

# 基于 CiteSpace 的重金属植物修复的知识图谱研究

郝加荣<sup>1,2</sup>, 赫 鼎<sup>1,2</sup>, 李继宁<sup>1,2</sup>, 王风贺<sup>1,2</sup>

(1.南京师范大学环境学院,江苏 南京 210023)

(2.江苏省环境风险防控与应急响应技术工程研究中心,江苏 南京 210023)

**[摘要]** 植物修复是去除重金属污染最具前景的修复手段之一。为全面了解和掌握重金属污染植物修复的研究现状以及发展趋势,检索了 2000 年 1 月 1 日—2024 年 4 月 30 日期间中国知网(CNKI)数据库和 Web of Science(WOS)核心数据库中关于重金属植物修复的相关文献,使用 CiteSpace 软件绘制重金属植物修复研究的知识图谱,从发文量、核心作者、研究机构、关键词和突现词等方面进行文献可视化分析。研究表明:自 21 世纪以来,重金属植物修复研究领域发文数量呈现增长态势,重金属植物修复正逐渐成为我国的研究热点;中国科学院土壤研究所的部分学者之间联系较为紧密,是重金属植物修复领域的核心学者;在发文机构统计方面,中南林业科技大学、南京农业大学、四川农业大学、湖南农业大学、中国科学院研究生院、西北农林科技大学、浙江大学等科研院所占据主要地位,并具有较强的影响力,但与国际研究机构相比,国内大学和研究所之间仍需强化学术交流和学术合作;重金属植物修复研究主要聚焦于土壤重金属污染,其中以生物修复、cadmium、phytoremediation 等为主要研究内容;近五年重金属植物修复研究聚焦于利用“联合修复”“生态修复”和“植物内生菌”等手段来提高重金属污染植物修复的效率,进一步促进重金属植物修复技术的发展及实际应用。此研究有助于全面了解目前我国重金属植物修复技术的研究趋势,可为重金属植物修复的研究提供一定的参考和借鉴。

**[关键词]** 植物修复,重金属,CiteSpace,知识图谱

**[中图分类号]** X173;X53 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2025)01-0045-10

## Knowledge Map of Heavy Metals Phytoremediation Based on CiteSpace

Hao Jiarong<sup>1,2</sup>, He Ding<sup>1,2</sup>, Li Jining<sup>1,2</sup>, Wang Fenghe<sup>1,2</sup>

(1.School of Environment,Nanjing Normal University,Nanjing 210023,China)

(2.Jiangsu Province Engineering Research Center of Environmental Risk Prevention and Emergency Response Technology,Nanjing 210023,China)

**Abstract:** Phytoremediation is one of the most promising remediation methods to remove heavy metal pollution. In order to comprehensively understand and grasp the current research status, as well as the development trend of phytoremediation for heavy metal pollution, this paper studies the relevant literature on heavy metal phytoremediation in the CNKI and WOS databases from January 1st, 2000 to April 30th, 2024. The study utilizes CiteSpace software to generate a knowledge map of heavy metal phytoremediation research and analyzes the literature visualization and analysis, including the number of articles issued, core authors, research institutions, keywords, and burst detection. The results show that since the 21st century, a number of publications in the field of heavy metal phytoremediation has shown an increasing trend, and that heavy metal phytoremediation is gradually becoming a hot research topic in China. The scholars from the Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences are closely connected with each other and are the core scholars in the field of phytoremediation of heavy metals. In terms of the statistics of publishing institutions, Central South University of Forestry and Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Sichuan Agricultural University, Hunan Agricultural University, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Northwest A&F University, Zhejiang University and other research institutions occupy a major position and have a strong influence. However, compared with international research institutes, there is still a need to strengthen academic exchanges and cooperation among domestic universities and research institutes. Heavy metal phytoremediation research mainly focuses on heavy metal contamination in soil media, with bioremediation, cadmium, and phytoremediation as the main research components. In the past five years, heavy metal phytoremediation research has focused on improving the efficiency of heavy metal contamination phytoremediation by means of “combined remediation”, “ecological remediation” and “endophytes”. The development and practical application of

收稿日期:2024-01-25.

通讯作者:王风贺,博士,教授,博士生导师,研究方向:荧光分子探针及其传感系统、危险化学品环境风险防控及应急响应。E-mail:

wangfenghe@njnu.edu.cn

heavy metal phytoremediation technology are furtherly promoted. This study contributes to a comprehensive understanding of the current research trend of heavy metal phytoremediation technology in China, and provides a certain reference and reference for the research of heavy metal phytoremediation.

**Key words:** phytoremediation, heavy metals, CiteSpace, knowledge mapping

自工业革命以来,随着化石能源及矿产的大量开采,重金属过量进入土壤,对人类及生态环境造成了威胁<sup>[1-2]</sup>. 重金属污染在世界范围内均有大量报道<sup>[3]</sup>. 随着我国经济社会的快速发展,环境中重金属的积累不可小觑,亟需治理<sup>[4]</sup>. 2014 年发布的《全国土壤污染调查公报》显示,全国土壤总的超标率为 16.1%,其中轻微、轻度、中度和重度污染点位分别为 11.2%、2.3%、1.5%和 1.1%;污染类型以无机污染物为主,有机型次之,复合型污染物比重较少,无机污染物超标点位占总体点位的 82.8%,无机污染物主要以镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍等重金属为主<sup>[5]</sup>. 土壤中的重金属污染具有积累性、隐蔽性、延后性和不可降解性等特性,导致土壤中重金属的污染持续时间较长<sup>[6]</sup>. 重金属污染对土壤生态性状造成的影响包括引发土壤质量的恶化、影响植物的正常生理活动、降低农作物产量和质量等<sup>[7]</sup>. 且农作物可能吸收土壤中的重金属至可食用部分,人类食用该部分农作物就会通过食物链的放大效应在人体积累重金属,最终对人类健康造成威胁<sup>[8-9]</sup>. 例如八大公害事件中的日本富山骨痛病事件,锌、铅冶炼厂等排放的含镉废水污染了神通川水体,两岸居民利用河水灌溉农田,使稻米和饮用水含镉,1963 年至 1979 年 3 月期间因之中毒的患者共有 130 人,其中死亡 81 人.

