

DOI: 10.11766/trxb202502060046

CSTR: 32215.14.trxb202502060046

高岩, 樊广萍, 李云涛, 史高玲, 童非, 李江叶, 陈未, 葛成浩, 周东美. 碱性土壤小麦高累积镉的机制与阻控策略探讨[J]. 土壤学报, 2026, 63 (4): 995–1006.

GAO Yan, FAN Guangping, LI Yuntao, SHI Gaoling, TONG Fei, LI Jiangye, Chen Wei, GE Chenghao, ZHOU Dongmei. Mechanisms of High Cadmium Accumulation by Wheat Grown in Alkaline Soils and Prospect on the Mitigation Strategies[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (4): 995–1006.

## 碱性土壤小麦高累积镉的机制与阻控策略探讨\*

高岩<sup>1, 2†</sup>, 樊广萍<sup>1, 2</sup>, 李云涛<sup>1, 2</sup>, 史高玲<sup>1, 2</sup>, 童非<sup>1, 2</sup>, 李江叶<sup>1, 2</sup>,  
陈未<sup>1, 2</sup>, 葛成浩<sup>3</sup>, 周东美<sup>3†</sup>

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2. 农业农村部长江下游平原农业环境重点实验室, 南京 210014; 3. 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京大学环境学院, 南京 210023)

**摘要:** 小麦作为全球 1/3 人口的主粮, 其籽粒镉 (Cd) 的富集能力及其引发的膳食暴露风险长期未得到充分关注。本文通过整合国内外文献分析与前期研究基础, 初步明确了受污染碱性土壤中小麦具有较高的 Cd 累积能力和超标风险。在稻麦轮作农田系统中, 相同点位小麦籽粒 Cd 富集系数显著高于水稻, 且碱性土壤 Cd 含量低于风险筛选值时, 小麦籽粒 Cd 超标率仍较高。随土壤 pH 的升高, 小麦对成人日均膳食 Cd 暴露量的贡献率增加, 而水稻贡献率则降低, 表明碱性土壤环境显著加剧小麦的 Cd 暴露风险。文章进一步讨论了碱性土壤 Cd 的赋存形态及其影响因素, 分析了旱作碱性土壤小麦根际界面 Cd 分配过程与形态转化驱动机制, 探讨了小麦 Cd-微量元素吸收转运互作效应。未来需加强小麦根际界面 Cd 迁移转化过程与 Cd-微量元素吸收转运的分子互作机制研究, 以发展适配碱性 Cd 污染土壤特性的小麦安全生产技术体系。

**关键词:** 小麦; 镉; 碱土; 根际; 污染耕地安全利用

中图分类号: X53 文献标志码: A

## Mechanisms of High Cadmium Accumulation by Wheat Grown in Alkaline Soils and Prospects for Mitigation Strategies

GAO Yan<sup>1, 2†</sup>, FAN Guangping<sup>1, 2</sup>, LI Yuntao<sup>1, 2</sup>, SHI Gaoling<sup>1, 2</sup>, TONG Fei<sup>1, 2</sup>, LI Jiangye<sup>1, 2</sup>, Chen Wei<sup>1, 2</sup>, GE Chenghao<sup>3</sup>, ZHOU Dongmei<sup>3†</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Key Laboratory of Agro-Environment in Downstream of Yangtze Plain, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China; 3. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

**Abstract:** Wheat, serving as a staple food for one-third of the global population, has long been overlooked in terms of its grain

\* 江苏省农业科技自主创新资金项目 (CX (24) 1001) 和国家自然科学基金项目 (41907114, 32201385, 4237071475) 资助 Supported by the Agricultural Science and Technology Innovation Fund of Jiangsu Province (No. CX (24) 1001) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41907114, 32201385, 4237071475)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: ygao@jaas.ac.cn; dmzhou@nju.edu.cn

作者简介: 高岩 (1978—), 女, 吉林敦化人, 研究员, 主要从事土壤污染修复与改良相关领域的研究工作。E-mail: ygao@jaas.ac.cn

收稿日期: 2025-02-06; 收到修改稿日期: 2025-05-29; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-08-25

cadmium (Cd) accumulation capacity and the resulting dietary exposure risks. By integrating analyses of global literature and our recent research findings, this study preliminarily clarified that wheat grown in contaminated alkaline soils exhibited high Cd accumulation capacity with elevated risks of exceeding food safety thresholds. In rice-wheat rotation farmland systems, the Cd enrichment factor of wheat grains at the same sampling points was significantly higher than that of rice. Remarkably, wheat grains exceeded China's food safety standard in alkaline soils even when the Cd contents remained below the national risk screening threshold. Elevated soil pH levels induced a pronounced increase in wheat's contribution to adult daily dietary cadmium intake, while concurrently reducing rice's contribution, demonstrating that alkaline soil conditions amplify Cd exposure risks specifically through wheat-derived dietary pathways. The article further discussed the Cd speciation in alkaline soils and their influencing factors, analyzed the mechanisms related to Cd migration and its chemical binding forms at the root-soil interface, and explored the interaction effects between Cd and trace elements during uptake and translocation by wheat. In order to develop wheat-safe production technologies adapted to the characteristics of alkaline Cd-contaminated soils, future research should strengthen investigations into the molecular mechanisms of Cd interface processes in the wheat rhizosphere and Cd-trace elements interactions on uptake and translocation by roots.

**Key words:** Wheat; Cadmium; Alkaline soil; Rhizosphere; Safe utilization of polluted farmland

近四十年来,我国工业化进程的快速推进导致部分区域农田土壤镉(Cd)污染问题日益凸显。据《全国土壤污染状况调查公报》(2014)显示,我国耕地土壤Cd点位超标率达7.0%,在8种主要重金属污染物中居首位<sup>[1]</sup>。为应对这一环境问题,2019年我国全面开展土壤环境质量类别划分工作,将轻、中度Cd污染耕地划为安全利用类耕地,实行耕地分类管理。安全利用类耕地土壤中Cd的含量相对较低,对植物、土壤动物和微生物不会产生明显毒害效应,但Cd仍能从土壤向作物可食部位迁移<sup>[2]</sup>,进而威胁农产品质量安全。因此,亟需通过采取安全利用措施以保障农作物安全生产。

小麦是人类获取蛋白质和能量的主要来源,全球近三分之一的人口以小麦作为主粮<sup>[3]</sup>,而中国近四成人口以小麦作为主粮,并且随着经济的发展,居民饮食结构发生改变,小麦制品的消费量仍不断提升<sup>[4]</sup>。值得注意的是,近年来我国小麦籽粒Cd含量超标的报道日益增多。一方面,现行小麦Cd限量标准( $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )较水稻严苛1倍;另一方面,基于本团队近期在稻麦轮作农田相同位点样本的系统分析<sup>[5]</sup>,小麦籽粒Cd富集系数( $0.036\sim 3.77$ ,均值0.37)明显高于水稻( $0.0044\sim 2.72$ ,均值0.19)。酸性土壤小麦籽粒Cd超标率达44.9%,而偏碱性土壤( $\text{pH}>7.5$ )仍维持较高的超标率(37.6%),且当土壤Cd含量低于风险筛选值(GB 15618-2018)时,30.0%小麦籽粒Cd含量仍达 $0.12\sim 0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,超过食品安全限值(GB 2762-2022)。应用稻麦混合摄

入模型估算发现,土壤pH升高( $5.78\rightarrow 8.56$ )导致小麦籽粒对膳食Cd暴露总量的贡献率在南方饮食模式中从50.2%增至57.9%,在北方模式中从82.7%升至89.1%,而水稻贡献率分别下降7.66%与6.45%。这种差异源于土壤pH提升对小麦籽粒Cd累积的限制作用较水稻更弱。

