

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

王娟, 苏德纯

引用本文:

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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0669>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

稻田重金属污染修复治理技术及效果文献计量分析

杜志鹏, 苏德纯

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2409-2417 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1128>

土壤镉和砷污染钝化修复材料及科学计量研究

李英, 朱司航, 商建英, 黄益宗

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2011-2022 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0601>

基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析

帅鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 688-695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1477>

基于CiteSpace重金属生物可给性的文献计量分析

罗杨, 吴永贵, 段志斌, 谢荣

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 17-27 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0713>

利用改性生物质电厂灰钝化修复北方Cd污染土壤的试验研究

宋乐, 韩占涛, 吕晓立, 张威, 李雄光, 王磊

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1484-1494 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1467>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.
WANG Juan, SU De-chun. Analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies in wheat and maize fields based on bibliometrics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(3): 493–500.



开放科学 OSID

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

王娟, 苏德纯*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

摘要:利用中国知网期刊全文数据库(CNKI)和 Web of Science 核心合集英文数据库(WOS),通过对2000—2018年小麦、玉米重金属污染农田修复领域的相关文献进行计量分析并统计归类,了解国内外有关小麦、玉米重金属污染农田土壤修复治理领域的研究趋势及特点,深入分析田间试验条件下不同修复治理技术对小麦、玉米籽粒的降镉效果,为进一步的深入研究与应用提供依据。结果表明,国内外该领域研究起步发展较缓,在2010年之后增速加大,但关注度明显低于稻田;从重金属种类来看,对重金属镉污染的研究热度居首位;在小麦、玉米重金属污染农田修复领域占据重要影响地位的主要发文期刊包括: *Journal of Hazardous Materials*、*Science of the Total Environment*、*Chemosphere*、《农业环境科学学报》以及《生态环境学报》;施用钝化剂/改良剂在该研究领域的受关注度最高;从田间条件下修复效果来看,低积累品种的应用籽粒降镉效果最佳,降镉率达57.73%,其次是无机+有机复合类钝化材料。无机+有机复合修复材料和低积累品种应用是小麦、玉米重金属污染农田土壤修复利用的有效技术和研究发展方向。

关键词:小麦;玉米;农田;重金属;文献计量;修复技术;改良剂;钝化剂

中图分类号: X53; G353.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)03-0493-08 doi:10.11654/jaes.2020-0669

Analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies in wheat and maize fields based on bibliometrics

WANG Juan, SU De-chun*

(College of Resources and Environment Sciences, China Agricultural University; Beijing Key Laboratory of Prevention, Control and Restoration of Farmland Soil Pollution, Beijing 100193, China)

Abstract: The China National Knowledge Infrastructure (CNKI), namely the China Academic Journals Full-text Database, and Web of Science Core Collection Database were used for bibliometrics analysis and statistical classification of relevant literatures on wheat and maize heavy metal-contaminated farmland remediation from 2000 to 2018. The aim was to clearly understand the domestic and foreign research trends and characteristics in this field, and provide a basis for future in-depth research and wider application of different types and effects of remediation technologies under field test conditions. The results showed that local and foreign research development in this field was slow, and although the growth rate had increased since 2010, the degree of concern was significantly lower than that for rice fields. From the perspective of heavy metal types, cadmium pollution was the most studied. The main publication journals in the field of heavy metal pollution restoration of wheat and maize farmland included *Journal of Hazardous Materials*, *Science of the Total Environment*, *Chemosphere*, *Journal of Agro-Environmental Science*, and *Journal of Eco-Environment*. Research on application of passivating agent/improver had attracted the most attention. Evaluation of the restoration effect under field conditions indicated that the selection and

收稿日期: 2020-06-14 录用日期: 2020-09-28

作者简介: 王娟(1996—),女,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为土壤污染控制与修复。E-mail: wangjuaner1025@163.com

*通信作者: 苏德纯 E-mail: dcsu@cau.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0801103)

Project supported: National Key R&D Program of China(2017YFD0801103)

application of low-cadmium accumulation varieties had the best cadmium reduction effect, with a reduction rate of 57.73%, followed by organic-inorganic composite and inorganic composite repair technologies. Organic-inorganic composite remediation materials and low-accumulation varieties were both effective technologies and research development directions for the remediation and utilization of wheat and maize heavy metal-contaminated farmland.

