

土壤-水稻系统中镉来源、富集过程和影响因素

陈化会^{1,2}, 谯露³, 胡海燕¹, 刘意章¹, 李平^{1,*}

(1. 中国科学院地球化学研究所 喀斯特环境演变与生态安全实验室, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

摘要: 土壤镉污染是影响我国水稻安全生产与人体健康的突出环境问题。水稻作为主要粮食作物, 对镉具有较强的富集能力, 容易将土壤中的镉转移并累积于籽粒中, 导致稻米镉含量超标, 进而通过食物链威胁人体健康。本文对土壤-水稻系统中镉来源、富集过程及影响因素进行了系统综述。首先厘清了土壤-水稻系统中镉的主要来源, 明确大气沉降与工矿业活动是首要人为源; 而碳酸盐岩和黑色页岩的风化, 造成了我国西南土壤的高镉背景值; 进而阐述了镉通过根吸收、叶片吸收两条途径进入水稻植株, 探讨了镉迁移、积累至籽粒的关键环节和机制; 其中 *OsHMA3*、*OsNramp5* 和 *OsZIP7* 等是调控水稻镉吸收、转运过程的关键转运蛋白。此外, 本文重点讨论了影响水稻吸收转运镉的主要因素, 其中土壤 pH、Eh 的变化和镉形态显著影响水稻对镉的吸收转运。最后, 对未来镉污染稻田安全利用与稻米安全生产中需进一步加强的研究方向作出展望, 以期为镉污染农田治理与水稻安全生产提供理论依据和参考。

关键词: 镉; 水稻; 转运机制; 影响因素

中图分类号: X53; S511 **文献标识码:** A

随着工业化和农业现代化的快速发展, 全世界每年排放到环境中的镉(Cadmium, Cd)高达 1.0×10^6 吨, 其中我国年排放量超过 680 吨^[1-2]。根据 2014 年发布的《全国土壤污染状况调查公报》, 土壤镉的点位超标率达 7.0%, 居 8 大重金属(镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍)中的首位^[3]。我国农田土壤中镉平均含量为 0.47 mg/kg, 是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中其他土壤风险筛选值 (0.3 mg/kg, $6.5 < \text{pH} \leq 7.5$) 的 1.58 倍^[4]。土壤中的镉被水稻(*Oryza sativa* L.) 根部吸收后, 通过木质部装载运输到地上部分, 经茎节韧皮部再分配, 最终累积到籽粒中^[5-6]。水稻作为全球约 30 亿人口的主要粮食作物^[7], 其安全生产直接关系到粮食安全与公共健康。然而, 水稻是镉的富集农作物, 其主要种植区如印度、孟加拉国、泰国及中国等均面临稻米镉超标的威胁^[8]。数据显示, 我国每年约有 10% 的稻米存在镉超标问题^[9]。因此, 系统揭示水稻镉富集机制, 是农业环境与食品安全领域的重要课题。本文基于现有水稻镉污染

研究, 旨在解析农田镉污染的主要来源, 进而阐述镉在土壤-水稻系统中的迁移转化过程, 重点讨论影响水稻镉富集的关键因素, 为镉污染稻田的安全利用与稻米安全生产的提供参考。

1 镉的健康危害

镉作为高生物毒性、强迁移性及难降解性的重金属元素, 其在环境中的半衰期长达 20~40 年, 易被农作物吸收并积累, 不仅抑制作物生长、降低产量与品质, 还可通过食物链在人体内富集, 引发健康风险^[10-11]。长期食用镉含量超标的大米或暴露在镉污染的环境中会对人体健康造成威胁, 导致呼吸短促、肺水肿和肺黏膜破坏, 进而引发肺炎, 且对肾脏和骨骼也会造成一定程度的损伤^[12]。蒋玉艳等^[13]基于 2013—2018 年广西 39 类食品的监测数据, 分析发现大米是居民膳食中镉的主要来源, 贡献率为 52.57%, 镉的月平均摄入量为 14.83 $\mu\text{g/kg BW}$ 。同样, Chen 等^[14]研究发现湖南省湘潭县当地普通人群膳食镉摄入主要来源于大米, 其贡献占比