碱性土壤中小麦Cd累积能力显著高于水稻的机制可归结为以下生物地球化学耦合过程:(1)稻田淹水期形成的厌氧环境促使硫酸盐还原菌介导 $\text{SO}_4^{2-}\rightarrow\text{S}^{2-}$ 转化,生成难溶性CdS沉淀,而旱作条件下氧化态占主导,土壤Cd的生物有效性相对提升<sup>[6]</sup>;(2)小麦根系通过分泌小分子有机酸、铁载体等过程活化根际土壤中必需微量元素(Fe、Mn、Cu、Zn等)的同时<sup>[7-8]</sup>,也增加了土壤Cd的生物可利用性;(3)小麦与水稻从根系向地上部转运Cd的能力和机制也存在显著差异<sup>[9]</sup>。当前研究对碱性旱地土壤Cd释放动力学机制、小麦根际微界面Cd形态转化过程及根系Cd-微量元素吸收转运的互作机制等关键环节仍缺乏系统性解析。

本文将围绕碱性旱地土壤(包括 $\text{pH}>7.0$ 的弱碱性及碱性土壤)小麦Cd超标风险高的特点,解析碱性土壤中小麦Cd的累积特征与膳食暴露风险,剖析影响碱性土壤Cd赋存形态、小麦根际土壤Cd形态转化的因素与潜在机制,探讨根系Cd-微量元素吸收转运互作机制,提出碱性土壤小麦Cd累积的阻控策略,为进一步研发高效阻控小麦Cd累积的技术措施提供理论指导。

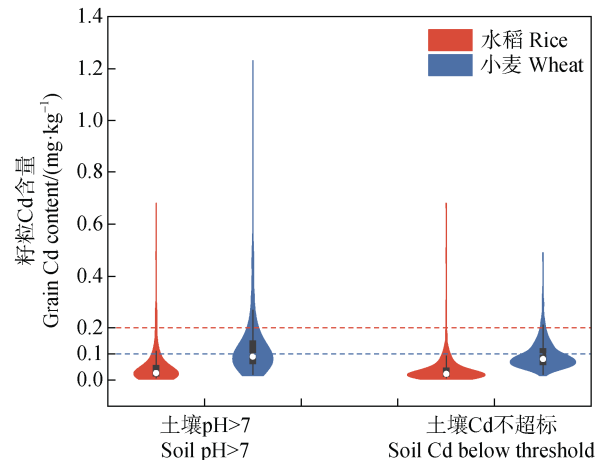
## 1 碱性土壤小麦 Cd 累积特征与膳食暴露风险

通过系统整合 42 篇发表文献数据（大田试验 11 篇、盆栽试验 31 篇，样本总量  $n=384$ ）及本团队在太湖和长江流域稻麦轮作农田的观测结果（ $n=1070$ ）<sup>[5]</sup>，发现小麦籽粒 Cd 的高累积特征主要体现在两个方面：

（1）弱碱性土壤中小麦籽粒 Cd 累积仍较高。水稻与小麦籽粒 Cd 累积能力的对比分析显示，土壤 pH 高于 7.0 条件下（土壤 Cd 含量范围  $0.039\sim 4.78\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），小麦籽粒 Cd 含量均值和中位值仍达到  $0.099$  和  $0.090\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，且 39.0% 以上籽粒 Cd 含量超过  $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ （图 1）。富集系数分析表明，小麦籽粒 Cd 富集系数均值和中位值分别为 0.43 和 0.36，较水稻高约 1.5 倍（水稻籽粒 Cd 富集系数均值 0.17，中位值 0.13）。国内外数据对比分析显示（表 1），当土壤 pH 为  $7.26\sim 8.55$  时（土壤 Cd 含量  $0.26\sim 5.75\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），小麦籽粒 Cd 含量范围为  $0.02\sim 1.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，75% 以上的小麦籽粒 Cd 含量超过  $0.1\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，其中 14.6% 的小麦籽粒 Cd 含量在  $0.1\sim 0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间。

（2）土壤 Cd 不超标时小麦籽粒 Cd 超标率仍较高。在土壤 Cd 含量不超标的情况下，小麦籽粒 Cd 含量均值（ $0.095\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）及中位值（ $0.082\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）显著高于水稻（均值  $0.13\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，中位值  $0.075\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ），

其超标率（28.3%）为水稻的 40 倍（水稻超标率 0.7%）<sup>[5]</sup>。进一步分析已发表数据（表 1），当碱性



注：数据来源于文献[5]数据的再分析，分别在土壤 pH>7 或土壤 Cd 含量不超过风险筛选值的样本中统计稻麦籽粒 Cd 含量。研究区域水稻品种为南粳 46，小麦品种为扬麦 25。Note: Data were derived from a reanalysis of data from published articles [5]. The Cd contents of rice and wheat grains were summarized in soil samples with soil pH > 7 or soil Cd content below the corresponding Cd risk screening values. In the study area, the rice variety is the Japonica rice variety NanJing46, and the wheat variety is the common wheat variety Yangmai 25.

图 1 稻麦轮作农田相同点位采集的水稻与小麦籽粒 Cd 含量对比

Fig. 1 Comparison of Cd content in rice and wheat grains collected from the same soil sampling points within rice-wheat rotation farmland

表 1 碱性土壤中小麦籽粒 Cd 累积特征

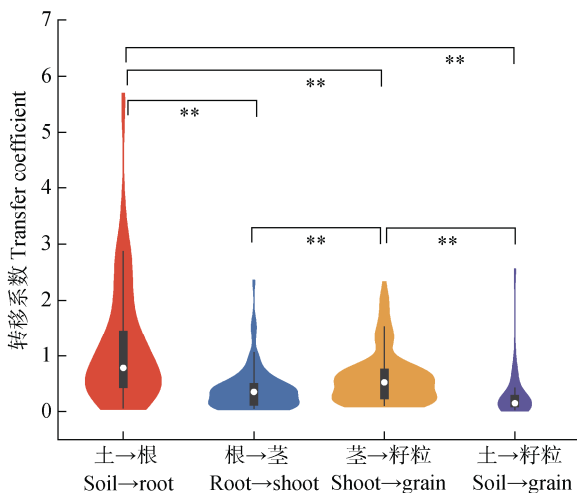
Table 1 Characteristics of Cd accumulation in wheat grain in alkaline soil

	土壤 pH Soil pH	土壤 Cd 含量			籽粒 Cd 含量			籽粒 Cd 超标率 Grain Cd exceeding rate/%
		Soil Cd content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			Grain Cd content/ ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
		最大值 Maximum	最小值 Minimum	中位值 Median	最大值 Maximum	最小值 Minimum	中位值 Median	
土壤 Cd 不超标 Soil Cd below threshold	7~7.5 >7.5	0.28 0.57	0.26 0.30	0.27 0.38	0.20 1.05	0.04 0.02	0.06 0.08	33.3 20.0
土壤 Cd 超标 Soil Cd above threshold	7~7.5 >7.5	5.00 5.75	0.40 0.65	1.57 2.28	0.29 1.21	0.04 0.03	0.11 0.30	60.0 89.2

注：通过 Web of Science 检索关键词“alkaline + soil + wheat + grain + cadmium”收集文献，共检索文献 76 篇，其中有效文献 42 篇。从每篇论文中提取土壤 Cd 含量、籽粒 Cd 含量、籽粒 Cd 超标率的平均值进行统计与展示。Note: Literature was collected through a Web of Science search with the keywords “alkaline + soil + wheat + grain + cadmium”, and a total of 76 papers were searched, of which 42 were valid. The average values of soil Cd content, grain Cd content, and grain Cd exceedance rate were extracted from each paper for statistics and presentation.

