

DOI:10.13718/j.cnki.zwyx.2022.06.002

土壤调理剂对农田镉污染的治理修复研究进展

成志军¹, 肖庆驹², 代玉豪², 李迅帆², 李石力²

1. 湖南中烟工业有限责任公司, 长沙 410014; 2. 西南大学 植物保护学院, 重庆 400715

摘要: 近年来, 我国土壤重金属镉污染问题日趋严重, 对粮食作物的生产造成了极大安全隐患。然而, 如何修复土壤重金属镉污染、保持提升土壤质量、提高土壤生产力成为当前亟需解决的问题。土壤调理剂在重金属污染治理中广泛应用, 能够有效修复和改良重金属对土壤的污染, 是农田重金属镉污染修复的重要途径, 具有良好的应用前景。基于此, 本文系统分析了土壤重金属镉污染特性与影响因子, 总结了土壤调理剂对镉污染土壤修复改良技术, 以期为镉污染农田的修复和改良提供一定参考。

关键词: 镉污染; 土壤调理剂; 修复改良

中图分类号: S156; X53

文献标志码: A

文章编号: 2097-1354(2022)06-0012-08

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress on Soil Conditioners Treatment in Remediation of Cadmium Polluted Farmland

CHENG Zhijun¹, XIAO Qingju², DAI Yuhao²,
LI Xunfan², LI Shili²

1. China Tobacco Hunan Industrial Co. LTD, Changsha 410014, China;

2. College of Plant Protection, Southwest University, Chongqing 400715, China

Abstract: In recent years, soil cadmium pollution has become more and more serious in China, which has caused a great safety problem to the production of food crops. How to repair heavy metal cadmium polluted soil, maintain and improve soil quality, and improve soil productivity has become an urgent problem to be solved. Soil conditioners are widely used in the control of heavy metal pollution, which can effectively repair and improve the heavy metal polluted soil. It is an important way to repair the heavy metal cadmium pollution in farmland, and has a good application prospect. Based on this, this paper systematically analyzed the characteristics and in-

收稿日期: 2022-09-22

基金项目: 湖南中烟烟草农业示范与推广科技项目(KY2020JD0010).

作者简介: 成志军, 高级农艺师, 主要从事烟叶生产方向研究.

通信作者: 李石力, 讲师.

fluencing factors of soil heavy metal cadmium pollution, summarized the technologies of using soil conditioners for remediation and improvement of cadmium contaminated soil, in order to provide a certain reference for the remediation and improvement of cadmium contaminated farmland.

Key words: cadmium pollution; soil conditioner; restoration and improvement

土壤是人类生存不可或缺的一种重要资源,支持了全球约95%的粮食生产并提供生态系统服务^[1].但随着社会进步和经济发展,土壤利用方式的人为改变,以及农田的集约化,农药、化肥等在农业生产中的大量使用,导致农业土壤的退化、污染问题越来越严重.

据统计,目前全世界耕地面积为7.3亿 hm^2 ,但每年平均有近500万 hm^2 的土地由于土壤退化而无法生产粮食^[2].重金属污染是农田土壤退化的重要表现,不仅会导致作物品质和产量下降,还会通过食物链危害人体健康.在重金属中镉是首要的污染物,调查表明全球每年释放到环境中的镉达数万吨,其中绝大部分最终汇集于土壤^[3].在我国,有 $2.786 \times 10^9 \text{ m}^2$ 的农业土壤被镉污染^[4],其中超过11个省份存在土壤镉含量超标的现象.根据2014年公布的全国土壤污染状况调查结果显示,我国土壤重金属污染总超标率达16.1%,其中镉的点位超标率达到7.0%,位居榜首^[5].随着耕地退化问题愈发严重,土壤重金属污染、肥力下降等问题已逐渐危及我国农业发展的可持续化.如何降低土壤重金属污染、改良修复退化土壤、提升土壤产质量成为当前亟需解决的问题.

