

印度芥菜修复污染土壤的研究进展

林伯智, 余光辉*

(湖南科技大学地球科学与空间信息工程学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 本文分析了近 21 年国内外印度芥菜修复土壤污染领域的研究进展、热点和前沿, 理清该领域发展趋势, 结合当前有关土壤修复技术, 提出今后可开展深入探讨的角度, 以期为后续学者进行深入研究提供参考。本文以中国知网 (CNKI) 数据库和 Web of Science (WoS) 数据库中的研究论文作为样本, 运用 CiteSpace 和 VOSviewer 可视化图谱软件对 2000~2021 年间有关印度芥菜修复土壤污染所发表文献进行发文机构、学科门类、载文期刊、作者耦合、文献共引、关键词和关键词突现等计量分析。①国际期刊发文量呈快速增长趋势, 而国内期刊发文趋势则先增后减。②主要发文机构为阿里格尔穆斯林大学、印度农业研究所和加拿大农业及农业食品部。③该领域研究涉及农业、环境科学和园艺等多学科领域, 主要发文期刊有 *Plant Physiology*、*Plant and Soil*、《土壤》和《土壤学报》等。④文献核心作者群体间联系度较强, Belimov 与蒋先军的论文累计引用次数相对较高, 说明两位学者的相关研究受到较高关注。⑤国内外有关研究的关键词趋同, 研究热点主要集中在重金属 Cd 污染土壤修复。未来印度芥菜修复土壤污染研究集中在 Cd 污染修复方面, 提出从螯合剂诱导或 PGR 与螯合剂联用强化印度芥菜修复土壤 Cd 污染技术、印度芥菜与其它植物间作和生物工程强化植物处理和重金属植物生物质处置的角度开展深入研讨。并且将会更加注重于多学科之间交叉研究以及对土壤环境的影响。

关键词: 印度芥菜; 土壤重金属; 土壤污染修复; Web of Science; 中国知网

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)01-0265-12

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022081204

林伯智, 余光辉. 印度芥菜修复污染土壤的研究进展 [J]. 土壤通报, 2024, 55(1): 265-276

LIN Bo-zhi, YU Guang-hui. Progress of Research on Remediation of Contaminated Soil by *Brassica juncea* [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(1): 265-276

1 引言

土壤是陆地生态系统的重要组成部分^[1]。随着社会经济的高速发展, 由于环保观念缺失等原因, 导致当前土壤遭受各种类型污染^[2]。根据中国土壤污染状况调查公告显示, 中国土壤总超标率高达 16.1%, 其中耕地点位污染超标率达 19.4%^[3]。印度芥菜 (*Brassica juncea*) 具有高产和生长快的优点, 并且对多种重金属的富集能力较强受到了广泛的关注^[4-5]。有研究发现印度芥菜在土壤和沙地中, 锌 (Zn) 的浓度为 0, 20, 40, 80 和 160 mg L⁻¹ 胁迫下, 每种浓度的生物蓄积因子大于 10 μg g⁻¹, 易位因子大于 1^[6]。王激清等发现在土壤镉 (Cd) 含量为 80 mg kg⁻¹ 时, 油菜川油 II-10 的地上部 Cd 含量达 120 mg kg⁻¹ 以上^[7]。铜 (Cu) 含量为 25 μmol L⁻¹ 时, 芥菜植物的生物蓄积因子 (BAF) 值最高^[8]。Du 等发现在 Cd

和 Zn 混合土壤污染中, BJ (Bao Jie, var. involutus) 植物品种相较于其他品种其耐受性和重金属提取能力更强^[9]。Kutrowska 等发现 Zn 会增加 Cd 在印度芥菜叶片中的积累, 铅 (Pb) 增加 Cd 在茎中积累, 其中 Cu 会显著降低生物质产生, Cu 和 Zn 之间存在拮抗作用, Pb 会降低 Cu 的积累^[10]。因此印度芥菜可作为复合型污染土壤修复潜在植物。文献计量学采用统计学与数学的方法分析与预测各类交叉学科的科学技术现状与发展趋势等, 是注重量化的综合性知识体系^[11-12]。相较于综述的其他类型, 文献计量学研究往往会更客观并且范围更广^[13]。本文基于中国知网 (CNKI) 和 Web of Science (WoS) 数据库, 运用 CiteSpace 和 VOSviewer 可视化软件对印度芥菜修复污染土壤领域相关文献进行图谱分析。梳理该领域研究方向和热点趋势, 并结合当前国内外有关土壤修复技术, 探究未来的研究方向, 以期为后续学者

收稿日期: 2022-08-12; 修订日期: 2023-01-15

基金项目: 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ30246) 资助

作者简介: 林伯智 (1997-), 男, 湖南凤凰人, 硕士研究生, 研究方向土壤环境修复。E-mail: 1050438638@qq.com

*通讯作者: E-mail: ygh@hnust.edu.cn

进行深入研究提供参考。

2 材料与方法

2.1 数据来源

本研究数据来源于 CNKI 与 WoS 核心数据库 (SCI, SSCI, A&HCI, CPCI-S), 时间跨度为 2000~2021 年, 检索截至时间 2022 年 5 月 20 日。在 CNKI 数据库中, 为保证最终结果准确性, 在数据筛选时排除学位论文和会议报告等, 采用数据高级检索的方法, 检索式 SU=印度芥菜, 所发表的中文核心期刊进行检索。英文文献对 WoS 核心数据库进行检索, 检索式为 TS = (*Brassica juncea* and Soil Contaminated)。对检索后所显示的文章标题和摘要内容进行筛选和去除与关键词 (中文: 印度芥菜, 英文 *Brassica juncea*) 无关文章, 最终分别留下 119 篇与 2257 篇文献作为样本。

2.2 数据分析

运用 Excel 对 CNKI 和 WoS 数据库中所收集的数据, 进行年份和发文量数据统计, 并用 Origin 软件进行绘图; CiteSpace 5.8.R3 和 VOSviewer 1.6.18

可视化图谱软件进行发文机构、学科门类、载文期刊、关键词和关键词突现等分析, 以研究该领域的不同时期的热点及发展趋势。

3 结果与分析

3.1 文献发表年度量及趋势

科学文献的数量与质量是一种对科学技术水平的度量, 从文献计量角度来研究科学学、预测学等方面的课题, 是一种崭新而有效的途径和方法^[14]。载文数量的年度分布变化是文献总量在时间维度的映射, 是某一研究方向衡量其成长历程与发展变化特征的重要指标^[15]。一定程度上能代表该领域受到的关注度^[16]。印度芥菜修复土壤污染的国际间期刊发文量总体上呈现上升趋势。由图 1 可知, 国际发文数量的增长可分为四个不同阶段: 2000~2006 年整体涨幅波动不大; 2006~2008 年开始呈现爆发性增长; 2008~2010 年发文量逐渐下降, 其中 2021 年发文量较最初增长近 3 倍。而该领域国内期刊发文量总体则呈现出先增后减趋势。