收稿日期: 2026-03-10; 改回日期: 2026-06-02

基金项目: 贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2024]013)。

第一作者简介: 陈化会(2001—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属的生物地球化学循环。email: chenhuahui@mail.gyig.ac.cn。

*通信作者: 李平(1981—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为汞的环境地球化学。email: liping@mail.gyig.ac.cn。

© Editorial office of Earth and Environment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

达81%。人类镉中毒事件时有发生,在20世纪初期,日本富山县神通川流域发生了“痛痛病”,患者出现骨软化、骨质疏松及骨折等症状,截至2015年10月,已有200名患者被正式认定患有“痛痛病”^[15-16]。2006年,湖南省株洲市的某实业有限公司将产生的废水直接排放,造成了厂区附近村民出现了不同程度的腹痛、呕吐、关节疼痛等症状,经检测约有2000人被诊断出镉中毒^[17]。镉不仅可引起急性损伤,还可诱发乳腺癌、肺癌、前列腺癌、鼻咽癌、胰腺癌和肾癌等多种癌症^[18]。1993年国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)根据工作场所暴露环境中肺癌的发病率已将镉列为人类肺癌致癌物;2016年美国国家毒理学计划(National Toxicology Program, NTP, 2016)将镉归类为第1类致癌物^[19]。

2 土壤-水稻系统镉的主要来源

土壤中镉的来源主要分为人为源和自然源(图1)。人为源是土壤-水稻系统镉的主要来源,包括大气沉降、工矿业活动、污水灌溉、化肥的不当施用等外源输入途径;自然源以成土母岩风化为主要途径,碳酸盐岩、黑色岩系在风化过程中释放镉,构成土壤镉的高地球化学背景值。这些不同来源的镉在土壤中富集后,可被作物(水稻)吸收积累。

2.1 人为源

2.1.1 大气沉降

随着工业发展,我国矿山开采和金属冶炼过程

向大气中排放了大量的镉,1990—2015年的镉排放量从202吨增加到1180吨^[20]。这些附着在大气颗粒物上的镉可长时间悬浮于大气环境中,且在风力的作用下长距离、大范围传输,最终以干湿沉降的方式进入并沉积至土壤表层^[21]。目前,大气沉降已成为镉进入土壤的主要途径^[22]。据报道,某些典型冶炼区周边农田土壤镉含量与大气沉降中镉的输入量呈显著正相关,且大气沉降对表层土壤镉的累积贡献率高达43.18%~100%^[23-24]。此外,由于大气沉降的镉会使原有土壤中的镉生物有效性提高^[25-26],其在土壤-水稻系统中存在一定的生态风险。例如,湖北某大型铜冶炼厂附近地区土壤中镉含量最高达29.6 mg/kg,且该地生产的稻米镉平均含量达1.87 mg/kg^[27]。因此,揭示大气沉降中的镉在土壤-水稻系统中的生物地球化学过程成为了研究热点。Zhou等^[28]利用稳定镉同位素示踪技术和薄膜扩散梯度技术(Diffusive gradients in thin-films, DGT)研究了大气沉降中镉的生物地球化学过程以及水稻中的积累情况,结果表明,水稻根部和叶面吸收大气沉降的镉,对水稻籽粒贡献率高达37%~79%。

2.1.2 工矿业活动

采矿/冶炼产生的大量冶炼废料,如冶炼炉渣、燃烧残渣和尾矿是导致周边土壤环境受到不同程度镉污染的主要来源^[29]。据报道,我国的采矿和冶炼场地已达近2万个,部分采矿区和金属冶炼工业园区的点位超标率分别为33.4%和29.4%^[3,30]。多

