

李昂, 侯红, 苏本营, 等. 基于CNKI文献分析的镉污染土壤钝化技术概况及效果评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1677-1684.
LI Ang, HOU Hong, SU Ben-ying, et al. Assessment of heavy metal passivation technology and evaluation of cadmium-contaminated soil based on CNKI literature analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1677-1684.

基于CNKI文献分析的镉污染土壤钝化技术概况及效果评估研究

李昂¹, 侯红², 苏本营³, 黄占斌¹, 冯艳⁴, 吴志豪², 孙在金^{2*}

(1. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国环境科学研究院, 环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 北京市门头沟区国家生态修复科技综合示范基地, 北京 102300; 4. 昌乐县宝都街道农业综合服务中心, 山东 昌乐 262400)

摘要:为探讨目前国内针对镉污染土壤的钝化修复研究进展,以CNKI数据库中1980—2018年的镉污染土壤钝化修复的文献为数据源,利用CiteSpace V和Excel 2013等软件工具,运用文献计量法,对文献从多个维度(即年代分析、研究机构、核心作者、研究热点、钝化剂的种类数量、钝化剂用量及效果评估等)进行文献数据整理和分析,并利用累积概率分布模型初步建立了效果评估和分级方法。结果表明:近年来发表相关文献的数量呈指数增长趋势,主要为高等院校和科研院所;钝化剂以生物炭、石灰和海泡石研究较多。通过概率分布计算:农产品镉降低率大于57.1%或有效态降低率大于50.1%时,效果可初步评估为优;当农产品镉降低率小于34.5%或有效态降低率小于26.9%时,效果可初步评估为差。论文指出钝化修复技术应加强机理方面研究,建立全面科学化、标准化成效评估方法。

关键词:镉污染土壤;钝化技术;CNKI数据库;文献计量法;效果评估

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)08-1677-08 doi:10.11654/jaes.2018-1534

Assessment of heavy metal passivation technology and evaluation of cadmium-contaminated soil based on CNKI literature analysis

LI Ang¹, HOU Hong², SU Ben-ying³, HUANG Zhan-bin¹, FENG Yan⁴, WU Zhi-hao², SUN Zai-jin^{2*}

(1. School of Chemical and Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. National Ecological Restoration Technology Demonstration Base of Mentougou District, Beijing 102300, China; 4. Changle County Baodu Street Integrated Agricultural Service Center, Changle 262400, China)

Abstract: To understand the research progress on heavy metal passivation of cadmium-contaminated soil in China, software tools such as CiteSpace V and Excel 2013, and bibliometric method were used. The data were obtained from CNKI database for the duration of 1980—2018. The analysis involves multiple dimensions, including chronological analysis, research institutions, core authors, research hotspots, types of passivating agents, and number of passivating agents. Moreover, the cumulative probability distribution model was used to establish the effects of evaluation and classification. The results showed that published related literature has increased exponentially in recent years. The main sources of literature are universities and institutes. Biochar, lime, and sepiolite are focused upon as passivation agents. The probability distribution indicated that the reduction effect can be initially evaluated as “excellent” when the cadmium reduction rate in agricul-

收稿日期:2018-12-06 录用日期:2019-05-29

作者简介:李昂(1997—),男,湖南长沙人,主要从事土壤改良研究。E-mail:anglion37@outlook.com

*通信作者:孙在金 E-mail:sunj@caes.org.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0800902);国家环境保护公益性行业科研专项(201509032)

Project supported: The National Key R&D Program of China (2017YFD0800902); The Special Fund for Environmental Protection Scientific Research in the Public Interest (201509032)

tural products is greater than 57.1% or “effective” when the reduction rate is greater than 50.1%; for the cadmium reduction rate in agricultural products less than 34.5% or the reduction rates less than 26.9%, the effect can be initially evaluated as “poor”. The paper also points out that to strengthen the study of passivation technology’s mechanisms, comprehensive and standardization scientific effectiveness evaluation methods need to be investigated in future research.

Keywords: cadmium contaminated soil; passivation technology; CNKI database; bibliometric method; effectiveness evaluation

我国土壤环境状况总体不容乐观,部分地区土壤污染较重,耕地土壤环境质量堪忧。其中,镉污染物点位超标率达到7.0%,呈现从西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势,是耕地、林地、草地和未利用地的主要污染物之一^[1]。镉污染不仅会引起土壤功能的失调、土质的下降^[2],还会不同程度地损害植物的生理发育,影响植株的生长代谢,并通过植物吸收、富集而转移进入食物链危害人类的生命和健康^[3]。

国家提出扎实推进净土保卫战的重大战略部署,要求全面实施土壤污染防治行动计划,有效管控农用地和城市建设用地土壤环境风险。目前,国内外管控土壤重金属污染的方法主要是将重金属从土壤中去,或是改变其在土壤中的形态和价态,降低其在环境中的迁移以及生物有效性。钝化修复技术是指土壤中添加钝化剂,通过吸附、沉淀、络合、离子交换和氧化还原等一系列反应,降低重金属污染物的可迁移性和生物有效性,从而达到修复目的的方法^[4],该技术成本低、操作简单易行,并且修复效率高,对于中轻度污染土壤的修复具有较好的应用前景,已经成为研究的热点^[5-9]。然而,国内外对钝化修复技术的后评估研究较少,污染治理修复成效评估办法缺失。对于钝化修复技术来讲,农产品中污染物消减率及土壤中有有效态含量降低率是评估其效果的核心指标,如何根据这两个指标大体确定钝化技术的优劣尚无科学依据。

