

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

高云峰^{1,2}, 徐友宁¹, 祝雅轩³, 张江华¹

GAO Yunfeng^{1,2}, XU Youning¹, ZHU Yaxuan³, ZHANG Jianghua¹

1. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西 西安 710054;

2. 长安大学地球科学与资源学院, 陕西 西安 710064;

3. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071

1. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

3. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao 266071, Shandong, China

摘要: 矿山生态环境修复作为生态文明的“绿水青山”建设的重要举措, 受到越来越多学者的关注和参与。为了厘清近20年来中国矿山生态环境修复工作的热点、阶段性研究前沿、目前的研究进展, 以及预测未来的研究方向, 以中国知网(CNKI)为数据源, 采用文献计量学方法结合VOSviewer和CiteSpace两款可视化分析软件, 定量分析了2000—2018年发表的相关文献。结果表明, 近20年间, 矿山生态环境修复领域研究成果主要以期刊杂志形式发表, 且发文量随着年份增加呈显著增长趋势; 通过VOSviewer对关键词进行“共现”分析, 发现“土地复垦”、“生态补偿与保证金”、“植物修复重金属污染”、“地质灾害治理”、“绿色矿山与矿山公园建设”等主题词是该领域的热点研究方向; 利用CiteSpace特有的时区图谱分析及实现关键词统计功能, 发现中国矿山生态环境修复工作经历了3个研究阶段, 内涵不断丰富和发展。多技术融合开展矿山土地复垦与地质灾害治理, 矿区水土污染源控制与治理技术研发、应用集成示范, 因地制宜的生态修复技术及绿色矿山、矿山公园建设将是未来矿山生态修复领域的研究热点。

关键词: 矿山地质环境; 生态环境修复; VOSviewer; CiteSpace; 文献计量

中图分类号: P5; X14 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2018)12-2144-10

Gao Y F, Xu Y N, Zhu Y X, Zhang J H. An analysis of the hotspot and frontier of mine eco-environment restoration based on big data visualization of VOSviewer and CiteSpace. *Geological Bulletin of China*, 2018, 37(12):2144-2153

Abstract: Mine ecological environment restoration is an important measure for the construction of ecological civilization, and hence it has attracted more and more attention and interest among geologists. In order to clarify the hot topics of the restoration of the eco-environment in China's mines in the past 20 years, the frontiers of the historical stage, and the current research progress so as to forecast future research directions, the authors used CNKI as the data source, and employed bibliometrics method and VOSviewer and CiteSpace visual analysis software to quantitatively analyze the relevant documents published in the period of 2000—2018. The results show that, in the past 20 years, the research achievements in the field of mine eco-environment restoration have mainly been published in the form of journals, and the number of documents issued has increased significantly year by year. The key words of "land reclamation", "eco-compensation and deposit", "phytoremediation of heavy metal pollution", "geological disaster management" and "green mine and mine park construction" are the hot research fields through the "co occurrence" analysis of the key words by VOS-

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-06-20

资助项目: 中国地质调查局项目《青海矿业开发地质环境效应调查》(编号: 1212011220224)、《秦岭及宁东矿产资源集中开采区地质环境调查》(编号: DD20160336)和自然资源部行业科研专项《矿集区地球化学环境累积效应及预警研究》(编号: 20111020)

作者简介: 高云峰(1992-), 男, 在读硕士生, 从事矿山地质环境、环境地球化学研究工作。E-mail: 757917819@qq.com

通讯作者: 徐友宁(1963-), 男, 博士, 研究员, 从事矿山地质环境调查与研究。E-mail: 948477575@qq.com

viewer. Using CiteSpace's unique time zone map analysis and highlighting key statistics functions, the authors found that China's mine eco-environment restoration has gone through three phases, and its connotation has been continuously enriched and developed. Multi-technical integration for carrying out mine land reclamation and geological disaster management, water and soil pollution source control and treatment technology research and application integration demonstration, ecological rehabilitation technology adapted to local conditions, and the construction of green mines and mine parks will be the research hotspots in the field of mine rehabilitation in the future.

Key words: mining geo-environment; eco-environment restoration; VOSviewer; CiteSpace; bibliometric analysis

矿山开采活动影响范围内,存在着山水林田湖草等多重自然资源,是人类赖以生存与发展的宝贵资源库。“开发金山银山,保护绿水青山”的生态文明建设,对矿山生态环境保护和修复提出了更高的要求。由于历史认知的原因,不合理的矿产资源开发常常造成矿区资源损毁,诱发地质灾害,污染水体、土壤等一系列生态环境问题^[1]。部分矿山地质环境问题,甚至严重恶化当地的生态环境,影响周围居民的日常生活,制约经济的可持续发展。针对这些问题,开展矿山生态修复工作,改善矿区生态条件,促进矿区绿色发展、可持续发展显得尤为重要,具有现实意义。

研究国内前人已发表的科研成果,分析当前研究现状和存在的技术问题,对于厘清某一学科的发展脉络,宏观把握学科走向,洞悉未来热点研究方向等科研工作具有重要意义。文献研究的方法众多,其中科学计量学与信息计量学技术近年来迅速发展,为论文数据可视化研究提供了可靠的途径^[2],同时也弥补了传统文献综述研究参考文献量少、只能定性归纳和分析、结论和建议受研究人员自身水平高低影响大、客观性较弱等不足。知识图谱是近几年兴起的文献分析手段,相对于以阅读、总结、定性探讨为主要流程的综述类文献的传统研究方法,知识图谱软件具有处理文献量大、直观可视化、分析角度多样、数据分析结果可信度高等优势特点。通过大量文献处理与可视化分析,梳理某一学科领域的期刊、科研人员、机构、发文量等关键情报,总结历史热点研究方向、预测未来研究方向等是其特有功能。国内最早开展知识图谱应用研究的学者大多来自于信息情报领域,以及高校图书馆等机构。如宗乾进等^[3]利用可视化工具VOSviewer对中国知网中收录的13种图书馆学CSSCI来源期刊文献信息进行挖掘,可视化展示2010年中国图书馆学研究热点主题及其脉络联系。王晰等^[4]以1997—2017年Web of Science数据库收录的585篇知识可

