相较于国外发达国家,我国矿山修复起步较晚,且初期以矿山用地复垦为主,研究成果主要在修复技术和模式等方面,修复效益评价研究尚未形成系统体系,直至党的十八大报告中明确指出,要将资源消耗、环境损害和生态效益纳入经济社会发展评价体系,该领域的研究与实践才得以被提升到新的战略高度。近年来,在经济、社会、生态及综合等效益方面探讨逐渐增多,较大促进了矿山修复实践。

(1) 经济效益方面。矿山修复经济效益是当前学者关注和研究的重点,相关研究采取不同方

式将矿山修复带来的隐性收益进行量化, 探讨最多的是从土地复垦基础上看经济效果。戴云仙等^[10]对不同复垦模式下的复垦成本和土地收益进行计算和比对分析, 以此评价黑岱沟露天煤矿的复垦经济效益。刘雨晴^[12]从公众认知和实际经济状况角度分析和评估矿山治理效益, 并以此构建效益评价模型。还有研究采用带动经济和促进就业、区域 GDP 增长、农业产品收益等产生的价值衡量矿山修复经济效益^[47-48]。比如, 秦静等^[48]构建了涵盖安全、资源、环境与生态修复等多个维度的指标体系, 并以货币量化方式评估某金矿修复成效。这些研究展现出可从多个维度全面评估, 也表明矿山修复并非纯粹的支出, 也能创造经济价值, 生动诠释了矿山修复不仅能再造“绿水青山”, 也能创造“金山银山”。

(2) 社会效益方面。我国学者关于矿山修复社会效益评价主要集中在矿山修复对社会贡献和影响方面, 通过梳理矿山修复对周边群众生产生活、公共健康与安全、社区和谐稳定、文化与福祉等方面的影响来衡量矿山修复所取得的效益^[13,49]。金兴等^[50]从区域经济、居民生活、社会和谐等 5 个方面建立了社会效益评价指标体系。马跃^[16]聚焦就业、公众满意度、政府补贴、上下游产业联动收益等角度, 构建评价指标体系并案例实证研究。同时, 有些社会效益无法直接用直观指标衡量, 但又至关重要, 学者采取其他指标替代以体现社会效益成果。比如, 戴红军等^[51]采用旅行费用、成果参照等方法测算淮南某矿区社会效益。林燕华^[52]揭示恩格尔系数、静态投资收益、产业结构等变化率对社会效益的影响程度, 并以此评价矿山修复治理。但是, 通过对现有研究对比分析发现, 社会效益中引用的民众满意度、产业发展水平、社会稳定性等指标较难量化, 且容易与经济、生态等指标产生交叉。

(3) 生态效益方面。生态效益是废弃矿山修复的核心, 当前我国学者大多数都围绕土地复垦和植被重建的角度进行探讨, 也有土地、林业等相关学科和相对成熟理论可供借鉴和参考^[9,11,17]。孙峰等^[53]聚焦生态系统服务功能和价值, 以涵养水源、固碳、保持水土、调蓄洪水等

指标评价修复工程的生态效益。罗明等^[54]建立山水林田湖草共治的生态修复模式, 并从水源涵养、水质净化、环境保护、水土保持等方面进行生态效益评价。还有一些学者侧重于矿山修复生态效益的评价模型研究。谷从楠^[55]和李芬等^[56]基于项目资金投入和 DEA 算法分别构建矿山生态修复生态效益模型。王效科等^[57]探讨生态效益与生态系统服务的关系、形成机制和主要特征, 提出效益评价框架。综观相关研究发现, 基于不同的出发点, 矿山修复生态效益评价指标和所构建的模型也不同, 加之缺乏系统的聚类分析和案例跟踪研究, 相关评价标准的适配性有待具体研究。

(4) 综合效益方面。近几年, 矿山修复综合效益评价受到越来越受学者的青睐, 评价内容和方式也不断丰富化和具象化。大部分学者均从经济、生态、社会 3 方面建立综合效益评价体系并在相关矿山实证分析^[13,58-59]。不同学者受个人主观意识影响, 经济、社会和生态三者要素分类界定往往因人而异。比如, 马跃^[16]认为政府生态补贴属于社会效益, 而李甫等^[60]认为生态补偿资金属于经济效益。此外, 还有学者关注质量、服务功能等变化产生的效益, 并以此评价矿山修复综合效益。比如, 常俊杰^[61]立足属地特点, 从生态环境质量、服务功能和变化驱动力等 3 个维度构建综合效益评价体系。胡一帆等^[62]针对青藏高原属道路、水电和矿产的开发利用, 构建生态系统结构、服务和质量等 3 大指标类别的综合效益评估指标体系, 以实现生态修复综合效益的总体认知和长期监测。

