

DOI: 10.11766/trxb202209110503

张力浩, 白姣杰, 田瑞云, 王国昌, 游来勇, 梁家妮, 慈凯东, 刘梦丽, 寇乐勇, 周伶俐, 周俊, 吴大付, 孙斌, 周静. 中国北方碱性农田土壤镉污染修复: 现状与挑战[J]. 土壤学报, 2024, 61(2): 348–360.

ZHANG Lihao, BAI Jiaojie, TIAN Ruiyun, WANG Guochang, YOU Laiyong, LIANG Jiani, CI Kaidong, LIU Mengli, KOU Leyong, ZHOU Lingli, ZHO U Jun, WU Dafu, SUN Bin, ZHOU Jing. Cadmium Remediation Strategies in Alkaline Arable Soils in Northern China: Current Status and Challenges[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(2): 348–360.

中国北方碱性农田土壤镉污染修复: 现状与挑战*

张力浩^{1, 2}, 白姣杰², 田瑞云¹, 王国昌², 游来勇¹, 梁家妮¹, 慈凯东¹, 刘梦丽¹, 寇乐勇¹, 周伶俐¹, 周俊¹, 吴大付², 孙斌³, 周静^{1†}

(1. 中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室(南京土壤研究所), 南京 210008; 2. 河南科技学院资源与环境学院/河南省生物药肥研发与协同应用工程研究中心, 河南新乡 453003; 3. 北京建工环境修复股份有限公司污染场地安全修复技术国家工程实验室, 北京 100015)

摘要: 中国土壤镉污染面积广、程度深, 但针对我国北方碱性农田土壤镉污染治理的理论研究及技术研发却较为薄弱。基于 VOSviewer 软件, 分析了近 20 年来国内外关于碱性土壤镉防控领域的研究方向、主推技术与国际研究格局。在此基础上, 系统梳理了碱性土壤中镉的转化过程及影响因素, 结合原位化学钝化技术、植物修复和农艺调控措施, 进一步总结了碱性土壤镉治理的科学与技术问题。我国碱性农田镉污染治理面临关注度不高、技术研发滞后以及转化困难、土壤-作物(小麦)镉吸收机制不清晰等诸多问题。因此, 亟需提高碱性农田土壤镉污染防治的重视程度, 研发、试点具有针对性的技术推广模式, 构建土壤-作物(小麦)镉精准防控体系, 以推动碱性土壤镉污染修复技术与理论的发展及粮食的安全生产。

关键词: 碱性农田土壤; 文献计量学; 镉; 修复策略; 小麦

中图分类号: S156 **文献标志码:** A

Cadmium Remediation Strategies in Alkaline Arable Soils in Northern China: Current Status and Challenges

ZHANG Lihao^{1, 2}, BAI Jiaojie², TIAN Ruiyun¹, WANG Guochang², YOU Laiyong¹, LIANG Jiani¹, CI Kaidong¹, LIU Mengli¹, KOU Leyong¹, ZHOU Lingli¹, ZHOU Jun¹, WU Dafu², SUN Bin³, ZHOU Jing^{1†}

(1. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Henan Institute of Science and Technology/Henan Engineering Research Center of Biological Pesticide & Fertilizer Development and Synergistic Application, Xinxiang, Henan 453003, China; 3. Beijing Construction Engineering Group Environmental Remediation Co., Ltd., National Engineering Laboratory for Site Remediation Technologies, Beijing 100015, China)

* 国家重点研发计划项目(2018YFD0800300)、江西省科技重大研发专项项目(20194ABC28010)和河南省重点研发与推广专项(232102320094)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China(No. 2018YFD0800300), the Major R & D Projects of Jiangxi Province, China(No. 20194ABC28010) and the Key Project in Scientific and Technological Development of Henan Province, China(No. 232102320094)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

作者简介: 张力浩(1991—), 男, 河南新乡人, 博士, 研究方向: 土壤重金属污染修复。E-mail: zhanglihao@issas.ac.cn

收稿日期: 2022-09-11; 收到修改稿日期: 2023-04-09; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-06-13

Abstract: Cadmium (Cd) pollution is dispersed over a wide area in farmland soils and seriously threatens the safety of agricultural produce and sustainable development of agriculture due to rapid industrialization and inadequate environmental protection in China. Compared to other toxic elements, Cd is highly carcinogenic and readily accumulates in edible portions of plants to levels that are toxic to humans. Traditional technologies of chemical remediation, physical remediation and phytoremediation have been widely applied to remediate Cd-polluted arable soil, especially in acid soil in some areas of southern China. However, little is known about the remediation technologies of Cd for alkaline arable soils. Alkaline soils are mainly distributed in North China. This area is an important hub for both the crop growing and animal breeding industries, and is suffering from severe Cd pollution as well. To ensure food safety, it is necessary to establish the technology and theory of Cd purification in alkaline soils. This paper reviews the domestic and foreign research trends of Cd remediation strategies, hot technologies, Cd geochemical cycle, and Cd transport and accumulation mechanisms in wheat grains, and analyzes the scientific and technological issues of Cd management and control in alkaline soils. The Web of Science core collection database (WOS) were employed to conduct a bibliometric analysis of the literature on remediation technologies of Cd in alkaline arable soils from 2000-2021 via VOSviewer software. The immobilization technology is popular to remediate Cd contamination in alkaline soils and the top three countries in the number of publications are China, the United States and Australia because of their abundant agricultural resources. Besides, soil acidification is the main reason for the increasing grain concentrations of Cd in alkaline arable soils. Meanwhile, lower soil Eh can increase Cd bioavailability by flooding in alkaline soils, suggesting that irrigation and drainage projects should be built in dry-land soil in North China. However, compared with acidic soil, the research on Cd remediation technology in alkaline arable soils is relatively weak. Currently, alkaline amendments such as clay minerals, biochar and lime are usually applied to lower Cd bioavailability in alkaline soils. However, it is difficult to inhibit the accumulation of Cd in crop grains by improving soil pH due to the large amount of carbonate in alkaline soils. Moreover, the excessive addition of alkaline amendments can destroy the soil structure, leading to soil hardening. Also, in phytoremediation, the high pH of alkaline soil will reduce the uptake of Cd by plant roots, resulting in low remediation efficiency and high cost. The accumulation of Cd in wheat grains is affected by both biotic and abiotic factors, and the complex molecular mechanism of its uptake and transport also limits the development of low-accumulation varieties. Thus, local governments should monitor the Cd concentration and it is imperative to explore and develop new technologies for inhibiting the transfer of Cd to food crops in alkaline soils.