视化研究文献为数据基础,整合VOSviewer和CiteSpace两个文献计量可视化软件的优势,采用共被引分析、引文分析、共词分析等方法分析探究了1997—2017年知识可视化领域的整体演进路径、研究热点与前沿。近年来,也有学者将这一方法应用到生态环境等领域。吴同亮等^[5]基于文献计量学方法,结合CiteSpace软件,分析了2016年国内外土壤学及环境科学领域中与土壤有关论文的关键词,揭示了2016年环境土壤学的研究热点和方向,其结果在一定程度上反映了农业环境科学领域关注的一些重点问题。王玉军等^[6]利用文献计量学方法,结合CiteSpace软件分析了近25年来国内外土壤重金属元素污染评价相关领域的研究热点和发展方向的演进,发现人体健康及生态风险评价、重金属元素在土壤中的形态分析、污染源解析等问题受到较广泛的关注。

本文以中国知网为数据来源,以VOSviewer和CiteSpace可视化软件为研究工具,同时结合文献计量法,对2000—2018年中国矿山生态修复方面的文献进行统计与可视化分析。以期用定量化、可视化的手段,梳理近20年间该领域的研究热点及阶段性前沿方向的演变脉络,旨在为矿山生态环境修复领域的相关研究提供参考。

1 数据与方法

1.1 数据来源

本文数据来源于中国期刊CNKI全文数据库。以主题为检索项,以“矿山(区)生态修复”、“矿山(区)恢复”、“矿山(区)整治”、“矿山(区)治理”为检索词,以精确匹配的方式对主题进行检索,检索范围为全部期刊,时间范围为2000—2018年,检索日期为2018年4月28日。共检索获得文献1809篇,剔除其中无作者的期刊72篇、与主题无关的期刊169篇、重复期刊1篇,最终剩余1567篇文献作为本文研究的基础数据。

1.2 研究方法

绘制知识图谱的软件工具目前有很多种,使用较广泛的有 CiteSpace、UCINET、VOSviewer 和 Global maps of science 等^[7]。本文主要采用其中的 VOSviewer(version 1.6.7 版本)和 CiteSpace(5.1.R8. SE 版本)两款软件。前者由 Nees Janvan Eck 和 Ludo Waltamn 合作开发,是一款免费的文献计量分析与可视化软件^[8],在“共现”网络聚类以及密度分析方面功能强大。CiteSpace 由美国德雷塞尔大学陈超美博士联合大连理工大学开发,该软件是一种基于 Java 环境的引文网络分析与可视化“共引”分析工具^[9-10],主要用于科学文献数据计量、分析和识别,以及科学发展新趋势和新动态的显示^[11]。本文综合运用 VOSviewer 和 CiteSpace 软件对 1567 篇文献数据进行可视化分析及知识图谱绘制,直观展现国内矿山生态修复工作总体研究方向、热点及各历史阶段的前沿方向。同时结合文献计量法进行文献数据挖掘,借助文献管理软件 Endnote X7、统计软件 Excel 及绘图软件 Origin2017 对文献的类型、数量、合作发文情况、高频关键词等进行分析与表达。

1.3 数据处理

检索出的基础数据,通过中国知网的文献导出格式选项,选择 Refworks 格式导出到 CiteSpace 中,通过 CiteSpace 的格式转换功能,转换成软件能识别、分析的格式。选择 EndNote 格式的数据,导出到 EndNote X7 中,进行年度发文数量、合作发文量及高频关键词统计。通过 EndNote X7 的文献题录导出功能,将基础数据导出成 RIS 格式,以方便 VOSviewer 软件对其进行识别和分析处理。为了更好地显示分析结果,对主题词进行整理;通过 VOSviewer

和 CiteSpace 软件自带的主题词剔除及合并功能,将意思接近的主题词进行合并处理,同时剔除对聚类分析起干扰作用的检索词。

2 文献计量学分析

2.1 文献类型

通过分析文献类型可以清晰地了解矿山生态修复领域的研究成果主要通过哪些发表形式来体现。按照文献类型划分,1567 篇基础文献中,期刊文章数量最多,有 873 篇,占全部文献的 55.71%;其次是学位论文,共计 544 篇,占比 34.72%;再次是 105 篇会议论文和 45 篇专利,分别占比 6.7%和 2.87%(图 1)。由此可知,中国矿山生态修复研究成果主要发表在各类期刊杂志中;学位论文占比 34.72%,超过 1/3,说明国内很多研究生培养高校、科研院校将矿山生态修复作为人才培养的重要方向;位居第三位的会议论文从数量看,年均发文量约为 5 篇/年,说明在相关学术会议交流中,矿山生态修复也是众多学者交流的热点话题之一;占比最少的专利文献,年均产出率约为 2 件/年,说明该领域的发明、创新水平较低,也可能与学者们对专利的重视程度不够有关。

目前,对基金论文能否准确反映论文的水平高低尚有争议,但是是否具有基金支持,对论文的分类统计具有一定意义^[12]。排除专利文献 45 篇,剩余 1522 篇文献中,得到省级和国家级基金支持的论文共 332 篇,占比 21.81%;无基金支持的论文 1190 篇,占比 78.19%(图 2)。这表明,矿山生态修复研究受到省市、国家层面的基金资助比重较低,领域内较高比重的成果来自生产单位。

