

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.001

余琼阳, 李婉怡, 张宁, 等. 农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展. 土壤, 2024, 56(2): 229–241.

农田土壤重金属污染现状与安全利用技术研究进展^①

余琼阳¹, 李婉怡², 张宁³, 赵玲^{3*}, 王月梅³, 宋家音³, 马文亭³, 张光华¹, 董荷玲¹, 於维维², 滕应³, 骆永明³, 沈仁芳³

(1 台州市农业技术推广中心, 浙江台州 318000; 2 台州市路桥区农(渔)技总站, 浙江台州 318000; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

摘要: 重金属污染农田直接影响粮食安全和农业可持续发展。安全利用技术主要通过降低土壤中重金属的生物有效性, 以减少作物对重金属的吸收累积和消减重金属进入食物链的风险, 其对解决我国重金属污染农田有效利用和保障粮食安全生产具有重要意义。因此, 本文首先分析了农田土壤重金属污染成因与现状, 然后综述了不同安全利用技术, 如农艺调控措施(包括低累积作物品种筛选、水肥管理及间作或轮作耕作方式)、原位钝化改良和叶面阻控技术的研究进展, 最后提出了强化重金属污染农田土壤安全利用研究及应用的对策。

关键词: 重金属; 污染现状; 安全利用; 农田土壤

中图分类号: X53 文献标志码: A

Present Pollution Status and Safe Utilization Technologies of Heavy Metal-polluted Farmland Soil: A Review

YU Qiongyang¹, LI Wanyi², ZHANG Ning³, ZHAO Ling^{3*}, WANG Yuemei³, SONG Jiayin³, MA Wenting³, ZHANG Guanghua¹, DONG Heling¹, YU Weiwei², TENG Ying³, LUO Yongming³, SHEN Renfang³

(1 Taizhou Agricultural Technology Extension Centre, Taizhou, Zhejiang 318000, China; 2 Luqiao Agricultural Technology Extension Station, Taizhou, Zhejiang 318000, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract: Heavy metal-polluted farmland directly affects food security and sustainable development of agriculture. Safe utilization technology can decrease the uptake and accumulation of heavy metals into crops and thereby cut down the risk of heavy metals into the food chain through primarily reducing the bioavailability of heavy metals in soils, which is of great significance for the effective application of heavy metal-polluted farmland resources and the protection of crop safety at current stage in China. Therefore, this paper firstly analyzed the pollution cause and current situation of heavy metals in farmland soil, then reviewed the research progress of different safe utilization technologies including low accumulation crop variety screening, water and fertilizer management, intercropping or crop rotation, in situ passivation and foliar resistance control, and finally proposed the strategies of strengthening the research and practice of safe utilization in heavy metal-polluted farmland.

Key words: Heavy metal; Pollution status; Safe utilization; Farmland soil

土壤是保障农业可持续发展的重要自然资源,也是生态环境保护的主要对象之一。但近几十年来,农业高度集约化生产、工矿业活动等人为活动,如农药化肥的不合理使用以及涉重金属企业“三废”的大量排放等导致农田土壤重金属污染问题日趋严峻^[1]。重金属污染土壤修复治理已成为全球共同关注的主要环境问题之一。欧洲数百万公顷的农田受到重金属污染,日本Cd、Cu等重金属污染农田面积达73 000 hm²^[2]。

我国农田重金属污染情况也较为严重。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[3]显示我国耕地点位超标率为19.4%,且以Cd、As、Hg等重金属污染为主。农作物能通过根部从农田土壤中吸收和累积重金属,并通过食物链对人类健康造成潜在威胁。王成尘等^[4]通过收集分析2000—2021年文献报道的我国粮食主产区6 078份水稻籽粒和3 024份小麦籽粒样品的重金属含量数据,发现水稻及小麦籽粒的Cd超

①基金项目: 台州市农业科技项目(2023-12)和国家重点研发计划项目(2019YFC1803705)资助。

* 通讯作者(zhaoling@issas.ac.cn)

作者简介: 余琼阳(1993—),女,浙江台州人,助理农艺师,主要从事农田安全生产技术推广相关工作。E-mail: 448749546@qq.com

标率达 31.3% 和 22.2%，Pb 的超标率达 26.2% 和 32.1%，污染情况较为突出。可见，农田土壤重金属污染能直接危害我国粮食安全和人体健康，因此，如何安全利用重金属污染农田以保障我国粮食安全生产，成为当前污染土壤治理的首要任务之一。

重金属污染土壤治理技术研究在我国已开展了数十年。由于中轻度重金属污染农田面广量大，从经济性和推广性方面考虑，现阶段中轻度重金属污染农田以安全利用为主，包括污染隔离、减量施肥等源头防控，低积累品种种植，叶面阻控，水肥调控，施用钝化剂，深翻，替代种植等^[5-7]。这些安全利用措施主要是通过降低土壤重金属含量或生物有效性，抑制其进入生物链或者通过改变作物对土壤重金属的吸收能力，在充分利用土地资源的同时保障农产品的安全生产。由于我国土壤类型多，性质差异大，且不同区域重金属种类和含量组成差别大，导致农作物对不同区域土壤中重金属的吸收累积存在显著差异^[8]。众多试验也表明，不同安全利用措施在不同地区的重金属污染农田的应用效果存在着差异^[9-10]。因此，在实际生产中如何筛选符合本区域效果好、成本低且易推广的受重金属污染农田安全利用技术模式一直是一个难题^[11]。鉴于此，本文在分析不同来源途径导致的农田土壤重金属污染现状的基础上，着重评述了应用于中轻度重金属污染农田土壤治理的不同安全利用技术的研究进展，提出了强化重金属污染农田土壤安全利用技术研究及实践的对策，以期为我国重金属污染农田资源有效利用及粮食安全生产提供参考。

1 农田土壤中重金属污染成因与现状

1.1 污染成因

与大气和水的环境介质不同，农田土壤中的重金属来源复杂多样，包含成土母质形成的自然成因和人类活动产生的人为成因。成土母质导致的土壤重金属含量超标是不可控因素^[12]，然而人类活动造成的土壤重金属污染随着人类经济社会的发展已逐渐成为最主要的因素^[13]。

1.1.1 自然成因 通常地表的天然矿物中含有不同质量的重金属元素，这些矿物在风化过程中会将重金属不可避免地带入土壤。研究发现，棕钙土、石灰(岩)土、绿洲土、水稻土、灰褐土和磷质石灰土等属于高背景区土类，其风化成土过程中会将重金属富集于土壤中，形成了土壤高背景值^[14]。研究还发现^[15]，不同类型母质发育的土壤中重金属含量也存在着显著差异。例如，Cd、As、Hg 和 Pb 等重金属在石灰

岩和火成岩母质发育的土壤中的平均含量明显要高于风沙母质土壤。我国中南部和西南部高背景地区土壤中重金属含量在区域大尺度上发生显著分异也是由于成土过程中重金属元素的次生富集作用造成的。

1.1.2 人为成因 我国大部分农田土壤的重金属污染主要由工矿业生产排放、农业投入品的不合理施用等人为因素造成。

1) 工矿业生产排放。重金属污染土壤在我国的空间分布上表现为“南高北低，东高西低”的区域性特点^[16]，其中，珠三角、长三角、环渤海地区、东北老工业基地和西南矿产资源型城市等区域的土壤重金属污染尤为突出，而这些区域的农田土壤重金属污染分布往往与工矿业生产活动区、城市中心区等污染源所在区域的分布较为一致，且土壤重金属的污染程度随着污染源距离的增加呈明显的递减趋势^[17]，特别是在农业和采矿业共存的区域，如江西、湖南、云南、贵州、四川、广西等有色金属矿区，土壤重金属污染问题更为严重^[18-20]。矿物开采及金属冶炼等人为活动导致高浓度的 Cd、Pb、Zn 等重金属元素通过直接排放或大气沉降等途径造成矿区周边农田土壤重金属污染^[13, 21]。此外，早期工业生产过程中的废水废气的任意排放造成周边水源和大气的污染^[22]，再通过灌溉和大气沉降进入农田，加重土壤重金属污染。