为了全面、系统地对土壤重金属镉污染展开研究,本文利用文献计量学方法对镉污染土壤修复相关的文献进行计量分析。文献计量学是图书情报学科十分活跃的研究领域,是一种基于数理统计的定量分析方法,它以科学文献的外部特征为研究对象,研究文献的分布结构、数量关系、变化规律和定量管理,进而探讨科学技术的某些结构、特征和规律,它不仅促进图书情报学科领域的快速发展,对科学学科也是很好的补充,如今已发展到对文献内部知识单元进行计量研究阶段^[10-11]。目前已有众多国内外学者通过运用文献计量学的理论和方法来探究学科发展的趋势、

学科之间的相互影响关系、学科领域的研究前沿与热点^[12-13]。CiteSpace是目前应用最广泛的信息可视化工具,其利用文献引文网的知识可视化分析原理,以图谱的形式呈现某研究领域的知识基础、演化历程、发展趋势和最新动向^[14-16]。本文总结国内镉污染土壤修复的发展历程和研究进展,梳理文献中的钝化剂种类、用量及效果,并利用累积概率分布模型确定农产品中污染物消减率及土壤中有有效态含量降低率的评估基准值,以期为镉污染土壤修复技术研发及评估管理提供支撑。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本文所用数据来自中国知网(CNKI),在高级检索中以文献摘要中含“土壤”和“镉”为检索条件进行检索,共得到相关文献10 125篇,进一步根据土壤镉的钝化修复、改良、稳定、固定等相关文献及数据进行筛选,得到227篇与镉污染土壤钝化相关的文献进行分析。文献检索截止时间为2018年12月。

1.2 统计方法

文章利用引文网络分析工具CiteSpace V(5.1.R8. SE.10.27.2017)进行关键词共现网络分析、文献数据挖掘和可视化分析^[17]。图谱中每个节点代表一个关键词,节点的大小表示关键词出现的频次,节点之间连线的粗细表示关键词共现强度的高低,彼此邻近的关键词表示他们通常出现在相似的文献中^[14-16]。同时运用Excel 2013进行数据整理和分析统计,运用文献计量方法,对论文从多个维度,即年代分析、研究机构及核心作者、研究热点、钝化剂的不同种类数量、钝化剂用量及效果情况等进行统计分析,得出我国土壤重金属镉污染钝化修复研究的现状和特点,分析存在的问题,并提出建议。

1.3 概率分布模型

本研究主要借鉴物种敏感度分布法,所采用概率分布模型为log-normal,不同累积概率下的镉有效态降低率和农产品消减率主要使用荷兰RIVM ETX 2.0

软件计算。

2 结果与分析

2.1 年代、研究机构及作者分析

如图1所示,20世纪文献数量较少,年均发文量均在10篇以内,此时土壤污染治理研究尚处于起步阶段,而针对镉污染土壤的研究主要是基于镉的污染特征和测定方法;2000—2011年文献数量呈线性增长,在此阶段研究者才陆续提出通过钝化修复的方式去除土壤中重金属镉污染,探究的钝化剂主要为石灰;2012—2016年文献数量呈现指数增长趋势,而之后略微有所下降并趋于稳定。随着土壤污染防治行动计划等一系列政策法规的出台,土壤重金属污染日益受到重视,此阶段土壤修复领域尤其是针对钝化剂进行了大量研究,近几年也逐步趋于稳定。

按性质将研究机构分为高等院校和科研院所两类。在CNKI数据库筛选出的文献中,高等院校和科

研院所参与的文献分别占70.04%和25.55%(图2),其他机构包括企业和无机构信息的文献共占4.41%。

同时,对筛选出文献的Top 15发文量的研究机构进行统计分析(图3),湖南农业大学是针对土壤镉污染钝化研究发文量最多的研究机构,累积文献数高达23篇,占10.13%,该机构持续研究不同种类钝化剂对镉污染土壤的修复作用,以及针对不同作物的修复效果,其发文量中学生的毕业论文占多数。其次是农业农村部环境保护科研监测所,发文13篇,占5.73%,最早于2010年开始对镉污染防治进行研究并发表文献,主要作者有徐应明、梁学峰和宋正国等^[18-20],在土壤钝化修复领域研究较为深入,其修复材料多为黏土矿物及生物炭,结合盆栽试验与田间试验,得到了较多有参考价值的成果。

