

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.039.

宋智衍, 王建文, 陈平平, 等. 生产建设项目废弃地植被恢复研究热点与趋势[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 430-438.

Song Zhiyan, Wang Jianwen, Chen Pingping, et al. Research Hotspots and Trends of Vegetation Restoration in Waste Sites of Production and Construction Projects[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 430-438.

生产建设项目废弃地植被恢复研究热点与趋势

宋智衍¹, 王建文², 陈平平³, 李建兴³, 王波³, 李敏⁴, 杨淩舟¹, 陈奇伯^{1,5}

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 昆明 650224; 2.云南省滇中引水工程建设管理局,

昆明 650032; 3.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 昆明 650051;

4.云南省滇中引水工程有限公司, 昆明 650032; 5.西南林业大学 石漠化研究院, 昆明 650224)

摘要: [目的] 把握生产建设项目废弃地植被恢复的发展历程及现阶段的研究热点问题, 推进该研究领域的发展。

[方法] 以 Web of Science 数据库及 CNKI 数据库文献为基础, 使用 CiteSpace 软件的文献计量方法对文献进行了分析。

[结果] (1) 生产建设项目废弃地植被恢复研究受到国内外研究者的共同关注, 中国、印度和美国为主要发文国家。在国际上, 印度科学与工业研究理事会(CSIR)和中国科学院是相关文章发表最多的机构, 国内机构中发文量排名居榜首的是北京林业大学。(2) 目前国际研究的知识群组主要分布在生态修复技术、生物多样性、生态恢复质量评价等方面。国内研究侧重于恢复生态系统结构、植被恢复模式和土壤质量评价体系等方面。(3) 根据关键词突现分析, “生态系统服务”“植被恢复”“煤矿弃土”等是目前国际研究的热点; 国内近年研究则聚焦于“生态恢复”“景观设计”“规划设计”等方面。[结论] 目前的研究多为短期试验, 鲜有针对大范围下整个恢复过程的研究, 全面重建生态系统功能的研究尚不完善, 未来的研究热点聚焦于在进行植被修复时考虑生态和景观综合效益, 重视生态系统服务和景观设计。

关键词: 项目废弃地; 植被恢复; 研究热点; 文献计量学; CiteSpace

中图分类号: X171.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0430-09

Research Hotspots and Trends of Vegetation Restoration in Waste Sites of Production and Construction Projects

Song Zhiyan¹, Wang Jianwen², Chen Pingping³, Li Jianxing³,

Wang Bo³, Li Min⁴, Yang Haozhou¹, Chen Qibo^{1,5}

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China;

2.Yunnan Water Diversion Project Construction Administration Bureau, Kunming 650032, China; 3.Kunming Engineering

Corporation Limited, Kunming 650051, China; 4. Yunnan Central Water Diversion Engineering Corporation Limited,

Kunming 650032; 5.Research Institute of Rocky Desertification, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

Abstract: [Objective] The purpose of paper is to understand the development history of vegetation restoration in waste sites of production and construction projects, analyze the hot research issues, and further to promote the development of the research in terms of vegetation restoration. [Methods] The method of bibliometrics was used to survey on the literature of Web of Science database and CNKI database. [Results] It has been found out that the Council of Scientific and Industrial Research (CSIR) of India and the Chinese Academy of Sciences are the institutions with the most relevant articles published. The top ranked domestic institution in terms of the number of articles published is Beijing Forestry University. The

收稿日期: 2023-11-15

修回日期: 2023-12-20

资助项目: 云南省滇中引水工程水土保持关键技术研究专项(DZYS-ZH-STBC-SJ-001)

第一作者: 宋智衍(1998—), 男, 云南楚雄人, 硕士研究生, 研究方向水土保持及生态恢复。E-mail: 1153677881@qq.com

通信作者: 王建文(1971—), 男, 云南宣威人, 高级工程师, 主要从事滇中引水工程环境保护、水土保持建设管理工作。E-mail: 401724040@qq.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

ecological restoration technology, biodiversity, the quality evaluation of ecological restoration have been incorporated into the research clusters of the international institutions. The domestic researchers focus on restoration of ecosystem structure, vegetation restoration mode and soil quality evaluation system, etc. According to the analysis of highlighted keywords, ‘ecosystem services’, ‘vegetation restoration’ and ‘waste sites of coal mine’ can be the focus of international research at present. The domestic researches in recent years emphasized ecological restoration, landscape design, and planning and design. [Conclusion] The current studies are mostly based on the short-term experiments, and there are few studies on the whole restoration process at large scale. Besides, the studies on comprehensive reconstruction of ecosystem functions have not been perfect yet. The hotspots of the future studies will take integrated ecological and landscape benefits into the consideration when conducting vegetation restoration, and emphasize on ecosystem services and landscape design.