典型的重金属修复技术按照修复技术原理可分为物理修复、化学修复、生物修复等<sup>[6]</sup>. 物理修复技术是通过物理技术手段,将污染物从土壤中分离,从而达到净化土壤的目的,常用的物理修复技术有热脱附、气相抽提等技术<sup>[10]</sup>. 化学修复技术是通过化学试剂与污染物发生化学反应,将污染物从土壤中分离或转化为稳定无毒害的形式,主要的化学修复技术有固化-稳定化技术、淋洗技术、氧化还原技术、光催化技术和点化学修复等<sup>[11]</sup>. 物理修复技术和化学修复技术存在成本高昂、使土壤不适合植物生长、劳动强度大和易导致二次污染等常见问题<sup>[12]</sup>. 生物修复中的植物修复技术具有修复成本低、无二次污染、适用范围广和生态效益好等优点<sup>[13]</sup>. 植物修复具有成本低廉、效率较高和对环境的扰动较小等优势,值得深入研究<sup>[14]</sup>.

Brooks 等<sup>[15]</sup>在 1977 年第一次提出超富集植物概念. Chaney<sup>[16]</sup>在 1983 年首次提出利用植物去除土壤中重金属的想法. 此后,重金属植物修复成为有关科研工作者的关注热点. 植物修复是利用植物吸收、降解、挥发、过滤和固定等作用,减轻土壤、水体中的重金属污染的生物修复技术<sup>[17]</sup>. 植物修复的原理是利用绿色植物及其共生微生物提取、转移、吸收、分解、转化或固定土壤中的污染物,把污染物从土壤中去除,从而达到移除、削减或稳定污染物,或降低污染物毒性等目的<sup>[18-19]</sup>. 近年来,植物修复因为使用成本低、环境扰动小等优点而受到关注. 由于植物修复的环境友好性,该技术比物理修复和化学修复更容易被大众接受<sup>[20]</sup>.

有关重金属植物修复的研究文章数量较多,内容涵盖广,较难从全局把握研究趋势及研究热点. 文献计量学最早由 Pritchard 在 1969 年提出,其核心是经验统计规律,是使用数学和统计方法定量地分析研究主题的交叉科学<sup>[21]</sup>. 目前文献计量学已广泛应用于环境<sup>[22]</sup>、食品安全<sup>[23]</sup>、医学<sup>[24]</sup>等多个学科领域,用于分析相关领域的研究热点和研究趋势等. 为全面了解重金属植物修复研究领域的研究动向、发展趋势及核心学者和研究机构的情况,本文采用文献计量学和知识图谱分析方法进行研究. 基于 WOS 核心数据库和 CNKI 数据库的文献源,本文使用目前国际上应用较为普遍的可视化软件 CiteSpace 对重金属植物修复领域的发文演变趋势、核心作者情况、发文机构情况和研究热点的演化等进行分析,通过构建整体框架,分析重金属植物修复领域的发展现状和趋势,以期给未来的重金属植物修复研究提供参考.

## 1 数据来源和分析方法

### 1.1 数据来源

本文文献来自 WOS 核心数据库和 CNKI 数据库. WOS 的检索条件为高级检索,检索内容为:TS = (Heavy metal \* ) AND TS = ( ' Hyperaccumulat \* plants \* ' OR Phytoremediation ),检索时间设置为 2000. 1.1—2024.4.30. 在 WOS 核心数据库中检索,去除重复的结果后得到 9 522 篇文献. 将相关文献以“Refworks”格式下载并保存,将保存的文件作为数据分析的样本. CNKI 的检索条件为高级检索,主题为

“重金属”和“超积累植物”或“植物修复”,文献类型限定为“学术期刊”和“学位论文”,检索时间设置为 2000.1.1—2024.4.30。去除重复的结果后得到 8 073 篇文献。将相关文献以“Refworks”格式下载并保存,将保存的文件作为数据分析的样本。

## 1.2 分析方法

CiteSpace 是陈超美博士开发的用来可视化科研文献中相关数据的文献计量软件<sup>[25-26]</sup>。本文借助该软件,对近年来有关重金属植物修复污染的文献进行可视化研究分析,在软件中选择 Author(作者)、Institution(机构)、Keyword(关键词)等选项,节点强度选择默认 Cosine(余弦函数)和 Within slices(时间切片内)等进行图谱分析,得出重金属植物修复污染研究领域的统计数据和共现图谱,从而分析重金属植物修复领域的研究现状、研究热点和研究前沿<sup>[27]</sup>。

在知识图谱中,density(网络密度)表示节点之间的联系情况;节点和字体大小表示要素的频次差异,节点越大表示要素出现的频次越高;节点的圆圈层表示年轮,年轮宽度反映中心性的大小,代表了要素的影响力;各节点之间的连线密度表示共现次数,节点之间的连线越多表示各要素之间的合作越多<sup>[28]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 发文量分析

