基于知识图谱分析的矿山生态修复研究进展*

刘洋[1,2],周良彬[3,4],袁雪涛[5],常智慧[1]

(1.北京林业大学 草业与草原学院, 北京 100083;
2.华北理工大学 电气工程学院, 河北 唐山市 063210;
3.成都获得感科技有限公司, 四川 成都 610200;
4.北京林淼生态环境技术有限公司四川分公司, 四川 成都 610096;
5.华北理工大学 矿业工程学院, 河北 唐山市 063210)

摘要:为探究矿山生态修复领域的研究热点和发展趋势,基于Web of Science(WOS)和中国知网(CNKI)检索的文献数据,采用VOSviewer、CiteSpace、SCImago Graphica等软件,对692篇英文文献和298篇中文文献进行可视化分析,并探讨了不同矿山生态修复理念及关键修复技术的差异。结果表明:矿山生态修复研究领域的发文量总体呈上升趋势;国家之间合作频繁,已形成以中国为主要核心,以美国、澳大利亚、西班牙等欧美国家为次要核心的研究网络;国际高产机构间合作紧密,国内高产机构间缺乏联系;研究热点聚焦于煤矿修复、植物修复技术、土壤重金属修复、微生物作用研究、修复效果评价、碳中和目标实践等。未来需要深入以土壤、微生物、植物为主的矿山生态基本单元的修复技术,推动无人机航测、机器学习等新兴技术在模型搭建和效果评价中的应用,并探索碳中和目标下的矿山生态修复路径。矿山生态修复研究目前处于发展爆发期,我国应将宏观监测与微观研究相结合,运用前沿技术,促进跨学科融合与跨领域合作,持续完善我国矿山生态修复的研究体系。

关键词:矿山生态修复;可视化分析;知识图谱

中图分类号:TD88 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)03-0207-14

Research Progress on Mine Ecological Restoration Based on Knowledge Graph Analysis

LIU Yang[1,2], *ZHOU Liangbin*[3,4], *YUAN Xuetao*[5], *CHANG Zhihui*[1]

(1.School of Grassland Science, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;
2.College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China;
3.Chengdu Chengdugan Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610200, China;
4.Sichuan Branch, Beijing Linmiao Ecological Environment Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610096, China;
5.College of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan, Hebei 063210, China)

Abstract: To explore the research hotspots and development trends in the field of mine ecological restoration, based on the literature data retrieved from Web of Science (WOS) and China National Knowledge Infrastructure (CNKI), 692 English literatures and 298 Chinese literatures were visually analyzed using software including VOSviewer, CiteSpace and SCImago Graphica. The differences among various mine ecological restoration philosophies and key restoration technologies were also discussed. The results show that the number of publications in the field of mine ecological restoration shows an overall upward trend. Cooperation among countries is frequent, and a research network has been formed with China as the primary core and European and American countries such as the United States, Australia and Spain as the secondary cores. Cooperation among international high-yield institutions is close, while connections among domestic high-yield institutions are lacking. Research hotspots focus on coal mine restoration, phytoremediation technology, soil heavy metal remediation, microbial mechanism research, restoration effect evaluation, and carbon neutrality target practice. In the future, it is necessary to further study the restoration technologies of basic mine ecological units dominated by soil, microorganisms and plants, promote the application of emerging technologies such as UAV aerial mapping and machine learning in model construction and effect evaluation, and

* **收稿日期**:2025-04-08
基金项目:中央引导地方科技发展资金项目(246Z4201G)
作者简介:刘洋(1988—),男,河北邢台人,硕士,讲师,主要从事矿山生态修复研究。E-mail: hlliuyang@ncst.edu.cn
通信作者:常智慧(1978—),男,湖北咸丰人,博士,教授,主要从事草地生态治理工作。E-mail: changzh@bjfu.edu.cn

explore the path of mine ecological restoration under the carbon neutrality goal. Mine ecological restoration research is currently in a period of explosive development. China should combine macro-monitoring with micro-research, apply cutting-edge technologies, promote interdisciplinary integration and cross-field cooperation, and continuously improve the research system of mine ecological restoration in China.

Key words: Mine ecological restoration, Visual analysis, Knowledge graph

0 引言

矿产资源作为“工业粮食”,是国民经济建设和社会发展的重要物质基础[1]。随着我国工业化、城镇化的快速推进,国家对矿产资源的需求和消耗日益增大。然而,矿山开采破坏当地生态环境,可能带来严重的植被退化、水土流失等自然灾害,影响地区生态景观,降低居民生活质量[2]。因此,矿山生态修复研究一直是国内外生态环保领域中的一项重要课题。矿山生态修复,即在人为辅助控制下,利用矿山生态系统演替和自我恢复能力,使被扰动和损害的生态系统恢复到接近于受干扰前的自然状态[3]。它是一项综合运用生物和工程措施,通过改良土壤,在矿山废弃地上创建适合植物生长发育的立地条件,依靠植物根系与土壤之间的附着力,以及根系之间的盘根交错,达到固土护坡、恢复矿山受损生态环境目的的技术[4]。

目前,学界已围绕矿山生态修复理念[5-6]、修复植物筛选[7-9]、修复工程手段[10-11]、微生物修复作用[12-13]、修复效果评价[14-16]等方面做了大量研究,也有部分学者利用文献计量分析软件对该领域研究进行了总结和论述。例如,高云峰等[17]、邵泽强等[18]分别以中国知网(CNKI)为数据源,综述了2000—2018年、2002—2022年国内矿山生态修复研究的现状与趋势。然而,近些年全球生态领域不断提出新理念,矿山生态修复研究不断涌现新技术、新方法,相关研究的发文数量、广度和深度均在不断增加,因此需要重新梳理该领域研究文献,探究其研究热点的新变化和发展的新趋势。此外,不同于该领域以往的综述研究,笔者增加了英文文献数据源,充分梳理了国内外最新研究进展;优化了数据分析方法,利用 Citespace 和 VOSviewer 软件对分析结果进行优化验证;还突出综述了矿山生态修复的技术手段,分析并对比了不同技术手段的优缺点。通过全面梳理和总结矿山生态修复领域研究现状,以期客观揭示矿山生态修复研究的动态、发展过程和演变趋势,挖掘该领域国内外的研究脉络,为未来我国矿山生态修复研究与实践提供科学参考。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与处理

本文研究数据来自 Web of Science(WOS)核心合集数据库和 CNKI 数据库,检索时间为 2024 年 10 月 29 日。WOS 数据库检索公式为 $TS=$(“mine”) AND ($TS=$(“ecological restoration”) OR $TS=$(“ecological management”)),不限年限,文献类型为“Article”,共检索到 1072 条结果;中文文献以“矿山”并“生态修复”或“生态治理”为主题,不限年限,文献类型为“学术期刊”,类别选择北大核心、CSSCI、CSCD,得到 441 条结果。对检索结果进行人工除杂,剔除综述、会议论文、报告等,最终得到有效英文文献 692 篇、中文文献 298 篇。

1.2 研究方法

本文利用 CiteSpace 软件对检索文献进行可视化处理,分析项目包括国家分布(Countries)、研究机构(Organizations)、关键词共现(keywords co-occurrence)、关键词聚类(keywords clustering)等,分析时间切片均设定为 1a,在此基础上借助 VOSviewer 软件对所得结果进行优化验证,借助 SCImago Graphica 软件对结果进行统计分析与绘图,力求更为直观、全面地展现矿山生态修复的研究现状与发展趋势。

由于文献计量法主要关注文献的外部特征,文献的内容特征容易被忽视。因此,本文在对国内外文献可视化分析的基础上,根据具体文献的内容开展了进一步分析。

2 结果与分析

2.1 研究发展阶段

从矿山生态修复研究的发文数量变化趋势(见图 1)来看,中英文文献发文量整体上均呈现上升趋

势,说明该领域研究的活跃度持续增加,受到了全球研究者的持续关注。

英文文献关于矿山生态修复的研究大致分为三个阶段。(1)萌芽期(1995—2006 年)。欧美国家,尤其是美国,开始关注矿山植被恢复及修复效果评价。这一阶段学界主要聚焦于农业和生物相结合的修复技术研究[19]。(2)发展期(2007—2019 年)。结合文献中"China"、"Loess Plateau"等关键词高频出现的现象,表明该阶段国内的相关研究开始增多且国内学者更倾向于将研究成果发表在国际期刊。土壤重金属污染治理[20-21]、微生物群落研究[22-23]日益成为研究重点。(3)爆发期(2020 年至今)。该阶段矿山修复效果评价体系、评估模型[24]的构建进一步受到重视。