Key words: Alkaline arable soils; Bibliometric analysis; Cadmium; Remediation strategies; Wheat

农田土壤重金属镉 (Cd) 污染已是制约我国农业可持续发展与食品健康安全的重要因素。据统计,我国受 Cd 污染耕地范围较广,其中以轻中度污染为主,主要集中于湖南、江西和广西等南方金属矿产资源丰富地区,总体呈现“南高北低,东高西低”的分布特征^[1-2]。目前,不同国家和地区基于土壤理化性质 (pH 和有机质)、人体健康及生态风险等的参考标准系建立了近 400 个关于土壤 Cd 环境质量标准,以我国、丹麦和芬兰最为严格 ($0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),而我国台湾地区限值则较高 ($5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[3-5]。我国土壤类型众多且特征差异大,在《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》(GB15618-2018)^[6]新标准中,根据土壤 pH 划定,Cd 在 pH > 7.5 的土壤中的限值超出其在 pH \leq 5.5 土壤中数值至少 1 倍。虽然在碱性土壤 (pH \geq 7.0) 中 Cd 对

生物的危害性要小于其在酸性土壤中^[7-8],但碱性土壤区由于 Cd 污染导致的作物果实超标及危害事件却屡被报道^[9-11]。然而截至目前,与酸性土壤相比,我国碱性土壤 Cd 污染问题仍未得到足够重视。

我国碱性土壤区域覆盖辽阔,主要分布于河南、河北、黑龙江、陕西和新疆等北方区域,同时也是我国的粮食主产区^[12]。高强度农业投入 (施肥、污灌等) 是导致该区域土壤重金属超标的首要因素,同时大气沉降和工业生产等途径输入的重金属也不容忽视^[13-14]。根据此前统计数据,我国碱性土壤 Cd 含量整体不高,但区域特征明显:新疆碱性土壤 Cd 平均浓度最高,为 $0.60\sim 1.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其次为河南省和陕西省,平均含量维持在 $0.30\sim 0.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[15]。有调查表明,河南部分地区碱性农田土壤中 Cd 含量可达 $1.12\sim 12.46 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且污染范围逐渐扩大,

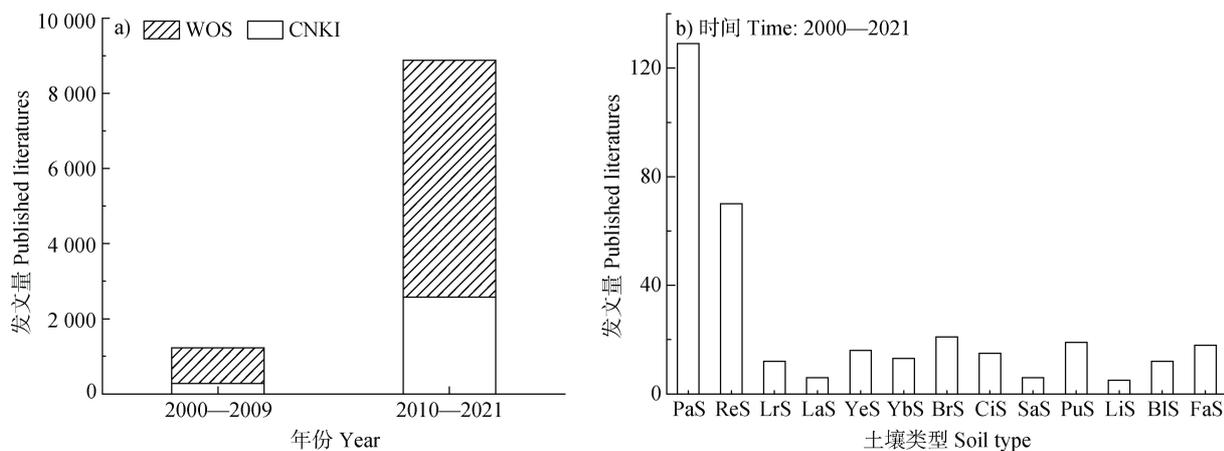
直接造成了小麦籽粒 Cd 超标^[16-17]。相比于酸性土壤,非酸性环境增强了土壤对重金属的沉淀和吸附能力,导致更高比例的 Cd 被表层土壤捕获并长期滞留于土壤中。因此,碱性土壤长期 Cd 污染严重威胁区域生态环境健康。

针对 Cd 污染酸性农田土壤,我国科学家在植物和化学等传统修复技术基础上,实行分类、分区治理:对于轻、中度 Cd 污染农田土壤,以“VIP+N”(低镉品种(variety)+全生育期淹水灌溉(irrigation)+施加生石灰调节土壤酸碱度(pH)+辅助措施(氮N))的稻米 Cd 污染控制技术为例,在湖南省 Cd 污染农田土壤(平均含量为 $0.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超标率为 66.70%)中,运用该技术产出的合格大米率达到 83%^[3, 18];在重度污染地区,种植结构调整和客土等是主要的治理方式。但在碱性土壤区域,目前沿用酸性土壤 Cd 污染治理方法是解决碱性土壤 Cd 污染问题的主要方式,且目光多聚焦于“调酸控污”,以提升 pH 为目的,比如施用石灰和钙镁磷肥等作为钝化剂,虽然取得了一些成效,但施用量大,通常需要 2%以上用量才能达到效果,若继续提高碱性土壤 pH 易造成土壤板结、肥力降低等不良现象发生^[19-21]。考虑到南北方气候环境、土壤成因、农业

结构以及产业结构发展等特征差异,我国碱性农田土壤 Cd 污染治理存在污染问题关注度不高、治理技术不匹配以及研发技术滞后等较多薄弱点。因此,探索并发展适用于碱性农田土壤 Cd 污染治理技术是亟待解决的问题。

1 碱性土壤镉修复技术研究现状——基于 Web of Science 和中国知网数据库分析

运用 VOSviewer 可视化分析软件,基于 Web of Science (WOS) 和中国知网 (Chinese National Knowledge Infrastructure, CNKI) 数据库,以“土壤&镉&修复”和“soil & cadmium & remediation”分别作为中、英文检索关键词,统计了 2000—2021 年国内外针对土壤 Cd 污染防治技术方面的研究趋势。由图 1a 可知,在 21 年里,关联主题中、英文发文量分别达到 2 859 和 7 256 篇,我国学者发文量接近全球发文总量的 40%,尤其在 2010 年以后,发文量显著上升,表明我国政府及人民对土壤 Cd 污染治理的关注度持续增高。然而,通过 CNKI 检索,



注: PaS: 水稻土, ReS: 红壤, LrS: 赤红壤, LaS: 砖红壤, YeS: 黄壤, YbS: 黄棕壤, BS: 棕壤, CiS: 褐土, SaS: 盐土, PuS: 紫色土, LiS: 石灰土, BIS: 黑土, FaS: 潮土。Note: PaS: Paddy Soil; ReS: Red Soil; LrS: Lateritic red Soil; LaS: Laterite Soil; YeS: Yellow Soil; YbS: Yellow-brown Soil; BS: Brown Soil; CiS: Cinnamon Soil; SaS: Saline Soil; PuS: Purple soil; LiS: Lime Soil; BIS: Black Soil; FaS: Fluvo-aquic Soil.

图 1 基于 Web of Science (WOS) 和中国知网数据库 (CNKI) 土壤重金属镉污染防治信息搜集 (a. 基于 WOS 和中国知网数据库 2000—2009 年与 2010—2021 年发表论文总篇数; b. 2000—2021 年依据我国不同土壤类型发表论文篇数)

Fig. 1 Information collection of soil cadmium prevention based on both Web of Science (WOS) and Chinese National Knowledge Infrastructure (CNKI) databases (a. The number of published papers from 2000 to 2009 and 2010 to 2021 based on WOS and CNKI databases, respectively; b. Number of papers published according to different soil types in China from 2000 to 2021)

按照土壤类型划分,我国研究者主要关注以水稻土、红壤等为代表的酸性土壤 Cd 污染治理,而对于碱性土壤(褐土、棕壤、黑土与潮土等)关注度明显较低(图 1b)。在 WOS 数据库中,以“alkaline soil & cadmium & remediation”作为关键词仅检索到相关论文 171 篇(2000—2021 年,数据未列),同时说明世界范围内对碱性土壤 Cd 污染治理关注度也较低,推测可能与 Cd 被认为在碱性土壤中的毒性和作物积累较低有关。根据统计,中国、美国与澳大利亚是碱性土壤 Cd 污染关注度最高的三个国家,而这三个国家均以农业生产为主(图 2)。尤其是我国,由于人口基数大和农业需求大,更加凸显出食品安全的重要性^[21]。