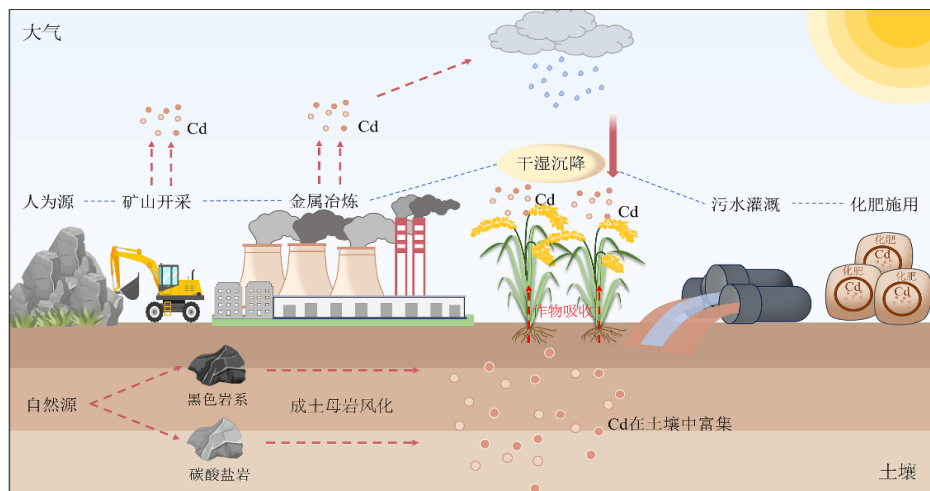


图1 土壤-水稻系统镉的主要来源示意图

Fig. 1 Diagram of the primary sources of cadmium in the soil-rice system

项研究表明,我国西南地区有色金属冶炼矿区(如锡矿、铅锌矿)周边土壤存在显著的镉富集现象^[31-32]。例如,贵州赫章县锌冶炼区周边的土壤中镉含量高达5.8~74 mg/kg^[33]。此外,电镀、塑料、电池、化工等行业也是向土壤中排放镉的主要工业源^[34]。例如,浙江嘉兴市某金属电镀厂的下风处表层土壤的镉平均含量高达15.0 mg/kg^[35],远超《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中其他土壤风险筛选值(0.3 mg/kg, 6.5<pH≤7.5)。广东省清远市龙塘镇某废弃电子垃圾拆解场,由于焚烧和酸浸场地使其表层土壤受到相对严重的镉污染(镉含量超过0.39 mg/kg)^[36]。河南新乡市某电池工业区,其周边土壤中镉的平均含量高达177 mg/kg^[37],远超《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中其他土壤风险筛选值(0.3 mg/kg, 6.5<pH≤7.5)。值得关注的是,我国稻米主要产区集中在工业发达的南方地区,尤其是湖南省。湖南水稻种植面积、产量居全国第一,然而因其有丰富的有色金属资源,加之历史时期无序的采冶使湖南的重金属镉污染不断加剧,造成湖南东部稻米镉超标率为76%,最高含量达4.8 mg/kg^[38-40]。

2.1.3 污水灌溉

随着工业化和城市化的快速发展,我国水资源短缺问题日益严峻,数据显示,我国人均水资源量仅为世界平均水平的1/4,超60%的灌溉农田面临缺水压力^[41]。因此,20世纪80年代至90年代我国缺水地区引污水灌溉农田现象十分普遍^[42]。但由于污水中常含有镉等重金属元素,如果长期使用未经处理的污水进行农田灌溉,可能导致镉在农田土壤中富集^[43]。例如,全国6大污灌区之一的张土灌区下游彰驿站镇的水田土壤镉含量高达2.49 mg/kg^[44],是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中水田土壤风险筛选值(0.3 mg/kg, 6.5<pH≤7.5)的4.15倍。西安市某典型污灌区,因长期污灌导致农田土壤镉平均含量高达1.45 mg/kg^[45],是《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中其他土壤风险筛选值(0.3 mg/kg, 6.5<pH≤7.5)的4.83倍。目前,大多数学者认为,将含镉污水处理达到一定的水质标准(即再生水)后再进行灌溉,有利于提高水资源的利用率,并且还能利用再生水中的氮、磷、钾等营养元素实现“以废补肥”^[46]。