2) 农业投入品的不合理施用。有机肥、化肥、农药等农业投入品中常常含有重金属，通过不合理施用会造成农田土壤重金属污染。已有研究表明，过磷酸钙中含有一定量的 Cd、Pb 等重金属元素，有机-无机复混肥中 Pb 含量甚至比化肥中的高，这些肥料长期施用不可避免地会引起土壤中重金属含量超标^[23]。此外，规模化养殖场产生的畜禽粪便常常含有较高含量的 Cd、As、Cu 等重金属元素，由于畜禽粪便常被当作有机肥施用到农田中，长期施用必然造成农田土壤重金属污染^[24]。

1.2 污染现状

我国农田土壤重金属污染及其导致的粮食安全问题已引起广泛关注。从污染成因分析可以看出，我国农田重金属污染主要是由于工矿业活动造成的，表 1 列举了我国不同区域典型的工矿业活动区周边农田土壤中重金属污染现状及其污染来源^[25-32]。从表 1 的数据可以看出，我国工矿业活动区周边土壤中常常存在多种重金属元素共存的污染现状，其中以 Cd、Pb、Cu、Zn 的复合污染最为常见，且这几种重金属的含量相对较高，主要为工业源和农业源，而 Cr、Ni 的含量相对较低，多为自然源。

表1 典型工矿业活动区周边农田土壤重金属污染现状
Table 1 Current situations of heavy metal pollution in farmland soils around typical industry and mining activity areas

工矿业活动区	重金属		污染来源	文献
	元素	含量 (mg/kg)		
湖北省钟祥市某磷化工厂	As	203 ± 330	磷化工厂的工业污染源	[25]
	Pb	88 ± 108		
	Cd	1.84 ± 4.31	农业污染源	
	Cu	75 ± 56	交通运输及大气沉降混合源	
	Zn	222 ± 241		
	Cr	100 ± 29	土壤母质源	
	Ni	41 ± 9		
台州市典型电子垃圾拆解场地	Cd	0.68 ± 0.81	金属冶炼源	[26]
	Pb	57 ± 42		
	Cu	95 ± 163		
	Zn	161 ± 126		
	Cr	115 ± 100	自然源	
	Co	14.4 ± 5.4		
	Ni	43 ± 17		
	As	8.97 ± 3.93	农业源	
包头市老工业基地	Hg	0.19 ± 0.28	燃煤和工业源	[27]
	Cd	0.25 ± 0.20	工业废水污灌	
	Pb	77 ± 97		
	Zn	186 ± 211		
	Cr	60 ± 173		
江西省某工业园区	Cd	0.23 ~ 6.67	金属冶炼等工业源	[28]
	Pb	145 ~ 836		
	Cu	81 ~ 215		
	Zn	53 ~ 1 820		
	Cr	60 ~ 173		
	Ni	35 ~ 76	自然源	
云南省某废弃硅厂	Cd	0.39 ± 0.80	燃煤和工业源	[29]
	Pb	50.62 ± 9.43		
	Zn	109.20 ± 62.25		
	As	34.40 ± 34.52		
	Hg	0.12 ± 0.14		
	Cr	82.04 ± 19.51	自然源	
	Cu	33.24 ± 5.21		
	Ni	44.85 ± 6.63		
豫西成矿带潭头盆地金矿区	Cd	0.40 ± 0.55	交通源	[30]
	Pb	84 ± 97		
	Zn	125 ± 60		
	Cu	33 ± 17		
	Cr	72 ± 18	自然源	
	Ni	31 ± 7.5		
	As	12.3 ± 6.7	金矿开采和尾矿相关矿业源	
	Hg	0.12 ± 0.31	汞溶解炼金相关的矿业源	
秦岭北麓潼关县有色金属矿区	Cd	8.1 ~ 11.6	农业源	[31]
	Pb	172 ~ 980	交通源	
	As	19 ~ 414	采矿及其废水灌溉工业源	
西南某高砷煤矿区	Hg	0.06 ~ 1.25		[32]
	Cd	0.03 ~ 0.42	自然源	
	Zn	42 ~ 144		
	Cu	43 ~ 100		
	As	19 ~ 414		

尽管表 1 汇总的不同类型工业园区或矿区周边农田土壤中重金属污染现状的研究结果是局部的,不能代表我国农田土壤重金属污染分布的整体情况。然而就总体而言, Cd 是我国农田土壤中污染最为普遍的重金属元素,且多种重金属污染程度大多处于中轻度水平。由于农田重金属污染能直接影响农产品安全生产,威胁我国粮食安全。因此,近年来针对安全利用类重金属污染农田,在农艺调控、土壤钝化改良、超富集植物与农作物间作或轮作等安全利用措施方面开展了较多研究,也取得了不错的研究进展。

2 中轻度重金属污染农田安全利用技术

基于我国耕地资源紧张,针对我国大面积中轻度重金属污染农田土壤,采用污染农田土壤上生产重金属含量不超标农产品的安全利用技术是现阶段最可推广实行的治理方法。目前,低累积品种作物筛选、水肥管理优化以及不同类型作物间作或轮作等农艺调控措施,土壤钝化改良,叶面阻控以及多项技术的组合应用等是研究较多的安全利用技术。中轻度重金属污染农田的不同安全利用技术模式如图 1 所示。

2.1 农艺调控措施

对于轻度重金属污染农田土壤,通过农艺调控措

施,主要包括低累积品种筛选、水肥管理优化、间作或轮作耕作方式改变等,降低土壤中重金属的生物有效性,进而减少农作物可食部分对重金属吸收累积。

2.1.1 低累积作物品种筛选 已有研究表明,植物不同种类之间和同一物种的不同品种之间对重金属的富集能力都存在较大差异,这为筛选可食部分累积量小的作物品种、减少重金属在食物链中的富集研究提供了可能。目前筛选的作物类型覆盖水稻(*Oryza sativa* L.)、小麦(*Triticum astivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、油菜(*Brassica napus* L.)、甘薯(*Ipomoea batatas* L.)等粮食作物,芹菜(*Apium graveoliens* L.)、苦瓜(*Momordica charantia* L.)、土豆(*Solanum tuberosum*)、番茄(*Solanum lycopersicum*)等蔬菜作物,涉及的重金属种类包括 Cd、Pb、As、Hg 和 Cr。表 2 列举了我国筛选的部分重金属低累积作物品种清单。在筛选低累积品种时,除了保障对重金属的低吸收的特征外,还需要兼顾品种的区域适应性、多金属抗性以及产量等特征。因此,筛选低累积品种作物需要结合作物可食部分重金属含量、作物产量、富集系数和转运系数等指标综合评价,筛选出能耐受多种重金属复合污染农田土壤的重金属低累积潜力且当地市场接受度高的品种进行推广。

