

农田土壤重金属污染修复研究进展 ——基于 CiteSpace 知识图谱分析

管秀静^{1,2}, 苏 燕², 阿娜尔¹, 田楚琪¹, 欧成浩¹, 姜绍元¹,

BM. Soran Dinki¹, 王 坚², 党秀丽^{1*}

(1. 沈阳农业大学土地与环境学院/土肥高效利用国家工程研究中心/农业农村部东北耕地保育重点实验室, 辽宁 沈阳 110866;

2. 沈阳环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要: 以中国知网及 Web of Science 数据库的文献资料为数据源, 利用 CiteSpace 文献计量工具, 对 2000~2021 年农田土壤重金属污染修复研究领域的相关中外文文献从发文量、发文国家及作者、关键词等进行分析, 以此探讨国内外该领域研究现状及未来发展趋势。结果表明, 农田土壤重金属污染修复研究文献数量呈快速增长态势, 中国、美国、韩国等是外文文献发文量较多的国家; 中国科研机构在外文文献发文数量上所占比重最大, 表明我国在该领域对国际学术的影响力较大; 从关键词出现频次分析可知, 当前该领域主要研究内容是土壤镉、铅等多种金属的复合污染的累积特征及重金属复合污染的修复, 而植物修复技术在农田土壤重金属污染修复研究中的应用是当前该领域研究热点; 未来土壤重金属污染修复领域的主要研究方向为物理、化学联合生物等多种修复技术组成的综合修复体系。

关 键 词: 重金属; 修复; 文献计量分析; CiteSpace; 农田土壤

中图分类号: X5 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)02-0573-11

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2022102001

管秀静, 苏 燕, 阿娜尔, 田楚琪, 欧成浩, 姜绍元, BM. Soran Dinki, 王 坚, 党秀丽. 农田土壤重金属污染修复研究进展——基于 CiteSpace 知识图谱分析 [J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 573 - 583

GUAN Xiu-jing, SU Yan, A Na-er, TIAN Chu-qi, OU Cheng-hao, JIANG Shao-yuan, BM. Soran Dinki, WANG Jian, DANG Xiu-li. Research Progress on Remediation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils at Home and Abroad - Based on CiteSpace Knowledge Map Analysis[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(2): 573 - 583

目前我国土地正遭受着重金属的污染, 受污染面积约为 $0.1 \times 10^8 \text{ hm}^2$ [1]。2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示, 我国土壤重金属污染现状严峻, 铬、锌、镉、铜、砷、铅、汞、镍等 8 种无机元素为主要超标元素, 超标点位占全部污染物超标点位数的 82.8% [2]。粮食产量每年因土壤重金属污染减少约 $1000 \times 10^4 \text{ t}$, 遭受的经济损失合计约为 $200 \times 10^8 \text{ 元}$ [3]。土壤中的重金属很难自然降解, 因其具有毒性且易通过食物链在植物、动物和人体内累积, 会对生态环境以及人体健康构成严重威胁。因此, 农田土壤重金属污染修复技术研究越来越得到国内外学术界的关注。

本研究利用定性与定量相结合的方式, 客观的对我国农田土壤重金属污染修复的现有研究成果进行梳理, 通过收集农田土壤重金属污染修复的相关

资料, 基于 CiteSpace 绘制科学知识图谱, 对 2000~2021 年农田土壤重金属污染修复相关文献进行量化分析, 揭示农田土壤重金属污染修复领域的研究现状, 并通过中外文献研读的方式对该领域研究的热点与其未来发展方向进行分析与展望, 以期明晰该领域国内外目前研究现状, 有助于进一步推动该领域的研究。

1 数据来源与方法

1.1 数据来源

本研究中文文献数据取自中国学术期刊出版总库 (CNKI 总库) 数据库中的核心合集, 检索方式为高级检索, 检索文献发表时间设置为 2000~2021 年, 检索“主题”或“关键词”=“重金属”并含“农田”并含“土壤修复”, 共检索出 417 篇文献。

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2023-01-30

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1806400)、国家重点研发计划项目 (2017YFD0801103) 资助

作者简介: 管秀静 (1993-), 女, 辽宁朝阳人, 在读硕士研究生, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: Yoilll@163.com

*通讯作者: E-mail: dxi@syou.edu.cn

外文文献数据取自美国科学信息研究所 (Institute for Scientific Information, ISI) Web of Science (WOS) 数据库中的 Web of Science™ 核心合集, 检索文献发表时间设置为 2000~2021 年, 以 “Article” 和 “Review” 精炼, 并以 “TS = (soil heavy metal*) AND 检索主题词: TS = (remediation or passivation or repair)” 等与检索主题词相关的上下近义词为检索条件进行高级检索, 共获取文献 1139 篇。

1.2 研究方法

通过共被引分析理论和寻径网络算法, CiteSpace 可视化软件对某一领域的已有文献进行分析, 可得到包含关键词、机构、国家、作者等不同种类的时间轴和共现图谱, 因此 CiteSpace 可视化软件可以帮助研究者分析某领域、可视化该领域演化路径、探测研究前沿并推测发展方向^[4]。

本文借助 CiteSpace5.7.R5 可视化软件和 Origin 绘图软件, 以 CNKI 核心数据库和 WOS 核心数据库中有关农田土壤重金属污染修复的研究中外文献为样本, 通过文献发文年限和发文量统计, 双图叠加分析推演农田土壤重金属污染修复领域的研究历程; 通过研究国家和机构的合作网络图谱, 揭示该领域全球研究力量的分布情况和世界合作关系; 通过关键词突现分析揭示该领域不同发展阶段的研究热点; 通过共被引网络的聚类分析提炼出该领域的主要研究主题。从宏观上将该领域的研究现状可视化, 揭示其阶段研究热点及未来发展态势, 以期今后的相关研究提供参考。