如图 3 所示,主题词 Cd 在关键词共现网络中处于核心地位(检索词“alkaline soil & cadmium & remediation”,2000—2021 年,WOS 数据库)。在近 21 年的碱性土壤 Cd 污染治理研究中,共现网络中除了镉(cadmium or Cd)和重金属(heavy-metals or heavy metals)外,排名前 10 位的关键词依次是:remediation、immobilization、biochar、bioavailability、lead、adsorption、contaminated soils、zinc、amendments

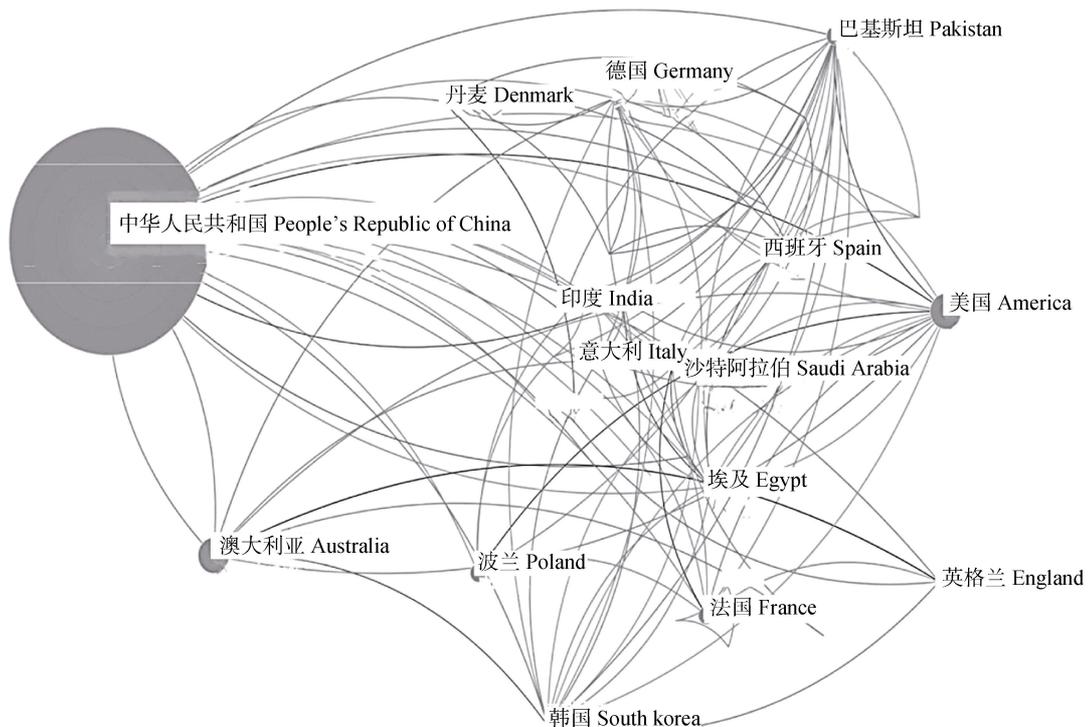
和 removal,形成了以关键词 bioaccumulation、amendments、alkaline soil、cadmium 和 adsorption 交互作用、关联的 5 大聚类(图 3)。由图 3 可得,immobilization(稳定化)和 amendements(改良)技术是此领域关注较多的修复手段,其中 biochar(生物质炭)作为典型的钝化材料被广泛报道。此外,关键词 bioaccumulation、bioavailability 和 adsorption 的热度也吻合当前此方向以钝化为主的修复技术^[22-23]。

2 碱性土壤中镉的化学形态与转变过程

Cd 在土壤中具有多种形态,包括可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态和残渣态等,受土壤液相(pH、氧化还原电位(Eh)、阳离子交换量(CEC)、无机和有机阴离子配体等)、固相(矿物类型、有机质含量、吸附位点强度)以及总量的影响^[24-25]。

2.1 土壤 pH

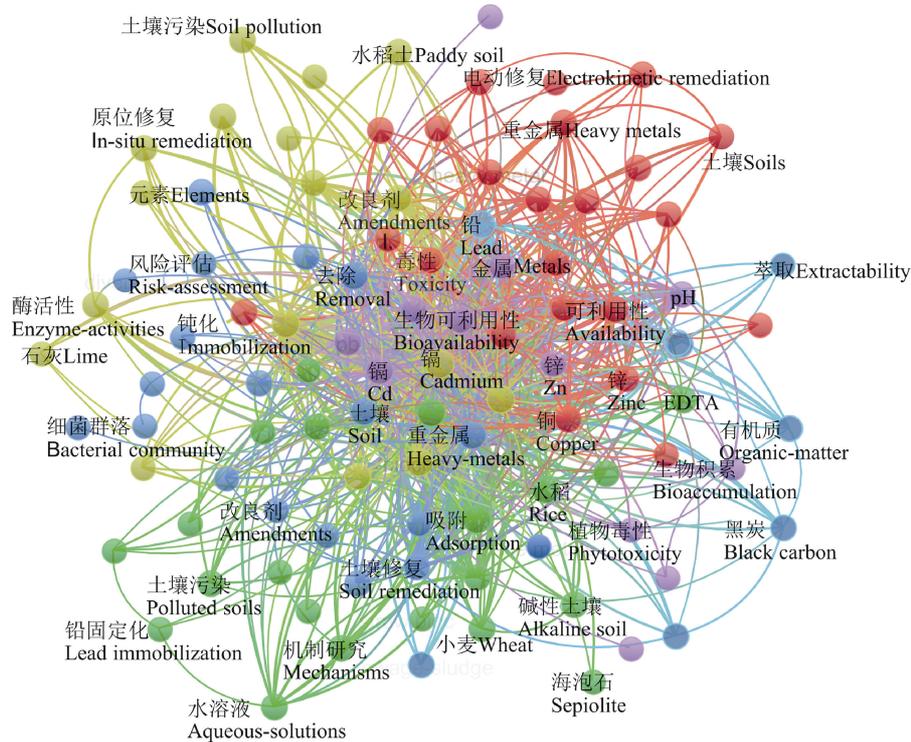
土壤 pH 是影响作物吸收 Cd 的首要因素。过去 40 年间,我国农田土壤 pH 平均下降了 0.13~0.80 个单位^[26]。在碱性土壤中,随着 pH 升高,土壤胶



注：圆圈大小表示国家发文量。Note: The size of the circle represents the number of publications sent by the country.

图 2 土壤重金属镉污染防治国际合作知识图谱

Fig. 2 Common map of international publications on the prevention and control of soil cadmium pollution



注：节点表示关键词；节点大小表示关键词出现的次数；关键词参数阈值设置为5，即关键词至少出现5次；不同颜色代表不同聚类。Note: Nodes represent keywords; The node size represents the number of occurrences of keywords; The threshold value of keyword parameters is set to 5, that is, keywords appear at least 5 times; Different colors represent different clusters.