中文文献关于该领域的研究阶段大致也可分为三个阶段。(1)萌芽期(2006—2016 年)。学界主要关注植被营造技术[25]、种植基质改良[26]、遥感监测[27]等三个方向的研究。(2)发展期(2017—2019 年)。随着我国 PPP 模式(政府和社会资本合作模式,Public-Private Partnership)进入规范阶段,由政府与社会资本合作修复矿山环境的新模式得到广泛应用。该阶段生态修复效果评价方法进一步受到重视,其中层次分析法被广泛应用,研究者通过确定地形条件、气象条件、植被保护性等准则层要素,选取不同的直观评价指标,构建权重评价体系,对生态修复效果进行科学客观的评价,为国内生态修复相关研究提供了更为科学、高效的评价方法[28]。(3)爆发期(2020 年至今)。我国提出了"双碳"目标,相关研究的中文文献大量涌现[29],以实现碳中和为目标的矿山生态修复路径研究,将成为未来较长时间国内学者关注的重点。

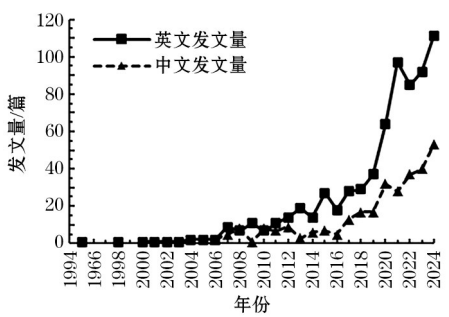


图 1 矿山生态修复研究的发文量

Fig.1 Number of publications on mine ecological restoration

2.2 国家分布及其合作关系

英文文献发文量排名前 25 的国家如图 2 所示。从发文数量看,中国发文量最多,处于绝对领先地位;其次是澳大利亚、美国、西班牙,剩下其余国家发文量均未超过 40 篇。从合作强度看,中国、美国、澳大利亚是合作强度最高的前 3 个国家。从文章被引次数看,中国 435 篇文章总共被引用 6 564 次,居各国之首;其次是澳大利亚、西班牙,文章被引用次数分别为 1 215 次、1 039 次。整体而言,矿山生态修复研究领域国家之间交流合作频繁,已形成以中国为主要核心,以美国、澳大利亚、西班牙等欧美国家为次要核心的研究网络。

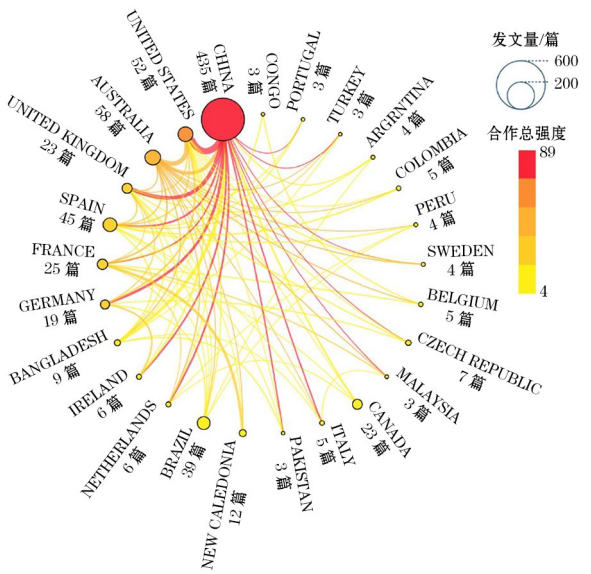


图 2 不同国家矿山生态修复研究的产出情况

Fig.2 Research output on mine ecological restoration of different countries

2.3 研究机构分布及合作特征

英文文献研究机构情况如图 3 所示,共涉及全球机构 914 家。其中,累计发文量≥3 篇的机构仅有 133 家,占比 15%,说明大多数机构缺乏研究的连续性。在上述 133 家研究机构中,隶属于中国的有 68 家,约占总数的 1/2。这可能与我国矿产资源丰富且开采量大,以及国家对生态修复治理的政策支持密切相关。这表明矿山生态修复研究受矿产资源禀赋、政策法规等方面的影响较为显著。图 3 中显示,机构之间合作网络密度较高,说明国际机构之间合作紧密,且存在跨国机构间的密切合作。整体上,已形成以中国科学院、中国矿业大学(北京)、西澳大学(澳大利亚)、中国地质大学(北京)、西北农林

科技大学等发文量较多的研究机构为核心的机构合作群。

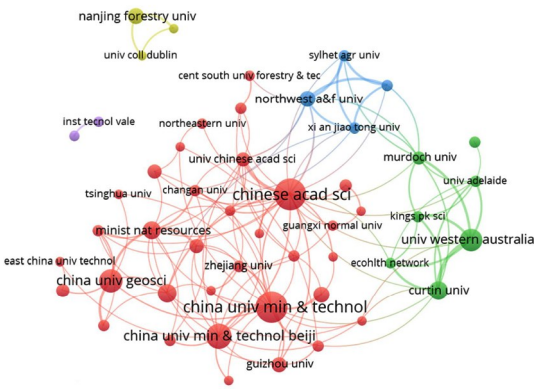


图 3 英文文献研究机构情况

Fig.3 Research institution landscape in English literatures

中文文献研究机构情况如图 4 所示,共涉及机构 545 家。其中,累计发文量≥3 篇的机构仅有 42 家,占比 8%,表明国内机构研究的连续性较为欠缺。国内研究机构类型丰富,包括国家相关部委、科研院所、高校和中央企业等,已经形成了政、校、企等多方共同参与的良好局面。中国矿业大学(北京)、中国地质大学(北京)、华北理工大学、中国自然资源航空物探遥感中心在矿山生态修复领域均有突出贡献,并与地理位置接近或隶属关系密切的机构紧密连接,形成了核心机构合作群。然而,各核心机构群之间仍缺乏充分的交流联系。这表明国内机构间的合作关系受地理、管理因素等客观因素影响较大。

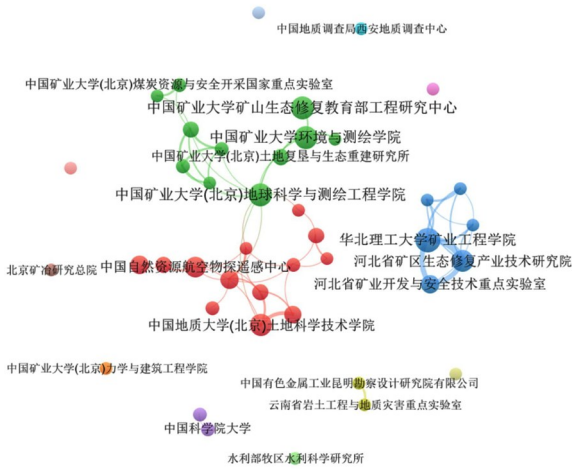


图 4 中文文献研究机构情况

Fig.4 Research institution landscape in Chinese literatures

结合国家分布和研究机构分析发现,中国是该领域研究最为活跃的国家,无论是国家总体发文量、文章被引用次数,还是参与研究的机构数量,均处于国际领先地位。国家间、机构间存在密切的交流合作,但是地理位置较远或非隶属关系的研究机构之间的合作较少。因此,在矿山生态修复研究的发展过程中,应进一步加强跨地区、跨学科、跨领域的交流合作,鼓励不同合作团队之间相互学习与提升,从而为全球矿山生态修复提供更加立体、全面、多元化的应用技术。

2.4 重点研究方向

将检索文献的关键词进行聚类分析,以探究该领域研究的不同主题或子领域,以及这些主题之间的联系。英文文献和中文文献的聚类模块值分别为 0.426 8、0.712 5,均大于 0.3,聚类社团结构显著;聚类平均轮廓值分别为 0.736 8、0.951 7,均大于 0.5,表明关键词之间联系紧密,聚类结果有效。

图 5 展示了英文文献中聚类前 11 的主题。结合每个主题下的主要关键词(表 1)分析,#0 phytoremediation(植物修复)、#1 coal mine(煤矿)这两个主题主要聚焦于植物修复与土壤重金属的相互作用研究,即利用植被修复技术吸收、分解、转化或固定土壤中的重金属污染物,从而改良土壤质地;#2 bacterial community(细菌群落)、#3 ecological succession(生态演替)、#6 microbial biomass(微生物生物量)、#7 enzymatic activity(酶活性)这四个主题重点聚焦于土壤微生物群落关键词,包括探究微生物群落结构与土壤理化性质的关系,以及微生物群落在评估生态恢复效果的价值等;#4 soil cover(土壤覆盖)、#8 superabsorbent polymer(高吸水性聚合物)、#9 edaphic filters(土壤过滤器)和#10 pedogenesis(成土作用)主要围绕土壤主题开展研究,涉及土壤覆盖、土壤质量、植物技术、群落组成、堆肥、种子库等关键词;#5 ecosystem service(生态系统服务)的研究主题则为生态系统的修复评价。

