DOI：10.11766/trxb202309030353
徐建明，何丽芝，唐先进，刘杏梅. 中国重金属污染耕地土壤安全利用存在问题与建议[J]. 土壤学报，2023，60（5）：1289–1296.
XU Jianming，HE Lizhi，TANG Xianjin，LIU Xingmei. Problems and Suggestions on Safe Utilization of Heavy Metal（loid）-contaminated Farmlands in China[J]. Acta Pedologica Sinica，2023，60（5）：1289–1296.

中国重金属污染耕地土壤安全利用存在问题与建议*

徐建明[1]，何丽芝[2]，唐先进[1]，刘杏梅[1]
（1. 浙江大学环境与资源学院，杭州 310058；2. 浙江农林大学环境与资源学院，碳中和学院，杭州 311300）

摘　要：中国耕地土壤重金属污染情况不容乐观，如何安全利用重金属污染耕地仍是当今亟需解决的农业和环保问题。本文综合分析了近几年不同污染程度耕地土壤的安全利用措施，提出重金属低积累作物种植、重金属钝化技术、农艺调控及种植结构调整为当前污染耕地土壤安全利用的主要手段，并指出污染源防控力度不足、土壤污染与作物安全性关系不明、原位钝化技术风险及低积累作物利用效果的局限性仍然是中国污染耕地土壤安全、高效利用面临的主要问题，建议进一步完善污染土壤评价标准、健全污染土壤防控体系、优化污染土壤安全利用技术，以推动重金属污染耕地土壤的安全、高效和可持续利用。
关键词：污染耕地；重金属；安全利用；解决措施
中图分类号：X53　　**文献标志码：**A

Problems and Suggestions on Safe Utilization of Heavy Metal(loid)-contaminated Farmlands in China

XU Jianming[1], HE Lizhi[2], TANG Xianjin[1], LIU Xingmei[1]
(1 *College of Environmental and Resource Sciences*, *Zhejiang University*, *Hangzhou* 310058, *China*; 2. *College of Environment and Resources*, *College of Carbon Neutrality*, *Zhejiang A & F University*, *Hangzhou* 311300, *China*)

Abstract: Heavy metal(loid)s-contaminated farmlands exist commonly in China, which is an urgent agricultural and environmental problem to be solved. According to heavy metal levels, application of low accumulation crops and soil amendments, as well as the utilization of agricultural managements are the current safe utilization technologies of contaminated farmlands. It was pointed out that the insufficient attention of farmland pollution sources, unclear relationship between soil pollution and crop safety, as well as the potential risk of soil amendments application and restriction of heavy metal(loid)s-low accumulation crops, were the main issues during the process of safe utilization of contaminated farmland. The improvements of evaluation standard, prevention system and safe utilization technologies of contaminated soils are suggested to guarantee the safety of crops production.
Key words: Contaminated farmlands; Heavy metal(loid)s; Safe utilization; Solving strategies

---

* 国家自然科学基金项目（41991334，41721001）、浙江省科技项目（2022C02046）和现代农业产业技术体系岗位项目（CARS-01）资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China（Nos. 41991334 and 41721001），the Science and Technology Program of Zhejiang Province，China（No. 2022C02046），and the Modern Agricultural Industry Technology System of China（No. CARS-01）
作者简介：徐建明（1965—），男，浙江桐乡人，博士，教授，主要从事土壤质量与过程、土壤污染控制与修复等方面的研究。 E-mail：jmxu@zju.edu.cn
收稿日期：2023–09–03；收到修改稿日期：2023–09–28；网络首发日期（www.cnki.net）：2023–10–10

2014 年《全国土壤污染状况调查公报》显示，中国土壤环境污染状况不容乐观，其中重金属为首的无机污染物超标点位数占全部超标点位的 82.8%。重金属污染影响土壤的正常功能，并通过食物链富集对生态环境和人类健康产生威胁。因此，重金属污染耕地土壤的安全利用是保障粮食安全生产和人类健康膳食的重要基础。曾希柏等[1]在 2013 年首次提出耕地土壤安全利用的概念，指出可利用一些物理化学技术或生物手段使土壤中重金属含量或有效性大幅度降低，阻止土壤重金属进入植物体内，切断重金属向农产品及人体转移的主要途径。2018 年生态环境部颁布《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618- 2018），以保障食用农产品质量安全为主要目标，兼顾保护农作物生长和土壤生态需求。对于土壤重金属含量介于风险筛选值和风险管控值之间，属于安全利用类土壤（即轻中度污染土壤），可通过安全利用手段来保障农产品的安全。对于土壤重金属含量高于风险管控值的重度污染耕地土壤需采取管控措施，加强农产品质量监测，安全处置超标农产品。本文重点分析了重金属低积累农作物品种筛选、重金属原位钝化和农艺调控等当前我国重金属污染耕地土壤安全利用中最为常见的几类技术及其在应用过程中暴露的问题，并针对性地提出了改进建议，以期为污染耕地土壤的安全利用提供有益参考。

