

基于文献计量的农田土壤重金属污染修复技术与效果分析

孙齐状, 杨金康, 睢福庆, 秦世玉, 李畅,
张雯雯, 许嘉阳, 王龙*, 赵鹏*

(河南农业大学 资源与环境学院, 郑州 450000)

摘要: 梳理国内外农田土壤重金属污染修复的研究热点及最新进展, 总结有效的修复治理技术及实际效果, 为我国重金属污染农田的安全利用提供依据。利用 COOC 和 VOSviewer 文献计量工具, 以中国知网 (CNKI) 全文数据库和 Web of Science 核心合集数据库 (WOS) 为数据检索源, 对 2010~2021 年农田土壤重金属污染修复与治理领域的相关文献进行知识图谱的可视化分析。在 2010~2021 年间, 国内外对农田土壤重金属修复研究文献数量呈快速增长态势, 且英文文献的增长率明显高于中文文献。我国在农田土壤重金属污染修复领域的研究占有绝对领先地位 (发文量占比率最高, 达 26.8%), 对全球重金属污染治理工作的贡献最大。国内外在该领域发文期刊 (TOP 3) 有: 《农业环境科学学报》《安徽农业科学》《环境工程学报》《Environmental Science and Pollution Research》《Chemosphere》《Journal of Hazardous Materials》。关注的重金属种类主要是镉、铅、砷等。国内外的研究学者呈“小聚体、大分散”的特点, 合作关系有待进一步加强。通过关键词分析表明, 固化/稳定化技术和植物修复技术在中英文文献中的研究比重均较高 (约 80%), 是目前研究的重点和热点。从田间试验的修复效果来看 (以镉污染为例), 低积累作物品种种植 (籽粒降镉率达 67.9%)、无机—有机组配 (42.7%) 以及叶面阻控技术 (39.9%) 在降镉方面表现出较好的效果, 未来还需将其与农艺措施 (如间套作、水分调控)、微生物菌剂等联合配施, 以实现更好的田间修复和治理效果。

关键词: 重金属污染; 农田; 修复技术; 文献计量

中图分类号: S15.99 文献标识码: A 文章编号: 0564-3945(2023)04-0998-11

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022042502

孙齐状, 杨金康, 睢福庆, 秦世玉, 李畅, 张雯雯, 许嘉阳, 王龙, 赵鹏. 基于文献计量的农田土壤重金属污染修复技术与效果分析 [J]. 土壤通报, 2023, 54(4): 998–1008

SUN Qi-zhuang, YANG Jin-kang, SUI Fu-qing, QIN Shi-yu, LI Chang, ZHANG Wen-wen, XU Jia-yang, WANG Long, ZHAO Peng. Remediation Technology and Effect Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil Based on Bibliometrics[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(4): 998 – 1008

随着我国工业化和城市化的快速发展, 大量污染物进入到土壤系统, 导致土壤污染日益突出, 耕地环境质量日益堪忧^[1]。据《全国土壤污染状况调查公报》, 全国土壤总超标率为 16.1%, 其中耕地土壤的超标率占总超标率的 19.4%, 污染类型以重金属污染为主^[2]。过量的重金属污染物一旦释放到农田中, 不仅会影响农产品的产量和质量, 还会通过食物链传递威胁人体健康^[3-4]。我国耕地资源本身已十分有限, 再加上日益严重的重金属污染, 严重阻碍了我国经济发展和美丽乡村建设的步伐^[5-6]。因此, 梳理农田土壤重金属污染修复或治理领域的最新前沿进展及研究热点, 总结有效的修复治理技术及实际效

果, 对于保障我国农产品质量安全十分必要。

文献计量法是以已公开发表的文献为研究对象, 采用数学和统计学等计量方法, 评价和预测某领域研究现状及发展趋势的图书情报学分支学科^[7]。文献计量法可以从定量角度直接分析文献的外部特征规律, 间接反映文献内容的相关关系, 包括文献的分布结构、数量关系和变化规律, 进而探究某领域已发表总文献中隐含的某种特征规律或预测某领域的未来研究趋势^[8]。数字化时代促生了一批能够应用于科学计量与知识网络分析的软件 (如 VOSviewer、BibexExcel、Pajek、CiteSpace 等), 这些软件已被国内外众多学者广泛应用于不同领域 (如医学、工

收稿日期: 2022-03-29; 修订日期: 2022-06-17

基金项目: 河南省科技攻关项目 (222102110048)、国家自然科学基金青年基金 (42007103)、河南农业大学科技创新基金 (KJCX2020A18) 和河南省大学生创新创业训练计划 (202110466029)

作者简介: 孙齐状 (1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事重金属污染防治与治理研究, E-mail: 1050388573@qq.com

*通讯作者: E-mail: hnndwanglong@163.com; E-mail: zhpddy@163.com

学、农学、林学、军事科学、物理学和新型技术领域)的文献情报分析^[9]。VOSviewer 和 COOC 软件因其图形展现方式丰富,结果可靠,能够定量地分析某个领域或某个主题的研究现状和进展,近年来在科学计量和知识图谱领域得到了广泛的认可和使用^[10]。鉴于此,本研究基于文献计量的可视化技术,以中国知网(CNKI)全文数据库和 Web of Science(WOS)核心合集数据库为文献检索来源,以已发表的有关农田土壤重金属污染修复技术或治理效果的文献为研究对象,以定性和定量相结合的方式进行数理统计,借助 COOC 和 VOSviewer 软件提取关键词、国家、机构、作者和期刊等知识单元(条目元素)进行频次分布计算和频次交叉分布分析,构建各知识单元共现网络和可视化知识图谱,挖掘、提炼和总结文献中隐藏的内涵和规律,揭示该领域的发展历程、研究进展、现状和前沿热点,总结适用于农田土壤重金属污染修复技术并分析不同修复治理技术的实际修复效果,为我国重金属污染农田的安全利用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文所用中文文献来源于中国知网(CNKI)全文数据库。以主题=(“农田”或“耕地”或“土壤”)+(“重金属”或“金属”或“微量元素”或“痕迹元素”或“铜”或“铅”或“锌”或“镉”或“锰”或“锡”或“铬”或“镍”或“锑”或“汞”)进行高级检索,利用“修复”、“钝化”、“改良”、“调理”、“稳定”、“固化”等主题词进行再次检索,后续设置仅显示中文文献及期刊来源,检索时间设置为2010年1月1日至2021年12月31日,检索结果显示共有5826篇相关文献。依据上述检索词及背景知识,人工剔除包括会议综述、快讯、主持人语和声明等与主题不相关文献,逐条筛选后得到的5626篇文献样本以RefWorks格式导出。