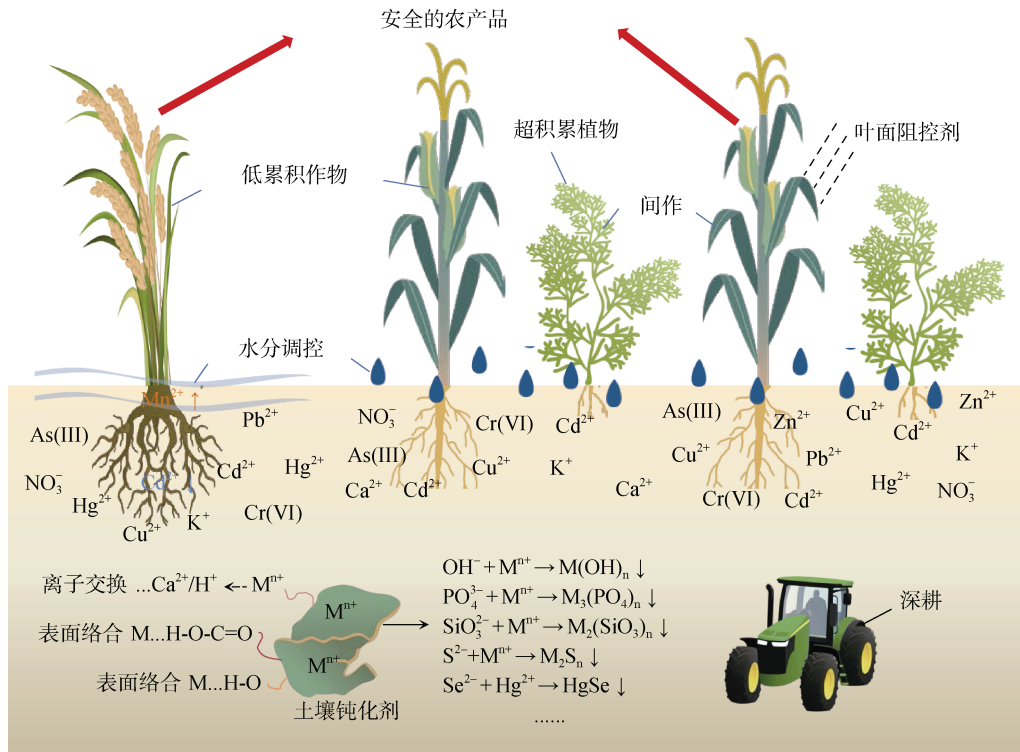


图 1 重金属污染农田安全利用技术模式

Fig. 1 Safe utilization technology modes of heavy metal-polluted farmland

表 2 我国筛选的部分重金属低累积作物品种清单
Table 2 List of low-heavy metal-accumulating crop cultivars in China

作物类别	主要品种	重金属	适宜地区	参考
水稻	深两优 8386、广 8 优金占、丰田优 553、桂香 12、广 8 优 169	Cd	广西省田东县	[33]
	野香优 703、恒丰优 666、广 8 优金占、野香优莉丝	As		
	成优 1479、天优 1177	Cd	贵州省贵阳市开阳县	[34]
	早稻：中嘉早 17、株两优 189、华 1s/R039	Cd	湖南省	[35]
	晚稻：长两优 772、长两优 1419、长两优 051			
	Y 两优 19、晶两优华占	Cd、As	湖南省浏阳市永和镇	[36]
	红优 2155、T78 优 2155、特优 716、中浙优 1 号	Cd	福建省	[37]
	隆两优 534、Y 两优 1 号、袁两优 908、渝香 203	Cd、As、Pb、Cr	重庆地区	[38]
	甬优 538、中浙优 8 号、甬优 1540、秀水 14	Cd	浙江省	[39]
	南粳 46、南粳 3908	Cd	苏南地区	[40]
	南粳 46、南粳 5055	Hg		
	小麦	保麦 2 号、百农 207、保麦 5 号、荔高 6 号、新麦 288	Cd、Pb、As、Cr、Hg	黄淮冬麦区
山农 17、镇麦 9 号		Cr	山东省	[42]
扬麦 25、镇麦 12 号、扬麦 12 号		Cd	苏南地区	[40]
扬麦 16、宁麦 13		Hg		
玉米	云瑞 8 号、会单 4 号、路单 7 号	Cd	云南省寻甸县	[43]
	金秋玉 3、五谷 3861、会玉 336	Cd	云南省	[44]
	豫丰玉 88、福科 07、大天 1 号	Cd	长株潭地区	[45]
	西单 8 号、路单 2 号、秋硕玉 6 号、宣黄单 5 号	Pb、Cd	云南省	[46]
	路单 12 号、足玉 7 号、华兴单 88 号	Pb、Cd、As	云南省个旧地区	[47]
	珠玉糯 1 号、正大 999、仲糯 1 号	Cd、Pb、As	韶关市曲江地区	[48]
	安单 3 号、富华 22、惠农单 5 号、惠农青 1 号	Cd、As	毕节市七星关区	[49]
油菜	浙油 51、赣油杂 6 号、纯油王 1 号	Cd、Cu	浙江省温州市	[50]
	赣油杂 6 号、华皖油 4 号、赣油杂 9 号、丰油 58	Cd	江西省贵溪市	[51]
	浙大 630	Cd	长三角地区	[52]
甘薯	广 87、福薯 18、苏薯 16、普薯 32、金山 57	Cd	福建省	[53]
	普薯 32、苏薯 16、金山 57	Cr	福建省	[54]
	广 87、QS816、湘薯 20、湘 108	Cd	湖南省长沙市	[55]
	广 87、普薯 32、金山 57、苏薯 16	Pb	福建省	[56]
芹菜	四季小香芹、荷兰红芹、津南实芹王	Cd	贵州省贵阳市	[57]
土豆	D47、D157、根 1	Cd、Pb	昆明铅锌矿区	[58]
	中薯 3 号、中薯 20 号	Cd、As	西南锌冶炼矿区	[59]
苦瓜	长绿二号、长绿、丰绿、翠绿、夏玉油绿	Cd、Pb、As	韶关市曲江地区	[48]
荷兰豆	饶平红花大荚、604 甜脆、韩育美味	Cd、Pb、As	韶关市曲江地区	[48]
番茄	黑珍珠、玉女、金宝、千禧、金玲珑	Cd、Pb、As	韶关市曲江地区	[48]

2.1.2 水肥管理优化 水分管理和施肥作为农业生产过程中必不可少的田间管理措施,能够影响土壤中重金属的赋存形态和生物有效性。研究表明,淹水能显著提高土壤的 pH^[60],进而显著降低土壤交换态、碳酸盐结合态 Cd 含量,并能增加水稻根表 Fe²⁺ 含量,从而通过土壤 Fe²⁺ 和 Cd²⁺ 竞争水稻根表吸附位和降低 Cd 的生物有效性这两种途径降低水稻对 Cd 的吸收累积^[61]。水分管理不仅能影响土壤 pH,还能影响土壤的氧化还原电位 Eh。淹水状态下土壤处于 Eh

值较低的强还原状态, Cd²⁺ 通过与 S²⁻ 形成 CdS 沉淀而大大降低 Cd 的生物有效性^[62],同时土壤中 Fe 和 Mn 等元素被还原,通过竞争水稻根系对 Cd 的吸收,也能降低水稻植株对 Cd 的吸收^[63]。Hu 等^[64]研究还表明,淹水灌溉比常规的干湿交替灌溉更显著地降低重金属 Cd、Pb、Cr 在土壤-水稻系统的迁移性,减少水稻对重金属的吸收累积。可见,水分调控是降低轻度重金属污染稻田糙米中重金属含量的有效方法之一,但是长期淹水状态会降低水稻产量,因此,

采用水分控制方式来减少水稻对重金属吸收的同时, 还需要保证水稻的产量。

施肥对农作物吸收重金属的影响也不容小觑。研究表明, 长期过量施用铵态氮加速农田酸化, 从而提高了土壤中重金属的移动性, 进而增加了农作物对重金属的吸收, 采用硝态氮替代铵态氮可以减少农作物对重金属的吸收^[65]。此外, 研究还表明施用含 Mn、Zn、Fe、Si 等元素的功能性肥料也能在一定程度上抑制农作物对重金属的吸收。例如, 叶面喷施锌肥能够降低白菜^[66]、小麦^[67]等作物体内的 Cd 含量, 喷施硅肥能够减少水稻地上部和籽粒中 Pb 的含量^[68], 增施锰肥可以有效降低稻米 Cd 的超标率^[69]。此外, 施加磷肥也能通过 P 与 As、Cr 等重金属竞争植物根系表面吸附位点而抑制作物对重金属的吸收^[70]; 另外,

化肥与有机肥的合理配施也能有效抑制农作物从土壤吸收和富集 Cd^[69]。除了肥料的组成对作物吸收重金属有影响外, 改变肥料的用量也能影响作物对重金属的吸收。Tang 等^[66]研究发现白菜中的 Cd 含量与土壤中的 K、Zn 的含量呈现负相关关系, 这一发现表明增施钾肥或锌肥能够降低白菜对 Cd 的吸收。肥料对作物吸收重金属存在影响, 但其作用机理比较复杂, 还需要进一步探索明确。

2.1.3 间作或轮作措施 近年来, 在保证农产品安全的前提下, 利用超富集植物或生物量大的富集植物与农作物进行间作或轮作以持续地减少土壤中的重金属含量, 成为重金属污染农田安全利用的重要发展方向。表 3 列出了重金属超富集植物与作物间作或轮作的修复效果与安全生产情况。