1 污染耕地土壤的安全利用手段

污染土壤修复的目的是去除土壤中的污染物，或降低污染物的活性，使之不对人体健康或生态安全构成危害。因而修复技术的选择须从土壤污染的类型、程度与面积、修复技术周期、成本以及耕地种植作物类型与品种等多方面考虑，并结合当地的区域地形、气候特点等一系列因素，经过科学论证，因地制宜选择合理的修复技术。经过几十年的探索，我国已形成“源头防控为前提、阻控治理为支撑、执法管理为保障”的系统化农业面源和重金属污染治理模式，初步取得一些成效。在保障农作物安全、稳定生产的前提下，从土壤中直接去除重金属的安全利用手段与技术种类少、难度高、技术不成熟，在大面积推广应用中存在较大阻力。而种植重金属低积累作物、采取有效的农艺调控措施（轮间套作、水肥管理等）、添加重金属钝化剂（生物质炭、石灰、凹凸棒土等）和喷洒叶面阻控剂等手段，是当前降低土壤中重金属有效性、遏制重金属向农作物迁移和保障农产品安全的主要手段[2]。

1.1 基础环节：种植重金属低积累作物

重金属低积累作物站在超积累植物的对立面，通常将重金属拦阻在体外或积累在非可食部分，从而降低可食部分的重金属含量。种植重金属低积累作物是抑制重金属在食物链中流通和保障人体健康的一种有效措施，具有成本低、易推广的优势。《农业绿色发展技术导则（2018—2030 年）》中提出“重金属低积累作物品种筛选、粮食作物重金属低积累种质资源关键基因挖掘利用与品种培育”是重金属污染控制与治理技术的重点研发方向。目前筛选出的低积累作物主要包括禾谷类、蔬菜类和经济作物类。不同作物对重金属离子吸收、转运的机制不同，品种间重金属含量和分布表现出巨大差异。如小麦对镉（Cd）/镍（Ni）的积累均高于青菜、水稻及黄瓜类[3-4]。而同一作物不同品种对重金属的低积累特征也具有差异，如部分芸豆对 Cd 的富集性较低，而有些则对砷（As）、铅（Pb）、铬（Cr）、锌（Zn）、镍（Ni）或铜（Cu）的累积量更低[5]。目前作物对重金属积累的种间差异已有较多研究，并得出了影响作物种内差异的因素为重金属积累基因，如水稻的 *OsHMA2* 基因、小麦的 *TaHMA2* 和 *TaLCT1* 基因[6]、白菜的重金属 ATP 酶[7]、马铃薯的 *StABC4* 和 *StWRKY29* 基因[8]等。因此，针对性地选择重金属低积累作物，是重金属污染耕地安全利用的基础环节。

1.2 关键环节：重金属原位钝化技术

在重金属污染土壤中施加一些钝化材料，如沸石、赤泥、海泡石、石灰、含磷材料等无机钝化剂，或畜禽粪便、堆肥、污泥、农业废弃物等有机钝化剂，可通过吸附、沉淀、络合和氧化还原等机理，促使可交换态重金属转化为有机结合态和残渣态，从而降低其在土壤中的有效浓度、迁移性和生物有效性。需要注意的是，影响不同类型土壤中重金属活性的因素不同，如酸性土壤受 pH 影响较大，而碱性土壤则受电导率、碳酸钙和有机质含量影响较大[9]，因此在安全利用过程中钝化剂的选择也具有较大差异，如修复碱性土壤时选择的钝化剂 pH 不

宜过高，需尽量选择中性和含有较多含氧官能团的材料[10]。钝化技术具有成本较低、操作简单、见效快且适合大面积推广等优点，在当前重金属污染土壤安全利用中也最为常见。钝化剂的目标已经从最初的钝化单一重金属逐渐发展到对复合污染土壤多种重金属的钝化。钝化剂的施用方式也从单独施用发展到多种钝化剂联合施用，或通过不同改性手段提高钝化剂的钝化效率后施用。如研发的钙基磁性生物质炭可同时降低土壤中 As 和 Cd 的有效态含量[11]，纳米零价铁改性沸石可降低青菜中 Cd、Pb 和 As 的积累[12]。由于钝化过程并未降低土壤中重金属总量，仅是通过各种作用暂时性地降低了重金属的有效态浓度。因此，应关注钝化剂对土壤重金属钝化作用的长期效果以及可能造成的环境风险，易降解有机钝化剂的环境风险、可行性、稳定性等更需进行长期的监测和评估。