2 结果与讨论

2.1 发文数量

发文量是某一领域发布文章的数量之和, 可直观地反映学术界对该领域的重视程度, 一般情况下该领域发文量越多, 其研究越活跃^[5]。通过农田土壤重金属污染修复领域研究文献量的时间分布情况 (图 1), 可基本了解该领域国际研究的活跃程度。由图 1 可知, 农田土壤重金属污染修复相关外文文献数量可以分为缓慢增长、下降、迅速增长 3 个阶段, 2014 年发文量增加态势明显。中文文献数量呈现缓慢增长、波动变化的趋势, 个别年份有小幅波动, 且发文量增加较外文文献为缓慢。

在 2000~2021 年间 CNKI 农田土壤重金属污染修复发文时间及数量分布见表 1。2000~2016 年间,

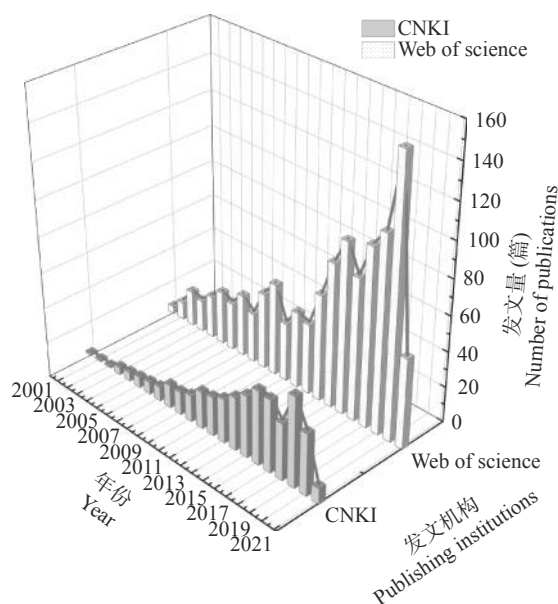


图 1 年度发文量

Fig.1 Annual publication amount

发文数量整体属于缓慢增长阶段, 该阶段累积发文量 249 篇。2013 年以前每年发文数量均少于 25 篇, 直至 2014 年发文数量首次突破 30 篇。在这一阶段农田土壤重金属污染修复属于 “起步” 时期; 2016~2021 年间, 文献发表数量则呈现波动变化, 但整体发文数量占总文献数量近 1/2, 说明该领域相关研究主要集中在 2016 年以后, 与 2016 年国务院印颁布的《土壤污染防治行动计划》有关, 该法规强调要以改善土壤环境质量为核心, 中央财政设立土壤污染防治专项资金, 用于土壤环境调查与监测评估、监督管理、治理与修复等工作。2018 年《建立市场化、多元化生态补偿机制行动计划》、《中华人民共和国土壤污染防治法》、《关于加强涉重金属行业污染防控的意见》和《国家乡村振兴战略规划》四项法规的颁布是党中央、国务院推进生态文明建设, 坚决向污染宣战的一项重大举措, 极大地推动了土壤污染治理工作, 所以 2019 年发文最多, 文献数量为 51 篇, 占比 12.2%。

2000~2010 年间, Web of Science 发文数量整体趋于缓慢增长阶段, 该阶段累积发文量 29 篇 (表 1)。2009 年以前每年发文数量均少于 40 篇, 至 2009 年首次突破 40 篇。在这一时期农田土壤重金属污染修复属于 “起步” 阶段; 2009~2011 年间文献数量则呈现波动变化; 2014~2020 年间, 文献数量呈现出迅速增长趋势, 2020 年文献数量比 2019 年增长 3.8%, 累积百分比为 95.5%, 2020 年发文最多,

表 1 2000 ~ 2021 年农田土壤重金属污染修复文献发表时间及数量分布

Table 1 Distribution of time and quantity of published articles on remediation of heavy metal pollution in farmland soil from 2000 to 2021

年份 Year	CNKI				Web of Science			
	发文量（篇） Number of articles	百分比 Percentage	累积发文量（篇） Cumulative Publication	累积百分比 Cumulative Percentage	发文量（篇） Number of articles	百分比 Percentage	累积发文量（篇） Cumulative Publication	累积百分比 Cumulative Percentage
2000	1	0.2%	1	0.2%	4	0.4%	4	0.4%
2001	1	0.2%	2	0.5%	10	0.9%	14	1.2%
2002	1	0.2%	3	0.7%	20	1.8%	34	3.0%
2003	4	1.0%	7	1.7%	18	1.6%	52	4.6%
2004	5	1.2%	12	2.9%	24	2.1%	76	6.7%
2005	6	1.4%	18	4.3%	30	2.6%	106	9.3%
2006	7	1.7%	25	6.0%	27	2.4%	133	11.7%
2007	8	1.9%	33	7.9%	35	3.1%	168	14.7%
2008	13	3.1%	46	11.0%	28	2.5%	196	17.2%
2009	13	3.1%	59	14.1%	43	3.8%	239	21.0%
2010	15	3.6%	74	17.7%	52	4.6%	291	25.5%
2011	21	5.0%	95	22.8%	33	2.9%	324	28.4%
2012	22	5.3%	117	28.1%	43	3.8%	367	32.2%
2013	25	6.0%	142	34.1%	40	3.5%	407	35.7%
2014	30	7.2%	172	41.2%	60	5.3%	467	41.0%
2015	35	8.4%	207	49.6%	81	7.1%	548	48.1%
2016	42	10.1%	249	59.7%	96	8.4%	644	56.5%
2017	41	9.8%	290	69.5%	80	7.0%	724	63.6%
2018	32	7.7%	322	77.2%	100	8.8%	824	72.3%
2019	51	12.2%	373	89.4%	110	9.7%	934	82.0%
2020	35	8.4%	408	97.8%	154	13.5%	1088	95.5%
2021	9	2.2%	417	100.0%	51	4.5%	1139	100.0%

文献数量为 154 篇。

2.2 发文作者

2000 ~ 2021 年间在 CNKI 和 web of science 中发表关于农田土壤重金属污染修复文章达 5 篇以上的作者共 7 位，利用 CiteSpace5.7.R5 绘制作者合作网络图谱（图 2），可以看出周冬美、周清、徐应名、刘永兵和李翔等人是在 CNKI 中发表文章较多的作者，也是中国团队的核心之一。中文文献作者群体总体呈小集中大分散态势，可以看出科研团队内部