表 3 重金属超富集植物与农作物间作或轮作的应用效果
Table 3 Heavy metal hyperaccumulators and crop intercropping or rotation application effect

超富集植物	农作物	种植模式	土壤重金属含量 (mg/kg)	土壤 pH	植物吸收量提升率(%)	土壤重金属消减提升率(%)	安全生产情况	参考文献
龙葵	玉米	间作	Cd: 0.64	4.81	72.4 ~ 150.5	19.07	达标	[71]
续断菊	玉米	间作	Cd: 25; Pb: 600	5.5	Cd: 53	Cd: 2.8	达标	[72]
土荆芥	玉米	间作	Pb: 3 427; Cd: 40; Zn: 825	7.69	Pb: 36; Cd: 21; Zn: -30	-	达标	[73]
	蚕豆	间作	Pb: 3 427; Cd: 40; Zn: 825	7.69	Pb: 85; Cd: 67; Zn: -47	-	达标	
东南景天	青芹	间作	Pb: 259	6.22	26	-	达标	[74]
	辣椒	间作	Pb: 259	6.22	29	-	达标	
伴矿景天	玉米	间作	Cd: 7.25	5.87	25	36	达标	[75]
伴矿景天	苋菜	轮作	Cd: 1.34	5.7	50	13	达标	[76]
伴矿景天	水稻	轮作	Cd: 2.27	7.2	11	15	达标	[77]
菊苣	水稻	轮作	Cd: 0.88	5.7	6.3 ~ 7.0	-	达标	[78]

从表 3 列出的已有研究表明, 采用重金属超富集植物与农作物间作或轮作的耕作方式, 不仅可以在一定程度上提高重金属的修复效率, 还能保证农产品的安全生产, 实现双赢的功效。但是也有研究表明, 超富集植物的根系分泌物会提高土壤中重金属的生物有效性, 反而促进作物对重金属的吸收^[79]。因此, 利用间作或轮作技术作为重金属污染农田安全利用措施时, 在选择物种搭配上需要选择合适的植物或者农作物种植。

2.2 土壤钝化改良措施

土壤钝化改良是中轻度重金属污染农田安全利用研究较多的另一重要措施。常用的钝化剂: 一类是石灰类^[80](石灰、钙镁氧化物和碳酸钙等)、含磷类^[81](磷灰石、磷酸盐等)、黏土矿物^[82-83](膨润土、海泡石、

蒙脱石等)以及金属及其氧化物^[84-85](赤泥、赤铁矿、水钠锰矿等)等无机钝化材料, 其主要是通过调节土壤 pH 以及与重金属发生拮抗、吸附、络合、共沉淀等作用降低重金属离子的活性; 另一类是有机肥、农作物秸秆、城市污泥、畜禽粪肥等^[86-88]有机钝化材料, 其施用于土壤后可以增加土壤有机质及阳离子交换量, 进而增强土壤对重金属的络合和吸附作用, 减少作物对重金属的吸收。此外, 生物质炭^[89-90]和纳米材料^[91]由于具有巨大的比表面积和极为丰富的孔隙结构, 近年来被作为重金属污染土壤新型钝化材料进行了广泛研究。不同类型钝化材料对土壤重金属的钝化机理及应用特点如表 4 所列。

2.2.1 无机类钝化材料 1) 石灰类材料。石灰类钝化材料因其市场价格低、来源广泛、使用方便等特

表 4 不同类型钝化材料对土壤重金属的钝化机理及应用特点

Table 4 Remediation mechanisms and characteristics for heavy metal-polluted soils by different types of passivation agents

钝化剂类别	重金属	钝化机理	优点	缺点	文献
石灰类材料	Cd、Cu、Zn、Hg	提高土壤 pH、吸附沉淀等	来源广泛、价格低廉、施用方便	破坏土壤结构、易板结及养分流失	[92-96]
含磷材料	Cd、Pb、Cu、Zn	提高土壤 pH、络合吸附或形成磷酸盐沉淀	经济高效、可提高土壤养分、对 Pb 修复效果好	过度施用易造成附近水体富营养化	[97-100]
黏土矿物	Cd、Cu、Pb、Zn	表面吸附或形成沉淀物	来源广泛、环境兼容性强、施用方便	钝化效果长效性差	[101-105]
金属及其氧化物	Cd、As	专性吸附、共沉淀或形成络合物	钝化修复效果好	组成复杂、易带入二次污染物	[106-108]
有机类材料	Cd、Cu、Pb	吸附固定或形成难溶性金属-有机络合物	提高土壤养分、改善土壤结构	可能引入二次污染、钝化效果不稳定	[109-114]
生物质炭	Cd、Pd、Zn、Cu、Hg	提高土壤 pH、离子交换、络合、吸附、沉淀等	改善了土壤理化性质、提升土壤肥力	钝化效果长效性不确定、施用成本高	[115-118]
纳米材料	Cr(VI)、Cd、Pb、Cu、Zn	吸附、沉淀作用	比表面积大、吸附及络合能力强、修复效果好	制备工艺复杂、成本高、生态安全性不明	[119-121]

点,是最常用的重金属钝化材料之一。石灰类材料的主要作用机理是提高土壤 pH,其产生的大量 OH⁻能与土壤中 Cd²⁺、Cu²⁺、Zn²⁺、Hg²⁺等重金属离子生成沉淀,同时石灰中的 Ca²⁺还能与重金属离子发生同晶替代作用,进而降低植物对重金属的吸收^[92]。研究表明,施加 CaO 可以阻控土壤中 Cd 向水稻籽粒^[93]和玉米籽粒^[94]的转运。石灰类材料与其他材料,如生物质炭、壳聚糖等联用对重金属 Cd、Cr 的钝化效果更好^[95-96]。虽然石灰类钝化材料价廉易推广,但长期施用会破坏土壤结构,易导致土壤板结及养分流失。

2) 含磷材料。可溶性磷酸盐、钙镁磷肥、磷灰石等是常用的含磷钝化材料。含磷材料除了能提高土壤 pH 外,其含有的磷酸根离子还能与重金属离子形成络合物或磷酸盐沉淀而被固定,从而降低土壤重金属生物有效性^[97]。已有的研究表明,含磷材料对土壤中 Cd、Pb、Cu 及 Zn 都有较好的钝化效果^[98-99],尤其是对 Pb^[100],且通常都是提高土壤 pH、发生络合吸附或形成磷酸盐沉淀等多种机制共同作用的结果。含磷材料,特别是易溶性的含磷材料使用时,需要注意过度施用可能会导致有效态磷流失,造成附近水体富营养化。

3) 黏土矿物。膨润土、凹凸棒石、海泡石等是常用的黏土矿物钝化材料,其钝化土壤主要是通过施入土壤后形成大量的 OH⁻及 SiO₃²⁻与 Cd²⁺、Cu²⁺、Pb²⁺等重金属离子形成沉淀物,且黏土矿物疏松多孔的表面也易于吸附重金属离子。安艳等^[101]通过田间试验研究发现,添加巯基膨润土能显著降低土壤中有效态 Cd 含量,最大降幅达到 48.6%,且水稻秸秆和籽粒对 Cd 吸收的下降率分别达到 70.9% 和 72.7%。同样,

Yu 等^[102]研究表明两种改性有机膨润土比未改性膨润土对土壤中重金属的修复效果更好。任珺等^[103]研究发现经聚合氯化铝铁改性后的凹凸棒石降低土壤中 Cd 生物有效性的效果最佳,并促进了玉米幼苗的生长。Abad-Valle 等^[104]研究表明,施加 5% 海泡石可以降低土壤中可溶态 Cd、Zn 和 Pb 达到 60% ~ 70%;而裴楠等^[105]研究发现海泡石对 Cd 的固定前期效果较好,但随着时间的延长其钝化效果呈现出减弱的趋势。