1.3　配套环节：农艺调控措施

施肥和水分管理是农艺调控中影响土壤重金属生物有效性的最常用措施，可通过改变土壤理化性质（pH、氧化还原电位 Eh、阳离子交换量 CEC、有机质含量等）直接与重金属发生沉淀、络合或氧化还原作用，调节植物根际微生物群落结构等，降低土壤中重金属的生物有效性及重金属的转运效率，有效减少农作物对重金属的积累[13]。如施用硅肥、淹水处理或二者联合处理可显著降低水稻籽粒中的 Cd 含量，提高作物产量[14]，但影响程度与土壤类型有关，如对酸性土壤影响更明显，对碱性土壤影响较小[15]。而且施肥对水稻生长和重金属的积累影响效果也取决于水分管理，如磷肥的施加仅在淹水条件下可降低水稻对 As 的吸收，而硅肥施用仅在非淹水条件下才可降低水稻对 Cd 和 As 的吸收[16]。此外，施用含有硒（Se）、硅（Si）、硫（S）、Zn、铁（Fe）等元素的叶面肥，可通过竞争重金属转运蛋白、参与防止氧化应激、提高抗氧化能力等生理生化过程[17-18]，影响作物对重金属的吸收与分配，减轻重金属对作物的毒害作用，降低作物可食部位对重金属的积累[19]。

适当的轮作和间作是提高土壤肥力和农产品产量并增加植物对重金属耐受性的有效措施。如小麦-玉米、红小豆-马铃薯轮作系统可显著降低作物可食用部分的汞（Hg）含量[20]。此外，超积累植物与低积累作物间作，可通过降低农作物重金属的转运能力、提高光能利用效率、缓解重金属胁迫及改善土壤养分和微生物群落等方面调控两者的生长发育，增强超积累植物对重金属的吸收和富集，提高农作物的产量和品质，获得较高的经济效益[21]，如龙葵和低积累洋葱间作，可在龙葵修复污染土壤的同时不增加洋葱可食用部分 Cd 浓度并且不影响洋葱产量，是植物修复重金属污染土壤的一条实用途径[22]。

1.4　重度污染耕地的种植结构调整

开展重度污染耕地土壤治理是促进耕地质量提升、守牢耕地质量红线、落实“藏粮于地、藏粮于技”战略和保障国家粮食安全的重要举措。2016 年以来，各地区、各部门全面实施《土壤污染防治行动计划》，加强对严格管控类耕地的用途管理，依法划定特定农产品禁止生产区域，严禁种植食用农产品。种植非食用农作物（如能源植物）是重度污染耕地土壤安全经济利用的途径之一。如在湖南长沙、株洲、湘潭三市重度镉污染区耕地开展棉花替代种植技术应用，在实现污染区土壤修复的同时还可创造经济价值[23]。此外，在种植非食用农作物的同时，辅以适宜的耕地安全利用手段（如间作、轮作、施用调理剂等），对促进非食用农作物移除重金属可起到协同作用。如在 Cd/Pb 重度污染土壤上，选择油菜-向日葵轮作，可较单一作物轮作产生更高的生物量，提高了土壤中重金属的去除率，尤其对 Cd 的去除率不亚于超积累植物，这两种油料作物的油脂中污染物含量也在国家标准的安全范围内，可产生一定的经济效益[24]。在浙江省受铜冶炼厂污染的某耕地土壤区，种植甘蔗、甜高粱、盐肤木和香根草，同时施加钝化剂（石灰和磷矿粉），结果表明钝化剂可有效控制重金属对能源植物的危害，且不会影响植物品质（如含糖量）[25]。此外，通过化学淋洗与非食用农作物联合的手段也可实现对重度污染耕地的修复。总之，从时间和空间上对耕地进行有效配置，可使污染耕地得到安全、有效、完整的修复利用并产生一定的经济效益。

2　中国重金属污染耕地土壤安全利用过程存在的问题

2.1　耕地污染源的防控力度不足

目前我国对重金属污染防控高度重视，防控重点主要集中于行业防治（如采矿、冶金、电镀等行

业）中废水、废渣和废气的排放，但对于农业源头的防治尚未引起足够重视。我国是农业大国，也是秸秆资源最丰富的国家之一，目前我国主要将秸秆用作肥料还田、畜牧饲料、生活能源、工业原料以及秸秆基料等[26]。秸秆还田是提升地力的有效措施，但当秸秆来自于重金属污染区时，在还田过程中，秸秆含有的重金属又返回土壤，造成污染。如将含 Cd 秸秆归还土壤，90 d 后秸秆中 70%～80%的 Cd 均会释放至土壤中。在污染土壤中多年连续秸秆还田试验也显示土壤中重金属总量及作物对重金属的吸收均呈增加趋势[27]。由于重金属主要集中在作物根茬，污染土壤中作物根茬残留也会显著提高土壤重金属的总量和活性及作物对重金属的吸收[28]。此外，秸秆还田还会影响土壤中重金属的赋存形态，且与秸秆类型、还田时期、农艺管理手段、重金属污染类型和程度等因子有关，这导致秸秆还田后，土壤重金属生物有效性发生不同程度的改变[29-30]。此外，当污染秸秆用于畜牧饲料时，秸秆中的重金属会进入动物体内并富集，最终进入食物链危害人体健康。同时，动物排泄物中的重金属又会被作为有机肥施入耕地土壤，造成新一轮的重金属循环。而无机肥和农药作为提高作物产量的有效手段，其含有的重金属也不可忽视。如对 1 222 种磷肥的检测发现 Cd 的平均含量为 0.75 $mg \cdot kg^{-1}$，在土壤中长期施用也会导致重金属的积累[31]。因此，控制污染耕地的秸秆还田或还田时期，集中处理污染秸秆，减少肥料和农药施用量等，亦是减少重金属积累的有效途径。此外，一些地区的大气污染造成的干湿沉降对土壤重金属含量的影响也不容忽视[32-33]。

