

DOI:10.12403/j.1001-1498.20230296

矿区受损生态系统修复与碳汇潜力的 文献计量研究

张宇昂¹, 李亚桐², 杜忠毓², 祁新华³, 侯红⁴, 陈光才^{2*}

(1. 国家林业和草原局产业发展规划院, 北京 100010; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400;
3. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 4. 中国环境科学研究院, 北京 100012)

摘要: [目的] 矿业开采导致的受损生态系统因分布范围广、环境污染重、生态功能受损, 严重威胁环境质量和生态安全和人民健康。在“双碳”目标背景下, 矿区受损生态系统的修复是现阶段我国生态保护与修复的重点和难点之一。[方法] 采用文献计量方法, 针对 2010—2022 年间发表的 914 篇矿区生态修复相关文献进行分析, 从矿区受损生态系统评价、生态修复技术、碳源/汇潜力及监测技术四个方面对矿区生态修复领域的研究进展进行了系统综述。[结果] 矿区受损生态系统修复由“工程修复为主”向“系统生态修复”, 由“条块化、分裂式”向“区域综合受损生态系统”转变; 矿区碳源/汇与区域环境的碳循环机制研究逐渐深入; 遥感等新兴技术手段的应用推动矿区修复监测评价体系的发展革新; 法律法规和系统管控理念的完善、多学科的融合发展、“三生空间”的权衡博弈共同影响着退化矿区的修复效益。[结论] 本研究明晰了当前矿区受损生态系统修复与碳汇潜力研究和应用的困境与挑战, 展望后续研究的方向与可能, 为未来矿区生态修复治理及监测评估提供参考。

关键词: 矿区; 生态修复; 评价; 碳汇; 监测

中图分类号: X24

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2024)02-0144-12

中国是世界上矿产资源丰富、矿种齐全的少数国家之一^[1-2]。截至 2020 年底, 我国已发现矿产 173 种, 其中, 能源矿产 13 种、金属矿产 59 种、非金属矿产 95 种、水气矿产 6 种^[3]。随着各种全球性生态环境问题的加剧^[4], 中国资源约束趋紧, 环境污染愈发严重, 生态系统受损的形势也异常严峻^[5]。矿山环境问题是一种以矿山环境为载体的负效应作用, 指在矿产资源勘查、矿床开采、洗选加工以及废弃闭坑等矿产开发过程中对矿山环境造成的不良影响^[6], 包括地貌景观破坏、土壤挖损或压占、地表塌陷、大气与水土污染、动植物生境碎片化、固碳能力丧失等问题, 其影响范围远大于采矿边界且时效超过矿山生产年限的数倍。

1987—2020 年间, 中国因煤矿开采产生的损毁土地达到 180.01 万公顷^[7]。历史遗留的矿山环境问题是现阶段我国环境治理的重要对象, 是绿色矿山发展的重要制约因素^[8], 也是我国构建国家生态安全保障体系的一大障碍^[9], 因此矿区受损生态系统的修复治理是目前亟待解决的环境问题之一^[10]。

矿产资源开发在带动经济发展和满足能源需求的同时, 使土地遭受极度损毁及退化, 其区域碳排放基数过大, 碳平衡遭到严重破坏^[4, 11], 碳固存能力下降甚至丧失^[12]。这种破坏式开发一直是世界各国面对的重要环境问题和科学研究的热点问题。在推进碳达峰、碳中和目标实现的过程中, 碳排放居高不下和碳汇能力不足是其主要障碍^[13], 矿山受损

收稿日期: 2023-07-28 修回日期: 2023-08-25

基金项目: 国家重点研发计划项目 (No.2020YFC1807704)

作者简介: 张宇昂, 硕士, 工程师。主要研究方向: 生态产品价值实现机制。电话: 13339414797 Email: zhyuang2018@126.com

* 通讯作者: 陈光才, 博士, 研究员。主要研究方向: 生态修复。电话: 0571-63105079 Email: guangcaichen@sohu.com

生态系统恢复无疑是极具迫切性和战略性的, 对其生态修复 (Ecological Restoration) 过程进行长时间序列的监测和评估是具有先瞻性和必要性的, 是矿区发展的巨大机遇与挑战^[14-15]。2020 年, 中国新增矿山治理恢复面积约 4.16 万公顷^[3]。然而, 因长期受制于矿山生态系统各要素之间的流动性、经济与环境之间的协调性、污染因素之间的相互影响的复杂多变, 相关规划治理缺乏统一性、系统性和整体性, 目前矿山环境修复治理工作仍呈现分布面积广、扰动因素多、机理复杂等特征, 中国矿山生态修复总体效果并不理想^[16], 矿区受损生态系统治理形势严峻^[17]。

事实上, 实现“双碳”目标不可能一蹴而就, 必然要经历能源、产业转型的“阵痛”^[18], 协调经济、社会、环境、能源、就业、安全等多角度系统性的规划支持十分必要。学术界围绕实施区域和目标合理分解^[19]、制定重点部门差异化达峰行动方案^[5, 20]、推动能源转型以及完善碳税和碳交易等碳定价机

制^[21-22]等方面展开研究, 为实现矿业开采和环境治理的双碳目标进行了多方探索。武强等提出解决矿山环境问题的“九节鞭”修复模式, 针对矿山环境问题梳理、调查、评价与预测、修复治理技术与模式、矿山土地适宜性评价、监测与预警、信息系统研发、法规标准和矿山环境管理等 9 个方面探讨矿区退化生态系统的修复路径^[2]。但在目前碳中和背景下, 从“前期受损程度 - 中期修复效益 - 后期模拟预测”的全周期视角下, 探讨矿区受损生态系统的监测和评估技术及应用的研究仍缺少系统的梳理总结。因此, 本研究基于文献计量分析结果, 以山水林田湖草生命共同体理念和绿色矿山建设政策导向为指导, 沿着生态修复的路径, 就当前研究进展中存在的问题进行提炼, 从受损生态系统评价、生态修复技术、矿区碳源/汇潜力、矿区生态系统监测技术四个方面厘清研究脉络 (图 1), 并对未来的研究方向提出展望, 以期拓宽矿区受损生态系统修复监测与评估的研究路径。