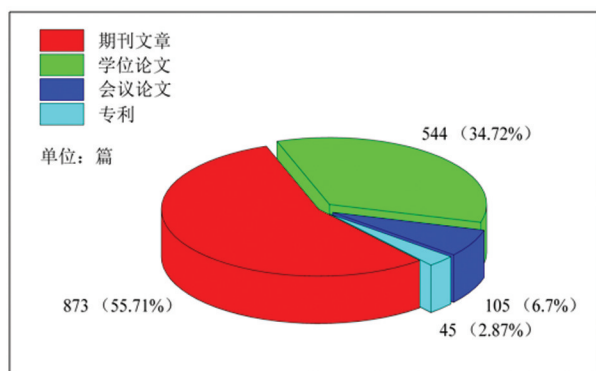


图1 矿山生态修复文献类型

Fig. 1 Literature types of mine ecological restoration

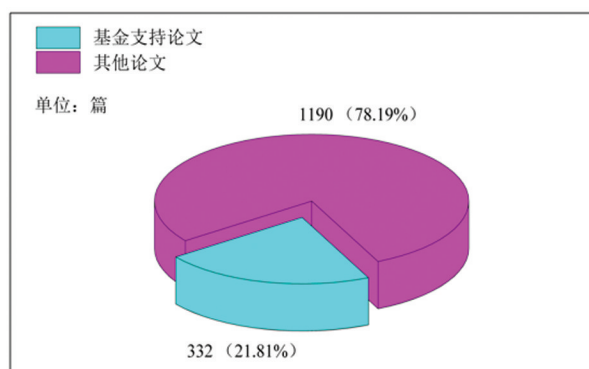


图2 基金论文数量与比重

Fig. 2 The quantity and proportion of fund papers

2.2 文献数量与年度分布

根据文献计量学理论,文献数量的年代分布统计可以在一定程度上反映出该领域的研究水平和发展程度^[13-14]。如图3所示,矿山生态修复文献数量随年份增加呈增长态势,且增长趋势符合线性回归模型。说明近20年来,矿山生态修复越来越受到关注,国内学者在该领域的工作不断加强、加深,科研成果数量逐年递增。2000—2018年,矿山生态修复研究大致可以分为以下2个发展阶段。

(1)2000—2007年,年度发文低于50篇/年,且增长速率缓慢,说明该阶段为中国矿山生态修复研究的发展起步期,政府管理者和学者们对矿山生态修复重要性认识不够,对该领域的关注和投入都较少。在此期间,中国先后修订、出台了《土地复垦规定》《土地管理法》《地质灾害防治条例》等;各省市相继出台了土地复垦保证金制度^[15];2006年国土资源部等七部委联合发布了《关于加强生产建设项目土地复垦管理工作的通知》,标志着生态修复与复垦工作正式进入到矿山开采许可、用地审批等办理的程序中^[16]。以上法律法规的出台,有力地推动了中国矿山生态修复的研究。

(2)2008—2017年,年度发文量快速增长,其中2016年发文量接近200篇,说明该阶段为中国矿山生态修复研究的中高速发展期。这一显著进展离不开国家相关政策、法规的支持,2007年中国颁布了《环境影响评价法》,2008年和2009年相继出台了《国家环保部关于加强土壤污染防治工作的意见》

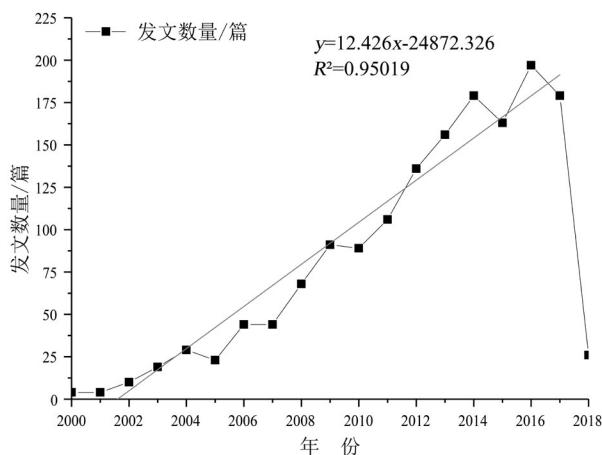


图3 2000—2018年矿山生态修复文献数量年度分布

Fig. 3 Annual distribution of documents of mine ecological restoration from 2000 to 2018

和《矿山地质环境保护规定》,对矿山生态环境保护和治理恢复提出了明确的目标和要求^[17]。

2.3 合作发表的文献统计

排除学位论文,剩余的1023篇文献中,独立撰写的文章为382篇,占比37.34%;合作撰写的文章为641篇,占比62.66%(图4);合作发文作者共计2225人,篇均合作度3.47,高于国际科学论文3.25的平均水平^[18],说明本领域学者之间合作较紧密,以团队合作形式完成该领域研究较普遍。研究成果产出量较高的团队,包括中国矿业大学(北京)胡振琪团队、中国地质大学(北京)白中科团队,以及中国矿业大学(徐州)张绍良和卞正富团队。

2.4 关键词统计

关键词是揭示论文主要内容的重要方式,是研究主题的高度概括和凝练^[19],一个关键词出现的频次等于附有该关键词的学术论文的总数,关键词出现的频次越高,说明相关的研究成果数越多,研究内容的集中性就越强^[20],即从该角度可反映该领域的研究热点。使用文献管理软件EndNoteX7中的“Subject Bibliography”工具对剔除专利文献后的1522篇文献的关键词进行统计分析,频次排名前20的关键词如表1所示。

剔除与检索词意思相近的关键词,如“生态修复”、“恢复治理”、“矿山”等,同时合并意思相近的关键词,如“矿山地质环境”、“地质环境”和“矿山环境”统一为“矿山地质环境”之后,发现“矿山地质环境”是最热的关键词,频次高达292,说明矿山生态

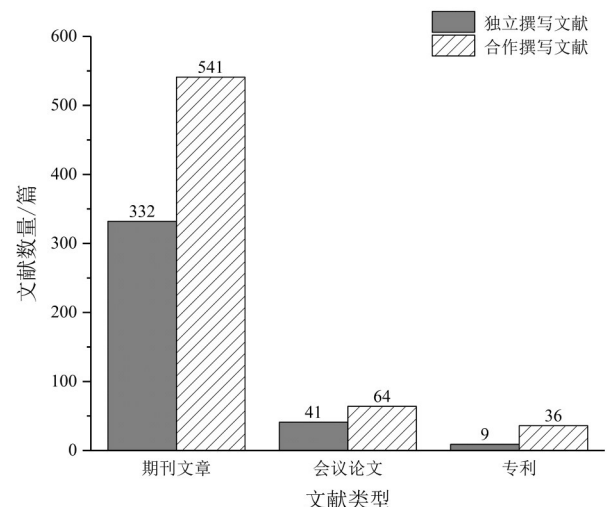


图4 合作发文数量统计

Fig. 4 Statistics of the number of cooperative documents

表1 2000—2018年矿山生态修复领域前20位的高频关键词
Table 1 The top 20 high-frequency keywords in the field of mine eco-restoration from 2000 to 2018