合作紧密，但科研团队与团队之间连线较少，说明其合作较为匮乏。在 Web of Science（WOS）数据库中 Web of Science™ 核心数据库中发文较多的作者有 HENG XU 和 YONG SIK OK（发表 7 篇），FMG TACK、KR REDDY 和 GUANG MING ZENG（发表 5 篇），根据作者与作者之间的连线密度，可以得出团队内部合作频繁，团队与团队之间交流较多。

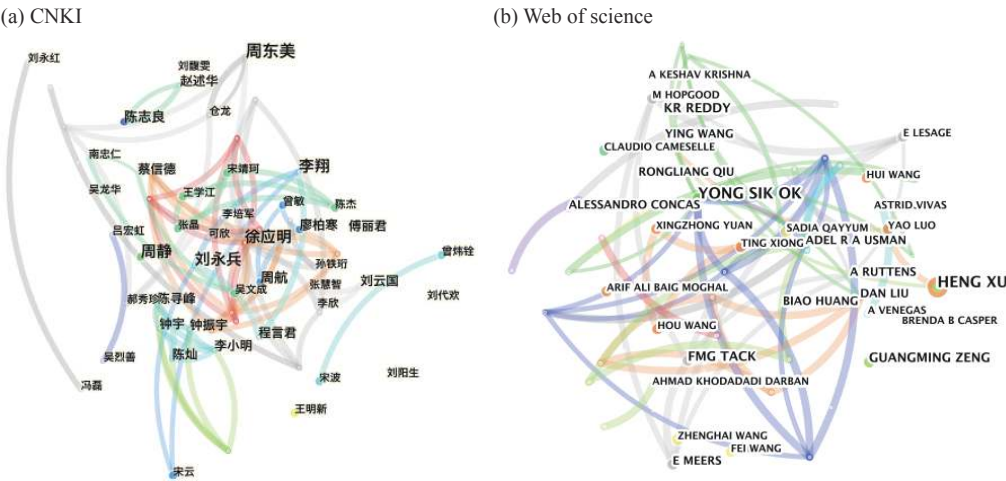


图 2 研究作者合作网络图谱
Fig.2 Authors' collaboration network map

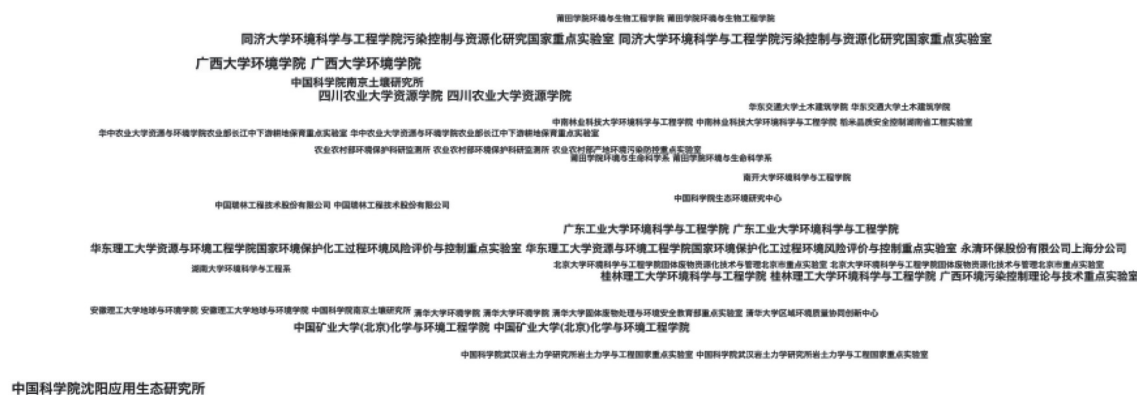
2.3 发文机构

通过 CiteSpace5.7.R5 可视化软件的连接线、中心性、密度值等量化值来分析国家和机构之间的合作紧密度,从而判断某国家或机构对农田土壤重金属污染修复研究领域的关注程度,给后续开展的国际合作提供参考^[6]。

CNKI 研究机构的共现图谱密度值近乎为 0,表明发文在 CNKI 中的研究机构合作关系并不紧密,web of science 研究机构共现图谱的密度值为 0.0033,说明发文在 web of science 中的研究机构之间的合作

较 CNKI 中的研究机构合作紧密的多(图 3)。中国的研究机构的中心性最大,说明其在农田土壤重金属污染修复研究领域的贡献巨大。其中,中心度最高(0.14)的为中国科学院,表明国内该领域研究主要围绕中国科学院进行展开。另外,韩国的高丽大学(Korea Univ)、美国的伊利诺伊大学(Univ Illinois)、沙特阿拉伯国王大学(King Saud Univ)等国外机构也对该领域有较多的关注。国家共现图谱表明该领域的研究以中国、美国和韩国为主要贡献国家。

(a) CNKI



(b) Web of science



图 3 农田土壤重金属污染修复研究机构共现图谱

Fig.3 Co-occurrence map of research institutions for remediation of heavy metal pollution in farmland soil