2.1.4 化肥的不当使用

化肥的不当施用会导致土壤中的镉含量上升,但其对土壤镉的贡献取决于化肥中的镉含量以及施用量^[47-48]。磷肥是主要的含镉肥料,其镉平均含量达0.75 mg/kg^[49]。据统计,2014年我国磷肥施用量达到峰值(846万吨),向土壤中输入了10.77吨的镉^[49]。因此,使用含有镉杂质的合成磷肥是土壤中镉含量升高的常见原因^[50]。然而,目前许多学者认为,磷肥能降低土壤中的有效态镉含量^[51-53],从而影响水稻对镉的吸收与积累。例如,钙镁磷肥(CMP)是降低土壤有效态镉的最佳肥料,钝化率可达31.76%,将稻米镉含量从0.50 mg/kg降至0.18 mg/kg^[54-56]。总之,磷肥一方面能降低土壤中有效态镉含量,其施用过程也是土壤镉的输入源。

2.2 自然源

土壤中的镉除与人为来源有关以外,还与成土母岩风化有关。研究表明,由碳酸盐岩、黑色页岩风化形成的土壤中镉含量普遍偏高^[57]。碳酸盐岩在风化和成土过程中,钙、镁等成分溶于水而淋失,不溶的黏土性风化物残留下来,镉等元素在此过程中相对地富集^[58]。例如,我国西南地区(滇黔桂)广泛发育碳酸盐岩,区域内土壤镉的平均含量达1.22 mg/kg^[59]。郭超等^[60]发现广西典型岩溶地质高背景地区稻田土壤镉的富集具有显著的母岩继承性,平均含量高达1.78 mg/kg。目前研究表明,碳酸盐岩地质高背景地区的土壤中镉主要以铁锰结合态、残渣态为主,总体呈现出“总量高、有效性低”特征,环境风险相对较小^[57,61]。但此类地区生产的稻米的镉含量存在较大差异,同时存在一定的超标现象,例如,贵州罗甸县打号村稻米镉含量平均值为0.32 mg/kg,超标率高达93%^[62];广西金城江地区稻米镉平均含量为0.79 mg/kg^[63]。人为活动可能是造成这一现象的重要原因。研究表明,贵州罗甸县打号村农田土壤中镉的人为来源贡献率高达72.9%,其中金属冶炼和运输排放各占21.3%,煤炭燃烧排放占14.0%,施肥占16.3%;而成土母岩风化仅占27.1%^[64]。黑色岩系风化形成的土壤中镉的生物有效性较高,环境风险相对较大^[65]。例如,重庆市城口县与巫山县黑色岩系发育的土壤中镉显著富集,城口县部分区域土壤镉平均含量为3.29 mg/kg,98.7%的样品超过风险筛选值;巫山县部分区域土壤镉含量最高可达148 mg/kg,其富集系数高达335^[66-67]。广西(南丹县、鹿寨县)黑色页岩区土

壤镉平均含量分别为 1.8、0.96 mg/kg,其稻米镉平均含量分别为 0.4、0.25 mg/kg^[68-69]。因此,部分地质高背景地区稻米镉含量高的问题以及土壤镉有效性调控过程,亟待成为风险管控与研究关注的重点。

据报道,2015—2019 年华北地区农田土壤镉主要来源为大气沉降,贡献占比 56.5%;灌溉水和化肥施用占比分别为 13.7%、3.9%^[70]。湖南省某工业区周围稻米中镉的主要来源为工业粉尘、农业肥料和汽车废气,平均贡献分别为 87%、9% 和 4%^[71]。贵州某喀斯特地区山地土壤中的镉主要来源于成土母岩风化,贡献占比 55.0%,金属冶炼、交通和煤炭燃烧分别占比 19.8%、18.8% 和 4%^[64]。综上所述,大气沉降、工矿业活动、污水灌溉、化肥的不当施用、成土母岩风化已成为土壤-水稻系统中镉的重要来源;其中,成土母岩风化仍是喀斯特地区土壤中镉的主要来源。

3 水稻吸收、转运镉的过程与机制

表 1 数据显示,不同农作物对镉的积累能力存在显著种间差异。水稻作为镉的主要富集农作物之一,表现出较强的镉富集能力,其籽粒镉含量范围达 0.01~2.06 mg/kg,富集系数最高达 5.00,远高于小麦、玉米及土豆。水稻对镉的吸收、转运是一个复杂的生理过程,主要包括水稻根部和叶片吸收、木质部装载和向地上部分运输、茎节的分配以及叶