本文对每一年发表的相关文献进行数量统计分析,从中能够体现出重金属植物修复污染的研究发展速度和研究状况。通常情况下,年度发文量越多,说明该研究领域越活跃。

图 1 为 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)之间重金属植物修复在 CNKI 的发文量分析。由图 1 可以看出,随着时间的推移,总体的发文量逐渐增加。2000 至 2009 年,重金属植物修复的研究开始在国内逐渐起步,每年的发文量逐渐上升,人们开始关注植物修复在重金属污染修复中的绿色应用。2010 至 2014 年,重金属植物修复领域年发文量较为相近,增长较为平缓,每年约为 396 篇相关文章。2015 至 2017 年,重金属植物修复领域年发文量有所上升,其中在 2017 年达到统计年份的最高峰,2017 年该领域共发表 552 篇相关文献。2018 至 2020 年重金属植物修复领域发表文献呈现波动态势,2019 年该领域共发表 229 篇相关文献,文献发表数量急剧下滑。2020 年至 2023 年发文量波动较为平稳,平均每年发表 514 篇文章。2024 年因统计时间较短,发文量较少,不纳入考量范围。

图 2 为 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)之间重金属植物修复在 WOS 的发文量分析。WOS 的发文量增长趋势不同于 CNKI 的波动式上升,从 2000 至 2023 年,除去 2002 年发文量同比下降 2 篇,2010 年发文量同比下降 21 篇,其余年间发文量均较前一年有所上升;2024 年由于统计时间较短,不纳入考量范围。发文量的上升表明近年来研究者们对于重金属植物修复的关注程度越来越高,导致该研究领域的有关文章数量快速增加。

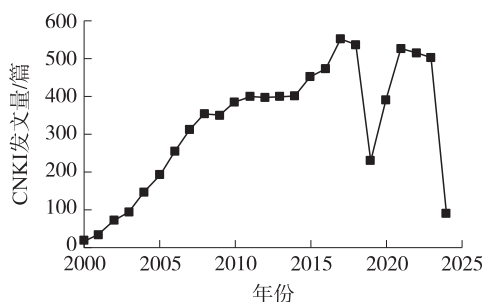


图 1 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域发文量分析

Fig. 1 The number of papers on phytoremediation of heavy metals of CNKI in 2000–2024(as of Apr. 30th)

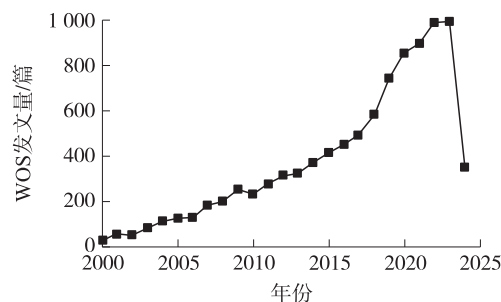


图 2 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复领域发文量分析

Fig. 2 The number of papers on phytoremediation of heavy metals of WOS in 2000–2024(as of Apr. 30th)

统计时间内,科研作者在 WOS 平均年发文量为 382 篇,在 CNKI 平均年发文量为 332 篇,WOS 平均年发文量多于 CNKI 平均年发文量 50 篇。发文量的不同表示在国际学术期刊上发表论文的科研作者数量较多或者这些科研作者更注重在国际期刊上进行学术研究和发表成果。

2.2 作者分析

科学研究主要由作者开展,通过研究发表文章的作者及作者之间的合作情况可以了解重金属植物修复领域相关科研人员的分布及合作情况。

如图 3 所示,使用 CiteSpace 软件制作出 CNKI 上国内重金属植物修复领域研究作者共现知识图谱,共有 981 个节点、845 条连接,网络密度为 0.001 8。文字大小显示了研究作者的发文频次,网络结构反映了作者间的合作关系,其共同组成了重金属植物修复的合作网络知识图谱<sup>[29]</sup>。



图 3 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域研究作者合作网络共现知识图谱

Fig. 3 CNKI co-occurrence knowledge map of domestic phytoremediation of heavy metals research authors' cooperation network from 2000-2024(as of Apr. 30th)

由 CiteSpace 产出的结果对发文作者进行分析,可以看出周启星、骆永明、吴龙华、仇荣亮、刘杰为重金属植物修复领域的重要学者,发文量均在 16 篇以上,其中,周启星的发文量达到 39 篇,为最高产的学者。由链接节点可以看出,骆永明、吴龙华、李振高和滕应 4 位作者之间联系较为紧密,经查询可知,4 位作者均为中国科学院南京土壤研究所的教授;孙丽娜与孙铁珩之间联系较多;由此可以看出,部分重金属植物修复领域核心作者之间联系较为紧密。但也有一些作者之间联系较少,如南开大学周启星教授、中山大学仇荣亮教授、桂林理工大学刘杰教授,重金属植物修复的核心研究人员所在机构较为分散,各团队之间合作较少,各团队的研究相对独立和封闭。这种较为分散的研究会加大各团队之间交流合作的成本,长此以往不利于重金属植物修复技术的发展。