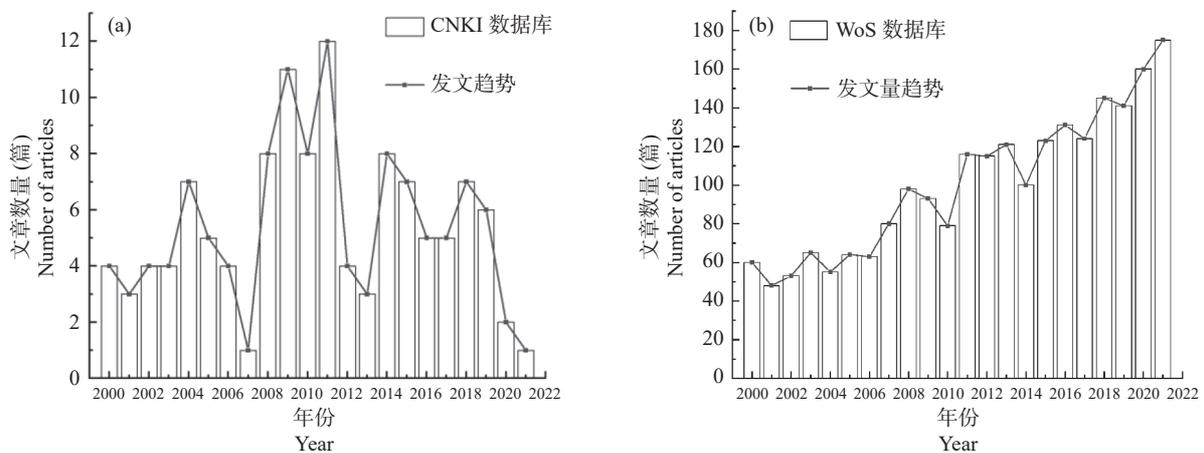


图 1 2000~2021 年印度芥菜修复土壤污染领域 CNKI 与 WoS 年发文量

Fig.1 Annual publication volume of CNKI and WoS in the field of *Brassica juncea* greens remediation of soil pollution from 2000 to 2021

3.2 发文机构分析

研究与分析文献作者所在的单位或机构, 便于了解该领域研究人员分布情况^[17]。通过对外网发文机构进行统计, 全球共有 2162 个机构对该植物在土壤污染修复领域进行研究。由表 1 可知, WoS 数据库有关文献发文机构中 Aligarh Muslim Univ (阿里格尔穆斯林大学)、Indian Agr Res Inst (印度农业研究所) 和 Agr & Agri Food Canada (加拿大农业及农

业食品部) 三个机构 2000~2021 年总发文量统计均在 80 篇以上, 可见这三个机构在该领域研究较为深入。对发文量前 10 的国家进行分析, 可知印度占比高达 45.7%, 中国 23.9%, 这反映了印度在该领域的主导作用, 而我国随着时间增长在该领域相关研究正在逐渐增加。知网数据库有关文献发文机构中河北农业大学发文量最多, 达到 23 篇, 其次为南京农业大学和中国环境管理干部学院, 发文量均为 11 篇,

表 1 2000~2021 年 WoS 与 CNKI 数据库印度芥菜修复土壤污染领域发文量前 10 位机构

Table 1 Top 10 institutions in the field of soil pollution remediation by *Brassica juncea* from 2000 to 2021 in WoS and CNKI databases

排名 Rank	机构 Institution	国家 Country	发文量 (篇) Number of Articles Issued	机构 Institution	国家 Country	发文量 (篇) Number of Articles Issued
1	Aligarh Muslim Univ	印度	87	河北农业大学	中国	23
2	Indian Agr Res Inst	印度	85	南京农业大学	中国	11
3	Agr&Agri Food Canada	加拿大	81	中国环境管理干部学院	中国	11
4	King Saud Univ	沙特阿拉伯	52	中国科学院南京土壤研究所	中国	10
5	Huazhong Agr Univ	中国	52	中国农业大学	中国	7
6	Chinese Acad Sci	中国	51	中国地质科学院国家地质实验测试中心	中国	5
7	Guru Nanak Dev Univ	印度	46	中国科学院研究生院	中国	5
8	Punjab Agr Univ	印度	42	四川师范大学	中国	5
9	Uni Western Australia	澳大利亚	40	河北大学	中国	5
10	Zhejiang Univ	中国	33	西南科技大学	中国	5

并列第二, 第三为中国科学院南京土壤研究所, 发文量 10 篇。从机构发文量排行前 10 可知, 高等院校的占比较重。

3.3 学科门类与载文期刊共被引分析

3.3.1 学科门类分析 发表文章所涉及到的学科如图 2 所示, 对 WoS 数据库学科分析发现该领域植物科学与环境科学、农学为发文较多的学科, 对 CNKI

数据库学科分析可知环境科学与资源利用为中文发文较多的学科, 其他还包括生物学、农作物和园艺等学科。结合 WoS 数据库和 CNKI 数据库表明印度芥菜修复土壤污染问题涉及了农业、环境科学和园艺等多学科领域的广泛关注。多学科间知识交叉融合, 有利于推动知识创新与学科发展。

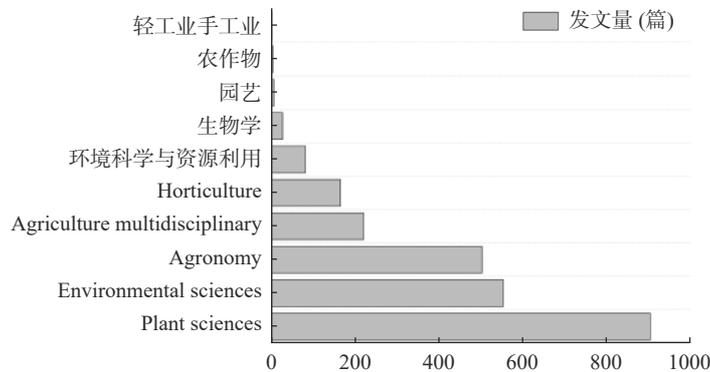


图 2 2000~2021 年印度芥菜修复土壤污染领域 WoS 与 CNKI 数据库学科分析图

Fig.2 Disciplinary analysis of WoS and CNKI databases in the field of *Brassica juncea* greens for soil pollution remediation from 2000 to 2021

3.3.2 载文期刊共被引分析 期刊共被引分析法是一种被海内外学者广泛运用于许多学科领域的定量研究方法^[18]。采取期刊共被引分析, 能对期刊进行定位和分类, 可以确定期刊在该学科中的核心或边缘位置, 从而对学术期刊进行评价。影响因子是期刊在该研究领域的影响力的表征体现, 能在一定程度体现一个期刊的质量水平, 其复合影响因子越高, 说明该期刊在该研究领域的影响力越强^[19]。对 WoS 数据库进行期刊共引统计, 在 2000~2021 年间 Plant Physiology 期刊总共被引次数高达 840 次 (见表 2), 位于本次筛选的所有期刊之首, 且 2022 年影响因子

为 8.005, 国内期刊土壤总共被引次数高达 7230 次 (见表 2), 影响因子 2.414, 位于本次筛选的所有期刊第一, 可见以上两个期刊分别在国内外该学科领域拥有较高的质量和影响力。

3.4 作者耦合分析

作者耦合是指在文献中 n 位作者同时引用了某一位作者所发表文献的情况, 则称这 n 位作者间具有耦合关系, 表明了各个作者间的客观联系^[20]。还能在一定时间内显示出某个研究领域的引领作者^[21]。对 WoS 数据库进行作者耦合分析, 设置最小发文阈值为 5, 共筛选出 2210 篇文章和 209 位作者, 构建

表 2 2000 ~ 2021 年 WoS 与 CNKI 数据库印度芥菜修复土壤污染领域共被引前 5 期刊

Table 2 Top five journals cited in total in the field of soil pollution remediation of *Brassica juncea* in WoS and CNKI databases from 2000-2021

排名 Rank	期刊 Journal	共被引次数 Total citation	影响因子 Impact factor (2022)	期刊 Rank	共被引次数 Total citation	影响因子 Impact factor (2021)
1	Plant Physiology	840	8.005	土壤	7230	2.414
2	Plant and Soil	724	4.993	土壤学报	3916	4.180
3	Journal of Experimental Botany	670	7.298	环境科学学报	3514	2.619
4	Physiologia Plantarum	508	5.081	应用生态学报	3292	3.893
5	Plant Science	505	5.363	安徽农业科学	3167	0.716