2.2 土壤污染与作物安全性关系不明

作物安全性主要受土壤中重金属的总量及赋存形态、土壤理化性质及作物类型影响。由于自然成土过程中的重金属在土壤中多以相对稳定的形态存在，导致有些土壤中的重金属总量超标，但生物有效性总体上较低 [34]，其生物富集因子明显低于人类活动带来的重金属，不易被植物吸收利用[35]。如广西壮族自治区和浙江省部分耕地土壤中重金属元素普遍超过土壤背景值，是典型的地质高背景土壤，但研究区水稻籽实中重金属元素（浙江研究区 Cd 除外）均未超标[36]。此外，作物对污染物的吸收具有差异性，如叶类菜、茎类菜、茄果类和鲜豆类对重金属 As 的富集能力依次降低[37]。基于动物试验的重金属生物有效性研究揭示了重金属对人类健康造成的风险也受到作物种类、重金属积累量、矿质元素含量和饮食方式的影响。对于重金属污染土壤的划定与管理，也需要辩证看待。如在重度 Cd 污染耕地，Cd 低积累玉米和大豆间作可保证玉米籽粒中 Cd 浓度在国家标准安全范围内，但是若全株作青贮或秸秆还田则存在重金属超标和二次污染的风险[38]。不能“一刀切”，要根据实际情况适当调整污染土壤的管理手段，这对保障我国粮食安全生产有着重要的指导意义。

2.3 多目标元素下作物的低积累特性及其稳定性较差

由于当前土壤的重金属污染具有复杂多样性，仅针对特定目标元素筛选出的低积累品种难以保证对其他重金属元素的低积累特性。如低积累 Pb 的小麦品种对 Cd 和 Zn 呈现高积累[39]。因此筛选可满足多目标元素的低积累品种更具实用意义。如能同时满足籽粒 Cd、As、Pb 和 Cr 低积累的大豆品种“理想 M-7”和低累积水稻品种（“隆两优 534”“Y 两优 1 号”“袁两优 908”和“渝香 203”）[40-41]，Cd/Pb 低积累玉米品种“先玉 335”和“大丰 30”[42]等。目前低积累作物的研究主要集中在重金属低积累农作物品种的筛选和培育，而作物对重金属的积累除作物类型及品种基因差异外，还受区域气候、土壤类型、土壤重金属污染特征、灌排水等地域环境因素及农艺管理措施的制约[43]，这可能会导致作物的重金属低积累特性不可重复，甚至出现矛盾，遗传稳定性差，难以大面积推广。如“秀水 63”的粳稻籽粒中 Cd 含量在浙江不同地区存在显著性差异[44]。

2.4 原位钝化剂具有一定的施用风险

原位钝化过程并未改变污染土壤中重金属的总量，仅是改变了其在土壤中的赋存形态，当土壤环境条件如 pH、Eh、可溶性有机质含量等变化时，或者发生冻融、干湿交替等环境胁迫，以及微生物对钝化剂的降解等均可能会导致重金属从土壤中缓慢释放并重新分配，再次导致土壤重金属污染[45-47]。此外，某些钝化剂仅可降低特定重金属的生物有效性，当被施入复合污染土壤时，可能会造成其他重金属元素的活化。如磷改性生物质炭加入 Cd/As/Cu 复合污染土壤中，虽然降低土壤 Cd/Cu 的生物有效性，但提高了 As 的生物有效性，增加了 As 的生态风险[48]。此外，某些钝化剂虽然降低了土壤中重金

属的生物有效性，但有可能产生新的生态风险，如温室气体释放增加、土壤中氮磷养分流失、施用过程中的粉尘造成空气污染等问题[49]。

就材料本身而言，有机钝化剂通常源于动物粪便与尸体、农林废弃物等，有可能将其包含的重金属、持久性有机污染物、潜在的人类病原体（肠道细菌、寄生虫、病毒等）和新兴污染物（抗生素抗性基因、内分泌干扰物、微塑料等）引入土壤，进而对生态环境和人体健康产生一定风险[50]。而某些无机钝化剂如石灰、磷矿石、粉煤灰、沸石等，可能会降低作物对养分的吸收，抑制作物生长[51]，还可能会造成地表水的富营养化[52]。因此，对进入市场的钝化剂进行监管，建立完善及科学的钝化剂施用方法，并对其安全性和安全利用效果进行长效性评估，有利于保证粮食安全生产和人体健康。