图 4 所示为 WOS 上重金属植物修复领域研究作者之间的合作网络共现知识图谱,共有 1 220 个节

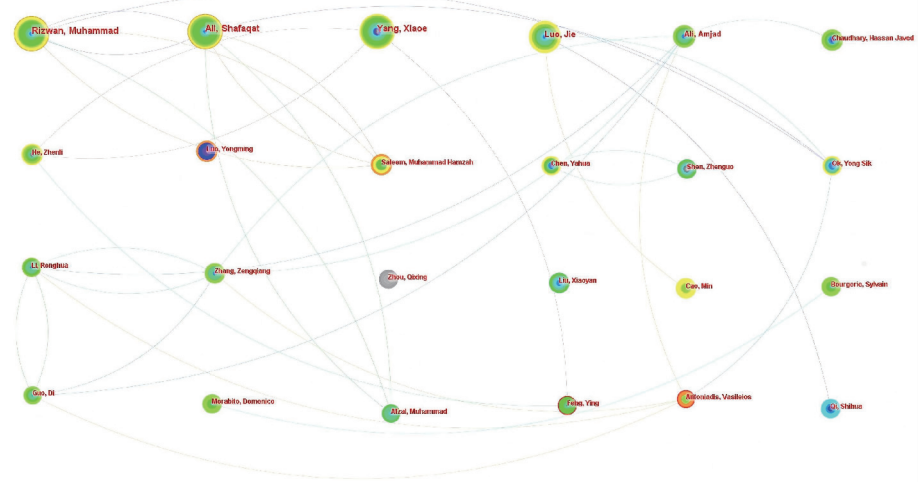


图 4 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复领域研究作者合作网络共现知识图谱

Fig. 4 WOS co-occurrence knowledge map of domestic phytoremediation of heavy metals research authors' cooperation network from 2000-2024(as of Apr. 30th)

点、1 714 条连接,网络密度为 0.002 3。发文量最多的为巴基斯坦学者 Rizwan Muhammad。由合作网络共现知识图谱可以看出,国际高发文量作者之间联系较为紧密。

### 2.3 发文机构分析

科研机构是研究的主体机构,通过研究了解科研机构的发文情况,可以明晰重金属植物修复领域的研究状况。

CNKI 上国内重金属植物修复领域发文量前 20 名的科研机构合作网络图谱如图 5 所示。图谱共有 750 个节点、1 064 条连接,网络密度为 0.003 8,仍处于较低水平。发文量前五的科研机构分别为中南林业科技大学、南京农业大学、四川农业大学、湖南农业大学和中国科学院研究生院,各发表了 55、53、45、39 和 37 篇文章。发文机构性质主要为大学和科研院所,图谱连线较为紧密,表明各机构之间联系和合作较多。

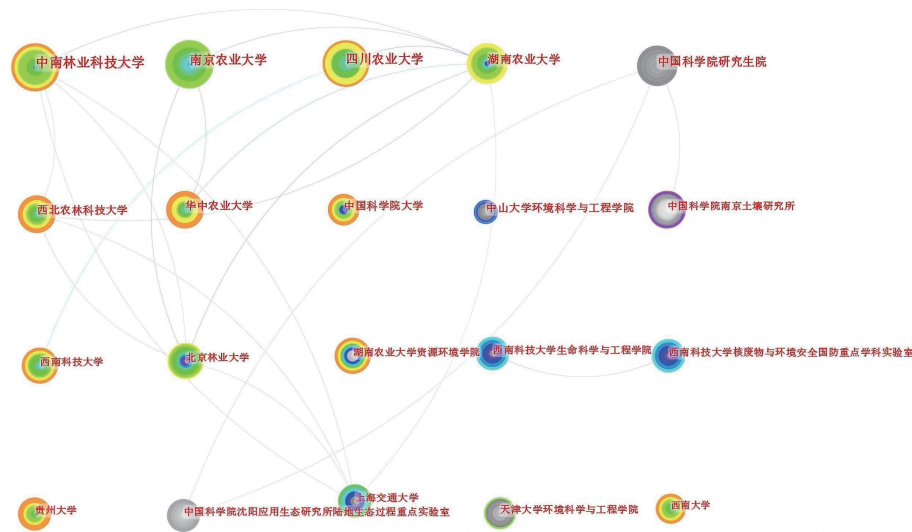


图 5 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域研究机构合作网络共现知识图谱  
Fig. 5 CNKI co-occurrence knowledge map of cooperation network of phytoremediation of heavy metals research institutions from 2000 to 2024 (as of Apr. 30th)

图 6 所示为 WOS 上前 20 名重金属植物修复领域的发文机构合作网络共现知识图谱。图谱共有 723 个节点、3 140 条连接,网络密度为 0.012。发文量前五的机构分别为 Chinese Academy of Sciences、University of Chinese Academy of Sciences、Egyptian Knowledge Bank、Zhejiang University、Council of Scientific & Industrial