作者共现分析图，图中圆圈的大小表示参与合作的发文数量，距离远近代表合作紧密程度。其结果如图 3 所示，联系较为紧密的团队有 RENU BHARDWAJ 团队、ANKET SHARMA 团队和 PARVAIZ AHMAD 团队等。其中 RENU BHARDWAJ 团队共发文量 40 篇位于之首。通过对作者间合作分析，可看出各团队间的紧密程度。RENU BHARDWAJ 团队（总联系强度 133）、ANKET SHARMA 团队（总联系强度 90）、PARVAIZ AHMAD 团队（总联系强度 77）。设置最

小发文阈值为 4，对 CNKI 数据库进行作者耦合分析，共筛选出 23 位作者。图 4 显示了国内各作者之间的合作关系，具有明显的聚类关系。发文量前三名分别是李博文团队（发文量 20 篇，总联系强度 22）、骆永明团队（发文量 9 篇，总联系强度 22）和杨卓团队（发文量 12 篇，总联系强度 17）。RENU BHARDWAJ 和李博文团队发文量、合作数量较多，因此有较强的联系强度。从全球范围来看，各研究人员主要以团队研究为主，团队独立性强，各团队间合作交流较少。

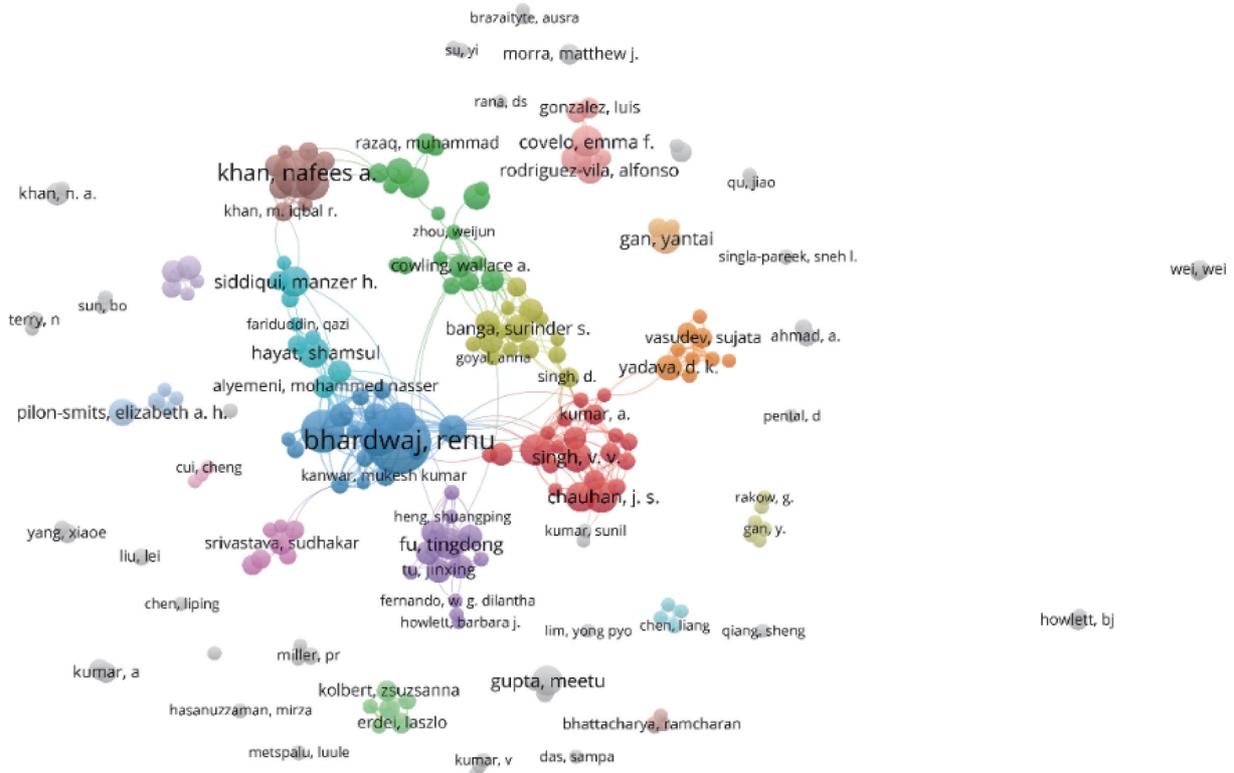


图 3 2000 ~ 2021 年基于 WoS 数据库印度芥菜修复土壤污染领域作者共现分析图

Fig.3 Co-occurrence analysis of authors in the field of *Brassica juncea* remediation soil pollution based on WoS database from 2000 to 2021

3.5 文献共引分析

文献共被引是指在第三篇施引文献目录中有两

篇文献共同出现，可以表明各发表文献之间的紧密关系[22]。文献共被引入次数能在一定程度上反应出公

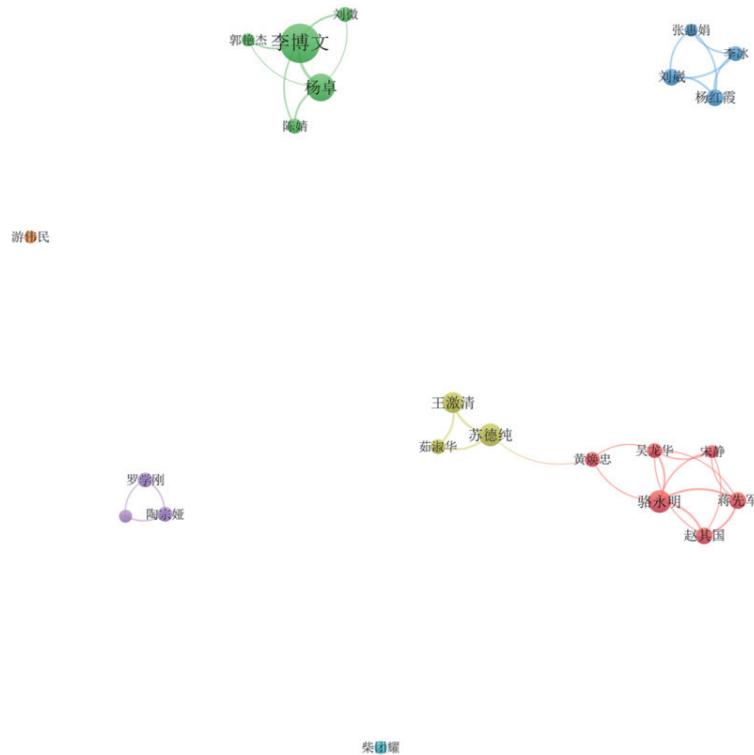


图 4 2000~2021 年基于 CNKI 数据库印度芥菜修复土壤污染领域作者共现分析图

Fig.4 Co-occurrence analysis of authors in the field of *Brassica juncea* remediation soil pollution based on CNKI database from 2000 to 2021

众对该文献的关注度，引用次数越多，则表明该文献越重要^[23]。通过文献共引分析发现国内外学者所发的有关文章在 2000~2010 年间引用较多，说明这 10 年来公众对该领域关注度较高使得该领域研究得到高速发展，随着国际间学者的合作与交流不断增加，使得作者的文献共引次数也相继增加。Belimo 和蒋先军的论文累积引用次数相对较高（见表 3、表 4），说明两位学者的相关研究受到较高关注。WoS 数据库 Top10 的高被引论文中，印度有 4 篇，俄罗斯 2 篇，其余为中国、美国、意大利和西班牙。由此可见国内部分研究的技术水平已经进入国际前列。