Keywords: wheat; maize; farmland; heavy metal; bibliometrics; remediation technology; passivating agent; improver

近年来农田土壤重金属污染问题日益凸显,作物生长在污染农田上所收获的农产品能否安全食用成为了人们关注的焦点。据中国科学院最新研究结果显示,中国粮食主产区耕地土壤重金属点位超标率达到21.49%^[1],较2014年《全国土壤污染状况调查公报》中19.4%的点位超标率,仅4年就增长了两个百分点,重金属污染仍然形势严峻。农田土壤中重金属的过量富集会土壤重金属污染的发生^[2],从而影响种植的农作物的产量及品质安全^[3],然后再通过食物链进入人体,会对人体健康造成严重危害^[4]。土壤重金属污染问题具有区域差异性、累积危害性、治理难度大等特点^[5]。而农田土壤污染与农产品安全关系密切,与其他土壤污染不同,农田土壤修复的核心重点在于使重金属污染农田土壤上生长出安全的农作物^[6],保障人体健康。同时小麦、玉米是我国第二、三大粮食作物,其重要地位仅次于水稻。但我国小麦、玉米主产区土壤在不同程度上受到重金属污染威胁,有不少区域甚至达到严重污染^[7]。目前针对稻田重金属污染修复研究较多,而有关小麦、玉米农田修复治理的研究较少。因此,了解小麦、玉米农田土壤重金属污染修复与治理领域的研究与进展,总结有效的修复治理技术对于保障我国的粮食质量安全非常必要。

重金属污染农田土壤修复一般从降低土壤重金属活性与减少土壤中重金属含量方面入手,如何在污染农田土壤上生产出安全农产品是我国目前的研究重点。重金属低吸收作物品种应用是保证农产品安全性的有效措施之一^[8-9]。各种钝化/改良剂可钝化土壤中有效态重金属,减少吸收,但效果存在差异,且取决于所用类型^[10-11]。利用离子拮抗机理,施用叶面阻控剂同样是当前污染修复的发展方向^[12-13]。同时联合各种技术能得到更好的效果^[14]。

利用文献计量学理论和方法来对科学研究领域的发展现状与趋势进行探究,已被国内外众多研究学者广泛应用于文献情报分析,其以数理统计分析为基础,主要研究文献外部特征,是了解学科领域的有力工具^[15]。本研究以中国知网的期刊全文数据库(CNKI)和Web of Science核心合集数据库(WOS)为

文献检索来源,检索对象定为旱地作物小麦、玉米重金属污染农田,研究重金属污染农田修复及治理技术领域的相关文献,利用数据筛选软件进行统计分析,研究比较国内外小麦、玉米重金属污染农田修复治理领域的研究热点,包括污染类型和特征、治理技术类型和效果,并针对田间条件下重金属镉污染农田土壤修复治理技术的效果进行深层次分析,为我国小麦、玉米重金属污染农田修复研究与应用提供借鉴。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究的中文文献数据来自于中国知网CNKI的期刊全文数据库(不包括学位论文及会议报告)。采用高级检索功能,将文献发表时间定为2000—2018年,将检索条件的关键主题词定为“土壤重金属”并“小麦”或“玉米”,共得到相关文献1 357篇,再以此为基础利用“修复”“钝化”“改良”“调理”“稳定固化”“降低”等主题词继续检索,筛选并剔除重复或不相关的文献,最后汇总出符合的中文文献共205篇。

本研究的英文文献数据来自于Web of Science核心合集数据库(WOS),该数据检索平台在世界范围内的自然科学领域拥有一定权威性^[16]。以小麦、玉米农田重金属修复相关文献为目标,采用高级检索功能,以主题“TS=(("corn field*" or wheat or maize or corn or "agricultural soil*") and ("heavy metal*" or cadmium or lead or plumbum or mercury or hydrargyrum or quicksilver or chromium or chrome or arsenic or copper or zinc or nickel) and (removal or decontaminat* or stabilizat* or phytoremediat* or phytostabilizat* or remediat* or bioremediat* or co-remedi* or hyperaccumulate or repair or restore* or control or localizat* or amendment or Immobiliz* or fix* or accumul*) not rice)"为检索策略,文献发表时间范围为2000—2018年,文献限定为“Article”和“Review”两种类型,并利用HistCite软件中“Cite Reference”功能将未收录的遗失文献进行补充,逐条整理并筛选,排查重复出现或不相关的文献,最后汇总出符合的英文文献共202篇。

1.2 研究方法

利用Excel数据处理软件对检索出的中文文献进行整理统计,对于英文文献,通过WOS数据库本身的分析功能并结合HistCite引文分析软件,导入全记录文本,再选取不同研究参数作为后续分析指标。其中重要参数指标包括TGCS(Total global citation score,为在整个WOS数据库中的总被引用次数)和TLCS(Total local citation score,为在本地导入的文献分析库的总被引用次数)。相比之下,TLCS更能反映文献对某一领域的影响程度,TLCS值越高,关注度越高,说明文献越重要^[17]。本文从国内外年度发文量、文献来源、关键词、国内外研究机构、研究类别及热点等方面入手,对2000—2018年期间的有关小麦、玉米农田重金属污染修复技术的文献进行统计分析,从而把握国内外该研究领域的现状和发展特点。

从得到的379篇中英文文献中再次筛选出针对重金属镉的田间试验条件下小麦、玉米农田土壤污染修复技术的文献,并根据不同类别修复技术将文献中可用数据提取出来并进行整理统计。对于各农田镉污染修复技术的效果,从土壤pH升高幅度、土壤中镉有效性降低率、作物籽粒中镉量降低率及产量变化等方面来统计分析,并按类别对比分析。