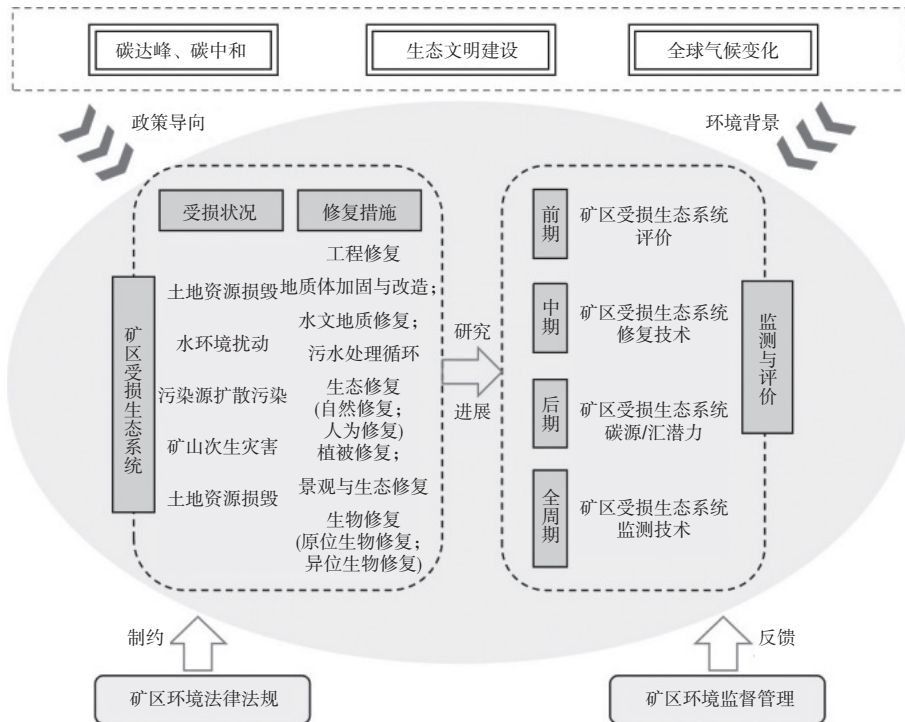


图 1 矿区受损生态系统修复研究框架

Fig. 1 Research framework for restoration of damaged ecosystem in mining area

1 矿区受损生态系统修复的文献共现分析

研究基于 Web of Science (WoS) 核心合集和中国知网 (CNKI) 核心期刊数据库进行交集检

索, 英文以“mining area”“ecological restoration”为检索主题词, 中文以“矿区”“生态修复”为检索主题词, 检索范围为论文主题 (标题、摘要、作者关键词和扩展关键词), 检索时间范围为 2010—

2022 年，检索日期为 2022 年 6 月。共计获得文献 914 篇，其中英文 701 篇，中文 213 篇（图 2）。矿区生态修复研究在国内外均愈发受到重视，国际上研究热度明显更为突出。国内研究热度与国家政策导向紧密关联，自十九大将建设生态文明提升为

“千年大计”后，山水林田湖草一体化的修复理念逐渐被贯彻落实，矿区生态修复研究呈现出蓬勃发展的态势。利用 CiteSpace 软件，对文献主题进行关键词共现分析，生成时间段共现图谱（图 3、图 4）。

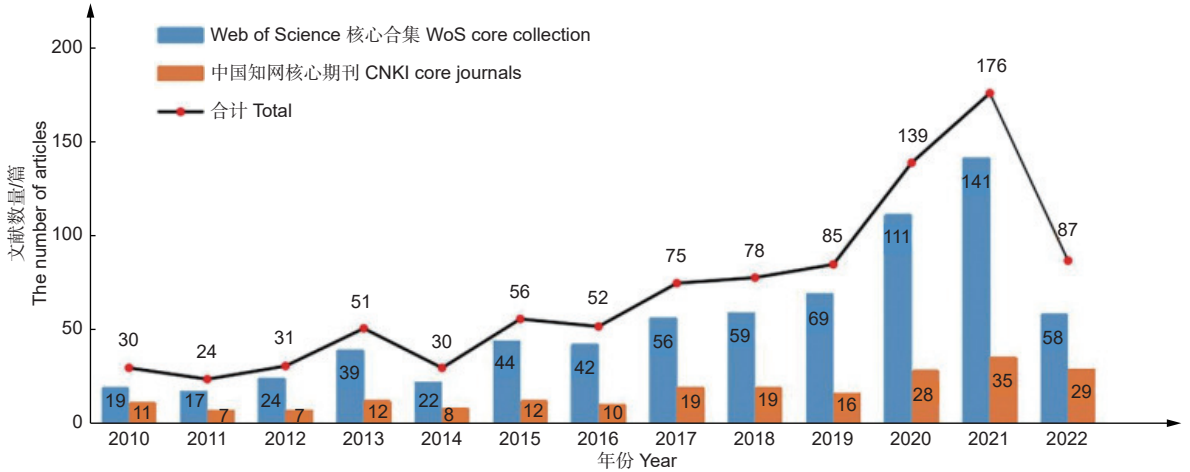


图 2 矿区生态修复研究领域的年发文章量变化趋势

Fig. 2 The trend of the annual number of papers in the field of ecological restoration research in mining areas

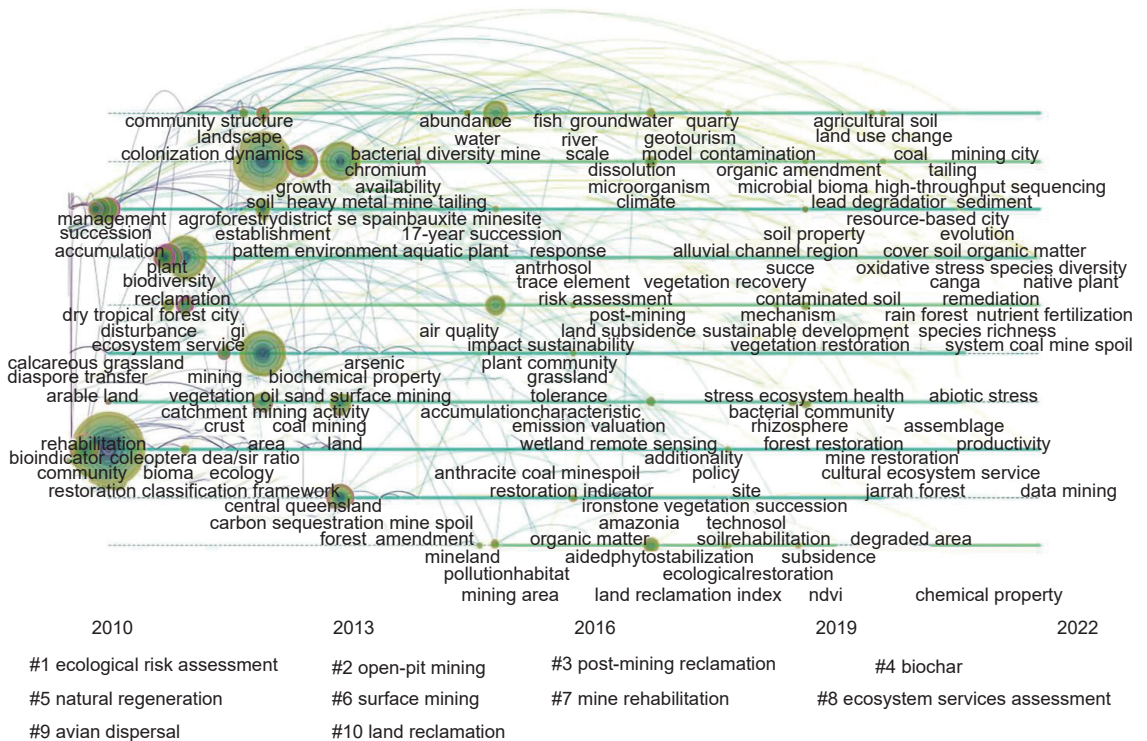


图 3 Web of Science 核心合集关键词时间线共现图: 矿区、生态修复

Fig. 3 Timeline co-occurrence of keywords in WoS core collection: mining area; ecological restoration