2.4 研究热点与前沿分析

2.4.1 研究热点 借助 CiteSpace5.7.R5 可视化软件,

节点类型为关键词,选取出现次数或引用次数最多的项目得到共现图谱(图 4)。为了探寻关键词在共

线网络中的核心力度与重要性, 本研究筛选了中心度均 ≥ 0.05 的前十个关键词, 通过分析这些核心关

键词第一次出现的时间变化来推测该领域研究重点的转变, 从而了解其研究的发展历程。

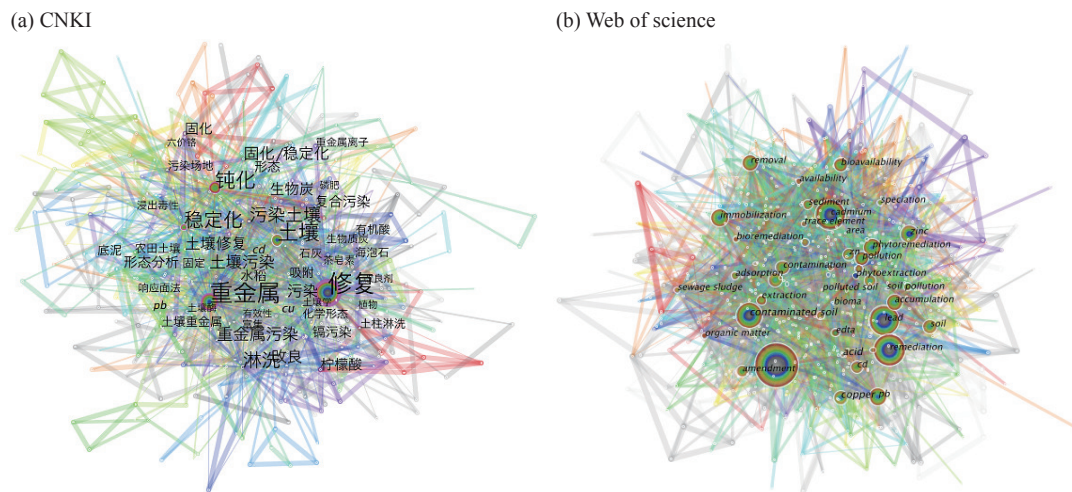


图4 关键词共现网络图谱

Fig.4 Keywords co-occurrence network map

中文关键词主要集中在农田土壤重金属污染的介绍以及该领域的物理化学修复方法。2006~2011年这个时间段“土壤修复”在整个研究中起到了基础性的作用。结合关键词分析可知, 钝化、稳定化、淋洗是土壤重金属污染修复的主要修复方法。钝化修复是通过向土壤中施加一些活性钝化修复材料, 改变重金属在土壤中的赋存状态, 降低土壤中重金属的有效浓度、迁移性和生物有效性^[7]。稳定化技术是将重金属污染物转化为迁移能力弱、不易溶解和毒性更小的形式^[8]。淋洗技术是向污染土壤中加入相应的淋洗剂, 使污染土壤中的污染物质从固相中转移至液相中, 达到清洁土壤的效果^[9]。热点词的出现往往伴随着国家相关政策的出台, 2018年的《中华人民共和国土壤污染防治法》中的第九条指出: 国家支持土壤污染风险管控和修复、监测等污染防治科学技术研究开发、成果转化和推广应用, 鼓励土壤污染防治产业发展, 加强土壤污染防治专业技术人才培养, 促进土壤污染防治科学技术进步。这些相关政策、法规的出台为土壤重金属污染修复提供了资金及法治保障。

外文文献关键词主要集中在土壤重金属污染代表性污染物的种类和植物修复2个方面。结合关键词分析可知, 镉、锌和铜等重金属元素是农田土壤重金属污染物的主要来源, 镉是毒性最强的5种重金属元素之一, 它能占用其他必需元素金属离子的运输通道, 导致植物对营养元素的吸收以及植物的

代谢活性降低, 抑制植物的生长^[10-11]。镉污染对作物生长、土壤微生物及土壤酶活性均具有不同程度的影响^[12]; 铅与其它污染物相比, 在环境中的滞留时间较长, 在较长的时间内可被作物吸收, 通过食物链进入人体。如果土壤中锌的浓度过高, 植物生态毒性和土壤微生物问题会比较严重, 同时也会影响地下水水质安全^[13]; 土壤中过量的Cu会对植物产生毒害, 而且能够通过食物链的富集作用对人类健康造成严重威胁^[14]。土壤重金属污染的修复方法主要包括物理、化学和生物修复3种。其中生物修复技术主要包含动物、植物修复技术和微生物修复技术。植物修复是指通过植物富集重金属的方式降低土壤中的重金属污染物, 甚至将其移出的环境污染的治理技术。它依据修复过程和机理分为: 植物稳定、植物挥发和植物提取^[15]。有研究表明, 通过植物萃取、植物修复、生物修复等修复技术通过吸附等机理来修复受重金属污染的土壤成为当时时下研究热点^[16]。

2.4.2 研究主题 通过CiteSpace可视化软件中采用对数极大似然率的算法, 可以将关系紧密的关键词进行聚类, 该类别的聚类名称是同一聚类中的最大值, 聚类可以有效地把握农田土壤重金属污染修复的研究主题。本研究绘制了共被引网络的时间线图(图5), 通过分析相关文献加以梳理, 以时间线图呈现该领域研究的主要研究内容与时间跨度, 对各个主题进行分析。

效的重要指标^[25], 不仅可作为评价土壤肥力的依据, 也可以评价其土壤质量。重金属污染可以影响土壤酶活性, 因此土壤酶的活性也能够直观有效地反映出土壤重金属污染的修复效果^[26]。②围绕土壤重金属污染修复技术及评价方法的研究(#1、#3、#4)。“钝化”(#1)、“淋洗”(#3) 2 个显著聚类为化学修复技术。化学钝化修复其原理是向土壤中添加相应的稳定化剂, 通过吸附、沉淀、络合、离子交换和氧化还原等一系列化学反应降低污染物的生物有效性减小其可迁移性来达到其修复目的^[27]; 钝化技术多以生物炭为钝化剂修复水稻土中的镉等重金属^[28]。淋洗是有效且耗时短的重金属污染土壤治理技术, 常用的淋洗剂有乙二胺二琥珀酸(EDDS)、乙二胺四乙酸(EDTA)以及柠檬酸等螯合剂^[29-32]。一般污染年限大的土壤的螯合剂需要过量投入, 使其重金属活性变高来取得更好洗脱效果^[33]。通过判断重金属修复后的浸出毒性、形态分析等“稳定化”(#4) 程度, 来评价修复土壤重金属污染的效果^[34]。