序号	关键词	频次	序号	关键词	频次
1	生态修复	241	11	生态补偿	51
2	恢复治理	137	12	土地复垦	48
3	矿山	134	13	地质灾害	47
4	矿山地质环境	110	14	矿产资源	42
5	地质环境	100	15	矿山废弃地	42
6	生态恢复	96	16	治理恢复	39
7	矿区	86	17	对策	33
8	矿山环境	82	18	环境保护	33
9	生态环境	80	19	重金属	32
10	治理	51	20	可持续发展	31

修复研究与矿山地质环境研究间存在密切的联系,开展矿山生态修复工作离不开矿山地质环境调查、评价等工作的支撑和协助,后者是前者的基础和前提。排第二的关键词“生态补偿”,说明有很多学者从经济、管理、法规政策的角度研究矿山生态修复问题。

对除去专利文献后的1522篇含有关键词信息的文献进行处理,导入到VOSviewer中,运用其关键词“共现”功能,以彩色网络标签视图的形式展现出来(图5)。图中节点圆圈越大,表示其关键词词频越大,即为热点研究内容;节点圆圈位置越接近中心,表示其所代表的关键词重要性越强,即为该领域的重要概念;节点圆圈之间越接近,说明二者共同出现在同一篇文献中的次数越多;连接2个节点的灰线越粗,也说明二者同时出现次数越多;同一种颜色的节点表示同一个聚类,即同一类研究主题(表2)。从图5可以明显看出,节点“生态修复”、“矿

山”、“生态环境”无论是大小还是位置,都具有突出优势,说明是本领域的重要概念。“矿山地质环境”、“土地复垦”、“地质灾害”、“重金属”等是本研究领域热点或重要的研究方向。

3 研究热点及阶段性前沿分析

3.1 研究热点

VOSviewer除具有标签视图分析功能外,还具有强大的密度视图功能(图6)。密度视图中,从冷色调(蓝色)到暖色调(红色)表示关键词共现的频次越来越高,即研究主题的热度越来越高^[2]。

综合图6和表2可以看出,“土地复垦”、“生态补偿与保证金”、“植物修复重金属污染”、“地质灾害治理”、“绿色矿山与矿山公园建设”等主题词是本领域的热点研究方向,亦即中国近20年矿山生态修复研究的热点领域。

3.1.1 土地复垦

土地复垦是国内较早开展矿山生态修复的途径和形式,是统筹矿产资源开发与土地资源保护、推动生态文明建设的重要举措^[21]。国内土地复垦工作主要针对露天煤炭开采导致的地表植被和耕土层破坏、排土场土壤重构、生态系统损毁及井下开采导致的地面塌陷、沉降等问题进行研究,侧重于矿区土地保护与恢复利用。开展土地复垦工作较早的地区是华东地区,20世纪70年代便有学者在中国东部平原煤矿塌陷区的恢复土地上尝试进行建筑、种植和养殖。1989年开始执行《土地复垦规定》,标志着中国土地复垦进入依法复垦的新阶段^[22]。国内目前复垦工程典型的矿区有平朔安太堡露天煤矿、淮南煤矿、德州邱集煤矿等。相关学者如白中科、台培东等对生态环境脆弱区矿山排土场的表土熟化、

表2 研究主题及关键词聚类

Table 2 Research topics and keywords clustering

研究主题	关键词聚类
矿区“3S”调查、评价与规划设计	GIS、可持续发展、层次分析法、模式、规划设计、遥感
土地复垦	丛枝菌根真菌、土地复垦、土地整治、排土场、煤炭开采
重金属污染植物修复与土壤改良	东南景天、土壤基质改良、土壤理化性质、植物修复、水土流失、重金属污染、镉
矿山地质灾害治理	地质灾害、影响评估、矿山环境治理、矿山地质环境问题、采煤塌陷
绿色矿山与矿山公园建设	景观再生、生态效应、生态文明、矿山公园、绿色矿山、规划、评价
生态补偿机制与保证金制度	公众参与、山西省、循环经济、指标体系、生态补偿机制、生态补偿标准保证金、法律制度、生态效益

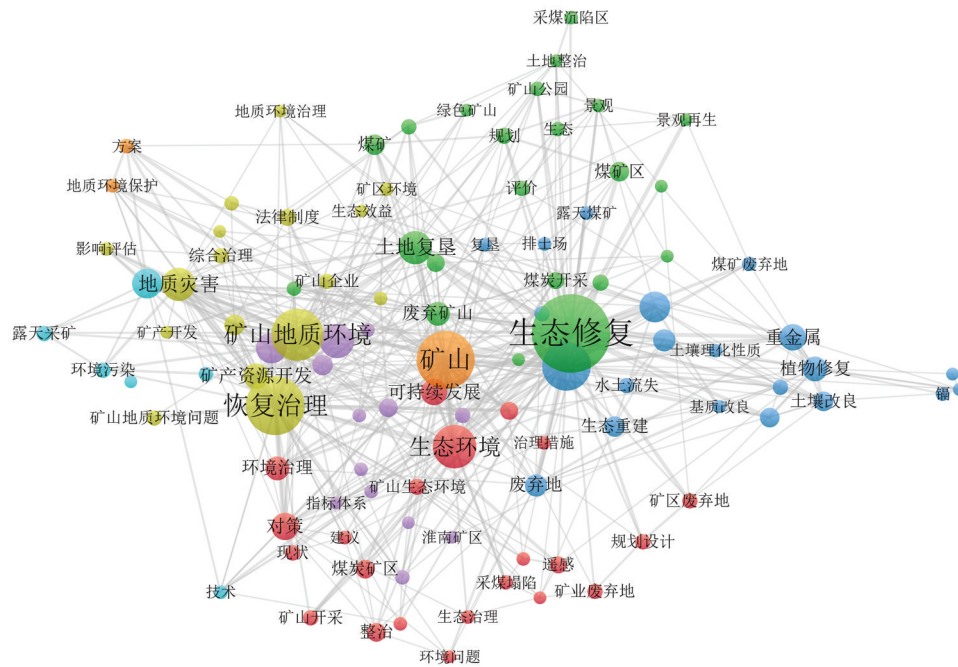


图5 2000—2018年矿山生态修复研究热点标签视图

Fig. 5 Hotspot label view of mine eco-restoration research from 2000 to 2018

植被筛选与配置进行了深入的研究,研究成果支持了矿区土地复垦工作的顺利开展^[23-25]。胡振琪团队将高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤作为研究对象,探讨定量评价复垦土壤形态发育状况,相关成果促进了复垦土壤生产力的提高和复垦技术的革新^[26]。