片韧皮部再活化向籽粒累积(图 2),因此,阐明水稻吸收、转运镉的过程与机制对于培育低镉品种、保障稻米质量安全具有重要意义。

3.1 水稻对镉的吸收过程

3.1.1 水稻根部吸收

水稻根部是土壤中最先接触镉的器官,也是水稻抵抗镉的第一个屏障。因此,水稻根部的镉含量往往要高于水稻的其他器官^[83]。研究表明,水稻根部对镉的吸收主要通过以下两种平行途径实现:(1)共质体途径,即 Cd^{2+} 在转运蛋白介导下跨膜进入共质体,该过程具有选择性且依赖能量消耗-主动运输;(2)质外体途径, Cd^{2+} 通过扩散作用沿细胞壁和细胞间隙等质外体空间迁移,该过程无需能量驱动,亦不依赖于膜转运蛋白-被动运输^[84]。但由于水稻根部的外皮层和内皮层细胞均存在凯氏带结构,该结构阻止了外体途径吸收的物质直接进入中柱,使得质外体途径吸收的镉只能通过内皮层的原生质体才能进入中柱。因此共质体途径是根系镉转运的关键步骤。即镉主要通过 Fe、Mn 和 Zn 等必需或有益元素的转运蛋白进入根部细胞,目前已报道的与水稻中与镉相关的转运蛋白主要有 *OsNramp5*^[85]、*OsNRAMP1*^[86]、*OsIRT1* 和 *OsIRT2*^[87]、*OsHMA3*^[88]。其中,*OsNramp5* 主要负责 Mn 的转运,也是水稻吸收镉的主要转运蛋白,可以协助根细胞吸收镉^[89]。Sasaki 等^[85]研究发现敲除 *OsNramp5* 后,水稻生长和谷物产量显著降低,而且水稻

表 1 不同农作物籽粒镉含量及富集系数

Table1 Cadmium content and enrichment coefficient in grains of different crops

作物名称	籽粒镉含量/(mg/kg)	富集系数	参考文献
水稻(<i>Oryza sativa</i> L.)	0.01~2.06	0.02~1.43	[72]
	0.08~0.51	1.50~5.00	[73]
	0.02~2.00	0.032~3.519	[74]
	—	0.078~1.214	[75]
	—	0.621	[76]
小麦(<i>Triticum aestivum</i> L.)	0.001~0.3	—	[77]
	0.11~0.19	0.08~0.10	[78]
	0.03~0.39	0.033~1.000	[74]
	—	0.122~0.769	[75]
玉米(<i>Zea mays</i> L.)	—	0.027	[76]
	0.06~0.67	0.031~0.870	[74]
	0.004~0.045	0.003~0.039	[79]
土豆(<i>Solanum tuberosum</i> L.)	0.21	0.003	[80]
	0.058	0.008	[81]