4) 金属及其氧化物。钢渣、赤泥、铁铝氧化物等可以作为土壤重金属修复钝化材料。钢渣含有 Si、Ca、Mg、P 等元素,能通过提高土壤 pH 来降低土壤重金属活性。钢渣与磷酸盐配施可以增大钢渣的孔体积和比表面积,提高其重金属吸附容量^[106]。赤泥是制铝工业提取铝后产生的废渣,其钝化重金属的作用机理是通过化学吸附,使重金属进入铁铝矿物的晶格内并形成稳定复合物,导致重金属的迁移性和生物有效性降低。研究表明,施加赤泥能显著提高土壤 pH,降低土壤中有效态 Cd 的含量,减少水稻对 Cd 的吸收和 Cd 在稻米中累积,进而使稻米达到食品安全标准^[107]。Fe、Mn 和 Al 等金属氧化物表面具有很多吸附位点,与重金属离子能形成专性吸附、共沉淀以及络合物等稳定结构,从而起到固定土壤中重金属的作用。例如,林志灵等^[108]研究发现铝镁氧化物和铁铝氧化物表面分别通过与 As 形成单齿单核结构和双齿双核结构的复合物,对 As 产生专性吸附。

2.2.2 有机类钝化材料 有机肥、农作物秸秆、城市污泥、畜禽粪肥等是较为常用的有机类钝化材料。

其中,有机肥中含有大量含氧功能基团,如羟基和酚羟基等,是重金属主要的络合配位基,可以形成难溶性的金属-有机络合物^[109],起到固定重金属的作用。已有的研究表明,施加猪粪或生物有机肥,可以降低土壤中有效 Cu、Cd 的含量或吸附固定土壤中的 Cd、Pb 等重金属^[110-111]。但是有机肥施用存在两面性,一方面有机肥中的含氧官能团与重金属结合能钝化重金属,另一方面有机肥会增加土壤有效磷含量,活化土壤中重金属^[112],因此在实际应用时要控制合理的有机肥施用量。水稻、小麦、玉米等常见农作物秸秆还田腐解产生的有机质能与土壤中的重金属发生络合作用,降低重金属的活性,因此可以作为土壤钝化材料施用^[112]。研究表明,油菜秸秆中含有氢硫基等有机官能团,能与重金属反应生成络合物^[113];玉米、菜豆等秸秆还田可以降低白菜中 Cd 含量^[114]。但是秸秆还田值得注意的是其重金属本底含量,如秸秆本身的重金属含量偏高,则需要通过发酵及陈化处理以适当降低其重金属本底值。

2.2.3 其他新型钝化材料 1) 生物质炭。近年来生物质炭作为一种有效的土壤改良材料备受关注。秸秆生物质炭、污泥生物质炭等是常用于土壤重金属修复的钝化材料。生物质炭一般呈碱性,其多孔结构使其具有极大的比表面积,且其表面的羧基、酚羟基、羰基、酯基等含氧官能团,有利于生物质炭与重金属通过吸附、沉淀、络合、离子交换等作用机制,降低重金属在土壤中的移动性和生物可利用性^[115]。例如,郑依虹^[116]研究发现施用水稻秸秆生物质炭显著提高了土壤 pH,降低了 Cd 的生物有效性。同样,王月梅等^[117]采用猪粪生物质炭及锰改性猪粪生物质炭,均降低了土壤中 Hg、Cd 的有效态含量,减少了稻米

中 Hg 和 Cd 含量,且锰改性猪粪生物质炭的处理效果更好。牛晓丛等^[118]施加 5% 的秸秆生物质炭可以降低土壤中 Cd、Pd、Zn 的生物有效性。生物质炭对重金属污染土壤钝化效果已开展不少田间验证试验,但其长期稳定性还有待验证,另外其使用成本偏高,其推广应用受到限制。

2) 纳米材料。与传统材料相比,纳米材料的独特优势体现为巨大的比表面积、极强的吸附及络合能力、高催化反应活性等,使其在重金属污染土壤修复中也表现出极高的修复效率。新型纳米钝化材料主要有纳米零价铁、纳米金属氧化物、纳米矿物等。研究发现,纳米零价铁颗粒可用于固定 Cr(VI) 污染的土壤或固体废物,能将 Cr(VI) 还原为 Cr(III),降低 Cr 的浸出毒性^[119]。邢金峰等^[120]研究表明,纳米羟基磷灰石能通过吸附和沉淀作用降低土壤中的 Cd、Pb、Cu 和 Zn 的生物有效性,并显著降低糙米中的 Cd 含量。采用壳聚糖、纳米黏土和生物质炭开发的一种生物纳米复合材料,能较好地固定土壤中 Pb²⁺、Cu²⁺ 和 Zn²⁺ 等重金属离子^[121]。虽然纳米材料对重金属污染修复效率高,但是复杂的制备工艺和高成本使纳米材料的应用受到了一定的限制,此外纳米材料的生态安全性在实际应用中也需关注。

2.3 叶面阻控技术

叶面阻控技术主要是通过喷施不直接接触土壤的环境友好型叶面阻控材料,降低作物对重金属的吸收和转运,减少作物可食部位重金属的累积量,以达到安全利用或者部分安全利用的效果。叶面阻控剂主要包括营养元素型、稀土元素型、有机酸型等。不同类型叶面阻控剂对作物累积重金属的阻控机理及应用特点如表 5 所列。

表 5 不同类型叶面阻控剂对作物累积重金属的阻控机理及应用特点

Table 5 Inhibition mechanisms and characteristics for accumulation of heavy metals in crops by different types of foliar resistance control agents

阻控剂类别	重金属	阻控机理	优点	缺点	文献
P 元素型	Pb、Cd、Zn	形成难溶性金属螯合物,降低重金属活性	使用简单易操作、经济收益高	过量施用易造成附近水体富营养化	[122-123]
S 元素型	Cd	降低重金属从植物茎向叶的转运	应用简易	阻控效果不稳定	[124]
金属元素型(Fe、Mn)	Cd	吸附固定或降低重金属转运	经济环保	长效性不明确	[125]
Si 元素型	Cd、Pb、Cu、Zn	形成金属-硅复合物,抑制重金属转运	Si 是作物不可或缺的元素,增强作物抗性	对不同作物的阻控效果不稳定	[126]
Se 元素型	Cu、Hg、Cd	与重金属拮抗作用,抑制作物对重金属吸收转运	适量硒肥可以提高稻米营养品质	过度施用易造成作物中毒	[127]
稀土元素型	Cd、Pb	竞争产生拮抗效应,增强植物对重金属的抗性	阻隔效果好	应用成本高	[128-130]
有机酸型	Cd、Cr、As、Pb	络合沉淀,降低重金属在植物体内的迁移性	操作简单	成本较高、阻控效果不稳定	[131-135]

2.3.1 营养元素型叶面阻控剂 营养元素型叶面阻控剂主要是通过调节植物生理过程,促进作物光合作用和对营养元素的吸收,从而提升作物对重金属胁迫的抗耐性。营养元素型叶面阻控剂中以 P 元素为主的大量营养元素型叶面阻控剂,如磷酸二氢钾(KH_2PO_4),其主要作用机制为:①通过与重金属结合形成螯合物,减少重金属在植株体内的移动性而阻控重金属在植株内的累积^[122];②通过增加细胞壁厚度而固持更多的重金属^[123]。以含 S、Ca、Mg 为主的中量营养元素型叶面阻控剂可以降低重金属从植物茎向叶的转运。例如,叶面喷施 L-半胱氨酸($\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$)、 K_2S 、 K_2SO_4 分别能使糙米 Cd 含量降低 47.18%、39.49%、27.69%^[124]。微量营养元素型叶面阻控剂中的 Fe、Mn 等元素能在植物根表形成的氧化物膜吸附固定 Cd,抑制根系对 Cd 的吸收,同时 Fe、Mn 还能与 Cd 竞争植物体内的转运蛋白,降低植物对 Cd 的转运效率,从而减少作物可食部位 Cd 含量^[125]。此外,目前研究较多含 Si 和含 Se 叶面阻控剂,都能有效降低糙米 Cd 含量。例如,黄崇玲等^[126]研究发现无机或有机 Si 溶胶的叶面阻控剂均能降低稻米的 Cd 含量,且喷施 0.2% 的有机 Si 溶胶应用效果更好。水稻叶面喷施亚硫酸硒溶液同样也能明显降低水稻不同部位对 Cd 的转运系数^[127]。