3 当前研究特征与不足

(1) 在相关政策、理论、技术等研究不断丰富和持续更新下, 矿山生态修复的内涵与外延得到进一步拓展, 但其本质仍是以矿山生态修复为主^[63-66]。综合来看, 矿山生态修复目标已经从实现恢复结构与功能向实现经济社会可持续发展的转变, 修复对象也从单一的自然环境转向“山水林田湖草”等全要素系统, 但矿山修复解决的基础问题还是矿山生态治理和改善, 以推动经济社会绿色和可持续发展^[67-68]。因此, 要实现矿山生

态修复系统性的持续健康发展,就不仅要关注山水田湖草沙生态系统治理,也要关注修复工程的实施,更需关注修复效益的分析。只有建立长期科学有效的废弃矿山生态修复效益评价机制,才能促进矿山修复的能动性,持续探索最适宜、最经济、效益最大化的修复模式。

(2) 对于矿山生态修复效益的评价,主要集中在生态效益评价、经济效益评价、社会效益评价和综合效益评价这四个方面。其中,生态效益评价研究成果最为丰富,国内外研究学者大多通过土地复垦、林草植被覆盖、水源涵养、环境净化、生物多样性和气体调节等指标进行生态效益评价研究,同时还有部分学者从供给服务、支持服务、调节服务、文化服务等角度入手,以生态系统服务价值核算的方式评估废弃矿山生态修复效益;经济效益评价研究至关重要,也是当前国内外学者研究的重点内容,常用 GDP 增长率、人均收入水平、投入产出比、生态产品价值等指标衡量矿山修复的经济效益;社会效益评价研究相对较少,居民满意度、人口数量变化、政府补贴、就业率等不易量化指标以及部分与生态效益、经济效益交叉或者较难准确归类的指标均被纳入社会效益评价范畴;综合效益评价研究大多都是基于经济、社会和生态 3 个方面进行综合分析矿山修复的价值。

(3) 矿山生态修复效益评价的重点和难点在于指标和评价模型的构建。矿山修复属于系统工程,涉及多领域多学科,评价指标的全面性和贴合性都会影响评价结果的真实性和准确性,数据的可获得性和准确性也会直接影响评价指标的选择和应用^[69]。目前,经济效益和生态效益多以定量指标为主,且多数可转化为货币化效益进行比较,但社会效益多以定性指标为主且量化比较的不多。同时,计算模型和评价方法决定最终评价结果的客观性和准确性,目前的研究成果中,部分价值转换或者定量化评估的计算模型过于复杂,普及率和使用率不高,被公众认可和推广也存在一定难度^[10]。

(4) 矿山生态修复效益分析尚未形成较为权威的评价体系,缺乏统一的评价标准。由于不同

矿区环境的复杂性和破坏程度的差异性,现在矿山修复评价多依赖传统的评价路径,比如生态产品价值定量化评估、复垦植被和土壤的碳汇估算等^[64-65],但仍有很多效益是无形的,没有被纳入效益评价体系中。此外,不同的矿山开采类型会影响矿山修复工程方案的选择,也会影响效益评价的方式方法^[29];不同学者依据不同的出发点和目的,采用的理论和评价方法与体系也不同。

(5) 矿山生态修复效益动态分析机制有待建立和完善。矿山生态修复工程呈现出点多面广、类型复杂多样且治理周期较长、难度较大等特点,修复效益分析需要及时收集大量基础资料作参考,才能实时反映修复成效,因此建立动态监测机制显得尤为重要;大量的实时监测工作量和动态数据分析,可以借助物联网、人工智能、大数据等数智化技术的支持以及第三方专业机构协助,有助于提高效率 and 准确度^[47,70]。反之,修复效益动态分析成果可指导优化和调整废弃矿山生态修复工程实施,助力矿山生态修复更加系统化、高效化^[71]。