(2) Web of science 外文文献聚类分析(表 2)。

①围绕以土壤重金属污染为主的研究(#0、#3)。土壤重金属污染研究包含“Enrichment factor”、“Heavy metals” 2 个显著聚类, 主要侧重于对重金属污染物在环境中的富集和沉积对农田土壤的影响进行研究。我国农田土壤重金属污染防治面临土壤重金属累积趋势难以逆转、土壤—农作物重金属富集线性关系不显著, 修复技术不完善、修复措施长期风险调控机制缺失等主要挑战^[35]。以富集重金属污染的土壤为视角, 农田土壤重金属污染主要来源于固体废弃物堆放及处置、工业废物大气沉降、污水农灌和农用物质的不合理施用^[36]。我国耕地重金属污染的面积占耕地总量的 1/6 左右, 农业土壤的污染已经引起了广泛的重视^[37], 其中重金属 Cd 污染概率

为 25.20%, 远超过其他几种土壤重金属元素^[38]。②围绕土壤重金属污染修复技术及评价方法的研究(#1、#2、#4)。“Leachability”(#1)、“Biochar”(#2) 和“Soil enzymes”(#4) 3 个显著聚类是实施和评价土壤重金属污染修复的关键。随着“十四五”规划的实施, 土壤污染防治需求越来越迫切。由于土壤重金属污染具有潜伏期长、隐蔽性强、污染后果严重等特点, 成为关注热点^[39]。常用的重金属修复技术为: 淋洗、阻隔填埋、水泥窑协同处置、固化稳定化和生物修复等。修复目的主要为减少重金属污染物总量或者降低土壤中重金属的迁移性^[40]。固化稳定化技术修复土壤重金属污染主要是固化技术和稳定化技术, 目的是限制土壤中重金属的释放, 降低其迁移性, 从而减小环境风险^[41]。其中, 固化处理是向污染土壤中添加惰性材料, 稳定化处理是向污染土壤中添加制剂, 从而降低土壤中重金属的毒性、溶解性和迁移性的过程。生物炭多用于修复污染土壤中的镉, 生物炭及其改性材料由于具有较发达的比表面积和孔隙结构、丰富的表面官能团及较强的吸附能力等特性, 被作为良好的环境修复材料而成为农田土壤重金属污染修复领域的研究热点^[42-44]。国内外学者已通过水培、盆栽等试验手段分别验证了应用植物修复技术修复土壤重金属污染的可行性。近年来, 各国学者做了大量研究, 包括重金属超富集植物种类的研究^[45-46]、不同种植条件对超富集植物修复潜力的影响^[47-53]、植物基因工程改造研究等。对农田土壤重金属污染修复的评价方法多采用铅、镉、锌等重金属的浸出毒性以及土壤中土壤酶的活性为评价依据^[54-55]。其土壤酶在土壤生态系统的物质循环和能量流动方面具有重要的作用, 所以对其活性进行检测应用于农田土壤评价^[56]。而重金属的浸出毒性多用于评价土壤重金属污染修复的程度。

表 2 不同聚类研究内容与特点一览表

Table 2 List of different clustering research contents and characteristics

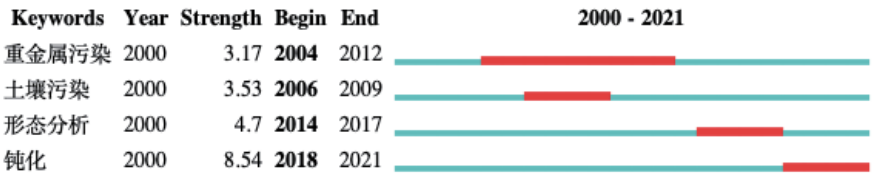
CNKI			Web of science		
聚类编号 Cluster number	聚类名称 Cluster name	主要关键词 Key words	聚类编号 Cluster number	聚类名称 Cluster name	主要关键词 Key words
#0	土壤	修复、土壤、重金属污染、污染、改良剂、钝化	#0	Enrichment factor	Contamination, soil, pollution, agricultural soil
#1	钝化	钝化、生物炭、镉污染、水稻、cd	#1	Leachability	Immobilization, cd, pb, zinc, copper, contamination
#2	重金属	重金属、复合污染、土壤酶、底泥、土地利用	#2	Biochar	Remediation, heavy metal, contaminated soil, soil, cd
#3	淋洗	淋洗、柠檬酸、吸附、农田土壤、化学形态、edta	#3	Heavy metals	Contamination, pollution, soil, Sediment, agricultural soil
#4	稳定化	稳定化、形态分析、土壤重金属、浸出毒性、修复技术、环境风险	#4	Soil enzymes	Accumulation, phytoremediation, Contamination, pollution, agricultural soil

2.5 研究前沿

在使用“timeline”展现关键词共现图谱的基础上^[57]，计算持续 1a 的突显关键词，CNKI 文献得到 4 个突显关键词（图 6）。突显强度由低到高分别为“重金属污染”（3.17，2004 ~ 2012 年）、“土壤污染”（3.53，2006 ~ 2009 年）、“形态分析”（4.7，

2014 ~ 2017 年），表明 21 世纪初研究热点为重金属在土壤中的形态分析。随着研究的深入，持续到 2021 年的突显关键词仅有“钝化”（8.54，2018 ~ 2021 年），侧面印证了在近几年的研究激增阶段主要以化学钝化技术修复重金属为主技术的结论。