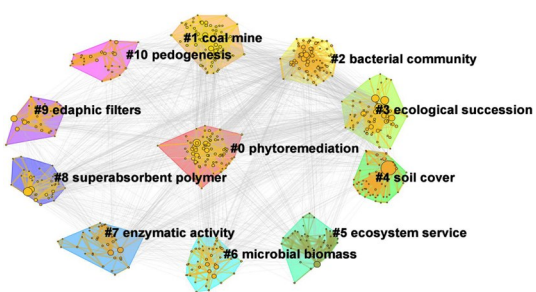


图 5 英文文献关键词聚类分析

Fig.5 Key words clustering analysis in English literatures

表 1 排名前 11 的英文文献关键词聚类分析

Table 1 Analysis of top 11 keywords clustering in English literatures

聚类名称	节点数/个	轮廓值	年份	主要关键词
#0 phytoremediation	77	0.725	2014	heavy metals, bioavailability, arsenic, copper accumulation
#1 coal mine	69	0.562	2016	vegetation restoration, organic carbon, heavy metals
#2 bacterial community	64	0.625	2017	bacterial diversity, fungal community, soil microbial communities
#3ecological succession	55	0.776	2007	mineral-solubilizing microorganisms, soil erosion, microbial community assembly process
#4 soil cover	53	0.842	2009	land reclamation, ecosystem restoration, forest, grasses
#5 ecosystem service	43	0.778	2013	ecological restoration priority, China, value assessment
#6 microbial biomass	42	0.799	2011	arbuscular mycorrhizal fungi, soil redevelopment, soil nutrients
#7 enzymatic activity	40	0.671	2017	arbuscular mycorrhizae, nitrogen, soilless revegetation, soil respiration
#8 superabsorbent polymer	28	0.818	2012	seed bank, community composition, root nodule, composted waste
#9 edaphic filters	27	0.866	2013	plant development, rehabilitation, biodiversity, grasslands
#10 pedogenesis	25	0.747	2012	soil quality, phytotechnology, spatial distribution patterns

图 6 展示了中文文献中聚类前 11 的主题。结合主题下的主要关键词(表 2)分析,#0 土地复垦主要围绕重金属污染矿山的治理效果及评价;#1 北京、#9 生态保护、#10 植被修复主要聚焦于修复植物的种植技术与效果评价;#3 水土保持、#6 配合比、#8 土壤改良的研究主体为土壤,涉及方向有水土保持、污泥堆肥、配合比设计等;#4 煤矿、#5 矿山地质环境、#7 无人机围绕遥感技术的应用开展研究;#2 碳中和的研究主题则为碳中和目标的实现途径,主要方向是“双碳”目标背景下矿山生态修复的措施。

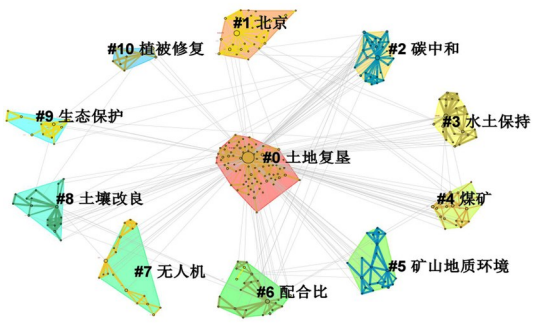


图 6 中文文献关键词聚类分析

Fig.6 Key words clustering analysis in Chinese literatures

表 2 排名前 11 的中文文献关键词聚类分析

Table 2 Analysis of top 11 key words clustering in Chinese literatures

聚类名称	节点数/个	轮廓值	年份	主要关键词
#0 土地复垦	70	0.999	2015	土地复垦、重金属污染、评价、岩体质量评价
#1 北京	30	0.984	2014	北京、植生袋、单因子假设检验
#2 碳中和	29	1.000	2021	碳中和、swot 分析、利益诉求、基于自然的解决方案
#3 水土保持	24	0.982	2017	地质环境、植被覆盖度、水土保持 、水土流失、
#4 煤矿	22	0.972	2015	土地复垦、煤矿、地理信息系统、遥感
#5 矿山地质环境	20	0.973	2019	离子型稀土矿、遥感生态指数、生态环境
#6 配合比	17	0.905	2014	废弃地、配合比 、关键技术、治理方法
#7 无人机	16	0.970	2020	倾斜摄影测量、层次分析法、矿山地质
#8 土壤改良	15	0.988	2013	产业化、剩余污泥 、铁矿尾矿、盆栽
#9 生态保护	14	0.907	2020	种植试验、钒钛磁铁尾矿、减损开采、绿色开采
#10 植被修复	13	0.994	2012	植物构建、基质改良、生态修复、多样性分析

2.5 研究热点分析

将检索文献的关键词进行共现分析,以了解该领域研究热点和趋势。剔除与检索主题相同和相近的关键词,合并意思相同的关键词,如中文文献分析时剔除关键词“矿区生态修复”“露天矿”“尾矿库”等;英文文献分析时将关键词“heavy metal”“heavy-metals”和“heavy-metal accumulation”进行合并,均以节点“heavy metals”表示。热度分布图中关键词研究密度越大,热度越高,背景颜色越接近红色;相反,关键词研究密度越小,热度越低,背景颜色越接近浅蓝色。

英文文献研究热点分布如图 7 所示,主要集中在土壤(soil)、植被修复(revegetation)、重金属(heavy metals)、多样性(diversity)、细菌群落(bacterial community)等热点;中文文献研究热点分布如图 8 所示,主要集中在土地复垦、重金属、煤

矿、遥感监测、评价指标等热点。植物、微生物和土壤之间共生关系的建立是矿山生态修复的关键,采矿后基质的土壤条件和土壤重金属种类及含量是植物恢复的重要限制因素[30]。因此,矿山土壤性质的恢复与土壤肥力的提升[31-33]、修复植物对土壤重金属吸收与分布的影响[34]、细菌群落对土壤理化特性的作用[35]、矿山生物多样性的评价作用[36],以及遥感监测技术在矿山生态修复评价体系的应用[37-38]等研究内容,受到了学界的重点关注。

分析近 5 年研究热点发现,修复效果评估、遥感监测等成为矿山生态修复研究的高强度词汇,反映了近年来该领域主要围绕生态修复效果评价的方向。究其原因,得益于遥感监测技术、无人机技术、机器学习算法等新兴技术、交叉学科的发展,研究者通过高科技手段监测和分析矿山生态系统的变化,为矿山的生态修复与可持续发展提供科学依据[16,39-40]。

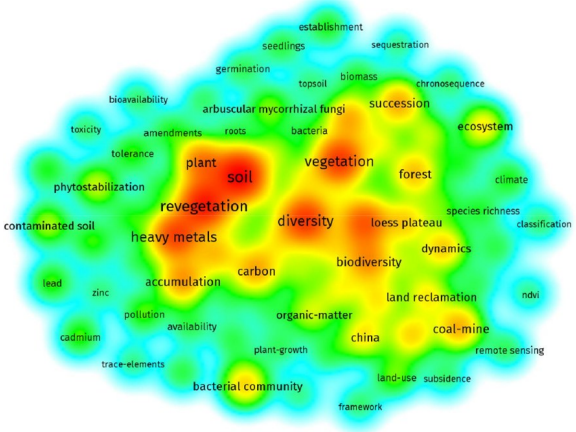


图 7 英文文献研究热点分布

Fig.7 Research hotspot distribution in English literatures

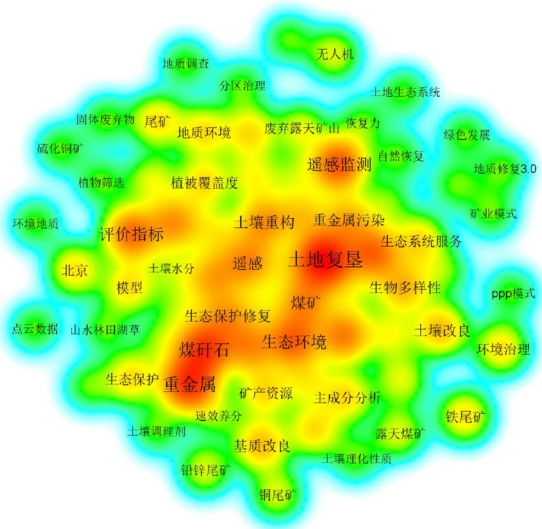


图 8 中文文献研究热点分布

Fig.8 Research hotspot distribution in Chinese literatures

3 重要研究内容及进展

分析国内外研究中提取的关键词,将矿山生态修复步骤大致归结为三个层面:明确修复理念、确定修复技术、修复效果评价(见图 9)。根据修复矿山实际情况选择合理的修复步骤,是取得良好修复效果的保障。