目前,土壤镉污染修复技术主要包括物理修复(客土法、物理分离等),化学修复(原位钝化、氧化还原、淋洗技术等),生物修复(微生物修复、植物富集稳定技术等)^[6].但是,由于传统的物理和化学修复方法存在成本高、效果不显著、易造成环境污染等问题,植物富集技术存在修复时间长且农田占用量大等问题;而原位钝化修复技术作为固化稳定化技术的一种,由于其简便、高效、经济、安全,可实现生产与修复同步进行等优点,成为镉污染农田土壤修复改良常用的技术之一,其中土壤调理剂则是钝化修复技术的关键.大量研究报告也指出,在土壤改良修复过程中,科学合理应用土壤调理剂,可以有效修复土壤重金属污染,改善土壤产质量和缓解土壤退化.因此,本文系统分析了土壤重金属镉污染特性、影响因子,总结了土壤调理剂对镉污染土壤修复改良的原理与技术,以为农田镉污染修复改良提供一定参考.

1 土壤镉污染概述

1.1 土壤镉污染来源

1.1.1 自然来源

大多数重金属天然存在于土壤母质中,主要以植物无法吸收的形式存在.由于它们的溶解度较低,存在于母质中的金属难以被植物吸收,对土壤生物的影响很小.其中,土壤中镉的自然来源主要是母岩的自然风化,而通过自然风化过程释放到土壤系统中的镉浓度在很大程度上与成土母质的来源和性质相关.如含有大量镉的镁铁质和超镁铁质岩石,在风化后,会将大量镉释放到土壤中^[7].有研究表明,我国以母岩划分的土壤A层镉含量范围为 $0.001 \sim 8.220 \text{ mg/kg}$,其中以沙岩镉含量最低(0.048 mg/kg),以石灰岩镉含量最高(0.218 mg/kg)^[8].郭超等^[9]研究表明,西南岩溶地区由于元素淋失和残留物中元素的浓缩,在地层成土过程中,常导致土壤镉的背景值偏高.同时,在一些特殊地域和情况下,如火山爆发、森林火灾、风尘和海浪等,可通过气体和热液将镉带入地表土壤.

1.1.2 人为来源

与成土母质输入不同,通过人为活动添加的重金属通常具有高生物利用度特性^[10-11]。人为活动主要有工业和农业生产过程以及农业、工业和生活废弃物的处置等,是土壤中重金属富集的主要来源。工业废水灌溉、废渣堆积以及大气颗粒中的重金属通过干湿沉降均可造成农田镉污染,大气颗粒中的重金属则可通过干湿沉降进入农田造成污染。Arthur 等^[12]研究表明,英国农田中镉含量有 50%来源于大气沉降。同时,不同地理位置的土壤遭受的镉污染程度也不同。受采矿活动的影响,在矿区附近的土壤则很容易造成镉含量超标^[13]。在锌冶炼生产过程中,由于化学相似性,镉作为客体元素存在于所有类型的锌矿石中,大量的镉被释放到环境中,富含镉的粉尘被释放到大气中,在大气中短时间停留后,开始局部沉积,进而导致土壤镉含量超标^[14]。

农业污染源如有机肥、复合肥、农药、地膜及污水灌溉、污泥农用等,均可造成农田生态系统中镉积累进而导致土壤镉污染^[15]。刘荣乐等^[16]研究发现,以德国堆肥中重金属含量标准为依据,我国有机废弃物重金属含量在猪粪、鸡粪、牛粪中均存在较高超标率,且均以镉超标为主。在复合肥中含有一定的镉,其中过磷酸盐中镉含量较多,磷肥次之。此外,农用塑料薄膜生产应用的热稳定剂中含有镉,在大量使用塑料大棚和地膜过程中也可能造成土壤镉的污染^[17],而由于当前农用塑料薄膜在农业生产中广泛使用及生产结束后的清理回收工作缺乏管理也可能进一步导致土壤镉污染情况加重。

1.2 土壤镉形态

土壤中镉的不同存在形态具有不同的吸附、迁移转化能力和毒性,能够在不同程度上影响生态系统^[18]。目前,最常用的土壤重金属元素形态分析方法主要为 Tessier 连续提取法、欧共体(BCR)分级法,以及改良的欧共体(BCR)分级法^[19-22]。相比于 BCR 分级法, Tessier 连续提取法对重金属的赋存形态进行了更加详细的划分,比较全面地涵盖了各类形态的重金属,可更详细地分析出重金属的赋存形态及含量,为土壤污染治理提供科学指导^[23]。