(a) CNKI



(b) Web of science

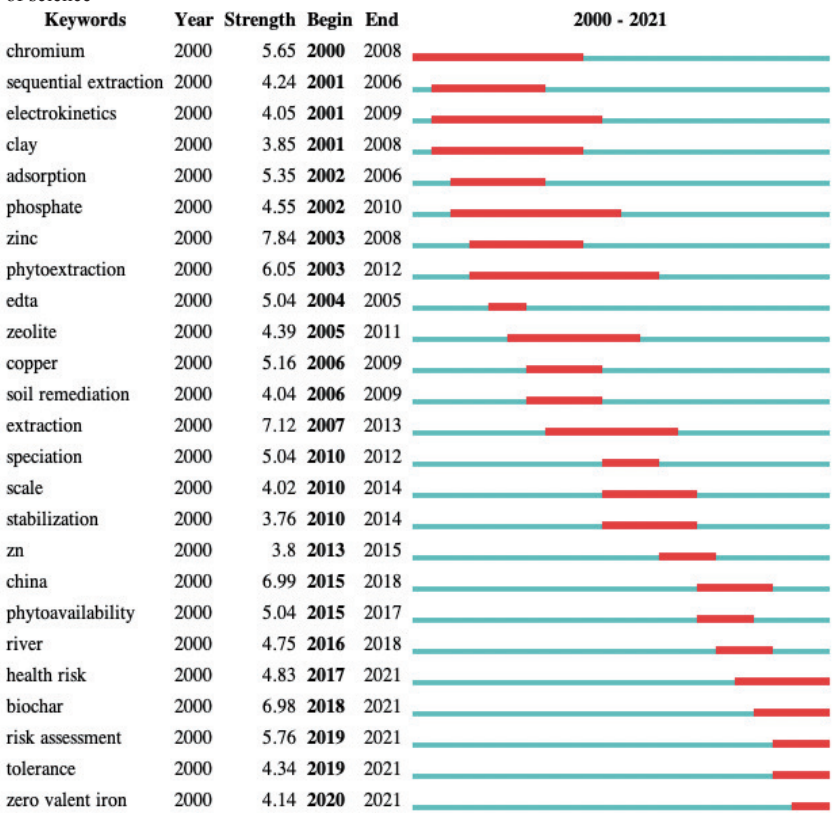


图 6 关键词突现时间图谱
Fig.6 Burst time map of keywords

Web of science 文献得到 29 个突显关键词（图 6）。突显强度较高的有 zinc（7.84，2003 ~ 2008 年）、China（6.99，2015 ~ 2018 年）、biochar（6.98，2018 ~ 2021 年）等，突显起始时间较长的有 chromium（5.65，2000 ~ 2008）、clay（3.85，2001 ~ 2008）、phosphate（4.55，2002 ~ 2010）、phytoextraction（6.05，2003 ~ 2012）、zeolite（4.39，2005 ~ 2011）等，其中生物炭、沸石和黏土等材料

表明 21 世纪初外文文献研究热点为添加修复材料对铬、锌、铜等污染物迁移机制的研究。随着研究的深入，持续到现 2012 年的突显关键词有“phytoextraction、speciation、stabilization、phytoavailability 等”多以植物修复和固化稳定化修复技术为研究热点。随着时间发展，持续到现在的突显关键词有“health risk、biochar、risk assessment、zero Valentino iron 等”。表明土壤重金属污染带来的

健康风险及农田土壤重金属污染相关的风险评估越来越受到各界研究学者的重视,同时零价纳米铁等新型材料的研发也成为近几年研究的热点。有学者研究发现 CF-nZVI 复合材料具有成本低、吸附性能好、易于分离等优点,是一种潜在的土壤重金属修复材料^[58]。为明确零价纳米铁改性生物炭输入下的土壤 Cd 赋存形态转化规律,有学者研究表明在 Cd 污染土壤中添加改性生物炭,能使土壤理化性质改善至理想状态,同时降低被污染土壤中 Cd 的生物有效性^[59]。结合近 3 年发表在高水平期刊或高被引文献分析,发现科技工作者围绕土壤污染开展的风险评估、耐受性、零化合价铁复合材料的方向等多角度的研究^[60-62],是近年来的研究热点和前沿。

3 结论

(1) 在过去 20 年里,关于农田土壤重金属污染修复研究的发文数量呈波动式增长态势,这表明研究人员对该领域的关注度越来越高。外文文献的研究作者、机构较中文文献的研究作者、国际研究机构合作密切,外文文献形成以我国科学院等研究机构为核心,而中文文献的研究力量多为高校师生和研究机构的科研人员。我国中外文文献在所有国家中皆为发文数量最多,表明我国在该研究领域表现最为活跃。

(2) 通过关键词出现频次分析,结合高被引论文分析,得到当前国际土壤重金属污染修复研究领域的热点问题集中在植物修复等修复技术效率的提升,钝化剂、稳定化剂等修复材料的研发及重金属污染物的修复对象,且近年来对农田土壤重金属污染修复从修复效果研究延伸到环境健康风险研究。镉、铅、锌、铜、铬等污染物两种或多种复合污染的农田土壤修复受到广泛关注。

(3) 未来重点研究方向主要集中在多种修复技术联合植物修复技术来提高修复能力,以及探究生物炭修复机理从而有目的地对生物炭进行改性两个方面,来达到农田土壤重金属污染更好的修复效果。

4 展望

(1) 植物修复机理的研究。植物修复作为一种有效的土壤重金属修复手段已被学术界广泛认可,由于植物提取技术可以永久性地清除土壤中的重金属,因此探讨植物超累积作用生理机制是未来该领域研究的重要方向。

(2) 联合修复技术的研发。对于污染程度高的

重金属污染土壤,单一的修复技术往往无法取得良好的修复效果。因此对修复土壤重金属复合污染的综合修复体系的研究和新型修复材料的研发等是今后需要继续努力的方向。

(3) 农田土壤重金属污染防控对策的优化。为减少农田土壤重金属污染,建议强化对固体废弃物堆放及处置、工业废物大气沉降排放、污水农灌和农用物质合理施用的监管,从源头到末端加强农田土壤中重金属的环境风险管控。

参考文献:

- [1] 黄迪,黄志红,孔辉,等. 重金属污染农田土壤的稳定化修复技术及其修复实践研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(8): 72 - 78.
- [2] 邵一鸣,潘杰,洪新宇,等. 重金属对睡眠影响的研究进展[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(12): 1383 - 1386.
- [3] 杨蕾. 我国土壤重金属污染的来源、现状、特点及治理技术[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(2): 151 - 153.
- [4] 黄现民,樊平,闵建美,等. 国际土壤农药污染研究进展与前沿——基于CiteSpace分析[J]. 土壤, 2021, 53(4): 764 - 770.
- [5] 邹丽娜,林志健,张冰,等. 基于CiteSpace的临床中药学研究的可视化分析[J]. 中医教育, 2021, 40(1): 18 - 22.
- [6] 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.
- [7] 李剑睿,徐应明,林大松,等. 农田重金属污染原位钝化修复研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(4): 721 - 728.
- [8] 郝汉舟,陈同斌,靳孟贵,等. 重金属污染土壤稳定/固化修复技术研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 816 - 824.
- [9] Antoniadis V, Levizou E, Shaheen S M, et al. Trace elements in the soil - plant interface: Phytoavailability, translocation, and phytoremediation - A review[J]. *Earth Science Reviews*, 2017, 171: 621 - 645.
- [10] Kaur H, Garg N. Recent perspectives on cross talk between cadmium, zinc, and arbuscular mycorrhizal fungi in plants[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37: 680 - 693.
- [11] Menahem E, Meni B H. Heavy metals and metalloids: Sources risks and strategies to reduce their accumulation in horticultural crops[J]. *Scientia Horticulture*, 2018, 234: 431 - 444.
- [12] 罗路云,蒋宏华,王殿东,等. 镉污染对稻田土壤真菌群落结构及多样性的影响[J/OL]. 南方农业学报: 1 - 13 [2022-08-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1381.S.20220817.1501.003.html>
- [13] 董璟琦,雷秋霜,张红振,等. 磷酸盐稳定化修复镉污染土壤小试和工程效果评估[J]. 环境工程学报, 2018, 12(3): 923 - 930.
- [14] 徐金玉,王伟伟,王惠,等. 铜污染土壤的生物修复研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 471 - 480.
- [15] 王亚丹,乔冬梅,陆红飞. 水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响研究[J/OL]. 土壤通报: 1 - 7 [2022 - 08 - 29]. DOI:10.19336/j.cnki.trtb.2021120804.
- [16] 章绍康,弓晓峰,易佳璐,等. 多种强化技术联合植物修复土壤重金

- 属污染机制探讨[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(14): 1-6.
- [17] 刘文超, 刘 曦, 温思寒. 武陟农田重金属污染特征及其与河流底泥的关联性分析[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(1): 79-85, 113.
- [18] 王长智, 任旭锋, 梅荣武. 温州河道底泥重金属污染特征和分级评价[J]. 四川环境, 2018, 37(4): 1-8.
- [19] 舒 伟, 陈 玥, 高阳俊. 基于3种方法对河道底泥重金属污染评价[J]. 上海第二工业大学学报, 2018, 35(1): 1-9.
- [20] 赛宁刚, 祁 娟, 贾燕伟, 等. 东祁连山不同土地利用方式下土壤重金属污染评价[J/OL]. 草业学报: 1-11 [2022-08-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1105.S.20220704.1602.011.html>.
- [21] 赵鑫娜, 杨忠芳, 余 涛. 矿区土壤重金属污染及修复技术研究进展[J/OL]. 中国地质: 1-30 [2022-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20221031.1102.004.html>.
- [22] 邬光海, 王晨昇, 陈鸿汉. 内蒙古废弃钨钼矿区周围土壤重金属污染生态环境评价及成因分析[J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1838-1852.
- [23] 齐 菲, 付同刚, 高 会, 等. 污水灌溉农田土壤镉污染研究进展[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(1): 10-20.
- [24] 魏 亮. 华北平原典型污灌区土壤砷及重金属迁移转化规律[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2020.
- [25] 吴春发, 关浩然, 张锦路, 等. 含磷钝化剂对镉污染农田土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业学报, 2022, 38(2): 361-368.
- [26] 陈彦芳, 曹 柳, 马建华, 等. 土壤重金属复合污染钝化修复对酶活性的影响[J]. 河南大学学报, 2020, 50(1): 1-10.
- [27] 曹心德, 魏晓欣, 代革联, 等. 土壤重金属复合污染及其化学钝化修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2011, 5(7): 1441-1453.
- [28] 王 港, 余海英, 李廷轩, 等. 两种淹水模式下施用钝化材料对镉污染农田水稻安全生产的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 1015-1022.
- [29] Khalid S, Shahid M, Niazi N K, et al. A Comparison of Technologies for Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 182: 247-268.
- [30] Beiyuan J Z, Tsang D C W, OK Y S, et al. Integrating EDDS - enhanced Washing With Low - cost Stabilization of Metal - contaminated Soil From an E-waste Recycling Site[J]. *Chemosphere*, 2016, 159: 426-432.
- [31] Liu L W, Li W, Song W P, et al. Remediation Techniques for Heavy Metal-contaminated Soils: Principles and Applicability[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 633: 206-219.
- [32] 孙 涛, 陆扣萍, 王海龙. 不同淋洗剂和淋洗条件下重金属污染土壤淋洗修复研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2015, 32(1): 140-149.
- [33] 戴竹青, 彭文文, 王明新, 等. 盐酸羟胺强化柠檬酸淋洗修复重金属污染土壤[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(09): 1218-1225.
- [34] 陈世宝, 王 萌, 李杉杉, 等. 中国农田土壤重金属污染防治现状与问题思考[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 35-41.
- [35] 陈卫平, 杨 阳, 谢 天, 等. 中国农田土壤重金属污染防治挑战与对策[J]. 土壤学报, 2018, 55(2): 261-272.
- [36] 高尚赞, 陶美娟, 汤海波. 典型农田土壤重金属污染修复技术及其应用分析[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(8): 176-178.
- [37] 王乐杭, 俞 栋, 王玉婷, 等. 重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J]. 资源节约与环保, 2021, (4): 46-47.
- [38] 宋 伟, 陈百明, 刘 琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. 水土保持研究, 2013, 20(2): 293-298.
- [39] 刘泽权, 李成明, 朱湖地, 等. 固化稳定化修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 环境保护科学, 2022, 48(4): 13-20.
- [40] 郭笑笑, 刘丛强, 朱兆洲, 等. 土壤重金属污染评价方法[J]. 生态学杂志, 2011, 30(5): 889-896.
- [41] 生态环境部. 建设用地土壤污染风险管控和修复术语: HJ 682—2019[S/OL]. 北京: 中国环境出版集团(北京), 2019.
- [42] Lv J X. Distribution and movement of heavy metals in sediments around the coastal areas under the influence of multiple factors: A case study from the junction of the Bohai Sea and the Yellow Sea[J]. *Chemosphere*, 2021, 278: 130352-130352.
- [43] 陈 明, 蔡青云, 徐 慧, 等. 水体沉积物重金属污染风险评价研究进展[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1069-1074.
- [44] 王鑫宇, 孟海波, 沈玉君, 等. 改性生物炭特性表征及对冶炼厂周边农田土壤铜镉形态的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(9): 4441-4451.
- [45] Alahabadi A, Ehrampoush M H, Miri M, et al. A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air[J]. *Chemosphere*, 2017, 172: 459-467.
- [46] 曾露苹, 秦俊豪, 董淑玉, 等. 不同木薯品种对重金属Cu、Zn、Cd累积差异及健康风险分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6): 1044-1052.
- [47] 杨 洋, 陈志鹏, 黎红亮, 等. 两种农业种植模式对重金属土壤的修复潜力[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 688-695.
- [48] Li N Y, Guo B, Li H, et al. Effects of double harvesting on heavy metal uptake by six forage species and the potential for phytoextraction in field[J]. *Pedosphere*, 2016, 26: 717-724.
- [49] 杨 刚, 伍 钧, 唐 亚, 等. 不同形态氮肥施用对鱼腥草吸收转运Pb的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1380-1385.
- [50] Shakirova F M, agulova C R, Maslennikova D R, et al. Salicylic acid - induced protection against cadmium toxicity in wheat plants[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2016, 122: 19-28.
- [51] 邢维芹, 刘 辉, 曾 冰, 等. 光照和浸种5种具有修复土壤重金属污染潜力的植物种子萌发的影响[J]. 种子, 2017, 36(9): 72-75.
- [52] 林钰栅, 范 缙, 蔡邦平, 等. 解磷微生物在重金属污染原位修复中的作用及其机理研究进展[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2016, 55(5): 697-706.
- [53] 郑君健, 刘 杰, 张学洪, 等. 土壤重金属污染植物修复及强化措施研究进展[J]. 广东农业科学, 2013, 40(18): 159-164.
- [54] Wang Y, Xu Y, Qin X, et al. Effects of S, S - ethylenediamine disuccinic acid on the phytoextraction efficiency of Solanum nigrum L. and soil quality in Cd - contaminated alkaline wheat soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28: 42959-42974.
- [55] Liu D P. Evaluating ecological risks and tracking potential factors influencing heavy metals in sediments in an urban river[J].