2 结果与讨论

2.1 年度及国家发文量分析

通过发文量的时间变化趋势,可了解到该科学领域的研究热度及各阶段的发展速度^[18]。相关文献年度发文量如图1所示,整体来看,国内外发文量均呈曲折增势,2000—2010年世界范围内发文量呈现出正负变化率交替发展,尚处于起步阶段,从最开始的零星几篇至逐步增加。2010年之后,发文量增势凸

显,证明小麦、玉米农田土壤重金属污染修复研究日趋受到关注与重视,从2008年开始持续上升;国外发文量于2015年出现增长率达80%的高速增长期,并在2018年达到顶峰,约是2010年发文量的7倍。国内外年度发文趋势线存在多次交叉,与国外相比,国内在前期阶段研究热度不足,后期基本持平甚至超越,这与近些年国家出台政策法规有关。对比杜志鹏等^[19]对稻田重金属修复领域的研究发现,旱作物小麦、玉米重金属污染农田修复研究关注度明显低于水稻,但也正逐渐成为学者的热点研究对象。

由各国发文量分析可以在一定程度上看出该国对某科学领域的研究热度。针对小麦、玉米重金属污染农田修复的研究,全世界范围的发文国家/地区主要分布在中国、巴基斯坦、美国等20多个国家/地区。发文量排名如表1所示,中国发文64篇,占比约1/3,并明显高于其他国家,表明我国在该研究领域的重要贡献及领先地位;被引次数可以反映出该国家/地区在该领域研究成果的水平以及影响力^[20],我国在发文量上存在优势,研究热度虽高,但不管从本地被引次数(TLCS)还是总被引次数(TGCS)来看,排名均较落后,研究成果影响力不够,仍需提高研究水平及深度。而瑞典虽发文量较低,但在两个被引次数方面均居第一,证明其在该领域具有较强的国际学术影响力,由于该国相关的农业政策及一定的重视程度使其在该领域的起步较早,发现了研究的创新点,其成果对其他国家具有借鉴价值,研究重点主要围绕有关生物炭及其他有机改良方法的发展。

2.2 期刊来源分析及研究机构分析

对文献期刊来源进行分析,可为快速查找该领域的研究文献提供依据^[21]。从中文研究分析数据(表2)来看,中文期刊发文居前二的是《农业环境科学学报》

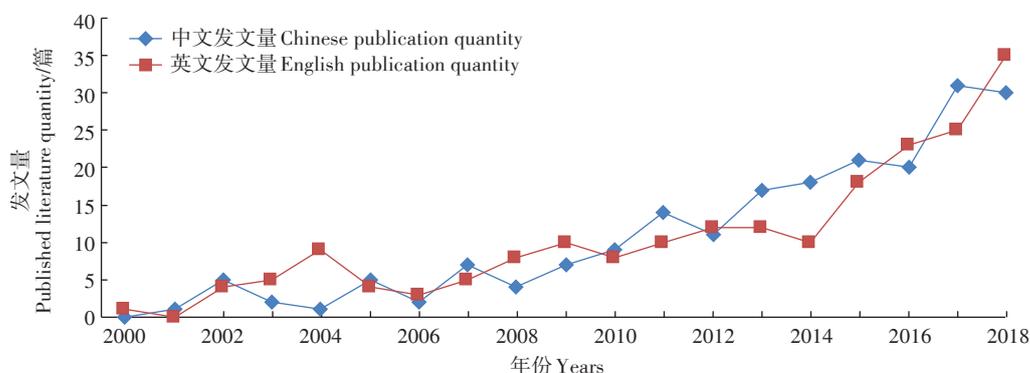


图1 2000—2018年小麦、玉米农田重金属污染修复研究的年度发文量

Figure 1 Annual published literature quantity of research on heavy metals pollution remediation in wheat and maize fields from 2000 to 2018

和《生态环境学报》,发文分别32篇和11篇,二者相差较大,共占21%;其他期刊发文量较为平均,其中《生态学报》与《环境科学》的复合影响因子及均篇被引次数高于其他,处于领先地位,在该领域拥有一定的期刊影响力及较高的研究水平^[22-23]。文献来源共包含73种英文期刊,发文量排名前10的如表3所示,排名第一为 *Chemosphere*, 相关文献共14篇,其次是 *Environmental Pollution*, 共12篇,二者共占14.5%。影响因子是评估期刊在某一领域的重要程度的指标,近5年平均影响因子最高的期刊为 *Journal of Hazardous Materials*, 其影响因子为7.336, 其中 *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 的影响因子及本地被引频次均较低,属于Q4分区,可见期刊发文量与影响力并不具有一定的相关性。结合影响因子与本地均篇被引次数, *Journal of Hazardous Materials*、*Science of*

the Total Environment 和 *Chemosphere* 为居前位的具有重要影响地位的期刊。

研究机构主要包括高等院校以及科研机构或单位,可以反映出该领域的重点研究区域的分布情况^[24]。针对2000—2018年小麦、玉米农田重金属修复领域,国内研究机构位列前位的均为高等院校,华南农业大学居首位,发文21篇,占10.24%,其次为云南农业大学、广西大学、河南农业大学以及中国农业大学,对比来看,我国南方高校研究占比较大,但某种程度上也显示出,目前该领域缺乏核心研究机构及相互间的交流合作,深度不够,范围也不够广泛,未成统一整体性体系。