此外,中国农业科学院、沈阳农业大学、西北农林科技大学等也是发表文献较多的研究机构,分别发表了11、11、9篇,占历年总文献的4.85%、4.85%、

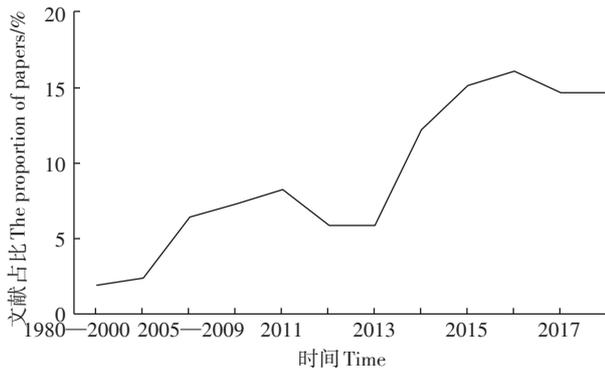


图1 各时间节点发文量趋势分析图

Figure 1 Trend analysis of the amount of documents sent by each time node

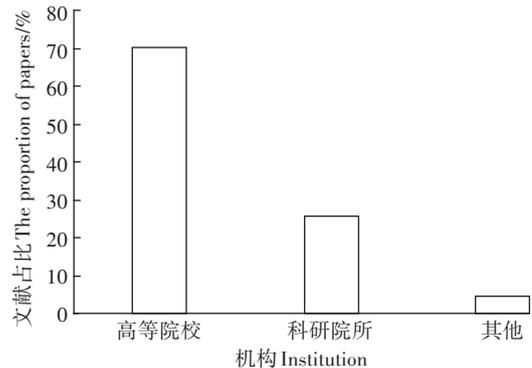


图2 各类研究机构文献占比——按性质分类

Figure 2 Proportion of papers in various types of research institutions: Classified by nature

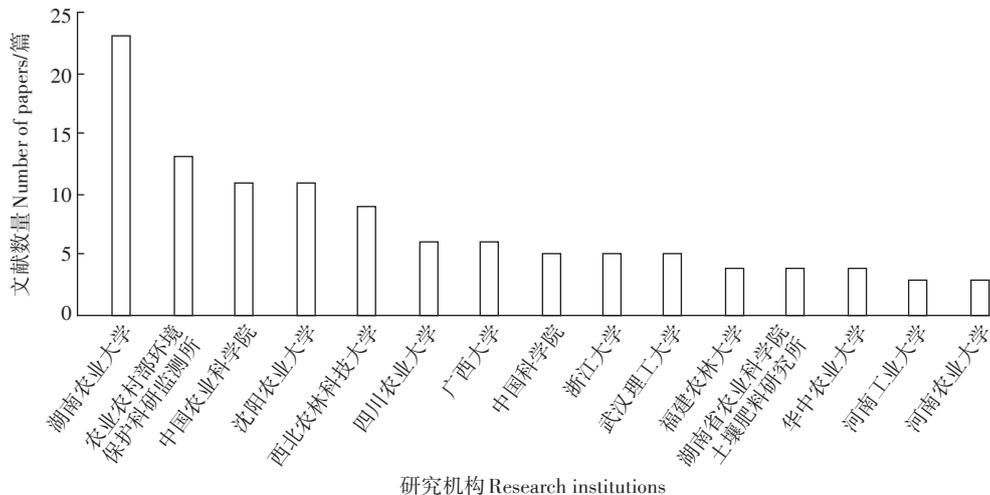


图3 CNKI数据库筛选文献数量前15的研究机构(仅按发文量排序)

Figure 3 CNKI database screening number of the top 15 research institutions (ordered by the amount of paper)

3.96%。其中中国农业科学院侧重研究生物炭、海泡石、赤泥等钝化剂对镉污染土壤的修复^[21-23],西北农林科技大学侧重石灰、沸石和生物有机质等钝化剂的作用^[24-25]。总之,不同机构对该课题的研究各有特色,同时相互促进,共同推动镉污染土壤修复治理的研究^[26-28]。

2.2 研究热点分析

通过对关键词分析可把握该学科的发展过程、特点、规律和联系,尤其能反映出该领域研究前沿和热点。利用 CiteSpace V 对 CNKI 导出的数据进行关键词共现分析,结果由图 4 可得出:以修复土壤、去除重金属为中心目标,科研人员致力于研究和寻找高效的钝化剂、改良剂。作为单个钝化剂,生物炭被研究的频次最高,是最大的研究热点。其次是石灰和海泡石,且两者常被同时研究。此外,赤泥、膨润土、鸡粪、猪粪等也是钝化剂中被研究的热点,针对这几类钝化剂,国内近几年已经进行了充分全面的研究,并取得了一定的研究成果。

针对年代热点分析,石灰作为钝化剂或改良剂应用于农田土壤开始时间较早,但从 2010 年开始,研究报道激增,后逐步趋于稳定;而对于生物炭,2010 年之前鲜有报道,但之后针对生物炭材料作为钝化剂的研究不断上升,甚至超过了石灰的研究热度。针对作物结构分析,由图 4 可见,水稻成为钝化剂研究针对的最主要的作物,主要原因为国内水稻种植区土壤镉活性较高,进而导致水稻籽粒超标的概率较大。此外,油菜、油麦菜、玉米等可食用作物也是研究的热点对象。