目前，国际上的研究主要聚焦于 ecological risk assessment（生态风险评估）、open-pit

mining/surface mining（露天采矿）、post-mining reclamation（采后复垦）、biochar（生物炭）、

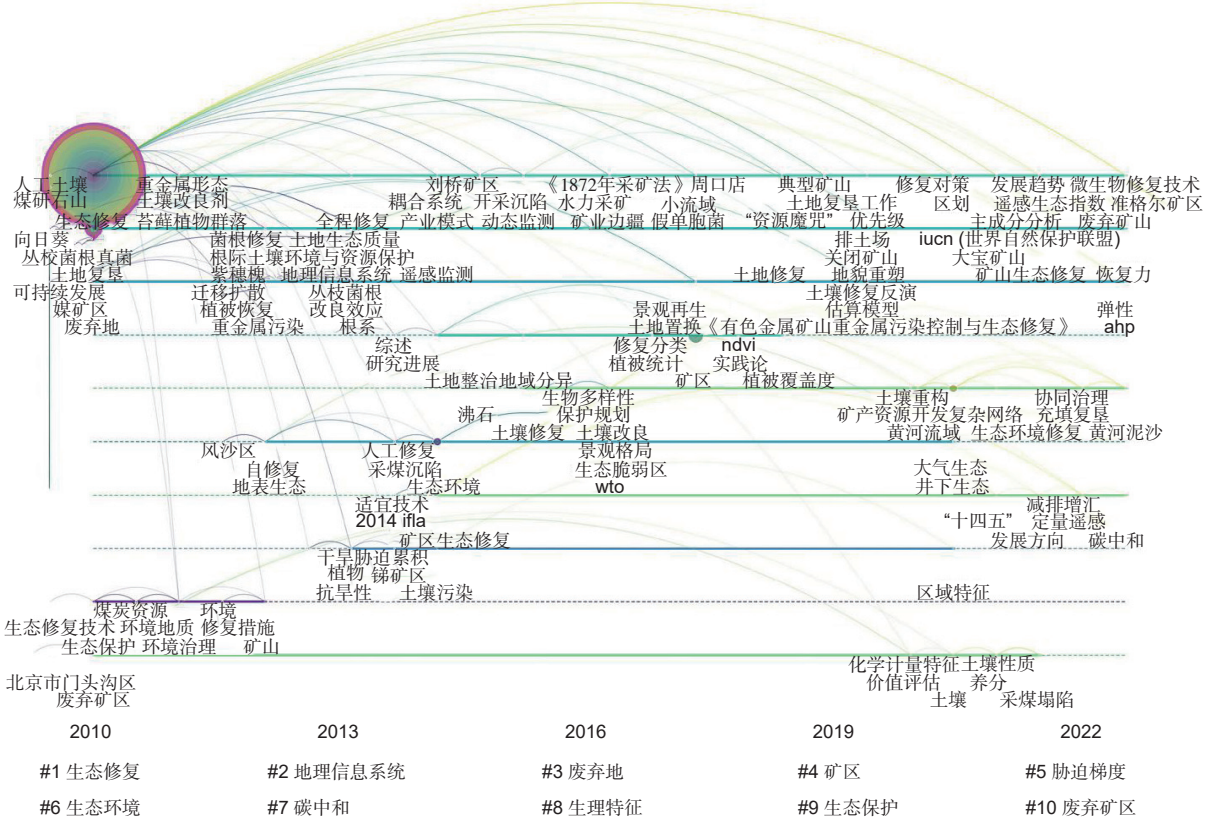


图 4 中国知网核心期刊关键词时间线共现图: 矿区、生态修复

Fig. 4 Timeline co-occurrence of keywords in CNKI core journals: mining area; ecological restoration

natural regeneration (自然更新)、mine rehabilitation (矿区恢复)、ecosystem services assessment (生态系统服务评估) 等热点领域 (图 3)。国内研究以生态修复、地理信息系统、废弃地、胁迫梯度、生态环境、碳中和、生理特性、生态保护等主题为主 (图 4)。图 3 和图 4 中圆圈半径大小表示对应的关键词在矿区生态修复研究分析中的重要程度, 其所处位置相应的年份为其出现的最早时间。随时间推进, 生态修复研究呈现精细化的深入发展态势, 早期矿区生态修复手段和技术的研究设想逐步被实现和扩展, 修复效益日益提升。

国际上关注的焦点主要是矿区生态风险和生态系统服务价值的评估, 化学和生物学方向的具体修复路径和方案, 矿区发展对全球气候变化的影响, 以及微观层面社区和人民面对的生计冲击和应对策略^[23-24]。国内的研究近期更趋向于减排减污增汇和碳中和等政策驱动下的区域发展路径探索与修复效果评价, 并尝试引入遥感等新技术手段和交叉学科的新理念理论, 推动恢复生态学和生态工程学从静

态的资源 and 环境本底调查、工程改善, 向区域性矿区生态系统功能评价与环境治理动态监测的研究方向转变^[25-26]。

当前矿区受损生态系统修复主要存在以下问题亟待解决: 生态修复理论对生态修复实践的支撑相对薄弱^[27], 生态修复整体观和系统观的思想落实尚待加强^[28]。生态修复碎片化现象突出, 忽视生态技术的地域和经济适宜性^[29], 修复效果的可持续性不强。缺乏科学合理的评价指标体系和方法模型^[30], 缺乏全周期综合信息管理与决策支持平台, 缺乏多生态要素协同的立体化监测技术。在管理体制机制方面, 现行的条块化管理体制不能从根本上解决矿区生态环境问题, 不同主体的需求和利益以及公众参与程度的差异, 共同导致矿区受损生态系统综合管理体系存在缺位现象^[31]。

2 矿区受损生态系统修复的研究主题

2.1 矿区受损生态系统评价

自 2020 年《绿色矿山建设评价指标》《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划

(2021—2035 年)》《山水林田湖草生态保护修复工程指南》等政策出台, 矿区更多被解读为以开发利用矿产资源为主导产业的社会生态集合体, 这表明其不仅有社会属性和经济属性, 更重要的是含有生态属性^[3, 9]。对于矿区受损生态系统的评价, 可以分为受损程度评价和修复效益评价两大部分。

在受损程度评价方面, 长期低效、粗放、过度的开采模式致使矿区产生了一系列生态环境受损问题^[32], 多表现出区域性、规律性特点^[2]。目前现有研究多结合矿山周边区域生态系统功能重要性、人居环境与经济社会发展状况^[33], 综合考量地理条件、气候条件、矿山生态等环境因素, 开采方式、开采规模等工程因素, 土壤理化性质、植被配置模式等生物化学因素^[6], 进行矿区生态环境损毁方式的类型划分^[34]和受损程度的综合评价^[7, 35], 由此探索矿区生态环境问题发生机理, 进而形成动态响应机制^[2, 36]。如张俊杰等在西北荒漠区 7 座典型露天煤矿展开调查研究, 从土地利用扰动情况和砾幕层年际变化角度评价其矿区生态受损状况^[37]。