2.3.2 稀土元素型叶面阻控剂 稀土元素叶面阻控剂主要是含有镧(La)、铈(Ce)、钕(Nd)等元素,能增强植物对重金属的抗性,从而减少植株体内的重金属含量。研究表明,La 可以有效缓解 Cd 对水稻、玉米、豌豆等作物幼苗的毒害作用^[128];Ce 可以缓解 Cd、Pb 对黄豆、小麦和玉米等作物幼苗的毒害^[129];Nd 能降低菹草和伊乐藻内的 Cd 含量^[130]。

2.3.3 有机酸型叶面阻控剂 有机酸型叶面阻控剂是通过有机酸与重金属形成络合物的方式沉淀重金属,减小重金属的移动性。研究证明,腐植酸、吡啶丁酸、天冬氨酸、Zn-赖氨酸、腐殖酸络合钾可以有效降低不同类型植物的根部、地上部 Cd 含量^[131-134]。不同类型叶面阻控剂混施对降低蔬菜作物中重金属含量的效果更好,如黄瓜果实膨大期喷施含有黄腐酸钾和 ZnSO_4 的叶面阻控剂可有效阻隔并降低黄瓜对 Cr、As、Pb 的吸收累积^[135]。

3 研究展望

重金属污染对耕地数量和质量以及农产品品质都会产生不良影响,进而会导致我国人均面积少、后备不足的耕地资源日趋紧张。近些年来,土壤污染防

治工作逐步受到了国家的高度重视。2016 年颁布的《土壤污染防治行动计划》,明确要求“到 2020 年受污染耕地安全利用率达到 90% 左右;到 2030 年受污染耕地安全利用率达到 95% 以上”。结合我国的具体国情、农田土壤重金属污染现状和安全利用实际需求,今后重金属污染农田土壤安全利用方面应重视并加强以下几方面的工作:

1) 针对重金属低累积作物筛选的局限性,一方面应强化不同作物种类对重金属吸收和转运关键基因的识别和确认研究,进而通过基因工程技术改变这些吸收和转运基因在作物体内的表达以增强作物对重金属的抗性,减少作物对重金属的吸收累积;另一方面重金属低累积品种筛选工作应拓展更多作物类别,除了目前研究较多的水稻、小麦、蔬菜等作物类别外,还应该增加经济作物,如烟草、中草药、棉麻等作物低累积品种的筛选工作,并开展筛选出的低累积品种在不同地域的适应性和推广性验证研究。

2) 针对钝化剂田间实际应用难的问题,需要结合不同区域的土壤类型及其基本理化性质、耕作制度和污染特征,加强不同类型钝化剂应用稳定性、安全性和经济性的综合评价工作,以明确与适用于具体地区的钝化剂种类、施用时间及施用量,建立钝化剂产品的建议使用名录,提高钝化剂的实际应用效果和推广性。

3) 针对现有单一安全利用技术实际应用及推广难度大等问题,需要加强现有技术的系统化集成研发,对还处于研究阶段的技术措施着重工程化应用研究,同时需要加强安全利用组合式工程技术与设备的研发力度,推动重金属污染农田土壤修复治理技术的产业化与工程化。

参考文献:

- [1] Zhang Y, Wang X, Ji X H, et al. Effect of a novel Ca-Si composite mineral on Cd bioavailability, transport and accumulation in paddy soil-rice system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 233: 802–811.
- [2] Dermont G, Bergeron M, Mercier G, et al. Soil washing for metal removal: A review of physical/chemical technologies and field applications[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 152(1): 1–31.
- [3] 中华人民共和国环境保护部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17). http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404t20140417_270670.htm.
- [4] 王成尘, 田稳, 向萍, 等. 土壤-水稻/小麦重金属吸收机制与安全调控[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(2): 794–807.
- [5] 董欣欣, 孙保亚, 杨双, 等. 镉低积累玉米水稻品种的筛选[J]. *农业与技术*, 2021, 41(8): 839–842.

- [6] 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.
- [7] 王丽, 和淑娟. 镉污染农用地安全利用技术与运用[J]. 环境与可持续发展, 2019, 44(5): 134–137.
- [8] 嵇东, 孙红. 农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J]. 农业开发与装备, 2018(12): 74–75.
- [9] 李娜, 贺红周, 冯爱焯, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. 环境科学, 2019, 40(10): 4637–4646.
- [10] 杨树深, 孙衍芹, 郑鑫, 等. 重金属污染农田安全利用: 进展与展望[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1555–1572.
- [11] 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.
- [12] 国家环境保护局主持, 中国环境监测总站主编. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [13] Hu H, Jin Q, Kavan P. A study of heavy metal pollution in China: Current status, pollution-control policies and countermeasures[J]. Sustainability, 2014, 6(9): 5820–5838.
- [14] 中国环境监测总站. 中华人民共和国土壤环境背景值图集[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994.
- [15] 赵其国, 骆永明. 论我国土壤保护宏观战略[J]. 中国科学院院刊, 2015, 30(4): 452–458.
- [16] 王萍. 不同钝化剂对重金属污染土壤长期稳定化效果研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [17] 张喜亮, 闵宁, 程成, 等. 皖北某电厂周边土壤重金属污染现状及评价分析[J]. 河南科技, 2023, 42(2): 79–82.
- [18] 李明, 冉景, 安忠义, 等. 广西某铅锌矿区周边农田土壤重金属污染特征及潜在生态风险评价[J]. 环境工程, 2019, 37(4): 322–327.
- [19] Liu Y H, Gao T, Xia Y F, et al. Using Zn isotopes to trace Zn sources and migration pathways in paddy soils around mining area[J]. Environmental Pollution, 2020, 267: 115616.
- [20] 邓呈逊, 徐芳丽, 岳梅. 安徽某硫铁矿矿区农田土壤重金属污染特征[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(1): 337–344.
- [21] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan Mine, South China[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(5): 1551–1561.
- [22] 杨阳, 茹广欣, 朱秀红, 等. 义乌市某工业废渣堆积场土壤重金属污染状况研究[J]. 安徽农业大学学报, 2013, 40(6): 1049–1053.
- [23] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466–480.
- [24] Nookabkaew S, Rangkadilok N, Prachoom N, et al. Concentrations of trace elements in organic fertilizers and animal manures and feeds and cadmium contamination in herbal tea (*Gynostemma pentaphyllum* makino)[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(16): 3119–3126.
- [25] 逯雨, 李琴, 张越, 等. 磷化工厂及周边农田土壤重金属污染与来源解析[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(11): 1514–1518, 1525.
- [26] 郑宇娜, 刘鹏, 刘金河, 等. 台州市典型电子垃圾拆解场地周边农田土壤重金属污染特征和来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1442–1451.
- [27] 包凤琴, 段海龙, 武慧珍, 等. 包头市南郊农田土壤重金属污染特征研究及风险评价[J]. 西部资源, 2022(4): 171–178.
- [28] 李笑路, 戴余优, 郭先明, 等. 某工业园周边农田土壤重金属污染特征及潜在风险评价[J]. 中国矿业, 2022, 31(7): 73–81.
- [29] 刘洋, 刘明庆, 王磊, 等. 云南某废弃硅厂周边农田土壤重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(4): 785–793.
- [30] 程贤达, 孙建伟, 贾煦, 等. 豫西成矿带潭头盆地金矿区农田土壤重金属污染及来源解析[J]. 华东地质, 2022, 43(3): 313–323.
- [31] 孙晓寅, 孙永昌, 王婷婷, 等. 秦岭北麓矿区周边农田土壤重金属污染及风险评价[J]. 工业安全与环保, 2022, 48(8): 87–92.
- [32] 欧灵芝, 胡鸣明, 安德章, 等. 高砷煤矿周围旱作土壤重金属污染特征及农作物健康风险评价[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(1): 25–35.
- [33] 潘荣庆, 蓝涓琛, 李站峰, 等. 不同阻控剂对水稻镉和砷的阻控效应及水稻产量的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(7): 1690–1697.
- [34] 秦冉, 娄飞, 代良羽, 等. 地质高背景区镉污染稻田中低累积水稻品种筛选[J]. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2709–2716.
- [35] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 镉污染农田不同水稻品种镉积累差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1818–1826.
- [36] 柳赛花, 纪雄辉, 谢运河, 等. 基于GGE双标图和BLUP分析筛选镉砷同步低累积水稻品种[J]. 生态环境学报, 2021, 30(2): 405–411.
- [37] 刘兰英, 涂杰峰, 吕新, 等. 福建省不同水稻品种稻米镉积累及健康风险评价[J]. 福建农业科技, 2018(5): 1–6.
- [38] 冯爱焯, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988–1000.
- [39] 李贵松, 徐火忠, 吴林土, 等. 适于浙江省种植的镉低累积水稻品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(7): 1309–1311.
- [40] 涂峰. 苏南典型重金属污染农田稻麦轮作安全生产技术研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [41] 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价[J]. 麦类作物学报, 2017, 37(11): 1489–1496.
- [42] 王彦苏, 李士伟, 于学臻, 等. 小麦对土壤铬富集和转运的品种差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 19–27.
- [43] 陈建军, 于蔚, 祖艳群, 等. 玉米(*Zea mays*)对镉积累与转运的品种差异研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(10): 1671–1676.
- [44] 杨牧青, 和丽萍, 魏恒, 等. 云南某矿区周边重金属镉低累积、高产玉米品种筛选研究[J]. 农业灾害研究, 2023, 13(2): 7–9.