Tessier 等^[24]用连续提取法将重金属形态分为 5 类:可交换态、碳酸盐结合态、铁(锰/铝)氧化物结合态、有机质及硫化物结合态和残渣晶格结合态。一般认为可交换态镉、碳酸盐形态镉具有生物有效性,残留态镉稳定性最高,不能被生物利用。而铁(锰/铝)氧化物结合态镉、有机质及硫化物结合态镉在一定的酸性条件下可转化为可交换态镉而被生物吸收积累,具有潜在生物有效性。

2 影响土壤中镉形态分布的关键影响因素

镉作为一种阳离子元素,在土壤溶液中以游离离子和可溶性络合物的形式存在。可溶性镉复合物的形成增加了其向根表面的迁移率,但通常认为游离镉离子是通过质膜转运到根细胞中的主要镉物质。因此,在不考虑植物自身遗传特性的情况下,通过改变镉的生物有效性形态可影响植物对镉的吸收、转运和积累,而镉形态易受土壤类型和土壤环境的影响,其中影响土壤中镉形态分布的因素主要包括土壤 pH 值、土壤 Eh 值、土壤有机质、土壤微生物等(表 1)。

表1 土壤中镉形态分布的影响因素

影响因子	功能
pH 值	土壤 pH 值升高,生物有效性镉含量降低
Eh	土壤中生物有效性镉含量随土壤 Eh 增大而降低
有机质	土壤有机质可与镉发生络合和螯合反应,降低生物有效性镉含量
微生物	通过影响镉形态转化及分散、富集过程从而影响作物对镉的吸收
相伴离子	K、Ca、Na、Mg 等元素在一定程度上可抑制植物对镉的吸收
根系分泌物	根际中分泌物的组成与数量影响重金属的配合反应特征,如低浓度有机酸降低重金属生物有效性,高浓度有机酸增强重金属毒害

2.1 土壤 pH 值

土壤 pH 值在作物根系对镉的吸附以及镉在土壤溶液中的形态、溶解度和迁移率方面起着最重要的作用^[25]。随着 pH 值变化镉形态含量占比也在发生变化,导致其生物有效性、迁移性及毒性发生变化^[26-28]。pH 值对土壤中重金属迁移的影响主要是通过改变重金属表面的吸附位、吸附稳定性以及赋存形态等实现的^[29]。喻华等^[30]对样品分析发现当 pH 值接近或大于 7 时,水溶交换态镉所占比例低于 10.00%; pH 值低于 6.5 时,水溶交换态镉所占比例大多接近 20.00%,最高达到 69.15%。

2.2 土壤 Eh 值

土壤 Eh 即土壤氧化还原电位,土壤中以可交换态、碳酸盐结合态存在的重金属会因氧化还原电位的变化而发生形态转变。一般来说,随着土壤氧化还原电位的升高,土壤中可交换态重金属含量会呈现降低趋势,残渣态重金属含量则会呈现上升趋势^[31]。在土壤介质中,土壤氧化还原状况可以对重金属元素与硫化物形成沉淀、与有机质络合、被铁锰氧化物吸附反应进行调控^[32]。在稻田土壤中,水覆盖量可控制氧化还原条件^[33]。葛颖等^[34]研究表明,土壤氧化还原电位与水溶性镉呈极显著正相关,淹水后土壤的氧化还原电位(Eh)显著降低,且氧化还原电位随着淹水时间的增长而下降。

2.3 土壤有机质

有机质(OM)是影响镉环境行为的关键土壤成分之一。土壤有机质中含有大量能够与镉发生络合或螯合反应的官能团,如羧基、酰胺基、羰基、酚基等含氧官能团。宋杨^[35]研究表明,添加含有大量有机质的固态污泥和秸秆均能使土壤中交换态镉和残渣态镉的含量降低,但同时也使土壤中碳酸盐结合态镉、铁(铝/锰)氧化物结合态镉及有机结合态镉的含量升高。