在修复效益评价方面, 生态系统恢复的目标是建立一个能够自我维护、运行良好的完整生态系统^[31, 36, 38], 矿区生态修复效益评价是考察其生态系统恢复程度的重要手段^[39-40]。2004 年, 生态恢复协会 (Society Ecological Restoration International, SER) 从生态恢复的结构与功能自我维持、生态系统抗干扰能力、与相邻生态系统的物质能量交流三个方面总结出评判生态系统恢复状况的 9 个关键属性^[41], 在学界被广泛应用与改进, 形成了针对各类生态系统的一系列评价指标体系^[42]。同时, 基于生态系统服务价值评价的研究热潮在矿山生态系统修复研究中也逐步体现。王壮壮等以我国 5 个重点脆弱生态区为研究区, 根据“生态恢复 - 生态系统结构 - 质量 - 服务 - 效益”级联式概念框架构建了生态恢复综合效益评估的指标体系^[43]。

针对大面积生态损毁矿区, 基于多时相和多波段的遥感影像融合提取归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 和归一化水体指数 (Normalized Difference Water Index, NDWI) 等生态指数, 是检测评估其生态系统的受损和修复状况、探析其生态系统服务价值及功能最快捷实用的方法^[44]。殷亚秋等应用遥感解译分类技

术获取矿山占损土地和恢复治理信息, 建立矿山地质环境评价指标体系, 以此对海南岛 2018 年矿山地质环境影响进行分析评价^[45]。

2.2 矿区受损生态系统修复技术

生态修复是指在不同人为干预程度下, 依靠生态系统自我调节能力与自组织能力, 使已遭受退化、损伤或破坏的生态系统恢复的过程^[18]。矿业开采对生态系统造成严重的负面影响^[41], 土壤结构受损、植被破坏、重金属污染共同导致土壤质量下降、农作物被污染, 严重威胁到人类健康^[46]。这些危害和潜在影响仅仅依靠自然演替减缓, 大约需要 100—1000 年^[47]。胡振琪等研究显示采取人工措施辅助生态修复可以更大程度地进行自主设计, 在生态系统层面上同时推进多个措施, 极大程度地缩短受损生态系统的恢复时间^[25]。

矿山生态修复是一个系统工程, 通常包括污染整治、土壤重构和生物恢复等措施 (表 1)。现有的矿区修复主要通过物理、化学、生物等措施进行, 其产生的效果和效益参差不齐^[25]。研究多针对确定的技术和方法下矿区生态环境进行论述, 而从全时间序列角度开展矿区受损生态系统评估与监测的研究较为罕见。自 2018 年组建成立自然资源部以来, 矿山生态修复工作逐步从早期的工程修复、土地植被整治过渡为“自然恢复为主, 人工引导为辅”的生态功能全面修复, 努力探索矿区复杂环境条件下的污染源阻控、环境治理与生态恢复耦合的技术创新, 力求建设具有完整功能的生态系统^[40, 48]。

基于自然的解决方案 (Natural-based Solution, NbS) 近年来被学界越来越多地认可, 以生物化学方法为主的生态技术在生态退化治理中显示出重要作用。许多学者尝试模拟预测矿区金属元素释放、迁移、转化过程的共性与差异、相互作用、输入输出, 明晰矿区受损生态系统内部的物质循环, 精确展开后续修复工作。Yu 等在华南地区被砷和镉污染的矿区开展稻田采样实验, 发现硅在缓解水稻砷和镉等重金属和非金属物质中发挥了独特的作用^[49]。Hou 等学者通过室外大型土柱, 对比分析受镉污染的表土和未受镉污染的底土, 研究外源镉在土壤中的迁移和地下水淋溶风险^[50]。Sun 等学者利用模型进行了砷元素迁移转化过程的识别量化与金属矿区土壤污染的修复设计^[51]。

表1 矿区受损生态系统修复措施

Table 1 Restoration measures of damaged ecosystem in mining area

修复措施 Repair measure	内涵 Connotation	改良方式 Improvement mode	具体方法 Concrete method
污染整治	矿山产生的污染包括重金属污染、酸碱污染、有机污染、油类污染、水污染和剧毒性氧化物等污染。	水污染处理	膜处理法、混凝土法、生物膜法、SBR法、生物氧化法、氧化沟法、混合法及湿地处理法等。
		土壤重金属污染处理	施用磷酸盐促使土壤中重金属形成难溶性盐,降低大多数重金属的生物有效性。也可以利用植物来稳定或提取矿区土壤中的重金属。
		工程修复处理	改进生产工艺、采用循环供水系统、加强三废处理设备维护。
土壤重构	指综合利用工程措施及物理、化学、生物、生态措施,重新构造适宜的土壤剖面 and 理化性质。	物理方式	排土、换土、去表土、客土、深耕翻土等。 动电方法。
		化学方式	碱性废弃地: 采用FeSO ₄ 及硫酸氢盐等物质来改善。 酸性废弃地: 向土壤中投放生石灰或碳酸盐等进行中和。 缺乏有机质等营养物质: 利用木屑、堆肥、绿色垃圾、粪肥和有机污泥等有机物提高土壤的pH值,改善土壤结构、提高土壤持水能力和阳离子交换能力。
		植物修复	根际过滤技术、废物填埋淋洗技术、人工湿地构建技术、植物固化技术、植物蒸发技术以及植物根际生物降解等诱导技术。
生物恢复	指利用植物、土壤动物和土壤微生物的生命活动及其代谢产物改变土壤物理结构、化学性质,重建植被群落,改善土壤质量,提升水土保持能力。	土壤动物修复	改良土壤结构、增加土壤肥力、分解枯枝落叶、促进营养物质的生物小循环。
		土壤微生物	利用微生物的生命代谢活动,减少土壤环境中有毒有害物的浓度,增加植物营养吸收、改进土壤结构、降低重金属毒性。

2.3 矿区受损生态系统的碳源/汇潜力

以往我国矿山生态修复研究侧重于矿山生态系统结构和功能的恢复,忽视了其在减排增汇方面的作用。目前矿区生态破坏区的碳吸收能力微乎其微^[52],实现矿区由碳源向碳汇的根本性转变尤为必要^[3, 53]。

矿区生态系统修复模式的异同会导致碳汇能力存在高低差异,修复过程中短暂的碳减排并不意味着修复后碳增汇能力的长期提升。矿区碳汇形成的关键过程包含植物光合碳分配、土壤碳固持、微生物固碳和土壤呼吸等。生态恢复的速率及产生的生态效应与土壤退化程度、植被类型、系统工程技术、矿产规模及其开采手段等一系列因素息息相关^[17]。近年来,已经有部分学者开始关注矿区开采导致的失碳效应^[54],并对碳库损失进行评价^[55]。其中,土地利用方式或植被覆盖情况是决定生态系统碳储量、影响碳循环的重要因素^[56]。由于矿区受损生态系统普遍存在生态脆弱和土壤有机质含量本底值较低的现象,其区域内的植被和土壤等主要碳汇要素及其固碳能力往往会被极大程度削弱^[57],区域“植被-土壤碳库”产生强烈扰动^[58]。而植被覆盖率和土壤有机碳含量是反映生态系统结构和功能