Keywords: waste sites of production and construction projects; vegetation restoration; research hotspots; bibliometrics; CiteSpace

废弃地是工业生产用地或与工业生产相关的用地在生产建设结束后被搁置不用的地段^[1]。在经济社会的发展历史长河中,这些工业设施曾发挥过重要作用,但废弃后给生态环境造成多种危害。比如植被毁坏、地貌景观退化、水文污染、生物多样性降低等^[2-4],进而对人类的生活动造成了严重影响,甚至制约社会发展,对区域经济产生影响^[5]。

因此,废弃地的生态恢复是我国推进生态文明建设必须解决的问题,系统地进行废弃地植被恢复相关研究能为可持续发展战略的推进提供助力^[6]。植被恢复以生态学原理为理论基础,通过人为的干预有计划地对自然植被进行保护,使生态系统中被破坏的部分得到修复,提高其生物多样性^[7]。植被恢复对改善废弃地的生态系统群落结构与功能有重要作用,是生态恢复的核心目标^[8],在研究时以恢复生态学作为它的理论基础。国际上部分国家从19世纪就开始对废弃地植被恢复进行了相关研究,在生态修复理论,植被恢复技术方面取得了丰富研究成果^[9]。但该主题的研究一直存在着大范围系统性研究少,缺乏长期监测,研究时间跨度较短,经费投入及因地制宜研究较少等问题^[10]。随着植被恢复研究的不断深入以及领域相关学科的发展、技术发展和研究热点的变迁,国内外大量相关研究文献的增加使得研究者们对当前研究热点和文献信息的掌握变得愈发困难。随着可视化技术的发展,以CiteSpace为代表的知识图谱软件为研究者们提供了掌握文献前沿热点的便利性。

CiteSpace运用科学的可视化理论对研究领域的发展与前沿热点进行整合分析,受到了国内外大量研究者的应用^[11-12];同时,知识图谱作为新的科学计量方法已兴起,应用于环境科学、植物学、土壤学、生态学、农学等方面^[13-14]。因此,使用CiteSpace对生产

项目建设废弃地植被恢复的国内外相关文献进行可视化分析符合目前的研究需求,可以清晰地显示出该领域内的研究现状和热点,对未来研究领域的发展趋势做出预测。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究所使用的英文数据来源于Web of Science数据库,所使用的中文数据来源于CNKI数据库,时间范围为1977—2022年,在Web of Science数据库的检索中以“vegetation * restoration *”“revegetation *”“reveget *”“plantat”“wasteland *”“spoil ground”“discarded land”为主题,语种类型选择设置为“English”,文献类型选择设置为“Article”“Review”的有关生产建设项目废弃地植被恢复研究的国际文献,并采用人工复筛的方法对文献进行整合,保证研究内容的准确性,复筛后共得到961条符合条件的文献信息。同时,中文数据以CNKI为数据源,使用CNKI数据库的高级检索功能以“植被恢复”“废弃地”为主题词,选定同义词扩展进行检索获取国内的研究数据,由于CNKI中的文献包含期刊、会议、学术报纸、专利等题材,同样使用人工复筛剔除进行整合,仅选择期刊论文作为数据来源,经过筛选,共整理出942篇文献。

1.2 分析方法

本研究使用CiteSpace(版本6.4.R3)软件中的主题词、关键词、聚类分析功能对Web of Science和CNKI数据库的结果进行可视化处理,绘制对应的知识图谱,使用Excel进行统计分析。在生成图谱后对数据进行挖掘,并结合文献相关信息生成分析报告。通过分析该领域的研究背景、研究现状、未来发展

趋势为生产项目建设废弃地的植被恢复发展提供详细的分析。

2 结果与分析

2.1 发文量变化趋势

年发文量可以反映出一定时间内某研究领域的整体状况,能够直观显示该研究领域的发展过程和研究规律。通过对 Web of Science 和 CNKI 数据库年际发文量变化进行分析统计,并通过图 1 呈现。其中,英文期刊的发文量变化分为两个阶段。第一阶段为 1977—1990 年,此阶段的年发文量篇幅在 10 篇以下,说明废弃地植被恢复的研究处于起步阶段;第二阶段为 1991—2022 年,此阶段年发文量稳步上升,为研究的发展提供文献积累。中文期刊年发文量变化分为 3 个阶段。第一阶段为 1977—2002 年,此阶段国内的年发文量篇幅在 10 篇以下,研究同样处于起步阶段;第二阶段为 2002—2012 年,此阶段年发文量持续上升,并呈现出加速发展的趋势,在 2012 年达到峰值,为加速发展阶段;第三阶段为 2013—2022 年,此阶段为稳定发展阶段,在经历了年发文量峰值后,年发文量增速放缓并逐渐趋于稳定。从图 1 可以看出,国内研究起步虽然晚于国外,但相关研究发展速度快,在短时间内年发文量达到国际水平。