3.6 关键词

3.6.1 关键词分析 文献的关键词可表明该篇文献的主要涉及领域与研究重点，是文献研究内容的精炼概括，采用关键词分析，还能确立文献的主题^[24]。从关键词的分布可以看出相应的研究创新、焦点和发展趋势^[25]。使用 VOSviewer 对 WoS 数据库绘制关键词分析图，最小阈值设为 5，共筛选出 959 个关键词，其结果如图 5 所示：排名前五的高频词分别是 *Brassica juncea*（456 次）、accumulation（290 次）、

growth（275 次）、plant（267 次）和 cadmium（234 次）。对 CNKI 数据库进行分析，最小阈值设为 4，共筛选出 32 个关键词，其结果如图 6 所示，高频词与 WoS 数据库分析词相似，说明国内外学者对该植物应用于土壤污染研究比较集中在土壤重金属污染修复。

3.6.2 关键词突现分析 基于关键词的突现分析，能够聚焦某一研究领域在不同时段发展变迁情况和热点主题分布^[26-27]。为了解国际间各学者对该领域当前的研究趋势，用 Citespace 对 WoS 数据库进行关键词突现分析， γ 值设置为 1.0，共出现 85 个突现词，由于关键词较多，根据关键词强度和突现持续时间进行排序，绘制 Top25 关键词突现图。由图 7 可知，2000~2017 年间，突现词主要为 *Brassica napus* L.、Indian mustard、metal 和 EDTA 等，说明此时该植物对土壤污染的研究处于早期摸索阶段。EDTA 因为其对多种重金属的螯合性较强，因此对其研究时间较长。2017~2019 年，突现词 Pb 的出现表明印度芥菜对于土壤重金属污染物开始具有针对性研究。2019~2021 年，土壤重金属 Cd 污染受到重视，且突变强度较高，因此可认为该植物修复土壤 Cd 污染为当前国

表 3 2000~2021 年 WoS 数据库印度芥菜修复土壤污染领域共被引前 10 位
Table 3 Top 10 citations in the field of *Brassica juncea* greens for soil pollution remediation in WoS database from 2000 to 2021

排名 Rank	题目 Title	年份 Year	第一作者 First author	国家 Country	共被引次数 Total number of citations	期刊 Journal	影响因子 Impact factor (2022)
1	Cadmium-tolerant plant growth-promoting bacteria associated with the roots of Indian mustard (<i>Brassica juncea</i> L. Czern.)	2005	Belimov, A A	俄罗斯	525	Biology, Soil Biology& Biochemistry	8.546
2	Metal hyperaccumulation in plants: Biodiversity prospecting for phytoremediation technology	2003	Prasad, MNV	印度	472	Electronic Journal of Biotechnology	2.826
3	Response of Phenylpropanoid Pathway and the Role of Polyphenols in Plants under Abiotic Stress	2019	Sharma, A	中国	421	Molecules	4.927
4	Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard (<i>Brassica juncea</i>) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress	2007	Mobin, M	印度	342	Journal of Plant Physiology	3.686
5	Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review	2010	Vamerali, T	意大利	330	Environmental Chemistry Letters	13.615
6	Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals	2012	Bhargava, A	印度	300	Journal of Environmental Management	8.910
7	Improved understanding of hyperaccumulation yields commercial phytoextraction and phytomining technologies	2007	Chaney R L	美国	296	Journal of Environmental Quality	3.866
8	Characterization of plant growth promoting rhizobacteria isolated from polluted soils and containing 1-aminocyclopropane-1-carboxylate deaminase	2001	Belimov, A A	俄罗斯	288	Canadian Journal of Microbiology	3.226
9	Significance of Bacillus subtilis strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in <i>Brassica juncea</i>	2006	Zaidi, S	印度	282	Chemosphere	8.943
10	The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils	2003	Walker, DJ	西班牙	267	Environmental Pollution	9.988

表 4 2000~2021 年 CNKI 数据库印度芥菜修复土壤污染领域共被引前 10 位
Table 4 Top10 citations in the field of *Brassica juncea* greens for soil pollution remediation in CNKI database from 2000 to 2021

排名 Rank	题目 Title	年份 Year	第一作者 First author	共被引次数 Total number of citations	期刊 Journal
1	油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力	2002	苏德纯	386	中国环境科学
2	重金属污染土壤的植物修复研究 I. 金属富集植物 <i>Brassica juncea</i> 对铜、锌、镉、铅污染响应	2000	蒋先军	293	土壤
3	植物对重金属的吸收和分布	2003	罗春玲	270	植物学通报
4	重金属污染土壤的植物修复研究 III. 金属富集植物 <i>Brassica juncea</i> 对锌镉的吸收和积累	2002	蒋先军	175	土壤学报
5	镉污染土壤植物修复的 EDTA 调控机理	2003	蒋先军	150	土壤学报
6	土壤镉污染特征及污染土壤的植物修复技术机理	2006	茹淑华	140	中国生态农业学报
7	镉污染土壤的植物修复及其 EDTA 调控研究 I. 镉对富集植物印度芥菜的毒性	2001	蒋先军	109	土壤
8	铜污染土壤修复的有机调控研究 II. 根际土壤铜的有机活化效应	2000	吴龙华	98	土壤
9	超积累镉油菜品种的筛选	2003	王激清	93	河北农业大学学报
10	印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态镉的影响	2004	王激清	93	环境科学学报

