

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.

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*

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

摘要: 为了解国内、外稻田重金属污染修复治理研究进展、研究趋势以及稻田镉污染修复治理效果, 通过检索 2006—2017 年 CNKI 中国期刊全文数据库和 Web of Science™ 核心合集数据库有关稻田重金属污染修复治理领域相关文献, 利用软件对相关文献进行计量分析, 并再次筛选出大田条件下稻田镉污染修复治理技术和效果。结果表明: 国内、外本领域近 12 年中英文发文数量基本持平; 近 6 年年发文数量迅速增长, 但中文论文本地篇均被引次数较低; 该领域发文主要期刊有《农业环境科学学报》《环境科学》《生态环境学报》《Environmental Pollution》《Journal of Hazardous Materials》和《Chemosphere》; 主要研究的重金属是镉、铅、砷等; 稻田重金属污染修复治理技术主要包括基施钝化类修复剂的固定/稳定化修复技术、重金属低积累水稻品种、叶面阻控剂以及农艺调控措施等; 大田条件下对稻田镉污染修复治理的主要技术以及该技术稻米平均降镉率分别为低镉积累水稻品种 74.50%, 黏土矿物钝化剂 46.85%, 叶面阻控剂+基施改良剂 44.52%, 无机组配改良剂 42.19%, 水分管理+基施改良剂 41.19%。

关键词: 文献计量; 稻田; 重金属; 镉; 修复技术; 降镉效果

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2018)11-2409-09 doi:10.11654/jaes.2018-1128

Bibliometric analysis of the effects of heavy metal pollution remediation technologies on paddy fields

DU Zhi-peng, 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 evaluation of remediation technologies for heavy metal contaminated paddy fields is essential for developing and implementing soil remediation strategies. By means of literature research, we summarized the progress of research on remediation technologies and their performance on heavy metal pollution in domestic and foreign paddy soils for the period 2006—2017. The related software (HistCite and Excel) was used to analyze relevant literature from the China National Knowledge Infrastructure (CNKI), namely the China Academic Journals Full-text Database, as well as the Web of Science Core Collection Database. The techniques and effects of remediating cadmium pollution in paddy fields under field conditions were obtained through screening and sorting. We found that an approximately equal number of papers had been published in English and Chinese over the past 12 years. The number of Chinese articles issued increased rapidly over the past six years; however, the average total local citation score (TLCS/R) was relatively low as a whole. The main journals in this field included *Journals of Agro-Environment Science*, *Environmental Sciences*, *Ecology and Environment*, *Hazardous Materials*, *Environmental Pollution*, and *Chemosphere*. The major remediation and control technologies were immobilization-stabilization remediation techniques with base-applied passivators, the screening of heavy metal low-accumulation rice varieties, and agronomic measures, which could be used with various heavy metal ions such as cadmium, lead, and arsenic. The top five effective remediation techniques for cadmium contaminated soils

收稿日期: 2018-08-31 录用日期: 2018-10-15

作者简介: 杜志鹏 (1994—), 男, 山西吕梁人, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤污染控制与修复。E-mail: 1049797989@qq.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); 国家自然科学基金项目 (41271488)

Project supported: The National Key R&D Projects of China (2017YFD0801103); The National Natural Science Foundation of China (41271488)

included screening for low cadmium accumulation rice varieties, clay minerals, foliar control agents and stabilizing amendments, inorganic combined amendments, and water management and stabilizing amendments. Their average cadmium reduction rates were 74.50%, 46.85%, 44.52%, 42.19%, and 41.19%, respectively.

Keywords: bibliometrics; paddy fields; heavy metal; cadmium; remediation technology; cadmium reduction rate

近30年,随着我国工业化进程的加速和社会经济的快速发展,农田土壤污染和质量下降问题日趋突出。2014年4月国家环境保护部与国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤重金属等污染物点位超标率达19.4%,镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍8种无机污染物点位超标率分别为7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%、4.8%,污染形势不容乐观^[1]。耕地土壤重金属污染会导致农产品重金属含量超标。重金属作为人体非必需元素,半衰期较长,通过食物链极易在人体内累积,因长期食用重金属污染的食物可造成骨毒害、肾损伤、免疫系统缺失、生殖功能障碍、致畸、致癌等各种疾病^[2]。近年来,国内发生了数起重金属污染相关的事件,包括镉大米、镉小麦、血铅超标等^[3]。水稻作为我国的第一大粮食作物,其年均种植面积为2860万hm²,年产稻米1.85亿t,占粮食总产量的40%^[4-5],而作为我国稻米主产区的西南、华南和中南地区正是土壤重金属污染较为突出的区域。因此,修复治理稻田土壤重金属污染,保障稻米食用安全,对于我国生态环境安全与食品安全有着不可忽视的作用。