本文所用英文文献来源于科睿唯安(Clarivate Analytics)的WOS核心合集数据库。以主题词=(heavy metal* or trace elements*) and (remediation* or stabilization* or immobilization* or phytoremediation* or bioremediation* or phytostabilization* or phytoinfiltration* or hyperaccumulator*)进行检索,后续设置TS=soil* or farmland* or cropland* or agricultural soil*和文章类

型=article or review进行精炼,检索时间跨度设置为2010年1月1日至2021年12月31日,依据上述人工剔除方法,筛选后得到11024篇文献样本。

1.2 分析方法

本文选择利用COOC^[11]和VOSviewer^[12]两个软件对国内外农田土壤重金属污染修复领域的年度发文量、趋势、刊文期刊、国家、作者和关键词等进行频次统计分析,挖掘出核心作者、核心期刊和核心关键词,分别构建作者、国家、关键词和期刊的共现网络与可视化知识图谱,同时将统计后的文献样本统计信息导入Origin软件绘制相应图表。

为了使数据更加全面和准确,利用COOC软件对检索到的中英文文献进行数据清洗,包括同义词合并(如“镉”和“Cd”)、无意义词删除以及文献去重等。数据清洗后依次对各知识单元的频次和统计分布进行分析,便于后续各知识单元可视化图谱的构建。数据清洗后的中文文献中各单元信息为12061位作者、987个期刊、5267个关键词,英文文献各单元信息为1630位作者,224个国家,937个期刊,17337个关键词。随后利用VOSviewer软件对清洗后的数据进行知识图谱分析,实现知识单元矩阵的标准化和可视化。

2 结果与讨论

2.1 年度及国家英文发文量分析

发文量是某个研究领域某个时间段内发表的论文总篇数^[13]。某个领域论文的发表量是该领域的外在指示指标,从发文量的变化历程中可整体观察和把握该领域的发展变化状况,也可反映一个国家/地区的整体科研实力和影响力^[14]。通过对2010~2021年国内外农田重金属污染修复领域发文量进行计量分析(图1-A),发现国内外发文量均呈逐年递增的趋势(除2021年受新冠疫情的影响),且英文文献的增长趋势要明显高于中文,说明国内外对农田重金属污染修复方面的研究不断获得重视,并且国际关注度一直高于国内。2010年,中英文文献分别发表208和406篇,到2021年时,中文文献为801篇,是2010年的3.85倍,英文文献为2026篇,约是2010年的4.99倍。中文和英文发文量的年均增长率分别为13.3%和15.9%,说明研究热度不断增加,重金属污染一直受到国际学术界的重视。值得注意的是,在2015年后,中文发文量出现24.6%的年度

增长率最高峰，这与近些年国家出台政策法规有关，该结果与王娟^[15]、杜志鹏^[16]报道的结果相一致。2013 年党的十八大将生态文明建设列入“五位一体”总体战略布局，2014 年 4 月发布了《全国土壤污染状况调查公报》，2016 年 5 月国务院颁布了《土壤污染防治行动计划》，2018 年 8 月通过了《中华人民共和国土壤污染防治法》，以及 2020 年 2 月出台

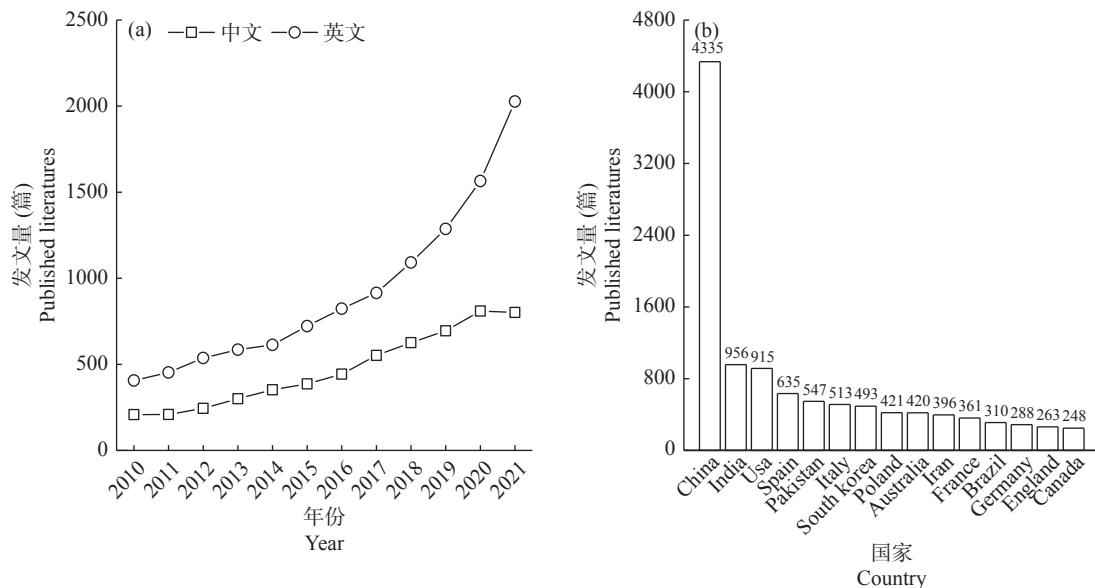


图 1 年度文献及英文文献国家发文量
Fig.1 Annual published literatures and national published literatures with English