2.5　其他问题

我国幅员辽阔，不同地区污染状况及土壤性质的差异，导致污染情况复杂多变，现有的土壤治理措施无法满足所有地区的治理需求，缺乏可直接套用的专业指导体系。我国现有的土壤重金属污染治理技术多为单项技术，跨部门、行业（包括企业）的联动差，技术推广被局限在小范围内，难以大规模推广。此外，耕地污染通常面临着责任主体不清，农户配合积极性差的窘境，这与当前的治理过程中经费补贴标准过低、项目单一有关。重度污染耕地的调查也依旧存在采样点位不足、区域划分边界有待厘清、类别划分及动态调整不健全等问题。

3　中国重金属污染耕地土壤安全利用过程中的改进建议

3.1　完善污染土壤划定标准与管理手段

利用现有农用地土壤污染详查和土壤环境质量类别划分成果，开展土壤-农产品协同加密监测，采用重金属有效态浓度代替总量的模型对土壤中污染物的污染程度进行精准划分和风险评价，优化类别划分方法，全面厘清污染耕地的范围和程度，精准圈定污染风险重点管控区。此外，应制定更加严格、精准且明确的农用地重金属污染防治标准，可更好地对土壤污染现状和污染程度进行监督、检查和管理，更加科学合理地指导农用地安全利用，保障农产品质量安全。在此过程中，建议各地政府加大土壤污染防治投入力度，建立土壤污染防治基金，健全土壤污染防治资金投入长效机制，为打好土壤污染防治攻坚战提供强有力的支撑和保障。

3.2　健全污染土壤防控体系

为从源头上遏制土壤污染，除对重点企业行业进行严格监管外，相关部门还须结合实际情况，对重金属污染耕地中的秸秆还田或作为畜牧饲料实行监控和管理，如将污染区的秸秆单独收集和处置，严禁其再次进入耕地或作为饲料进入食物链。对于低重金属浓度的污染秸秆也可通过加入土壤钝化剂缓解污染土壤中秸秆还田造成的作物重金属超标的风险[27]。此外，需对农业生产过程中的农药和化肥的类型、质量及使用量进行明确规定，并制定针对性的法律法规，减少农业生产过程中重金属在土壤中的积累，进一步协调土、水、气、固废等不同的污染防控主体，形成立体化的防控体系。

3.3　优化污染土壤安全利用技术

第一，加强不同安全利用技术的研发力度：寻找稳定性高的重金属低积累品种，建立低积累品种种质资源库；筛选或通过改性制备高效价廉并具有持久效果的土壤钝化剂；研发稳定高效的叶面阻控剂和微生物制剂等；针对重度污染土壤，寻找和培育更多对重金属耐性较强的经济作物。第二，优化土壤安全利用技术：对轻中度污染土壤，协同两种或两种以上安全利用方法，形成联合安全利用技术体系模式，提高污染土壤的安全利用效率。如对 Cd 和 As 复合污染土壤展开联合修复，结合当地的耕种特点和土壤污染状况，通过筛选低积累水稻品种，施加石灰、生物质炭等钝化剂，并适时喷洒叶面阻控剂，高效实现污染耕地的安全生产；针对重度污染耕地进行种植结构调整，选择适宜的种植模式，种植经过安全评估的特定食用农产品，并结合其他高效修复技术，实现重度污染耕地的风险管控。当受污染耕地修复达标后，需及时进行类别调整，使耕地得到充分有效的利用。

4　结　论

本文介绍了重金属污染耕地安全利用的常见手段，并对安全利用过程中存在的问题及建议进行了梳理，其中秸秆还田作为土壤中重金属农业源输入的影响不容忽视，在评估和界定土壤的污染程度时

需结合作物和土壤中的重金属浓度综合评价，大力发展重金属复合污染土壤的安全利用手段，筛选低施用风险的钝化剂。最后需在政策及资金支持的前提下，结合农户意愿，对污染土壤进行全链条式设计，如考虑钝化剂施用量与施用频率、效果稳定性、成本、生态风险、对土壤肥力的影响等，研发形成较低廉、高效率、强稳定、全适应、易操作、可持续的污染耕地土壤安全利用技术体系及模式，确保重金属污染耕地土壤的安全利用。

参考文献（References）

[1] Zeng X B，Xu J M，Huang Q Y，et al. Some deliberations on the issues of heavy metals in farmlands of China[J]. Acta Pedologica Sinica，2013，50（1）：186—194. [曾希柏，徐建明，黄巧云，等. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报，2013，50（1）：186—194.]

[2] Xu J M，Meng J，Liu X M，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. [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.]

[3] Bai Y J，Chen X H，Shen G X，et al. Accumulation characteristics of Ni in different crops and screening of low-Ni accumulation crops[J]. Ecology and Environmental Sciences，2019，28（10）：2098—2104. [白玉杰，陈小华，沈根祥，等. 不同作物对土壤中 Ni 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 生态环境学报，2019，28（10）：2098—2104.]