土壤中总 Cd 含量低于风险筛选值时, 小麦籽粒 Cd 超标率仍高达 33.3% (pH 7~7.5) 和 20.0% (pH>7.5), 表明碱性土壤 Cd 不超标时小麦籽粒的超标风险仍较高。

小麦籽粒 Cd 累积特征受根系吸收及地上部转运的双重调控。基于文献数据整合分析(图 2), 小麦根系对 Cd 的富集系数(1.15)显著高于其根-茎(0.39)和茎-籽粒(0.60)的转移系数。对比 Meta 分析结果<sup>[10]</sup>, 尽管水稻根系 Cd 富集系数(4.6)显著高于本文分析的小麦根系 Cd 富集系数(1.15), 但水稻根-茎转移系数(0.10)不足小麦(0.39)的 1/3, 且茎-籽粒转移系数(0.12)仅为小麦(0.60)的 20%。上述结果表明, 小麦通过从根部向地上部的 Cd 转运过程(尤其是茎-籽粒转运阶段), 显著提升籽粒 Cd 累积量。研究进一步证实<sup>[11-13]</sup>, 相较于水稻, 小麦根系吸收的 Cd 更易向地上部迁移, 且在低 Cd 暴露条件下, 小麦根茎系统中 40%~45% 的 Cd 可最终转运至籽粒<sup>[9]</sup>。



注: 数据来源同表 1, 对文献中小麦不同部位的 Cd 富集/转移系数的平均值进行统计。Note: The data source is the same as Table 1, and the mean values of Cd enrichment/transfer coefficients of different parts of wheat in the literature were counted.

图 2 碱性土壤中小麦不同部位的 Cd 富集/转移系数  
Fig. 2 Cd enrichment/transfer coefficients of different parts of wheat in alkaline soil

膳食摄入是人体 Cd 暴露的最主要途径, 因此必须严格限制谷物中 Cd 含量。我国《食品安全国家标准》(GB 2762-2022) 设定小麦籽粒 Cd 限量值为  $0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 与澳大利亚、新西兰标准一致, 但

较国际食品法典委员会 (CODEX)、欧盟、新加坡及中国香港地区小麦面粉标准 ( $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 更严格。依据欧洲食品安全局 (EFSA) 建议, 人体 Cd 每日可耐受摄入量 (PTDI) 为  $0.36 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ BW}\cdot\text{D}^{-1}$ 。稻麦轮作系统研究表明<sup>[5]</sup>, 在 Cd 未超标的碱性农田 (pH>7.5) 中, 成人小麦 Cd 膳食暴露风险显著高于水稻: 当土壤 Cd 含量处于  $0\sim 0.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  与  $0.3\sim 0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  范围时, 成人日均小麦 Cd 摄入量均值分别为  $0.36$  与  $0.51 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ BW}\cdot\text{d}^{-1}$ , 超过 PTDI 的比例达 35.1% 和 71.1%, 而摄入稻米时, 保障成人日均膳食 Cd 摄入量对应比例仅为 2.6% 和 3.9%。进一步通过谷物混合摄入模型分析发现<sup>[5]</sup>, 当土壤 pH>7.5 时, 保障成人日均膳食 Cd 摄入量不超过 PTDI 的土壤 Cd 阈值仅为  $0.41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远低于现行碱性旱地土壤 (pH>7.5) 的 Cd 风险筛选值 ( $0.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , GB 15618-2018)。

## 2 碱性土壤 Cd 的赋存形态与主要影响因素

钙质碱性土壤源于石灰性成土母质发育过程, 其典型特征为碳酸钙 ( $\text{CaCO}_3$ ) 富集 ( $50\sim 150 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 占土壤总钙含量的 90% 以上, 且有机质含量普遍较低<sup>[14-15]</sup>。高酸溶态钙含量和高 pH 是影响 Cd 生物有效性的重要因子<sup>[16]</sup>。 $\text{CaCO}_3$  水解释放  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{CO}_3^{2-}$  及  $\text{OH}^-$ , 因  $\text{Ca}^{2+}$  离子半径 ( $0.99 \text{ \AA}$ ) 与  $\text{Cd}^{2+}$  ( $0.97 \text{ \AA}$ ) 相近, 导致发生离子交换反应, 进而被  $\text{CaCO}_3$  化学吸附形成  $\text{CdCO}_3$  沉淀<sup>[17]</sup>; 同时,  $\text{Cd}^{2+}$  通过同晶置换作用占据  $\text{CaCO}_3$  晶格中的  $\text{Ca}^{2+}$  位点, 促使可交换态 Cd 向碳酸盐结合态转变<sup>[18]</sup>。

低 Cd 浓度条件下,  $\text{CaCO}_3$  矿物表面优先形成 ( $\text{Cd}, \text{Ca}$ ) $\text{CO}_3$  固溶体, 对 Cd 表现出高吸附亲和力; 当 Cd 浓度升高时, 方解石表面以  $\text{CdCO}_3$  沉淀覆盖为主, 导致溶液相  $\text{CaCO}_3$  欠饱和并诱发 pH 下降<sup>[19-20]</sup>。研究表明, 北方碱性土壤中碳酸盐结合态 Cd 占比高达 38%~41%, 远高于南方酸性土壤 (5.7%~16.2%)<sup>[21-22]</sup>。X 射线吸收精细结构光谱 (XAFS) 分析证实<sup>[23]</sup>, 钙质碱性土壤对 Cd 的固持机制涵盖内层络合吸附、碳酸盐共沉淀及外层扩散吸附等多界面耦合过程。

$\text{CaCO}_3$  含量较低的弱碱性土壤中, 有机质及铁

锰矿物共同构成 Cd 的多界面吸附体系。机制研究表明, 有机质通过静电引力作用与配位络合机制, 与  $\text{Ca}^{2+}$  结合形成有机-钙复合体 (OM-Ca) [24-25], 该复合体对  $\text{Cd}^{2+}$  具有较高的亲和力, 可通过表面络合、吸附降低土壤 Cd 生物有效性。然而, 在根际微域作物分泌有机酸作用下, OM-Ca 结构可发生解离, 导致部分吸附态 Cd 的二次释放[20, 26]。

钙质碱性土壤中含有一定比例 (5.8%~12.7%) 的铁锰氧化物, 其可通过表面配位作用专性吸附 Cd 或通过 Fe-Cd 共沉淀机制实现 Cd 的固定, 且 pH 的增加会增强 Cd 在铁锰氧化物表面的结合强度[12, 27]。前期研究表明, 在碱性麦田土壤中外源添加巯基坡缕石、铁锰矿物等土壤调理剂, 均可显著提高小麦根际及非根际土壤中铁锰结合态 Cd 含量, 进而降低小麦籽粒 Cd 累积[28-30]。上述证据系统揭示了铁锰氧化物在碱性土壤 Cd 的生物有效性调控中的界面主导效应。

在有机质含量较低的高钙质碱性土壤中, 低有机质含量条件下,  $\text{Ca}^{2+}$  占据土壤有机碳结合位点, 限制土壤有机碳积累过程, 同时  $\text{CaCO}_3$  固相与有机质对 Cd 的竞争吸附效应显著弱化有机质对 Cd 形态调控的实际贡献[14-15]。研究证实, 外源重金属 (Pb、Cu) 在石灰性土壤中呈现由可交换态/有机结合态向碳酸盐结合态及铁锰氧化态转化的再分配趋势, 且该趋势随着  $\text{CaCO}_3$  含量的增加而增强[31]。

值得注意的是, 小麦根系分泌物 (如柠檬酸、苹果酸) 通过络合溶解作用动态调控  $\text{CaCO}_3$  的沉淀-溶解平衡, 进而显著改变 Cd 在碳酸盐-溶液界面的吸附-解吸行为。因此, 系统解析小麦根际微域中  $\text{CaCO}_3$  介导的 Cd 形态转化过程, 并阐明  $\text{CaCO}_3$  矿物-有机质-铁锰氧化物三元体系的界面交互作用机制[16, 24], 将有助于深化对碱性土壤 Cd 生物地球化学循环的认知, 提升小麦种植体系下 Cd 生物有效性的动态预测精度。