2.3 研究热点分析

农田重金属污染是全世界范围的关注问题,不同种类重金属的污染程度也存在着差异。某种重金属

表1 2000—2018年小麦、玉米农田重金属污染修复领域发文量Top10的国家/地区

Table 1 Top10 countries or regions in volume of publications in the field of remediation of heavy metals contaminated wheat and maize fields soil from 2000 to 2018

序号	国家/地区 Country/region	发文量 Literature quantity/篇	本地总被引次数 TLCS	本地均篇被引用次数 Local average number of citations	总被引次数 TGCS	均篇总被引次数 Total average number of citations
1	中国 China	64	94	1.47	1 398	21.84
2	巴基斯坦 Pakistan	32	75	2.34	1 025	32.03
3	美国 USA	24	54	2.25	1 464	61.00
4	韩国 South Korea	12	56	4.67	1 077	89.75
5	加拿大 Canada	10	43	4.30	634	63.40
6	埃及 Egypt	9	14	1.56	251	27.89
7	瑞典 Sweden	8	51	6.38	1 547	193.38
8	澳大利亚 Australia	8	33	4.13	1 009	126.13
9	德国 Germany	8	20	2.50	211	26.38
10	印度 India	8	9	1.13	249	31.13

表2 2000—2018年小麦、玉米农田重金属污染修复中文发文量Top10期刊

Table 2 Top10 Chinese journal in volume of publications in the field of remediation of heavy metals contaminated wheat and maize fields from 2000 to 2018

序号	期刊名称 Journal name	发文量 Literature quantity/篇	占期刊发文总量比例 Proportion of the total number of literatures/%	被引用次数 Total citations	均篇被引次数 Average number of citations	复合影响因子 Compound impact factor
1	农业环境科学学报	32	15.53	782	24.44	2.40
2	生态环境学报	11	5.37	219	20	2.21
3	水土保持学报	7	3.41	107	15.29	2.02
4	中国农学通报	6	2.93	72	12	1.00
5	西南农业学报	5	2.44	27	5.4	0.84
6	安徽农业科学	5	2.44	53	10.6	0.49
7	环境科学	5	2.44	193	38.6	3.05
8	生态学报	5	2.44	154	30.8	3.58
9	环境科学学报	4	1.95	112	28	2.54
10	环境科学与技术	4	1.95	16	4	1.08

发文量的高低与其污染程度和研究热度是相关的。对2000—2018年中文文献中小麦、玉米重金属污染农田修复类别进行分析(图2),镉居第一位,铅排第二位,发文量分别达138篇和79篇,分别占比67.3%和38.5%;在英文发文方面(图3),同样是镉排第一(143篇),铅次之,足以看出全世界范围对小麦、玉米农田镉与铅的重视程度远高于其他,从侧面也凸显其污染严重性。同时国内外重点研究的重金属类别前4位保持一致,分别为镉、铅、锌、铜,而对比发现稻田砷污染的热度较之更明显。综合发现,农田复合重金属污染修复的发文量呈现增多趋势,研究关注点逐渐从单一重金属污染变得复杂多样^[25]。

而对于两种作物的研究同样存在差异,小麦、玉米均为我国重要的旱作粮食作物,从发文量统计来看,小麦农田重金属污染修复的研究发文量为223篇,玉米为183篇,对于小麦农田重金属修复的研究

热度高于玉米,这与玉米作物本身具有某些重金属耐受性有关。有学者对比发现,小麦的重金属富集系数普遍大于玉米的富集系数,表明小麦对这些重金属比玉米更敏感,富集能力更强^[26]。玉米吸收重金属后主要被留于根部,极少量转移至茎叶及籽粒,且其生物量大,种植范围广,通过文献筛选发现,不少研究将某些重金属低积累玉米品种用于修复重金属污染农田的研究,某种程度上可作为一种修复利用的典型植物,具有一定修复利用潜力^[27]。

从技术类型统计结果来看(图4),主要包括施用钝化剂/改良剂、生物修复技术、低累积品种筛选、叶面阻控剂、农艺措施以及联合修复技术,其中施用钝化剂/改良剂占比最大(48.4%),研究热度远超过其他,为该修复领域的研究重点,修复效果可能更佳,这同杜志鹏等^[19]对稻田修复的研究结果一致。钝化剂/改良剂包括有机和无机类等,还可细分为石灰矿物、