3 土壤调理剂对镉污染土壤的修复改良

3.1 土壤调理剂对镉污染土壤修复改良原理

土壤调理剂通过有效改善土壤理化性质,使镉在土壤中发生吸附、络合或沉淀反应进而原位钝化,将土壤中生物有效性形态镉转化为不活泼形态的镉,从而控制镉在土壤环境中的迁移,降低镉的生物有效性形态含量和毒性^[36]。重金属的吸附、络合或沉淀高度依赖于土壤的理化性质,包括土壤 pH 值,氧化还原电位和阳离子/阴离子交换能力,土壤成分,如硅酸盐黏土、有机质以及铁、铝和锰的氧化物等^[37]。不同种类土壤调理剂通过自身特性及改变土壤不同理化性质实现对重金属镉的吸附、络合或沉淀。牡蛎壳粉含有多种有机和无机成分,可改善土壤结构、提高土壤酸碱度,且由于其含有大量的 2~10 μm 微孔,使其具有较强的吸附、交换等

能力,可作为 Cd, Cr, Pb 等重金属元素的吸附剂^[38]. 石灰等富含碳酸盐的碱性固化稳定化材料,通过提高土壤 pH 值,从而促进土壤中重金属离子生成碳酸盐或氢氧化物沉淀^[39]. 巯基改性海泡石、钙镁磷肥可与土壤重金属发生离子交换进而将其吸附固定,而巯基修饰海泡石主要是通过物理吸附和提高土壤阳离子交换量的方式固定土壤中的重金属^[40]. 无机硅土壤调理剂在将土壤中的镉固定的同时也可阻碍作物根系对镉的吸收,从而显著降低作物根、茎、叶、果实中的镉含量^[41]. 土壤结构改良剂可分为天然结构改良剂和人工合成结构改良剂(如腐殖酸、聚丙烯酰胺、聚乙烯醇),它们一般拥有较大的比表面积,并且富含各类含氧活性官能基团,如羧基、羟基、酚羟基、羰基、酚基等;这些官能团能够在溶液中进行质子的解离释放,进而使其表面带有负电荷,在静电引力的作用下将土壤中的 Cd^{2+} 吸附,同时各官能团中含有的氢、氮、氧、磷和硫原子可通过配位络合反应进一步吸附固定土壤中的 Cd^{2+} ,因此土壤结构改良剂可通过其良好的阳离子交换性能、吸附和络合能力,降低土壤中镉的生物有效性^[42-44]. 金属及金属氧化物,如铁、锰氧化物,通过表面吸附、沉淀的形式实现对重金属的固定;除了常规的吸附作用外,部分金属氧化物具有强氧化性,可改变金属价态,从而对重金属污染土壤进行修复(表 2)^[45].

表 2 不同土壤调理剂对镉污染土壤修复改良的功能

类别	钝化材料	种类	功能
无机类	石灰类	石灰、碳酸钙、氧化钙、氢氧化钙等	提高土壤 pH 值,与镉形成碳酸盐、硅酸盐沉淀
	含磷类	羟基磷灰石、磷酸盐、钙镁磷肥、磷矿粉等	诱导吸附镉,与镉生成沉淀
	黏土矿物	海泡石、沸石、膨润土、蒙脱石等	比表面积较大,结构层带电荷,吸附镉及与镉形成络合物
	金属氧化物	铁氧化物、锰氧化物、炉渣、钢渣等	通过表面吸附,共同沉淀固定镉
有机类		农作物秸秆、家畜粪便、生物炭、腐殖酸类等	提升土壤 pH 值,增加土壤阳离子交换量,形成难溶性金属络合物

3.2 土壤调理剂对镉污染土壤修复改良的应用现状

目前,土壤调理剂在重金属污染修复中的应用与研究被不断重视,在实际应用中也获得良好效果. 美国超级基金修复报告对 1 447 个已开展的补救措施场地统计,其中有 460 个污染场地使用了固化/稳定化技术,高达 31.8% 的使用率^[46]. 固化稳定化技术在我国土壤重金属污染(包括场地污染和农田污染)修复应用选择中占到 70% 以上^[47]. 曹英兰等^[48]将牡蛎壳粉添加到不同镉污染水平的土壤后,镉的酸可溶态、可还原态和可氧化态分别降低了 12.92%~20.97%, 18.99%~31.10% 和 -18.02%~47.80%, 而残渣态则增加了 124.2%~175.9%. 王璨等^[49]通过实验发现钾长石粉、牡蛎壳粉、生物炭粉、氧化钙、碳酸钾和磷酸钙 6 种常见土壤调理剂均可有效降低土壤中镉的活性. Hamid 等^[50]研究发现,无论单独使用石灰、生物炭、铁生物炭还是使用复合改性剂都会显著降低重金属可用性,且石灰和复合改良剂有效改善了土壤的 pH 值,降低了重金属的有效性并减少了水稻对重金属的吸收和积累. 魏玮等^[51]研究发现,施用结构改良剂能够显著降低土壤中有效态铜和镉的含量,并且能够有效降低水稻根、茎和稻米中镉的含量,抑制了水稻对铜和镉的吸收.