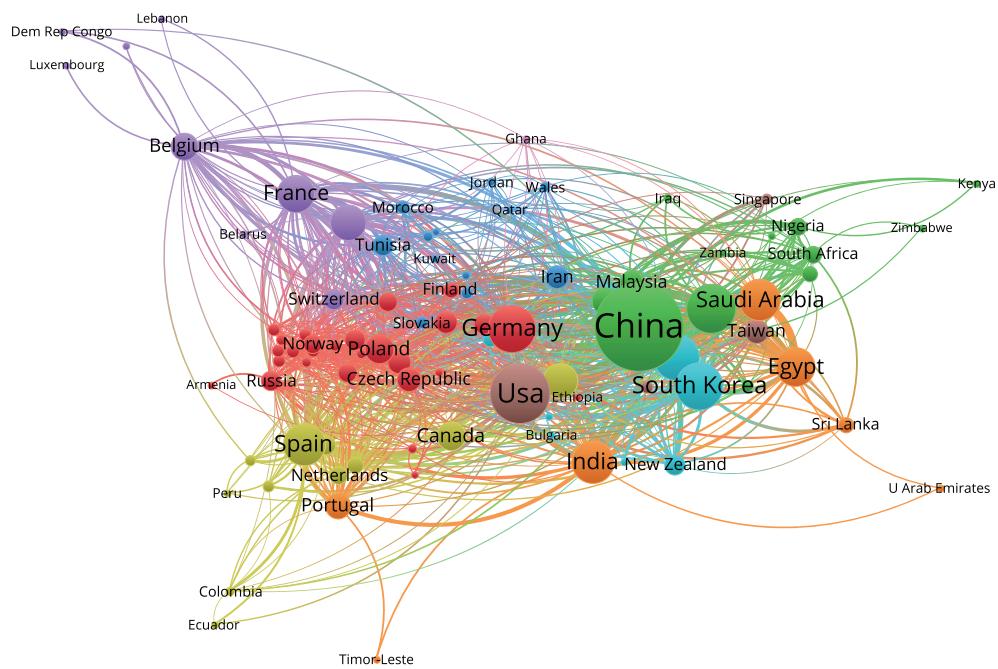
在外文文献国家发文量中（图 1-B），中国发文量占比率高达 25.8%，是排名第二（印度）的 4.5 倍，是排名第三（美国）和排名第四（西班牙）的 4.7 倍和 6.8 倍。可见，我国在农田土壤重金属污染修复领域的研究占有绝对领先地位，对全球农田重金属污染治理工作做出了巨大的贡献。从农田重金属污染修复领域重要发文国家共现知识可视化图中也可看出（图 2），我国与美国、巴基斯坦、澳大利亚等国家进行了密切的科研合作，并且我国在该研究领域的贡献最大。在国家发文量排名前 15 的国家中，大多数都是农业大国，如中国、美国、印度、西班牙、加拿大、澳大利亚等，表明科研能力和社会需求对该研究领域的发展具有重大推动作用，农田重金属污染已成为全球范围内广泛关注的问题^[21]。

2.2 期刊来源分析

通过对 2010~2021 年国内外重金属污染土壤修复领域刊文期刊进行计量统计分析，挖掘出中英文刊文量 TOP10 的期刊（表 1）。中文文献来源共包

了《美丽中国建设评估指标体系及实施方案》等一系列相关政策法规，都积极推动了该领域的研究进程，使得重金属污染领域发文量持续攀升^[17~18]。另外，重金属污染的食品安全事件不断进入大众视野，人们对于重金属污染的认识不断加深，投入该领域的科研人员数量迅速增加，针对不同区域的重金属污染来源和修复技术进行研究，每年发表大量论文^[19~20]。

含 987 种期刊，《农业环境科学学报》在重金属污染土壤修复领域内刊载文献量最多，数量为 198 篇，占据总文献样本数据的 3.52%；其次为《安徽农业科学》《环境工程学报》《资源节约与环保》和《环境与发展》，刊文量分别为 137、124、123 和 104 篇，占比率分别为 2.44%、2.22%、2.19% 和 1.85%；接下来是《环境科学与技术》《广东化工》《生态环境学报》《环境科学》，占比率分别为 1.81%、1.74%、1.56% 和 1.48%。从出版周期可以看出，TOP10 期刊主要为月刊或半月刊，关注的学科主要是环境科学与资源利用。英文文献来源共包含 937 种期刊，刊文量排名前 10 的期刊如表 2 所示，刊文量最多的期刊是 *Environmental Science And Pollution Research*，刊文量达到 804 篇；其次为 *Chemosphere*，刊文量为 714 篇，两者占比率达到 13.8%。接下来为 *Journal of Hazardous Materials*、*Science of the Total Environment*、*International Journal of Phytoremediation*、*Ecotoxicology and*



注:图中圆点之间连线粗细代表合作关系,圆点大小代表发文量。

图2 农田重金属污染修复技术领域国家合作可视化图

Fig.2 Visualization of national cooperation in the field remediation technology of heavy metal pollution in farmland

表1 重金属污染土壤修复技术领域中文文献TOP10期刊及刊文量

Table 1 The TOP10 Chinese literature journals and the number of publications in the field of heavy metal contaminated soil remediation technology

序列 Number	期刊名称 Journal name	刊文量/篇 Literature quantity	复合影响因子 Compound impact factor	综合影响因子 Comprehensive impact factor	出版周期 Publishing period	主要关注学科 Major subject
1	农业环境科学学报	198	3.026	2.221	月刊	环境科学与资源利用
2	安徽农业科学	137	0.716	0.494	半月刊	农作物基础
3	环境工程学报	124	1.785	1.256	月刊	环境科学与资源利用
4	资源节约与环保	123	0.316	0.184	月刊	环境科学与资源利用
5	环境与发展	104	0.426	0.235	月刊	环境科学与资源利用
6	环境科学与技术	102	1.319	0.915	月刊	环境科学与资源利用
7	广东化工	98	0.349	0.243	半月刊	环境科学与资源利用
8	生态环境学报	88	2.667	2.002	月刊	环境科学与资源利用
9	江苏农业科学	83	1.181	0.810	半月刊	农作物基础
10	环境科学	82	3.936	2.954	月刊	环境科学与资源利用

注:中文期刊影响因子及关注学科数据来源于CNKI。

表2 重金属污染土壤修复技术领域英文TOP10期刊及刊文量

Table 2 The TOP 10 English journals and the number of publications in the field of heavy metal contaminated soil remediation technology

序列 Number	期刊名称 Journal name	刊文量/篇 Literature quantity	影响因子 Impact factor	JCI分区 Journal citation reports	引文指标 Citation indicator
1	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	804	4.223	Q2	0.87
2	<i>Chemosphere</i>	714	7.086	Q1	1.43
3	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	536	10.588	Q1	1.85
4	<i>Science of the Total Environment</i>	505	7.963	Q1	1.66
5	<i>International Journal of Phytoremediation</i>	431	3.212	Q2	0.66
6	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	407	6.291	Q1	1.44
7	<i>Environmental Pollution</i>	315	8.071	Q1	1.61
8	<i>Journal of Environmental Management</i>	297	6.789	Q1	1.35
9	<i>Water Air and Soil Pollution</i>	262	2.520	Q3	0.55
10	<i>Journal of Soils and Sediments</i>	206	3.308	Q2	0.8

注:英文期刊为2021年影响因子,数据来源于WOS。

Environmental Safety 和 *Environmental Pollution* 期刊, 其刊文量分别为 536、505、431、407 和 315 篇, 其余期刊刊文量均在 300 篇以下。