- [45] 李勇进, 匡政成, 陈浩东, 等. 长株潭地区低镉积累玉米品种的筛选[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 125–131.
- [46] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田 Cd、Pb 低积累玉米品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(6): 1076–1083.
- [47] 杜彩艳, 余小芬, 杜建磊, 等. 不同玉米品种对 Cd、Pb、As 积累与转运的差异研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(9): 1867–1875.
- [48] 林煜玲. 重金属污染农田种植结构调整作物品种的筛选[D]. 广州: 华南农业大学, 2019.
- [49] 柴冠群, 周礼兴, 王丽, 等. 镉砷污染耕地玉米重金属安全品种筛选[J]. 河南农业科学, 2022, 51(10): 74–85.
- [50] 赵丽芳, 黄鹏武, 宗玉统, 等. 适于镉铜复合污染农田安全利用的油菜品种筛选[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(9): 1614–1616.
- [51] 杨涛, 吕贵芬, 陈院华, 等. 江西省镉污染土壤中超积累油菜品种筛选[J]. 湖北农业科学, 2019, 58(5): 36–38.
- [52] 吴林土, 叶春福, 李贵松, 等. 适于浙江省种植的镉低积累油菜品种筛选试验[J]. 浙江农业科学, 2021, 62(4): 681–683.
- [53] 温国灿. 不同甘薯品种对土壤重金属镉转移富集规律研究[J]. 福建农业科技, 2020(7): 20–24.
- [54] 温国灿. 不同品种甘薯对土壤重金属铬富集能力的差异[J]. 农业科技与信息, 2021(4): 59–61.
- [55] 周虹, 张超凡, 张亚, 等. 不同甘薯品种中镉的积累与转运特性研究[J]. 中国农学通报, 2019, 35(3): 12–19.
- [56] 温国灿. 甘薯品种在不同土壤环境下的富集能力的比较[J]. 福建热作科技, 2021, 46(1): 20–22, 45.
- [57] 刘桂华, 胡岗, 秦松, 等. 贵州典型酸性黄壤中 3 种叶菜类蔬菜对 Cd 累积特性及低累积品种筛选[J]. 安全与环境学报, 2018, 18(1): 396–401.
- [58] 宋洁, 郭华春. 低 Pb、Cd 积累马铃薯品种筛选及其余矿物质营养元素的相关性研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 621–627.
- [59] 周妍, 朱焯, 李栎. 锌冶炼矿区周边重金属污染农田土壤低累积作物筛选[J]. 绿色科技, 2023, 25(4): 173–178, 193.
- [60] 王艳红, 李盟军, 唐明灯, 等. 水作和旱作对叶菜吸收镉的影响差异研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(4): 770–774.
- [61] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2837–2846.
- [62] 吕银斐. 不同水分管理方式对水稻镉积累的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [63] 刘晓宇, 梁琼, 高如泰, 等. 长期污灌条件下农田土壤重金属污染环境风险评价[J]. 生态与农村环境学报, 2015, 31(4): 572–578.
- [64] Hu P J, Huang J X, Ouyang Y N, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2013, 35(6): 767–778.
- [65] 徐仁扣. 酸化红壤的修复原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [66] Tang L, Luo W J, Tian S K, et al. Genotypic differences in cadmium and nitrate co-accumulation among the Chinese cabbage genotypes under field conditions[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 201: 92–100.
- [67] Guo G H, Lei M, Chen T B, et al. Evaluation of different amendments and foliar fertilizer for immobilization of heavy metals in contaminated soils[J]. Journal of Soils and Sediments, 2018, 18(1): 239–247.
- [68] Liu J G, Cai H, Mei C C, et al. Effects of nano-silicon and common silicon on lead uptake and translocation in two rice cultivars[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2015, 9(5): 905–911.
- [69] Yang Y, Wang M E, Chen W P, et al. Cadmium accumulation risk in vegetables and rice in southern China: Insights from solid-solution partitioning and plant uptake factor[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(27): 5463–5469.
- [70] Qian H F, Sun Z Q, Sun L W, et al. Phosphorus availability changes chromium toxicity in the freshwater alga *Chlorella vulgaris*[J]. Chemosphere, 2013, 93(6): 885–891.
- [71] 闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 等. 玉米与龙葵间作模式对植物生长及 Cd 富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2162–2171.
- [72] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 700–707.
- [73] 秦丽, 湛方栋, 祖艳群, 等. 土荆芥和蚕豆/玉米间作系统中 Pb、Cd、Zn 的累积特征研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2017, 32(1): 153–160.
- [74] 颜越, 金荷仙, 王瑛, 等. 间作模式对社区花园可食植物生理特性及铅吸收的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, 40(2): 338–347.
- [75] Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(2): 134–140.
- [76] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 轮间作对伴矿景天和苋菜生物量及 Cd 含量的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(13): 35–37.
- [77] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻锌镉吸收的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(11): 2952–2958.
- [78] 陈奕暄. 不同水-旱轮作模式对镉污染土壤修复作用的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- [79] 王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 等. 丝瓜与伴矿景天间作对土壤 Cd 形态及丝瓜 Cd 吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(12): 2292–2298.
- [80] 李明, 陈宏坪, 王子莹, 等. 石灰钝化法原位修复酸性镉污染菜地土壤[J]. 环境工程学报, 2018, 12(10): 2864–2873.
- [81] Zeng G M, Wan J, Huang D L, et al. Precipitation, adsorption and rhizosphere effect: The mechanisms for phosphate-induced Pb immobilization in soils—a review[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 339: 354–367.