注:—表示无数据。

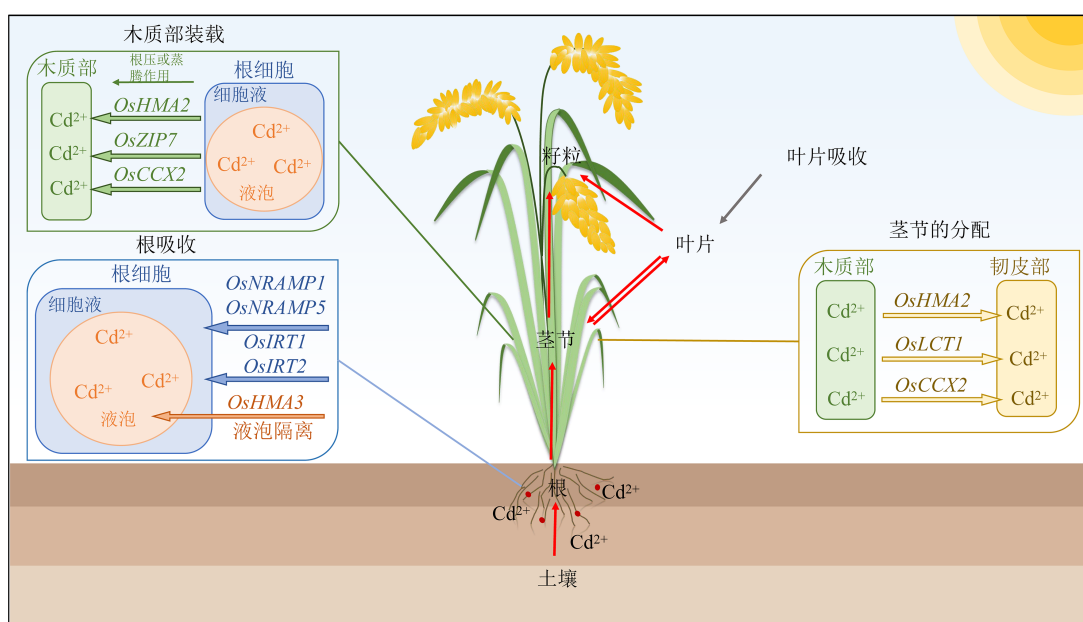


图2 水稻对镉的吸收、转运过程示意图(据文献[82])

Fig. 2 Diagram of cadmium uptake and transport in rice (from ref. [82])

的根部和地上部分镉的含量均低于野生型水稻,甚至在 30 min 内丧失了吸收镉的能力。*OsNRAMP1* 与 *OsNRAMP5* 的功能相似,但与敲除 *OsNRAMP5* 相比,敲除 *OsNRAMP1* 对镉的吸收影响较小^[90]。由于 Cd^{2+} 的物理和化学性质与 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} 相似,因此 Zn^{2+} 和 Fe^{2+} 转运体蛋白 *OsIRT1* 和 *OsIRT2* 也能介导根部对镉的吸收。有研究发现过量的 NO_3^- 增加了水稻幼苗中 *OsIRT1* 的表达,进而增加了水稻植株和籽粒对镉的吸收和积累^[91]。当水稻根细胞吸收镉后,部分镉被隔离到液泡中,液泡隔离已被证明是限制镉向地上部和籽粒中转移的主要过程^[88]。Miyadate 等^[92]研究表明转运蛋白 *OsHMA3* 能够将镉转运进液泡,减少镉向地上部运输,从而减轻镉毒害作用。

3.1.2 水稻叶片吸收

除水稻根部外,水稻叶片也能吸收镉,植物叶片吸收重金属主要通过气孔渗透和角质层吸附两种途径^[93]。气孔渗透是指叶面沉积颗粒覆盖了叶表皮的气孔开口及其保卫细胞,导致气孔无法关闭而保持永久开放,其中部分携带重金属的细小颗粒物通过开放气孔进入叶组织^[94]。角质层吸附是指植物叶表面沉积的重金属颗粒物被表皮蜡吸附,浸入蜡质层中,被蜡质包裹的重金属通过内吞作用穿透角质层,随后在质外体中解吸,被叶肉细胞吸收^[95]。大气中的镉沉降在水稻叶片表面后,更容易

被叶片吸收后转移到水稻植株的其他器官中^[96]。Xia 等^[97]在中国最大铜冶炼厂周围的场地,通过开顶式气室对水稻叶片和根部进行干、湿沉降暴露试验,发现水稻籽粒中 52%~70% 的镉来源于叶片吸收的镉,高于根部的贡献(30%~48%)。同样, Du 等^[98]研究发现叶片吸收的镉对水稻籽粒的贡献达 27%~45%。在某些污染较严重的地区,叶面吸收可能成为水稻吸收镉的主要途径,甚至在某些生长阶段(如开花和成熟)对水稻籽粒镉含量贡献更大^[99]。因此,叶片吸收成为不可忽视的水稻吸收镉的途径。