通过对国内外重金属污染土壤修复领域刊文期刊进行描述性统计分析, 我们得到了该领域内的中英文核心期刊, 表明这些期刊是科研人员的潜在投稿期刊。在中文期刊中, 《农业环境科学学报》的影响因子最高为 3.026, 该期刊在重金属污染土壤钝化修复领域的认可度和影响力相对较高, 对该领域的关注度较高; 其次是影响因子为 2.667 和 2.619 的《生态环境学报》《环境科学》, 表明这两期刊在重金属污染土壤钝化修复领域影响力相对较大, 但这些期刊的刊文量相对较少, 说明其对该领域的关注程度相对有限, 可能与期刊刊文侧重点有关。《土壤通报》虽然也是在本领域认可度较高的期刊(其复合影响因子为 2.109), 但未进入 TOP10 期刊行列, 一方面是由于该期刊为双月刊, 另一方面是由于该期刊主要关注农业基础科学(土壤养分、土壤有机碳等), 而非环境科学与资源利用。英文期刊中, *Journal of Hazardous Materials* 的影响因子最高为 10.588, 其后 *Environmental Pollution*, *Science of the Total Environment*, *Chemosphere*, *Journal of Environmental Management*, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 影响因子依次为 8.071, 7.963, 7.086, 6.789, 4.872, 均属于 Q1 分区。发文量的最多的 *Environmental Science and Pollution Research*, 影响因子为 4.223, 属于 Q2 分区。可见期刊发文量与影响力并不完全对应, 这可能与期刊主题的契合度、影响力以及投稿周期等有关^[22]。

2.3 作者群体分析

学术活跃作者是推动某个领域学术创新与学科

发展的重要力量, 摸清某领域核心作者的数量和分布及合作关系, 对于精确把握该领域的活跃作者十分重要^[23]。文献中涉及到的所有作者名字进行提取和频次分析, 发现我国土壤重金属污染修复领域出现了徐应明、吴龙华、周静、梁学峰、骆永明、叶正钱、孙约兵、柳丹、马友杰和刘杰等学者团队为活跃学术团体, 基本形成了该领域内核心作者群的分布网络。同时, 这些活跃作者是该领域内的文献高产作者(图 3), 其中徐应明发表中文文献量最多为 46 篇, 吴龙华和周静分别发表 34 和 32 篇, 梁学峰、骆永明、叶正钱、孙约兵、柳丹和马友华等人发文量也均在 20 篇以上。在外文文献中也出现了一批活跃作者, 其中发文量最高的为 Ok Yong Sik 和 Tsang Daniel C W 两位学者, 发文量依次为 83 和 74 篇, 这两位学者的研究重点主要围绕生物炭^[24-25]。其次为 Ali Shafaqat、Rizwan Muhammad、Yang Xiaoe、Xu Heng、Naidu Ravi、Zhang Zengqiang 和 Xu Yingming 七位学者, 其发文量均在 40~50 篇之间, Rinklebe Joerg 作者发文量在 30 篇以上, 上述这些活跃作者是重金属土壤污染修复领域的中坚力量, 其研究方向代表着该领域的研究前沿进展, 持续性推动该领域的发展与前进, 与该领域的演变进程密切相关^[26]。在外文文献 TOP10 作者中有 4 位中国的作者, 可见中国学者对该领域的关注度较高、贡献较大。该结果从外文核心作者科学合作网络可视化图中也可体现出来(图 4), 中国学者占据了很大比例, 能够体现出来中国对重金属污染土壤修复领域的研究热度, 间接说明我国土壤重金属污染问题形式严峻。然而, 国内外重金属污染修复领域的研究学者呈现“小聚体, 大分散”的特点, 且大部分作者

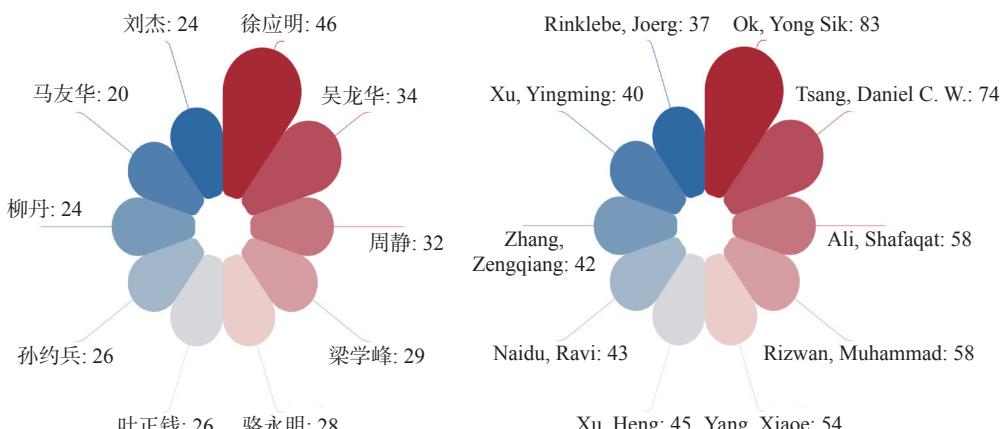
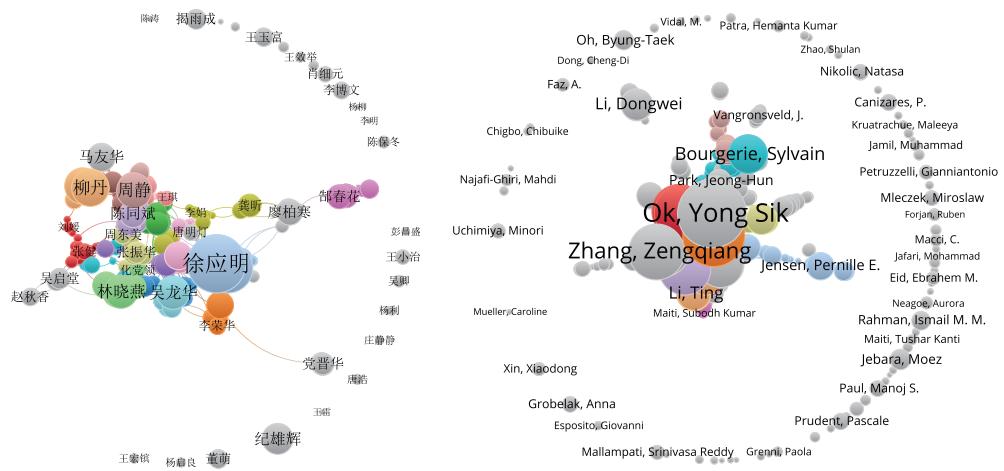