3.1 生态修复理念内涵

随着全球生态环境的恶化,人们不断思考并完善发展理念,逐渐形成了尊重自然、保护自然、顺应自然的文明发展理念,在矿山生态修复进程中,我国学者在有效吸纳了国际理念基础上,结合我国矿山开采实际开展了一系列修复实践,见表 3。由表 3 可知,不同修复理念彼此联系但又各有侧重。

表 3 不同生态修复理念的概念及特点

Table 3 Concepts and characteristics of different ecological restoration philosophies

修复理念类型	概念	特点
“因地制宜”理念	指根据各地的具体情况,制定适宜的办法。	量身定制修复方案,最大程度地恢复受损的生态系统。
“基于自然的解决方案”理念	也称为 NbS 理念,指保护、可持续管理和恢复自然的和经改变的生态系统的行动,有效和适应性地应对社会挑战,同时提供人类福祉和生物多样性效益[48]。	修复成效高、时效长,稳定性强,系统性强。
“边采边复”理念	指在矿山开采过程中,同步进行土地复垦(修复)的技术,通过矿山开采与地面复垦的有机耦合,实现矿山采-复一体化[43]。	提高土地恢复率,缩短复垦周期,地表熟土破坏少。
“碳中和”理念	指在一定时间内直接或间接产生的二氧化碳或温室气体排放总量,通过植树造林、节能减排等形式,以抵消自身产生的二氧化碳或温室气体排放量,实现正负抵消,达到相对“零排放”[52]。	推动节能减排、改善能源结构、提升经济效益和生态环境质量、改善全球气候环境。

“因地制宜”理念强调精准施策,根据具体情况制定适宜的修复措施。实践中,需要在全面了解矿山基础条件的前提下,确定障碍因子并进行针对性修复[41]。该理念作为一种传统理念,后续出现的新理念普遍是在其基础上的升级或补充。“基于自然的解决方案”最早由世界银行于 2008 年在《生物多样性、气候变化和适应性:世界银行投资中的基于自然的解决方案》报告中提出,并由世界自然保护联盟

在2009年《联合国气候变化框架公约》中被引用并重新定义,该理念在“因地制宜”理念的基础上,进一步突出了遵循自然规律的原则,改变了以往生态修复人工过度干预的问题[42]。“边采边复”的理念由胡振琪等[43]提出,旨在解决我国煤矿以往存在的“先破坏、后复垦”的传统问题。该理念大大缩短了矿山复垦的时间,提高了土地的恢复率。然而,由于在修复过程中明确设定了土地的用途和生态功能,导致土地的利用方式受限。因此,在修复进程中需要高度精细的操作与复杂的工程安排,以及先进的设备和技术支持。2020年,中国提出了“双碳”目标。在“碳中和”生态理念下,需要转变生态修复思维,以节能减排、固碳增汇为最终目标,不断开展植被修复巩固和发展碳汇、推进尾矿的综合利用等研究,并探究矿山的低碳生产与低碳冶炼等技术[44]。随着我国提出碳中和目标,未来较长时间内面向碳中和目标的矿山生态修复新模式、新技术,以及“边采边复”理念的应用实践,也将成为研究热点。

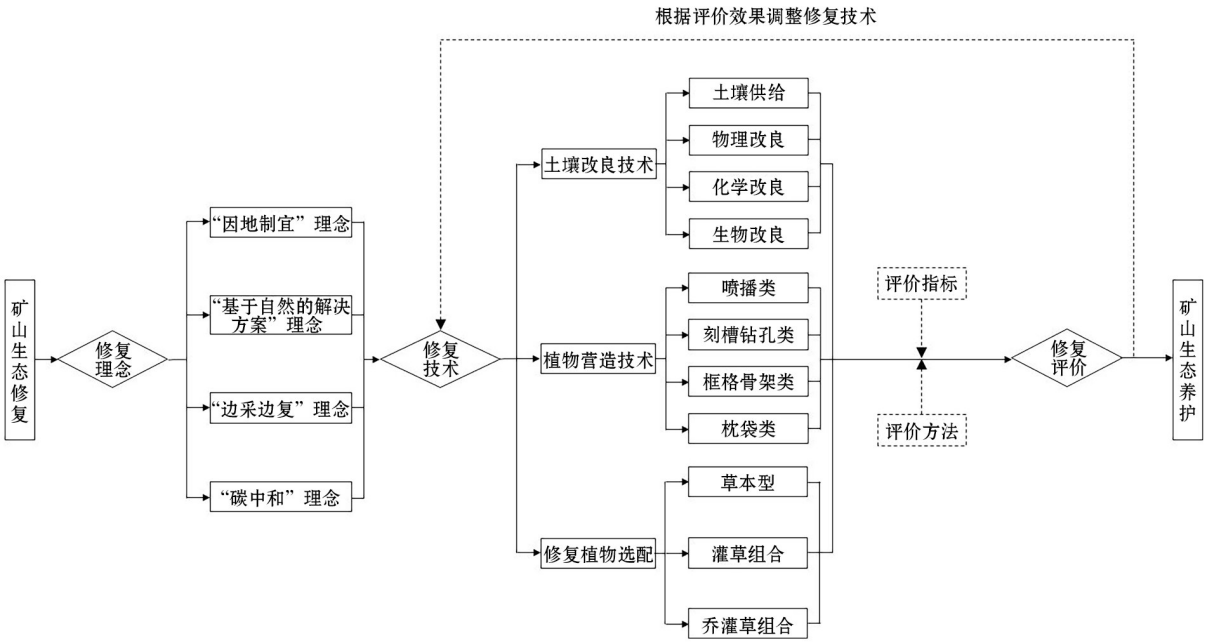


图9 矿山生态修复步骤

Fig.9 Steps for mine ecological restoration

3.2 关键修复技术体系

3.2.1 土壤改良技术

土壤改良是矿山生态修复的基础,学界主要围绕土壤供给、物理改良、化学改良、生物改良4种类型开展研究[45],不同类型的土壤改良技术特征与适用性见表4。利用天然土壤进行表土回填或客土覆盖,以其修复效率高的优点被广泛采用[46-48]。但在被修复的矿山缺乏土壤或者土壤条件极差时,这类技术就很难施用。针对矿山普遍缺乏天然土壤的困境,国内外学者探究了人工土壤重构技术[49],该技术拓宽了土壤来源,可以全面解决修复区土壤问题,已成为土壤改良技术的研究热点之一。

物理修复借助隔离、热解吸、电动力学、玻璃化修复等方法来处理土壤,在实际矿山修复中得到应用[50-51],但由于修复成本普遍较高、对土壤条件要求苛刻等原因,不能大面积推广。

化学修复多用于重金属或类金属污染系数较大的土壤,代表性的技术为固化/稳定技术、土壤淋洗技术等,由于其极易造成土壤或地下水的二次污染,因此避免二次污染的化学修复剂研究十分必要。近年来,市政污泥稳定化产物作为修复剂在矿山生态修复的应用效果得到了验证,具有良好的发展前景[52]。

生物修复可分为动物修复、植物修复与微生物修复3种,具有环境友好性强、成本低、可持续性强等特点。其中,动物修复利用蚯蚓、蚂蚁等土壤动物改变土壤结构、孔隙度和土层排列,在国外研究中较为常见[53-54]。植物修复以其改良重金属污染、保持水土、美化环境、经济有效等优点,在修复研究中发挥着重要作用,实践中多选择既是优势种又是本地种的植物作为先锋植物,同时选择灌草型、乔灌草型等多种植物组合搭配模式提升修复效果和稳定性[55]。此外,目前已经发现有超700种重金属超富集植物[56]在矿山生态修复中得到了广泛应用,该类