4 结论与展望

(1) 2011 年—2025 年,我国矿山修复效益类文献呈递增趋势,其中高频关键词为生态修复、矿山生态、废弃矿山等,研究热点主要集中在地质灾害、矿山修复、生态效益、循环经济等方面。经过十数年理论研究和工程实践,矿山生态修复在修复技术、修复模式等方面已取得较大进展,但修复效益分析研究有限。随着生态文明体制改革的进一步深化和“以高品质生态环境支撑高质量发展”理念的逐步深入,矿山生态修复效益分析研究的现实需要性越来越凸显,对于政府的主导、资本的介入、项目承建企业的参与积极性和效益预测等保障修复项目全方位实施的作用也越来越明显。废弃矿山生态修复效益分析研究会是未来学术研究的热点方向,也会成为矿山生态修复研究的重点内容。

(2) 矿山生态修复内容主要集中在土地复垦、林草植被覆盖、水土资源保持、地质安全隐患消除、生态产品开发等方面。矿山修复紧密联系着人类的福祉,在落实深化生态文明体制改革的新

部署和新质生产力赋能矿业高质量发展的大背景下, 矿山生态修复将迎来前所未有的机遇和挑战。矿山生态修复将站在更高起点上, 以持续推进《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》和《“十四五”历史遗留矿山生态修复行动计划》落实为抓手, 着重推动“历史遗留废弃矿山生态修复示范工程”和“山水林田湖草沙一体化保护和修复工程”实施, 及时先进经验并推广运用, 特别是总结修复效益分析成果, 帮助和支持更多有条件、有需求的区域和群体因地制宜开展矿山生态修复, 助力实现经济、社会和生态的可持续发展。

(3) 矿山生态修复效益评价主要集中在生态效益评价、经济效益评价、社会效益评价和综合效益评价等方面。随着新时代生态文明建设、建设人与自然和谐共生现代化的深入推进, 矿山地质环境修复的内涵将进一步拓展, 效益评价角度也将逐步增多, 需要加快研究和构建多维综合矿山生态修复效益评价体系, 从经济效益(如土地可利用率、农林产品量、碳排放交易、生态补偿、资源循环利用率等)、生态效益(如植被覆盖率、水土保持、净化环境、物种群落、碳固存等)、社会效益(如群众满意度、增加就业率、人口净流入量等)、可持续发展(如上下游产业联动收益、品牌形象、环保意识、景观美学等)等方面全方位多维度综合评价修复成效, 既能为政府、社会、修复企业等参与各方提供有效参考和科学决策, 也能倒逼参与各方和社会大众提升矿山生态修复的认知和意识。

(4) 矿山生态修复效益评价的真实性和准确性一直是实践的难点和弱项, 不同区域不同类型的废弃矿山生态修复所采用的技术方法、实施方式以及修复效益评价内容和方式都存在显著差异, 修复效益评价体系适用性、精准性和推广性也有待进一步挖掘。因此, 在建立多维综合矿山生态修复效益评价体系基础上, 结合实践经验和不同矿山客观实际, 设置评价指标因子和系数, 针对不同区域不同类型矿山可选取不同影响因子和不同系数, 确保修复效益评价因地制宜、因矿而异, 既可以评价大型复杂的矿山, 也可以评价规模较

小简单的矿山, 同时可以依据需求适度简化评价内容和过程, 切实提高适用性; 探索实施第三方机构评价模式, 通过有偿购买方式委托独立于政府与企业之外的且具备国家认可资质的第三方机构, 利用其专业技术能力和资源整合能力, 为废弃矿山修复提供独立、专业、客观、公正的修复效益评价服务, 进一步增强修复效益评价的客观性、科学性和信任度; 适时引入卫星遥感、物联网、人工智能、大数据、AI 等数智化技术的支持, 通过天空地网多元感知数据, 搭建智能化监测系统、智慧化分析系统、数字化管理系统, 实现矿山生态修复的精准实施、实时状态监测、态势智慧分析、动态效益评估等, 为我国矿山生态修复提供精准决策支持。

参考文献:

- [1] RENEE E. YOUNG, GEORGE D. G, BETHANIE W, et al. International principles and standards for the ecological restoration and recovery of mine sites [J]. *Restoration Ecology*, 2022, Vol. 30(2): e13771.
- [2] NDEYE M N, DAVID B, MATTHIEU B, et al. Artisanal exploitation of mineral resources: remote sensing observations of environmental consequences, social and ethical aspects [J]. *Surveys in Geophysics*, 2022, 44(1): 225–247.
- [3] 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.
- [4] HAILIANG X, ABDULWI, AMANNISA K, et al. Dynamic approaches to ecological restoration in China's mining regions: A scientific review[J]. *Ecological Engineering*, 2025, 214: 107577.
- [5] 张超, 顾清华, 江松, 等. 基于 Citespace 可视化的国内外矿山环境治理与生态修复研究进展[J]. *采矿技术*, 2024, 24(3): 260–268.
- [6] 李海兵, 张永忠, 梅金华, 等. 湖南省历史遗留矿山现状及生态修复对策[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(12): 144–151.
- [7] 杨金中, 姚维岭, 陈栋, 等. 历史遗留矿山核查方法研究[J]. *自然资源遥感*, 2022, 34(3): 10–16.
- [8] AISHAJIANG A, ZHANG Y, LIN T, et al. Ecological benefits of artificial vegetation restoration on local climate condition in abandoned mining area[J]. *Ecological Indicators*,

- 2024,(169):112964.
- [9] 田博文.“两山”理念下的矿区生态修复研究[D]. 武汉:中南民族大学,2022.
- [10] 戴云仙,乔光华,翟正江,等. 黑岱沟露天煤矿不同复垦模式效益分析与评价[J]. 中国矿业,2017,26(12):139-142.
- [11] 杨丛铭,袁颖,侯明华,等. 张家口尚义县废弃矿山修复生态效益评估研究[J]. 河北地质大学学报,2022,45(6):116-121.
- [12] 刘雨晴. 徐州潘安湖采煤塌陷区转型模式及综合效益研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.
- [13] YIMIN L,SHUITAI X,YUHUI Z,et al. Satisfaction evaluation of ecological restoration in abandoned mines based on the residents' perception: A case study in Ganzhou, Jiangxi [J]. Scientific Reports,2025,14(1):27368.
- [14] JOSIANNE C. S. Rosa, Angus Morrison-Saunders, Michael Hughes, et al. Planning mine restoration through ecosystem services to enhance community engagement and deliver social benefits[J]. Restoration Ecology, 2020,28(4):937-946.
- [15] XU X C,ZHU Z G,YU L Q,et al. Ultimate pit limit optimization method with integrated consideration of ecological cost,slope safety and benefits: a case study of Heishan open pit coal mine[J]. Sustainability, 2024,16(13):5393.
- [16] 马跃. 废弃矿山资源化生态修复模式构建与效益评价[D]. 大连:大连理工大学,2021.
- [17] 刘雅倩. 太行山中段东麓某矿山修复工程的生态产品价值效益测算[D]. 石家庄:河北地质大学,2023.
- [18] ZHAO,XIAOFENGCAA,LI,et al. Impact of mining area steep slope conditions on the soil and water conservation benefits of ecological restoration[J]. Water (Switzerland), 2025, Vol. 17(2):256.
- [19] LI M,MA L,WANG C,et al. Evaluation of carbon sequestration benefits of ecological restoration in open pit mines: A case study of tongluo mountain mine[J]. E3S Web of Conferences,2025,630:02006.
- [20] ZHUWU Z,SHOUMEI W,KE Z,et al. Evaluation and analysis of land ecological economic benefit in baodian mining area[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science,2020,440(5):052037.
- [21] ODUM H T. Environment,power and society[J]. American Journal of Public Health,1970,61(10):314.
- [22] JAMES Purlill,EMMA J Gagen, Bryce Hamilton. A brief history of mine rehabilitation reforms in Queensland [J]. Environmental and Planning Law Journal,2022,39(1):64-78.
- [23] DAVID J. Eldridge, Ian Oliver, Jeff R. Powell, et al. Temporal dynamics in biotic and functional recovery following mining [J]. Journal of Applied Ecology,2022,59(6):1632-1643.
- [24] YA S,QINXUE X,XI W. Progress of mine land reclamation and ecological restoration research based on bibliometric analysis [J]. Sustainability,2023,15(13):10458.
- [25] JUN L,SHIWEN Z,ENWEI L,et al. Effects of cubic ecological restoration of mining wasteland and the preferred restoration scheme [J]. The Science of the total environment,2022,851(1):158155.
- [26] D AGUI,HAYLEE M,van der Heyde,et al. Evaluating biological properties of topsoil for post-mining ecological restoration: different assessment methods give different results [J]. Restoration Ecology,2022,(30):1-10.
- [27] Iskandar,Iskandar, Suryaningtyas, et al. The regulatory role of mine soil properties in the growth of revegetation plants in the post-mine landscape of East Kalimantan [J]. Ecological Indicators,2022,(139):108877.
- [28] MENG Y,JINGYI O,SHUANNING Z,et al. Research on ecological effect assessment method of ecological restoration of open-pit coal mines in alpine regions [J]. International journal of environmental research and public health,2022,19(13):7682.
- [29] VLADO L,AKSCIC MF,SLAVICA·COLIC,et al. A bioassessment of soil nickel genotoxic effect in orchard planted on rehabilitated coalmine overburden [J]. Ecotoxicology and environmental safety,2013,98(1):374-382.
- [30] KENTULA E M. Perspectives on setting success criteria for wetland restoration[J]. Ecological Engineering,2000,15(3):199-209.
- [31] TALEB A T,ARONSON J,SHAW K. Rays of hope from the ecological restoration alliance of botanic gardens, following its recent meeting in Amman, Jordan[J]. Restoration Ecology,2016,24(5):573-576.
- [32] COSTANZA R,DARGE R,DE GROOT R,et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital [J]. Ecological Economics,1998,25(1):3-15.
- [33] PEARCE D. Auditing the Earth[J]. Environment, 1998,40(2):23-28.
- [34] DAMIGOS D,KALIAMPAKOS D. Environmental economics