图 3 重金属污染土壤修复技术领域中英文 TOP10 作者及刊文量

Fig.3 The TOP10 authors and publications in Chinese and English in the field of heavy metal-contaminated soil remediation technology



注:核心作者筛选发文量阈值 $P \geq 5$

图 4 重金属污染土壤修复技术领域中英文核心作者合作可视化图

Fig.4 Visualization of the cooperation between Chinese and English core authors in the field of heavy metal-contaminated soil remediation technology

为独立作者,说明该领域内研究学者的合作关系并不密切,有待进一步加强。

2.4 研究热点分析

关键词是文献的研究内容和研究主题的高度概括,通过对关键词的梳理和分析,确认领域内核心关键词,有助于读者了解该领域的发展历程、特点和规律,尤其是反映该领域的研究内容、研究方向和研究热点^[9]。对 2010~2021 年重金属污染土壤修复中英关键词统计,结果表明中文文献样本中共有关键词 5267 个,英文文献样本中共有 17337 个关键词,并构建核心关键词的共现可视化图(图 5 和

图 6)。在中文文献中出现了重金属、土壤、重金属污染、植物修复、土壤修复、镉、土壤污染、修复、修复技术、污染土壤、铅、生物炭、污染、镉污染、生物修复、土壤重金属污染、生态修复、农田土壤、钝化、超富集植物等关键词的节点较大且与其它节点之间的连接强度较强。在英文中出现了重金属、植物修复、镉、铅、植物修复、改良、生物修复、植物提取、土壤修复、生物炭、稳定化、植物固定、砷、生物有效性、锌、铜、EDTA、生物修复、土壤污染、土壤清洗等核心关键词。这些关键词往往代表着该领域内的研究热点,但中文与英文的研究方

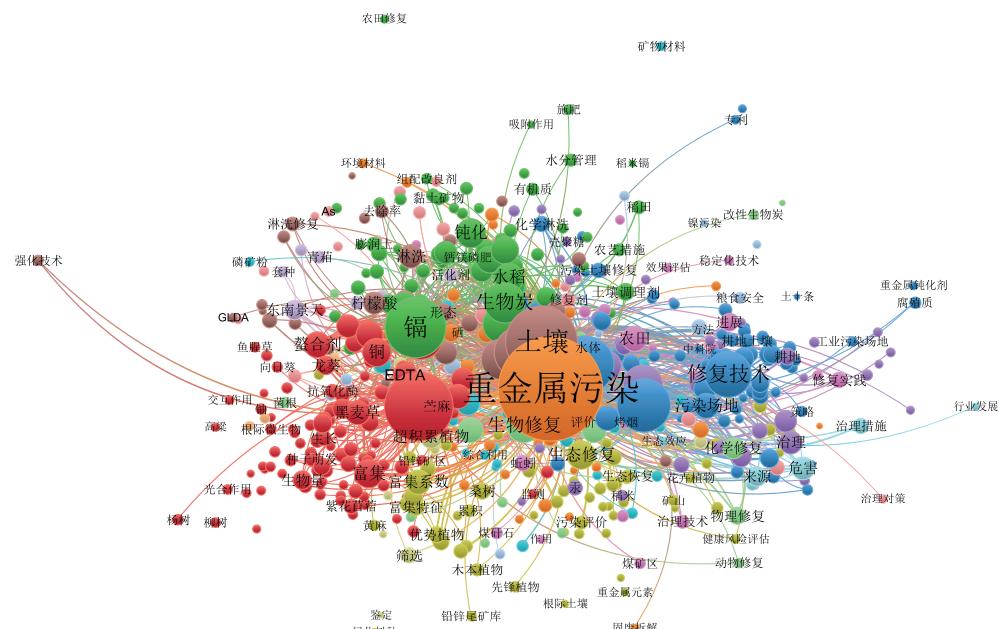


图 5 2010~2021 年中文文献核心关键词可视化图

Fig.5 Visualization of the core keywords of Chinese literature from 2010 to 2021

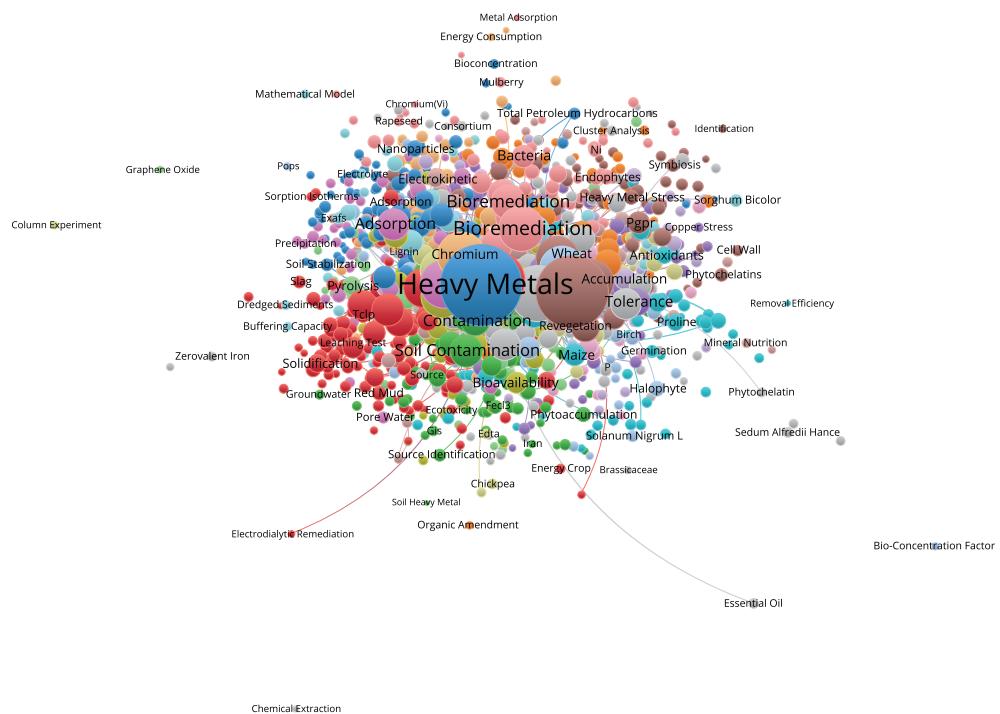


图 6 2010~2021 年英文文献核心关键词可视化图
Fig.6 Visualization of the core keywords of English literature from 2010 to 2021