2.3 钝化剂种类数量和钝化效果分析

重金属污染的钝化修复是土壤镉污染的主要修复途径之一,针对钝化剂的选择和施用,研究者们进行了广泛的尝试和探究,并得到了一系列钝化效率高且效果好的钝化剂。

针对 CNKI 数据进行筛选和总结,得到各种类型钝化剂的研究频次占比和钝化效果(表 1)。无机类钝化剂是目前主要的研究对象,占分析数据中总钝化剂研究数量的 60.70%,其中,黏土矿物、碱性物质和磷化合物是当下的研究热点,分别占 22.33%、16.98% 和 16.04%。磷化合物类钝化剂中,研究最多且钝化效率最高的钝化剂是钙镁磷肥,在 0.04%~2.00% 的用量下,土壤有效态镉最高可降低 99.00%^[29],同时农产品中的镉含量最高可降低 70.06%^[30]。其次是羟基磷灰石,最高能使土壤中的有效态镉降低 52.40%,同时

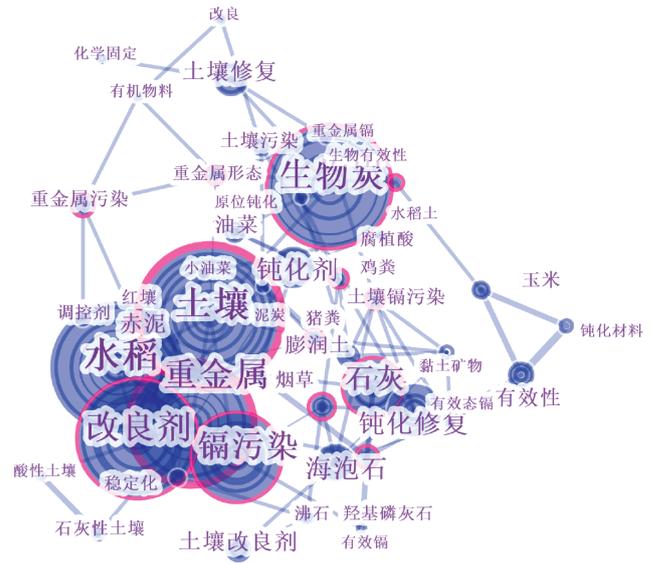


图 4 CNKI 数据库土壤镉污染修复领域研究热点知识图谱
Figure 4 CNKI database soil cadmium pollution remediation research hot spot knowledge map

农产品中的镉含量最高可降低 82.20%^[31]。其他如磷酸二氢钾、磷酸二氢钙、磷矿粉等的钝化效果均在 85% 以下。

碱性物质的钝化作用原理在于提升土壤 pH,增加胶体表面负电荷,促进对重金属的吸附,或形成金属沉淀以达到钝化修复效果。其中,石灰是运用较多的钝化剂,石灰与其他钝化剂配合施用是目前研究较多的方向之一,在图 4 的研究热点知识图谱中也可得到此结论,配施石灰最高钝化效率可达 99.03%^[32]。单施石灰时,在用量为 0.003 5%~2.00% 范围内,钝化效率可达 87.40%^[33]。

黏土物质分布广泛,因其较大的比表面积和孔隙,能通过矿物表面离子交换吸附固定重金属,具有较好的吸附能力。其中海泡石的研究和使用最为广泛,其钝化效率高达 78.00%^[34]。此外,沸石和膨润土能分别达到 90.65%^[35]和 86.10%^[36]的钝化效率。

金属氧化物主要通过矿物表面的专属吸附或共沉淀来固定重金属,其中赤泥是氧化铝冶炼工业生产过程中排出的固体粉状废弃物,具有比表面积大、吸附性能好等特点,能有效降低污染重金属的移动性和生物有效性,也是治理镉污染土壤的热点之一,其钝化效果能达到 85.98%。

在生产生活中,经常会产生很多有机物料,如作物残留物、动物粪便、腐植酸等。而许多有机物料对土壤重金属镉具有较好的修复能力,也常作为钝化剂使用。文献数据统计得到的有机物料中腐植酸、有机

表1 钝化剂种类及钝化效果分析(%)

Table 1 Analysis of passivation agent types and passivation effect(%)

钝化剂种类 Type of passivating agent		研究频次占比 Frequency of research	钝化剂用量 Passivation agent dosage	农产品镉降低率 Agricultural product cadmium reduction rate	土壤镉有效态降低率 Soil cadmium effective state reduction rate		
无机类	磷化合物	钙镁磷肥	6.29	16.04	0.04~2.00	12.11~70.06	7.40~99.00
		羟基磷灰石	2.83		0.15~5.00	14.78~82.20	26.70~52.40
		磷酸二氢钾	2.20		0.30~0.90	24.14~40.50	19.40~51.70
		其他(磷矿粉、磷酸二氢钙、过磷酸钙、骨粉、普钙等)	4.72		0.04~2.00	—	2.30~85.00
	碱性物质	石灰	12.58	16.98	0.003 5~2.00	15.10~87.00	6.93~87.40
		碳酸钙	1.57		0.50~5.00	—	6.70~46.85
		其他(石膏、重钙、硅酸钙等)	2.83		0.07~13.50	13.85~52.00	10.64~68.10
	黏土物质	海泡石	8.18	22.33	0.10~9.00	2.10~58.22	3.30~78.00
		沸石	3.77		0.53~5.00	23.02~56.87	6.10~90.65
		膨润土	3.14		0.30~9.00	2.63~45.29	30.75~86.10
		其他(高岭土、蛭石、硅藻土、凹凸等)	7.24		0.001 5~20.00	14.30~77.69	1.06~91.00
	金属氧化物	赤泥	4.40	5.35	0.05~5.00	17.90~49.30	18.60~85.98
其他(零价铁、硫酸铁等)		0.95		0.012 5~5.00	2.00~9.10	6.92~13.04	
有机类	有机物料	腐植酸	4.40	18.87	0.03~5.00	21.00~35.11	4.80~43.00
		有机肥	4.09		0.07~2.00	1.60~51.19	5.30~32.70
		猪粪	3.14		0.18~30.00	10.70~50.00	8.38~57.14
		其他(鸡粪、秸秆、蚕沙、椰糠等)	7.24		0.001 3~5.00	14.00~73.50	18.60~91.00
	炭材料	生物炭	16.03	16.03	0.06~5.00	9.04~72.33	4.31~59.13
有机-无机类	新材料	纳米材料	2.52	4.40	0.50~5.00	54.88~57.43	25.30~49.00
		其他(保水剂、介孔材料、高分子材料等)	1.88		0.07~0.80	—	20.30~63.68