植物可以显著降低矿山土壤中的重金属含量[9],为改良重金属污染土壤提供了有效方法。微生物修复在矿山生态修复中也有大量的研究突破。例如,巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)可以促进碳酸盐岩矿石风化[57],蜡状芽孢杆菌(*Bacillus cereus*)、粗毛栓菌(*Trametes gallica*)、绿脓假单胞菌(*Pesudomonas aeruginosa*)等已被证实可以降低土壤重金属毒性[58]。但是微生物修复要求环境条件苛刻,因此,如何提高微生物制剂在不同环境下的扩繁能力也是重点研究方向。

表 4 常见的矿山土壤改良技术分类与适用性

Table 4 Classification and applicability of frequently-used mine soil amelioration techniques

技术类型	技术手段	技术原理	优点	缺点	适合范围
土壤供给	表土回填技术	在矿山开采作业前,将表土移除并保存,开采作业完成后再将表土回填。	见效快,土壤所含养分和植物种子得以保存。	破坏表层土壤结构。	适用即将开采的新矿山。
	客土覆盖技术	向污染土壤中添加洁净土壤,降低土壤中污染物的浓度,减少污染物与植物根系的接触。	见效快,效果好。	成本较高,改变土壤结构。	适用表层土壤受污染严重且污染范围较小的区域。
	人工土壤重构技术	综合运用工程措施及物理、化学、生物、生态措施,使受损的土壤系统功能得以恢复的过程或活动。	全面解决土壤问题,改善土壤结构,增加土壤养分。	需要全面技术支撑,操作复杂。	适用范围广,包含重金属污染土壤、采空区土壤等。
物理改良	隔离技术	通过物理障碍(如防渗膜)将受污染的土壤或废弃物与周边环境分离。	流程简单,易操作施工	需要定期监测维护,对高浓度重金属污染土壤不适用。	适用面积较小、污染严重、污染物易迁移或分解的土壤。
	热解吸技术	通过加热土壤至特定温度,引发污染物的热解和蒸发,再用冷凝系统回收或经过后续处理而去除土壤污染物。	能够保持土壤结构和功能的完整性。	能耗高,成本高,可能造成二次污染。	适用较为干燥的土壤条件。
	电动力学技术	利用土层和污染物电动力学性质对土壤进行修复。	成本低,处理效率高,不破坏土层结构,可控性强。	对高浓度污染物修复效果差,受土壤性质、污染物种类和浓度影响大。	适用黏质土壤、细砂土壤。
	玻璃化修复技术	通过高温加热将污染土壤中的有机物和无机物转化为玻璃状物质,从而达到修复土壤的目的。	修复效率高,可持续性高,成本低。	仅适合小面积修复处理。	适用含水量较低、污染物深度较浅的土壤。
化学改良	固化/稳定技术	通过使用固化剂与土壤中的污染物发生化学反应,从而降低污染物的溶出率。	针对性高,见效快。	影响土壤原有物理化学性质,存在二次污染风险。	适用重金属和类金属污染的土壤。
	土壤淋洗技术	通过向土壤添加特定的洗涤剂或者螯合剂,将污染物从土壤颗粒中解吸出来并进入水相,再将污染物从洗涤剂中分离出来,从而达到净化土壤的目的。	效率高,处理速度快,能同时处理多种污染物。	破坏土壤结构,容易造成地下水二次污染。	适用空隙大、高渗透性污染较为严重的土壤。
生物改良	微生物技术	利用微生物的代谢作用来降解矿山土壤中的污染物。	成本低,对环境干扰小,可持续性强。	修复周期长、效率低。	适用受污染的土壤和地下水环境。
	动物技术	利用土壤动物改变土壤层次结合和松散程度。	提高土壤松散度、提供养分。	修复周期长、效率低。	适用矿山废弃地。
	植物技术	利用植物的挥发、固定、提取和转化作用对污染物进行处理。	操作简单,对环境友好,自然美观。	修复周期长,对深层污染治理能力有限。	适用矿山表面修复。

3.2.2 植被营造技术

矿山边坡普遍较难为植物生长发育提供良好的立地条件,因此边坡植被营造技术一直是生态修复的重点。美国、法国、瑞士等西方国家的植被营造技术研究时间较早[59],中国虽然起步较晚,但通过借鉴国外先进技术和成功经验,在矿山边坡固土绿化方面也得到了发展[60]。表 5 展示了目前常用的植被营造技术类型,不同技术具有不同的特点和适用场景。

表 5 常用的植被营造技术

Table 5 Overview of frequently-used revegetation engineering

技术类型	技术步骤	常用技术	适用场景
喷播类	(1)处理坡面;(2)按比例混合喷播材料;(3)使用专用喷播机械将混合材料喷到坡面上。	液压喷播、厚层基材喷播、客土喷播、植被混凝土、三维植被网护坡。	适用坡度小于 60°不同质地的边坡。
刻槽钻孔类	(1)在坡面构建孔穴或槽穴;(2)在孔穴或槽穴回填土壤基质;(3)种植植物。	V 形槽种植技术、刻槽法种植技术、柔性种植槽技术、钻孔植播技术。	适用高陡硬岩石或干旱气候条件。
框格骨架类	(1)在坡面砌筑固土骨架;(2)在骨架内喷播或栽植植物。	骨架植草技术、框格梁植被营造技术、土工格室植草护坡技术、蜂巢式网格植草护坡。	适用土质边坡或风化岩质边坡。
枕袋类	(1)将种子、肥料、基质等装入专用网袋;(2)将网袋逐一码放到坡面上。	植生袋护坡技术、生态袋护坡技术。	适用坡度为 30°～60°的边坡或已做工程加固的高陡岩质边坡。

整体而言,喷播类技术以其高度的机械化程度和广泛的适用场景,已成为我国应用最广泛的植被营造技术之一[61]。然而,对于中、大型开采矿山,不同位置的边坡因开采水平与区域的不同,岩体质量可能也存在差异。因此,针对此类情况需要因地制宜,选择适用的技术类型。吴杨等[62]提出基于岩体质量评价与分区的矿山边坡生态重建技术,根据边坡地层分布、岩性、坡面特性等基础条件构建模型、划分区域并采用不同的植被营造技术,取得了良好的效果,为矿山边坡生态修复合理选取技术类型提供了新思路。近年来,尽管我国植被营造技术发展迅速,但由于我国矿山类型多样且分布广泛,仍有许多植被营造难题需要解决。例如,在干旱、高寒等极端地区的矿山植被营造手段,反季节施工作业,以及后续的简养护或免养护手段等方面仍需要开展更深入的研究[61]。

3.2.3 修复植物选配研究

植被恢复是矿山生态修复的前提。根据矿山自然环境现状,合理筛选植被物种和组合搭配是生态修复的关键环节之一。植物选配需要首先调查矿山土壤、水分和气候立地条件,再根据调查结果、护坡要求和景观效果确定目标植物群落。常见的植物配置类型有草本型、灌草组合型、乔灌草组合型等[63]。草本植物具有易成活、生长快、覆盖度高、经济性好等特点,能在短时间内达到护坡效果,促进土壤新陈代谢,为其他植物成活创造有利条件,研究中常用的暖季型草种有狗牙根(*Gramineae*)、结缕草(*Zoysia japonica*)、百喜草(*Paspalum natatum*)、艾草(*Artemisia argyi*)等;冷季型草种有紫花苜蓿(*Medicago sativa*)、高羊茅(*Festuca arundinacea*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、白三叶(*Trifolium repens*)、披碱草(*Elymus dahuricus*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)等[63-66]。灌草组合可以更好利用草本和灌木特征,达到更好的护坡效果。草本快速生长,改良土壤结构,产生的枯枝落叶保温保墒,并为灌木生长提供营养;灌木根系更加发达,更好起到护坡效果,加快植物群落自然演替,形成更加稳定的群落结构。在北方地区常用的灌木有胡枝子(*Lespedeza bicolor*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、锦鸡儿(*Caragana sinica*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、柠条(*Caragana korshinskii*)等;南方地区常用的灌木有紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、山毛豆(*Tephrosia candida*)、多花木兰(*Magnolia multiflora*)、银合欢(*Leucaena leucocephala*)等[63,66-67]。乔灌草组合相比草本、灌草组合的物种更丰富,群落更稳定,但是乔木生长需水量大、自重大,不适于在高陡边坡和较为干旱的区域使用。目前常用的乔木有桉树(*Eucalyptus robusta*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、圆柏(*Sabina chinensis*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)、台湾相思树(*Acacia confusa*)、云杉(*Picea asperata*)等[63,67-69]。结合土壤改良中的生物技术分析,重金属超富集植物的筛选与应用将是修复植物选配研究的重点。