向并不完全相同。另外，这些核心关键词的网络中心性也较强，并以此形成聚集体，各个关键词之间的联系也较为密切，尤其是固化/稳定化技术和植物修复技术在中英文文献的比重都较强（约占 80%），是目前该领域内的研究重点和热点^[27~28]。另外，在重金属种类上，国内外重点关注的是镉、铅、砷等。

2.5 关键词时空演变趋势分析

通过对年度主要关键词进行时空突现分析，可以更加准确地分析出该领域的研究热点及演变规律^[29]。从图 7-a 可以看出，在 2010~2015 年间，中文文献中出现了螯合剂、表面活性剂以及低/超积累植物（龙葵、苜蓿、油菜、印度芥菜）等突现的关键词，并且侧重于镉、铅等重金属污染的场地修复；从 2016 年开始，研究热点逐渐转移到生物炭、微生物菌剂等各类钝化剂的化学修复中，同时土壤生态、耕地质量及微生物生态重要性提升开始受到关注，侧重于农田的安全利用及健康风险评估。在英文文献突现的关键词中（图 7-b），在 2010~2014 年间，锌、铜、铅、镍等重金属被关注，主要是由于它们具有相似的地球化学性质、分布特征及污染来源，修复技术以螯合、淋洗、生物降解、超级累植物为主，主要涉及场地修复、矿山尾矿修复等；2015~2018 年间对连续提取、转运效率、移动性等的研究

较多，同时也关注到植物根际、根系分泌物等，研究重点在重金属的形态变化及降低其移动性；2018 年后，出现了生物有效性、生物质炭、有机质、氧化胁迫等关键词，更加注重不同修复措施的修复效果及其机制。另外，中文文献关键词中的超富集植物、电动修复、钝化剂的突现强度较高，英文文献关键词中的植物固定、植物提取和生物质炭的突现强度较高。

2.6 农田重金属污染修复技术效果分析

从农田重金属污染修复技术的研究热点可知，镉（Cd）是国内外重点研究的污染元素，由于其移动性强、毒性大、污染面积广，被称为“五毒之首”^[6,30]。基于上述关键词筛选出固化/稳定化技术和植物修复技术在中英文文献的比重较大，为此挑选出与之密切相关的农田土壤 Cd 污染文章进行分析（中文 1428 篇，英文 2844 篓）。统计出的固化/稳定化材料主要包括无机类^[31]、有机类^[32]及其复合材料^[33]。其中，无机材料主要包括石灰类（如粉煤灰、钢渣等）、黏土矿物类、磷酸盐类（磷矿粉、骨灰等）和金属氧化物类等^[34~35]；有机材料包括生物质秸秆、污泥、动物粪便、堆肥和植物残体等^[36]。统计出的植物修复技术主要是植物根际过滤技术（如低积累品种的筛选）和叶面阻控技术^[37~38]。并对筛选的试验地

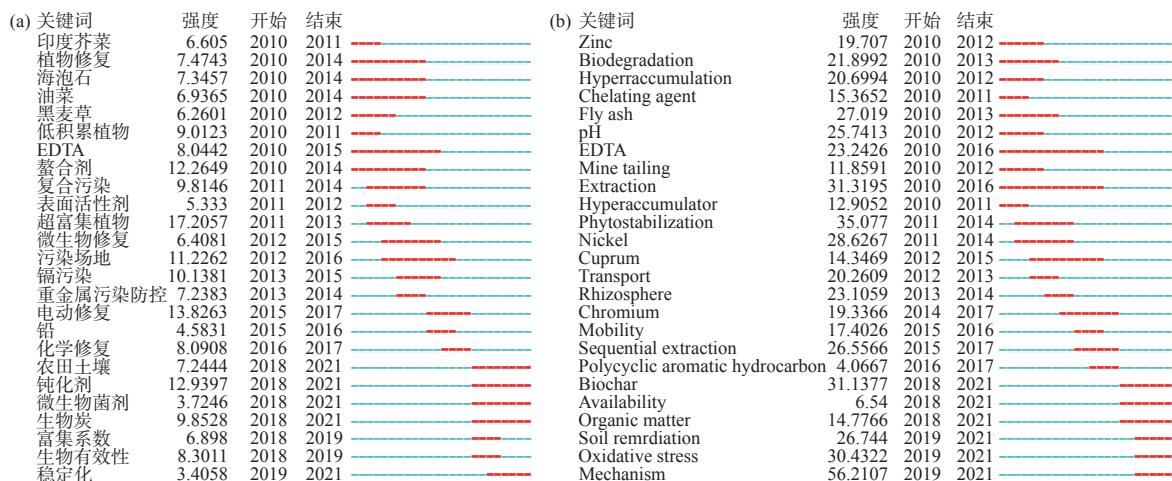


图 7 2010~2021 年中英文核心关键词时空突现分析

Fig.7 Analysis on the temporal and spatial trend of core keywords in Chinese and English from 2010 to 2021

分别统计其土壤 Cd 本底值、有机质含量、土壤 pH 值、施用前后土壤 Cd 生物有效性降低比率、作物籽粒降低比率以及产量变化(表 3)。

表 3 农田土壤 Cd 污染修复技术效果^[15-16]
Table 3 Effects of remediation technology of Cd pollution farmland soil

修复材料 Remediation stuff	样本数 sample number	土壤Cd含量均值 Mean value of soil Cd content (mg kg ⁻¹)	土壤pH值 Mean value of soil pH	土壤有机质均值 Mean value of soil organic matter (g kg ⁻¹)	Cd生物有效性降低率 Reduction rate of Cd bioavailable (%)	作物籽粒降Cd率 Reduction rate of crop Cd content (%)	产量提升率 Yield rising rate (%)
无机	石灰类物质	123	1.71	5.50	31.54	29.09	30.84
	磷酸盐类	74	3.34	6.41	29.21	22.16	23.51
	黏土矿物类	103	1.72	5.92	38.96	25.48	42.97
	金属氧化物类	135	1.93	5.70	31.35	22.98	37.35
	无机组配类	89	4.95	5.47	31.92	50.31	42.19
有机	有机物料	143	2.86	5.79	31.07	7.51	19.37
	生物炭	85	4.03	6.03	22.35	15.90	35.70
	无机 + 有机组配类	81	2.78	6.22	0.967	41.09	42.72
	叶面阻控	79	3.11	6.22	23.33	—	39.95
	品种筛选	182	1.39	6.03	33.86	—	67.96