### 3 碱性土壤小麦根际界面 Cd 分配过程与形态转化

植物根系对根-土界面元素的截获吸收是其获取金属离子的重要途径。根系表皮细胞壁多糖分子中的羧基 (-COOH) 和羟基 (-OH) 官能团经去质

子化作用产生表面负电荷, 可通过静电引力吸附土壤溶液中的  $\text{Cd}^{2+}$  等阳离子, 其中部分离子可经阳离子交换反应解吸并在根系细胞质外体空间积累[32]。根系截获能力与其在土壤中所占的体积有关, 尽管作物根系的体积占比通常小于 1% [33], 但小麦根系 Cd 含量可达茎部的数倍至数十倍、籽粒的数十倍乃至数百倍[34], 暗示质流作用 (蒸腾驱动) 和扩散作用 (浓度梯度驱动) 对  $\text{Cd}^{2+}$  向根-土界面的迁移和分配过程具有协同贡献[35]。需特别指出, 扩散过程主要发生于水分饱和的土壤孔隙系统[33, 36], 而雨养模式下的小麦田土壤含水量呈现显著的时空异质性, 其动态变化通过调控  $\text{Cd}^{2+}$  迁移路径 (质流/扩散相对贡献率) 直接影响根表 Cd 通量。

植物对 Cd 的累积程度取决于土壤固相-溶液相  $\text{Cd}^{2+}$  的动态平衡能力, 该过程受控于质流迁移、扩散传输及根系截获吸收的多机制耦合效应。在碱性旱作土壤系统中, 小麦根系为应对 Fe、Mn、Cu、Zn 等元素生物有效性不足的胁迫, 通过分泌小分子有机酸 (草酸、柠檬酸、琥珀酸等) 与铁载体 (甲磺酸去铁胺 DFOM, 铁色素 ferrichrome, 非编码氨基酸尼克胺 NA 等), 活化根际微域中微量元素的同时, 也增强了土壤固相对 Cd 的释放[7]。

前期研究表明, 有机酸-铁载体协同作用可打破铁矿物在 pH 6~7 范围内 (碱性土壤根际酸碱环境) 的表面稳态, 通过配位溶解途径促进  $\text{Fe}^{3+}$ - $\text{Cd}^{2+}$  的共释放[8, 37-38]。此外, 小分子有机酸作为多齿配体, 通过与  $\text{Ca}^{2+}$ / $\text{Mg}^{2+}$  及其他金属离子形成稳定络合物, 加速碳酸盐矿物溶解并调控铁氧化物表面  $\text{Cd}^{2+}$  的吸附-解吸平衡[39-42]。

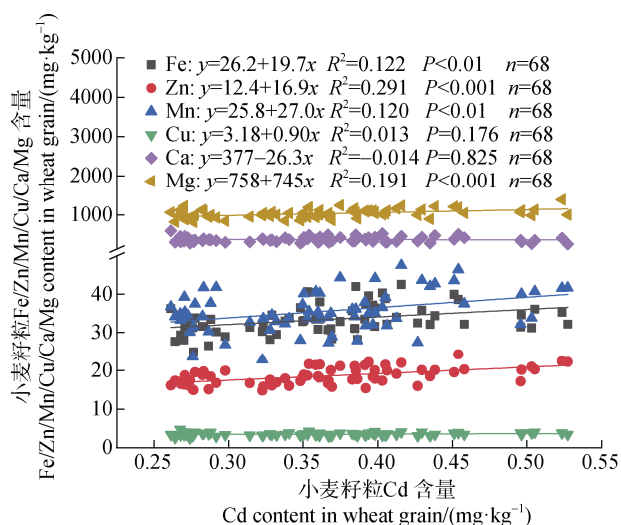
旱作根际微域环境与稻田存在较多差异, 当前研究瓶颈在于: 小麦根际环境中  $\text{Fe}^{3+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cd}^{2+}$  在矿物-有机质-根系界面的多相反应路径及其对 Cd 形态转化的调控机制尚未建立完整理论框架。现有认知主要基于化学连续提取法的形态分级数据, 而涉及微观尺度界面过程与分子水平调控机制的解析仍亟待突破。

### 4 碱性土壤小麦根系 Cd-微量元素吸收转运互作机制

土壤溶液中的  $\text{Cd}^{2+}$  经由根表皮细胞间隙与细胞

壁-质膜间隙构成的质外体空间迁移至内皮层时,一部分受凯氏带物理屏障阻隔而无法通过被动运输进入中柱。解剖学证据表明, Cd 胁迫可诱导根部凯氏带木质化和木栓化程度增强,进一步强化质外体途径运输的限制效应<sup>[43-44]</sup>。未被质外体滞留的  $\text{Cd}^{2+}$  则通过 ZIP、NRAMP 等转运体家族介导的跨膜运输进入到细胞质中,其中的少部分通过液泡膜转运蛋白(如 TaHMA3)区隔化储存于液泡和其他细胞器中,剩余部分通过相关转运蛋白主动装载至木质部/维管束,最终通过蒸腾流转运至地上部,随后通过韧皮部运输被分配至各组织器官<sup>[43]</sup>。

土壤有效态  $\text{Cd}^{2+}$  的跨膜运输主要依赖低选择性阳离子转运系统的共质体途径实现,其分子载体包括铁调节转载体 ( $\text{IRT}_S$ )、锌铁调节转运蛋白 (ZIPs) 及天然抗性相关巨噬细胞蛋白 (Nramp) 家族等<sup>[45-50]</sup>。基于本团队前期品种筛选数据再分析 ( $n=68$ )<sup>[51]</sup>,小麦籽粒 Cd 含量与 Fe、Zn、Mn 等微量元素呈现显著正相关 ( $P<0.01$ ) (图 3)。在碱性旱作土壤中,小麦通过分泌两类铁载体调控 Cd 吸收:(1) 非编码氨基酸型铁载体直接与氧化铁矿物中的  $\text{Fe}^{3+}$  形成可溶性六配体<sup>[52]</sup>;(2) 麦根酸类铁载体 (MAs) 与  $\text{Fe}^{3+}$  形成 1:1 型可溶性络合物<sup>[45]</sup>,经 YSL (yellow stripe 1-like) 转运蛋白跨膜进入根细



注:数据来源于已发表文献[51]数据的再分析。Note: Data from reanalysis of data from published literature [51].

图 3 小麦籽粒 Fe/Zn/Mn/Cu/Ca/Mg 含量与小麦籽粒 Cd 含量的一元线性回归分析

Fig. 3 One-way linear regression analysis of Fe/Zn/Mn/Cu/Ca/Mg content in wheat grain versus Cd content in wheat grain

胞<sup>[52-53]</sup>。需特别指出, YSL 家族虽可介导  $\text{Cu}^{2+}/\text{Zn}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$  等金属-载体复合物转运<sup>[53-55]</sup>,但其表达调控的代谢信号网络尚未完全解析,且缺 Fe/Fe 充足条件下  $\text{Cd}^{2+}$  是否通过 YSL 蛋白进行跨膜运输仍存争议。

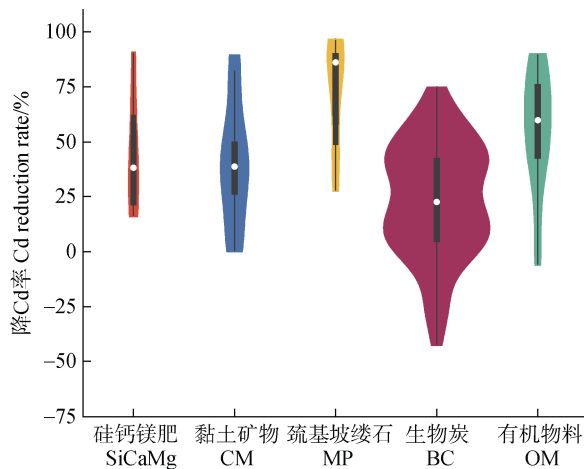
对比水稻 Cd 转运机制发现, OsLCT1 低亲和阳离子转运体在高  $\text{Ca}^{2+}$  条件下对  $\text{Cd}^{2+}$  的转运活性被显著抑制<sup>[50, 56-57]</sup>,而小麦根际高  $\text{CO}_2$  分压与有机酸分泌显著促进  $\text{Ca}^{2+}$  溶出,其与  $\text{Cd}^{2+}$  吸收的协同/拮抗效应阈值尚未明确。以往对水稻吸收、转运 Cd 的分子机制研究较多,小麦  $\text{Cd}^{2+}$  与其他金属离子 ( $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}/\text{Cu}^{2+}/\text{Zn}^{2+}/\text{Mn}^{2+}$ ) 的转运竞争互作效应和机制仍待进一步深入探究,这将为研发精准拮抗 Cd 吸收的优化施肥技术提供理论支撑。