3.1.2 生态补偿与保证金

生态补偿目前没有统一的定义,但普遍认为生态补偿是通过经济手段对遭到破坏的生态系统进行修复,对被降低的区域生态系统服务能力予以恢复,对资源行业比重过大造成的区域可持续发展能力受损进行弥补的综合性制度安排^[27]。矿区生态修复工作进展,很大程度上取决于国家生态补偿机制及相关配套政策的设立、执行。生态补偿机制是通过计划、立法、市场等手段让资源开发的受益者向生态保护者承担责任的方式,使生态利益与责任得到合理配置,缓解资源开发与生态环境保护、受益地区与受损地区之间的矛盾,避免走“先开发,后治理”的老路^[27-28]。中国对于生态补偿制度与政策的探索始于20世纪80年代,地方矿产资源生态补偿费的征收最早始于1993年,全面建立保证金制度开始于2006年,真正确立的标志事件是2009年3

月2日中华人民共和国国土资源部令第44号《矿山地质环境保护规定》的颁布,该《规定》确立了矿山地质环境保护的原则,规定采矿权人应当缴存矿山地质环境治理恢复保证金。保证金制度由确立、全面执行到2017年财政部等三部委联合发文《关于取消矿山环境治理恢复保证金建立矿山环境治理恢复基金的指导意见》,标志着保证金制度退出历史舞台,近10年间,其内涵不断丰富,机制不断完善。相关研究主要集中在补偿资金的筹措机制、法律制度体系建立的探索、保证金使用机制、行政部门间协调规划、监督管理机制等方面。

3.1.3 植物修复重金属污染

矿业活动影响范围内的土壤、农作物、水资源污染问题由来已久。媒体对广东上坝癌症村、湖南镉大米事件的相继报道,使重金属污染成为公众关注的焦点问题。因土壤重金属污染具有隐蔽性、累积性与不可逆性的特点,使土壤污染修复工作异常困难。近年来,研究人员利用植物修复技术开展重金属污染土壤研究,已经取得了一定的成果,试验尺度由室内盆栽实验发展成田间大面积技术集成示范^[29-30]。由表2和图6可知,目前研究最热的重金属污染元素是Cd,如胡振琪等^[31]通过等温吸附试

验,研究了粘土矿物膨润土、海泡石、凹凸棒石对 Cd^{2+} 有很好的吸附作用。赵宇鹄^[32]通过对粤北大宝山多金属硫化物矿区尾矿砂、废渣、河水、选冶废水、尾矿库排水、土壤、可食用植物等样品的室内实验分析,建立矿山区域中Cd的迁移、生物富集和食物链传播途径。研究较深入的植物是东南景天,如叶海波^[33]以东南景天(*Sedum alfredii* Hance)为试验材料,采用盆栽和大田试验的方法,在Pb、Zn、Cd三种元素复合污染条件下,系统研究了超积累生态型东南景天耐重金属胁迫、吸收和积累Zn、Cd、Pb的特性。熊愈辉^[34]通过水培、盆栽、大田等系列试验,探讨了矿山生态型东南景天对镉的耐性机制,同时对这种植物提取土壤镉的调控途径进行了探索,为修复重金属污染土壤提供一定的理论和技术支持。

3.1.4 矿山地质灾害治理

本主题主要研究山地、丘陵地区矿山开采导致的崩塌、滑坡、泥石流、塌陷等地质灾害的治理、规划和设计;尾矿库、排土场选址;矿坑透水、突水、深部岩爆、矿震等突发事件的应急处理处置;煤炭矿山开采导致地裂缝、地面沉降、地面塌陷、井巷透水等问题的治理研究^[35-37]。中国地质灾害治理研究工作起步较早,积累了一定的技术方案和工程经验,地质灾害治理措施较成熟。乔冈等^[38]通过收集全国典型矿山地质环境治理成果资料,分析了不同煤矿山采煤塌陷地质灾害表现形式及相应治理思路,结合采煤塌陷区形成规模、发育特征,就采煤塌陷区是否容易形成积水的情况,总结出2种不同的治理模式。徐友宁等^[39]遵循相似性原理,采用缩尺结构,以小秦岭金矿区采矿堆排的废渣为物源进行直斜式模拟起动试验,探讨了影响和控制矿渣型泥石流起动的颗粒级配、底床坡度、临界水量等主要因子之间的定量关系。吕义清^[40]以太原西山矿区为例,分析了各种煤矿地质灾害的形成特点及其环境效应,为煤矿地质灾害的研究及治理提供依据。

3.1.5 绿色矿山与矿山公园建设

绿色矿山与矿山公园建设主题相关的研究内容有景观再生、生态效应、生态文明、规划与评价等。“生态文明建设”是本主题研究的政策环境背景,是国家大力支持的研究方向^[41];“规划”、“评价”是建设工作的重点环节及前期条件。开展绿色矿山和矿山公园建设首先要对矿区现状进行评价,对矿山功能区进行科学合理的规划、设计;“生

态效应”是绿色矿山与矿山公园建设全过程需要牢固树立的观念,是工作开展好与坏的重要评价指标,生态效应良好,矿区环境向着改善的方向发展;“景观再生”是绿色矿山与矿山公园建设的重要方向,在保护现有的景观生态环境的基础上,加大力度通过空间布局设计,融入自然、生态、多样化、艺术等理念,以人为本、因地制宜地开展景观生态改造,同时注意景观再生的整体性、连续性和功能性^[42-43]。