对于大面积的稻田重金属污染修复治理,现阶段多采用固定/稳定化方法,降低污染土壤中重金属的生物有效性,阻止农作物对其吸收,使一些污染程度较低的农田还可以继续安全的生产农产品。其主要机制是通过向污染土壤中施加一些物质,以改变重金属在土壤中的存在状态,降低其在土壤中的迁移性和生物可利用性,使土壤中重金属固定/稳定化,减少作物对重金属的富集,从而减少重金属对作物的危害^[6]。比如基施钝化类的无机、有机以及它们的组配形式^[7-9]。不同品种的水稻对重金属的积累存在显著性差异^[10-11],通过筛选重金属低积累品种可以有效降低稻米中重金属含量^[12]。此外,水分管理、叶面阻控剂也可有效降低稻米中重金属含量^[13-15]。

文献计量学以文献体系和文献计量特征为研究对象,被广泛用于文献情报分析,进而评价某领域科学发展现状及水平^[16]。本文通过检索CNKI中国期刊全文数据库和Web of ScienceTM核心合集数据库2006—2017年稻田重金属污染修复治理领域相关文献,利

用Excel软件筛选整理、HistCite引文分析软件统计分析相关文献,了解国内、外稻田重金属污染修复治理领域最新研究进展、修复技术类型和特征,并通过文献分析整理出在大田试验条件下稻田镉污染修复治理技术的修复治理效果,以期为我国稻田重金属污染修复治理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 中文数据来源

本文中文数据来源于CNKI的中国期刊全文数据库。利用中国知网高级检索功能,检索时间跨度为2006—2017年,检索截止时间为2017年12月31日,以“重金属”并“水稻”或含“稻田”为主题,利用“改良”、“钝化”、“固定”、“调理”、“阻控”、“修复”、“减少”、“降低”等主题词在上次主题词搜索结果中再次检索,逐条整理挑选,去掉重复、不相关题录、一稿多发、简讯、会议报告等,共获取中文文献551篇。

1.2 英文数据来源

本文英文数据来源于美国汤森路透公司(Thomson Reuters)出版的Web of ScienceTM核心合集数据库。该数据库收录的文献覆盖了全世界最重要和最有影响力的研究成果,是世界公认的自然科学领域最为重要的检索平台。利用主题词(TS),设计与稻田重金属修复相关文献的检索式如下:TS= (("acid soil*" or "rice field*" or paddy or rice or "agricultural soil*") and ("heavy metal*" or lead or "black lead" or plumbum or cadmium 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 bioremediat* or co-remediat* or phytostabilizat* or phytoinfiltrat* or hyperaccumulate or remediat* or repair or restore* or localizat* or accumulat* or Immobiliz* or improve* or control or passivation or fix* or amendment) not maize not wheat),检索时间为2006—2017年,文献类型为Article和Review,逐条整理挑选之后,共获取英文相关文献593篇。

1.3 研究方法

中文文献按Excel文件格式导出,利用Excel进行

分类整理统计,对2006—2017年间发表的有关稻田重金属污染修复技术文献从年度发文量、来源期刊分析、关键词分析、研究热点等方面进行计量统计。

利用Web of ScienceTM数据库自带的分析工具、HistCite软件、Excel 2013软件,对2006—2017年间发表的有关稻田重金属修复技术文献从国家/地区发文量、来源期刊分析、关键词分析、研究方向以及热点等方面进行计量统计。其中用HistCite软件进行数据分析时,是将从Web of ScienceTM核心合集数据库下载的txt全纪录格式的题录,按照研究内容的需要将文本导入至HistCite软件,然后进行分析。

从1144篇中英文文献中再次筛选出在大田试验条件下修复稻田镉污染的各种技术文献,并从文献中提取相关修复稻田镉的数据,对各种技术修复稻田镉污染的效果(各修复技术对土壤pH提升单位、降低土壤中镉生物有效性、稻米降镉率等)进行分析比较。

2 结果与讨论

2.1 发文量及年度变化趋向

发文量表征科研人员对本领域热点的关注程度,一定意义上表明了稻田重金属修复领域的发展速度和发展程度^[17]。所发论文被SCI收录数量一定程度上可反映一个国家/地区的整体科研实力和国际影响力^[18]。年度发文量结果(图1)表明,在2006—2011年间,中英文稻田重金属修复领域发文量增加不显著,但从2011—2017年,中英文稻田重金属修复领域发文量迅速增长。到2017年,中文年发文量为111篇,是2011年发文量的5.5倍;英文发文量为118篇,是2011年发文量的3倍。2011—2017年该领域中文和英文发文量的年增长率分别为115%、32.5%、5.3%、-1.7%、44.1%、30.6%和2.6%、12.5%、22.2%、25.5%、94.2%、-11.9%,2012—2017年中文和英文发文量年平均增长率为37.6%和24.2%。2012—2017年6年累计中文和英文发文量占统计年限(12年)总发文量的75.3%和77.7%,说明近6年稻田重金属污染修复问题受到科研人员的高度重视,在该领域的研究热度也逐渐提升。在2015年之后,中英文发文量都呈爆发式增长,主要原因可能是2014年4月17日环保部和国土资源部^[19]历时8年调查发布的《全国土壤污染状况调查公告》出台以及2014年4月24日新环保法的颁布,进一步有效地推动了科研人员对稻田污染修复的研究工作,加快了该领域的研究热度提升。国外土壤重金属修复文献统计显示,从20世纪