4 展望

土壤中重金属镉的来源存在多途径、多形式的特性,其中重金属镉来源又以人为活动贡献

最为突出. 在治理修复重金属镉污染的过程中, 首先需要找准污染源, 从源头开始遏制重金属污染的进一步恶化. 同时由于重金属镉污染危害程度主要取决于其在土壤中的赋存形态, 因此, 在土壤重金属镉污染修复治理中可通过改变各类与土壤镉形态相关的因子如土壤pH值、氧化还原电位、有机质含量等, 从而降低土壤中镉的生物有效性形态含量.

土壤调理剂在治理重金属污染过程中因具有快速、简单和低成本的特点而被广泛应用. 在作物种植生产过程中, 因地制宜, 合理选择、施用土壤调理剂, 可以在修复改良土壤理化性质的同时, 使土壤中镉发生吸附、络合或沉淀反应, 降低土壤镉生物有效性、迁移转化能力和毒性, 减轻其对生态系统的影响程度, 从而达到生产安全与稳产增收的目的.

然而, 在实际运用土壤调理剂进行土壤镉污染治理时, 也还存在着许多问题: ①当下土壤调理剂应用过程中所需施用量较大且需长期连续施用以确保土壤改良修复效果; 而且, 土壤调理剂在长期大量施用下可能会降低对土壤的改良修复效率, 对土壤生态系统的稳定性和安全性也可能造成一定的潜在风险^[52]. ②一些土壤调理剂原料可能含有大量重金属物质, 在生产过程中如处理不当或不合理施用会加剧土壤退化甚至造成二次污染, 进而导致土壤的产能与品质下降, 引发农产品安全等相关问题. ③土壤调理剂在修复改良重金属镉污染土壤的过程中, 由于钝化机理的特殊性, 只是暂时降低土壤镉的生物有效性形态, 在一定程度上可能对土壤造成二次污染.

因此, 在土壤调理剂对重金属污染治理研究中, 一方面要加强土壤调理剂的研发及应用, 以达到绿色、经济、持久、提质降量的目的; 另一方面需重视材料的环境、经济效益, 避免对土壤造成二次污染. 在进行土壤重金属治理时则需科学适量施用土壤调理剂, 不同地域, 需因地制宜, 选用合适的土壤调理剂及配套修复技术进行土壤治理修复, 避免治理的盲目性, 实现治理有效性, 最终达到农业可持续发展的目的.

参考文献:

- [1] FERREIRA C S S, SEIFOLLAHI-AGHMIUNI S, DESTOUNI G. Soil Degradation in the European Mediterranean Region: Processes, Status and Consequences [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 805: 150106.
- [2] 周岩, 武继承. 土壤改良剂的研究现状、问题与展望 [J]. *河南农业科学*, 2010, 39(8): 152-155.
- [3] XU Z, LU Z, ZHANG L. Red Mud Based Passivator Reduced Cd Accumulation in Edible Amaranth by Influencing Root Organic Matter Metabolism and Soil Aggregate Distribution [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116543.
- [4] XUE S, SHI L, WU C. Cadmium, Lead, and Arsenic Contamination in Paddy Soils of a Mining Area and Their Exposure Effects on Human HEPG2 and Keratinocyte Cell-Lines [J]. *Environmental Research*, 2017, 156: 23-30.
- [5] QIN G, NIU Z, YU J. Soil Heavy Metal Pollution and Food Safety in China: Effects, Sources and Removing Technology [J]. *Chemosphere*, 2021, 267: 129205.
- [6] GUO G L, ZHOU Q X, MA L Q. Availability and Assessment of Fixing Additives for the in Situ Remediation of Heavy Metal Contaminated Soils: aReview [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2006, 116(1): 513-528.
- [7] SHAH M T, BEGUM S, KHAN S. Pedo and Biogeochemical Studies of Mafic and Ultramafic Rocks in the Mingora and Kabal Areas, Swat, Pakistan [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2010, 60(5): 1091-1102.
- [8] 赵国强. 稻田系统中镉来源研究进展 [J]. *绿色科技*, 2020(18): 62-63, 66.
- [9] 郭超, 文宇博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2019, 55(4): 678-687.
- [10] CHARY N S, KAMALM C T, RAJD S S. Assessing Risk of Heavy Metals from Consuming Food Grown on