- Environmental Sciences Europe, 2021, 33: 1 – 13.
- [56] 蒋萍萍, 刘 杰, 游少鸿, 等. 原位酶谱技术在土壤酶学中应用的研究进展与展望[J]. 土壤通报, 2021, 52(2): 454 – 461.
- [57] Chao M C. Science Mapping: A Systematic Review of the Literature[J]. Journal of Data and Information Science, 2017, 2: 1 – 40.
- [58] Li S S. Performance of lead ion removal by the three-dimensional carbon foam supported nanoscale zero-valent iron composite[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 22: 125 – 350.
- [59] 尹 杰, 康雅茹, 海平霞, 等. 改性生物炭对土壤结构及Cd赋存形态的影响[J]. 南方农业, 2022, 16(9): 106 – 111.
- [60] 王 蕊, 陈 楠, 张二喜. 基于总量与形态的矿区周边土壤重金属生态风险与健康风险评估[J]. 环境科学, 2022, 43(3): 1546 – 1557.
- [61] 厉有为, 梁婵娟. 三种油料作物对土壤Pb污染的耐受性与积累[J]. 环境化学, 2021, 40(5): 1602 – 1610.
- [62] 王向琴, 刘传平, 杜衍红, 等. 零价铁与腐殖质复合调理剂对稻田镉污染钝化的效果研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(12): 2329 – 2336.

Research Progress on Remediation of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils at Home and Abroad - Based on CiteSpace Knowledge Map Analysis

GUAN Xiu-jing^{1,2}, SU Yan², A Na-er¹, TIAN Chu-qi¹, OU Cheng-hao¹, JIANG Shao-yuan¹,
BM. Soran Dinki¹, WANG Jian², DANG Xiu-li^{*}

(1. National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Key Laboratory of Arable Land Conservation in Northeast China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, P. R. China, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China;

2. Shenyang Institute of Environmental Sciences, Shenyang 110167, China)

Abstract: Based on the literature of China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science database, CiteSpace bibliometric tool was used to analyze the relevant literature in the field of remediation of heavy metal pollution in farmland soil from the aspects of number of publications, countries, authors and keywords from 2000 to 2021, so as to explore the research status and future development trend in this field at home and abroad. The results showed that the number of literatures on heavy metal pollution remediation in farmland soil increased rapidly. China, the United States and South Korea were the countries with more foreign literatures. Chinese scientific research institutions occupied an important position in the number of foreign literature publications, indicating that China has a strong international academic influence in this research field. According to the frequency analysis of keywords, the accumulation characteristics and remediation of multi-metal compound pollution such as cadmium and lead in soil were the main research contents in this field, and the application of phytoremediation technology in the remediation of heavy metal pollution in farmland soil was a hot topic in this field. The comprehensive remediation system composed of physical and chemical remediation combined with bioremediation technology is the main research direction in the field of soil heavy metal pollution remediation in the future.

Key words: Heavy metal; Remediation; Bibliometric analysis; CiteSpace; Farmland

[责任编辑: 韩春兰]