3.2 阶段性前沿分析

VOSviewer关键词共现密度图只能定性地展现矿山生态修复研究热点,无法体现其时间变化规律,而CiteSpace的关键词突现分析功能则可以定量地表示出不同研究热点的热度及其时间变迁规律^[2]。CiteSpace软件有时区视图和突变词探测功能,其绘制出的图形可以形象地展现研究热点随着时间变化而发生的演变,直观地展示出研究前沿之间的交互关系和演进路径^[44]。突变词是指短时间内使用频率骤增的关键词,可以表征研究前沿的发展趋势,突变词的突变率则表现了该词短时间内使用频率骤增的强度^[45]。本文利用CiteSpace的这一特有功能,对基础数据进行处理:将时间区域确定为2000—2018年,设置每一年为一个时间切片,对每个切片中突现关键词进行探测,最终得到图7和表3。分析后可以发现如下特点。

(1)2000—2007年突现关键词:土地复垦、植物修复、水土流失、矿山生态。在这一时期,生态修复、环境治理、矿山环境地质等矿山生态修复领域重要概念开始大量出现,明确了本领域研究的基本范围和主题,说明本时期是矿山生态修复研究的起步阶段。国内学者^[46-48]主要开展以工程复垦为核心、以生物复垦与生态复垦为辅助手段的矿山土地复垦研究工作。通过大量工程实践,结合国外发展趋势,提出了矿山土地复垦技术当前及今后的4个重要研究领域,即酸性矿山废弃物污染预防技术、边坡土流失防治技术、土壤重构与培肥技术、复垦地貌恢复与景观设计等。此外,本阶段也有学者^[49-51]开始研究植物技术修复土壤重金属污染这一方向。

(2)2008—2013年突现关键词:可持续发展、保证金、生态补偿、煤矿区治理、地质灾害等。本时期是矿山生态修复内涵进一步丰富和发展的阶段。

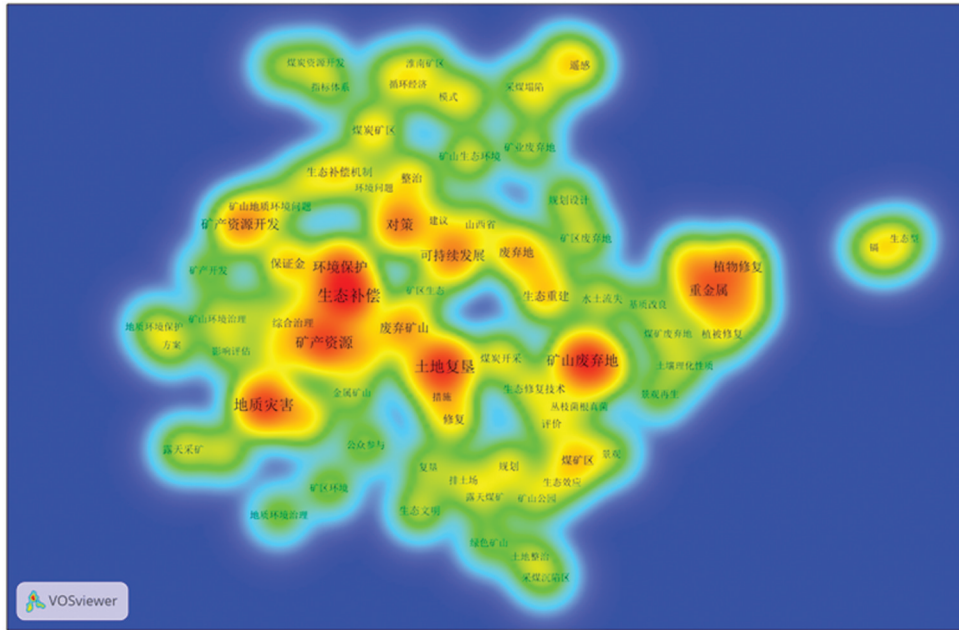


图6 关键词共现密度视图

Fig. 6 Density view of co-occurrence keywords

这一阶段内,国家相关政策、法规陆续出台,“可持续发展”理念、“生态文明建设”目标先后提出,各级政府对于生态环境问题的关注不断加强。这些因素在一定程度上促进了矿山生态修复工作的发展。地质灾害治理和保证金制度建立是本阶段重要的研究内容,前者从技术和工程角度,剖析矿区生态修复面临的自然及人为灾害问题,提出解决途径和技术方案。后者从经济、法规和管理角度,探索矿山生态修复工作的资金筹措和制度保障,从宏观层面将中国矿山修复工作面临的经济、责任问题厘清。保证金制度是提高矿区修复效率、改善矿区生态环境的有利措施。

(3) 2014—2018 年突现关键词:绿色矿山、土壤改良、景观再生、矿山公园等。本阶段矿山生态修复研究随着国家、部委相关政策法规的颁布,其内涵不断丰富和深化。尤其在 2017 年 5 月,国土资源部等五部委联合印发《关于加快建设绿色矿山的实施意见》,体现了全面推进绿色矿山建设工作的国家意志,相关方面的研究成为近期热点。贴

近自然、融入生态的观念不断加强,人们对矿山生态修复工作开启了更深的探索。黎启国等^[52]为解决国家矿山公园建设现阶段存在的诸多问题,如区域发展不平衡、矿产结构类型分布过于集中、申报建设与后续管理相脱节等,为促进国家矿山公园建设的可持续发展,提出包括重“均衡”、重“丰度”、重“监管”、重“体系”、重“保护”、重“建设”、重“收益”在内的“七重”建议。闫志刚等^[53]基于生命周期评价