[4] Chen X H，Shen G X，Bai Y J，et al. Accumulation of Cd in different crops and screening of low-Cd accumulation cultivars[J].Environmental Science，2019，40（10）：4647—4653. [陈小华，沈根祥，白玉杰，等. 不同作物对土壤中 Cd 的富集特征及低累积品种筛选[J]. 环境科学，2019，40（10）：4647—4653.]

[5] Qin R，Gong S T，Lou F，et al. Screening of kidney bean varieties with low heavy metal-accumulation ability based on multi-objective heavy metal elements[J]. Journal of Agro-Environment Science，2021，40（12）：2704—2714.[秦冉，龚思同，娄飞，等. 基于多目标重金属元素筛选低累积芸豆品种[J]. 农业环境科学学报，2021，40（12）：2704—2714.]

[6] Zhu L N. Screening of winter wheat cultivars with low cadmium accumulation and differences in cadmium accumulation mechanism[D]. Zhengzhou：Henan Agricultural University，2021. [朱利楠. 冬小麦镉低积累品种筛选及镉积累机制差异[D]. 郑州：河南农业大学，2021.]

[7] Zhang S J. Effects of cadmium stress on physiological and biochemical characteristics and expression of key genes in Chinese cabbage with high and low Cd accumulation[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2021. [张思佳. Cd 胁迫对高、低镉积累白菜生理生化特性及关键基因表达的影响[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2021.]

[8] He G D. Cadmium tolerance gene mining and molecular mechanism of *Solanum tuberosum* varieties with low cadmium accumulation[D]. Guiyang：Guizhou University，2021.[何冠谛. 低积累 Cd 型马铃薯相关基因挖掘及耐镉分子机制研究[D]. 贵阳：贵州大学，2021.]

[9] Wu Y，Wang S，Ning X，et al. A promising amendment for the immobilization of heavy metal（loid）s in agricultural soil，northwest China[J]. Journal of Soils and Sediments，2021，21：2273—2286.

[10] Zhang G，Guo X，Zhao Z，et al. Effects of biochars on the availability of heavy metals to ryegrass in an alkaline contaminated soil[J]. Environmental Pollution，2016，218：513—522.

[11] Wu J Z，Li Z T，Huang D，et al. A novel calcium-based magnetic biochar is effective in stabilization of arsenic and cadmium co-contamination in aerobic soils[J]. Journal of Hazardous Materials，2020，387：122010.

[12] Li Z T. Simultaneous immobilization of cadmium，lead，and arsenic in soils by zeolite-supported nanoscale zero-valent iron and the associated mechanisms[D]. Hangzhou：Zhejiang University，2020. [李章涛. 纳米零价铁改性沸石对土壤镉铅砷复合污染的钝化效果及相关机制研究[D]. 杭州：浙江大学，2020.]

[13] Liu Y Y. Effects and mechanism of water management and organic manure coupling on remediation of cadmium contaminated soil by sepiolite[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2019. [刘艺芸. 水肥耦合对海泡石钝化修复镉污染土壤的影响行为与机制[D]. 北京：中国农业科学院，2019.]

[14] Luo W X，Ma J W，Aman Khan M，et al. Cadmium accumulation in rice and its bioavailability in paddy soil with application of silicon fertilizer under different water management regimes[J]. Soil Use and Management，2021，37（2）：299—306.

[15] Wan Y，Huang Q，Camara A Y，et al. Water management impacts on the solubility of Cd，Pb，As，and Cr and their uptake by rice in two contaminated paddy soils[J]. Chemosphere，2019，228：360—369.

[16] Suriyagoda L，Dittert K. Phosphorus and silicon fertilization with improved water management as potential remedies for growing rice seedlings in heavy metal and metalloid contaminated soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis，2023，54（19）：2699—2715.

[17] Nasirzadeh L，Kvarnheden A，Sorkhilaleloo B，et al. Foliar-applied selenium nanoparticles can alleviate soil-cadmium stress through physio-chemical and stomatal changes to optimize yield，antioxidant capacity，and

fatty acid profile of wheat（*Triticum aestivum* L.）[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2022，22（2）：2469—2480.

[18] Aram S，Weisany W，Daliri M S，et al. Phenology，physiology，and fatty acid profile of canola（*Brassica napus* L.）under agronomic management practices（direct seeding and transplanting）and zinc foliar application[J]. Journal of Soil Science and Plant Nutrition，2021，21（2）：1735—1744.

[19] Long S L. Study on screening rice cultivar with low Cd/Pb accumulation in yellow soil integration with other remediation technology[D]. Guiyang：Guizhou Normal University，2023. [龙胜楼. 镉铅超标黄壤低积累水稻品种筛选及联合调控措施研究[D]. 贵阳：贵州师范大学，2023.]

[20] Jiang L，Yi X，Xu B，et al. Soil treatment and crop rotation for in situ remediation of heavy metal- contaminated agricultural soil in gold mining areas[J]. Human and Ecological Risk Assessment，2019，25（1/2）：374—392.