- [82] Sun Y B, Li Y, Xu Y M, et al. *In situ* stabilization remediation of cadmium (Cd) and lead (Pb) co-contaminated paddy soil using bentonite[J]. Applied Clay Science, 2015, 105/106: 200–206.
- [83] 徐奕, 赵丹, 徐应明, 等. 膨润土对轻度镉污染土壤钝化修复效应研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(1): 38–46.
- [84] Oprčkal P, Mladenovič A, Zupančič N, et al. Remediation of contaminated soil by red mud and paper ash[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 256: 120440.
- [85] 史力争, 陈惠康, 吴川, 等. 赤泥及其复合钝化剂对土壤铅、镉和砷的稳定效应[J]. 中国科学院大学学报, 2018, 35(5): 617–626.
- [86] Mori M, Kotaki K, Gunji F, et al. Suppression of cadmium uptake in rice using fermented bark as a soil amendment[J]. Chemosphere, 2016, 148: 487–494.
- [87] Yao Y, Sun Q, Wang C, et al. Evaluation of organic amendment on the effect of cadmium bioavailability in contaminated soils using the DGT technique and traditional methods[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(9): 7959–7968.
- [88] Yang Z B, Liu L X, Lv Y F, et al. Metal availability, soil nutrient, and enzyme activity in response to application of organic amendments in Cd-contaminated soil[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(3): 2425–2435.
- [89] Puga A P, Abreu C A, Melo L C A, et al. Biochar application to a contaminated soil reduces the availability and plant uptake of zinc, lead and cadmium[J]. Journal of Environmental Management, 2015, 159: 86–93.
- [90] Yasmin Khan K, Ali B, Cui X Q, et al. Impact of different feedstocks derived biochar amendment with cadmium low uptake affinity cultivar of pak choi (*Brassica Rapa ssp. chinensis* L.) on phytoavoidance of Cd to reduce potential dietary toxicity[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 141: 129–138.
- [91] 王帝伟, 刘祎丹, 易春辉, 等. 改性纳米二氧化硅对 Cd 污染农田土壤的钝化修复[J]. 环境化学, 2019, 38(5): 1106–1112.
- [92] 曹梦华, 祝玺, 刘黄诚, 等. 无机稳定剂对重金属污染土壤的化学稳定修复研究[J]. 环境科学, 2013, 34(9): 3722–3726.
- [93] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(10): 1867–1872.
- [94] 谢运河, 纪雄辉, 黄涓, 等. 赤泥、石灰对 Cd 污染稻田改制玉米吸收积累 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2104–2110.
- [95] 赵莎莎, 肖广全, 陈玉成, 等. 不同施用量石灰和生物炭对稻田镉污染钝化的延续效应[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 334–340.
- [96] 常会庆, 徐富锦, 潘亚杰. 碳酸钙及其与壳聚糖联用对石灰性土壤铬污染的钝化效应[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(9): 1665–1671.
- [97] 胡红青, 黄益宗, 黄巧云, 等. 农田土壤重金属污染化学钝化修复研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(6): 1676–1685.
- [98] 李如艳, 崔红标, 刘笑生, 等. 模拟酸雨对磷酸二氢钾钝化污染土壤 Cu、Cd、Pb 和 P 释放的影响[J]. 环境工程学报, 2018, 12(1): 227–234.
- [99] 方雅莉, 朱宗强, 赵宁宁, 等. 桉树遗态磷灰石材料对铅污染土壤的钝化修复效应[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1498–1504.
- [100] 丁苏苏, 李凯华, 黄珏瑛, 等. 含磷材料修复铅、镉污染农田土壤效果及影响因素研究进展[J]. 环境污染与防治, 2020, 42(7): 929–936.
- [101] 安艳, 朱霞萍, 孟兴锐, 等. 巯基膨润土钝化修复镉污染水稻土的研究[J]. 土壤通报, 2021, 52(4): 934–939.
- [102] Yu K, Xu J, Jiang X H, et al. Stabilization of heavy metals in soil using two organo-bentonites[J]. Chemosphere, 2017, 184: 884–891.
- [103] 任琚, 王艺蓉, 任汉儒, 等. 聚合氯化铝铁改性凹凸棒石对 Cd 污染土壤的钝化修复效应[J]. 环境工程, 2022, 40(7): 123–131.
- [104] Abad-Valle P, Álvarez-Ayuso E, Murciego A, et al. Assessment of the use of sepiolite amendment to restore heavy metal polluted mine soil[J]. Geoderma, 2016, 280: 57–66.
- [105] 裴楠, 梁学峰, 秦旭, 等. 海泡石对镉污染稻田钝化修复效果的稳定性[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(2): 277–284.
- [106] 杨刚, 李辉, 龙涛, 等. 钢渣基固化药剂对重金属土壤修复机理的研究[J]. 非金属矿, 2016, 39(3): 26–29.
- [107] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 692–697.
- [108] 林志灵, 曾希柏, 张杨珠, 等. 人工合成铁、铝矿物和镁铝双金属氧化物对土壤砷的钝化效应[J]. 环境科学学报, 2013, 33(7): 1953–1959.
- [109] Shahid M, Sabir M, Arif Ali M, et al. Effect of organic amendments on phytoavailability of nickel and growth of berseem (*Trifolium alexandrinum*) under nickel contaminated soil conditions[J]. Chemical Speciation & Bioavailability, 2014, 26(1): 37–42.
- [110] Li P, Wang X X, Zhang T L, et al. Effects of several amendments on rice growth and uptake of copper and cadmium from a contaminated soil[J]. Journal of Environmental Sciences (China), 2008, 20(4): 449–455.
- [111] 刘秀春, 高艳敏, 范业宏, 等. 生物有机肥对重金属的吸附解吸作用的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(4): 942–945.
- [112] 吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 等. 不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究[J]. 环境科学, 2015, 36(1): 309–313.
- [113] 丁琼, 杨俊兴, 华璐, 等. 不同钝化剂配施硫酸锌对石灰性土壤中镉生物有效性的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(2): 312–317.
- [114] 贾乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10): 1992–1998.

- [115] 刘晶晶, 杨兴, 陆扣萍, 等. 生物质炭对土壤重金属形态转化及其有效性的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11): 3679–3687.
- [116] 郑依虹. 水稻秸秆生物炭对土壤理化性质及土壤镉形态的影响[J]. 河南农业, 2022(8): 12–13.
- [117] 王月梅, 王作鹏, 李承骏, 等. 锰改性猪粪炭对水稻吸收累积土壤中汞镉的影响[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1225–1232.
- [118] 牛晓丛, 何益, 金晓丹, 等. 酵素渣和秸秆生物炭钝化修复重金属污染土壤[J]. 环境工程, 2018, 36(10): 118–123.
- [119] Xu Y H, Zhao D Y. Reductive immobilization of chromate in water and soil using stabilized iron nanoparticles[J]. Water Research, 2007, 41(10): 2101–2108.
- [120] 邢金峰, 仓龙, 葛礼强, 等. 纳米羟基磷灰石钝化修复重金属污染土壤的稳定性研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(7): 1271–1277.
- [121] Arabyarmohammadi H, Darban A K, Abdollahy M, et al. Utilization of a novel chitosan/clay/biochar nanobiocomposite for immobilization of heavy metals in acid soil environment[J]. Journal of Polymers and the Environment, 2018, 26(5): 2107–2119.
- [122] 杨志敏, 郑绍健, 胡霁堂. 不同磷水平下植物体内镉的积累、化学形态及生理特性[J]. 应用与环境生物学报, 2000, 6(2): 121–126.
- [123] 李桃, 李军, 韩颖, 等. 磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1712–1718.
- [124] 赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(7): 1387–1401.
- [125] 李磊明, 张旭, 李劲, 等. 矿区农田施用木炭和硫酸亚铁对水稻吸收累积镉砷的影响[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(4): 161–167.
- [126] 黄崇玲, 雷静, 顾明华, 等. 土施和喷施硅肥对镉污染农田水稻不同部位镉含量及富集的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1532–1535.
- [127] Hu Y, Norton G J, Duan G L, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. Plant and Soil, 2014, 384(1): 131–140.
- [128] 赵胡, 李裕红, 陈杰. 镉对镉胁迫下大蒜幼苗生长及镉积累的影响[J]. 植物研究, 2008, 28(4): 447–451.
- [129] 徐秋曼, 陈宏, 程景胜. 稀土元素铈减轻铅对玉米毒害的机理初探[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2008, 30(3): 70–74.
- [130] 王春涛. 稀土钆减轻镉对水生植物胁迫的研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2005.
- [131] Vameralli T, Bandiera M, Lucchini P, et al. Long-term phytomanagement of metal-contaminated land with field crops: Integrated remediation and biofortification[J]. European Journal of Agronomy, 2014, 53: 56–66.
- [132] Rizwan M, Ali S, Zaheer Akbar M, et al. Foliar application of aspartic acid lowers cadmium uptake and Cd-induced oxidative stress in rice under Cd stress[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(27): 21938–21947.
- [133] Rizwan M, Ali S, Hussain A, et al. Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment[J]. Chemosphere, 2017, 187: 35–42.
- [134] 范才银, 陈世宝, 单雪华, 等. 降镉技术对烤烟品质和烟叶镉吸收的影响[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(21): 34–38.
- [135] 孙硕, 赵会薇, 石学萍, 等. 组合叶面喷剂对设施果蔬重金属累积的影响[J]. 北方园艺, 2020(9): 61–66.