际研究前沿。从 2000~2021 年间关键词突现图可知, 随着时间推移该领域的研究内容的深度和广度不断拓展, 使得研究对象也呈现出多样性。

4 讨论及建议

通过对 WoS 数据库与 CNKI 数据库关键词分析

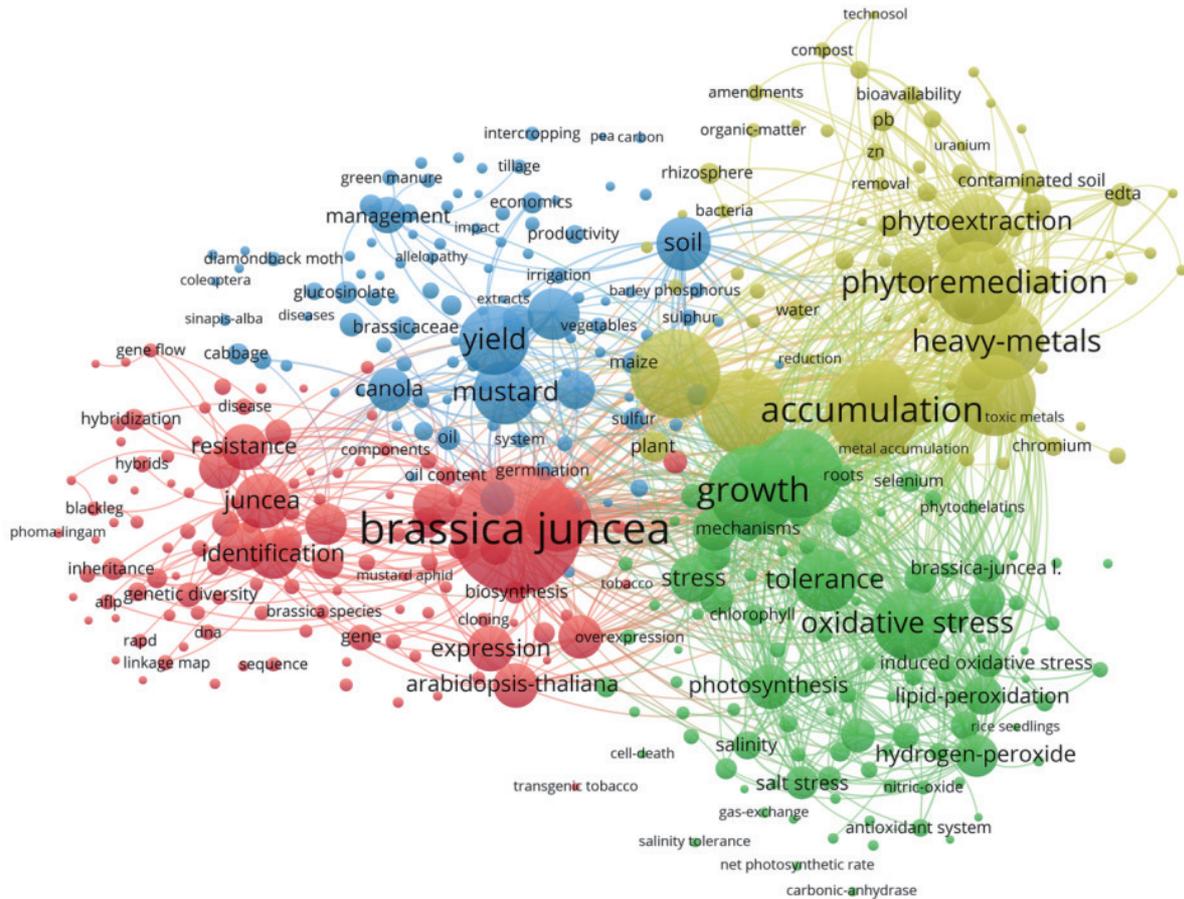


图5 2000~2021年基于WoS数据库印度芥菜修复土壤污染领域关键词分析图

Fig.5 Keyword analysis in the field of soil pollution remediation in *Brassica juncea* based on WoS database from 2000 to 2021

发现, 国内外对于该植物用于土壤污染修复主要研究方向为土壤重金属修复。通过关键词突现分析对WoS数据库21年关键词热点分析可知, 该植物的研究热点是土壤重金属Cd污染修复。中国约7%的农田镉点位超标, 其中约0.5%农田受到严重污染^[28]。结合中国实际情况和文献分析结果, 可知该植物对土壤污染修复今后的研究热点仍聚焦于Cd污染修复。现对已有的Cd污染修复技术, 结合印度芥菜应用上提出可深入开展的研究建议:

(1) 螯合剂诱导印度芥菜修复土壤Cd污染技术

EDTA一直是植物修复研究中使用最广泛的螯合剂, 能够高效地提取多种金属^[29]。在污染土壤中加入EDTA后能显著提高印度芥菜对Cd的积累能力^[30]。由于EDTA的可生物降解性较差, 所以在其应用方面受到的限制较多^[31-32]。谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)具有良好的生物降解性, 不会对环境和生物体造成不良影响, 是一种新型绿色无害淋洗剂^[33]。其在土壤中不容易与其他介质发生反应, 可以与土壤中的重金属离子结合形成配位物, 配位物易于被植物吸收^[34]。

在黄棕壤和红壤中GLDA与EDTA对镉有相似的去镉效果, 并且前者对土壤酶的活性影响小于后者^[35]。Begum等研究发现GLDA、甲基甘氨酸二乙酸(MGDA)、(脲基二琥珀酸四钠)HIDS、乙二胺二琥珀酸(EDDS)和亚氨二丁二酸(IDSA)五种可生物降解螯合剂在pH值为7时, 对土壤Cd提取能力大小分别为GLDA > MGDA > HIDS > EDDS > IDSA^[36]。

已有学者研究发现GLDA具有代替EDTA作诱导剂提升植物重金属积累能力的潜力。周宽等研究发现施加GLDA后, 与对照组相比菘草对镉的累积净化效果提高了1.29~1.32倍^[37]。Yang等发现可降解螯合剂均能有效提高玉米对重金属富集能力, 并且当GLDA浓度在3 mmol kg⁻¹时, 玉米对Cd的富集系数(BCF)和迁移系数(TF)分别是对照组的1.93倍和3.02倍^[38]。当前螯合剂诱导强化植物修复Cd污染土壤的修复植物研究较多的是龙葵或伴矿景天等, 而对于不同螯合剂应用于印度芥菜的相关报道则较少, 因此有较好的研究前景。

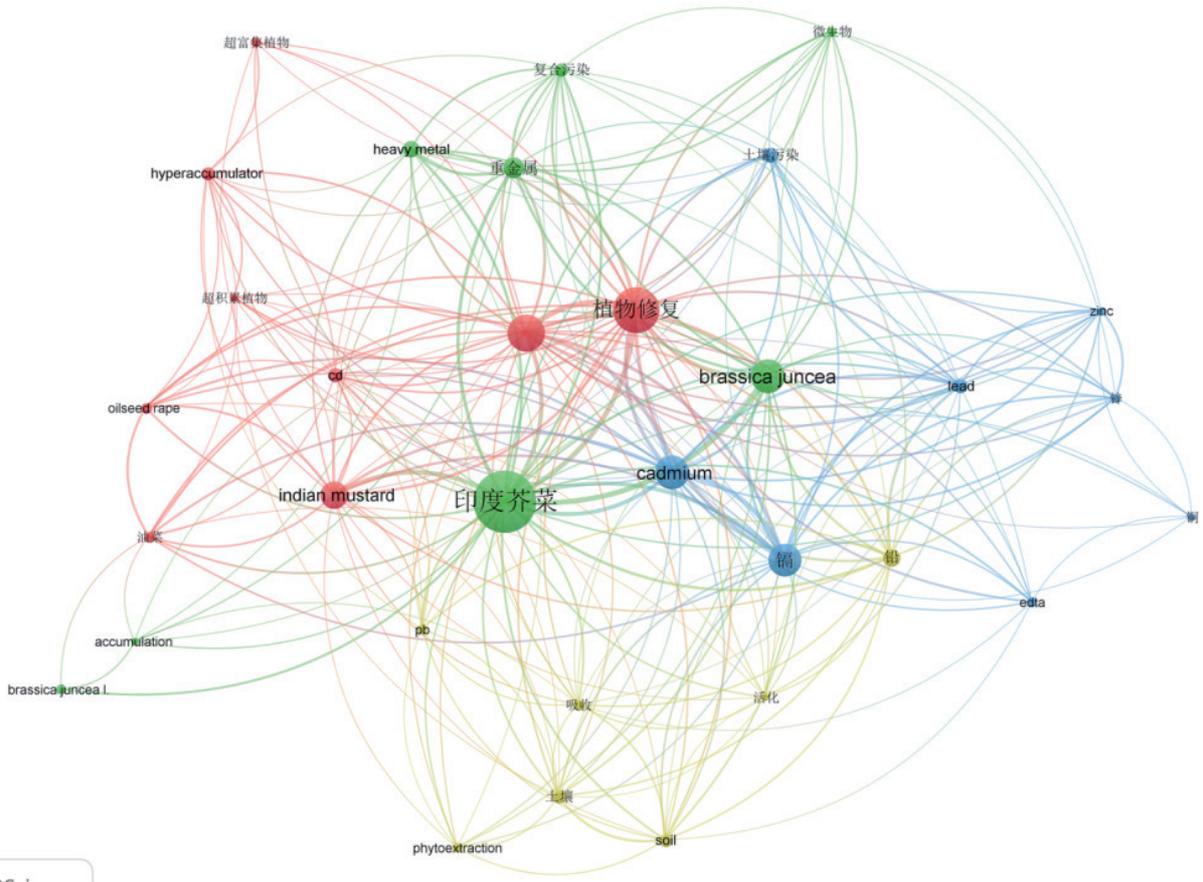


图 6 2000~2021 年基于 CNKI 数据库印度芥菜修复土壤污染领域 Top25 关键词分析图

Fig.6 Top 25 keyword emergence analysis of *Brassica juncea* based on WOS database in the field of soil pollution remediation from 2000 to 2021