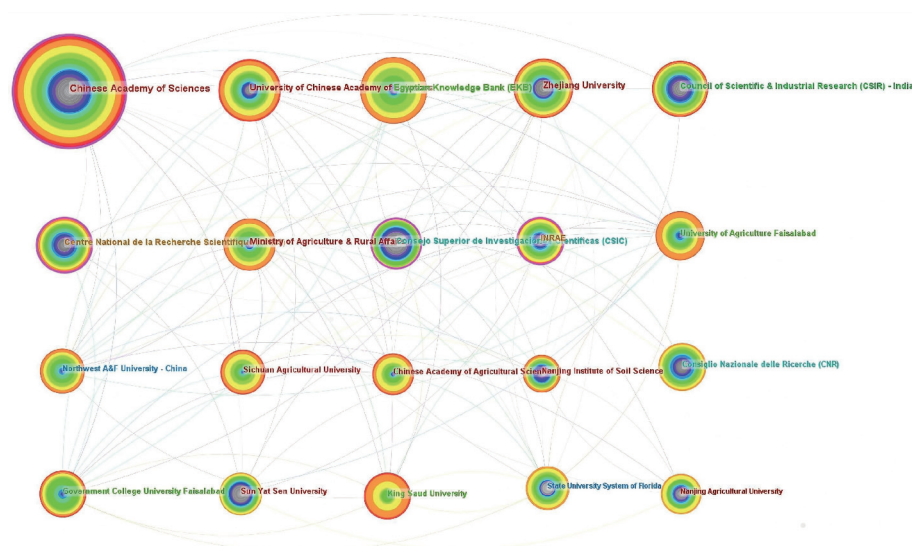


图 6 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复领域研究机构合作网络共现知识图谱  
Fig. 6 WOS co-occurrence knowledge map of cooperation network of phytoremediation of heavy metals research institutions from 2000 to 2024 (as of Apr. 30th)

Research-India. 由图 6 可以看出,在 CNKI 发文量较高的中国科学院研究生院、西北农林科技大学、四川农业大学、中国科学院南京土壤研究所、南京农业大学在 WOS 发文量也占据前 20 名. 值得注意的是,浙江大学在 WOS 的发文量为调查年间的第四位,共发表了 184 篇文章,远高于其在 CNKI 上的发文量.

2.4 关键词共现分析

关键词是文献研究内容的高度提炼,通过关键词共现分析能够反映重金属植物修复领域的研究前沿和研究热点等信息,结合关键词突变分析可以进一步研究该领域的发展状况<sup>[26]</sup>.

对 CNKI 上重金属植物修复研究领域内相关文献的关键词进行归纳和分析,使用 CiteSpace 软件对相关文献中的网络节点类型选择“关键词”进行分析,可以得到如图 7 所示的关键词合作网络共现知识图谱. 图 7 共有 872 个节点、7 317 条连接,网络密度为 0.019 3. 节点大小表示关键词出现频次的高低,可以看出植物修复、重金属、土壤、土壤污染、生态修复等关键词出现频次最高,分别为 2 301、1 039、584、363 和 298 次. 土壤为植物最主要的生长场所,是重金属植物修复污染最主要的应用领域,所以利用植物修复重金属污染土壤是植物修复领域研究的热点内容. 出现频次前 10 的关键词如表 1 所示.

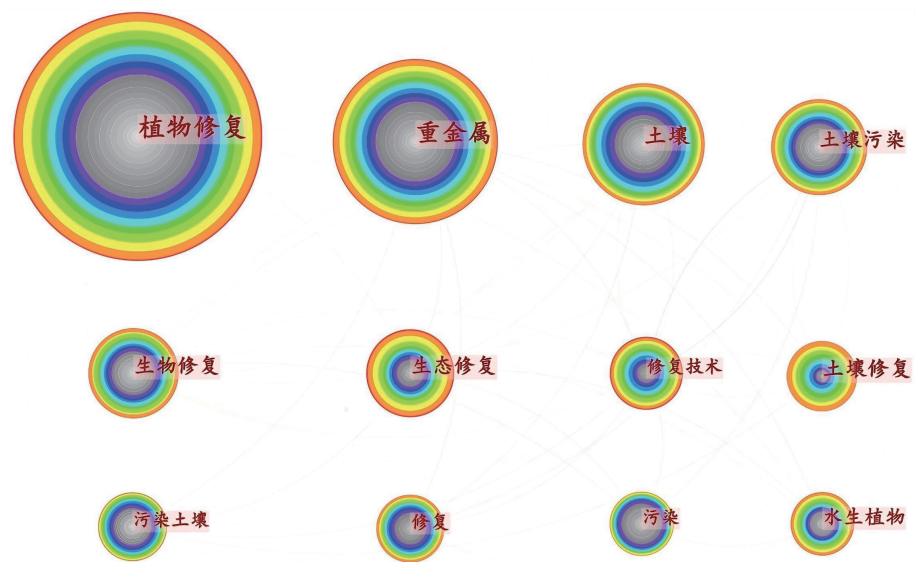


图 7 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域关键词合作网络共现知识图谱  
Fig. 7 CNKI co-occurrence knowledge map of keywords in domestic phytoremediation of heavy metals research from 2000 to 2024(as of Apr. 30th)

表 1 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域研究领域高频次关键词  
Table 1 Keywords of high frequency in research field of phytoremediation of heavy metals in CNKI database from 2000 to 2024( as of Apr. 30th)

排名	关键词	频次	最早年份	排名	关键词	频次	最早年份
1	植物修复	2 301	2 000	6	生态修复	298	2004
2	重金属	1 039	2 000	7	修复技术	218	2002
3	土壤	584	2 000	8	土壤修复	199	2003
4	土壤污染	363	2 000	9	污染土壤	194	2000
5	生物修复	316	2 000	10	修复	191	2001

在关键词共现图谱中,重金属植物修复中应用最多的植物为黑麦草、东南景天、蜈蚣草、油菜和龙葵等. 这些植物都具有种植范围广、成活简单、生长周期短等优点,可以有效降低重金属植物修复的使用成本以及提高重金属植物修复的普适性. 相关文献表明,镉为学者们研究最多的一种重金属污染<sup>[30]</sup>.

对 WOS 中重金属植物修复领域相关文献进行知识图谱共现分析,如图 8 所示. 图 8 共有 1 092 个节点、14 159 条连接,网络密度为 0.023 8. 可以看出,学者们主要研究的重金属污染物为镉、锌和铅. 出现频次前 10 的关键词如表 2 所示.