肥、猪粪的最高钝化效率分别可达43.00%^[37]、32.70%^[38]和57.14%^[39]。

炭材料修复土壤重金属的机理主要为胶体表面功能团的配位反应和离子交换吸附。作为钝化剂的炭材料主要为生物炭,包括秸秆炭、骨炭、蚕沙炭、木炭、草炭、果壳炭等,其研究频次占16.03%,经其作用后农产品的镉含量最高可降低72.33%^[40],钝化效率可达59.13%^[41],是目前有机钝化剂中效果较好的选择。

从时间维度分析,无机材料作为钝化剂或改良剂应用于农田土壤中开始的时间较早,但2010年开始,研究报道激增,后逐步趋于稳定;而对于有机类钝化材料,2010年之前鲜有报道,但之后的研究不断上升。由表1数据可知,目前的钝化剂研究依旧停留在无机、有机钝化剂层面,未来应针对新型、高效钝化剂进行探究,以得到更低成本、更高效率的环保型钝化剂。

2.4 钝化技术效果初步评估方法

通过钝化剂对农产品以及重金属有效态的效应数据进行统一整理和计算,共筛选出214条农产品降低率数据以及291条土壤重金属镉有效态降低率数

据,由高到低排列并作累积概率分布,在此基础上利用log-normal模型拟合计算。

钝化剂对农产品镉降低率的累积概率分布曲线如图5所示。计算得出累积概率为40%、60%和80%时,农产品中镉降低率为34.5%、44.5%和57.1%。

钝化剂对土壤镉有效态降低率的累积概率分布曲线如图6所示。计算得出累积概率为40%、60%、80%时,有效态镉消减率为26.9%、36.7%和50.1%。

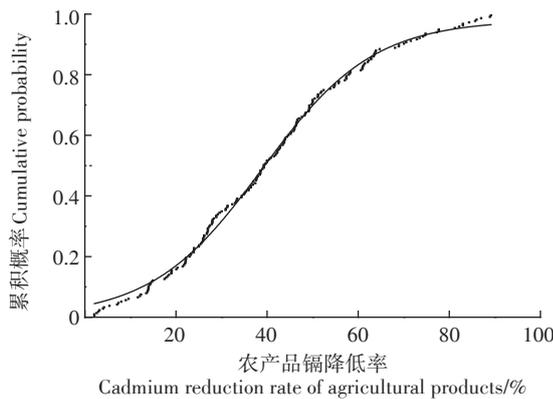
基于以上结果,在评估钝化技术的效果时,可以分为优、良、中、差4个等级,相关评估指标值及主要依据如表2所示。石灰作为目前较为常用的钝化材料,其效果可以作为钝化技术的参照。本研究筛选出的农产品消减率数据有21个,平均值为35.9%,效果初步评估结果为中;有效态降低率数据有15个,平均值为38.3%,效果初步评估结果为良。

3 结论与展望

本研究通过对CNKI数据库中镉污染土壤钝化修复相关文献进行分析,阐述了镉污染土壤钝化修复的概况,其中发表数量随时间呈显著增长趋势,主要为

高等院校和科研院所。钝化剂种类以生物炭、石灰和海泡石占比最大,赤泥、膨润土、有机材料等也是钝化剂中被研究的热点。此外,通过计算农产品镉及土壤有效态镉降低率,建立了基于累积概率分布的效果评估等级方法,为钝化材料的研发及钝化技术评审提供了科学依据。

近年来,我国农用地土壤环境总体状况堪忧,需要应用不同修复技术来降低土壤的安全风险。钝化方法是应用较广泛的一种修复方法,但由于问题的复杂性,仍存在理论研究不够、实践缺乏等问题,宏观实验结果缺乏直接的微观证据,并且对钝化修复效果评估研究较少,已不能满足日益扩大的土壤修复市场需求以及相关部门的管理需求。总体来说,在以后的相关研究过程中需进一步完善,主要应考虑以下几方面:



图中点代表文中搜集的214条有效数据,每个点位纵坐标为累积概率,横坐标为农产品Cd降低率,曲线为log-normal模型拟合得出
Point in figure represents the 214 valid data collected in the paper.