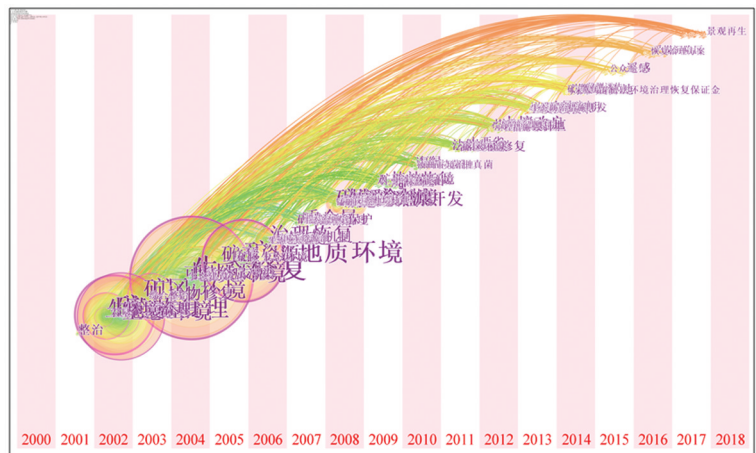


图7 前沿时区视图

Fig. 7 Frontier time zone view

表3 突现关键词
Table 3 List of burst keywords

突现关键词	突现率	起始年	终止年	2000—2018年
土地复垦	3.56	2000	2009	●●●●●●●●●●●●●●●●●●●●
植物修复	3.96	2003	2006	○○○●●●●●●●●●●●●●●●●
地质灾害	3.87	2003	2008	○○○●●●●●●●●●●●●●●●●
水土流失	3.81	2006	2010	○○○○○○●●●●●●●●●●●●
可持续发展	3.67	2008	2012	○○○○○○○○●●●●●●●●●●●
保证金	3.72	2008	2013	○○○○○○○○●●●●●●●●●●●
生态补偿	3.76	2008	2012	○○○○○○○○●●●●●●●●●●●
煤炭矿区	4.43	2011	2014	○○○○○○○○●●●●●●●●●●●
矿山公园	3.44	2012	2013	○○○○○○○○○○●●●●●●●●●
土壤改良	3.89	2015	2018	○○○○○○○○○○●●●●●●●●●
绿色矿山	3.56	2016	2018	○○○○○○○○○○●●●●●●●●●
景观再生	3.32	2017	2018	○○○○○○○○○○●●●●●●●●●

注:表中“2000—2018年”在列数据,每一O代表一年,加粗O为所在行对应的突现关键词突现的起、止年份分布

理论,对矿山建设中的污染源进行辨识,构建了符合中国国情的绿色矿山评价标准体系。同时参考绿色建筑的相关评价方法,利用层次分析法和模糊评价法,探讨了绿色矿山的评价方法。

4 结语与展望

基于文献计量法结合 VOSviewer 和 CiteSpace 的知识图谱可视化功能,发现 2000—2018 年矿山生态修复领域研究成果主要在期刊杂志上发表;受基金支持的论文数量有限,发文量随着年份增加呈显著增长;土地复垦、生态补偿与保证金、植物修复重金属污染、地质灾害治理、绿色矿山与矿山公园建设等是本领域的热点研究方向;中国矿山生态修复工作经历 3 个发展阶段,阶段性前沿热点由土地复垦发展到保证金制度设立,再到目前的绿色矿山和矿山公园建设。

未来矿山生态修复研究的重点方向:①多技术融合开展矿山土地复垦与地质灾害治理;②矿区水土污染源头控制与治理技术研发、应用集成示范;③因地制宜的生态修复技术;④涉及多种地理要素、生态要素、经济与人文要素的绿色矿山、矿山公园建设。

参考文献

[1]徐友宁. 矿山地质环境调查研究现状及展望[J]. 地质通报, 2008, 27

(8):1235-1244.

[2]李彬彬,许明祥,巩晨,等. 国际土壤质量研究热点与趋势——基于大数据的 CiteSpace 可视化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11):1983-1998.

[3]宗乾进,袁勤俭,沈洪洲. 基于 VOSviewer 的 2010 年中国图书馆学研究热点分析[J]. 图书馆, 2012, (4):88-90.

[4]王晰,辛向阳, Craig M. Vogel. 1997 至 2017 年间知识可视化研究领域文献计量分析[J]. 图书馆, 2017, (7):40-45

[5]吴同亮,王玉军,陈怀满,等. 基于文献计量学分析 2016 年环境土壤学研究热点[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2):205-215.

[6]王玉军,吴同亮,周东美,等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12):2365-2378.

[7]Chen C M. Science Mapping: A Systematic Review of the Literature[J]. Journal of Data and Information Science, 2017, 2(2):1-40.

[8]高凯. 文献计量分析软件 VOSviewer 的应用研究[J]. 图书情报导刊, 2015(12):95-98.

[9]Chen C M, Hu Z G, Liu S B, et al. Emerging trends in regenerative medicine: A scientometric analysis in CiteSpace[J]. Expert Opinion on Biological Therapy, 2012, 12(5):593-608.

[10]Chen C, Song I Y, Yuan X, et al. The thematic and citation landscape of Data and Knowledge Engineering(1985-2007)[J]. Data & Knowledge Engineering, 2008, 67(2):234-259.

[11]李彬彬,许明祥,巩晨,等. 国际土壤质量研究热点与趋势——基于大数据的 CiteSpace 可视化分析[J]. 自然资源学报, 2017, 32(11):1983-1998.

[12]张彩丽,张志转,陈娟,等. 中国土壤重金属污染植物修复研究的文献计量分析[J]. 世界农业, 2016, (1):136-140.

[13]郑礼全,胡振琪,郭相坤,等. 国内土地复垦文献的定量分析[J]. 能源环境保护, 2008, 22(3):5-8.

[14]方征. 我国小班化研究现状评估与展望——1998 年-2009 年的文献计量分析[J]. 西北师范大学学报(社会科学版), 2010, 47(4):78-82.

[15]程琳琳,付亚洁,孙海元,等. 基于 VOSviewer 的矿区土地复垦保证金制度研究综述[J]. 矿产保护与利用, 2017, (1):10-16.

[16]杨柯,成杭新,刘飞,等. 基于 Web of Science 数据库的土地复垦与生态重建文献计量学分析[J]. 中国矿业, 2015, (5):65-72.