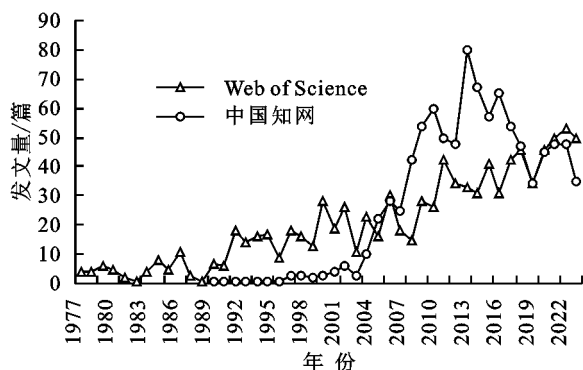


图 1 WoS 数据库和 CNKI 数据库 1977—2022 年度发文量

Fig. 1 vegetation restoration in CNKI database and WoS database

2.2 主要研究国家机构分析

2.2.1 发文国家分析 对 WoS 数据中发文量前 10 位的国家排序,见表 1。在 1977—2022 年期间,印度、美国、中国 3 个国家的发文量都超过了 120 篇,处于国际领先地位,表明了这 3 个国家的研究机构和学者在该领域内所做的研究数量多。

中介中心性数值的大小可以反映出国家在该领域中的影响力及与其他国家紧密合作开展相关研究工作的强度,中介中心性数值越大,说明国家在该领域内的影响力越大。如图 2 所示,发文量前三的国家

中,中国与其他国家的合作在国际上依然处于领先水平,稍弱于美国与印度。

表 1 WoS 数据库中发文量前 10 位的国家

Table 1 The top 10 most productive countries in terms of relevant articles in WoS database

国家	发文量	中介中心性
印度(INDIA)	205	0.24
美国(USA)	157	0.27
中国(CHINA)	126	0.18
英格兰(ENGLAND)	65	0.19
波兰(POLAND)	53	0.13
德国(GERMANY)	51	0.15
西班牙(SPAIN)	48	0.20
澳大利亚(AUSTRALIA)	37	0.09
捷克共和国(CZECHREPUBLIC)	32	0.06
法国(FRANCE)	31	0.22

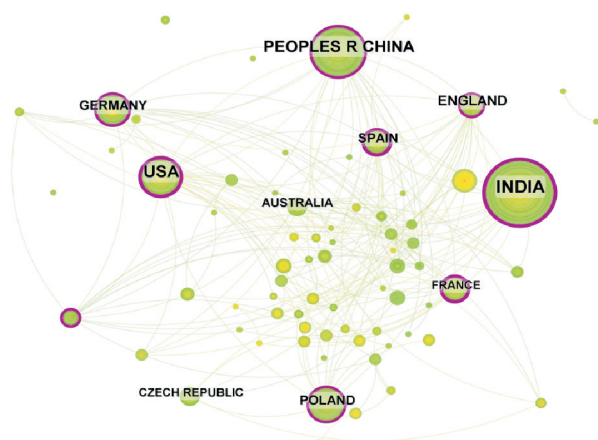


图 2 WoS 数据库发文量前 10 位的国家合作图

Fig. 2 Collaboration map of the top 10 countries in terms of WoS database

结合图 2 与表 1 可知,在文章产出前 10 的国家中,除澳大利亚(中介中心性 0.09)与捷克共和国(中介中心性 0.06)以外的国家都与其他国家有紧密合作,法国(0.22)和西班牙(0.2)虽然相关研究较少,但有着较高的中介中心性,体现了其在研究领域上较高的影响力。

2.2.2 发文机构分析 基于 WoS 和 CNKI 数据库的文献数据,对研究机构进行统计分析,结果见表 2。在 WoS 数据库中,中国科学院的发文量位居第 2 位,发文量为 49 篇,占排名前 10 位机构总发文量的 18.92%,表明中国科学院在植被恢复领域具有较高的影响力,为该领域的发展研究做出了巨大的贡献。

在 CNKI 数据库中,北京林业大学排名第一,发文量为 63 篇,占排名前 10 位机构总发文量的 31.98%。从表 2 可以看出,在国内机构中,北京林业大学占据主导地位,中南林业科技大学、内蒙古农业大学、西北农林科

技大学和河北农学大学,分列第 2 至第 5 位,发文量在 15 篇以上,其他机构的发文量逐渐减少。

表 2 CNKI 数据库和 WoS 数据库中发文量前 10 位的机构

Table 2 The top 10 organizations in publications in CNKI and WoS databases

国际研究机构	发文量/篇	最早发文年份	国内研究机构	发文量/篇	发文年份
印度科学与工业研究理事会	49	1994	北京林业大学	63	2004
中国科学院	49	1998	中南林业科技大学	20	2005
印度理工学院	27	2005	内蒙古农业大学	19	2007
印度农业研究理事会	24	1997	西北农林科技大学	19	2003
印度中央矿业与燃料研究所	20	2006	河北农业大学	15	2007
捷克科学院	19	2001	南京林业大学	14	2004
巴纳拉斯印度教大学	19	1992	山西大学	14	2008
印度矿业学院	19	2011	东北林业大学	12	2004
法国农业食品与环境研究所	17	2003	辽宁工程技术大学	11	2005
波兰科学院	16	2008	云南省林业科学院	10	2008

2.2.3 发文期刊及学科分析 在文献计量学分析中,学科分布分析常被研究者用来明晰某一研究领域的学科演化特征。通过对表 3 统计的文献在不同学科的分布情况进行分析,可以反映出环境领域学科之间的交叉融合。同时可以观察到环境科学、土壤科学和生态学是该研究领域的前三大热门学科。其中,环境科学类的发文量(419 篇)远远大于其他学科,占据了主导地位。