表3 2000—2018年小麦、玉米农田重金属污染修复英文发文量Top10期刊

Table 3 Top10 English journal in volume of publications in the field of remediation of heavy metals contaminated wheat and maize fields from 2000 to 2018

序号	期刊 Journal name	发文量 Literature quantity/篇	本地总被 引次数 TLCS	总被引 次数 TGCS	近5年平均影响因子 Impact factor	期刊排名分区 Journal ranking
1	<i>Chemosphere</i>	14	38	702	5.089	Q1
2	<i>Environmental Science and Pollution Research</i>	12	14	188	3.208	Q2
3	<i>Communications in Soil Science and Plant Analysis</i>	8	2	83	0.784	Q4
4	<i>International Journal of Phytoremediation</i>	8	17	157	2.29	Q4
5	<i>Ecotoxicology and Environmental Safety</i>	7	33	310	4.64	Q2
6	<i>Environmental Pollution</i>	6	13	201	6.152	Q2
7	<i>Journal of Hazardous Materials</i>	5	37	899	7.336	Q1
8	<i>Science of the Total Environment</i>	5	15	309	5.727	Q2
9	<i>Environmental Earth Sciences</i>	4	5	123	2.032	Q4
10	<i>Journal of Plant Nutrition and Soil Science</i>	4	4	138	2.664	Q2

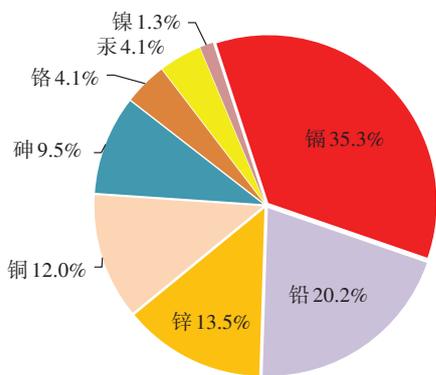


图2 2000—2018年中文文献小麦、玉米农田重金属污染类别
Figure 2 Chinese literatures in wheat and maize fields heavy metal pollution category from 2000 to 2018

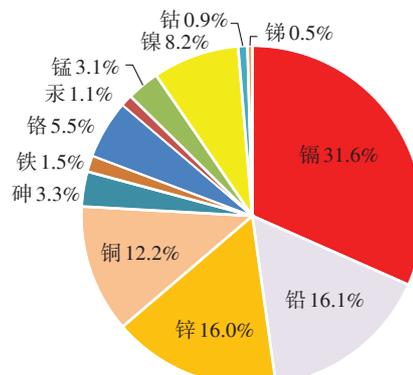


图3 2000—2018年英文文献小麦、玉米农田重金属污染类别
Figure 3 English literatures in wheat and maize fields heavy metal pollution category from 2000 to 2018

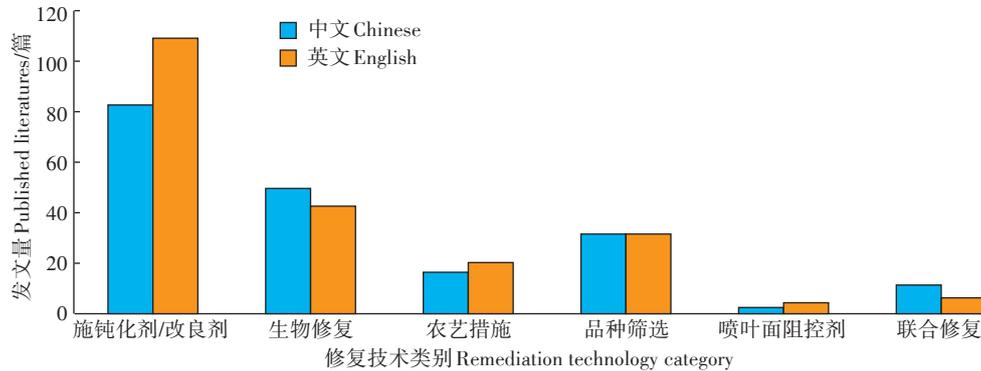


图4 2000—2018年小麦玉米农田重金属污染各修复技术类别发文章数

Figure 4 Number of published literatures about remediating heavy metals pollution in wheat and maize fields from 2000 to 2018

生物炭及农家肥等^[28],而不同钝化/改良剂的效果不同。生物修复研究成果也较多,其发展前景十分可观^[29]。总体来看,植物修复逐渐受到关注,但发展尚不成熟,以超累积植物修复研究为主^[30];动物修复较少,以蚯蚓为主^[31],微生物中丛枝菌根真菌的受关注度较高,与玉米耐受性有关^[32]。另外,国内外对叶面阻控剂的研究均未凸显,该技术用于小麦、玉米农田重金属污染修复研究正处于起步阶段,常用的有硅肥、硒肥及锌肥等,来抑制重金属转移到作物可食部位^[33],对比稻田修复热度明显不足,但可以此为参考进行未来研究。由于重金属污染情况复杂,仅靠单项修复治理技术可能很难达到目的,将多种可行的修复技术进行组合,因地制宜做到优势互补,也是重金属污染农田修复今后的趋势所在。