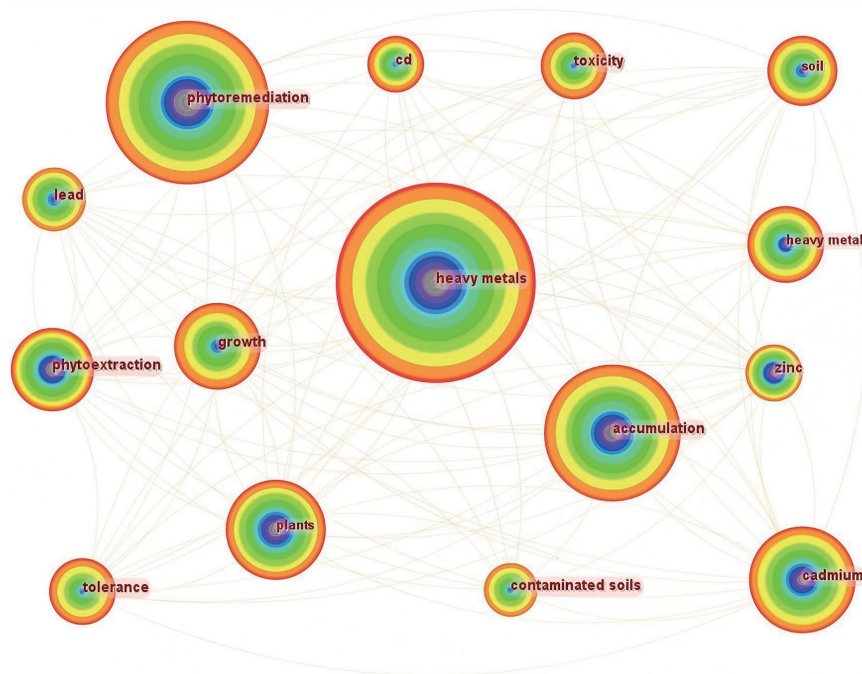


图 8 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复领域关键词合作网络共现知识图谱  
Fig. 8 WOS co-occurrence knowledge map of keywords in domestic phytoremediation of heavy metals  
research from 2000 to 2024(as of Apr. 30th)

表 2 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复领域研究领域高频次关键词  
Table 2 Keywords of high frequency in research field of phytoremediation of heavy metals  
in WOS database from 2000 to 2024(as of Apr. 30th)

排名	关键词	频次	最早出现年份	排名	关键词	频次	最早出现年份
1	heavy metals	5 296	2 000	6	growth	1 341	2001
2	phytoremediation	3 712	2 000	7	phytoextraction	1 223	2000
3	accumulation	2 766	2 000	8	tolerance	1 033	2001
4	cadmium	1 918	2 000	9	heavy metal	1 006	2000
5	plants	1 773	2 000	10	soil	999	2001

2.5 研究趋势分析

当某些关键词在短期内突然被多次提及,这些关键词在 CiteSpace 中被称为突现词 (strongest citation bursts). 对突现词的研究,有助于理解、捕捉研究领域新的研究热点以及指明未来的研究方向<sup>[31]</sup>. 本文对 2000—2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域文献的关键词进行突现性分析,排名前 30 的关键词如图 9 所示,这些关键词浓缩了 24 年间的突变主题.

结果表明,“吸收”是突现强度最高的关键词(6.43),“污染土壤”突现强度次之(6.31). “吸收”也是突现持续时间最长的关键词,持续了 10 年. “吸收”突现强度最高是因为重金属植物修复的主要原理是通过植物根系吸收环境中的重金属,将环境中的重金属转移到植物体内,从而达到从环境介质中去除重金属污染的目的. “土壤修复”突现强度次高是因为重金属植物修复最主要的应用场景就是使用重金属植物修复污染的土壤,少量的植物会用于修复水体中的重金属污染. “生物炭”“镉污染”“龙葵”“伴矿景天”“间作”“光合作用”“联合修复”是突现时间最晚的几个关键词,从 2019 年开始突现. 重金属植物修复虽然有绿色环保、成本低廉等优点,但也有修复效率低、修复时间长等缺点,因此随着研究的深入,利用各种手段提高重金属植物修复污染的效率便成为研究的热点. 例如,采用添加生物炭、化肥、微生物、真菌等辅助物或与其他作物连种等“联合修复”“生态修复”的手段来提高重金属植物修复的效率.

图 10 所示为 WOS 重金属植物修复领域文献突现性排名前 30 的关键词. 可以看出,indian mustard(印度芥菜)为突现强度最高的关键词(77.52),thlaspi caerulescens(天蓝遏蓝菜)为突现强度次高的关键词(70.33). 印度芥菜对特定的重金属有超积累作用,通常被用作土壤修复引进的植物. 天蓝遏蓝菜是一种