状况最直接的参数,与矿区生态系统生产力测算紧密相关,也是其碳汇潜力评估的基础数据^[48]。随着矿区废弃地生态修复年限的增加,植被碳汇量和土壤有机碳含量也会随着植物生长累积而逐步增加^[55]。Li等^[35]学者尝试借助黄土高原林地、灌丛、草地和荒地的土壤细菌群落和土壤理化特性,探讨植被恢复对矿区重建土壤的响应机制,从而恢复并稳定矿山生态系统的结构和功能^[59]。

矿产资源开发与区域环境的碳循环机制交织耦合,使矿区生态系统碳循环具有独特性^[7]。部分学者尝试利用遥感等手段分析核算矿区碳汇量^[60-61],或从定性角度对微观的个案矿区进行碳库潜力研究^[13]。如张纪伟和陈华勇基于多元数据,构建以“驱动力-压力-状态-影响-响应”模型为理论框架的综合评价指标体系,定量评估福建罗卜岭矿区的经济价值及其未来勘查开发对生态环境产生的影响^[62]。但目前面向生态碳汇的概念探讨及测算研究仍然罕见,且鲜有从宏观尺度评估矿山生态系统修复后的固碳效应及生态碳汇潜力^[63],针对碳汇能力提升的矿区退化生态修复技术仍有较大的提升空间。

2.4 矿区受损生态系统监测技术

当前矿区生态环境监测数据主要由地面传感器

站点观测、样地和基站点采样、实验室对比实验获取。受制于观测尺度和人工作业强度，多为几年甚至近几个月的空间点位离散数据，且仅个别传感器存在数年的高频次观测^[64]。矿区生态环境演变监测与评价的时空尺度不匹配现象明显，矿区生态系统的全流程监测需求无法得到有效保障。

进入 21 世纪以来，遥感（Remote Sensing, RS）、卫星定位（Global Position System, GPS）以及地理信息系统（Geographic Information

System, GIS）平台和技术的发展和成熟成为生态系统的演化研究强大的技术支撑，极大推进了大尺度上生态系统格局及其对全球变化响应的相关研究。借助于新时代的大数据网络^[65]，矿区生态系统研究正在实现从点到面、从定性到定量、从平面到“天-空-地-井”立体监测、从单项到综合的突破^[64]（图 5），进而对开采沉陷、露天矿坑、“三废”问题、矿山次生地质灾害等矿区生态环境问题实施多点多面、高精度、实时连续的有效监测与预警^[66]。

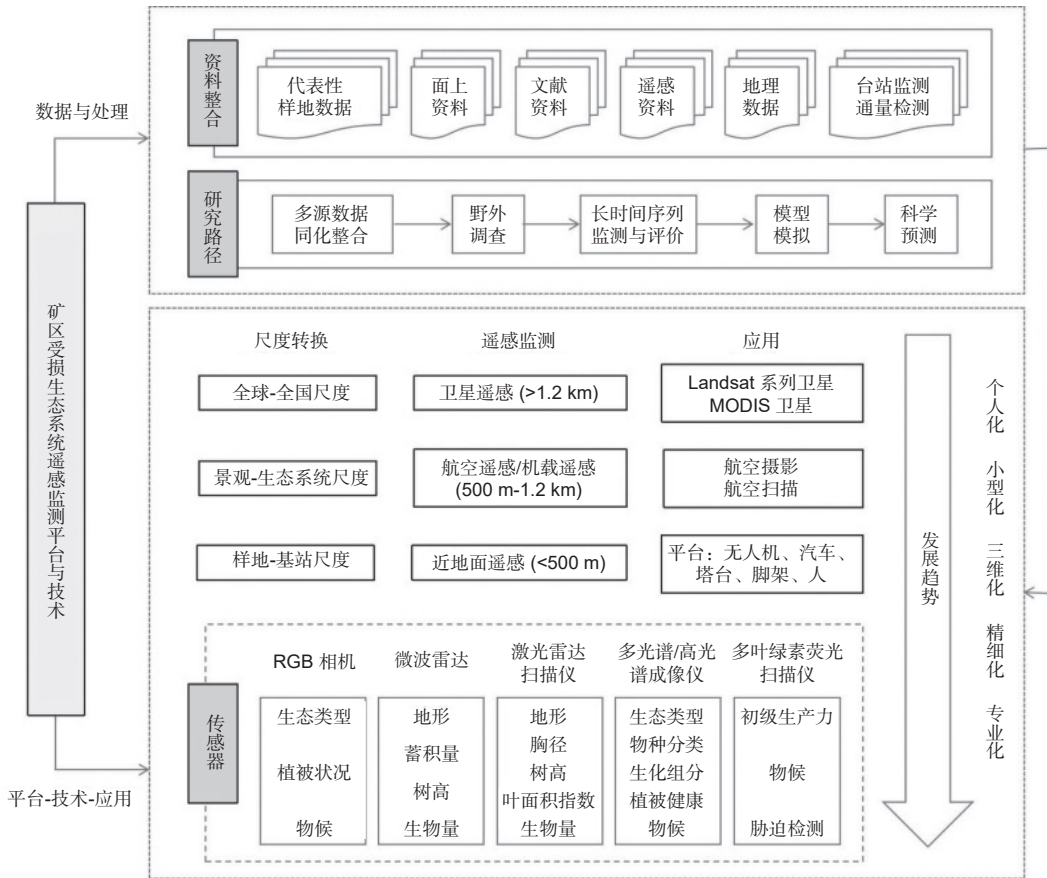


图 5 多尺度、多平台的矿区受损生态系统遥感监测技术与应用框架

Fig. 5 Multi-scale and multi-platform remote sensing monitoring technology and application framework of damaged ecosystem in mining area

在研究对象上，现有研究主要集中于矿区地表要素类型遥感识别与分类^[65]、矿区植被、土壤、水体、大气等要素的定量遥感监测^[67]、矿区生态系统参数综合监测等方面。在研究内容方面，学界大多利用遥感生态指数（Remote Sensing Ecology Index, RSEI）、景观指数等^[68]指标测算矿区的生态系统固碳功能和生态系统服务价值。对于结构比较单一的矿区生态系统，通过利用光学遥感获取的植被指数、光谱反射率和纹理信息与实际测量的生

物量建立反演模型，可以较为准确地估算大范围的地上生物量分布^[69-70]。Erner^[48]通过对矿区植被受损状况进行植被分类分析，从微观角度估测其区域的矿区受损程度，确定了加拿大埃德蒙顿北部某矿区的植被变化规律。

随着技术的发展，单源数据的简单回归方法、地上生物量遥感反演方法、微波散射机理模型的反演方法，逐渐发展到基于多源数据融合的非参数化反演方法。应用高分辨率遥感数据、背包雷达等小

型监测仪器与野外数据相结合的方法,可以共同构建矿区碳循环模型,分析区域固碳效应,估算区域生态碳汇潜力,是目前一大研究趋势^[15]。人工神经网络、支持向量机、随机森林等新兴方法也正在被学者们尝试引入结合,虚拟现实、地理空间分析、物联网等技术装备也具有应用拓展的可能^[2,26],进而形成全周期立体化的科学地面监测。随着国家重大生态工程的开展和矿山生态修复技术的不断进步,我国的矿山生态环境修复的遥感监测研究呈现蓬勃发展态势^[30]。