2.4 小麦、玉米农田镉污染修复技术效果分析

从小麦、玉米重金属污染农田修复类别研究可知,国内外将镉污染作为研究重点,其污染形势最为严峻,对此针对镉污染进行分析比较。由于采取盆栽试验手段存在一定局限性,从相关的379篇文献中再筛选出田间条件下农田镉污染修复的文献,提取信息并对土壤条件、试验用量及修复效果等进行综合分析。统计出的主要大田技术包括无机类(石灰及工业副产品类、磷酸盐类、金属氧化物类、黏土矿物类和无机复合类)、有机类(生物肥及有机物料、生物炭改良)、无机+有机复合类、叶面阻控剂、品种筛选、植物修复及联合修复等,每类包含样本量不同。

由表4可知,试验土壤pH值在6~8,包括酸性到碱性范围的农田土壤,土壤镉含量的范围在超出《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)的风险筛选值1~8倍。其中品种筛选样本最多,以籽粒降镉率作为主要指标评价。无

机复合类对土壤pH升高最多,提升1.84个单位;其次是黏土矿物类。采用联合修复后土壤镉生物有效性降低率效果最为明显(49.20%);其次是无机+有机复合;石灰及工业副产品类与植物修复的能力较弱。从保障农作物食用安全看,低积累镉小麦、玉米品种的应用使籽粒降镉率达57.73%,效果最佳,其次是无机+有机及无机复合类钝化,而其他技术也在不同程度上降低了作物镉量,但叶面阻控效果相对较差(23.26%),可能与样本数量有限有关。对于产量提升最为显著的是生物肥及有机物料和磷酸盐类及金属氧化物类。总体来看,在降低土壤及作物镉量上,无机+有机复合类钝化修复技术是最有效的。仅靠一种钝化方式修复可能难以达到效果,未来可从复合钝化剂研发及配施进行努力。另外,小麦、玉米重金属污染农田修复技术及效果与稻田存在差异,由于稻田土壤条件为酸性且淹水,多数修复技术偏向于碱性钝化材料,同时结合水分管理等技术,而小麦、玉米为旱作作物,土壤环境不同,钝化剂种类范围也更大。综上,低积累镉品种的选用对稻田及小麦、玉米重金属污染农田的降镉效果均最强,值得重点研究。

3 结论

国内外对小麦、玉米重金属污染农田修复的研究起步较缓,在2010年之后增速加大,但研究热度明显低于稻田。研究热点同稻田一致,均以镉污染修复最多,不同类别的农田修复技术中,施用钝化剂/改良剂的研究受关注度最高,但所用钝化剂种类及效果与稻田不同。小麦、玉米重金属污染农田修复领域发文的主要来源期刊有: *Journal of Hazardous Materials*、*Science of the Total Environment*、*Chemosphere*、《农业环境科学学报》及《生态环境学报》。

表4 小麦、玉米农田土壤镉污染修复技术效果

Table 4 Effects of remediation technology of Cd pollution in wheat and maize farmland soil

修复技术(样本数) Remediation technologies(sample number)		土壤镉含量均值 Mean value of soil Cd content/(mg·kg ⁻¹)	土壤pH均值 Mean value of soil pH	pH提升值 pH rising value	土壤镉生物有效性降 低率 Reduction rate of soil Cd bioavailable/%	作物籽粒降镉率 Reduction rate of crop Cd content/%	产量提升 Yield rising rate/%
无机钝 化改良	石灰及工业副产品类(n=42)	1.74	5.78	0.90	26.32	24.96	29.06
	磷酸盐类及金属氧化物类(n=35)	5.08	7.22	0.98	31.00	26.00	37.80
	黏土矿物类(n=24)	1.81	6.74	1.23	35.90	30.18	8.19
	无机复合类(n=28)	1.72	6.43	1.84	34.44	47.80	36.63
有机钝 化改良	生物肥及有机物料(n=39)	5.73	6.63	0.42	31.63	46.47	37.91
	生物炭(n=29)	2.19	7.30	0.85	35.75	32.82	22.74
	无机+有机复合类(n=22)	1.94	7.93	0.53	47.94	53.51	13.96
	叶面阻控类(n=17)	0.76	7.06	—	—	23.26	7.00
	品种筛选(n=71)	1.11	6.76	—	—	57.73	—
	植物修复(n=17)	0.63	6.69	0.74	26.66	33.60	4.14
	联合修复(n=12)	1.13	5.93	0.87	49.20	39.00	24.95
	范围	0.63~5.73	5.78~7.93	0.42~1.84	26.32~49.20	23.26~57.73	4.14~37.91