- and the mining industry: monetary benefits of an abandoned quarry rehabilitation in Greece[J]. *Environmental Geology*, 2003, 44(3): 356–362.
- [35] HUBER O. Light compensation point of vascular plants of a tropical cloud forest and an ecological interpretation[J]. *Photosynthetica*, 1978, 12(4): 382–390.
- [36] MISHRA, SHRUTI K, HITZHUSEN, et al. Costs of abandoned coal mine reclamation and associated recreation benefits in Ohio [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, Vol. 100: 52–58.
- [37] EKO S, ZHANG Z Y, GLENN C, et al. Evaluation of environmental and economic benefits of land reclamation in the Indonesian coal mining industry[J]. *Resources*, 2021, 10(6): 60.
- [38] CAIRNS J. Setting ecological restoration goals for technical feasibility and scientific validity[J]. *Ecological Engineering*, 2000, 15(3): 171–180.
- [39] BESTLMAYER B T. Threshold concepts and their use in rangeland management and restoration: The good, the bad, and the insidious[J]. *Restoration Ecology*, 2006, 14(3): 325–329.
- [40] KELLY K M, DON K D, MARIO B D, et al. Topoedaphic unit analysis: A site classification system for reclaimed mined lands [J]. *CATENA*, 1993, 20(3): 289–301.
- [41] PALMER A M, Bernhardt S E, ALLAN D J, et al. Standards for Ecologically Successful River Restoration [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 42(2): 208–217.
- [42] WACKERNAGEL M, ONISTO L, BELLO P, et al. National natural capital accounting with the ecological footprint concept [J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 375–390.
- [43] ANA T. LIMA, KRISTEN M, David W. O’Connell, et al. The legacy of surface mining: remediation, restoration, reclamation and rehabilitation[J]. *Environmental Science and Policy*, 2016, 66: 227–233.
- [44] WAN L, DU C. An approach to evaluation of environmental benefits for ecological mining areas based on ant Colony algorithm[J]. *Earth Science Informatics*, 2021, 14(2): 1–12.
- [45] KATHERINE L Harries, John Woinarski, Libby Rumpff, et al. Characteristics and gaps in the assessment of progress in mine restoration: insights from five decades of published literature relating to native ecosystem restoration after mining[J]. *Restoration Ecology*, 2024, 32(1): e14016.
- [46] WANG X, SAIED P, HISHMI J H, et al. Leveraging machine learning for monitoring afforestation in mining areas: evaluating Tata Steel’s restoration efforts in Noamundi, India[J]. *Environmental monitoring and assessment*, 2025, 197(7): 816.
- [47] 李积普, 庄小静, 谢红彬. 基于模糊综合评价的福建紫金山国家矿山公园综合效益分析[J]. *山西师范大学学报*, 2021, 35(2): 114–120.
- [48] 秦静, 李国清, 侯杰, 等. 矿山生态效益评估模型及其应用[J]. *矿业研究与开发*, 2022, 42(11): 208–214.
- [49] 凌璐婷. 生态文明建设视角下的江西省典型废弃矿山修复治理对比研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [50] 金兴, 曹希绅. 遂昌金矿矿山环境治理恢复社会效益评价[J]. *资源与产业*, 2016, 18(2): 76–81.
- [51] 戴红军, 白林, 孙涛, 等. 资源城市棕地生态治理综合效益评价: 以淮南市大通采煤沉陷区为例[J]. *资源开发与市场*, 2014, 30(12): 1489–1493.
- [52] 林燕华. 矿山地质环境恢复治理工程社会影响总体评价: 以景德镇市为例[J]. *当代经济*, 2015(3): 120–123.
- [53] 孙峰, 肖卫平, 姚健庭. 生态保护修复工程生态效益综合评价研究: 以江西赣州为例[J]. *环境教育*, 2023(5): 58–61.
- [54] 罗明, 周妍, 鞠正山, 等. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(23): 8911–8919.
- [55] 谷丛楠. 基于 DEA 算法的矿山修复生态效益评估模型[J]. *安徽地质*, 2022, 32(1): 67–71.
- [56] 李芬, 李妍菁, 赖玉珮. 城市矿山修复生态效益评估研究[J]. *环境保护*, 2018, 46(2): 55–58.
- [57] 王效科, 杨宁, 吴凡. 生态效益及其特性[J]. *生态学报*, 2019, 39(15): 5433–5441.
- [58] 肖林颖, 吴秀芹, 周金星, 等. 岩溶断陷盆地典型县域石漠化治理综合效益评价: 以云南建水县为例[J]. *地球学报*, 2021, 42(3): 444–450.
- [59] 田芳. 非金属矿山生态修复效益评价体系研究[J]. *江苏建材*, 2023(4): 7–9.
- [60] 李甫, 刘俊建, 葛建平, 等. 典型水源涵养区废弃矿山生态修复效益评价指标体系研究[J]. *中国矿业*, 2023, 32(52): 44–52.
- [61] 常俊杰. 生态脆弱区生态修复综合效益评价思考: 以陕西省为例[J]. *中国土地*, 2020, (9): 36–38.
- [62] 胡一帆, 王浩, 焦磊, 等. 青藏高原重大建设工程生态修复综合效益评估指标体系[J]. *生态学报*, 2022, 42(18): 7565–7576.
- [63] ZHAO E M, He J, CAO A, et al. Selecting ecological