3 研究挑战与展望

3.1 矿区受损生态系统的修复理念与系统管控

随着基于自然的解决方案(NbS)理念、“山水林田湖草沙生命共同体”系统保护与修复理念、“绿水青山就是金山银山”的经济社会发展理念的发展和普及,如何同步实现“能源开发+耕地保护+污染治理+固碳增汇”的多元目标,匹配区域碳中和的修复需求是矿区修复的关键问题^[37]。以生态学的系统观和整体观为基础,秉承碳达峰、碳中和的系统性思维,明确矿区生态系统与区域碳循环、生态碳汇相互关系,预测其碳源/汇对全球气候变化的响应是后续研究的主要方向^[71]。

矿区受损生态系统修复工作具有长期性、复杂性、不确定性和多层嵌套的特点,其修复过程更是各级政府及其环保职能部门、污染责任方、环保企业、社会公众等各主体博弈的一个复杂过程^[28]。面向生态碳汇有益的方向开展矿区适应性管理工作^[72],建立修复政策、技术、资金、产业、人才一体化的区域多维关系网络,完善目标导向、规划执行、动态监测、评估反馈的交替式动态循环管理体系是极其重要的^[37]。

融合地球系统科学、能源科学、地理科学、工程学、管理学的理论与实践进行跨学科的交叉融合,统筹考虑经济结构、产业结构、能源结构、资源利用结构、国土空间结构的跨尺度整合,可以实现矿区生态修复从单要素管理向多要素综合管控、从行政区域向自然矿区的转变。

3.2 矿区受损生态系统的修复方案与技术

矿山生态修复的核心目标是区域生态系统的重塑,而实践中仍存在着对自然演化规律认知不足、缺乏自然恢复手段、以固有的工程化手段为主的弊

病。这种修复模式漠视了对生态系统本底恢复能力的考量,修复构建的生态群落稳定性差,生态碳汇能力提升有限,修复效益可持续性不足^[73]。综合考虑自然经济、人为扰动、修复措施的区域性和污染等级、工程规模的差异性,耦合“地貌重塑、土壤重构、植被重建、景观重现、生物多样性重组与保护”的目标导向修复方案是探索“矿区生态保护修复+全域土地综合整治+人与自然和谐共生”融合模式的有效措施。

未来在恢复生态学相关理论基础^[72],矿区修复应兼顾生物多样性、景观多样性和生态系统多样性的协同发展,明确区域地下水、土壤和植被间的相互关系及作用机制^[74],针对性开展植物筛选与配置、水文调控、土壤底质改良等工作,逐步形成优势植被/功能菌筛选、环境材料复合微生物固碳和固碳微生物定向增殖等关键技术体系^[26]。结合生态补偿政策、绿色金融、国家生态红线政策,参考生态伦理观、生态发展观等理论可以实现方法理论的突破创新,强化矿区生态系统修复研究成果的应用推广,推进从理论迈向实践的进程。

3.3 矿区受损生态系统的监测技术

随着全球碳达峰、碳中和目标共识的形成,国土空间整体管控的顶层设计日益明确,对矿区遥感监测技术的需求日益提升。目前矿区受损生态系统的区域化、实验性的探索虽然取得了一定成效,但其技术应用深度和创新程度明显不足,遥感影像的地物信息提取技术手段较为粗浅^[64],至今仍未建立完善的多尺度矿区遥感监测技术体系。从小型实验室、基地站尺度扩大到全尺寸规模是目前矿区受损生态系统监测模拟工作的最大挑战。

近地面遥感,相较于传统的卫星遥感和航空遥感,观测尺度更贴近传统地面观测,可以更加便捷地获取矿区生态系统-景观尺度的高时空分辨率遥感信息,突破三维生态监测的屏障,填补矿区“天-空-地-井”全面观测的空缺^[67]。未来可以尝试运用近地面遥感结合样地调查的方式^[75],融合空间遥感、地理信息系统、生命科学、能源科学及人工智能等前沿技术,突破“国家-区域-样地”的尺度转换的壁垒^[44,61],在矿区受损生态系统的空间布局、物种识别、生境调查、影响因素、灾害风险预警、生物多样性监测和生态系统管理等多方面深入创新研究。

3.4 矿区受损生态系统的修复效益与评价

矿区受损生态系统的生态修复是一项复杂、长期的系统工程,实现近期利益与远期利益的权衡已然成为矿山废弃地生态修复系统设计与评价的重点工作。严峻的矿地矛盾制约了区域经济的可持续发展,衍生出众多地区生态-社会问题,同时修复效果的滞后性进一步扩大了工作推进的阻碍^[72]。其修复效益和碳汇潜力亟待从更长的时间尺度、更广的空间尺度展开评价。矿山生态环境数字孪生(Digital Twin of Mine Ecological Environment, DTME)系统的构想将支撑矿山生态全过程治理的感知、表达、监测、模拟、仿真、预测与控制的功能,有望推进矿山生态环境治理信息化建设^[76]。

以全国碳交易体系建立为契机,利用遥感和统计数据,结合 IPCC 清单指南等国际通用指标框架,从不同时空尺度对矿区碳储量和碳排放量进行核算,强调评价与核算方法的创新,构建资源绿色勘查与评价、矿山规划建设、资源开采与综合利用、矿山环境生态保护与修复等全生命周期的 workflow 是后续工作的重点。基于矿区生态系统独特的碳循环^[60],着重探索其系统要素间的互馈与耦合机制,综合考虑区域生态安全格局和生态定位,拓展矿区开发和保护多发展模式,是践行碳中和目标、实现矿区生态文明建设的关键所在。

参考文献:

[1] GUO J, ZHANG Y J, ZHANG K B. The key sectors for energy conservation and carbon emissions reduction in China: Evidence from the input-output method[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179(APR.1): 180-190.

[2] 武强, 刘宏磊, 赵海卿, 等. 解决矿山环境问题的“九节鞭”[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(1): 10-22.

[3] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告2021[R/OL]. 中华人民共和国自然资源部. 北京, 地质出版社: 1-27. [2022-6-15]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkcyzbyg/

[4] WANG Q, LI R R. Journey to burning half of global coal: Trajectory and drivers of China's coal use[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016(58): 341-346.

[5] 严刚, 郑逸璇, 王雪松, 等. 基于重点行业/领域的我国碳排放达峰路径研究[J]. *环境科学研究*, 2022, 35(2): 309-319.

[6] 李树志. 我国采煤沉陷区治理实践与对策分析[J]. *煤炭科学技术*, 2019, 47(1): 36-43.

[7] 杨博宇, 白中科. 碳中和背景下煤矿区土地生态系统碳源/汇研究进展及其减排对策[J]. *中国矿业*, 2021, 30(5): 1-9.

[8] 鞠建华. “双碳”目标背景下矿业发展新机遇与实现路径[J]. *中国*

矿业, 2022, 31(1): 1-5.

[9] 王军, 应凌霄, 钟莉娜. 新时代国土整治与生态修复转型思考[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(1): 26-36.

[10] FENG X T, LIU J P, CHEN B R, *et al.* Monitoring, warning, and control of rockburst in deep metal mines[J]. *Engineering*, 2017, 3(4): 538-545.