80年代开始便有重金属土壤污染修复的相关研究^[20],且发文量持续增长,而此时国内研究开展较少。2006—2017年稻田重金属修复领域国内、国际趋势相同,基本持平,发文量均处于快速发展期。



图1 2006—2017年稻田重金属污染修复领域年度发文量

Figure 1 Annual published articles on heavy metals pollution remediation in paddy fields from 2006 to 2017

2.2 主要国家发文量分析

一个国家/地区的发文量一定程度上代表了在该领域研究的活跃程度,总被引频次(TGCS)反映了一个国家/地区的整体科研实力和科研影响力^[21],本地被引频次(TLCS)则代表了本国所发表的论文在该领域的重要程度,可更贴切地表明一个国家在该领域的影响力。从Web of ScienceTM核心合集数据库中共检索出中国、印度、美国等50个国家/地区发表了有关稻田重金属污染修复的研究论文。在现有数据上,对2006—2017年不同国家/地区的发文情况进行分析,论文发表数量排名前10位的国家/地区如表1所示,中国的发文量排名第一,共387篇,遥遥领先于其他国家,占英文发文总量的65.3%,分别是排名第二的印度发文量的4.5倍和排名第三的美国发文量的6.2倍,可见我国在稻田重金属污染修复领域的研究占有重要地位,间接也说明我国当下稻田重金属污染问题的严峻。由表1可知,中国发文量虽然位居榜首,稻田重金属修复治理领域虽然发展较快,但其篇均被引次数、本地篇均被引次数排名均偏低,表明中国在该领域的研究虽然比较活跃,但国际影响力不高,应加强该领域的创新性研究。日本发文量排第四,其篇均被引次数、本地篇均被引次数排名均为第一,表明日本在稻田重金属污染修复治理领域的文章影响力较强。

2.3 期刊来源分析

对2006—2017年稻田重金属污染修复领域中文

文献检索结果进行分析,收录与稻田重金属修复相关的研究论文前10种中文期刊如表2,在这10种期刊中,发文量排第一的是《农业环境科学学报》,为95篇,占期刊发文总量的15.94%。综合影响因子最高的期刊是《生态学报》,为2.521。发文量排名前10的中文期刊总发文量为284篇,占该领域中文期刊发文总量的51.54%。

对2006—2017年稻田重金属污染修复领域英文文献检索结果进行分析,收录与稻田重金属修复相关的研究论文有187家英文期刊,英文发文量前10的期刊如表3。发文量第一的期刊为《Environmental Sci-

ence and Pollution Research》,其发文量为57篇。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6.513,其次是《Environmental Pollution》《Science of the Total Environment》《Chemosphere》和《Ecotoxicology and Environmental Safety》,近5年平均影响因子分别为5.291、4.984、4.551、4.000,在2017年期刊引证报告中,这5种期刊均属于Q1分类,其余5种期刊近5年影响因子在1.972~3.921之间。某期刊的本地篇均被引次数(TCLS/R)可直观表现出该期刊所刊登稻田重金属修复领域研究文章在本领域的受重视程度,本地篇均被引次数最高为

表1 2006—2017年稻田重金属污染修复研究发文量排名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 paddy soil from 2006 to 2017

国家/地区 Country/region	发文量 Records/篇	本地总被引次数 TLCS	总被引次数 TGCS	本地篇均被引次数 TLCS/R	篇均被引次数 TLCS/R
中国 China	387	941	4797	2.43	12.40
印度 India	86	127	1375	1.48	15.99
美国 USA	62	223	1504	3.60	24.26
日本 Japan	57	317	1695	5.56	29.74
韩国 South Korea	45	123	854	2.73	18.98
巴基斯坦 Pakistan	37	94	808	2.54	21.84
澳大利亚 Australia	29	102	489	3.52	16.86
英国 UK	29	120	721	4.14	24.86
西班牙 Spain	26	25	511	0.96	19.65
孟加拉国 Bangladesh	19	31	333	1.63	17.53

注:TLCS表示的是某一篇文章被导入 HistCite 进行分析的这几百或几千篇文献所引用的次数,若某一篇文献的 TLCS 值越高,说明该文献在该研究领域内影响越大。下同。

Notes: TLCS denotes the number of references to hundreds or thousands of articles that have been imported into HistCite for analysis. The higher the TLCS value of a document, the greater the impact of the document on the field. The same below.