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2000 ~ 2021
<i>Brassica napus</i> L.	2000	12.27	2000	2008	[Timeline bar]
Indian mustard	2000	11.26	2000	2007	[Timeline bar]
yield	2000	6.32	2000	2004	[Timeline bar]
<i>Phoma lingam</i>	2000	4.92	2000	2006	[Timeline bar]
mustard	2000	5.9	2001	2005	[Timeline bar]
rapeseed	2000	5.07	2002	2007	[Timeline bar]
EDTA	2000	5.66	2003	2012	[Timeline bar]
metal	2000	4.91	2004	2005	[Timeline bar]
Overexpression	2000	5.31	2006	2008	[Timeline bar]
<i>Brassica juncea</i> L.	2000	4.96	2007	2012	[Timeline bar]
linkage map	2000	4.55	2007	2013	[Timeline bar]
root	2000	6.48	2010	2013	[Timeline bar]
evolution	2000	5.37	2012	2016	[Timeline bar]
Proline	2000	4.83	2012	2014	[Timeline bar]
population	2000	4.61	2012	2015	[Timeline bar]
gene expression	2000	6.71	2015	2019	[Timeline bar]
Nitric oxide	2000	7.42	2016	2021	[Timeline bar]
induced oxidative stress	2000	6.5	2016	2021	[Timeline bar]
<i>Oryza sativa</i> L.	2000	4.66	2016	2019	[Timeline bar]
plant growth	2000	6.08	2017	2021	[Timeline bar]
Pb	2000	5.49	2017	2019	[Timeline bar]
phenolic compound	2000	7.24	2018	2021	[Timeline bar]
Reactive oxygen specy	2000	5.97	2018	2021	[Timeline bar]
sequence	2000	4.62	2018	2021	[Timeline bar]
Cd	2000	4.63	2019	2021	[Timeline bar]

图 7 2000~2021 年基于 WoS 数据库印度芥菜修复土壤污染领域 Top25 关键词突现分析图

Fig.7 Top 25 keyword emergence analysis of *Brassica juncea* based on WoS database in the field of soil pollution remediation from 2000 to 2021

(2) 植物生长调节剂 (PGR) 与螯合剂联用强化印度芥菜修复土壤 Cd 污染技术

己酸二乙氨基乙醇酯 (DA-6) 和植物激素 3-吲哚乙酸 (IAA) 等植物生长调节剂能增加植物生物量, 缓解重金属/螯合剂的植物毒性, 协同螯合剂促进植物对重金属的吸收、转运和积累等作用^[39-42]。PGR 与螯合剂组合施用能够增强植物对重金属的富集能力。罗洋等研究发现在 Cd-Pb 复合污染土壤中对龙葵联合施用 IAA 和 GLDA 后, 龙葵地上部和地下部 Cd 提取量显著增加, 但对 Pb 吸收的影响不显著^[43]。Fässler 等研究发现 IAA 与 MDDS 联合施用能显著的增强向日葵对 Pb 的富集能力^[44]。He 等研究发现当 DA-6 浓度为 $1 \mu\text{mol L}^{-1}$ 时与 EDTA 联用对黑麦草吸收土壤中 Cd 效果最佳^[45]。PGR 作为辅助螯合剂强化植物修复土壤 Cd 污染技术, 当前研究较多的是龙葵等植物, 而印度芥菜的相关研究报道则较少, 因此同样具备较好的研究前景。

(3) 印度芥菜与其他植物间作

无收益的超积累植物大面积种植会使得当地农民生产积极性降低, 进而导致污染修复工程进度缓慢和修复效果不佳等问题^[46]。间作能够解决以上问题, 通过选择适宜的不同植物种类进行间作, 不仅能收获安全的农产品, 还能提高土壤环境质量, 修复土壤重金属污染^[47]。

已有研究表明, 高富集植物与经济作物间作能在产生经济效益的同时降低土壤重金属污染, 改善土壤环境质量。Qin 等提出再生纳皮尔草—中国牛奶野豌豆接力间作系统, 提高纳皮尔草对 Cd 的吸收率的同时增加了土壤 DOC, 缓解土壤 TN 的下降情况^[48]。王小慧等研究发现象草与木本植物苦楝/构树间作于矿区重金属污染土壤中有利于改善土壤环境质量, 增加修复植物的地上部生物量及其对 Cd 和 Pb 富集, 降低土壤重金属迁移风险^[49]。采用植物间作能在对土壤污染进行修复同时尽可能减少对于农业生产的影响, 将会是未来植物修复重金属污染的热点之一, 而当前印度芥菜与其他作物间作修复土壤重金属污染的有关研究报道较少, 可作为未来印度芥菜修复土壤重金属污染研究方向之一。

对于植物修复或施加化学试剂强化植物修复污染过程中应探究植物在不同生长时间下对于土壤有效态重金属的动态影响, 用以评价使用该方法后对土壤环境的动态影响, 为不同修复方法联合使用或

植物间作等提供参考。此外除探究重金属含量变化外, 还应该研究更深层次的对植物修复机理如超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT) 和土壤微生物等影响。

(4) 生物工程强化植物处理

近年来, 应用生物工程学 (例如基因组学, 蛋白质组学和代谢组学等) 缓解植物 HM (重金属) 胁迫以及强化植物吸收重金属研究受到了广泛的关注^[50]。Wang 等研究发现从小麦中分离出的 TtNRAMP6 过量表达能增强拟南芥对 Cd 的积累, 但降低了其生物量^[51]。Gurajala 等在 Pb 和 Cd 混合污染土壤中通过田间试验, 比较了印度芥菜 80 种基因型品种对于 Cd 和 Pb 的提取效率, 结果表明印度芥菜均对 Cd 和 Pb 有不同程度的积累能力, 其中 IM-25、IM-13 和 IM-65 的基因型积累了更多的 Cd 和 IM-79、IM-24 和 IM-32 能积累更多的 Pb^[52]。Zhang 等研究发现杨树扩张素基因 PtoEXPA12 在烟草植物中的过度表达增强其对 Cd 的吸收和积累^[53]。运用生物工程缓解植物 HM 胁迫是当前以及未来植物修复重金属污染的热点之一, 采用生物工程学强化印度芥菜吸收土壤重金属能力、运用基因工程解决某些重金属超富集植物生长慢等特点以及采用基因工程后的植物对土壤环境和动植物的影响等有关研究报道较少, 值得未来持续探索。

(5) 重金属植物生物质处置

对植物吸收重金属所产生含有高浓度重金属的生物质, 进行减量化、无害化、部分资源化是当前的研究重点^[54]。生物质中 Cd 能通过热解、液化、气化等进行处理^[55]。修复植物热解制成生物炭, 随着温度升高, 所积累的 PTM (潜在有毒金属) 越发稳定, 当温度达到 $750 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时生物炭中浸出行为不受影响, 高温下产生的生物炭具有更大的抗氧化性, 很小的碳损失, 这将防止与有机物结合的金属的释放^[56]。Zhang 等对景天进行水热转化去除 Cd/Zn 研究发现, 在 $210 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 添加 HCl, 得到最高的脱除效率 Cd (95.0%) 和 Zn (89.3%), 得到的水炭对 Cu 的吸附能力增加, HCl 提高了水炭的能量密度, 促进了 Zn 的固定化, 同时增强了 Cd 的流动性, 水热转化显著降低了 Cd 和 Zn 的浸出风险^[57]。当前对于印度芥菜生物质处理相关研究报道较少, 可作为未来印度芥菜修复土壤重金属污染研究方向之一, 此外重金属植物生物质处置方法未来应该在现有方法上