[21] Guo S Y. Effects of different intercropping distance on remediation of farmland soil polluted by cadmium and arsenic by *Pteris vittata* and *Solanum nigrum* intercropped with maize[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2021. [郭思宇. 蜈蚣草、龙葵与玉米不同间作距离对镉砷复合污染农田土壤修复的影响[D]. 昆明：昆明理工大学，2021.]

[22] Wang S Q，Wei S H，Ji D D，et al. Co-planting Cd contaminated field using hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. through interplant with low accumulation Welsh onion[J]. International Journal of Phytoremediation，2015，17（9）：879—884.

[23] Guo L S，He S J，Li J L. Research progress on planting technology of cotton as a substitute crop in polluted area by Cd[J]. China Cotton，2016，43（11）：5—8，4. [郭利双，何叔军，李景龙，镉污染区棉花替代种植技术研究[J]. 中国棉花，2016，43（11）：5—8，4.]

[24] Yang Y，Zhou X H，Tie B Q，et al. Comparison of three types of oil crop rotation systems for effective use and remediation of heavy metal contaminated agricultural soil[J]. Chemosphere，2017，188：148—156.

[25] Yu H B，Song J，Luo Y M，et al. Field demonstration of energy plants production on heavy metal contaminated farmland[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring，2011，23（3）：71—76. [余海波，宋静，骆永明，等. 典型重金属污染农田能源植物示范种植研究[J]. 环境监测管理与技术，2011，23（3）：71—76.]

[26] Chen Y H，Tian F Y，Yan Y F，et al.Current status，existing problems and development suggestions for comprehensive utilization of crop straw[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2018，39（2）：67—73. [陈玉华，田富洋，闫银发，等. 农作物秸秆综合利用的现状、存在问题及发展建议[J]. 中国农机化学报，2018，39（2）：67—73.]

[27] Zheng S A，Liu D L，Zhang M K，et al. Effects of long-term straw returning on heavy metals of soil and agricultural products in the polluted farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation，2020，34（2）：354—359. [郑顺安，刘代丽，章明奎，等. 长期秸秆还田对污染农田土壤与农产品重金属的影响[J]. 水土保持学报，2020，34（2）：354—359.]

[28] Miao W J. Effects of cadmium contaminated rice stubble on Cd-contaminated soil quality and Cd accumulation by rice and pakchoi[D]. Chengdu：Sichuan Agricultural University，2022. [缪文静. 水稻根茬还田对镉污染土壤质量及水稻、小白菜吸收镉的影响[D].成都：四川农业大学，2022.]

[29] Huang J Y. Impact mechanism of straws returning on cadmium speciation and bioavailability of soils in Tongling mining area[D]. Hefei：Hefei University of Technology，2014. [黄界颖. 秸秆还田对铜陵矿区土壤 Cd 形态及生物有效性的影响机理[D]. 合肥：合肥工业大学，2014.]

[30] Zhang Y，Wang J J，Xia B，et al. Effect of exogenous rice straw on water dispersible colloidal metals in polluted soil under redox change[J]. Acta Pedologica Sinica，2024，DOI：10.11766/trxb202204110168. [张雨，汪家家，夏冰，等. 外源秸秆对污染土壤氧化还原过程水分散性胶体态重金属的影响[J].土壤学报，2024，DOI：10.11766/trxb202204110168.]

[31] Li H，Yang Z L，Dai M W，et al. Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006-2016[J]. Science of the Total Environment，2020，698：134149.

[32] Mi Y Z，Liang J N，Zhou J，et al.Deposition area of typical smelter input and output balance of heavy metals（Cd，Cu，Pb）in arable soils in atmospheric deposition area of typical smelter[J]. Acta Pedologica Sinica，2024，DOI：10.11766/trxb202302180064. [米雅竹，梁家妮，周俊，等. 典型冶炼厂大气沉降区耕地耕层土壤重金属（Cd、Cu、Pb）输入输出平衡研究[J]. 土壤学报，2024，DOI：10.11766/trxb202302180064.]

[33] Yi S Y，Li X N，Chen X Y，et al. Source-route-receptor-based spatial zoning study on soil heavy metals pollution risk[J]. Acta Pedologica Sinica，2024，DOI：10.11766/trxb202303220112. [易诗懿，李笑诺，陈欣悦，等. 基于“源-径-汇”关系的土壤重金属污染风险空间区划研究[J]. 土壤学报，2024，DOI：10.11766/trxb202303220112.]

[34] Yang J，Qu P，Wang J S，et al. Review on analysis methods of bioavailability of heavy metals in soil and its influence factors[J]. Environmental Pollution and Control，2017，39(2)：217—223. [杨洁，瞿攀，王金生，等. 土壤中重金属的生物有效性分析方法及其影响因素综述

[J]. 环境污染与防治，2017，39（2）：217—223.]

[35] Liu W X，Shen L F，Liu J W，et al. Uptake of toxic heavy metals by rice（*Oryza sativa* L.）cultivated in the agricultural soil near Zhengzhou City，People's Republic of China[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology，2007，79（2）：209—213.