表2 2006—2017年稻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 paddy soil from 2006 to 2017

期刊名称 Journal name	发文量/篇 Records	占期刊发文总量比例% Proportion of the total number of articles	复合影响因子 Compound impact factor	综合影响因子 Comprehensive impact factor
农业环境科学学报	95	15.94	2.218	1.513
湖南农业科学	37	6.21	0.370	0.259
环境科学	34	5.70	2.870	2.026
生态环境学报	26	4.36	2.391	1.559
中国农学通报	24	4.03	0.980	0.631
环境科学学报	18	3.02	2.346	1.563
水土保持学报	15	2.52	1.873	1.269
安徽农业科学	13	2.18	0.423	0.248
中国稻米	12	2.01	0.608	0.435
生态学报	10	1.68	3.540	2.521

表3 2006—2017年稻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 paddy soil from 2006 to 2017

期刊Journal name	发文量/篇 Records	本地总被引次数 TLCS	本地篇均被引次数 TLCS/R	近5年平均影响因子 Impact factor	期刊分区 Journal ranking
Environmental Science and Pollution Research	57	111	1.95	2.989	Q2
Chemosphere	45	162	3.60	4.551	Q1
Ecotoxicology and Environmental Safety	36	124	3.44	4.000	Q1
Environmental Pollution	33	176	5.33	5.291	Q1
Science of the Total Environment	28	67	2.39	4.984	Q1
Journal of Soils and Sediments	26	48	1.85	2.736	Q2
Water Air and Soil Pollution	23	33	1.43	1.972	Q3
Journal of Hazardous Materials	17	80	4.71	6.513	Q1
Geoderma	13	60	4.62	3.921	Q1
Journal of Environmental Sciences	13	70	5.38	3.242	Q2

5.38,所属期刊为《Journal of Environmental Sciences》,其次为《Environmental Pollution》《Journal of Hazardous Materials》《Geoderma》和《Chemosphere》,本地篇均被引次数分别为5.33、4.71、4.62、3.60。综合近5年平均影响因子和本地篇均被引次数排名前5的期刊,归纳出在稻田中金属污染修复领域影响力较强的3种期刊为《Environmental Pollution》《Journal of Hazardous Materials》和《Chemosphere》。

2.4 稻田重金属污染类别分析

稻田重金属污染类别文章的数量一定意义上也代表了某种重金属的污染程度。图2为2006—2017年中文稻田重金属污染类别,可见中文发文量第一的重金属为镉,发文量达548篇,占中文稻田重金属污染修复总发文量的56.32%;同样对2006—2017年英文稻田重金属污染修复类别(图3)分析发现,发文量第一的重金属仍为镉,发文量达458篇,占比31.11%。此外,结合2006—2017年中英文稻田重金属污染修复领域主要关键词出现频次(图4、图5)将出现频次最高的前100个关键词进行分类合并,稻田重金属污染出现频次最高的重金属同样是镉。说明全球稻田重金属污染中镉污染最突出,包括我国,这与我国2014年的《全国土壤状况调查公报》中所报告的镉的点位超标率为7.0%,是所有无机污染中污染最严重的结论相符合,另外铅、砷等重金属污染也较为严重^[22-23]。中文与英文稻田重金属污染类别均为镉、铅、砷、铜、锌,表明在稻田重金属污染修复领域研究人员的重金属研究热点为镉、铅、砷、铜、锌这5种重金属,间接也说明全球稻田主要受镉、铅、砷、铜、锌这

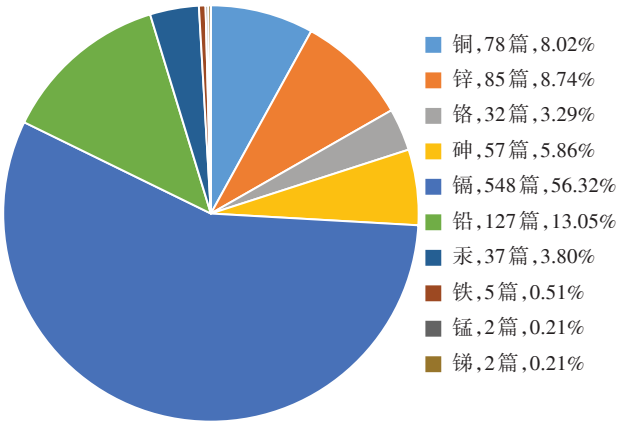


图2 2006—2017年中文稻田重金属污染修复类别

Figure 2 Being published Chinese articles in paddy field heavy metals pollution category from 2006 to 2017