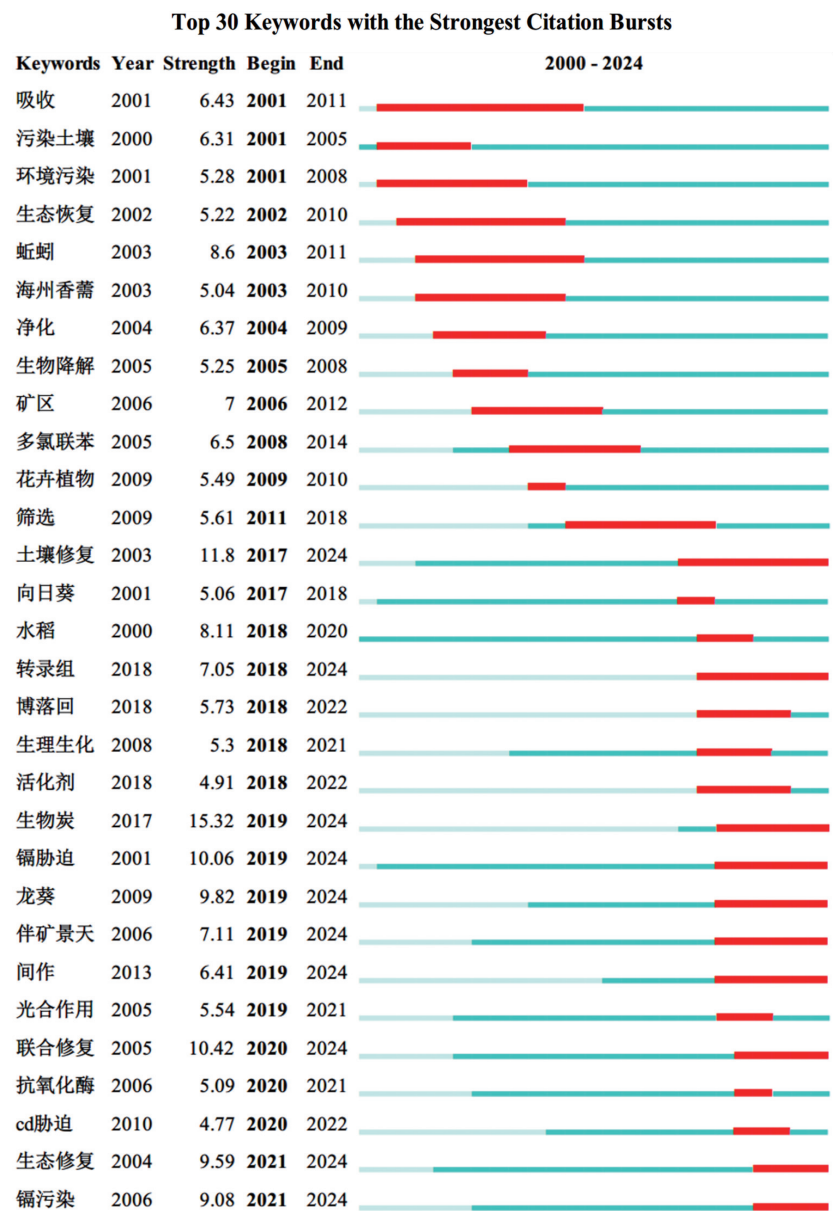


图 9 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)CNKI 重金属植物修复领域关键词突现词谱

Fig. 9 Burst keywords of heavy metals phytoremediation literature in CNKI from 2000 to 2024( as of Apr. 30th)

十字花科重金属超富集植物,常用于镉的土壤修复. *populations* 和 *glomus mosseae* 为突现持续时间最长的关键词,持续了 13 年. *glomus mosseae* 是一种丛枝菌根,是生态系统的重要组成部分,可以提高植物的生态系统效率,进而提高修复重金属污染的效率<sup>[32]</sup>. 最晚出现的突现词为 *endophytic bacteria*(植物内生菌),从 2015 年开始突现. 植物内生菌可以促进植物生长、提高抗逆性,提高植物对于重金属的吸收和积累作用,帮助去除或稳定污染物<sup>[33]</sup>.

### 3 结论

本文将文献计量分析和 CiteSpace 可视化软件相结合,展示了重金属植物修复领域的发展现状. 分析可知,随着时间的增加,重金属植物修复领域发文量也随之增加,人们逐渐开始增加对重金属植物修复这一绿色环保的修复技术的关注度. CNKI 年均发文量要低于 WOS 年均发文量. CNKI 数据库中部分研究人员联系较多,学术交流较为频繁;WOS 数据库中部分研究人员联系颇为紧密,学术交流颇为频繁. CNKI 上发文的部分研究机构之间的网络密度为 0.003 8,各研究机构之间联系与合作较多;WOS 上发文的部分研究机构之间的网络密度为 0.012,各研究机构之间的联系较之 CNKI 上头部研究机构之间的联系更为紧密. CNKI 上相关研究领域的主要关键词为土壤、土壤污染、生物修复等,WOS 上相关研究领域的主要关键



图 10 2000 至 2024 年(截至 4 月 30 日)WOS 重金属植物修复文献关键词突现词谱

Fig. 10 Burst keywords of heavy metals phytoremediation literature in WOS from 2000 to 2024(as of Apr. 30th)

词为 accumulation 和 cadmium 等;突现词含有联合修复、生态修复、glomus mosseae 等,旨在通过这些手段提高植物修复重金属污染的效率.

从 2000 年到 2024 年,重金属植物修复领域的发文量越来越多,重金属植物修复领域呈现越来越受关注的态势,经历了从理论到实际应用的过程. 基于本文的研究成果,对重金属植物修复的未来发展提出以下两点建议:

(1) 高校和科研院所在植物修复土壤污染中发挥了重要作用,但各机构之间的交流合作不紧密,建议多开展各类学术交流活动,进而促进重金属植物修复领域的发展.

(2) 通过关键词共现分析发现,重金属植物修复的研究主要集中在土壤中,对水体中的重金属污染修复研究较少. 经过超积累植物的研究,后续可以加强水生超积累植物的研究力度,使用水生超积累植物去除水体中的重金属污染.