田间试验条件下小麦、玉米镉污染农田修复效果的统计表明,低积累镉小麦、玉米品种的应用在降低作物籽粒中镉的效果最佳,降镉率达57.73%,其次是无机+有机复合类钝化修复技术,籽粒的降镉率达53.51%。无机-有机复合类修复材料和低积累品种选用是小麦、玉米重金属污染农田修复利用的有效技术和发展方向。

参考文献:

- [1] 尚二萍, 许尔琪, 张红旗, 等. 中国粮食主产区耕地土壤重金属时空变化与污染源分析[J]. 环境科学, 2018, 39(10): 4670-4683. SHANG Er-ping, XU Er-qi, ZHANG Hong-qi, et al. Spatial-temporal trends and pollution source analysis for heavy metal contamination of cultivated soils in five major grain producing regions of China[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(10): 4670-4683.
- [2] Li J R, Xu Y M. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment[J]. *Chemosphere*, 2017, 185: 1228.
- [3] 王兰, 刘方, 王俭, 等. 铅锌矿渣酸性淋溶下重金属释放特征及其对植物幼苗生长的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(6): 1121-1126. WANG Lan, LIU Fang, WANG Jian, et al. Release characteristics of heavy metals in Pb/Zn tailings under acid leaching and the effects of leachate on plant seedlings growth[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(6): 1121-1126.
- [4] 肖青青, 王宏斌, 赵宾, 等. 云南个旧市郊农作物重金属污染现状及健康风险[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2): 271-281. XIAO Qing-qing, WANG Hong-bin, ZHAO Bin, et al. Heavy metal pollution in crops growing in suburb of Gejiu City, Yunnan Province, China: Present situation and health risk[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2): 271-281.
- [5] Li J, Xu Y. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment[J]. *Chemosphere*, 2015, 22(7): 5580-5586.
- [6] 蔡美芳, 李开明, 谢丹平, 等. 我国耕地土壤重金属污染现状与防治对策研究[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(增刊2): 223-230. CAI Mei-fang, LI Kai-ming, XIE Dan-ping, et al. The status and protection strategy of farmland soils polluted by heavy metals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 37(Suppl 2): 223-230.
- [7] 宋赛虎, 孟繁华, 郝艳, 等. 东北及黄淮海平原农产品产地土壤污染风险及防控对策[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1662-1668. SONG Sai-hu, MENG Fan-hua, HAO Yan, et al. Agricultural production area soil contamination risks and prevention countermeasures in Northeast China and the Huanghuaihai Plain[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(10): 1662-1668.
- [8] 强承魁, 秦越华, 曹丹, 等. 小麦富集重金属的品种差异及其潜在健康风险评估[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1489-1496. QIANG Cheng-kui, QIN Yue-hua, CAO Dan, et al. Difference of heavy metal bioaccumulation among wheat varieties and their potential health risk assessment[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2017, 37(11): 1489-1496.
- [9] 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策议[J]. 农业现代化研究, 2018, 39(4): 535-542. HU Peng-jie, LI Zhu, WU Long-hua. Current remediation technologies of heavy metal polluted farmland soil in China: Progress, challenge and countermeasure[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(4): 535-542.
- [10] 杜彩艳, 王攀磊, 杜建磊, 等. 生物炭、沸石与膨润土混施对玉米生长和吸收Cd、Pb、Zn的影响研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 190-198. DU Cai-yan, WANG Pan-lei, DU Jian-lei, et al. Influence of fixed addition of biochar, zeolite and bentonite on growth and Cd, Pb, Zn uptake by maize[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(1): 190-198.
- [11] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1377-1386. SUN Li-juan, QIN Qin, SONG Ke, et al. The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2018, 27(7): 1377-1386.
- [12] 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 186-194. ZENG Xi-bo, XU Jian-ming,