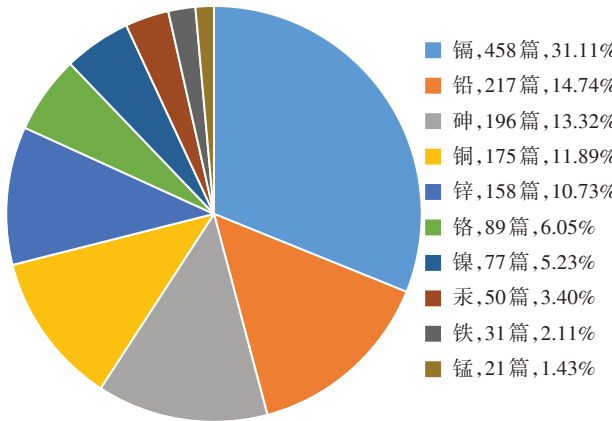


图3 2006—2017年英文稻田重金属污染修复类别

Figure 3 Being published English articles in paddy field heavy metals pollution category from 2006 to 2017

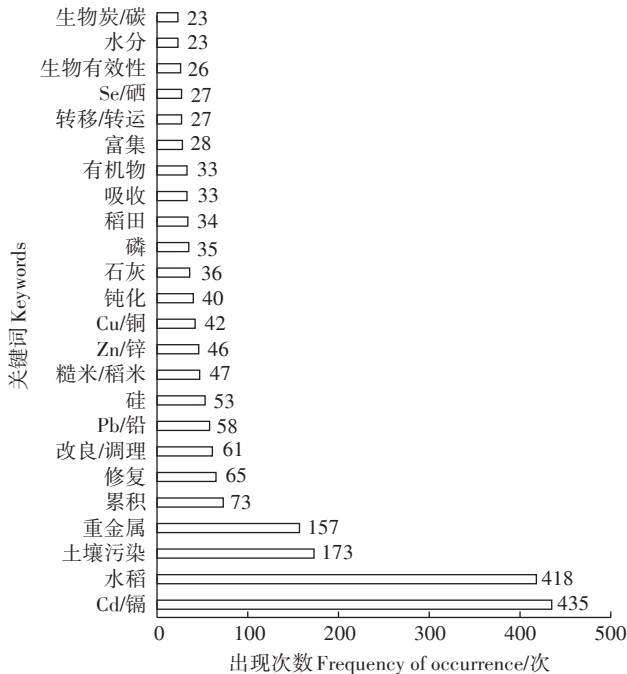


图4 2006—2017年中文稻田重金属污染修复领域
主要关键词出现频次

Figure 4 Frequency of major keywords in published Chinese articles of remediation of heavy metals contaminated paddy soil from 2006 to 2017

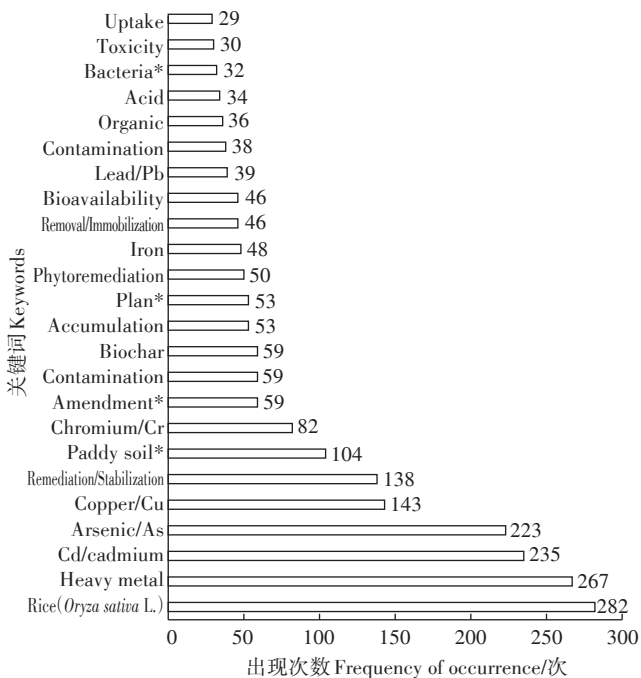


图5 2006—2017年英文稻田重金属污染修复领域
主要关键词出现频次

Figure 5 Frequency of major keywords in published English articles of remediation of heavy metals contaminated paddy soil from 2006 to 2017

5种重金属污染。对比中英文稻田砷污染发文量百分比,英文明显高于中文,表明国外的稻田砷污染修复研究工作较我国更多。许多研究都表明,治理铅、镉、铜、锌等重金属的化学调理剂一般可提高土壤pH值,这在很大程度上可能提高土壤砷的生物活性,在治理镉、铅、砷等复合污染稻田时,对修复某种重金属污染有效果,但不一定对砷有效果^[24-25]。因此,不仅需要稻田单个重金属污染进行修复治理,也需关注稻田重金属复合污染修复治理的效果。