进行改进或研究更多处置方法进一步提高重金属提取效率,对于植物体内重金属含量与进行处置后产品的影响等方面,值得未来持续关注。

5 小结

本文对 2000~2021 年间 CNKI 中文核心数据库与 WoS 核心数据库 (SCI, SSCI, A&HCI, CPCI-S) 中所收录的以“印度芥菜”与“*Brassica juncea* and Soil Contaminated”为主题所发表的中英文文献进行发文机构、学科门类、载文期刊、作者耦合、文献共引、关键词和关键词突现等计量分析,能在一定程度上反映出该领域技术发展历程。主要结论如下:

(1) 国际间期刊发文量呈快速增长趋势,而国内期刊发文量趋势则先增后减; Aligarh Muslim Univ、Indian Agr Res Inst 和 Agr&Agri Food Canada 三个学术机构在相关领域发文量最多。

(2) 印度芥菜修复土壤污染领域涉及环境科学、农业和园艺等多学科多多领域的广泛关注,多学科间知识交叉融合,有利于推动知识创新与学科发展。

(3) 国内外主要发文期刊有 Plant Physiology、Plant and Soil、《土壤》和《土壤学报》等;文献核心作者群体间联系度较强,其中 Renu Bhardwaj 和李博文团队发文量最多可认为在该领域有较深的研究,从全球范围来看,各研究人员主要以团队研究为主,团队独立性强,各团队间合作交流较少; Belimov 与蒋先军的论文累积引用次数相对较高,说明两位学者的相关研究受到较高的关注。

(4) 通过关键词与关键词共线分析了印度芥菜对土壤污染修复今后的研究热点仍聚焦于 Cd 污染修复,并提出未来可从整合剂诱导或 PGR 与整合剂联用强化印度芥菜修复土壤 Cd 污染技术,印度芥菜与其他植物间作,生物工程强化植物处理和重金属植物生物质处置的角度开展深入研讨。

参考文献:

- [1] Sarkar A, Deb S, Ghosh S, et al. Impact of anthropogenic pollution on soil properties in and around a town in Eastern India[J]. *Geoderma Regional*, 2022, 28: e00462.
- [2] Han F, Deng Y, Liu Q, et al. Construction and application of the knowledge graph method in management of soil pollution in contaminated sites: A case study in South China[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 319: 115685.
- [3] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报 [EB/OL]. http://www.mee.gov.cn/gkml/sthjbgw/qt/201404/t20140417_270670.htm, 2014-04-17.
- [4] 孙涛, 张玉秀, 柴团耀. 印度芥菜 (*Brassica juncea* L.) 重金属耐性机理研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(1): 226-234.
- [5] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 重金属污染土壤的植物修复研究 I. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对铜、锌、镉、铅污染的响应[J]. *土壤*, 2000, 32(2): 71-74.
- [6] Chaudhry H, Nisar N, Mehmood S, et al. Indian Mustard *Brassica juncea* efficiency for the accumulation, tolerance and translocation of zinc from metal contaminated soil[J]. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 2020, 23(C): 101489.
- [7] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 用于修复土壤超积累镉的油菜品种筛选[J]. *中国农业大学学报*, 2003, (1): 67-70.
- [8] Feigl G, Kumar D, Lehota N, et al. Physiological and morphological responses of the root system of Indian mustard (*Brassica juncea* L. Czern.) and rapeseed (*Brassica napus* L.) to copper stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 94: 179-189.
- [9] Du J, Guo Z, Li R, et al. Screening of Chinese mustard (*Brassica juncea* L.) cultivars for Cd/Zn phytoremediation and research on physiological mechanisms[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 261: 114213.
- [10] Kutrowska A, Małeczka A, Piechalak A, et al. Effects of binary metal combinations on zinc, copper, cadmium and lead uptake and distribution in *Brassica juncea*[J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2017, 44: 32-39.
- [11] 成璐瑶, 曾萍, 魏健, 等. 基于文献计量的制药废水处理专利发展趋势[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(1): 17-24.
- [12] 刘小茜, 裴韬, 舒华, 等. 基于文献计量学的社会—生态系统恢复力研究进展[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(7): 765-777.
- [13] Mukherjee D, Lim W M, Kumar S, et al. Guidelines for advancing theory and practice through bibliometric research[J]. *Journal of Business Research*, 2022, 148(C): 101-115.
- [14] 赵庆龄, 路文如. 中美土壤重金属污染超富集植物文献计量分析——以印度芥菜为例[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(4): 370-375.
- [15] 高春东, 吴秀平. 基于文献计量的水治理研究国际发展态势分析[J]. *地球科学进展*, 2019, 34(3): 324-332.
- [16] 郑梅迎, 林伟, 徐茜, 等. 基于 CNKI 数据库的土壤酸化文献计量分析[J]. *土壤*, 2020, 52(4): 811-818.
- [17] 赵福梅, 付建秋, 李绍才, 等. 基于文献计量分析的城市扬尘现状研究[J]. *环境科学与技术*, 2019, 42(S1): 65-72.
- [18] 张良友. 期刊共被引分析的若干问题及其实证研究[D]. 广州: 中山大学, 2010.
- [19] 闫淑兰, 赵秀红, 罗启仕. 基于文献计量的重金属固化稳定化修复技术发展动态研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(2): 229-238.
- [20] 王生晖, 杨宗帅, 陈粉丽, 等. 基于文献计量分析的地下水中氨氮污染去除研究[J/OL]. *土壤*, DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.020. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1118.P.20220428.0712.002>.