图3 2000—2021年土壤重金属镉污染防治WOS数据库文献关键词突现图谱

Fig. 3 Keywords emergence map of domestic literature on soil heavy metal cadmium pollution control in WOS database from 2000 to 2021

体上吸附的Cd溶出率与溶解度降低，以专性吸附为主，同时由于氢氧根离子与土壤溶液中阳离子之间的互作也降低了其他阳离子与Cd离子之间的竞争吸附，导致土壤中的Cd不易迁移而在原地沉积，其生物可利用性相对较低^[27]。然而在土壤由碱至酸过程中，专性吸附的Cd会被逐渐转为非特异性吸附态并被释放，其生物可利用性随之增加。有研究表明，土壤pH每降低一个单位Cd的溶解度同时增加4倍~5倍^[28]。此外，Cd在土壤中吸附带范围通常在pH 4~8内，在此范围内Cd在土壤中的吸附量会急剧上升^[24]。但由于该范围较窄，低于锌(Zn)和铜(Cu)等其他金属，导致Cd的离子竞争位点较弱，且当超出吸附带范围后Cd的吸附效率减弱。结合Vasconcelos等^[29]结果，土壤pH在7~9范围内，Cd在矿物上分别以外圈络合物—内外圈络合物—内圈络合物的结合形式演变。Serrano等^[30]也证明了该过程，随pH增加，迫使土壤颗粒表面吸附位点从以金属离子态吸附为主过渡到以金属氢氧化

物为主。因此，不同pH条件下碱性土壤中Cd的吸附—解吸、沉淀—溶解等物理和化学过程存在较大差异：首先抑制土壤酸化进程是阻控碱性土壤Cd风险的有效方式之一；同时在碱性土壤中按照pH梯度，厘清Cd不同的赋存和结合形态，并研发高效率、具有针对性的材料，避免盲目以“调酸控污”为目的的传统材料在碱性Cd污染土壤中施用所带来的危害。

2.2 土壤 Eh

土壤Eh也是影响Cd在土壤中赋存形态的重要因素。在酸性稻田土壤中，淹水条件下土壤pH上升但土壤Eh下降，Cd²⁺以CdS沉淀形式存在；在排水落干过程中(氧化)，CdS被溶解并以Cd²⁺的形式释放，加剧了水稻对Cd的吸收^[28, 31]。北方碱性土壤种植区，大多以旱作为主，土壤干燥且通气性良好，Eh也相对较高，Cd相对不易解吸。但与酸性稻田土壤相反，淹水条件导致碱性土壤pH降低进而增加Cd的离子浓度，这表明碱性土壤在淹水

条件下 Cd 更易被解吸^[32]。此外，北方大部分农田地处平原，排水不畅。根据我国北方灌溉方式，其中大水漫灌仍是大面积农田的主要灌溉方式之一。结合北方农田污灌的特征，一方面淹水导致土壤 Eh 波动，进而改变土壤组分的电荷，造成原吸附态 Cd 被解吸，不利于作物安全生产；另一方面污灌过程将引入更多的 Cd 在土壤表层滞留、积累，增加土壤 Cd 负荷^[33]。在北方碱性农田 Cd 污染区域，清洁农用水引灌联合合理的灌溉方式（水分调节），并建立应对恶劣天气的排水系统，也是阻控作物吸收 Cd 的有效方式。

2.3 其他因素

土壤中有机质含量、CEC 和离子共存等也是影响 Cd 在土壤中形态和作物对其吸收的重要因素。随着土壤 pH 升高，一方面土壤有机质所含官能团如羧基、酚类和碳基等发生解离，增加这些配体对 Cd 的亲合力^[34]；另一方面碱性条件下，有机质与 Cd 反应易形成可溶性的 Cd 配合物，抑制离子交换和 Cd 向根系的转移^[35]。此外，土壤 CEC 增加导致大量 Cd 解吸，尤其在农业生产中，过量施用含钙磷肥使得大量的钙（Ca）蓄积并导致与 Cd 竞争吸附位点，提高 Cd 的生物有效性^[3]。同时，土壤中共存的铅（Pb）、Zn 等其他重金属元素也会影响 Cd 的形态以及作物对其吸收。研究发现，在碱性土壤中，相比于 Pb 和 Cu，Zn 对小麦籽粒 Cd 含量的抑制程度最高，由于 Zn 与 Cd 共享膜转运蛋白（如 Zn/Fe 转运蛋白），进而在碱性土壤中适当提高 Zn/Cd 比可缓解小麦 Cd 籽粒超标问题^[36]。

3 农田土壤镉修复技术

相比于欧美等国家，我国土壤污染修复技术研发起步较晚，存在多数基础研究与应用技术无法有效衔接、土壤修复系统配套不完善等多重问题。我国农田土壤 Cd 污染常用的修复技术包括物理、化学和生物修复，以及农艺调控措施等，但热点仍偏向于南方酸性土壤，尤其在稻田土壤 Cd 治理中取得了一定成效，如作者所在课题组在南方受 Cu/Cd 污染红壤耕地区域，应用物理、化学、生物和农艺措施联合修复技术开展了具有一定规模的重金属污染农田修复试点工程^[3, 37]。然而，结合北方碱性土

壤 Cd 污染治理现状，整体缺乏系统性、针对性和集成性，且技术成果转化薄弱。

3.1 化学原位钝化修复

根据近 20 年研究热点总结，原位钝化是面对目前农田大面积轻中度 Cd 污染土壤的主流修复技术（图 3），具有适用面积广、经济、安全等特点，但不改变污染物的总量。在碱性土壤重金属修复中，无机钝化剂（硅钙物质、含磷材料、黏土矿物、金属及金属氧化物等）、有机钝化剂（作物秸秆、腐殖酸、有机堆肥、城市污泥、畜禽粪便等）和新型材料（生物质炭、微生物菌剂、纳米材料、介孔材料、多酚物质、有机无机多孔杂化材料）等均有研究报告^[20, 38-39]。表 1 归纳了在碱性受污土壤中已报道的钝化材料类型、种类及钝化机制。与酸性土壤相比，一些材料施用量普遍偏大，如 1% 以上的钙镁磷肥、5% 石灰、3% 褐煤等施用对碱性土壤中 Cd 的钝化效率较高并减少作物积累^[19-21, 39]。生物质炭等主流材料也常有报道应用于碱性土壤重金属污染修复，但整体钝化效率较低。Janus 等^[39]报道在酸性土壤中生物质炭使得酸溶性 Cd 降低 36.80%，但在碱性土壤中，酸溶性 Cd 最大仅降低 12.40%。此外，作为含磷材料，羟基磷灰石据报道具有较好的阻控效果^[40]。如 Feng 等^[41]报道碱性土壤 Cd 含量为 2.46 mg·kg⁻¹，施用 2.50% 羟基磷灰石可显著降低两种冬小麦（Zhengmai-7698（郑麦-7698）和 Zhoumai-30（周麦-30））籽粒对 Cd 的积累，抑制比例高达 92.40%。同时，诸如沸石负载锰氧化物、巯基改性生物质炭、巯基改性蒙脱土、巯基改性氧化硅、硫化钙、聚合二硫代氨基甲酸钠、2, 4, 6-三巯基均三嗪三钠三、铁锰氧化物等新材料/改性材料在碱性土壤 Cd 污染治理中展现了优越的钝化性能，但仅停留于实验室研究阶段^[19, 42-44]。综上，原位化学钝化修复操作简单，治理效果快且显著。在近来碱性土壤污染治理研究中，研究者已经将目光从引用酸性土壤治理模式逐渐过渡到具有针对性的功能材料。然而绝大部分材料仅限于试验阶段，部分价格昂贵，很难在实际生产中推广应用。

3.2 植物修复

植物修复具有绿色、安全且无二次污染等优点，适用于中重度 Cd 污染土壤的修复，但修复效率低且受到较多因素影响，如植物种类、土壤污染物浓

表 1 碱性土壤重金属修复中钝化材料的应用

Table 1 Application of passivation materials in remediation of heavy metals in alkaline soils