利用 WoS 数据库的统计结果,通过表 4 检索得到了该领域内发文总量排名前 10 的期刊。可以看出,排名前 10 中的高水平期刊占比很大,例如《Soil Biology and Biochemistry》《Science of the Total Environment》《Environmental Pollution》《Chemosphere》等。这些期刊的关注,表明了关于生产项目建设废弃地植被恢复的研究不仅发文量较多,而且受到了国际高水平期刊的关注。

表 3 WoS 数据库中发文量前 10 位的学科

Table 3 The top 10 organizations in subject in WoS databases

学科类别	发文量/篇	中介中心性
环境科学 Environmental Sciences	419	0.66
土壤科学 Soil Science	179	0.1
生态学 Ecology	149	0.32
植物学 Plant Sciences	99	0.12
环境工程 Engineering Environmental	94	0.17
林学 Forestry	85	0.11
水资源学 Water Resources	81	0.09
农学 Agronomy	75	0.14
地球科学 Geosciences	55	0.22
环境研究 Environmental Studies	34	0.04

2.3 关键词分析

CiteSpace 能通过软件的关键词分析功能,将所选数据库内的文章关键词绘制成可视化图谱,直观展现出领域内的内容,让研究者能直观地了解领域内重点研究方向^[15]。分析 CNKI 数据库文献和 WoS 数据库

文献生成的关键词共现图谱如图 3 所示。在关键词共现中图形的大小表示了关键词在文献中出现的频次,颜色随时间推移逐渐加深反映了关键词出现的时间变化。节点间连线的密集程度代表着不同研究热点之间联系紧密,其中的高频关键词展现出了较强的共现性。由高频关键词分析可知,国内研究出现频率最高的关键词为植被恢复,其次为生态恢复,表明这 2 个关键词是该研究领域的核心研究点;同时物种多样性、土壤理化性质、重金属、土壤种子库、土壤养分、矿山废弃地等关键词也是研究的重要组成部分。在国际上,研究以矿山弃土、重金属、植被修复为基础,将研究延伸到植被多样性、碳汇、生物量、森林、填海等方面。

表 4 WoS 数据库中发文量前 10 位刊物

Table 4 The top 10 organizations in publications in WoS databases

排名	来源出版物	发文量/篇	影响因子
1	Plant and Soil	200	4.993
2	Soil Biol Biochem	158	8.546
3	Journal of Environmental Quality	149	2.388
4	Soil Science Society of America journal	149	2.949
5	Science of the Total Environment	147	9.684
6	Environmental Pollution	143	8.821
7	Ecological Engineering	137	3.792
8	Forest Ecology and Management	132	3.678
9	Geoderma	118	6.086
10	Chemosphere	115	8.748

图 4 直观地展现了废弃地植被恢复研究主要核心聚类领域,在图 4 的 CNKI 和 WoS 数据库文献关键词聚类图中,CNKI 数据库的平均轮廓值 $S=0.7678$,文献聚类图谱模块值 $Q=0.5241$,WoS 数据库平均轮廓值 $S=0.7865$,文献聚类图谱模块值 $Q=0.5322$ 。当 $Q>0.3$ 说明关键词所划分出的结构是显著的,同时 $S>0.7$ 表明研究分析聚类是高效且让人信服的,聚类主题明确。