The ordinate of each point is the cumulative probability, the abscissa is the Cd reduction rate of the agricultural product, and the curve is obtained by fitting the log-normal model

图5 钝化技术对农产品镉降低率的累积概率分布曲线

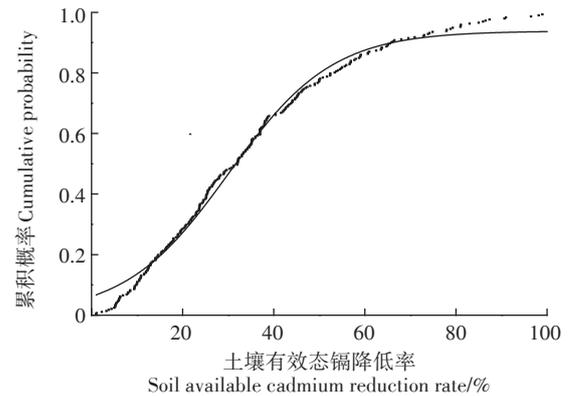
Figure 5 Cumulative probability distribution curve of cadmium reduction rate of agricultural products by passivation technology

3.1 加强对重金属钝化机理研究

从目前国内发表文献角度来看,重金属镉钝化修复已经开展了大量的研究并取得了一些进展,但理论研究仍有很大欠缺,修复机理方面的论文较少,无法解释钝化反应机制,应综合利用各种现代分析测试技术,深入到分子水平对其机制作出解释。

3.2 建立更为精确的基于农产品和重金属有效态的钝化效果评估和分级方法

众所周知,钝化修复技术的效果受许多因素的影响,如土壤重金属含量、土壤理化性质(pH、有机质、氧化还原电位等)等。此外,重金属有效态测定方法、不同农产品乃至不同品种、钝化剂的施用时间和方法,也会对整个效果评估产生较大变异,因此如何综合考虑以上因素,建立相关参数的归一化方法或模型,对于客观准确地反映钝化效果具有重要意义。



图中点代表文中搜集的291条有效数据,每个点位纵坐标为累积概率,横坐标为土壤有效态Cd降低率,曲线为log-normal模型拟合得出
Point in figure represents the 291 valid data collected in the paper.

The ordinate of each point is the cumulative probability, the abscissa is the Cd reduction rate of the soil effective state, and the curve is obtained by fitting the log-normal model.

图6 钝化技术对土壤有效态镉降低率的累积概率分布曲线

Figure 6 Cumulative probability distribution curve of passivation technology on soil available cadmium reduction rate

表2 钝化技术效果评估等级及主要依据

Table 2 Assessment level and main basis of passivation technology effect

钝化效果评估等级 Passivation effect evaluation level	评估指标 Evaluation index		主要依据 Main basis
	农产品镉降低率(N) Agricultural product reduction rate	有效态镉降低率(Y) Effective state reduction rate	
优	N≥57.1%	Y≥50.1%	高于文献报道中80%的钝化技术对农产品镉降低率或土壤有效态镉降低率
良	44.5%≤N<57.1%	36.7%≤Y<50.1%	高于文献报道中60%的钝化技术对农产品镉降低率或土壤有效态镉降低率,但低于排名前20%的技术
中	34.5%≤N<44.5%	26.9%≤Y<36.7%	高于文献报道中40%的钝化技术对农产品镉降低率或土壤有效态镉降低率,但低于排名前40%的技术
差	N<34.5%	Y<26.9%	低于文献报道中60%的钝化技术对农产品镉降低率或土壤有效态镉降低率

3.3 建立更为全面的成效评估指标体系和方法

任何一种土壤修复技术或风险管控模式,在评估时都需要考虑多重因素,如修复效果是否能达到预定的工程目标或修复标准,是否能保证经济性高、环境友好和生态安全,是否对土壤生态系统和人类健康构成威胁,钝化修复技术的钝化稳定性和时效性等。因此,综合考虑经济效益、环境效益和社会效益,科学建立修复技术的评估方法,对于修复技术最佳参数选择、技术应用及其推广、修复项目和工程的验收等具有重要意义,国家相关部门亟需研究完善成效评估指标体系和方法,尽快出台标准化的成效评估技术规定。