3.3 修复效果评价研究

作为衡量矿山开采后生态恢复效果的关键环节,矿山生态修复效果评价贯穿于修复的全过程,涵盖了土壤改良、植被修复、水文修复、生物多样性恢复、景观与地貌修复等多个方面。国际生态协会从植被恢复后的稳定性、抵御外界因素影响、信息交流3个方向,筛选出9个极具代表性的评价指标,在修复评价研究中得到了广泛应用[70]。陆世东等[71]采用三维重构等岩体结构数字识别技术,实现了对某铜矿的边坡科学分区,利用识别参数获得岩体质量分级并提出针对性的生态修复优选方案,为提高矿山生态修复效率,提升修复精细化程度提供了参考价值。秦静等[72]构建了矿山生态效益指标量化模型,实现了生态矿山建设效果的货币量化,为矿山生态修复效果评价提供了新思路。由于评价系统的复杂性,国内外评价研究中存在缺乏系统性、普适性,缺乏长期监测数据支持,缺少社会经济效益评价等问题。因此,利用多层次的评价指标,构建动态化的修复效果评价体系和方法也是重要的研究课题。

针对修复效果评价的大多数研究集中在采矿对生态环境的负面评价,但是CHEN等[73]通过现场监测和遥感数据分析,关注到采煤对潜水深度影响而诱发的生态效应,揭示了榆神府矿区金鸡滩煤矿采矿活动对生态植被产生的积极影响,改变了人们对采矿的传统负面印象。然而,该研究主要关注短期地下水位变化及其对植被的影响,长期的生态效果仍需要进一步监测和分析。该研究结果具有一定的代表性,但不同矿区的自然条件、开采方式和生态背景差异较大,因此,该研究结论的推广价值有待进一步检验。

4 结论与展望

4.1 结论

借助文献计量分析软件,对国内外矿山生态修复研究文献进行分析,得出以下结论。

(1) 从发文趋势和国家来看,矿山生态修复研究发文量总体呈上升趋势,且当前处于爆发期。中国虽然起步较晚,但目前在发文量、文章总被引用次数、合作强度上均处于领先地位。该领域国家之间合作频繁,已形成以中国为主要核心,以美国、澳大利亚、西班牙等欧美国家为次要核心的研究网络。

(2) 从研究机构来看,国际机构之间合作紧密,已形成稳定的合作机构群,但多数机构缺乏研究的连续性。我国研究机构在国际上具有较强的影响力,且已形成政、校、企等多方共同参与的良好局面,但是国内机构间的合作受地理、管理因素等客观因素影响较大,导致核心机构群之间缺乏联系。

(3) 从研究内容和方向来看,目前该领域研究主要集中在煤矿区生态修复、植物修复技术、土壤重金属修复、微生物作用研究、修复效果评价、碳中和目标实践等热点。未来主要研究方向有 3 个:由土壤、微生物、植物为主构建的生态系统仍是未来研究的基础;遥感监测、无人机技术、机器学习算法等新兴技术和交叉学科在修复模型搭建与评价中的应用是未来研究的创新点;“边采边复”“碳中和”理念下的修复路径探究是未来较长时间国内学者关注的重点。

4.2 展望

近 30 年来,国内外矿山生态修复研究已取得丰富成果,但未来还有 3 个方面需要深入探讨。

(1) 深化研究内容,突出研究重点。在全球生态系统不断恶化的背景下,矿山生态修复研究要将宏观监测与微观研究相结合,深入探究微生物、植物的群落结构及功能与矿山土壤养分循环的相互作用机制。在最新生态理念的指引下,充分发挥跨学科、跨领域优势,融合生态学、生物学、地质学、经济学、社会学等学科前沿,丰富并深化矿山生态修复研究内容。

(2) 运用前沿技术,提升技术支撑。构建运用人工智能、AI 技术、大数据应用、遥感技术、无人机航测等现代信息技术进行矿山生态环境调查监测的网络体系,加强机器深度学习模型训练与优化,更客观、高效地分析生态环境的历史演变过程,为及时研判分析、系统解决矿山生态问题提供参考。

(3) 加强机构及研究者跨区域合作。虽然我国研究机构具有一定的合作强度,但仍存在分布分散、跨区域合作较弱的问题。我国研究机构及学者应通过政策引导,以中国科学院、中国地质大学、中国矿业大学等核心机构牵头,开展矿山生态修复研究的合作交流,形成跨地区、跨机构、跨领域的多维度、多层次合作模式,逐步完善我国矿山生态修复的研究体系,助力国家生态环境改善。

本文的不足在于,文献计量分析和可视化分析难以展现矿山生态修复领域的全貌,只能在整体理论框架上,结合部分应用案例探讨该领域的热点、现状与前景,较难在有限篇幅内对矿山生态修复深层次技术细节进行对比及综述。未来需要进一步利用科研工具,结合最新研究成果进行补充和完善。

参考文献(References):

[1] 冯培忠,曲选辉,吴小飞.关于我国矿产资源利用现状及未来发展的战略思考[J].中国矿业,2004(6):14-18.
FENG Peizhong, QU Xuanhui, WU Xiaofei. Study on the strategy of exploitation and utilization status of China's mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2004(6): 14-18.

[2] SCOTTON M, ANDREATTA D. Anti-erosion rehabilitation: effects of revegetation method and site traits on introduced and native plant cover and richness[J]. Science of the Total Environment, 2021, 776: 145915.

[3] 王治国.关于生态修复若干概念与问题的讨论[J].中国水土保持,2003(10):8-9.
WANG Zhiguo. Approach to concepts and issues on ecological renovation[J]. Soil and Water Conservation in China, 2003(10): 8-9.

[4] 李均容.边坡的生态恢复探析[J].现代园艺,2019(8):152-153.
LI Junrong. Analysis of slope ecological restoration[J]. Contemporary Horticulture, 2019(8): 152-153.

[5] 崔君,魏海英,王晓军.基于 NbS 的矿山可持续性评价研究:以北岳恒山露天矿区为例[J].中国矿业,2022,31(5):69-74.
CUI Jun, WEI Haiying, WANG Xiaojun. Research on assessment of sustainability in coal mine based on NbS of Hengshan Open-pit Mining Area[J]. China Mining Magazine, 2022, 31(5): 69-74.

[6] LIAO Q P, LIU X R, XIAO M Z. Ecological restoration and carbon sequestration regulation of mining areas: a case study of Huangshi city[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19: 4175.

[7] XUE J C, HE M, WU C F, et al. Adaptable plants for acidic wastewater sediment of copper sulfide mines[J]. Environmental Engineering and Management Journal,2020,19(9):1475-1480.

[8] LAFFONT-SCHWOB I, RABIER J, MASOTTI V, et al. Functional trait-based screening of Zn-Pb tolerant wild plant species at an abandoned mine site in gard (France) for rehabilitation of mediterranean metal-contaminated soils[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(15):5506.

[9] 赵敏娟,李雨季,高天鹏,等.湿地超富集植物对重金属矿山生态修复的比较分析[J].分子植物育种,2023,21(18):6252-6259.
ZHAO Minjuan, LI Yuji, GAO Tianpeng, et al. Comparative analysis on ecological restoration of heavy metal mines by wetland hyperaccumulators[J]. Molecular Plant Breeding,2023,21(18):6252-6259.

[10] 白建光,王建军,温楠,等.现浇网格矿山边坡生态修复技术研究[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2014,35(1):99-102.
BAI Jianguang, WANG Jianjun, WEN Nan, et al. Study on cast-in situ grid ecological restoration technology of mine slope[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition),2014,35(1):99-102.

[11] 于帅.基于层次分析-模糊综合模型的露天矿山微地形生态修复技术评价研究[J].中国矿业,2024,33(11):39-48.
YU Shuai. Evaluation of micro-topography ecological restoration technology for open-pit mines based on analytic hierarchy process-fuzzy comprehensive evaluation[J]. China Mining Magazine,2024,33(11):39-48.

[12] WONG W S, MORALD T K, WHITELEY A S, et al. Microbial inoculation to improve plant performance in mine-waste substrates: a test using pigeon pea (cajanus cajan)[J]. Land Degradation & Development,2022,33(3):497-511.

[13] ASMARA D H, ALLAIRE S, VAN NOORDWIJK M, et al. The effect of biochar amendment, microbiome inoculation, crop mixture and planting density on post-mining restoration[J]. Forests,2023,14(4):856.