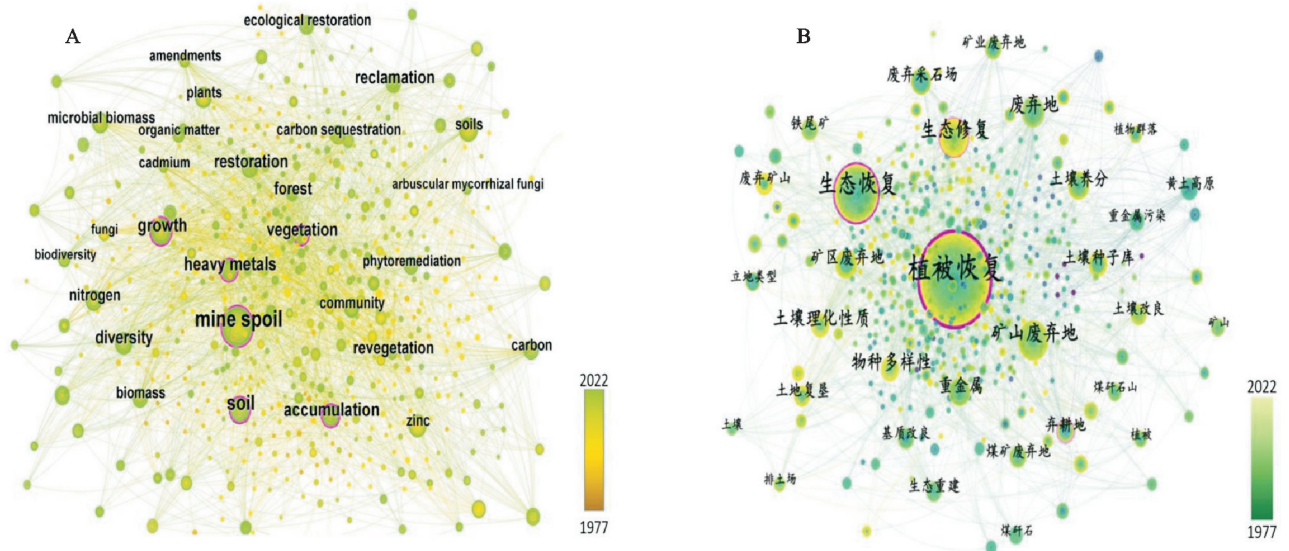


图 3 WoS(A)和 CNKI(B)数据库关键词共现图

Fig. 3 Keywords co-occurrence map of WoS and CNKI databases

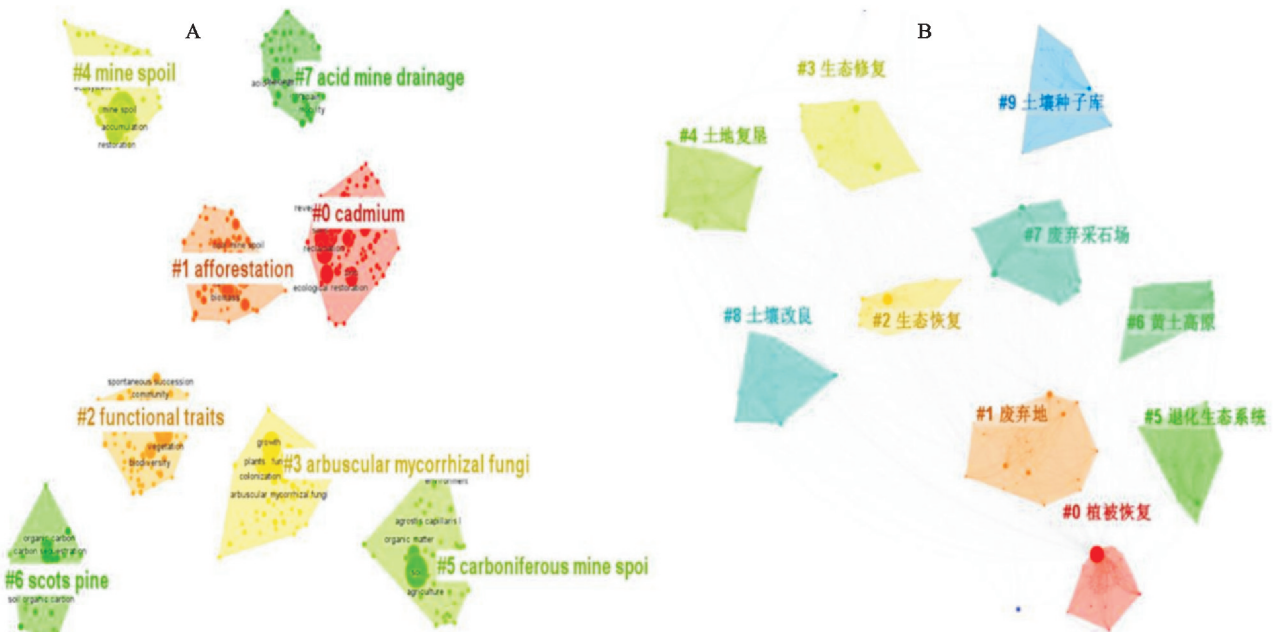


图 4 WoS 数据库关键词聚类图(A)和 CNKI 数据库关键词聚类图(B)

Fig. 4 WoS and CNKI database keyword clustering graph

在 CNKI 数据库中, #0 聚类为“植被恢复”, 关键年份为 2012 年, 是该领域最早出现的聚类团, 聚类中心度为 0.85, 聚类频次为 84, 其中包括“土壤有机碳”“物种配置”等聚类词。#2 和 #3 分为“生态修复”和“生态恢复”, 矿山废弃地是这两者之中的高频聚类, 研究者们对不同植被配置模式下废弃地土壤有机碳及其组分的变化, 利用土壤微生物碳的敏感性, 作为土壤质量变化的变化指标, 通过实地试验探究出适合废弃地植被恢复的配置模式。#1 和 #7 分别为“废弃地”和“废弃采石场”, 其中, 土壤理化性质、土壤养分、多样性是这两者的高频聚类词, 研究者们对废弃

地土壤养分和植被进行调查, 通过对废弃地土壤理化性质及多样性的分析, 进行土壤质量综合评价, 探寻土壤养分对植被恢复的影响。#4 为“土地复垦”, 其中高频关键词为重金属污染和基质改良, 研究者们利用超富集植物提取法, 通过工程措施和植物修复将重金属从土壤中去, 以削减土壤中重金属总量; 或利用化学和生物等方法, 降低土壤中重金属生物有效性及迁移性, 从而降低污染风险^[16]。#5 为“退化生态系统”, 其中的高频聚类为弃耕地和恢复生态学, 废弃地植被演替的研究是恢复生态学研究动力, 而恢复生态学是作用在废弃地的研究中形成并获得发展, 研究