	黏土矿物材料 Clay minerals materials	石灰类材料 Lime materials	含磷物质材料 Phosphorus-containing substances materials	金属氧化物材料 Metal oxides materials	生物质炭材 Biochar materials	含腐殖酸物质材料 Humic acid materials	农业秸秆材料 Straw materials	有机物料 Organic materials
钝化机制 Passivation mechanisms	离子交换、表面吸附沉淀、成核和结晶	提高土壤 pH、增加土壤可变电荷、改变土壤阳离子交换量和土壤盐基饱和度	吸附/取代、表面络合、化学沉淀和提升土壤 pH	吸附、共沉淀、络合和氧化还原作用	表面吸附和提升土壤 pH	螯合、吸附作用，并降低重金属活性	增加土壤肥效，与重金属拮抗作用并降低重金属活性	改变重金属形态并降低其生物有效性
代表性材料 Representative materials	海泡石、膨润土、凹凸棒土、电气石、巯基化坡缕石、热改性坡缕石、褐煤、蒙脱石、沸石、白云石、方解石等	水泥、石灰等	磷酸二氢钾、过磷酸钙、磷酸一铵、羟基磷灰石、磷矿粉、钙镁磷肥等	铁锰氧化物、铁铝氧化物等	锯木屑生物炭、小麦/玉米秸秆生物质炭、硫磺、改性小麦秸秆生物质炭、巯基改性生物质炭等	腐殖酸	花生秸秆、水稻秸秆、玉米秸秆、油菜秸秆和小麦秸秆等	鸡粪、赤泥、农田粪肥等

度和来源、土壤 pH 等^[45]。我国土壤分布地带性强、异质性大，联合超积累植物的区域适应性特征，限制了其大面积的推广应用。如张云霞等^[46]发现在广东省鬼针草 (*Bidens pilosa* L.) 对 Cd 转运系数可达 2.84，但在贵州省仅为广东省的 1/2。总体而言，超积累植物的提取效率与土壤 Cd 生物可利用态间存在显著的正相关，因此理论上植物在酸性土壤 (pH < 7) 中的提取效率优于碱性土壤 (pH > 7)。Huang 等^[47]通过对比 5 种超积累植物籽粒苋 (*Amaranthus hypochondriacus*)、青葙 (*Celosia argentea*)、龙葵 (*Solanum nigrum*)、商陆 (*Phytolacca acinosa*) 和伴矿景天 (*Sedum plumbizincicola*) 在酸、碱性土壤中对 Cd 的提取效率时发现，在酸性土壤中这些植物的提取效率要高于碱性土壤中，其中伴矿景天在碱性土壤中的提取效率最佳，且在碱性土壤中植物更

倾向于通过分泌更多的低分子量有机酸来增加根际有效 Cd 含量。Li 等^[45]梳理对比了以往研究结果，计算出植物修复在酸、碱性土壤中提取 Cd 的平均效率比为 1.6 : 1。在植物修复领域，我国植物修复项目修复周期长，直接导致修复成本增加。尤其在碱性土壤中，更低的修复效率与盈亏平衡间的矛盾则会更加突出。近来，有研究者通过添加硫以降低碱性土壤 pH 从而提高植物修复效率，结果表明添加硫后菊苣 (*Cichorium intybus*) 根吸收 Cd 含量从 4.43 mg·kg⁻¹ 显著增加至 20.16 mg·kg⁻¹^[48]。此外，轻度 Cd 污染土壤中，通过油菜与修复植物间作可缩短修复周期并增加经济收入，修复回收期将缩短至 6~8 年^[49]。最后，利用植物修复策略来清除金属污染土壤的关键取决于超积累植物对重金属的吸收能力、土壤特性和植物—土壤关系的相互适应度。因

此，应当考虑当地物候环境、土壤等特征条件与污染类型和程度结合，通过超积累植物的筛选特别是本地植物的培育，加快碱性 Cd 污染土壤的植物提取效率并减少成本投入，同时应建立地方性的超积累植物种质资源库。

3.3 叶面阻隔技术

研究表明，叶面阻隔剂通过改变重金属在植株体内的分配，可有效降低籽粒重金属含量，特别适用于轻中度重金属污染农田土壤中^[50]。我国学者已经在江西、广西和湖南等地开展了叶面喷施阻隔 Cd 的田间试验，试验涵盖了不同的气候区域^[51]。结果表明，叶面喷施抑制作物吸收 Cd 与气候条件、土壤类型和作物品种并无明显相关性，因而此技术普适性好，可大规模推广应用^[51]。根据以往研究结果，叶面喷施如硅（Si）、硒（Se）肥不仅可有效阻隔 Cd，同时可增强植物的逆境调节能力^[52]。但在某些情况下，喷施 Se 甚至增加水稻籽粒对 Cd 的积累，这可能与土壤 Cd 水平有关^[51]。同时，喷施时间是决定作物积累 Cd 的关键。Javed 等^[53]发现小麦孕穗期是叶面施用 Zn 的最佳时段，不仅可降低籽粒 Cd 含量，也可有效减少 Cd 引起的产量损失。综上所述，叶面阻隔技术前景广阔，与其他农艺措施结合使用的技术以及应用时机探索是今后研究的要点。此外，纳米喷施材料是目前研究的热点之一，其对 Cd 的阻隔效果更佳^[54]。例如，在作物中使用 ZnO 纳米颗粒作为叶面纳米肥料较传统肥料更有效^[55]。

4 小麦吸收镉的机制及影响因素

小麦是世界第三大主粮作物，仅次于水稻和玉米。据估算，60%的小麦及副产品被作为食品消费，到 2050 年该比例预计增长至 70%。我国是小麦的最大生产国家，也是最大的消费国，尤其以北方为主，因此小麦籽粒 Cd 安全问题引起了社会各界的关注。

Cd 的转运过程是籽粒积累 Cd 的关键因素。以往研究表明，小麦根系虽然对 Cd 的吸收率较低，但 Cd 从根到籽粒的转运率较高，这将直接导致小麦籽粒 Cd 超标风险^[56]。从生理上讲，土壤中的 Cd 通过根际被根部吸收，随后通过木质部转移至地上部组织。由于韧皮部是 Cd 进入籽粒的关键运输通道，因此有研究者指出小麦籽粒积累的 Cd 与韧皮部介导的 Cd 转运有关，并发现在转运 Cd 过程中韧

皮部一些参与转运的基因特异性表达^[57]。进一步，部分研究者试图通过分子生物学手段调控小麦相关转运基因的表达以抑制 Cd 的积累。Liu 等^[58]过表达小麦 *TaSWEET14* 基因，不仅可提高小麦对 Cd 的耐受性，同时也降低其对 Cd 的积累，这是由于该基因过表达影响了参与转运的基因 *NRAMP5*、*LCT1*、*HMA3* 和 *IRT1* 的表达模式。Wu 等^[59]发现小麦细胞膜 *TaSFT2L* 蛋白是调控 Cd 转运的关键基因，沉默该基因可抑制 Cd 从小麦根至籽粒的转运，抑制率达 68%，并使得小麦籽粒 Cd 含量降低 53%。然而，由于在 Cd 胁迫下参与 Cu、Fe、Zn 和 Mn 等转运的基因同步特异性表达，截至目前小麦植株体内尚未发现特定的 Cd 转运体^[10]。因此，具有阻隔 Cd 积累效应的转基因小麦开始被关注。Zhang 等^[56]通过转基因技术成功克隆并在小麦体内过表达水稻控 Cd 基因 *OsHMA3*，使小麦从根到茎的 Cd 转运率降低了近 10 倍，小麦籽粒中 Cd 积累也降低了 96%。此外，由于 Zn^{2+} 、 Fe^{2+} 和 Ca^{2+} 这些二价阳离子与 Cd^{2+} 在化学性质上具有相似性，也有研究者通过检测小麦体内介导多种阳离子的转运基因 *TaLCT1*，发现提高 Ca 水平可抑制 *TaLCT1* 对 Cd 的转运，但该基因对 Cd 并无特异性^[57]。