[14] ZHANG C Y, LI F Y, LI J, et al. Assessing the effect, attribution, and potential of vegetation restoration in open-pit coal mines' dumping sites during 2003—2020 utilizing remote sensing[J]. Ecological Indicators,2023,155:111003.

[15] YUAN M, OUYANG J Y, ZHENG S N, 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.

[16] MAO Z J, YU H Y, LIANG W, et al. Dynamic monitoring of ecological restoration of abandoned mines based on GF-2 remote sensing images: take dawukou ditch of helan mountain as an example[J]. Ecological Engineering,2024,207:107304.

[17] 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.
GAO Yunfeng, XU Youning, ZHU Yaxuan, et al. An analysis of the hotspot and frontier of mine eco-environment restoration based on big data visualization of VOSviewer and CiteSpace[J]. Geological Bulletin of China,2018,37(12):2144-2153.

[18] 邵泽强,刘书奇,陆文龙,等.基于 Citespace 的矿山生态修复的文献计量分析[J].环境工程,2023,41(增刊 2):707-711.
SHAO Zeqiang, LIU Shuqi, LU Wenlong, et al. Bibliometric analysis of mine ecological restoration based on Citespace[J]. Environmental Engineering,2023,41(Suppl. 2):707-711.

[19] BOOTH D T. Seed longevity and seeding strategies affect sagebrush revegetation[J]. Journal of Range Management,2002,55(2):188-193.

[20] LI M S, LUO Y P, SU Z Y. Heavy metal concentrations in soils and plant accumulation in a restored manganese mineland in Guangxi, South China[J]. Environmental Pollution,2007,147(1):168-175.

[21] SEO K W, SON Y, RHOADES C C, et al. Seedling growth and heavy metal accumulation of candidate woody species for revegetating Korean mine spoils[J]. Restoration Ecology,2008,16(4):702-712.

[22] JASPER D A. Beneficial soil microorganisms of the Jarrah forest and their recovery in bauxite mine restoration in Southwestern Australia[J]. Restoration Ecology,2007,15:S74-S84.

[23] CLAASSENS S, JANSEN VAN RENSBURG P J, MABOETA M S, et al. Soil microbial community function and structure in a post-mining chronosequence[J]. Water, Air, and Soil Pollution,2008,194:315-329.

[24] TAO W, JIN Z. Remote sensing image characteristics and typical area analysis of Taiyuan Xishan ecological restoration area[J]. Sensors,2023,23(4):2108.

[25] 戴方喜,宋林旭.边坡生态防护与治理技术的研究及应用[J].中国水土保持,2007(7):20-22.
DAI Fangxi, SONG Linxu. Study and application of ecological protective and control techniques of slopes[J]. Soil and Water Conservation in China,2007(7):20-22.

[26] 程一松,李书钦,谭辉.马钢姑山矿业公司钟山排土场复垦效果分析[J].金属矿山,2011(10):131-134.
CHENG Yisong, LI Shuqin, TAN Hui. Analysis of reclamation effect of Zhongshan dump of Masteel Gushan Mining Company[J]. Metal Mine,2011(10):131-134.

[27] 陈伟涛,张志,王焰新,等.矿山地质环境遥感监测方法初探[J].地质通报,2010,29(增刊 1):457-462.
CHEN Weitao, ZHANG Zhi, WANG Yanxin, et al. Preliminary study on methods of geo-environment monitoring in minesites using remote sensing technique[J]. Geological Bulletin of China,2010,29(Suppl.1):457-462.

[28] 蒋仁伟,谈树成.基于GIS的白马红格矿区地质环境承载力研究[J].金属矿山,2019(5):170-176.
JIANG Renwei, TAN Shucheng. Study on the geological environmental bearing capacity of Baimahongge Mining Area based on GIS[J]. Metal Mine,2019(5):170-176.

[29] 胡振琪,理源源,李根生,等.碳中和目标下矿区土地复垦与生态修复的机遇与挑战[J].煤炭科学技术,2023,51(1):474-483.
HU Zhenqi, LI Yuanyuan, LI Gensheng, et al. Opportunities and challenges of land reclamation and ecological restoration in mining areas under carbon neutral target[J].2023,51(1):474-483.

[30] CROSS A T, STEVENS J C, SADLER R, et al. Compromised root development constrains the establishment potential of native plants in unamended alkaline post-mining substrates[J]. Plant and Soil,2021,461(1/2):163-179.

[31] LI X H, LEI S G, LIU F, et al. Analysis of plant and soil restoration process and degree of refuse dumps in open-pit coal mining areas[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health,2020,17(6):1975.

[32] GAO X M, XIE Y H, GAO W B, et al. Comprehensive evaluation of soil quality: a case study from a semi-arid area experiencing coal mine related subsidence in China[J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2021, 30(5): 4531-4544.

[33] FENG H B, ZHOU J W, ZHOU A G, et al. Grassland ecological restoration based on the relationship between vegetation and its below-ground habitat analysis in steppe coal mine area[J]. Science of the Total Environment,2021,778:146221.

[34] PENG L, LUO S, XIONG L Z, et al. The absorption and distribution of heavy metals of dominant plant for ecological restoration of stone coal mine[J]. Adsorption Science & Technology,2021:4694528.

[35] ZHANG Q, WEI P F, BANDA J F, et al. Succession of microbial communities in waste soils of an iron mine in Eastern China[J]. Microorganisms,2021,9(12)2463.

[36] ZHANG P P, YE Q Q, YU Y. Research on farmers' satisfaction with ecological restoration performance in coal mining areas based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Global Ecology and Conservation,2021,32:e01934.

[37] 高俊华,邹联学,龙欢,等.基于遥感动态监测的吉林省矿山地质环境及生态修复变化特征分析[J].自然资源遥感,2022,34(3):240-248.
GAO Junhua, ZOU Lianxue, LONG Huan, et al. Analysis on characteristics of mine geological environment and ecological restoration changes in Jilin Province based on dynamic remote sensing monitoring[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2022,34(3):240-248.

[38] 徐容,杨金中,邢宇,等.基于卫星遥感数据的矿山生态修复评价体系:以云南省三江成矿带为例[J/OL].地质通报:1-11[2024-11-04]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20241104.1118.006.
XU Rong, YANG Jinzhong, XING Yu, et al. Mine ecological restoration assessment based on satellite remote sensing data: a case study of the Sanjiang metallogenic belt in Yunnan Province[J/OL].Geological Bulletin of China:1-11[2024-11-04]. https://link.cnki.net/urlid/11.4648.P.20241104.1118.006.

[39] ZHONG A Y, WANG Z, ZHANG Z X, et al. Remote sensing monitoring of ecological environment quality in mining areas under the perspective of ecological engineering [J]. Environmental Earth Sciences,2024,83(20):587.

[40] TAN H, YU X X, ZHU M F, et al. Deformation monitoring and spatiotemporal evolution of mining area with Unmanned Aerial Vehicle and D-InSAR technology[J]. Mobile Information Systems,2022:8075611.

[41] 肖文彬,叶宗达,申浩原.因地制宜精准施策:荔浦市英山采石场实施废弃矿山生态修复案例[J].南方自然资源,2024(4):49-50.
XIAO Wenbin, YE Zongda, SHEN Haoyuan. Act according to circumstances and implement precise policies: case study of ecological restoration of abandoned mine in Yingshan Quarry, Lipu City[J]. Southern Natural Resources, 2024(4):49-50.

[42] MI J X, HOU H P, ZHANG S L, et al. Detecting long-term effects of mining-induced ground deformation on plant succession in semi-arid areas using a cellular automata model [J]. Ecological Indicators,2023,151:110290.

[43] 胡振琪,肖武.矿山土地复垦的新理念与新技术:边采边复[J].煤炭科学技术,2013,41(9):178-181.
HU Zhenqi, XIAO Wu. New idea and new technology of mine land reclamation: concurrent mining and reclamation [J]. Coal Science and Technology,2013,41(9):178-181.

[44] LYU X, YANG K, FANG J J, et al. Feasibility study of construction of pumped storage power station using abandoned mines: a case study of the Shitai mine[J]. Energies,2023,16(1):314.

[45] 张世荣.探究矿山地质环境现状与生态修复技术的应用[J].流体测量与控制,2024,5(4):66-69.
ZHANG Shirong. Explore the current situation of mine geological environment and the application of ecological restoration technology[J]. Fluid Measurement & Control, 2024,5(4):66-69.

[46] LEVI N, HILLEL N, ZAADY E, et al. Soil quality index for assessing phosphate mining restoration in a hyper-arid environment[J]. Ecological Indicators,2021,125:107571.