者们通过分析演替过程中植被和土壤间的相互关系,揭示最佳的植被恢复模式^[17]。#8的聚类为“土壤改良”,生态重建、边坡治理、采矿废弃地是其中的高频聚类,关键年份为2013年,聚类中心度为0.852,聚类频次为34。研究者通过分析废弃地的植被和土壤情况,提出适合该废弃地的土壤改良方案,进行植被恢复相关试验,为复垦选择合适的树种,分析改良方案的可行性,为土地复垦提供科学的指导。#9为“土壤种子库”,土地利用是其中的高频聚类,研究者们通过不同的土地利用类型来探究在植被恢复时土壤种子库的特征关系。

在图4WoS数据库中,#0聚类为cadmium(镉),关键年份为2004年,聚类中心度为0.644,聚类频次为94。其中的高频聚类为重金属污染,污水污泥等。研究者通过研究不同植物对水体中重金属的吸收量,因地制宜选取合适的植物作为当地生态修复的物种^[18]。#1为afforestation(植树造林),其中的高频聚类为煤矿弃土,关键年份为2009年,聚类中心度为0.643,聚类频次为68。#2为functional traits(功能特征),其中的高频聚类为演替、物种丰富度、生态系统服务,研究者通过研究演替过程中物种丰富度的变化规律,提出利于提高植物多样性的演替模式进行研究,对生态系统服务价值进行分析评估^[19-20]。#3为arbuscular mycorrhizal fungi(丛枝菌根真菌),其中的高频聚类为丛枝菌根,丛枝菌根真菌最早是用于向矿山固体废弃物中引入微生物,促进根瘤菌和菌根的生成,从而促进植物生长、固定废弃物和加速废弃物风化成土^[21-22]。在聚类#4 mine spoil(矿山废弃地)和#5 carboniferous mine spoil(石炭纪山废弃地)及#7 acid mine drainage(酸性矿井排水)中,土壤类型和土地复垦是他们中的高频聚类词,废弃地土地复垦的前期工作通过选取适当的土壤类型,进而构建合理的评价模型,基于最小限制因子法与综合指数模型法,评价废弃地土地是否能够进行复垦,通过模型评价的结果为土地复垦提供合理的复耕模式,实现废弃地的再次利用,促进生态环境的可持续发展^[23-24]。#6为scots pine(欧洲赤松),其中的高频聚类词为生物量和重金属,关键年份为2011年,聚类中心度为0.813,聚类频次为42,研究者通过研究具有较强的富集重金属能力和较高金属耐受植被对重金属的吸附规律,为重金属污染地的修复提供科学的方案指导^[25]。

2.4 关键被引文献作者分析

图5展示了1977—2022年废弃地植被恢复研究领域的高被引文献的共现图。R Core Team, MenchM, Kompala-Baba A, Ahirwal J, Lebrun M等文献都属于具

有高被引频次的文献的被引枢纽节点。Ahirwal J^[26]通过研究复垦土地的时间依赖性发现废弃地土壤质量和固碳能力的变化规律,根据土壤有机碳、速效氮和土壤CO₂通量随着植被年限的增加而变化来评价矿区土壤质量。随着时间的推移,矿区土壤质量有所改善。经过14a的植被恢复,矿区土壤有机碳和氮库的恢复与参考样地相当,为后续的植被恢复发展和实地研究奠定了重要的方法论和实践基础。Kompala-Baba A^[27]利用典型对应分析(CCA)方法研究发现在石料上形成的样地具有最高的物种丰富度和多样性指数、Simpson指数和even指数,为领域内的研究提供了重要的方法参考。Sangeeta Mukhopadhyay^[28]采用主成分分析方法建立了矿区土壤质量指数(MSQI)用于评价矿区复垦进度。通过评估土壤的理化和生物学特征,实现了矿区土壤的可持续复垦,并得出了MSQI随年限增加而增加。同时较大的MSQI值说明土壤具有较高的质量,通过对比复垦过程中MSQI值的变化,能更好地反映土壤的复垦状况的结论。Feng Yu^[29]提出考虑应从地貌重塑、土壤重建、水文稳定、植被恢复和景观重建这5个阶段来构建一个综合系统用于植被恢复,以上研究成果为植被恢复的发展提供了重要的评估体系和方法论。

国内一些早期研究者,如周国逸等^[30]通过进行生态恢复研究,探索生态系统产生退化的原因,我国许多科研人员在此基础上开展了一系列有关恢复生态学的研究。例如,杨修对德兴铜矿植被恢复进行研究,建立不同的植被恢复模式,分析了矿区土壤质量影响因子和主要植被类型,阐述了植被恢复中优良先锋植物和土壤改良的重要性,推动了废弃地植被恢复研究的发展^[31]。彭少麟提出采矿地的生态重建应以恢复生态学为理论基础,使用物理化学的方法对废矿地生态系统中的污染进行消除,并强调化学改良和有机废物利用的重要性,为国内植被恢复工作奠定了基础^[32]。