由表 3 可知, 试验土壤 pH 值在 5.4~6.4 之间, 多为酸性土壤, 土壤 Cd 含量超出 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险筛选值》(为 0.4 mg kg⁻¹) 的 3~12 倍, 多数已超出了 GB 15618—2018《农用地土壤污染风险管控值》(为 2.0 mg kg⁻¹)。从降低土壤 Cd 生物有效性的比率来看, 无机组配类和无机—有机组配类的效果最明显(分别为 50.3%、41.1%), 是无机类和有机类的 2~3 倍。从降低农作物可食部位(籽粒)的 Cd 比率来看, 低 Cd 积累品种的种植效果最好, 降 Cd 率达 67.9%, 其次为黏土矿物类、无机组配类和无机—有机组配类, 分别为 43.0%、42.2% 和 42.7%, 叶面阻控也表现出较好的降 Cd 效果(为 39.9%)。从产量的提升比率来看, 磷酸盐类、生物质炭和有机物料类的效果较好(分别为 25.2%、

19.9%、18.3%)。因此, 综合在降低土壤 Cd 生物有效性、籽粒 Cd 含量及作物产量的提升方面, 我们认为将低积累作物品种种植与无机—有机组配及叶面阻控等技术措施联合施用在 Cd 污染修复和治理方面具有很好的效果^[39-40], 同时也应加强对生物质炭的研究^[41]。另外, 微生物菌剂、农艺措施(如间作)也是近年来的研究热点, 常以小规模田间试验展开, 未来需进一步加强对其在大田试验中的研究^[42-44]。

综上所述, 经过十多年的探索研究, 我国在农田土壤重金属(尤其是 Cd)污染修复或治理的实施中取得了较为丰富的经验和治理准则, 逐渐形成了一套以农作物(尤其对主粮籽粒)安全生产为目标的安全利用集成技术(图 8), 但未来还需将低积累作物品种选育、土壤物理化学调控(无机—有机组

配)、农艺措施(如间作、水分调控)、叶面阻控、微生物菌剂等技术联合配施进行深化使用^[45-47]。

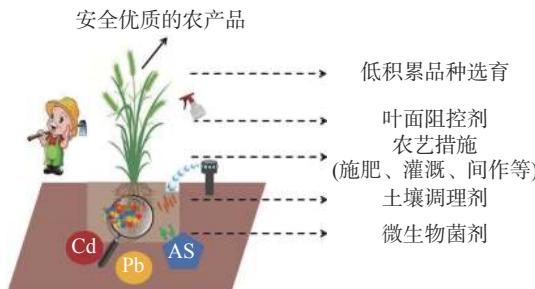


图 8 以农作物安全生产为目标的农田重金属安全利用技术集成

Fig.8 Technology integration of safe utilization of heavy metals in farmland aiming at crop safety production

3 结论

(1) 在 2010~2021 年间, 我国在农田重金属污染修复领域的研究在国际上占有绝对领先地位(发文量占比率高达 26.8%), 对全球重金属污染农田土壤治理与修复具有杰出贡献。

(2) 固化/稳定化技术和植物修复技术是我国目前在农田重金属污染修复领域的研究重点和热点。以 Cd 污染为例, 从田间试验的修复效果来看, 低积累作物品种种植、无机—有机调理剂组配及叶面阻控技术等表现出良好的效果, 未来还需将其与农艺措施(套间作、水分调控)、微生物菌剂等技术精准化联合施用, 形成一整套以农作物(尤其对主粮籽粒)安全生产为目标的集成技术。

参考文献:

- [1] 张小敏, 张秀英, 钟太洋, 等. 中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J]. 环境科学, 2014, 35(2): 692~703.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报[EB]. 2014, 17(4). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm.
- [3] 熊敏先, 吴 迪, 许向宁, 等. 土壤重金属镉对高等植物的毒性效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2021, 16(6): 133~149.
- [4] Karri V, Schuhmacher M, Kumar V. Heavy metals (Pb, Cd, As and MeHg) as risk factors for cognitive dysfunction: A general review of metal mixture mechanism in brain[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2016, 48: 203~213.
- [5] 鲁力菲. 我国耕地资源价值体系研究综述[J]. 山西农业科学, 2015, 43(9): 1215~1218.
- [6] Sun Y, Li H, Guo G, et al. Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 251: 109512.
- [7] 朱亮, 孟宪学. 文献计量法与内容分析法比较研究[J]. 图书馆工作与研究, 2013, (6): 64~66.
- [8] 刘杏梅, 赵健, 徐建明. 污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于 Web of Science 数据库的计量分析[J]. 土壤学报, 2021, 58(2): 445~455.
- [9] 胡泽文, 孙建军, 武夷山. 国内知识图谱应用研究综述[J]. 图书情报工作, 2013, 57(3): 131~137+84.
- [10] Van Eck N J, Waltman L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping[J]. *Scientometrics*, 2010, 84(2): 523~538.
- [11] 学术点滴, 文献计量. COOC—一款用于文献计量和知识图谱绘制的新软件[EB/OL], (2020-01-12)[2022-01-30]. https://mp.weixin.qq.com/s/8RoKPLN6b1M5_jCk1J8UVg.
- [12] 张力, 赵星, 叶鹰. 信息可视化软件 CiteSpace 与 VOSviewer 的应用比较[J]. 信息资源管理学报, 2011, (1): 95~98.
- [13] 吴志红, 胡志荣, 杨鲁捷, 等. 基于数据库分析的机构发文量及学术影响力实证研究[J]. 情报科学, 2013, 31(11): 69~73.
- [14] 牛硕, 陈卫平, 杨阳, 等. 基于文献计量的重金属污染土壤修复材料研究热点和前沿分析[J/OL]. 环境工程技术学报, 1-13[2022-04-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5972.X.20220321.1932.006.html>.
- [15] 王娟, 苏德纯. 基于文献计量的小麦玉米重金属污染农田修复治理技术及效果分析[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(3): 493~500.
- [16] 杜志鹏, 苏德纯. 稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11): 2409~2417.
- [17] 陈卫平, 谢天, 李笑诺, 等. 土壤污染防治技术体系建设思考[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 557~568.
- [18] 新华社. 中华人民共和国土壤污染防治法[J]. 环境经济, 2018(17): 12~25.
- [19] 李静, 岳小琳, 程月红, 等. 土壤重金属污染现状及其对蔬菜重金属残留影响的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(16): 5299~5305.
- [20] 张洁琼, 周明慧, 田巍, 等. 粮食中重金属污染风险研究进展[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(6): 166~17.
- [21] 胡远妹, 周俊, 刘海龙, 等. 基于 Web of Science 对土壤重金属污染修复研究的计量分析[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 707~720.
- [22] 甘琳, 李刚. CSSCI 来源期刊发文机构固化现象的成因与影响——以国情档期刊为例[J]. 图书馆论坛, 2021, 41(02): 56~66.
- [23] 李晓晓, 韩瑞芳, 陈倩倩, 等. 土壤重金属迁移转化领域研究的文献计量分析[J]. 土壤通报, 2020, 51(3): 733~740.
- [24] Palansooriya K N, Li J, Dissanayake P D, et al. Prediction of Soil Heavy Metal Immobilization by Biochar Using Machine Learning[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(7): 4187~4198.
- [25] Li J, Li L, Suvarna M, et al. Wet wastes to bioenergy and biochar: A critical review with future perspectives[J]. *Science of The Total Environment*, 2022, 817: 152921.