- restoration modes for watershed ecosystems;a case study in Loess Plateau[J]. Environmental Research Letters, 2025,20(4).
- [64] JIN C,LI M,ZHANG Z C,et al. Evaluation of the ecological restoration of a coal mine dump by exploring the characteristics of microbial communities[J]. Applied Soil Ecology,2020,147:103430.
- [65] SHAO Quanqin,LIU Shuchao,NING Jia,et al. Remote sensing assessment of the ecological benefits provided by national key ecological projects in China during 2000 – 2019[J]. Journal of Geographical Sciences, 2023, 33(8):1587 – 1613.
- [66] AHIRWAL,JITENDRA,PANDEY,et al. Restoration of mine degraded land for sustainable environmental development [J]. Restoration Ecology,2021,29(4):1 – 4.
- [67] TIMOTHY P. Futuristic restoration as a policy tool for environmental justice objectives[J]. Restoration Ecology, 2022,30(3):1 – 5.
- [68] LORITE,JUAN,BALLESTEROS,et al. Economic evaluation of ecological restoration options in gypsum habitats after mining[J]. Journal for Nature Conservation,2021,(59): 125935.
- [69] MASAREI,MONTI I,ERICKSON,et al. Engineering restoration for the future[J]. Ecological Engineering, 2021,(159):106103.
- [70] 田彦清. 新形势下政府购买第三方施工质量安全巡查监管模式探讨[J]. 安全与健康,2024(9):64 – 67.
- [71] HONG Y,XIANG G,JIANHUA W,et al. Ecological restoration for China's mines[J]. Science,2024,385(6713): 1052 – 1053.