2.5 关键词突现分析

通过对关键词的突现分析,可以清楚地了解某研究领域在某一阶段的研究热点和发展趋势。图6为WoS与CNKI数据库中废弃地植被恢复研究的关键词突现分析。

WoS数据库关键词突现分析表明在生产建设项目废弃地植被恢复研究的初期,研究聚焦于真菌、矿山弃土、可利用性、植被重建污水污泥等,这些关键词对应了聚类分析的研究内容。随着研究的深入,关键词变为了锌、铜、毒性、尾矿、植物、生物多样性等关键词,因为随着研究的深入,研究者们总结出了在生产建设过程中影响土壤质量和植被的生长的重要因素,

矿、生物量、铁尾矿、植被恢复模式等,这些关键词能够进一步说明不同植被恢复模式对土壤质量的影响得到重视,研究者们通过研究演替过程中不同植被与土壤质量间的相互作用,分析得出影响植被恢复的关键因子,为生态恢复提供可行的植被恢复模式。同时,对修复技术及生态效益也开始深入研究。近年来,出现了土壤改良、规划设计、景观设计、生态修复等关键词,预示着未来的整体发展方向。其中,生态修复关键词的突现强度最高(9.94,2016—2022),表明当前热点正朝着生态修复与改善环境方向发展,加快了生态恢复评价体系的完善,在进行生态修复的同时也开始重视景观的设计,为生态系统的保护做出长远规划,推动了生态系统服务的发展。

3 结论与展望

(1) 国内外废弃地植被恢复的相关研究逐渐增加,年发文量增速放缓并逐渐趋于稳定。国外的研究力量主要集中于印度、美国以及英国为首的欧洲等国相关研究机构,国内的研究以中国科学院、北京林业大学等机构为主导。该领域在国际各大期刊的发文量较多,说明植被恢复领域受到了国际高水平期刊的关注。

(2) 植被演替是一个长期的过程,需要一定年限的恢复周期才能实现,目前的研究多为短期试验,鲜有针对大范围下整个恢复过程的研究。此外,恢复后形成的生态系统不够稳定,在生态恢复质量评价体系方面还需要得到重视,制定严格的施工管理制度的同时还要建立规范且科学的恢复观测和评价体系,同时考虑环境综合因素对植被恢复的影响。

(3) 通过对国内外关键词聚类图和关键词突现分析发现,全面重建生态系统功能的研究还不完善,在生态修复时考虑生态和景观综合效益会成为未来的研究热点,可以推测未来的研究将重视生态系统服务、景观设计等方面,相关技术的应用方式将随学科间的交互和领域间融合不断创新。

参考文献(References):

[1] 王向荣,任京燕.从工业废弃地到绿色公园:景观设计与工业废弃地的更新[J].中国园林,2003,19(3):11-18.
Wang X R, Ren J Y. From industrial wasteland to green park[J]. Journal of Chinese Landscape Architecture, 2003,19(3):11-18.

[2] 张应红,文志岳.矿山环境综合治理政策研究[J].中国矿业,2002,11(6):57-60.
Zhang Y H, Wen Z Y. Study of policy for environmental protection in mining areas[J]. China Mining Maga-

zine, 2002,11(6):57-60.

[3] 孙庆先,胡振琪.中国矿业的环境影响及可持续发展[J].中国矿业,2003,12(7):23-26.
Sun Q X, Hu Z Q. Negative influences on environment quality and sustainable development of mining industry in China[J]. China Mining Magazine, 2003,12(7):23-26.

[4] Palmer M A, Hondula K L, Koch B J. Ecological restoration of streams and rivers: Shifting strategies and shifting goals[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2014,45:247-269.

[5] Rodrigo M A. Wetland restoration with hydrophytes: A review[J]. Plants, 2021,10(6):1035.

[6] 左寻,白中科.工矿区土地复垦、生态重建与可持续发展[J].中国土地科学,2002,16(2):39-42.
Zuo X, Bai Z K. Land reclamation, ecological restoration and sustainable development for area of mining and project construction[J]. China Land Science, 2002,16(2):39-42.

[7] 杨恒,张文清.实景三维重建与BIM技术在露天矿山生态修复中的应用实践[J].能源与环保,2023,45(8):51-55.
Yang H, Zhang W Q. Practical application of real scene 3D reconstruction and BIM technology in ecological restoration of open-pit mines[J]. China Energy and Environmental Protection, 2023,45(8):51-55.

[8] 乔欧盟,陈璋.矿区不同类型生态护坡工程植物多样性对环境因子的响应[J].应用生态学报,2022,33(3):742-748.
Qiao O M, Chen Z. Plant diversity on different types of slope ecological engineering and its responses to environmental factors in mining areas[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022,33(3):742-748.

[9] Li S Q, Liber K. Influence of different revegetation choices on plant community and soil development nine years after initial planting on a reclaimed coal gob pile in the Shanxi mining area, China[J]. The Science of the Total Environment, 2018,618:1314-1323.