参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. [2014-4-17]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/t20140417_1312998.htm
Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. National soil pollution survey bulletin[EB/OL]. [2014-4-17]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/t20140417_1312998.htm
- [2] Bataillard P, Cambier P, Picot C. Short-term transformations of lead and cadmium compounds in soil after contamination[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 54(2):365-376.
- [3] Kirkham M B. Cadmium in plants on polluted soils: Effects of soil factors, hyperaccumulation, and amendments[J]. *Geoderma*, 2006, 137(1):19-32.
- [4] 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.
CAO Xin-de, WEI Xiao-xin, DAI Ge-lian, et al. Research progress on heavy metal pollution and its chemical passivation remediation technology[J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(7):1441-1453.
- [5] Gsr K, Huang P M, Kozak L M, et al. Distribution of cadmium in selected soil profiles of Saskatchewan, Canada: Speciation and availability[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, 77(4):613-619.
- [6] Mahabadi A A, Hajabbasi M A, Khademi H, et al. Soil cadmium stabilization using an Iranian natural zeolite[J]. *Geoderma*, 2007, 137(3):388-393.
- [7] Strobel B W, Borggaard O K, Hansen H C B, et al. Dissolved organic carbon and decreasing pH mobilize cadmium and copper in soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 56(2):189-196.
- [8] Sriprachote A, Ociai K, Matoh T, et al. 8-1-43 Influence of soil properties and cadmium concentration on cadmium accumulation level in rice grains[J]. *Plos Pathogens*, 2012, 8(3):e1002595.
- [9] Tejada M. Application of different organic wastes in a soil polluted by cadmium: Effects on soil biological properties[J]. *Geoderma*, 2009, 153(1):254-268.
- [10] Régibeau P, Rockett K E. Research assessment and recognized excellence: Simple bibliometrics for more efficient academic research evaluations[J]. *Economic Policy*, 2016, 31(88):611-652.
- [11] 苏新宁. 文献计量学与科学评价中有关问题思考[J]. 图书与情报, 2013, 149(1):79-83.
SU Xin-ning. Reflections on relevant issues in bibliometrics and scientific evaluation[J]. *Books and information*, 2013, 149(1):79-83.
- [12] Liu X J, Zhang L, Hong S. Global biodiversity research during 1900-2009: A bibliometric analysis[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2011, 20(4):807-826.
- [13] Zhuang Y H, Liu X J, Nguyen T, et al. Global remote sensing research trends during 1991-2010: A bibliometric analysis[J]. *Scientometrics*, 2012, 96(1):203-219.
- [14] Chen C, Leydesdorff L. Patterns of connections and movements in dual-map overlays: A new method of publication portfolio analysis[J]. *Journal of the Association for Information Science and Technology*, 2014, 65(2):334-351.
- [15] 陈悦,陈超美,刘则渊,等. CiteSpace知识图谱的方法论功能[J]. 科学学研究, 2015, 33(2):242-253.
CHEN Yue, CHEN Chao-mei, LIU Ze-yuan, et al. Methodological Functions of CiteSpace Knowledge Mapping[J]. *Studies in Science of Science*, 2015, 33(2):242-253.
- [16] 李杰,陈超美. CiteSpace:科技文本挖掘及可视化[M]. 北京:首都经济贸易大学出版社, 2016:194-203.
LI Jie, CHEN Chao-mei. CiteSpace: Scientific text mining and visualization[M]. Beijing: Capital University of Economics and Business Press, 2016:194-203.
- [17] 干文芝,胡宗达,任永宽,等. 基于文献计量学的国际土壤呼吸研究态势分析[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3):1105-1111.
GAN Wen-zhi, HU Zong-da, REN Yong-kuan, et al. Situation analysis of international soil respiration based on bibliometrics[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(3):1105-1111.
- [18] 孙约兵,徐应明,史新,等. 海泡石对镉污染红壤的钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2012, 32(6):1465-1472.
SUN Yue-bing, XU Ying-ming, SHI Xin, et al. Passivation and remediation effects of sepiolite on cadmium-contaminated red soil[J]. *Acta Scientiae Sinica*, 2012, 32(6):1465-1472.
- [19] 宋正国,唐世荣,丁永祯,等. 田间条件下不同钝化材料对玉米吸收镉的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11):2152-2159.
SONG Zheng-guo, TANG Shi-rong, DING Yong-zhen, et al. Effects of different passivation materials on cadmium uptake by maize under field conditions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2152-2159.
- [20] 梁学峰,徐应明,王林,等. 天然黏土联合磷肥对农田土壤镉铅污染原位钝化修复效应研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5):1011-1018.
LIANG Xue-feng, XU Ying-ming, WANG Lin, et al. In situ passivation and remediation effects of natural clay combined with phosphate fertilizer on soil cadmium and lead pollution in farmland[J]. *Acta Scientiae Sinica*, 2011, 31(5):1011-1018.
- [21] 郭文娟. 生物炭对镉污染土壤的修复效应及其环境影响行为[D]. 北京:中国农业科学院, 2013.
GUO Wen-juan. Remediation effects of biochar on cadmium-contaminated soil and its environmental impact behavior[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [22] 徐明岗,张青,王伯仁,等. 改良剂对重金属污染红壤的修复效果及评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1):121-126.
XU Ming-gang, ZHANG Qing, WANG Bo-ren, et al. Remediation ef-