- Sewage Irrigated Soils and Food Chain Transfer [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(3): 513-524.
- [11] LAMB D T, MING H, MEGHARAJ M, et al. Heavy Metal (Cu, Zn, Cd and Pb) Partitioning and Bioaccessibility in Uncontaminated and Long-Term Contaminated Soils [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 171(1-3): 1150-1158.
- [12] ARTHUR E, CREWS H, MORGAN C. Optimizing Plant Genetic Strategies for Minimizing Environmental Contamination in the Food Chain [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2000, 2(1): 1-21.
- [13] 许紫峻, 汪溪远, 师庆东, 等. 准东煤矿区土壤镉污染风险评价及敏感性分析 [J]. *生态毒理学报*, 2018, 13(2): 159-170.
- [14] ROY M, MCDONALD L M. Metal Uptake in Plants and Health Risk Assessments in Metal-Contaminated Smelter Soils [J]. *Land Degradation & Development*, 2015, 26(8): 785-792.
- [15] 袁旭峰. 农田土壤中镉的来源及水稻控镉生产技术 [J]. *基层农技推广*, 2021, 9(3): 95-97.
- [16] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析 [J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 392-397.
- [17] 刘育红. 土壤镉污染的产生及治理方法 [J]. *青海大学学报(自然科学版)*, 2006, 24(2): 75-79.
- [18] 黄凤, 宋磊, 周浩. 浅谈土壤镉污染的来源及存在形态 [J]. *价值工程*, 2020, 39(29): 225-226.
- [19] 王亚平, 鲍征宇, 侯书恩. 尾矿库周围土壤中重金属存在形态特征研究 [J]. *岩矿测试*, 2000, 19(1): 7-13.
- [20] 王亚平, 黄毅, 王苏明, 等. 土壤和沉积物中元素的化学形态及其顺序提取法 [J]. *地质通报*, 2005, 24(8): 728-734.
- [21] 李洪达, 李艳, 周薇, 等. 稻壳生物炭对矿区重金属复合污染土壤中 Cd、Zn 形态转化的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1856-1865.
- [22] 邓红梅, 陈永亨, 常向阳. 腐殖酸对铊污染土壤中铊形态和分布的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(3): 891-894.
- [23] 李娜, 夏瑜, 何绪文, 等. 基于 Tessier 法的土壤中不同形态镉的转化及其影响因素研究进展 [J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1505-1512.
- [24] TESSIER A, CAMPBELL P G C, BISSON M. Sequential Extraction Procedure for the Speciation of Particulate Trace Metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7): 844-851.
- [25] ZHAO K L, ZHANG W W, ZHOU L, et al. Modeling Transfer of Heavy Metals in Soil - Rice System and Their Risk Assessment in Paddy Fields [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2009, 59(3): 519-527.
- [26] HUSSAIN B, ASHRAF M N, SHAFEEQ U R. Cadmium Stress in Paddy Fields: Effects of Soil Conditions and Remediation Strategies [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 142188.
- [27] MAO C P, SONG Y, CHEN L. Human Health Risks of Heavy Metals in Paddy Rice Based on Transfer Characteristics of Heavy Metals from Soil to Rice [J]. *CATENA*, 2019, 175: 339-348.
- [28] 和君强, 贺前锋, 刘代欢, 等. 土壤镉食品卫生安全阈值影响因素及预测模型——以长沙某地水稻土为例 [J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1181-1194.
- [29] 林青, 徐绍辉. 土壤中重金属离子竞争吸附的研究进展 [J]. *土壤*, 2008, 40(5): 706-711.
- [30] 喻华, 秦鱼生, 陈琨, 等. 水稻土镉形态分布特征及其生物效应研究 [J]. *西南农业学报*, 2017, 30(2): 452-457.
- [31] 毛凌晨, 叶华. 氧化还原电位对土壤中重金属环境行为的影响研究进展 [J]. *环境科学研究*, 2018, 31(10): 1669-1676.
- [32] 刘莉, 钱琼秋. 影响作物对镉吸收的因素分析及土壤镉污染的防治对策 [J]. *浙江农业学报*, 2005, 17(2): 111-116.
- [33] HU Y A, CHENG H, TAO S. The Challenges and Solutions for Cadmium-Contaminated Rice in China: a Critical Review [J]. *Environment International*, 2016, 92-93: 515-532.
- [34] 葛颖, 马进川, 邹平, 等. 水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响 [J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(3): 79-86.
- [35] 宋杨. 冻融作用下外源有机质对东北耕地土壤中重金属 Pb 和 Cd 赋存形态的影响 [D]. 长春: 吉林大学, 2012.