2.5 稻田重金属污染修复技术分析

对2006—2017年稻田重金属污染修复中英文出现频次最高的前100个关键词频次进行分析(图4、图5),发现稻田重金属污染修复主要是通过钝化或改良技术将重金属固定在土壤中,降低土壤中重金属的生物有效性,减少有效重金属被水稻吸收以及累积^[26],这一类的钝化剂有石灰类、硅钙类、磷酸盐类、有机物料、生物炭等。其次也有通过叶面喷施阻控剂阻止重金属转运基因的表达以及在细胞壁固定部分重金属等,以有效阻控重金属向稻米中转运^[27-28],这一类叶面阻控剂有硅类、硒类、锌类等。也可通过水分管理等农艺措施来降低水稻对重金属的吸收累积^[29-30]。

将2006—2017年1144篇中英文稻田重金属污染修复文献按修复类型分为基施钝化类、水稻品种筛选、农艺措施、叶面阻控、生物修复、机理/综述六大类,其发文量如图6。国内外稻田重金属污染修复技术都是以基施钝化类为主要研究方向,中文和英文发文量分别为377篇和397篇,占有稻田重金属修复技术的53.9%和49.0%。比较2006—2017年中英文稻田重金属污染各修复技术的发文量可发现,除了基

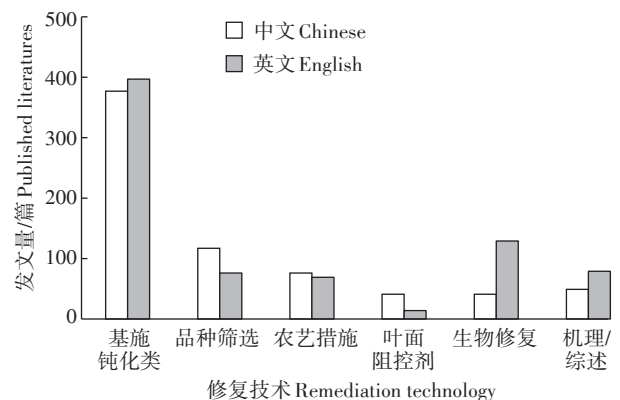


图6 2006—2017年中英文稻田重金属污染各修复技术发文量
Figure 6 The number of published Chinese and English articles about remediating heavy metals pollution in paddy soils from 2006 to 2017

施钝化类修复技术,国内研究人员比较侧重水稻品种的筛选以及叶面阻控剂对水稻的阻控效果研究,而国际研究者比较侧重生物修复技术和机理/综述的研究工作。就我国而言,约有 $1 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 的重金属污染土壤,其中轻中度重金属污染占超标点位的94.3%,地域上大部分分布于南方亚热带水热资源丰富地区,修复治理后的土壤具有巨大的利用潜力;中度和轻度污染的土壤修复后,单位面积产量可以提高10%以上^[31],因此,大面积轻中度重金属污染稻田修复治理具有很实际的意义。基于生物地球化学理论,稻田重金属行为是水-土-气-生共同作用的地表过程。镉、砷等元素从土壤矿物至植物根表的迁移机制、从根至籽粒的转运机制,是关键科学问题。从基础入手,研发降低重金属从矿物迁移至根表的钝化技术、阻控可食部位积累重金属的生理阻隔技术(叶面阻控剂),是阻控稻米重金属积累的有效途径^[32]。

2.6 稻田镉污染修复技术效果分析

在“2.4 稻田重金属污染类别分析”中得出,稻田重金属污染中镉污染最为突出,稻米食用安全需要保障,对众多稻田镉污染修复技术效果(稻米降镉率)进行统计分析,有利于筛选出高效的稻田镉污染修复技术。

对2006—2017年稻田重金属污染修复领域筛选

出的1144篇文章进行二次筛选,挑选出稻田镉污染修复技术且在大田试验条件下进行的文章,对其试验地土壤性质、施用修复技术后的pH变化单位、降低土壤镉生物有效性、施用修复技术前后的稻米镉含量、产量等进行统计(表4)。稻田镉修复技术包括石灰类物质、硅钙类物质、黏土矿物、有机物料、生物炭、磷酸盐类、生物肥类、无机组配改良剂、无机+有机组配改良剂、叶面阻控剂、叶面阻控剂+基施改良剂、水分管管理+基施改良剂、品种筛选等。

从表4可知,试验地土壤pH多为酸性,土壤镉含量严重超标。除叶面阻控和品种筛选外,其他修复技术都不同程度地提升了稻田土壤pH,其中最为明显的是黏土矿物修复技术,其次为无机组配改良剂修复技术,分别提升了0.98、0.95个单位。降低土壤镉生物有效性最显著的是无机组配改良剂修复技术,其次是无机+有机组配改良剂修复技术,分别降低50.31%、38.54%。在施用各项稻田镉污染修复技术后,稻米中的镉含量都明显下降。其中,稻米降镉率最高为74.50%,以下为46.85%、44.52%、42.19%、41.19%、38.69%、35.67%、34.62%、33.89%、31.28%、27.23%、21.27%、14.77%,分别为品种筛选、黏土矿物、叶面阻控+基施改良剂、无机组配改良剂、水分管管理+基施改良剂、无机+有机组配改良剂、生物炭、