[10] 谭桂清.阜新矿区废弃地植被恢复研究进展及对策[J].吉林林业科技,2016,45(1):51-53.
Tan G Q. Research progress and countermeasures of vegetation recovery in Fuxin mining waste land[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2016,45(1):51-53.

[11] Wang G F, Li S, Zhang Z H, et al. A visual knowledge map analysis of cross-border agri-food supply chain research based on CiteSpace[J]. Sustainability, 2023,15(14):10763.

[12] Liu C, Yuan Y, Zhou A H, et al. Development trends and research frontiers of preferential flow in soil based

- on CiteSpace[J]. *Water*, 2022,14(19):3036.
- [13] Liu Y, Wang Z J. Research progress and hotspot analysis of urban heat island effects based on cite space analysis[J]. *Land*, 2023,12(6):1154.
- [14] Xue W Z, Li H, Ali R, et al. Knowledge mapping of corporate financial performance research: A visual analysis using cite space and ucinet[J]. *Sustainability*, 2020,12(9):3554.
- [15] Liu Z G, Yin Y M, Liu W D, et al. Visualizing the intellectual structure and evolution of innovation systems research: A bibliometric analysis[J]. *Scientometrics*, 2015,103(1):135-158.
- [16] 储昭霞.煤矸石协同植物对铜尾矿改良的效果与作用机制研究[D].安徽淮南:安徽理工大学,2020.
- Chu Z X. The Effect and Mechanism of Coal Gangue Combined with Plants on the Improvement of Copper Mine Tailings[D]. Huainan, Anhui: Anhui University of Science & Technology, 2020.
- [17] Cao S X, Chen L, Shankman D, et al. Excessive reliance on afforestation in China's arid and semi-arid regions: Lessons in ecological restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2011,104(4):240-245.
- [18] Wu Y J, Tian X, Wang R Z, et al. Effects of vegetation restoration on distribution characteristics of heavy metals in soil in Karst Plateau area of Guizhou[J]. *Peer J*, 2023,11:e15044.
- [19] Arroyo-Rodríguez V, Melo F P L, Martínez-Ramos M, et al. Multiple successional pathways in human-modified tropical landscapes: New insights from forest succession, forest fragmentation and landscape ecology research[J]. *Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society*, 2017,92(1):326-340.
- [20] Chazdon R L. Beyond deforestation: Restoring forests and ecosystem services on degraded lands[J]. *Science*, 2008,320(5882):1458-1460.
- [21] Asmelash F, Bekele T, Birhane E. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016,7:1095.
- [22] 孔静.丛枝菌根真菌对几种草本植物抗旱性的影响研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2016.
- Kong J. Research on the Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Drought Resistance of Several Kinds of Plant[D].Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology,2016 .
- [23] Crouzeilles R, Curran M, Ferreira M S, et al. A global meta-analysis on the ecological drivers of forest restoration success[J]. *Nature Communications*, 2016,7:11666.
- [24] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess area[J]. *Catena*, 2015,128:44-53.
- [25] Gupta S, Nayek S, Saha R N, et al. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory[J]. *Environmental Geology*, 2008,55(4):731-739.
- [26] Ahirwal J, Maiti S K. Assessment of carbon sequestration potential of revegetated coal mine overburden dumps: A chronosequence study from dry tropical climate [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017,201:369-377.
- [27] Kompała-Bąba A, Bierza W, Błońska A, et al. Vegetation diversity on coal mine spoil heaps-how important is the texture of the soil substrate? [J]. *Biologia*, 2019,74(4):419-436.
- [28] Mukhopadhyay S, Maiti S, Masto R. Development of mine soil quality index (MSQI) for evaluation of reclamation success: A chronosequence study[J]. *Ecological Engineering*, 2014,71:10-20.
- [29] Feng Y, Wang J M, Bai Z K, et al. Effects of surface coal mining and land reclamation on soil properties: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019,191:12-25.
- [30] 周国逸,余作岳,彭少麟.广东小良试验站降雨径流关系的一个黑箱模型[J].*生态学杂志*,1995,14(4):67-72
- Zhou G Y, Yu Z Y, Peng S L. A black box model of rainfall-runoff relationship at Xiaoliang experimental station in Guangdong Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1995,14(4):67-72.
- [31] 杨修,高林.德兴铜矿矿山废弃地植被恢复与重建研究[J].*生态学报*,2001,21(11):1932-1940.
- Yang X, Gao L. A study on re-vegetation in mining wasteland of Dexing Copper Mine, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001,21(11):1932-1940.
- [32] 彭少麟.恢复生态学与植被重建[J].*生态科学*,1996,15(2):28-33.
- Peng S L. Restoration ecology and vegetation reconstruction[J]. *Ecological Science*, 1996,15(2):28-33.
- [33] 束文圣,张志权,蓝崇钰.中国矿业废弃地的复垦对策研究(I) [J].*生态科学*,2000,19(2):24-29.
- Shu W S, Zhang Z Q, Lan C Y. Strategies for restoration of mining wastelands in China(I) [J]. *Ecologic Science*, 2000,19(2):24-29.