- [26] 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, (8): 480–481.
- [27] Li C, Ji X, Luo X. Phytoremediation of Heavy Metal Pollution: A Bibliometric and Scientometric Analysis from 1989 to 2018[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(23): 4755.
- [28] 吕凯, 张彩丽. 中国土壤重金属污染修复研究的文献计量分析[J]. *农学学报*, 2017, 7(5): 56–59+95.
- [29] 张晓晴, 李雅, 魏珊, 等. 基于CiteSpace土壤重金属污染防治的知识图谱研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(4): 133–143.
- [30] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil Contamination in China: Current Status and Mitigation Strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750–759.
- [31] Sharma A, Nagpal A K. Soil amendments: a tool to reduce heavy metal uptake in crops for production of safe food[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 2018, 17(1): 187–203.
- [32] Khan M A, Khan S, Khan A, et al. Soil contamination with cadmium, consequences and remediation using organic amendments[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 601: 1591–1605.
- [33] Bashir S, Adeel M, Gulshan A B, et al. Effects of Organic and Inorganic Passivators on the Immobilization of Cadmium in Contaminated Soils: A Review[J]. *Environmental Engineering Science*, 2019, 36(9): 986–998.
- [34] Yi X, Xuefeng L, Yingming X, et al. Remediation of Heavy Metal-Polluted Agricultural Soils Using Clay Minerals: A Review[J]. *Pedosphere*, 2017, 27(2): 193–204.
- [35] 陈远其, 张煜, 陈国梁. 灰石对土壤重金属污染修复研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(8): 1419–1424.
- [36] 曾晓舵, 王向琴, 涂新红, 等. 农田土壤重金属污染阻控技术研究进展[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(9): 1900–1906.
- [37] 徐剑锋, 王雷, 熊瑛, 等. 土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2017, 7(3): 366–373.
- [38] Raza A, Habib M, Kakavand S N, et al. Phytoremediation of Cadmium: Physiological, Biochemical, and Molecular Mechanisms[J]. *Biology-Basel*, 2020, 9(7): 177.
- [39] 高宇, 程潜, 张梦君, 等. 镉污染土壤修复技术研究[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(10): 103–110.
- [40] 徐丽萍, 梁乐缤, 李兵, 等. 不同修复技术对土壤有效态镉含量及作物镉吸收的影响[J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(1): 207–211.
- [41] 李江遐, 吴林春, 张军, 等. 生物炭修复土壤重金属污染的研究进展[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(12): 2075–2081.
- [42] 陈保冬, 于萌, 郝志鹏, 等. 丛枝菌根真菌应用技术研究进展[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 1035–1046.
- [43] 李非里, 邵鲁泽, 吴兴飞, 等. 植物修复重金属强化技术和间套种研究进展[J]. *浙江工业大学学报*, 2021, 49(3): 345–354.
- [44] 张玮川, 李剑, 王志宇, 等. 内生菌-植物联合修复污染土壤研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38(3): 355–364.
- [45] Zheng Y, Xiao C, Chi R. Remediation of soil cadmium pollution by biomimetic precipitation using microbial-induced precipitation: a review[J]. *World Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2021, 37(12): 208.
- [46] Zhang Y, Zhang Y, Akakuru O U, et al. Research progress and mechanism of nanomaterials-mediated in-situ remediation of cadmium-contaminated soil: A critical review[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2021, 104: 351–364.
- [47] Li C, Zhou K, Qin W, et al. A Review on Heavy Metals Contamination in Soil: Effects, Sources, and Remediation Techniques[J]. *Soil & Sediment Contamination*, 2019, 28(4): 380–394.

Remediation Technology and Effect Analysis of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil Based on Bibliometrics

SUN Qi-zhuang, YANG Jin-kang, SUI Fu-qing, QIN Shi-yu, LI Chang,

ZHANG Wen-wen, XU Jia-yang, WANG Long*, ZHAO Peng*

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: The latest frontier progress and research hotspots in the remediation of heavy metal pollution in farmland soils at home and abroad were reviewed to summarize the effective remediation and treatment technologies and the practical effects, so as to provide a basis for the safe use of heavy metal-contaminated farmland in China. In this study, COOC and VOSviewer bibliometric tools were used, and the full-text database of China Knowledge Network (CNKI) and Web of Science core collection database (WOS) were used as data retrieval sources to visualize and analyze the knowledge map of relevant literature in the field of remediation and management of heavy metal pollution in agricultural soil fields from 2010 to 2021. The number of domestic and foreign research literature on heavy metal remediation in agricultural soil fields has been growing rapidly during 2010 ~ 2021, and the growth rate of English literature was significantly higher than that of Chinese literature. China is the leading researcher in the field of remediation of heavy metal pollution in agricultural fields (with the highest publication rate of 26.8%) and has contributed the most to the global heavy metal pollution control efforts. The TOP 3 journals of domestic and foreign publishing in this field include: *Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, *Anhui Agricultural Science*, *Journal of Environmental Engineering*, *Environmental Science and Pollution Research*, *Chemosphere*, *Journal of Hazardous Materials*. Heavy metals such as cadmium (Cd), lead and arsenic, etc. were attracted much attention from researchers. The research scholars at home and abroad were characterized by "small clusters, big dispersion", and the cooperation needs to be further strengthened. Based on the analysis of keywords, the research hotspots were solidification/stabilization technology and phytoremediation (with a proportion of 80%) in both Chinese and English literature. Taking Cd pollution as an example, the remediation effects of reducing Cd in field trials were included in the low-accumulation crop varieties (the rate of Cd reduction in grains reached 67.9%), inorganic-organic combination (42.7%) and foliar resistance control technology (39.9%). However, it is still necessary to combine them with agronomic measures (e.g. intercropping, water regulation) and microbial fungicides to achieve better field restoration and governance effect.

Key words: Heavy metal pollution; Farmland; Remediation technology; Bibliometric

[责任编辑：高晓丹]