## 5 碱性土壤小麦 Cd 累积的阻控策略探讨

小麦籽粒 Cd 的累积主要源于根系吸收与向地上部的直接转运过程,而营养器官 Cd 的再分配贡献相对有限<sup>[58]</sup>。因此,抑制小麦根系 Cd 吸收及其向地上部的转运是降低小麦籽粒 Cd 累积的重要机制。当前 Cd 污染农田安全利用技术中,基于钝化剂的化学固定技术因见效快与稳定性好被广泛采用<sup>[59]</sup>。需特别指出,多数商业土壤调理剂富含钙镁硅等元素,主要通过提高土壤 pH 及  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  介导的沉淀-吸附效应降低 Cd 生物有效性,但其在碱性土壤中的应用面临双重限制:(1) 高本底 pH 弱化了钝化剂通过提高土壤 pH 降低 Cd 有效性的调节效果;(2) 长期施用引发土壤中  $\text{Ca}^{2+}$  累积,加剧土壤板结与性质恶化<sup>[60-61]</sup>。

近年研究表明, 巯基坡缕石等新型钝化剂在降低碱性土壤小麦 Cd 累积方面具有较好的效果<sup>[62-63]</sup>。整合碱性土壤小麦 Cd 累积文献数据集的分析表明(图 4),不同类型钝化剂对小麦籽粒的降 Cd 效果存在显著差异:巯基坡缕石的降 Cd 效果(均值 74.2%)显著优于传统黏土矿物类(均值 39.6%)、硅钙镁肥类(均值 44.6%)和生物炭类(均值 24.4%)。然而,钝化剂措施仍难以保障碱性土壤中小麦的安全生产。田间试验数据显示,相较于其他钝化剂(小麦籽粒 Cd 达标率均  $<15\%$ ),巯基坡缕石处理的小麦籽粒 Cd 达标率(38.4%)虽显著提升,但距完全达标仍存在较大差距。巯基坡缕石的区域适配性与长期

环境稳定性仍需通过多区域验证与长期定位监测进行系统评估。



注：数据来源同表 1 中文献。Note: Data was extracted from literature collected in Table 1.

图 4 不同种类钝化剂降低小麦籽粒 Cd 积累的效果

Fig. 4 The effect of different types of passivators on reducing Cd accumulation in wheat grains

在轻度 Cd 污染的碱性土壤中，部分微量元素能够调节根际重金属的生物有效性<sup>[64]</sup>，或通过拮抗作用抑制作物对 Cd 的吸收转运过程<sup>[65-67]</sup>。已有较

多研究表明，施加铁、锰、锌肥可有效降低小麦籽粒中的 Cd 累积量<sup>[64, 68-71]</sup>。然而，过量施用锌肥可能诱导小麦体内产生更多与  $Zn^{2+}$  相关的转运蛋白，从而增强对  $Cd^{2+}$  的转运能力<sup>[72-73]</sup>，因此锌肥的施用效果很大程度上取决于土壤中 Cd/Zn 摩尔比及 pH 条件<sup>[74]</sup>。改变锰肥和锌肥的种类，如采用沸石负载锰氧化物或纳米氧化锌等形态，有望进一步提升抑制小麦 Cd 累积的效率<sup>[68, 75]</sup>。铁肥的施用对调控小麦根际 Cd 有效性及减少 Cd 向地上部的转运表现出积极效果，但其效应与铁肥的化学形态（如  $FeCl_3$ 、 $FeSO_4$ 、 $Fe_2(SO_4)_3$ 、EDTA- $Na_2Fe$ ）、施用量及施用方式密切相关<sup>[76-77]</sup>。

根据已发表数据的统计分析（表 2），尽管施用锰肥（降幅 14.6%~65.3%）、锌肥（降幅 7.2%~82.3%）和铁肥（降幅 2.8%~33.1%）均能够降低碱性土壤中小麦籽粒 Cd 含量，但仅当土壤 Cd 处于低污染水平时（1.1~1.4  $mg \cdot kg^{-1}$ ），部分锌肥处理可将小麦籽粒 Cd 含量降低至食品安全限值 0.1  $mg \cdot kg^{-1}$  以下。因此，关于如何精准施用锌、锰、铁肥料以调控小麦 Cd 累积的技术，其在施用策略的准确性与适用条件方面仍需进一步系统研究。

表 2 碱性土壤中施用微量元素降低小麦籽粒 Cd 积累的效果

Table 2 Effects of trace elements application on reducing Cd accumulation in wheat grain in alkaline soil

微量元素种类 Trace element	土壤 Cd 含量 Soil Cd content/ ( $mg \cdot kg^{-1}$ )	籽粒降 Cd 效果 Reduction in grain Cd/%	施用后小麦籽粒达标率	
			Compliance rate of wheat grain after treatment	参考文献 References
锰 Mn	1.9~3.7	14.6~65.3	0	[64-65, 68, 71]
锌 Zn	1.1~1.4	11.5~67.0	37.5%	[66, 78]
	1.8~2.0	7.2~82.3	0	[69-70, 74, 79]
铁 Fe	0.5~1.0	2.8~33.1	0	[76, 80-81]

在碱性土壤中，土壤总 Cd 含量是影响小麦籽粒 Cd 累积的关键因素<sup>[5]</sup>。因此，在 Cd 含量较高的土壤条件下，Cd 减量移除是保障小麦安全生产的关键。在我国实行“严禁非农化”土地政策的背景下，针对大面积农田推行“边生产，边移除”的策略显得尤为重要。已有研究表明，某些农作物（如玉米、油菜）表现出秸秆 Cd 积累量高而籽粒 Cd 超标风险较低的特性。例如，在重度 Cd 污染农田（土壤 Cd

含量为 2.20  $mg \cdot kg^{-1}$ ，pH 为 5.36）中，Cd 仍主要累积在玉米秸秆中，其秸秆 Cd 含量可达 4.07  $mg \cdot kg^{-1}$ ，而籽粒中 Cd 含量仅 0.07  $mg \cdot kg^{-1}$ <sup>[82]</sup>。同样，当土壤 Cd 含量高达 7.23  $mg \cdot kg^{-1}$  时，油菜品种“浙油 51”的秸秆 Cd 含量可达 26.0  $mg \cdot kg^{-1}$ ，但其籽粒 Cd 含量仅为 0.41  $mg \cdot kg^{-1}$ ；此外，Cd 从油菜籽向菜籽油的转移率也较低，仅介于 2%至 10%之间<sup>[83-84]</sup>。然而，目前依靠秸秆移除实现土壤 Cd 污染修复的效

率仍较为有限<sup>[85]</sup>。针对偏碱性土壤, 仍需通过施用农用有机酸液体肥等方式, 强化作物根系对 Cd 的活化-吸收耦合效应, 从而有效降低土壤 Cd 含量, 使其尽快达到小麦安全生产的阈值要求。

## 6 结论与展望

轻、中度 Cd 污染的碱性土壤中, 小麦籽粒 Cd 含量、富集系数及超标率仍较高, 引起的膳食暴露风险不容忽视, 需加强现行土壤 Cd 污染风险筛选值、小麦籽粒 Cd 限量标准和膳食暴露风险之间的科学关联研究; 碱性土壤中小麦根际界面 Cd 的分配过程、赋存形态转化及驱动机制研究尚显薄弱, 小麦对 Cd 与其他微量元素的吸收、转运互作机制研究也有待加强, 这将为发展有效的小麦安全生产技术提供重要理论依据:

1) 小麦籽粒 Cd 富集能力强、超标风险高。通过数据分析发现, 弱碱性或碱性土壤中 (pH7.26~8.55, Cd 含量为 0.26~5.75 mg·kg<sup>-1</sup>), 75%以上的小麦籽粒 Cd 含量超过 0.1 mg·kg<sup>-1</sup>, 并且当土壤 Cd 含量低于其风险筛选值时, 对应的小麦籽粒超标率仍达 25.0%。稻麦轮作系统中, 小麦籽粒 Cd 富集系数 (0.46) 明显高于水稻 (0.12), 其根-茎 Cd 转移系数 (0.39) 显著高于水稻 (0.10), 对小麦籽粒累积 Cd 具有重要贡献。

2) 碱性土壤中, 小麦籽粒对 Cd 的高累积导致其亦具有较高的 Cd 暴露风险。稻麦轮作农田中, 土壤 Cd 含量低于其风险筛选值时, 小麦籽粒 Cd 暴露量超过 PTDI 推荐值的比例达 35.1%和 71.1%, 远高于水稻。谷物混合摄入模型分析表明, 当土壤 pH>7.5 时, 满足 PTDI 推荐值的土壤 Cd 含量阈值为 0.41 mg·kg<sup>-1</sup>, 远低于现行碱性旱地土壤 (pH>7.5) 中的 Cd 风险筛选值。

3) 碱性旱作土壤中, 小麦通过根系分泌有机酸与铁载体活化生长所必需的微量元素, 进而影响根际土壤铁锰矿物氧化还原过程、形态转化及 Cd 在矿物表面的吸附解吸行为, 但其对根际土壤 Cd 的形态转化影响的相关微观分子机制及 Cd 与 Fe<sup>3+</sup>/Zn<sup>2+</sup>/Mn<sup>2+</sup>/Ca<sup>2+</sup> 等的吸收转运互作效应仍需进一步深入探究, 从而为研发根际 Cd 有效性精准调控技术及精准拮抗 Cd 吸收的优化施肥技术提供理论支撑。

4) 麦季 Cd 污染控制是亟待突破的难题, 土壤调理剂降低碱性土壤中小麦籽粒 Cd 含量的效果有限。新型钝化剂巯基坡缕石降低小麦籽粒 Cd 累积的效果虽优于传统黏土矿物、硅钙镁肥和生物炭类钝化剂, 但小麦籽粒 Cd 达标率仍较低。碱性土壤中施用微量元素功能肥料抑制小麦籽粒 Cd 累积的效果取决于微量元素含量、土壤 Cd 含量、pH 与肥料类型, 精准施用锌、锰、铁肥调控小麦 Cd 累积的技术仍需进一步深入研究。在中、重度 Cd 污染土壤中, 土壤 Cd 的减量移除是保障小麦安全生产的关键。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources. Bulletin of national soil pollution survey[J]. Natural Resources Newsletter, 2014, 8: 26—29. [环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 自然资源通讯, 2014, 8: 26—29.]
- [ 2 ] Wang Y, Gao P P, Shang Y M, et al. Trade-offs of reproductive growth and Cd remobilization regulated Cd accumulation in wheat grains (*Triticum aestivum* L.) [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 476: 135166.
- [ 3 ] Dong C H, Zhang L C, Zhang Q, et al. *Tiller Number1* encodes an ankyrin repeat protein that controls tillering in bread wheat[J]. Nature Communications, 2023, 14: 836.
- [ 4 ] Batis C, Sotres-Alvarez D, Gordon-Larsen P, et al. Longitudinal analysis of dietary patterns in Chinese adults from 1991 to 2009[J]. British Journal of Nutrition, 2014, 111 ( 8 ): 1441—1451.
- [ 5 ] Li Y T, Fan G P, Gao Y, et al. Wheat tends to accumulate higher levels of cadmium in the grains than rice under a wide range of soil pH and Cd concentrations: A field study on rice-wheat rotation farmland[J]. Environmental Pollution, 2025, 367: 125574.
- [ 6 ] Li Z M, Liang Y, Hu H W, et al. Speciation, transportation, and pathways of cadmium in soil-rice systems: A review on the environmental implications and remediation approaches for food safety[J]. Environment International, 2021, 156: 106749.
- [ 7 ] Puschenreiter M, Gruber B, Wenzel W W, et al. Phytosiderophore-induced mobilization and uptake of Cd, Cu, Fe, Ni, Pb and Zn by wheat plants grown on metal-enriched soils[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 138: 67—76.
- [ 8 ] Lin Q Q, Wang Y L, Yang X H, et al. Effect of low-molecular-weight organic acids on hematite dissolution promoted by desferrioxamine B[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018,

- 25 (1): 163—173.
- [ 9 ] Yan B F, Nguyen C, Pokrovsky O S, et al. Cadmium allocation to grains in durum wheat exposed to low Cd concentrations in hydroponics[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 184: 109592.
- [ 10 ] Li X F, Zhou D M. A meta-analysis on phenotypic variation in cadmium accumulation of rice and wheat: Implications for food cadmium risk control[J]. *Pedosphere*, 2019, 29 (5): 545—553.
- [ 11 ] Harris N S, Taylor G J. Cadmium uptake and partitioning in durum wheat during grain filling[J]. *BMC Plant Biology*, 2013, 13: 103.
- [ 12 ] Chan D Y, Hale B A. Differential accumulation of Cd in durum wheat cultivars: Uptake and retranslocation as sources of variation[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55 (408): 2571—2579.
- [ 13 ] Yan B F, Nguyen C, Pokrovsky O S, et al. Contribution of remobilization to the loading of cadmium in durum wheat grains: Impact of post-anthesis nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2018, 424 (1): 591—606.
- [ 14 ] Qiao J J, Li Q, Zhao Y, et al. Study on the CaCO<sub>3</sub> content characteristics in conterminous region of Beijing, Tianjin and Hebei[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, 25 (6): 56—59. [乔捷娟, 李强, 赵焯, 等. 京津冀接壤区土壤表土层中碳酸钙的分布规律[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, 25 (6): 56—59.]
- [ 15 ] Tao L, Ma D H, Zhang C Z, et al. Distribution characteristics of calcium forms and their relations with organic carbon content in calcareous soil aggregates[J]. *Soils*, 2021, 53 (4): 715—722. [陶澹, 马东豪, 张丛志, 等. 石灰性土壤团聚体中钙形态特征及其与有机碳含量的关系[J]. *土壤*, 2021, 53 (4): 715—722.]
- [ 16 ] Huang F, Wei X M, Zhu T B, et al. Insights into distribution of soil available heavy metals in Karst area and its influencing factors in Guilin, southwest China[J]. *Forests*, 2021, 12 (5): 609.
- [ 17 ] McBride M B. Chemisorption of Cd<sup>2+</sup> on calcite surfaces[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 (1): 26—28.
- [ 18 ] Mandell G K, Rock P A, Fink W H, et al. Lattice energies of calcite-structure metal carbonates III. Theoretical excess energies for solid solutions (Ca, M)CO<sub>3</sub> [M=Cd, Mn, or Fe][J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 1999, 60 (5): 651—661.
- [ 19 ] Papadopoulos P, Rowell D L. The reactions of cadmium with calcium carbonate surfaces[J]. *European Journal of Soil Science*, 1988, 39 (1): 23—36.
- [ 20 ] Pearson A R, Hartland A, Frisia S, et al. Formation of calcite in the presence of dissolved organic matter: Partitioning, fabrics and fluorescence[J]. *Chemical Geology*, 2020, 539: 119492.
- [ 21 ] Yong Y Y, Yang T T, Wang Y L, et al. Mercapto-palygorskite decreases the Cd uptake of wheat by changing Fe and Mn fraction in Cd contaminated alkaline soil[J]. *Geoderma*, 2024, 441: 116751.
- [ 22 ] Li B, Zhu H H, Zhu Q H, et al. Improving liming mode for remediation of Cd-contaminated acidic paddy soils: Identifying the optimal soil pH, model and efficacies[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2024, 272: 116038.
- [ 23 ] Zhao X L, Takahashi Y, Wu W S, et al. Speciation of Zn and Cd in sierozem soil, northwest China: Bulk EXAFS and micro synchrotron X-ray fluorescence[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2023, 25 (5): 954—963.
- [ 24 ] Wei N, Gu X Y, Wen Y B, et al. Geochemical speciation and activation risks of Cd, Ni, and Zn in soils with naturally high background in karst regions of southwestern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2025, 486: 137100.
- [ 25 ] Shi Z Q, Allen H E, Di Toro D M, et al. Predicting PbII adsorption on soils: The roles of soil organic matter, cation competition and iron (hydr) oxides[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 10 (6): 465—474.
- [ 26 ] Rowley M C, Grand S, Verrecchia É P. Calcium-mediated stabilisation of soil organic carbon[J]. *Biogeochemistry*, 2018, 137 (1): 27—49.
- [ 27 ] Liu L, Wang X M, Zhu M Q, et al. The speciation of Cd in Cd-Fe coprecipitates: Does Cd substitute for Fe in goethite structure?[J]. *ACS Earth and Space Chemistry*, 2019, 3 (10): 2225—2236.
- [ 28 ] Liang X F, Li N, He L Z, et al. Inhibition of Cd accumulation in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in alkaline soil using mercapto-modified attapulgite[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 818—826.
- [ 29 ] Zhang Y, Xu Y M, Liang X F, et al. Rhizosphere effect enhanced the immobilization efficiency of mercapto-palygorskite for Cd in alkaline soil: Mechanism from the perspective of microorganism[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 24 (4): 7713—7728.
- [ 30 ] Lu T, Wang W H, Liu L H, et al. Remediation of cadmium-polluted weakly alkaline dryland soils using iron and manganese oxides for immobilized wheat uptake[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132794.
- [ 31 ] He J. The adsorption and desorption of several calcareous soils with different content calcium carbonate on exogenous pollutants[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2012. [贺婧. 不同碳酸钙含量石灰性土壤对外源污染物的吸附解吸[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2012.]
- [ 32 ] Kahle H. Response of roots of trees to heavy metals[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1993, 33 (1):