另一方面，由于 Cd 的毒性效应，可导致小麦机体中毒、产量下降。在近来的研究中，相比于高积累品种小麦，协调金属耐受性的基因 *HMT-1* 和过氧化物酶基因仅在低 Cd 积累小麦中表达并上调，表明低积累小麦的活性氧清除机制较活跃^[60]。此外，在 Cd 胁迫下，小麦体内涉及转录因子、螯合剂、重金属转运、抗氧化酶和水通道蛋白等多类基因均特异表达，说明小麦对 Cd 的反应极其复杂，这也对未来低积累小麦的育种计划构成了挑战。

除了小麦自身转运基因的表达和品种影响 Cd 的吸收，非生物因素土壤因子如 pH、有机物、CEC、铁锰氧化物含量和土壤质地（黏土含量）也是影响小麦积累 Cd 的关键因素。在碱性土壤中，土壤酸化增加了植物对 Cd 的吸收率，而根系分泌物也可增加 Cd 在碱性土壤中的生物利用率。有研究表明，增加土壤 Fe、Mn 和黏土矿物含量会降低小麦对 Cd 的吸收，但降低 pH 和 CEC 则会增加小麦对 Cd 的吸收^[11]。Ma 等^[61]通过 13 个小麦品种复合不同磷梯度试验发现，碱性土壤中磷的供应对小麦籽粒 Cd 的贡献较小麦品种选择更为重要，高磷土壤抑制了

小麦籽粒对 Cd 的积累。部分研究通过向土壤施用土壤钝化剂也可达到降低小麦对 Cd 的吸收与积累, 比如施用生物炭可使小麦籽粒中 Cd 的积累降低 97.80%^[62]。

有研究者指出由于作物吸收 Cd 受到多重因素影响, 导致土壤 Cd 含量与水稻、小麦等农作物籽粒中 Cd 含量的线性关系较差^[3, 63]。同时也会出现部分土壤 Cd 不超标但作物籽粒 Cd 超标的假阴性错误结果, 以及土壤 Cd 超标但作物籽粒 Cd 不超标的假阳性错误结果^[3]。因此, 有研究认为相比于土壤总 Cd 含量, 以土壤有效态 Cd 含量替代并预测农作物籽粒中 Cd 含量将更具实际意义。然而类似研究通常集中于酸性水稻土—水稻系统, 鲜少关注于碱性土壤—小麦系统。土壤有效态重金属浸提剂主要分 3 类: (1) 稀(弱)酸类稀 HCl、稀 HNO₃ 和 CH₃COOH 等; (2) 中性盐类 CH₃COONH₄、CaCl₂、NaNO₃ 和 K₂SO₄ 等; (3) 络合剂类主要有二乙烯三胺五乙酸 (DTPA)、碳酸氢铵-二乙烯三胺五乙酸 (AB-DTPA) 和乙二胺四乙酸 (EDTA) 等^[64]。在酸性土壤中, 肖振林等^[65]通过对比 9 种不同的提取剂发现, 以 0.10 mol·L⁻¹ CaCl₂ 提取的有效态 Cd 含量与稻米籽粒 Cd 含量达到极显著水平。在碱性土壤中, 研究发现 0.10 mol·L⁻¹ CaCl₂、0.05 mol·L⁻¹ EDTA 和 DTPA 提取的有效态 Cd 含量与小麦籽粒中 Cd 含量均达到显著水平^[66]。该结果也与熊礼明和鲁如坤^[67]研究结果一致, 在碱性黄潮土中, 有效态 Cd 含量与小麦籽粒中 Cd 含量相关性顺序以 0.10 mol·L⁻¹ CaCl₂ 和 0.10 mol·L⁻¹ HCl 最显著, 相关性系数均达到 0.97, 最低的为 1.00 mol·L⁻¹ NaNO₃ 提取, 相关性系数仅为 0.36。

5 结论与展望

我国人口众多但农用地资源短缺, 同时伴随 Cd 污染农田土壤面积广、污染成因复杂的交互问题, 给粮食安全生产带来空前压力。我国碱性土壤区域分布广, 部分区域受人为因素影响导致土壤和作物 Cd 不同程度超标。但是, 面对我国碱性农田土壤 Cd 污染区域治理, 关注度不高, 导致其修复技术研发相对滞后、针对性弱。鉴于此, 应建立有效的碱性土壤重金属 Cd 污染防治体系, 充分考虑 Cd 在碱

性土壤中的地球化学过程, 开发并优化相应的配套技术, 解析旱地主粮作物 (以小麦为例) 的 Cd 超标机制, 保障区域农田健康、安全、稳定与科学的生产。

(1) 加强政府引导, 科学投入。相比于酸性土壤, 碱性土壤 Cd 毒性当量和生物可利用态含量低, 其标准限值也相对较高。但是, 仍有部分碱性农用地面临土壤和作物 Cd 问题, 且超标区域大多位于我国主粮产区。因此, 碱性土壤 Cd 超标问题也不容忽视。根据研究现状, 我国甚至世界其他地区多关注于酸性土壤 Cd 污染治理, 而缺乏对碱性土壤的关注。因此, 政府需要起到牵头作用, 尤其是当地乡、镇政府, 加强政策引导, 适当提高碱性土壤污染防治资金资助力度, 要充分了解、摸清当地碱性土壤 Cd 污染状况、风险及来源等基本情况, 以土壤类型、作物种植和耕作方式等作为背景参数, 推进分类、分区管理与农田土壤 Cd 污染防治结合的治理模式, 以增强区域性修复措施的针对性。

(2) 探究土壤中 Cd 的地球化学过程, 精准配套碱性土壤 Cd 污染修复技术。Cd 在酸、碱性土壤中的地球化学过程并不相同。在碱性土壤环境中, 首要防治农业生产造成的土壤酸化问题, 抑制土壤中 Cd 的进一步解吸和溶解。其次, 建立配套的灌溉模式与排水系统, 防止过渡淹水与恶劣天气导致 Cd 超标事件发生。最后, 根据 Cd 在碱性土壤中的赋存机制, 匹配对应的 Cd 污染治理技术, 从绿色、安全、经济等原则考虑, 做好实验室到田间的技术衔接、验证与推广, 着重开发针对性的钝化材料与植物修复模式, 提高 Cd 的修复效率。

(3) 解析主粮作物——小麦对 Cd 的吸收、积累机制, 筛选、构建小麦防御体系。小麦对 Cd 的积累和防御机制异常复杂且影响因素较多, 阻碍了对小麦体内特定的 Cd 转运基因/蛋白的发掘, 结合转基因技术的安全性考虑, 对未来通过基因编辑、转基因等分子手段阻控小麦籽粒 Cd 吸收构成了一定挑战。此外, 目前针对碱性土壤种植小麦的土壤 Cd 安全阈值研究较少, 数据不全面, 同时导致“土壤 Cd—小麦籽粒 Cd 含量”存在假阳性和假阴性的结果。因此, 适时考虑从土壤—小麦综合影响因素出发并建立精准防控体系对小麦控 Cd 具有重要指导意义。

参考文献 (References)