- html.
- [21] 张宇婷, 肖海兵, 聂小东, 等. 基于文献计量分析的近30年国内外土壤侵蚀研究进展[J]. 土壤学报, 2020, 57(4): 797 – 810.
- [22] 杨宗帅, 魏昌龙, 宋 昕, 等. 基于Web of Science数据库的污染场地可持续修复领域的文献计量分析[J]. 土壤通报, 2022, 53(1): 221 – 233.
- [23] 杜安倩, 范玉超, 刘明雨, 等. 基于文献计量的重金属镉污染土壤修复技术研究分析[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(15): 150 – 154.
- [24] 叶翔宇, 张惠芳, 曹丽勤, 等. 基于文献分析的暖体假人研究进展[J]. 丝绸, 2022, 59(5): 68 – 76.
- [25] 杨雨寒. 基于文献计量的我国水处理研究发展态势分析[J]. 环境工程学报, 2019, 13(5): 1245 – 1260.
- [26] 李光龙, 陈 燕. 我国义务教育财政研究演进的可视化分析—基于关键词共现和文献共被引知识图谱[J]. 华东经济管理, 2017, 31(10): 164 – 172.
- [27] Ding M and Zeng H. A bibliometric analysis of research progress in sulfate-rich wastewater pollution control technology[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2022, 238(4): 113626.
- [28] Meng Y T, Zhang X L, Wu Q, et al. Transcription factor ANAC004 enhances Cd tolerance in Arabidopsis thaliana by regulating cell wall fixation, translocation and vacuolar detoxification of Cd, ABA accumulation and antioxidant capacity[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 436(5): 129121.
- [29] Luo C, Shen Z, Li X. Enhanced phytoextraction of Cu, Pb, Zn and Cd with EDTA and EDDS[J]. Chemosphere, 2005, 59(1): 1 – 11.
- [30] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 镉污染土壤植物修复的EDTA调控机理[J]. 土壤学报, 2003, 40(2): 205 – 209.
- [31] Gluhar S, Kaurin A, Lestan D. Soil washing with biodegradable chelating agents and EDTA: Technological feasibility, remediation efficiency and environmental sustainability[J]. Chemosphere, 2020, 257(10): 127226.
- [32] Liu L R, Luo D G, Lu Y Y, et al. Risk assessment of groundwater pollution during GLDA-assisted phytoremediation of Cd- and Pb-contaminated soil[J]. Ecological Indicators, 2022, 139(1): 108913.
- [33] 曹 阳, 王 丹, 刘若琪, 等. GLDA淋洗参数对污泥中重金属去除效率的影响及其动力学分析[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1227 – 1235.
- [34] 吴 青, 崔延瑞, 汤晓晓, 等. 生物可降解螯合剂谷氨酸 N, N-二乙酸四钠对污泥中重金属萃取效率的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(5): 1733 – 1738.
- [35] 高一丹, 袁旭音, 汪宜敏, 等. 不同螯合剂对两类Cd和Ni污染土壤的淋洗修复对比[J]. 中国环境科学, 2022, 42(1): 250 – 257.
- [36] Begum Z A, Rahman I M M, Tate Y, et al. Remediation of toxic metal contaminated soil by washing with biodegradable aminopolycarboxylate chelants[J]. Chemosphere, 2012, 87(10): 1161 – 1170.
- [37] 周 宽, 皇甫卓曦, 钟承韡, 等. 可生物降解螯合剂GLDA诱导蔺草修复镉污染土壤[J]. 环境工程, 2021, 39(5): 165 – 170 + 79.
- [38] Yang Q, Yang C, Yu H, et al. The addition of degradable chelating agents enhances maize phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2021, 269(04): 129373.
- [39] 周建民, 党 志, 陈能场, 等. 3-吡啶乙酸协同整合剂强化植物提取重金属的研究[J]. 环境科学, 2007, 28(9): 2085 – 2088.
- [40] Khare S, Singh N B, Niharika, et al. Phytochemicals mitigation of Brassica napus by IAA grown under Cd and Pb toxicity and its impact on growth responses of Anagallis arvensis[J]. Journal of Biotechnology, 2022, 343(5): 83 – 95.
- [41] Pal A K, Mandal S, Sengupta C. Exploitation of IAA Producing PGPR on mustard (*Brassica nigra* L.) seedling growth under cadmium stress condition in comparison with exogenous IAA application[J]. Plant Science Today, 2019, 6(1): 22 – 30.
- [42] Huang R, Cui X Y, Luo X Z, et al. Effects of plant growth regulator and chelating agent on the phytoextraction of heavy metals by *Pfaffia glomerata* and on the soil microbial community[J]. Environmental Pollution, 2021, 283(4): 117159.
- [43] 罗 洋, 王正霞, 向仰州, 等. 吡啶乙酸和谷氨酸 N, N-二乙酸对 Cd-Pb复合污染土壤上龙葵生长及重金属吸收的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2022, 37(1): 145 – 151.
- [44] Fässler E, Evangelou W M, Robinson B H, et al. Effects of indole-3-acetic acid (IAA) on sunflower growth and heavy metal uptake in combination with ethylene diamine disuccinic acid (EDDS)[J]. Chemosphere, 2010, 80(8): 901 – 907.
- [45] He S Y, Wu Q L, He Z L. Synergetic effects of DA-6/GA₃ with EDTA on plant growth, extraction and detoxification of Cd by *Lolium perenne*[J]. Chemosphere, 2014, 117C(1): 132 – 138.
- [46] 杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 间套轮作超积累植物技术模式修复Cd污染土壤的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2122 – 2133.
- [47] Xu Y G, Feng J Y, Li H S. How intercropping and mixed systems reduce cadmium concentration in rice grains and improve grain yields[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 402(2): 123762.
- [48] Qin J J, Long J, Peng P Q, et al. Regrow Napier grass–Chinese milk vetch relay intercropping system: A cleaner production strategy in Cd-contaminated farmland[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 339(25): 130724.
- [49] 王小慧, 肖细元, 郭朝晖, 等. 象草与苦楝/构树间作修复矿区重金属污染土壤潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 426 – 435.
- [50] Khan M R, Chopra P, Chhillar H. Regulatory hubs and strategies for improving heavy metal tolerance in plants: Chemical messengers, omics and genetic engineering [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 164: 260 – 278.
- [51] Wang C, Chen X, Yao Q, et al. Overexpression of TtNRAMP6 enhances the accumulation of Cd in Arabidopsis[J]. Gene, 2019, 696: 225 – 232.
- [52] Gurajala H K, Cao X, Tang L, et al. Comparative assessment of Indian mustard (*Brassica juncea* L.) genotypes for phytoremediation of Cd and Pb contaminated soils[J]. Environmental Pollution, 2019, 254(Pt B): 113085.
- [53] Zhang H, Ding Y, Zhi jun, et al. Over-expression of the poplar

- expansin gene PtoEXPA12 in tobacco plants enhanced cadmium accumulation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 116: 676 – 682.
- [54] 王敏捷, 盛光遥, 王 锐. 土壤重金属污染修复植物处置技术进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(2): 151 – 159.
- [55] Chai Y, Bai M, Chen A, et al. Thermochemical conversion of heavy metal contaminated biomass: Fate of the metals and their impact on products[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 822: 153426.
- [56] Du J, Zhang L, Ali A, et al. Research on thermal disposal of phytoremediation plant waste: Stability of potentially toxic metals (PTMs) and oxidation resistance of biochars[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2019, 125: 260 – 268.
- [57] Zhang J, Wang Y, Wang X, et al. Hydrothermal conversion of Cd/Zn hyperaccumulator (*Sedum alfredii*) for heavy metal separation and hydrochar production[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127122.

Progress of Research on Remediation of Contaminated Soil by *Brassica juncea*

LIN Bo-zhi, YU Guang-hui*

(School of Earth Science and Spatial Information Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: The purpose of this study is to analyze the research progress, hot spots and frontiers in the field of remediation of soil pollution by *Brassica juncea* at home and abroad in the past 21 years, to clarify the development trend of this field, combine with the current soil remediation technology, and propose perspectives that can be further discussed, in order to provide reference for subsequent scholars to conduct in-depth research. The research papers in the database of China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WoS) were taken as samples, and CiteSpace and VOSviewer visual mapping software were used to analyze the literatures published between 2000 and 2021 on the remediation of soil pollution by *Brassica juncea*. The analysis mainly focuses on the quantitative analysis of the publishing institution, subject category, published journal, author coupling, literature co-citation, keywords and keyword highlighting. ① The number of published papers in international journals showed a trend of rapid growth, while this number in domestic journals increased first and then decreased. ② The main publishers were Aligarh Muslim Univ, Indian Agr Res Inst and Agr&Agri Food Canada. ③ The research in this field covered many disciplines such as agriculture, environmental science and horticulture. The main publications include *Plant Physiology*, *Plant and Soil*, *Soils and Acta Pedologica Sinica*, etc. ④ There was a strong correlation among the core author groups of the literature, and the cumulative citation times of the papers of Belimov and Jiang Xianjun were relatively higher, indicating that the relevant research of the two scholars has received high attention. ⑤ The key words of the relevant studies at home and abroad converged, and the research hotspots mainly focused on the remediation of heavy metal Cd-contaminated soil. Future research on *Brassica juncea* remediation of soil contamination is focused on Cd contamination remediation. The in-depth research will be carried out from the perspectives of chelator-induced or PGR in combination with chelator to enhance *Brassica juncea* remediation of soil Cd contamination, *Brassica juncea* intercropping with other plants, bioengineering to enhance plant treatment and heavy metal plant biomass disposal. In addition, more emphasis will be placed on interdisciplinary research and the impact on the soil environment.

Key words: *Brassica juncea*; Soil heavy metals; Soil pollution remediation; Web of Science; China National Knowledge Infrastructure

[责任编辑: 裴久渤 高晓丹]