[11] SHI J, DU P, LUO H L, *et al.* Characteristics and risk assessment of soil polluted by lead around various metal mines in China[J]. *International Journal of Environmental Research Public Health*, 2021, 18(9): 1-9.

[12] AHIRWAL J, MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India[J]. *Catena*, 2016(140): 155-163.

[13] LI J H, LI H, ZHANG Q, *et al.* Effects of fertilization and straw return methods on the soil carbon pool and CO₂ emission in a reclaimed mine spoil in Shanxi Province, China[J]. *Soil Tillage Research*, 2019(195): 104361.

[14] 严洁, 于小娟, 唐明, 等. 造林对乌海露天煤矿复垦地土壤养分和碳库的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(4): 66-73.

[15] 赵明轩, 吕连宏, 张保留, 等. 中国能源消费、经济增长与碳排放之间的动态关系[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(6): 1509-1522.

[16] ZHONG X, CHEN Z W, LI Y Y, *et al.* Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern Chin[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020(400): 123289.

[17] 陈浮, 于昊辰, 卞正富, 等. 碳中和愿景下煤炭行业发展的危机与应对[J]. *煤炭学报*, 2021, 46(6): 1808-1820.

[18] XIAO W, HU Z Q, FU Y H. Zoning of land reclamation in coal mining area and new progresses for the past 10 years[J]. *International Journal of Coal Science & Technology*, 2014, 1(2): 177-183.

[19] United Nations Environment Programme (UNEP). Adaptation gap report 2020[R/OL]. 2020. <https://www.unep.org/resources/adaptation-gap-report-2020>.

[20] United Nations Environment Programme (UNEP). Emission gap report 2019[R/OL]. 2019. <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2019>.

[21] XU X C, GU X W, WANG Q, *et al.* Production scheduling optimization considering ecological costs for open pit metal mines[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018(180): 210-221.

[22] 胡玉凤, 丁友强. 碳排放权交易机制能否兼顾企业效益与绿色效率?[J]. *中国人口·资源与环境*, 2020, 30(3): 56-64.

[23] COSTANZA R, ARGE A R, GROOT R D, *et al.* The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. *Ecological Economics*, 1997, 25(1): 3-15.

[24] KIVINEN S. Sustainable post-mining land use: Are closed metal mines abandoned or re-used space[J]? *Sustainability*, 2017, 9(10): 1705.

- [25] 胡振琪, 龙精华, 王新静. 论煤矿区生态环境的自修复、自然修复和人工修复[J]. 煤炭学报, 2014, 39 (8): 1751-1757.
- [26] 陈 浮, 朱燕峰, 马 静, 等. 黄土高原矿区生态修复固碳机制与增汇潜力及调控[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51 (1): 502-513.
- [27] 胡振琪, 肖 武, 赵艳玲. 再论煤矿区生态环境“边采边复”[J]. 煤炭学报, 2020, 45 (1): 351-359.
- [28] 王广成, 曹飞飞. 基于演化博弈的煤炭矿区生态修复管理机制研究[J]. 生态学报, 2017, 37 (12): 4198-4207.
- [29] 黄 翌, 汪云甲, 田 丰, 等. 煤炭开采对植被-土壤系统扰动的碳效应研究[J]. 资源科学, 2014, 36 (4): 817-823.
- [30] 廖小罕. 地理科学发展与新技术应用[J]. 地理科学进展, 2020, 39 (5): 709-715.
- [31] PALMER M A, FILOSO S. Restoration of ecosystem services for environmental markets[J]. Science, 2009, 325(5940): 575-576.
- [32] BIRCH J C, NEWTON A C, AQUINO C A, *et al.* Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(50): 21925-21930.
- [33] 胡振琪. 我国土地复垦与生态修复30年: 回顾、反思与展望[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47 (1): 25-35.
- [34] 张进德, 郗富瑞. 我国废弃矿山生态修复研究[J]. 生态学报, 2020, 40 (21): 7921-7930.
- [35] LI P F, ZHANG X C, HAO M D, *et al.* Effects of vegetation restoration on soil bacterial communities, enzyme activities, and nutrients of reconstructed soil in a mining area on the Loess Plateau, China[J]. Sustainability, 2019, 11(8): 2295.
- [36] JACKSON S T, HOBBS R J. Ecological restoration in the light of ecological history[J]. Science, 2009, 325(5940): 567-569.
- [37] 陈 浮, 朱燕峰, 马 静, 等. 东部平原采煤沉陷区降污固碳协同修复机制与关键技术[J]. 煤炭学报, 2023, 48 (7): 2836-2849.
- [38] YANG K, WANG S F, CAO Y G, *et al.* Ecological restoration of a Loess open-cast mining area in China: Perspective from an ecological security pattern[J]. Forests, 2022(13): 269.
- [39] GOMEZ-ROS J M, GARCIA G, PENS J M. Assessment of restoration success of former metal mining areas after 30 years in a highly polluted Mediterranean mining area: Cartagena-La Unión[J]. Ecological Engineering, 2013(57): 393-402.
- [40] RUIZ-JAEN M C, AIDE T M. Restoration success: How is it being measured[J]? Restoration Ecology, 2010, 13(3): 569-577.
- [41] Society Ecological Restoration International Science and Policy Working Group. The SER international primer on ecological restoration[M]. Tucson, Arizona: Society Ecological Restoration International, 2004: 1-13.
- [42] MITANI Y, SHOJI Y, KURIYAMA K. Estimating economic values of vegetation restoration with choice experiments: A case study of an endangered species in Lake Kasumigaura, Japan[J]. Landscape Ecological Engineering, 2008, 4(2): 103-113.
- [43] 王壮壮, 王 浩, 冯晓明, 等. 重点脆弱生态区生态恢复综合效益评估指标体系[J]. 生态学报, 2019, 39 (20): 7356-7366.
- [44] ZHANG J, HU J, LIAN J, *et al.* Seeing the forest from drones: Testing the potential of lightweight drones as a tool for long-term forest monitoring[J]. Biological Conservation, 2016(198): 60-69.
- [45] 殷亚秋, 蒋存浩, 鞠 星, 等. 海南岛2018年矿山地质环境遥感评价和生态修复对策[J]. 自然资源遥感, 2022, 34 (2): 194-202.
- [46] 张 溪, 周爱国, 甘义群, 等. 金属矿山土壤重金属污染生物修复研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 33 (3): 106-112.
- [47] 魏 远, 顾红波, 薛 亮, 等. 矿山废弃地土地复垦与生态恢复研究进展[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10 (2): 107-114.
- [48] ARZU E. Remote sensing of vegetation health for reclaimed areas of Seyitömer open cast coal mine[J]. International Journal of Coal Geology, 2011, 86(1): 20-26.
- [49] YU H Y, DING X, LI F, *et al.* The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: The role of soil extractable and plant silicon[J]. Environmental Pollution, 2016(215): 258-265.
- [50] HOU H, YAO N, LI J N, *et al.* Migration and leaching risk of extraneous antimony in three representative soils of China: Lysimeter and batch experiments[J]. Chemosphere, 2013, 93(9): 1980-1988.
- [51] SUN J, PROMMER H, SIADE A, J. , *et al.* Model-based analysis of Arsenic immobilization via Iron mineral transformation under advective flows[J]. Environmental Science Technology, 2018, 52(16): 9243-9253.
- [52] LUYSSAERT S, SCHULZE E D, BORNER A, *et al.* Old-growth forests as global carbon sinks[J]. Nature, 2008, 455(7210): 213-215.
- [53] 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): 0-54.
- [54] 田惠文, 张欣欣, 毕如田, 等. 煤炭开采导致的农田生态系统固碳损失评估[J]. 煤炭学报, 2020, 45 (4): 1499-1509.
- [55] AHIRWAL J, MAITI S K. Development of technosol properties and recovery of carbon stock after 16 years of revegetation on coal mine degraded lands, India[J]. Catena, 2018(166): 114-123.
- [56] TOKTAR M, LO-PAPA G, KOZYBAYEVA F E, *et al.* Ecological restoration in contaminated soils of Kokdzhon phosphate mining area (Zhambyl region, Kazakhstan)[J]. Ecological Engineering, 2016(86): 1-4.
- [57] 闫美芳, 王 璐, 郝存忠, 等. 煤矿废弃地生态修复的土壤有机碳效应[J]. 生态学报, 2019, 39 (5): 1838-1845.
- [58] TAN K, PIAO S L, PENG C H, *et al.* Satellite-based estimation of biomass carbon stocks for northeast China's forests between 1982 and 1999[J]. Forest Ecology Management, 2007, 240(1-3): 114-121.