表4 稻田镉污染修复技术及效果

Table 4 Effect of cadmium pollution repair technology in rice fields

修复技术 (样本数)	土壤pH 均值	Cd含量均 值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质均 值/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH提升 单位	降低土壤镉 生物有效 性/%	对照稻米镉 含量范围/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	对照稻米镉 含量均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	改良后稻米 镉含量范围/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	改良后稻米 镉含量均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	降镉 率/%	产量 提升/%
石灰类物质(81)	5.35	1.70	31.54	0.55	30.52	0.016~1.85	0.499	0.009~1.196	0.329	33.89	6.07
硅钙类物质(107)	5.51	1.99	31.35	0.35	19.98	0.016~3.9	0.629	0.009~3.4	0.458	34.62	5.80
黏土矿物(79)	5.67	1.69	38.96	0.98	22.32	0.036~1.85	0.605	0.016~0.817	0.319	46.85	4.00
有机物料(104)	5.48	1.79	31.07	0.23	10.17	0.13~2.3	0.567	0.1~1.29	0.45	14.77	7.77
生物炭(56)	5.37	4.99	22.35	0.48	23.69	0.05~3.2	1.162	0.04~2.82	0.723	35.67	13.16
磷酸盐类(39)	5.69	1.78	29.21	0.31	14.22	0.31~1.85	0.659	0.04~1.57	0.454	21.27	13.86
叶面阻控剂(62)	5.92	1.84	29.94	—	—	0.016~3.9	0.844	0.008~2.8	0.624	27.23	4.78
叶面阻控剂+基施 改良剂(33)	5.99	3.75	23.33	0.6	23.36	0.3~3.9	1.412	0.07~2.7	0.98	44.52	7.39
生物肥类(18)	5.45	0.82	46.4	0.28	13.04	0.023~0.69	0.378	0.022~0.576	0.244	31.28	6.33
无机组配改良剂 (89)	5.47	4.95	31.92	0.95	50.31	0.27~2.7	1.166	0.06~2.27	0.715	42.19	10.99
无机+有机组配改 良剂(59)	5.58	3.09	34.69	0.68	38.54	0.14~1.44	0.562	0.08~1.00	0.32	38.69	9.41
水分管管理+基施改 良剂(78)	5.84	1.44	20.21	0.48	29.59	0.092~1.12	0.344	0.048~0.77	0.207	41.19	4.29
品种筛选(111)	5.56	1.57	33.86	—	—	0.16~1.53	0.62	0.03~0.698	0.13	74.50	—

硅钙类物质、石灰类物质、生物肥类、叶面阻控剂、磷酸盐类、有机物料。产量提升最为显著的稻田镉污染修复技术为磷酸盐类和生物炭,分别提升13.86%和13.16%。

3 结论

(1)2006—2017年12年稻田重金属污染修复领域国内发文量与国际发文量基本持平,从2011年开始发文量迅速增加。研究的重金属元素主要是镉、铅、砷、铜、锌。研究热点主要为稻田镉污染修复治理,且基施钝化类修复固定/稳定技术最多。

(2)通过对2006—2017年大田试验条件下稻田镉污染修复技术修复效果统计,低积累镉品种筛选稻米降镉效果最好,其次为黏土矿物、叶面阻控剂+基施改良剂、无机组配改良剂、水分管理+基施改良剂、无机+有机组配改良剂,降镉率依次为74.50%、46.85%、44.52%、42.19%、41.19%、38.69%。

参考文献:

- [1] 庄国泰. 我国土壤污染现状与防控策略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4):477-483.
ZHUANG Guo-tai. Current situation of national soil pollution and strategies on prevention and control[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30(4):477-483.
- [2] Ke S, Cheng X Y, Zhang N, et al. Cadmium contamination of rice from various polluted areas of China and its potential risks to human health [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(7):408.
- [3] 胡鹏杰, 李柱, 吴龙华. 我国农田土壤重金属污染修复技术、问题及对策倡议[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.
- [4] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7):1257-1263.
ZHAN Jie, WEI Shu-he, NIU Rong-cheng. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: A review[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7):1257-1263.
- [5] Hu Y N, Cheng H F, Tao S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China: A critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92/93:515-532.
- [6] Zia-Ur Rehman M, Rizwan M, Ghafoor A, et al. Effect of inorganic amendments for in situ stabilization of cadmium in contaminated soils and its phyto-availability to wheat and rice under rotation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(21):16897-16906.
- [7] Rehman M, Khalid H, Akmal F, et al. Effect of limestone, lignite and biochar applied alone and combined on cadmium uptake in wheat and rice under rotation in an effluent irrigated field[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 227:560-568.
- [8] Xiao A W, Ouyang Y, Li W C, et al. Effect of organic manure on Cd and As accumulation in brown rice and grain yield in Cd-As-contaminated paddy fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(10):9111-9121.
- [9] Wei X, Liu Y Q, Zhan Q, et al. Effect of Si soil amendments on As, Cd, and Pb bioavailability in contaminated paddy soils[J]. *Paddy and Water Environment*, 2018, 16(1):173-181.
- [10] Duan G L, Shao G S, Tang Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10:9.
- [11] 张标金, 罗林广, 魏益华, 等. 不同基因型水稻镉积累动态差异分析[J]. 中国农学通报, 2015, 31(9):25-30.
ZHANG Biao-jin, LUO Lin-guang, WEI Yi-hua, et al. Analysis of cadmium accumulation dynamics in rice with distinct genotypes[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(9):25-30.
- [12] Cao F B, Ahmed I M, Zheng W T, et al. Genotypic and environmental variation of heavy metal concentrations in rice grains[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2013, 11(1):718-724.
- [13] Honma T, Ohba H, Kaneko A, et al. Effects of soil amendments on arsenic and cadmium uptake by rice plants (*Oryza sativa* L. cv. *Koshihikari*) under different water management practices[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2016, 62(4):349-356.
- [14] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2):215-222.
GAO Min, ZHOU Jun, LIU Hai-long, et al. Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):215-222.
- [15] 倪中应, 石一珺, 谢国雄, 等. 几种叶面肥控制水稻籽粒重金属积累的效果: 田间试验与盆栽试验的比较[J]. 江西农业学报, 2017, 29(12):38-42.
NI Zhong-ying, SHI Yi-jun, XIE Guo-xiong, et al. Controlling effects of several kinds of foliar fertilizer on accumulation of heavy metals in rice grains: Comparison between field experiment and pot experiment [J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2017, 29(12):38-42.
- [16] 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. Correlation analysis between document citation frequency and download frequency: In the field of library & information science[J]. *Information Science*, 2016, 34(1):3-8.
- [17] 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.
- [18] 串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于Web of Science数据库的土壤污染修复领域发展态势分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1):

- 12-20.
- CHUAN Li-min, ZHENG Huai-guo, ZHAO Tong-ke, et al. Trends in research on contaminated soil remediation based on web of science database[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(1): 12-20.
- [19] 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 中华人民共和国环境保护部, 中华人民共和国国土资源部, 2014.
- The Ministry of Environmental Protection of PRC, The Ministry of Land and Resources of PRC. Report on the national soil contamination survey[R]. Beijing: The Ministry of Environmental Protection of PRC, The Ministry of Land and Resources of PRC, 2014.
- [20] Guo K, Liu Y F, Zeng C, et al. Global research on soil contamination from 1999 to 2012: A bibliometric analysis[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 2014, 64(5): 377-391.
- [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.
- 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.
- [22] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153-159.
- XU Jian-ming, MENG Jun, LIU Xing-mei, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 153-159.
- [23] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750-759.
- [24] 辜娇峰, 周航, 贾润语, 等. 三元土壤调理剂对田间水稻镉砷累积转运的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1910-1917.
- GU Jiao-feng, ZHOU Hang, JIA Run-yu, et al. Effects of a tribasic amendment on cadmium and arsenic accumulation and translocation in rice in a field experiment[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1910-1917.
- [25] Mendoza-Cózatl D G, Jobe T O, Hauser F, et al. Long-distance transport, vacuolar sequestration, tolerance, and transcriptional responses induced by cadmium and arsenic[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2011, 14(5): 554-562.
- [26] 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.
- LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. In situ immobilization remediation of heavy metals in contaminated soils: A review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(4): 721-728.
- [27] Huang B F, Xin J L, Dai H W, et al. Effects of interaction between cadmium(Cd) and selenium(Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice(*Oryza sativa* L.) system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(43): 9537-9546.
- [28] Chen R, Zhang C B, Zhao Y L, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2361-2368.
- [29] 崔晓荧, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177-2184.
- CUI Xiao-ying, QIN Jun-hao, LI Hua-shou. Effect of different water management modes on rice(*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2177-2184.
- [30] 杨定清, 雷绍荣, 李霞, 等. 大田水分管理对控制稻米镉含量的技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(18): 11-16.
- YANG Ding-qing, LEI Shao-rong, LI Xia, et al. Controlling cadmium concentration in rice by field water management technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(18): 11-16.
- [31] 周建军, 周桔, 冯仁国. 我国土壤重金属污染现状及治理战略[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(3): 315-320.
- ZHOU Jian-jun, ZHOU Ju, FENG Ren-guo, et al. Status of China's heavy metal contamination in soil and its remediation strategy[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2014, 29(3): 315-320.
- [32] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1418-1426.
- YU Huan-yun, CUI Jiang-hu, QIAO Jiang-tao, et al. Principle and technique of arsenic and cadmium pollution control in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1418-1426.