- 99—119.
- [ 33 ] Zhang F C. Nutrient transport mechanism of soil-root system and its numerical simulation[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2001. [张富仓. 土壤-根系统养分迁移机制及其数值模拟[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001.]
- [ 34 ] Huang P X. Response and mechanism on different wheat varieties to lead and cadmium[D]. Yangzhou, Jiangsu: Yangzhou University, 2007. [黄萍霞. 不同小麦品种对 Cd、Pb 的响应和机理研究[D]. 江苏扬州: 扬州大学, 2007.]
- [ 35 ] Jungk A O. Dynamics of nutrient movement at the soil-root interface//Plant roots: The hidden half[M]. New York: Verlag Marcel Dekker Inc., 1991.
- [ 36 ] Barber S A. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach[M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc. 1995.
- [ 37 ] Reichard P U, Kretzschmar R, Kraemer S M. Dissolution mechanisms of goethite in the presence of siderophores and organic acids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2007, 71 ( 23 ): 5635—5650.
- [ 38 ] Sadrarhami A, Grove J H, Zeinali H. The microbial siderophore desferrioxamine B inhibits Fe and Zn uptake in three spring wheat genotypes grown in Fe-deficient nutrient solution[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2021, 44 ( 15 ): 2299—2309.
- [ 39 ] Ritschel T, Totsche K U. Reductive transformation of birnessite by low-molecular-weight organic acids[J]. *Chemosphere*, 2023, 325: 138414.
- [ 40 ] Rothwell K A, ThomasArrigo L K, Kaegi R, et al. Low molecular weight organic acids stabilise siderite against oxidation and influence the composition of iron (oxyhydr) oxide oxidation products[J]. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2025, 27( 1 ): 133—145.
- [ 41 ] Hu S W, Zheng L R, Zhang H Y, et al. Sequestration of labile organic matter by secondary Fe minerals from chemodenitrification: Insight into mineral protection mechanisms[J]. *Environmental Science & Technology*, 2024, 58 ( 25 ): 11003—11015.
- [ 42 ] Hu S W, Zhen L R, Liu S H, et al. Synchronous sequestration of cadmium and fulvic acid by secondary minerals from Fe ( II ) -catalyzed ferrihydrite transformation[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2022, 334: 83—98.
- [ 43 ] Liu Y K, Lu M, Tao Q, et al. A comparative study of root cadmium radial transport in seedlings of two wheat ( *Triticum aestivum* L. ) genotypes differing in grain cadmium accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 266: 115235.
- [ 44 ] Zhang D Z, Zhou H, Shao L L, et al. Root characteristics critical for cadmium tolerance and reduced accumulation in wheat ( *Triticum aestivum* L. ) [J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 305: 114365.
- [ 45 ] Suzuki M, Urabe A, Sasaki S, et al. Development of a mugineic acid family phytosiderophore analog as an iron fertilizer[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 1558.
- [ 46 ] Connolly E L, Fett J P, Guerinot M L. Expression of the IRT1 metal transporter is controlled by metals at the levels of transcript and protein accumulation[J]. *Plant Cell*, 2002, 14 ( 6 ): 1347—1357.
- [ 47 ] Ishimaru Y, Takahashi R, Bashir K, et al. Characterizing the role of rice NRAMP5 in manganese, iron and cadmium transport[J]. *Scientific Reports*, 2012, 2: 286.
- [ 48 ] Pottier M, Oomen R, Picco C, et al. Identification of mutations allowing Natural Resistance Associated Macrophage Proteins ( NRAMP ) to discriminate against cadmium[J]. *The Plant Journal*, 2015, 83( 4 ): 625—637.
- [ 49 ] Li L Z, Tu C, Peijnenburg W J G M, et al. Characteristics of cadmium uptake and membrane transport in roots of intact wheat ( *Triticum aestivum* L. ) seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 221: 351—358.
- [ 50 ] Abedi T, Mojiri A. Cadmium uptake by wheat ( *Triticum aestivum* L. ): An overview[J]. *Plants*, 2020, 9 ( 4 ): 500.
- [ 51 ] Yi Q S, Wang Y, Yi C, et al. Agronomic and ionomics indicators of high-yield, mineral-dense, and low-Cd grains of wheat ( *Triticum aestivum* L. ) cultivars[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 261: 115120.
- [ 52 ] Curie C, Cassin G, Couch D, et al. Metal movement within the plant: Contribution of nicotianamine and yellow stripe 1-like transporters[J]. *Annals of Botany*, 2009, 103 ( 1 ): 1—11.
- [ 53 ] Oburger E, Gruber B, Schindlegger Y, et al. Root exudation of phytosiderophores from soil-grown wheat[J]. *New Phytologist*, 2014, 203 ( 4 ): 1161—1174.
- [ 54 ] Cakmak S, Gülüt K Y, Marschner H, et al. Effect of zinc and iron deficiency on phytosiderophore release in wheat genotypes differing in zinc efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1994, 17 ( 1 ): 1—17.
- [ 55 ] Chaignon V, Di Malta D, Hinsinger P. Fe-deficiency increases Cu acquisition by wheat cropped in a Cu-contaminated vineyard soil[J]. *New Phytologist*, 2002, 154 ( 1 ): 121—130.
- [ 56 ] Uraguchi S, Kamiya T, Sakamoto T, et al. Low-affinity cation transporter ( *OsLCT1* ) regulates cadmium transport into rice grains[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2011, 108 ( 52 ): 20959—20964.
- [ 57 ] Uraguchi S, Kamiya T, Clemens S, et al. Characterization of *OsLCT1*, a cadmium transporter from indica rice ( *Oryza sativa* ) [J]. *Physiologia Plantarum*, 2014, 151 ( 3 ): 339—347.
- [ 58 ] Tavares M, Macri A, Sankaran R P. Cadmium and zinc