- [59] KRABBENHOFT K, KIRBY D, BIONDINI M, *et al.* Topoedaphic unit analysis: A site classification system for reclaimed mined lands[J]. *Catena*, 1993, 20(3): 289-301.
- [60] VIVIANA OTERO, RUBEN VAN De KERCHOVE, BEHARA SATYANARAYANA C M-E, *et al.* Managing mangrove forests from the sky: Forest inventory using field data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, Peninsular Malaysia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018(411): 35-45.
- [61] GETZIN S, WIEGAND K, SCHOENING I. Assessing biodiversity in forests using very high-resolution images and unmanned aerial vehicles[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2012, 3(2): 397-404.
- [62] 张纪伟, 陈华勇. 金属矿床勘查与开发定量生态评估体系初探: 以福建罗卜岭斑岩型铜铅矿为例[J]. *地球科学*, 2021, 46(11): 3818-3828.
- [63] 李金铠, 马静静, 魏 伟. 中国八大综合经济区能源碳排放效率的区域差异研究[J]. *数量经济技术经济研究*, 2020, 37(6): 109-129.
- [64] 郭庆华, 胡天宇, 马 勤, 等. 新一代遥感技术助力生态系统生态学研究[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(4): 418-435.
- [65] DALPONTE M, BRUZZONE L, GIANELLE D. Fusion of hyperspectral and LIDAR remote sensing data for classification of complex forest areas[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(5): 1416-1427.
- [66] KINCEY M, WARBURTON J, BREWER P. Contaminated sediment flux from eroding abandoned historical metal mines: Spatial and temporal variability in geomorphological drivers[J]. *Geomorphology*, 2018, 319(15): 199-215.
- [67] HUSSON E, HAGNER O, ECHE F. Unmanned aircraft systems help to map aquatic vegetation[J]. *Applied Vegetation Science*, 2014, 17: 567-577.
- [68] HONG W X, WEI G X, BAO L Z, *et al.* Production process optimization of metal mines considering economic benefit and resource efficiency using an NSGA-II model[J]. *Processes*, 2018, 6(11): 228.
- [69] JIA W X, LIU M, YANG Y H, *et al.* Estimation and uncertainty analyses of grassland biomass in Northern China: Comparison of multiple remote sensing data sources and modeling approaches[J]. *Ecological Indicators*, 2016(60): 1031-1040.
- [70] FAN L, ZHAO W P, FENG W D, *et al.* Insight into the characteristics of soil microbial diversity during the ecological restoration of mines: A case study in Dabaoshan mining area, China[J]. *Sustainability*, 2021(13): 11684.
- [71] PIAO S L, LIU Q, CHEN A P, *et al.* Plant phenology and global climate change: Current progresses and challenges[J]. *Global Change Biology*, 2019(25): 1922-1940.
- [72] 官炎俊, 王 娟, 周 伟, 等. 露天矿区土地复垦适应性管理: 内涵解析与框架构建[J]. *中国土地科学*, 2023, 37(2): 102-112.
- [73] LIN Y, JIAO Y, ZHAO M, *et al.* Ecological restoration of wetland polluted by heavy metals in Xiangtan manganese mine area[J]. *Processes*, 2021(9): 1702.
- [74] MI J X, LIU R, ZHANG S L, *et al.* Vegetation patterns on a landslide after five years of natural restoration in the Loess Plateau mining area in China[J]. *Ecological Engineering*, 2019(136): 46-54.
- [75] 曾伟生, 陈新云, 蒲 莹, 等. 基于国家森林资源清查数据的不同生物量和碳储量估计方法的对比分析[J]. *林业科学研究*, 2018, 31(1): 66-71.
- [76] 张 帆, 葛世荣. 矿山数字孪生构建方法与演化机理[J]. *煤炭学报*, 2023, 48(1): 510-522.

A Bibliometric Study on the Restoration and Carbon Sink Potential of Damaged Ecosystem in Mining Area

ZHANG Yu-ang¹, LI Ya-tong², DU Zhong-yu², QI Xin-hua³, HOU Hong⁴, CHEN Guang-cai²

(1. Industry Development and Planning Institute, NFGA, Beijing 100010, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China; 3. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian, China; 4. Chinese Research Academy of Environmental Science, Beijing 100012, China)

Abstract: [Objective] Mining activities have a detrimental impact on the environment, both in China and globally, leading to pollution, ecosystem damage, and risks to human health. The restoration and remediation of damaged ecosystems in mining areas present significant challenges, particularly in the context of China's commitment to carbon neutrality. [Method] This study analyzed 914 literature published between 2010 and 2022, focusing on four key aspects of ecological restoration in mining areas: evaluation of damaged ecosystems, ecological restoration technology, carbon source/sink potential, and monitoring technology. [Result] There had been a shift in the approach to restore damaged ecosystems in mining areas. Earlier emphasis on "engineering restoration" had given way to a more holistic approach known as "system ecological restoration". There was a transition from solely addressing fragmented and isolated areas to considering the restoration of the entire regional ecosystem. Additionally, study on the carbon source/sink in mining areas and the carbon cycle mechanisms of the regional environment is progressing. The application of big data technologies, such as remote sensing, played a significant role in advancing monitoring and evaluation systems for mining rehabilitation. The effectiveness of restoration efforts in degraded mining areas was influenced by various factors including improvements in laws and regulations, system control systems, multi-disciplinary integration, and striking a balance between production and living ecology. [Conclusion] This study clarifies the current dilemmas and challenges in the research and application of damaged ecosystem restoration and carbon sequestration potential in mining areas and provides reference for future ecological restoration management and monitoring and evaluation in mining areas.

Keywords: mining area; ecological restoration; evaluate; carbon sink; monitor

(责任编辑: 崔 贝)