- [1] Wang J, Wei H, Pan B. Accumulation characteristics and probabilistic risk assessment of Cd in agricultural soils across China[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (7): 4006—4046. [王静, 魏恒, 潘波. 中国农田土壤 Cd 累积分布特征及概率风险评价[J]. *环境科学*, 2023, 44 (7): 4006—4046.]
- [2] 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.]
- [3] Chen S B, Wang M, Li S S, et al. Current status of and discussion on farmland heavy metal pollution prevention in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26 (6): 35—41. [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.]
- [4] Zhang T L. More comprehensive understanding and effective control of heavy metal pollution of cultivated soils in China[J]. *Soils*, 2015, 47 (3): 435—439. [张桃林. 科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J]. *土壤*, 2015, 47 (3): 435—439.]
- [5] Zhang H B, Luo Y M, Li Y, et al. Screening of criteria for heavy metals for revision of the national standard for soil environmental quality of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (3): 429—438. [章海波, 骆永明, 李远, 等. 中国土壤环境质量标准中重金属指标的筛选研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (3): 429—438.]
- [6] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Soil environmental quality—risk control standard for soil contamination of agricultural land: GB15618-2018[S]. Beijing: China Environmental Press, 2018. [生态环境部. 土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB15618-2018[S]. 北京: 中国环境出版社, 2018.]
- [7] Tan X P, He J H, Guo Z M, et al. Research progresses on soil enzymes as indicators of soil health and their responses to heavy metal pollution[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (1): 50—62. [谭向平, 何金红, 郭志明, 等. 土壤酶对重金属污染的响应及指示研究进展[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (1): 50—62.]
- [8] Wang Y J, Wu T L, Zhou D M, et al. Advances in soil heavy metal pollution evaluation based on bibliometrics analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36 (12): 2365—2378. [王玉军, 吴同亮, 周东美, 等. 农田土壤重金属污染评价研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36 (12): 2365—2378.]
- [9] Zhu G F, Zhang C Y, Wang J L, et al. Investigation of heavy metal pollution in soil and wheat grains in sewage-irrigated area in Sizhuangding, Xinxiang city[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28 (2): 263—268. [朱桂芬, 张春燕, 王建玲, 等. 新乡市寺庄顶污灌区土壤及小麦重金属污染特征的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28 (2): 263—268.]
- [10] Zhuang Z, Niño-Savala A G, Mi Z D, et al. Cadmium accumulation in wheat and maize grains from China: Interaction of soil properties, novel enrichment models and soil thresholds[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 275: 116623.
- [11] Xu J H, Hu C Y, Wang M L, et al. Changeable effects of coexisting heavy metals on transfer of cadmium from soils to wheat grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 127182.
- [12] Liu F, Wu H Y, Zhao Y G, et al. Mapping high resolution National Soil Information Grids of China[J]. *Science Bulletin*, 2022, 67 (3): 328—340.
- [13] Shi H Y, Wang P, Zheng J T, et al. Spatial distribution of soil heavy metals and regional control strategies in China at province level[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 (8): 4706—4716. [石航源, 王鹏, 郑家桐, 等. 中国省域土壤重金属空间分布特征及分区管控对策[J]. *环境科学*, 2023, 44 (8): 4706—4716.]
- [14] Fan T T, Long T, Lu Y Y, et al. Meta-analysis of Cd input-output fluxes in agricultural soil[J]. *Chemosphere*, 2022, 303: 134974.
- [15] Zhang X Y, Chen D M, Zhong T Y, et al. Assessment of cadmium (Cd) concentration in arable soil in China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22 (7): 4932—4941.
- [16] Zhao Q G, Luo Y M. The macro strategy of soil protection in China[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2015, 30 (4): 452—458. [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.]
- [17] Qu X Z, Xu W W, Ren J H, et al. A field study to predict Cd bioaccumulation in a soil-wheat system: Application of a geochemical model[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 400: 123135.
- [18] Wen M Y, Ma Z Q, Gingerich D B, et al. Heavy metals in agricultural soil in China: A systematic review and meta-analysis[J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, 1 (4): 219—228.
- [19] Xie X L, Yuan C, Zhu X L, et al. *In-situ* passivation remediation materials in cadmium contaminated alkaline agricultural soil: A review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49 (5): 1254—1260. [解晓露, 袁彘, 朱晓龙, 等. 中碱性镉污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. *土壤通报*, 2018, 49 (5): 1254—1260.]
- [20] Ren C, Li J T, Zhu L W, et al. Study on the passivation effect of different passivators on alkaline cadmium contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 44 (3): 71—78. [任超, 李竞天,

- 朱利文,等.不同钝化剂对碱性镉污染土壤钝化效果研究[J].环境科学与技术,2021,44(3):71—78.]
- [21] Ding M, Yang Q Y, Hua D L, et al. Effects of amendments derived from lignite on Pb, Cd bioavailability of lettuce in calcareous soil[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(4): 678—685. [丁满,杨秋云,化党领,等.褐煤基材料对石灰性土壤铅镉生物有效性的影响[J].农业环境科学学报,2017,36(4):678—685.]
- [22] Liu X M, Zhao J, Xu J M. Research on immobilization of heavy metals in contaminated agricultural soils—Bibliometric analysis based on Web of Science database[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(2): 445—455. [刘杏梅,赵健,徐建明.污染农田土壤的重金属钝化技术研究——基于Web of Science数据库的计量分析[J].土壤学报,2021,58(2):445—455.]
- [23] Yang J, Hu R Q, Zhao C, et al. Challenges and opportunities for improving the environmental quality of cadmium-contaminated soil in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 445: 130560.
- [24] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, et al. Cadmium sorption and desorption in soils: A review[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2012, 42(5): 489—533.
- [25] Naidu R, Bolan N S, Kookana R S, et al. Ionic-strength and pH effects on the sorption of cadmium and the surface charge of soils[J]. European Journal of Soil Science, 1994, 45(4): 419—429.
- [26] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008—1010.
- [27] Wang J, Wang P M, Gu Y, et al. Iron-Manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems[J]. Environmental Science and Technology, 2019, 53(5): 2500—2508.
- [28] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, et al. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety[J]. Environmental Pollution, 2019, 249: 1038—1048.
- [29] Vasconcelos I F, Haack E A, Maurice P A, et al. EXAFS analysis of cadmium (II) adsorption to kaolinite[J]. Chemical Geology, 2008, 249(3-4): 237—249.
- [30] Serrano S, O'Day P A, Vlassopoulos D, et al. A surface complexation and ion exchange model of Pb and Cd competitive sorption on natural soils[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 73(3): 543—558.
- [31] Chen H P, Yang X P, Wang P, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: A case study in Xiangtan, Southern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 639: 271—277.
- [32] Hussain B, Ashraf M N, Shafeeq-Ur-Rahman, et al. Cadmium stress in paddy fields: Effects of soil conditions and remediation strategies[J]. Science of the Total Environment, 2021, 754: 142188.
- [33] 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.]
- [34] Pan Y, Bonten L T C, Koopmans G F, et al. Solubility of trace metals in two contaminated paddy soils exposed to alternating flooding and drainage[J]. Geoderma, 2016, 261: 59—69.
- [35] Li D M, Liu H Y, Gao M, et al. Effects of soil amendments, foliar sprayings of silicon and selenium and their combinations on the reduction of cadmium accumulation in rice[J]. Pedosphere, 2022, 32(4): 649—659.
- [36] Wang T Q, Li Y L, Yang Y, et al. Effects of zinc-to-cadmium ratio on cadmium accumulation in wheat grains from alkaline soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(12): 5143—5149 [王天齐,李艳玲,杨阳,等.碱性土壤锌镉比对小麦籽粒镉积累的影响[J].环境科学学报,2021,41(12):5143—5149]
- [37] Zhou J. Present situation and prospects of technologies for remediation of heavy-metal-contaminated soil around Jiangxi Guixi Smelter[J]. World Environment, 2016(4): 48—53. [周静.重金属污染土壤修复技术的现状和展望——以江西贵溪冶炼厂周边区域土壤修复示范项目为例[J].世界环境,2016(4):48—53.]
- [38] Venegas A, Rigol A, Vidal M. Viability of organic wastes and biochars as amendments for the remediation of heavy metal-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2015, 119: 190—198.
- [39] Janus A, Waterlot C, Heymans S, et al. Do biochars influence the availability and human oral bioaccessibility of Cd, Pb, and Zn in a contaminated slightly alkaline soil?[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2018, 190(4): 218.
- [40] Feng Y, Yang J J, Aminu D, et al. Effects of hydroxyapatite on safe wheat production and soil microbial functional genes in an alkaline soil contaminated with heavy metals[J]. Environmental Research, 2023, 220: 115183.
- [41] Feng Y, Yang J J, Liu W, et al. Hydroxyapatite as a passivator for safe wheat production and its impacts on soil microbial communities in a Cd-contaminated alkaline soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 404: 124005.
- [42] He L Z, Dai Z M, Liu X M, et al. Effect of alkaline lignin on immobilization of cadmium and lead in soils and the associated mechanisms[J]. Chemosphere, 2021, 281: 130969.