[36] Tang D D，Yuan X Y，Wang Y M，et al. Enrichment characteristics and risk prediction of heavy metals for rice grains growing in paddy soils with a high geological background[J]. Journal of Agro-Environment Science，2018，37（1）：18—26. [唐豆豆，袁旭音，汪宜敏，等. 地质高背景农田土壤中水稻对重金属的富集特征及风险预测[J]. 农业环境科学学报，2018，37（1）：18—26.]

[37] Xiao X Y，Chen T B，Liao X Y，et al. Comparison of concentrations and bioconcentration factors of arsenic in vegetables，grain and oil crops in China[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2009，29（2）：291—296. [肖细元，陈同斌，廖晓勇，等. 我国主要蔬菜和粮油作物的砷含量与砷富集能力比较[J]. 环境科学学报，2009，29（2）：291—296.]

[38] Zhang H M，Bao G L，Zhou X T，et al. Safety assessment of heavy metals in specific crops of strictly controlled farmland[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2022，38（3）：52—58. [张慧敏，鲍广灵，周晓天，等. 严格管控类耕地特定农作物重金属安全性评估[J].中国农学通报，2022，38（3）：52—58.]

[39] Chen Y R，Zhang Q F，Fu B S，et al. Differences of lead，cadmium and zinc accumulation among Chinese wheat mini-core collections germplasms and screening for low Pb，Cd and Zn accumulative cultivars in grains[J]. Journal of Nanjing Agricultural University，2017，40（3）：393—399. [陈亚茹，张巧凤，付必胜，等. 中国小麦微核心种质籽粒铅、镉、锌积累差异性分析及低积累品种筛选[J]. 南京农业大学学报，2017，40（3）：393—399.]

[40] Chai G Q，Wang L，Liu G H，et al. Screening of soybean varieties with low accumulation of heavy metals based on multi-object elements[J]. Journal of Southwest University（Natural Science Edition），2023，45（9）：2—11. [柴冠群，王丽，刘桂华，等. 基于多目标重金属元素低积累大豆品种筛选[J]. 西南大学学报（自然科学版），2023，45（9）：2—11.]

[41] Feng A X，He H Z，Li N，et al. Screening of rice varieties with low accumulation of heavy metals based on multiple target elements and their absorption and transport characteristics in rice plants[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment，2020，37（6）：988—1000. [冯爱煊，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.]

[42] Ren Y Z，Ren C，Xiao J H，et al. Cd and Pb accumulation characteristics of different maize varieties and comparative study of Xianyu 335 and Dafeng 30[J]. Jiangsu Agricultural Science，2022，50（24）：179—188. [任彧仲，任超，肖建辉，等. 不同玉米品种 Cd、Pb 积累特性及先玉 335 与大丰 30 对比研究[J]. 江苏农业科学，2022，50（24）：179—188.]

[43] Chai G Q，Zhou L X，Wang L，et al. The Cd absorption characteristics and edible safety evaluation of different varieties of potato tubers[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences，2023，52（3）：73—81. [柴冠群，周礼兴，王丽，等. 不同品种马铃薯块茎 Cd 吸收特征及食用安全性评价[J]. 河南农业科学，2023，52（3）：73—81.]

[44] Zeng F R，Ali S，Zhang H T，et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants[J]. Environmental Pollution，2011，159（1）：84—91.

[45] Huang M，Zhu Y，Li Z W，et al. Compost as a soil amendment to remediate heavy metal-contaminated agricultural soil：Mechanisms，efficacy，problems，and strategies[J]. Water，Air and Soil Pollution，2016，227（10）：359.

[46] Chang C Y，Cao H X，Tao L，et al. Advances on heavy metal stability and reactivation for soil after solidification/stabilization remediation[J]. SoilS，2021，53（4）：682—691. [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] Xing J F，Cang L，Ren J H. Remediation stability of in situ chemical immobilization of heavy metals contaminated soil：A review[J]. SoilS，2019，51（2）：224—234. [邢金峰，仓龙，任静华. 重金属污染农田土壤化学钝化修复的稳定性研究进展[J]. 土壤，2019，51（2）：224—234.]

[48] Zhang H，Shao J A，Zhang S H，et al. Effect of phosphorus-modified biochars on immobilization of Cu（II），Cd（II），and As（V）in paddy soil[J]. Journal of Hazardous Materials，2019，390：121349.

[49] He L Z，Zhong H，Liu G X，et al. Remediation of heavy metal contaminated soils by biochar：Mechanisms，potential risks and applications in China[J]. Environmental Pollution，2019，252：846—855.

[50] Urra J，Alkorta I，Garbisu C. Potential benefits and risks for soil health derived from the use of organic amendments in agriculture[J]. Agronomy-Basel，2019，9（9）：542.

[51] Tan W N，Li Z A，Qiu J，et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in South China[J]. Pedosphere，2011，21（2）：223—229.

[52] Chen M，Chen J，Du P. An inventory analysis of rural pollution loads in China[J]. Water Science and Technology，2006，54（11/12）：65—74.

（责任编辑：陈荣府）