- partitioning and accumulation during grain filling in two near isogenic lines of durum wheat[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2015, 97: 461—469.
- [ 59 ] Feng J Y, Nie X X, Liu B, et al. Efficiency of in situ passivation remediation in cadmium-contaminated farmland soil and its mechanism: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38 ( 5 ): 764—777. [冯敬云, 聂新星, 刘波, 等. 镉污染农田原位钝化修复效果及其机理研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2021, 38 ( 5 ): 764—777.]
- [ 60 ] Zhang L H, Bai J J, Tian R Y, et al. Cadmium remediation strategies in alkaline arable soils in northern China: Current status and challenges[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 ( 2 ): 348—360. [张力浩, 白姣杰, 田瑞云, 等. 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.]
- [ 61 ] Adebawale K O, Unuabonah I E, Olu-Owolabi B I. The effect of some operating variables on the adsorption of lead and cadmium ions on kaolinite clay[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2006, 134 ( 1/2/3 ): 130—139.
- [ 62 ] Wang Y L, Xu Y M, Liang X F, et al. Effects of mercapto-palygorskite on Cd distribution in soil aggregates and Cd accumulation by wheat in Cd contaminated alkaline soil[J]. *Chemosphere*, 2021, 271: 129590.
- [ 63 ] Huang Q Q, Di X R, Liu Z J, et al. Mercapto-palygorskite efficiently immobilizes cadmium in alkaline soil and reduces its accumulation in wheat plants: A field study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2023, 266: 115559.
- [ 64 ] Wang Y L, Xu Y M, Liang X F, et al. Soil addition of  $MnSO_4$  reduces wheat Cd accumulation by simultaneously increasing labile Mn and decreasing labile Cd concentrations in calcareous soil: A two-year pot study[J]. *Chemosphere*, 2023, 317: 137900.
- [ 65 ] Huang Q Q, Wang Y L, Qin X, et al. Soil application of manganese sulfate effectively reduces Cd bioavailability in Cd-contaminated soil and Cd translocation and accumulation in wheat[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 814: 152765.
- [ 66 ] Zhou J, Zhang C, Du B Y, et al. Effects of zinc application on cadmium ( Cd ) accumulation and plant growth through modulation of the antioxidant system and translocation of Cd in low- and high-Cd wheat cultivars[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265: 115045.
- [ 67 ] Ma W Y, Li Y L, Ge C H, et al. Effect of genotype on cadmium and trace element accumulation in wheat from weakly alkaline cadmium-contaminated soil[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2024, 113: 9.
- [ 68 ] Wang W H, Lu T, Liu L H, et al. Zeolite-supported manganese oxides decrease the Cd uptake of wheat plants in Cd-contaminated weakly alkaline arable soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 419: 126464.
- [ 69 ] Zhou Z, Zhang B, Liu H T, et al. Zinc effects on cadmium toxicity in two wheat varieties ( *Triticum aestivum* L. ) differing in grain cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 183: 109562.
- [ 70 ] Yao C, Zhou T Y, Fan G P, et al. Effects of different zinc fertilizers on soil cadmium availability and cadmium uptake and transport in wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43 ( 1 ): 19—29. [姚澄, 周天宇, 樊广萍, 等. 不同锌肥对土壤镉有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43 ( 1 ): 19—29.]
- [ 71 ] Yao C, Zhou T Y, Yi C, et al. Effects of manganese fertilizer on rhizosphere soil manganese availability and cadmium uptake and transport by wheat[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41 ( 9 ): 1955—1965. [姚澄, 周天宇, 易超, 等. 施用锰肥对根际土壤锰有效性及小麦镉吸收转运的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41 ( 9 ): 1955—1965.]
- [ 72 ] Sarwar N, Saifullah, Malhi S S, et al. Role of mineral nutrition in minimizing cadmium accumulation by plants[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90 ( 6 ): 925—937.
- [ 73 ] Salah S A, Barrington S F. Effect of soil fertility and transpiration rate on young wheat plants ( *Triticum aestivum* ) Cd/Zn uptake and yield[J]. *Agricultural Water Management*, 2006, 82 ( 1/2 ): 177—192.
- [ 74 ] Niu S, Wang T Q, Yang Y, et al. Effect of zinc fertilizer application on cadmium accumulation in wheat grain and its application risk[J]. *Environmental Science*, 2023, 44 ( 2 ): 984—990. [牛硕, 王天齐, 杨阳, 等. 田间施用锌肥对小麦籽粒镉累积的影响及施用风险[J]. *环境科学*, 2023, 44 ( 2 ): 984—990.]
- [ 75 ] Usman M, Zia-Ur-Rehman M, Rizwan M, et al. Effect of soil texture and zinc oxide nanoparticles on growth and accumulation of cadmium by wheat: A life cycle study[J]. *Environmental Research*, 2023, 216: 114397.
- [ 76 ] Yao Q, Yang Y Y, Chen J, et al. Soil application of  $FeCl_3$  and  $Fe_2 ( SO_4 )_3$  reduced grain cadmium concentration in Polish wheat ( *Triticum polonicum* L. ) [J]. *BMC Plant Biology*, 2024, 24 ( 1 ): 930.
- [ 77 ] Yao Q, Li W P, Liu Y, et al.  $FeCl_3$  and  $Fe_2 ( SO_4 )_3$  differentially reduce Cd uptake and accumulation in Polish wheat ( *Triticum polonicum* L. ) seedlings by exporting Cd from roots and limiting Cd binding in the root cell walls[J]. *Environmental Pollution*, 2023, 317: 120762.
- [ 78 ] Li C, Li G X, Wang Y, et al. Supplementing two wheat genotypes with  $ZnSO_4$  and ZnO nanoparticles showed differential mitigation of Cd phytotoxicity by reducing

- Cd absorption, preserving root cellular ultrastructure, and regulating metal-transporter gene expression[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 206: 108199.
- [ 79 ] Li G X, Duan R, Liang X R, et al. Zinc oxide nanoparticles and nano-hydroxyapatite enhanced Cd immobilization, activated antioxidant activity, improved wheat growth, and minimized dietary health risks in soil-wheat system[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12 ( 5 ): 113574.
- [ 80 ] Lu T, Wang W H, Liu L H, et al. Remediation of cadmium-polluted weakly alkaline dryland soils using iron and manganese oxides for immobilized wheat uptake[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 365: 132794.
- [ 81 ] Lu T, Wang L, Hu J W, et al. Enhanced reduction of Cd uptake by wheat plants using iron and manganese oxides combined with citrate in Cd-contaminated weakly alkaline arable soils[J]. *Environmental Research*, 2024, 257: 119392.
- [ 82 ] Deng T, Wu J L, Lu W S, et al. Differences in cadmium accumulation and translocation in different *Zea mays* cultivars[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38 ( 6 ): 1265—1271. [邓婷, 吴家龙, 卢维盛, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异性[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38 ( 6 ): 1265—1271.]
- [ 83 ] Fei W X, Rong S B, Chu M G, et al. Advances in phytoremediation of soil polluted by heavy metals such as cadmium by oilseed rape planting[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46 ( 35 ): 19—22, 93. [费维新, 荣松柏, 初明光, 等. 油菜种植修复重金属镉等污染土壤研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46 ( 35 ): 19—22, 93.]
- [ 84 ] Fei W X, Rong S B, Chu M G, et al. Enrichment difference of heavy metal cadmium and cuprum by *Brassica napus* L. in contaminated farmland soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2019, 47 ( 10 ): 74—78. [费维新, 荣松柏, 初明光, 等. 甘蓝型油菜品种对农田土壤重金属镉与铜的富集差异研究[J]. *安徽农业科学*, 2019, 47 ( 10 ): 74—78.]
- [ 85 ] Zhao F J, Zhao X Y, Tao Y M, et al. Straw removal has a limited effect on decreasing cadmium concentration in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40 ( 4 ): 693—699. [赵方杰, 赵星宇, 陶祎敏, 等. 秸秆移除对降低土壤镉含量的效果有限[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40 ( 4 ): 693—699.]

(责任编辑: 卢 萍)