- HUANG Qiao-yun, et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 186-194.
- [13] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 1030-1043. HUANG Dao-you, ZHU Qi-hong, ZHU Han-hua, et al. Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, 39(6): 1030-1043.
- [14] 杜彩艳, 段宗颜, 曾民, 等. 田间条件下不同组配钝化剂对玉米 (*Zea mays*) 吸收 Cd、As 和 Pb 影响研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(10): 1731-1738. DU Cai-yan, DUAN Zong-yan, ZENG Min, et al. Effects of different combined amendments on cadmium, arsenic and lead absorption of maize under field conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(10): 1731-1738.
- [15] 陆伟, 钱坤, 唐祥彬. 文献下载频次与被引频次的相关性研究——以图书情报领域为例[J]. *情报科学*, 2016, 34(1): 3-8. LU Wei, QIAN Kun, TANG Xiang-bin, et al. Research on the correlation between the frequency of literature downloading and the frequency of cited: Taking the field of library and information as an example[J]. *Information Science*, 2016, 34(1): 3-8.
- [16] 王会梅. 数字图书馆中 Web of science 数据库的解读与应用[J]. *农业图书情报学刊*, 2010, 22(11): 100-103. WANG Hui-mei. Analyses and application of Web of Science database in digital libraries[J]. *Journal of Library and Information Sciences in Agriculture*, 2010, 22(11): 100-103.
- [17] 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. HU Yuan-mei, ZHOU Jun, LIU Hai-long, et al. Bibliometric analysis of studies on remediation of heavy metals contaminated soils based on Web of Science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(3): 707-720.
- [18] 丁学东. 文献计量学基础[M]. 北京: 北京大学出版社, 1993. DING Xue-dong. *Bibliometric basis*[M]. Beijing: Peking University Press, 1993.
- [19] 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. DU Zhi-peng, SU De-chun. Bibliometric analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies on paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11): 2409-2417.
- [20] 金碧辉, 汪寿阳, 任胜利, 等. 论期刊影响因子与论文学术质量的关系[J]. *中国科技期刊研究*, 2000, 11(4): 202-205. JIN Bi-hui, WANG Shou-yang, REN Sheng-li, et al. On the relationship between journal impact factor and academic quality[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2000, 11(4): 202-205.
- [21] 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. LÜ Kai, ZHANG Cai-li. Bibliometric analysis of soil heavy metal pollution restoration in China[J]. *Journal of Agriculture*, 2017, 7(5): 56-59, 95.
- [22] Lluch J O. Some consideration on the use of the impact factor of scientific journals as a tool to evaluate research in psychology[J]. *Scientometrics*, 2005, 65(2): 189-197.
- [23] Li J F, Zhang Y H, Wang X S, et al. Bibliometric analysis of atmospheric simulation trends in meteorology and atmospheric science journals[J]. *Croatica Chemica Acta*, 2009, 82(3): 695-705.
- [24] 帅鸿, 欧阳迪庆, 陈玉成. 基于文献计量的我国农地重金属研究热点分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 688-695. SHUAI Hong, OUYANG Di-qing, CHEN Yu-cheng. Hotspot issues of heavy metals in China's farmland based on bibliometrics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 688-695.
- [25] 佟倩, 纪薇薇, 沈洋, 等. 硅对镉锌复合污染下玉米植株体内镉、锌含量及重金属形态的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(8): 171-176. TONG Qian, JI Wei-wei, SHEN Yang, et al. Impacts of Si on concentrations of Cd and Zn in corn and their forms in soil[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2016, 44(8): 171-176.
- [26] Yang G H, Zhu G Y, Li H L, et al. Accumulation and bioavailability of heavy metals in a soil-wheat/maize system with long-term sewage sludge amendments[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(8): 1861-1870.
- [27] 田帅, 丁永祯, 居学海. 玉米对重金属胁迫的响应及其在植物修复中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(5): 2208-2210. TIAN Shuai, DING Yong-zhen, JU Xue-hai. Study on the response of maize to heavy metal stress and its applications in phytoremediation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2009, 37(5): 2208-2210.
- [28] 邢金峰, 仓龙, 任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 224-234. XING Jin-feng, CANG Long, REN Jing-hua. Remediation stability of in situ chemical immobilization of heavy metals contaminated soil: A review[J]. *Soils*, 2019, 51(2): 224-234.
- [29] 刘喜, 肖劲光, 陈伟. 基于文献计量的重金属污染土壤生物修复研究发展态势分析[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(13): 189-192. LIU Xi, XIAO Jin-guang, CHEN Wei. Development trends of bioremediation of heavy metal contaminated soils based on bibliometrics[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(13): 189-192.
- [30] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(3): 471-477. QIN Li, ZU Yan-qun, ZHEN Fang-dong, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(3): 471-477.
- [31] 刘拓, 王萌, 陈世宝. 基于小麦籽粒降 Cd 率及土壤 Cd 形态变化评价蚯蚓对 Cd 污染土壤的修复效果[J]. *地学前缘*, 2019, 26(6): 75-81. LIU Tuo, WANG Meng, CHEN Shi-bao. Evaluation of the efficiency of remediation of Cd contaminated soil by earthworm based on the rate of Cd reduction in wheat grain and changes in Cd bioavailability in soil experiment[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(6): 75-81.
- [32] 刘灵芝, 张玉龙, 李培军, 等. 丛枝菌根真菌 (*Glomus mosseae*) 对玉米吸镉的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(3): 568-572. LIU Ling-zhi, ZHANG Yu-long, LI Pei-jun, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (*Glomus mosseae*) on Cd accumulation in maize plants[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(3): 568-572.
- [33] 龙思斯, 杨益新, 宋正国, 等. 三种类型阻控剂对不同品种水稻富集镉的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(5): 459-465. LONG Si-si, YANG Yi-xin, SONG Zheng-guo, et al. Effects of three inhibitors on the accumulation of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(5): 459-465.