[47] 刘梓莹,高志伟,吴肇惠,等.不同生态修复方式对内蒙古荒漠草原露天矿山土壤肥力的影响[J].天津师范大学学报(自然科学版),2024,44(4):39-45.
LIU Ziying, GAO Zhiwei, WU Zhaohui, et al. Effects of different ecological restoration methods on soil fertility of open-pit mine in Inner Mongolia desert grassland[J]. Journal of Tianjin Normal University:Natural Science Edition,2024,44(4):39-45.

[48] 朱晓勇,胡国长.花岗岩露天关闭矿山生态修复技术应用[J].地质与勘探,2022,58(1):168-175.
ZHU Xiaoyong, HU Guozhang. Application of ecological restoration technology to closed granite open pit mines[J]. Geology and Exploration,2022,58(1):168-175.

[49] 胡振琪.矿山复垦土壤重构的理论与方法[J].煤炭学报,2022,47(7):2499-2515.
HU Zhenqi. Theory and method of soil reconstruction of reclaimed mined land[J]. Journal of China Coal Society,2022,47(7):2499-2515.

[50] 薛成杰,方战强,王炜.电子废物拆解场地复合污染土壤修复技术研究进展[J].环境污染与防治,2021,43(1):103-108.
XUE Chengjie, FANG Zhanqiang, WANG Wei. Review on remediation technology of composite polluted soil in electronic waste dismantling site[J]. Environmental Pollution & Control,2021,43(1):103-108.

[51] 李凤明,丁鑫品,孙家恺.我国采煤沉陷区生态环境现状与治理技术发展趋势[J].煤矿安全,2021,52(11):232-239.
LI Fengming, DING Xinpin, SUN Jiakai. Ecological environment status and development trend of governance technology of coal mining subsidence area in China[J]. Safety in Coal Mines,2021,52(11):232-239.

[52] 王仲瑀.城市污泥用于矿山废弃地生态修复污染控制与应用管理探讨[J].江苏农业科学,2017,45(24):1-8.
WANG Zhongyu. Exploration on pollution control and application management of urban sludge for ecological restoration of mining wasteland[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2017,45(24):1-8.

[53] WATERHOUSE B R, BOYER S, ADAIR K L, et al. Using municipal biosolids in ecological restoration: What is good for plants and soil may not be good for endemic earthworms[J]. Ecological Engineering,2014,70:414-421.

[54] QUEIROZ A, RABELLO A M, LASMAR C J, et al. Diaspore removal by ants does not reflect the same patterns of ant assemblages in mining and rehabilitation areas[J]. Neotropical Entomology,2021,50(3):335-348.

[55] 陈早雄.边坡修复中边坡类型及绿化植物对目标群落有效性的研究[J].草原与草坪,2024,44(4):85-93.
CHEN Zaoxiong. Study of slope types and the effectiveness and target communities of green plants in slope restoration[J]. Grassland and Turf,2024,44(4):85-93.

[56] REEVES R D, BAKER A, JAFFRÉ T, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements[J]. New Phytologist,2018,218(2):407-411.

[57] WU Y W, ZHANG J C, WANG L J, et al. Rock-weathering bacteria isolated from rock surface and its role inecological restoration on exposed carbonate rocks[J]. Ecological Engineering,2017,101:162-169.

[58] 王泽煌,王蒙,蔡昆争,等.细菌对重金属吸附和解毒机制的研究进展[J].生物技术通报,2016,32(12):13-18.
WANG Zehuang, WANG Meng, CAI Kunzheng, et al. Research advances on biosorption and detoxification mechanisms of heavy metals by bacteria[J]. Biotechnology Bulletin,2016,32(12):13-18.

[59] 李富平,贾淯斐,夏冬,等.石矿迹地生态修复技术研究现状与发展趋势[J].金属矿山,2021(1):168-184.
LI Fuping, JIA Yufei, XIA Dong, et al. Study status and development trends of ecological restoration techniques in abandoned quarry[J]. Metal Mine,2021(1):168-184.

[60] 张梦岩,郭小平,赵廷宁,等.中国边坡绿化研究进展与展望:基于 CiteSpace 和 VOSviewer 的文献计量分析[J].水土保持通报,2023,43(6):248-255.
ZHANG Mengyan, GUO Xiaoping, ZHAO Tingning, et al. Research progress and prospect slope greening in China: bibliometric analysis based on CiteSpace and VOSviewer[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2023,43(6):248-255.

[61] 杨雨荷,廖克武,麻坚,等.中国 30 年边坡绿化技术专利发展[J].生态学杂志,2023,42(8):1993-2002.
YANG Yuhe, LIAO Kewu, MA Jian, et al. Review on the development of slope greening technology patents for 30 years in China[J]. Chinese Journal of Ecology,2023,42(8):1993-2002.

[62] 吴杨,夏冬,梁冰,等.基于岩体质量评价与分区的露天矿岩质边坡生态重建技术[J].煤炭学报,2019,44(7):2133-2142.
WU Yang, XIA Dong, LIANG Bing, et al. Ecological reconstruction technology of rock slope in open pit based on rock mass quality evaluation and division[J]. Journal of China Coal Society,2019,44(7):2133-2142.

[63] 陈影,张利,董加强,等.废弃矿山边坡生态修复中植物群落配置设计:以太行山北段为例[J].水土保持研究,2014,21(4):154-157.
CHEN Ying, ZHANG Li, DONG Jiaqiang, et al. Study on the design method of plant community for the ecological restoration of slope in abandoned mine[J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(4):154-157.

[64] LIN H, JIANG X Y, LI B, et al. Soilless revegetation: an efficient means of improving physicochemical properties and reshaping microbial communities of high-salty gold mine tailings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety,2021,207:111246.

[65] LI X Y, WU Y G, YANG K Z, et al. The impact of microbial community structure changes on the migration and release of typical heavy metal (loid)s during the revegetation process of mercury-thallium mining waste slag[J]. Environmental Research,2024,251:118716.

[66] 梁世伟,许领,胡而已.露天矿山生态修复中的土壤重构试验[J].地质科技通报,2023,42(6):242-248.

LIANG Shiwei, XU Ling, HU Eryi. Field model tests of soil reconstruction in ecologicalrestoration of open-pit mines [J]. Bulletin of Geological Science and Technology,2023,42(6):242-248.

[67] 苏军德.矿山废弃地生态修复区植被碳库研究[J].水土保持通报,2018,38(5):234-237.
SU Junde. A study on vegetation carbon storage in ecological restoration area of abandoned mines[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2018,38(5):234-237.

[68] CHEN J H, JISKANI I M, LI G Q. Ecological restoration of coalmine-degraded lands: influence of plant species and revegetation on soil development[J]. Sustainability,2023,15(18):3772.

[69] 潘大伟,周雷,王世平,等.基于机载 LiDAR 和 LANDIS PRO 模型的矿山生态复垦区地上植被固碳能力及其提升路径研究[J/OL].生态学杂志:1-13[2024-11-28].https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20241127.1442.004.
PAN Dawei, ZHOU Lei, WANG Shiping, et al. Carbon sequestration capacity of aboveground vegetation in mine ecological reclamation area based on airborne LiDAR and LANDIS PRO model and its promotion path [J/OL]. Chinese Journal of Ecology:1-13[2024-11-28].https://link.cnki.net/urlid/21.1148.Q.20241127.1442.004.

[70] 蒋文翠,杨继清,彭尔瑞,等.矿山生态修复研究进展[J].矿业研究与开发,2022,42(4):127-132.
JIANG Wencui, YANG Jiqing, PENG Errui, et al. Research progress of mine ecological restoration[J]. Mining Research and Development,2022,42(4):127-132.

[71] 陆世东,张栋,涂美义,等.基于岩体结构数字识别技术的露天矿山边坡生态修复方案优选[J].金属矿山,2021(11):181-187.
LU Shidong, ZHANG Dong, TU Meiyi,et al. Optimization of slope ecological restoration scheme of open-pit mine based on digital identification technology of rock mass structure [J]. Metal Mine,2021(11):181-187.

[72] 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.
QIN Jing, LI Guoqing, HOU Jie, et al. Evaluation model of mine ecological benefit and its application [J]. Mining Research and Development,2022,42(11):208-214.

[73] CHEN W C, LI W P, YANG Z, et al. Analysis of mining-induced variation of the water table and potential benefits for ecological vegetation: a case study of Jinjitan coal mine in Yushenfu mining area, China[J]. Hydrogeology Journal, 2021,29(4):1629-1645.