- [36] 张静静,朱爽阁,朱利楠,等.不同钝化剂对微碱性土壤镉、镍形态及小麦吸收的影响[J].环境科学,2020,41(1):460-468.
- [37] PARK J H, LAMB D, PANEERSELVAM P. Role of Organic Amendments on Enhanced Bioremediation of Heavy Metal(Loid) Contaminated Soils [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 185(2-3): 549-574.
- [38] 欧阳娜,李云龙.牡蛎壳吸附材料研究进展[J].黎明职业大学学报,2019(2):86-91.
- [39] HOUBEN D, PIRCAR J, SONNET P. Heavy Metal Immobilization by Cost-Effective Amendments in a Contaminated Soil: Effects on Metal Leaching and Phytoavailability [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123: 87-94.
- [40] 刘艺芸,陈志国,王秀梅,等.蓄电池拆解区铅、镉复合污染农田土壤钝化修复[J].环境化学,2021,40(4):1138-1146.
- [41] 张宇鹏,谭笑潇,陈晓远,等.无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响[J].生态环境学报,2020,29(2):388-393.
- [42] DE VARENNES A, QUEDA C. Application of an Insoluble Polyacrylate Polymer to Copper-Contaminated Soil Enhances Plant Growth and Soil Quality [J]. Soil Use and Management, 2005, 21(4): 410-414.
- [43] YANG X, LIU J J, MCGROUTHER K, et al. Effect of Biochar on the Extractability of Heavy Metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) and Enzyme Activity in Soil [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(2): 974-984.
- [44] SARFRAZ R, SHAKOOR A, ABDULLAH M, et al. Impact of Integrated Application of Biochar and Nitrogen Fertilizers on Maize Growth and Nitrogen Recovery in Alkaline Calcareous Soil [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2017, 63(5): 488-498.
- [45] 唐朝春,朱蓓,许荣明,等.金属基吸附剂除砷技术研究进展[J].环境科学与技术,2020,43(10):221-228.
- [46] 常春英,曹浩轩,陶亮,等.固化/稳定化修复后土壤重金属稳定性及再活化研究进展[J].土壤,2021,53(4):682-691.
- [47] 黄占斌,赵鹏,王颖南,等.土壤重金属固化稳定化材料研发及其应用基础研究进展[J].农业资源与环境学报,2022,39(3):435-445.
- [48] 曹英兰,陈丽娜,张金丽,等.牡蛎壳粉对酸性土壤的修复及其对镉的钝化作用研究[J].环境科学与技术,2016,39(1):178-182.
- [49] 王璨,张煜行,何明靖,等.不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响[J].环境科学,2021,42(8):4024-4036.
- [50] HAMID Y, TANG L, HUSSAIN B. Efficiency of Lime, Biochar, Fe Containing Biochar and Composite Amendments for Cd and Pb Immobilization in a Co-Contaminated Alluvial Soil [J]. Environmental Pollution, 2020, 257: 113609.
- [51] 魏玮,李平,郎漫.不同结构改良剂对铜镉污染土壤水稻生长和重金属吸收的影响[J].环境科学,2021,42(9):4462-4470.
- [52] 索琳娜,马杰,刘宝存,等.土壤调理剂应用现状及施用风险研究[J].农业环境科学学报,2021,40(6):1141-1149.