[ 参考文献 ] (References)

[ 1 ] 王利宝,朱宁华,鄂建华. Pb、Zn 等重金属对樟树、栎树幼苗生长的影响[J]. 中南林业科技大学学报,2010,30(2):

- 44-47.
- [2] 刘金霞. 我国农作物的重金属污染及防治对策[J]. 农村实用技术,2020(7):75-76.
- [3] 刘敬勇,赵永久. 矿山资源开发引起的环境污染效应及其控制对策[J]. 矿产保护与利用,2007(5):47-50.
- [4] 甘凤伟,王菁菁. 有色金属矿区土壤重金属污染调查与修复研究进展[J]. 矿产勘查,2018,9(5):1023-1030.
- [5] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 国土资源通讯,2014(8):26-29.
- [6] 陆志家,耿秀华. 土壤重金属污染修复技术及应用分析[J]. 中国资源综合利用,2018,36(11):110-112.
- [7] DIACONU M,PAVEL L V,HLIHOR R M,et al. Characterization of heavy metal toxicity in some plants and microorganisms: A preliminary approach for environmental bioremediation[J]. New Biotechnology,2020,56:130-139.
- [8] XIANG M T,LI Y,YANG J Y,et al. Heavy metal contamination risk assessment and correlation analysis of heavy metal contents in soil and crops[J]. Environmental Pollution,2021,278:116911.
- [9] VARRICA D,TAMBURO E,MILIA N,et al. Metals and metalloids in hair samples of children living near the abandoned mine sites of Sulcis-Inglesiente(Sardinia,Italy)[J]. Environmental Research,2014,134:366-374.
- [10] 饶晨曦,龙来早. 土壤修复技术研究现状[J]. 广东化工,2018,45(2):156-158.
- [11] 鞠雪峰. 土壤重金属污染修复方法研究[J]. 资源节约与环保,2022(10):121-124.
- [12] ALI H,KHAN E,SAJAD M A. Phytoremediation of heavy metals:Concepts and applications[J]. Chemosphere,2013,91(7):869-881.
- [13] 串丽敏,赵同科,郑怀国,等. 土壤重金属污染修复技术研究进展[J]. 环境科学与技术,2014(增刊2):213-222.
- [14] 王丽华,唐容,刘尉. 土壤中铅污染及其植物修复技术综述[J]. 南方农业,2017,11(22):105-107.
- [15] BROOKS R R,LEE J,REEVES R D,et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. Journal of Geochemical Exploration,1977,7:49-57.
- [16] CHANEY R L. Plant uptake of inorganic waste constituents[J]. Land Treatment of Hazardous Wastes,1983,6(9):50-76.
- [17] 黄明煜,章家恩,全国明,等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述[J]. 生态科学,2018,37(3):194-203.
- [18] CHANEY R L,MALIK M,LI Y M,et al. Phytoremediation of soil metals[J]. Current Opinion in Biotechnology,1997,8(3):279-284.
- [19] AHMED M. Remediation of metalliferous soils through the heavy metal resistant plant growth promoting bacteria:Paradigms and prospects[J]. Arabian Journal of Chemistry,2019,12(7):1365-1377.
- [20] 王庆海,却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报,2013,21(2):261-266.
- [21] 邱均平. “文献计量学”定义的发展[J]. 情报杂志,1988(4):45-47.
- [22] USMAN M,HO Y S. A bibliometric study of the Fenton oxidation for soil and water remediation[J]. Journal of Environmental Management,2020,270:110886.
- [23] KAMDEM J P,DUARTE A E,LIMA K R R,et al. Research trends in food chemistry:A bibliometric review of its 40 years anniversary(1976-2016)[J]. Food Chemistry,2019,294:448-457.
- [24] YANG K L,JIN X Y,GAO Y,et al. Bibliometric analysis of researches on traditional Chinese medicine for coronavirus disease 2019(COVID-19)[J]. Integrative Medicine Research,2021,9(3):100490.
- [25] 韩增林,李彬,张坤领,等. 基于 CiteSpace 中国海洋经济研究的知识图谱分析[J]. 地理科学,2016,36(5):643-652.
- [26] 侯剑华,胡志刚. CiteSpace 软件应用研究的回顾与展望[J]. 现代情报,2013,33(4):99-103.
- [27] 程夕,左冰菁,林华贞,等. 基于 CiteSpace 的中国观赏草研究知识图谱分析[J]. 山东林业科技,2019,49(6):38-44.
- [28] 曹梦,李勇,勾宇轩,等. 基于知识图谱的土壤中抗生素研究进展分析[J]. 农业资源与环境学报,2020,37(5):627-635.
- [29] 段和平,史文海,俞立,等. 探讨期刊论文发表数量和核心作者群的重要意义[J]. 临床荟萃,2004,19(8):480.
- [30] 蒋兴一,李景吉,钱美玲. 三种菊科草本植物对重金属 Cd 污染土壤的修复效应实验研究[J]. 四川环境,2017,36(5):29-33.
- [31] 罗杨,吴永贵,段志斌,等. 基于 CiteSpace 重金属生物可给性的文献计量分析[J]. 农业环境科学学报,2020,39(1):17-27.
- [32] MA Y,OLIVEIRA R S,FREITAS H,et al. Biochemical and molecular mechanisms of plant-microbe-metal interactions: Relevance for phytoremediation[J]. Frontiers in Plant Science,2016,7:918.
- [33] 翟凯影,张影影,高夕全. 种子内生菌促生机制和抗病机理研究进展[J]. 农业生物技术学报,2023,31(9):1965-1979.

[责任编辑:严海琳]