- [43] Wang Y L, Xu Y M, Peng Y Y, et al. Control effects of column leaching combined with mercapto-modified palygorskite immobilization on weakly alkaline Cd and Pb-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39 (1): 78—86. [王雅乐, 徐应明, 彭云英, 等. 柱淋滤-巯基改性坡缕石钝化组合对弱碱性土壤镉铅污染控制效应[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39 (1): 78—86.]
- [44] Sun T, Li K, Fu Y T, et al. Effect of modified biochar on immobilization remediation of weakly alkaline Cd-contaminated soil and environmental quality[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(7): 2571—2580. [孙彤, 李可, 付宇童, 等. 改性生物炭对弱碱性 Cd 污染土壤钝化修复效应和土壤环境质量的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40 (7): 2571—2580.]
- [45] Li X H, Zhu W G, Meng G J, et al. Phytoremediation of alkaline soils co-contaminated with cadmium and tetracycline antibiotics using the ornamental hyperaccumulators *Mirabilis jalapa* L. and *Tagetes patula* L[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27 (12): 14175—14183.
- [46] Zhang Y X, Zhou L, Xiao N C, et al. Remediation potential of *B. pilosa* L. in cadmium—contaminated farmland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40 (17): 5805—5813. [张云霞, 周浪, 肖乃川, 等. 鬼针草(*Bidens pilosa* L.) 对镉污染农田的修复潜力[J]. *生态学报*, 2020, 40 (17): 5805—5813.]
- [47] Huang R, Dong M L, Mao P, et al. Evaluation of phytoremediation potential of five Cd (hyper) accumulators in two Cd contaminated soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137581.
- [48] Liu H T, Luo L, Jiang G Y, et al. Sulfur enhances cadmium bioaccumulation in *Cichorium intybus* by altering soil properties, heavy metal availability and microbial community in contaminated alkaline soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 837: 155879.
- [49] Yang L, Wang J B, Yang Y S, et al. Phytoremediation of heavy metal pollution: Hotspots and future prospects[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 234: 113403.
- [50] Yang X R, Wang C R, Huang Y C, et al. Foliar application of the sulfhydryl compound 2, 3-dimercaptosuccinic acid inhibits cadmium, lead, and arsenic accumulation in rice grains by promoting heavy metal immobilization in flag leaves[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 285: 117355.
- [51] Lian J P, Cheng L P, Zhai X, et al. Foliar spray of combined metal-oxide nanoparticles alters the accumulation, translocation and health risk of Cd in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 440: 129857.
- [52] Zhou J, Zhang C, Du B Y, et al. Soil and foliar applications of silicon and selenium effects on cadmium accumulation and plant growth by modulation of antioxidant system and Cd translocation: Comparison of soft vs. durum wheat varieties[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402: 123546.
- [53] Javed H, Naeem A, Rengel Z, et al. Timing of foliar Zn application plays a vital role in minimizing Cd accumulation in wheat[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23 (16): 16432—16439.
- [54] Sarkar M R, Rashid M H, Rahman A, et al. Recent advances in nanomaterials based sustainable agriculture: An overview[J]. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, 2022, 18: 100687.
- [55] Lian J P, Cheng L P, Zhai X, et al. Zinc glycerolate (Glyzinc): A novel foliar fertilizer for zinc biofortification and cadmium reduction in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2023, 402: 134290.
- [56] Zhang L X, Gao C, Chen C, et al. Overexpression of rice *OsHMA3* in wheat greatly decreases cadmium accumulation in wheat grains[J]. *Environmental Science and Technology*, 2020, 54 (16): 10100—10108.
- [57] Abedi T, Mojiri A. Cadmium uptake by wheat (*Triticum aestivum* L.): An overview[J]. *Plants : Basel*, Switzerland, 2020, 9 (4): 500.
- [58] Liu X J, Wang H C, Tang H, et al. *TaSWEET14* confers low cadmium accumulation in wheat and is regulated by TaMYB41[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2022, 201: 104992.
- [59] Wu L L, Yu Y A, Hu H Y, et al. New SFT2-like vesicle transport protein (SFT2L) enhances cadmium tolerance and reduces cadmium accumulation in common wheat grains[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2022, 70 (18): 5526—5540.
- [60] Zhang D Z, Liu J J, Zhang Y B, et al. Morphophysiological, proteomic and metabolomic analyses reveal cadmium tolerance mechanism in common wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 445: 130499.
- [61] Ma S J, Nan Z R, Hu Y H, et al. Phosphorus supply level is more important than wheat variety in safe utilization of cadmium-contaminated calcareous soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 424: 127224.
- [62] Gong H B, Zhao L, Rui X, et al. A review of pristine and modified biochar immobilizing typical heavy metals in soil: Applications and challenges[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 432: 128668.
- [63] Zhang H Z, Luo Y M, Zhang H B, et al. Characterizing the plant uptake factor of As, Cd and Pb for rice and wheat cereal[J]. *Environmental Science*, 2010, 31 (2): 488—495. [张红振, 骆永明, 章海波, 等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律[J]. *环境科学*, 2010, 31 (2): 488—495.]
- [64] Fu Y C, Zhu X L, Yuan C, et al. Cadmium absorption and enrichment in wheat and its cadmium pollution

- prediction: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36(6): 37—41. [符云聪, 朱晓龙, 袁鑫, 等. 小麦对镉的吸收、富集及其镉污染预测研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(6): 37—41.]
- [65] Xiao Z L, Wang G, Huang R Q, et al. Extraction method for available cadmium in acid soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2008, 27(2): 795—800. [肖振林, 王果, 黄瑞卿, 等. 酸性土壤中有效态镉提取方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 795—800.]
- [66] Ji S J, Wang J W, Huang L P, et al. Study on influence of cadmium on growth of *Triticum aestivum* and forecast of contamination to wheat[J]. Grain Processing, 2008, 33(1): 51—53. [纪淑娟, 王俊伟, 黄莉萍, 等. 重金属镉胁迫对小麦生长的影响及小麦镉污染预测的研究[J]. 粮食加工, 2008, 33(1): 51—53.]
- [67] Xiong L M, Lu R K. Extracting mechanism of chemical extractants for available cadmium in soils[J]. Environmental Chemistry, 1992, 11(3): 41—47. [熊礼明, 鲁如坤. 土壤有效 Cd 浸提剂对 Cd 的浸提机制[J]. 环境化学, 1992, 11(3): 41—47.]

(责任编辑: 陈荣府)