- fect and improvement of improving agent on heavy metal contaminated red soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 121-126.
- [23] 代允超, 吕家珑, 曹莹菲, 等. 石灰和有机质对不同性质镉污染土壤中镉有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(3): 514-519.
- DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, CAO Ying-fei, et al. Effects of lime and organic matter on cadmium availability in cadmium-contaminated soils with different properties[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3): 514-519.
- [24] 蒋永吉. 不同镉污染农田的原位修复研究[D]. 陕西: 西北农林科技大学, 2017.
- JIANG Yong-ji. In situ remediation of different cadmium-contaminated farmland[D]. Shanxi: Northwest A&F University, 2017.
- [25] 郭利敏, 艾绍英, 唐明灯, 等. 不同改良剂对土壤-叶菜系统Cd迁移累积的调控作用[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(8): 1520-1525.
- GUO Li-min, AI Shao-ying, TANG Ming-deng, et al. Regulatory effects of different amendments on Cd migration and accumulation in soil-leaf system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(8): 1520-1525.
- [26] 陈玉鹏, 梁东丽, 刘中华, 等. 大棚蔬菜土壤重金属污染及其控制的研究进展与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(1): 9-17.
- CHEN Yu-peng, LIANG Dong-li, LIU Zhong-hua, et al. Research progress and prospect of heavy metal pollution and control in greenhouse vegetables[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(1): 9-17.
- [27] 串丽敏, 郑怀国, 赵同科, 等. 基于专利文献分析的土壤污染修复技术发展现状与展望[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(11): 2041-2048.
- CHUAN Li-min, ZHENG Huai-guo, ZHAO Tong-ke, et al. Development status and prospect of soil pollution remediation technology based on patent literature analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2041-2048.
- [28] 官迪, 纪雄辉. 镉污染土壤钝化修复机制及研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2016(4): 119-122.
- GUAN Di, JI Xiong-hui. Passivation mechanism and research progress of cadmium contaminated soil[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016(4): 119-122.
- [29] 敖明, 任婧, 刘桂华, 等. 不同钝化材料对土壤中有有效态Cd的钝化效果研究[J]. *山西农业科学*, 2018, 46(6): 949-952.
- AO Ming, REN Jing, LIU Gui-hua, et al. Study on passivation effect of different passivation materials on available Cd in soil[J]. *Shanxi Agricultural Sciences*, 2018, 46(6): 949-952.
- [30] 曹仁林, 霍文瑞, 何宗兰, 等. 不同改良剂抑制水稻吸收镉的研究: 在酸性土壤上[J]. *农业环境科学学报*, 1992(5): 195-198, 241.
- CAO Ren-lin, HUO Wen-rui, HE Zong-lan, et al. Studies on the inhibition of cadmium uptake by rice by different amendments: On acidic soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 1992(5): 195-198, 241.
- [31] 王浩朴, 胡丽, 冯莲莲, 等. 石灰、硅酸钠和羟基磷灰石对烟草吸收镉的影响[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(8): 1434-1440.
- WANG Hao-pu, HU Li, FENG Lian-lian, et al. Effects of lime, sodium silicate and hydroxyapatite on cadmium uptake by tobacco[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2017, 38(8): 1434-1440.
- [32] 李大猛, 赵驰, 徐梦宇, 等. 镉污染土壤的固化研究[J]. *四川环境*, 2017, 36(3): 15-19.
- LI Da-meng, ZHAO Chi, XU Meng-yu, et al. Solidification of cadmium contaminated soil[J]. *Sichuan Environment*, 2017, 36(3): 15-19.
- [33] 伊如汗, 张佳文, 陈明, 等. 炭石灰体系对于土壤中Cd赋存形态的影响[J]. *环境化学*, 2013, 32(11): 2044-2049.
- YI Ru-han, ZHANG Jia-wen, CHEN Ming, et al. Effect of carbon lime system on the morphology of Cd in soil[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(11): 2044-2049.
- [34] 陈钊, 高远, 张艳玲, 等. 不同土壤改良剂对烟草吸收镉的影响[J]. *烟草科技*, 2013(3): 72-76.
- CHEN Zhao, GAO Yuan, ZHANG Yan-ling, et al. Effects of different soil amendments on cadmium uptake by tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2013(3): 72-76.
- [35] 朱晴, 罗惠莉, 吴根义, 等. 改性赤泥-沸石修复材料对土壤中镉的稳定化研究[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(5): 907-912.
- ZHU Qing, LUO Hui-li, WU Gen-yi, et al. Stabilization of cadmium in soil by modified red mud-zeolite remediation materials[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 907-912.
- [36] 赵丹. 膨润土对镉污染土壤钝化修复效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2014.
- ZHAO Dan. Study on passivation and remediation effects of bentonite on cadmium-contaminated soil[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2014.
- [37] 肖丹丹. 腐植酸对铅镉污染土壤中重金属形态及油菜抗氧化酶活性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- XIAO Dan-dan. Effects of humic acid on the forms of heavy metals in lead-cadmium contaminated soil and the activities of antioxidant enzymes in rape[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2017.
- [38] 汪涛, 高国龙, 王庆, 等. 无机有机复合材料对重金属污染土壤的修复效应[J]. *环境科技*, 2018, 31(5): 29-34.
- WANG Tao, GAO Guo-long, WANG Qing, et al. Remediation effects of inorganic-organic composites on heavy metal contaminated soils[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 31(5): 29-34.
- [39] 逯娟. 三种改良剂对蔬菜镉积累及养分吸收的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011.
- LU Juan. Effects of three amendments on cadmium accumulation and nutrient uptake in vegetables[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2011.
- [40] 王丽丽. 不同生物炭对铅锌矿尾矿重金属污染土壤修复效果的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- WANG Li-li. Study on the effect of different biochar on the remediation of heavy metal contaminated soil in lead-zinc mine tailings[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [41] 李晓. 牛粪生物炭和沸石配施对镉镍复合污染土壤的修复[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017.
- LI Xiao. Remediation of cadmium-nickel complex contaminated soil by combined application of cow manure biochar and zeolite[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.