[17]员学锋,邵雅静,侯瑞,等. 土地污染文献定量分析[J]. 干旱区地理(汉文版), 2017, 40(4):824-830.

[18]王孝宁,何苗,何钦成,等. 基于文献计量学研究方法的科技论文定量评价[J]. 科学与科学技术管理, 2004, 25(4):15-18.

[19]李珊珊,张文毓,孙长虹,等. 基于文献计量分析土壤修复的研究现状与趋势[J]. 环境工程, 2015, 33(5):160-165.

[20]安秀芬,黄晓鹏,张霞,等. 期刊工作文献计量学学术论文的关键词分析[J]. 中国科技期刊研究, 2002, 13(6):505-506.

- [21] 杨柯, 成杭新, 刘飞, 等. 基于 Web of Science 数据库的土地复垦与生态重建文献计量学分析[J]. 中国矿业, 2015, (5): 65-72.
- [22] 王镔, 白中科. 大中型矿山废弃土地复垦对策[J]. 中国煤炭, 1997, (1): 19-22.
- [23] 台培东, 孙铁珩, 贾宏宇, 等. 草原地区露天矿排土场土地复垦技术研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 90-93.
- [24] 白中科, 赵景连, 李晋川, 等. 大型露天煤矿生态系统受损研究——以平朔露天煤矿为例[J]. 生态学报, 1999, 19(6): 870-875.
- [25] 刘春雷, 王金满, 白中科, 等. 干旱区草原露天煤矿土地复垦技术分析[J]. 金属矿山, 2011, 40(5): 154-157.
- [26] 胡振琪, 李玲, 赵艳玲, 等. 高潜水位平原区采煤塌陷地复垦土壤形态发育评价[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 95-101.
- [27] 时颖. 中国油气资源开发生态补偿制度建设与思考——以陕西省为例[J]. 中国国土资源经济, 2016, 29(12): 9-13.
- [28] 葛伟亚, 李君浒, 叶念军. 我国矿山环境生态补偿机制探索[J]. 中国矿业, 2008, 17(5): 36-38.
- [29] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [30] 鲍桐, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 重金属污染土壤植物修复技术强化措施研究进展[J]. 环境科学与技术, 2010, 17(s2): 858-865.
- [31] 胡振琪, 杨秀红, 高爱林. 粘土矿物对重金属镉的吸附研究[J]. 金属矿山, 2004, (6): 53-55.
- [32] 赵宇鸷. 粤北大宝山含硫化物矿山开发的镉环境地球化学及生态效应——兼论镉在表生系统的环境地球化学表现[D]. 中山大学硕士学位论文, 2006.
- [33] 叶海波. 东南景天(*Sedum alfredii* Hance)对锌、镉、铅复合污染响应与金属积累特性[D]. 浙江大学硕士学位论文, 2003.
- [34] 熊愈辉. 东南景天对镉的耐性生理机制及其对土壤镉的提取与修复作用的研究[D]. 浙江大学博士学位论文, 2005.
- [35] 郭维君, 崔晓艳, 肖桂元, 等. 矿山地质灾害主要类型及防治对策研究[J]. 金属矿山, 2010, (8): 148-151.
- [36] 何芳, 徐友宁, 乔冈, 等. 中国矿山地质灾害分布特征[J]. 地质通报, 2012, 31(213): 476-485.
- [37] 闫国杰. 矿山地质灾害研究与防治探讨[J]. 中国矿业, 2004, 13(3): 66-68.
- [38] 乔冈, 徐友宁, 何芳, 等. 采煤塌陷区矿山地质环境治理模式[J]. 中国矿业, 2012, 21(11): 55-58.
- [39] 徐友宁, 曹琰波, 张江华, 等. 基于人工模拟试验的小秦岭金矿区矿渣型泥石流起动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(7): 1388-1395.
- [40] 吕义清. 煤矿开采诱发的地质灾害特征分析——以太原西山矿区为例[J]. 地球科学进展, 2004, 19(s1): 262-265.
- [41] 乔繁盛. 将生态文明贯穿于绿色矿山建设全过程[J]. 中国矿业, 2013, 22(1): 53-56.
- [42] 刘治保. 矿山区域生态修复与景观再生探究[J]. 美与时代(城市版), 2017(2): 44-45.
- [43] 徐庆勇. 矿山环境治理的景观再生设计研究——以北京龙世源有限责任公司采石场矿山环境治理为例[J]. 城市地质, 2015, 10(3): 18-21.
- [44] 邱均平, 马瑞敏, 程妮. 利用 SCI 进行科研工作者成果评价的新探索[J]. 中国图书馆学报, 2007, 33(4): 11-16.
- [45] Chen C, Morris S. Visualizing evolving networks: minimum spanning trees versus pathfinder networks[C]// Information Visualization, 2003. INFOVIS 2003. IEEE Symposium on. IEEE, 2009: 67-74.
- [46] 郭建一. 矿山土地复垦技术与评价研究[D]. 东北大学硕士学位论文, 2009.
- [47] 周锦华, 胡振琪, 高荣久. 矿山土地复垦与生态重建技术研究现状与展望[J]. 金属矿山, 2007, 37(10): 11-13.
- [48] 武强, 薛东. 矿山土地复垦方法类型划分研究[J]. 西北地质, 2003: 247-252.
- [49] 王英辉, 祁士华, 陈学军. 金属矿山废弃地重金属污染的植物修复治理技术[J]. 中国矿业, 2006, 15(10): 67-71.
- [50] 杨秀敏, 胡振琪, 胡桂娟, 等. 重金属污染土壤的植物修复作用机理及研究进展[J]. 金属矿山, 2008, 38(7): 120-123.
- [51] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 等. 大叶井口边草——一种新发现的富集砷的植物[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 777-778.
- [52] 黎启国, 郑伯红. 论国家矿山公园建设的可持续发展[J]. 工业建筑, 2014, 44(4): 38-39.
- [53] 闫志刚, 刘玉朋, 王雪丽. 绿色矿山建设评价指标与方法研究[J]. 中国煤炭, 2012, 38(2): 116-120.