3.2 水稻对镉的转运过程

3.2.1 木质部装载和地上部分运输

木质部装载是养分等物质从中柱薄壁细胞向木质部导管转移的过程,同时也是物质从共质体向质外体途径的过渡^[100]。但由于水稻根系中液泡对镉的区隔化和依靠根表皮上的一些外排转运蛋白的作用,大部分镉都被积累、滞留在根中,只有少部分镉能通过根木质部继续向地上部运输^[101]。镉通过转运蛋白进入导管,并随后依靠蒸腾作用与根压向上运输,这是决定镉在水稻地上部及籽粒中积累的关键过程^[102]。在该过程中, *OsHMA2* 在镉向木质部的装载中发挥作用,参与其从地下部向地上部的转运^[103]。Satoh-Nagasawa 等^[104]验证了 *OsHMA2* 如何对水稻中镉进行吸收及转运,其将野生型和

*OsHMA2*突变体水稻在含有 4.5 nmol/L 镉的水培条件下发现, *OsHMA2*突变体的镉的转运率显著低于野生型, 且地上部的镉浓度也较低, 与此相反, *OsHMA2*突变体根中的镉浓度与野生型没有显著差异, 这些结果表明 *OsHMA2*不负责镉的根部吸收, 但参与镉从根向地上部的转运。除了 *OsHMA2*转运蛋白在木质部装载中发挥作用外, *OsZIP7*也参与了镉在木质部的装载。 *OsZIP7*的敲除导致大量镉在根中积累, 降低了谷粒中的镉含量^[105]。最后, Hao 等^[106]发现了水稻钙离子/阳离子交换蛋白 *OsCCX2* 主要在水稻节点维管组织的木质部区域表达, 敲除 *OsCCX2*可显著降低籽粒的镉含量, 该基因的破坏导致镉从根部向地上部的转运效率降低。

3.2.2 茎节的分配

水稻茎节是叶片和茎秆的连接处, 是调控水稻镉转运的关键部位。在茎节这一特殊结构中, 分布有大量相互连通的维管束, 其构成了镉的转运和分配的路径^[107]。Fujimaki 等^[108]利用正电子发射示踪成像系统 (Positron-Emitting Tracer Imaging System, PETIS) 证明, 茎节是控制镉从根向节间和籽粒分布的器官, 且镉在水稻茎节处首先由木质部转运至韧皮部, 进而通过穗茎中的韧皮部被输送并积累于籽粒。 *OsLCT1*作为一种定位于质膜上的活性蛋白, 该蛋白在水稻各茎节处表达, 参与韧皮部转运镉的过程, 能够介导镉向其他组织的次级转运与分配, 敲除 *OsLCT1*后的稻米镉含量较对照组降低了 50%^[109]。Wang 等^[110]研究发现, 水杨酸能调控叶片中镉转运蛋白 *OsLCT1* 的表达水平, 最终增强水稻对镉的耐受性, 减少镉在籽粒中的积累。

3.2.3 叶片韧皮部再活化和籽粒积累

木质部装载运输到茎节的镉在抽穗前通过茎节上的离子通道蛋白一部分转运积累到稻穗中, 另一部分则转运储存至叶片^[108, 111]。在这一过程中, 茎节对稻米中镉的累积起着至关重要的作用。 Kobayashi 等^[112]发现, 镉从水稻根部被运输后可以立即在第 1 个茎节处被装载运输至韧皮部。并且稻穗下第 1 个节点(N1)决定了糙米中的镉积累情况, 该节点中 *OsLCT1* 和 *OsHMA2* 表达水平较低, 导致从茎节转运到稻米中的镉减少^[113]。在灌浆期叶片对镉的短期吸收很少, 而在茎秆和籽粒中积累较多。在花期后吸收的镉通过木质部转运, 在茎节中实现维管束通道之间的转移, 最终到达发育中的籽粒中^[108]。而镉一旦转运到籽粒中, 就被固定在籽粒

中, 不会再转运到其他器官^[114]。此外, 在水稻成熟期, 叶片中储存的镉会被重新活化, 并通过韧皮部转运至籽粒中积累^[115]。转运蛋白 *OsLCD* 在此过程中发挥作用, 将该基因敲除后可降低镉胁迫下水稻地上组织中镉的浓度^[116]。

4 影响水稻吸收、转运镉的主要因素

水稻吸收、转运镉受到许多因素的影响, 主要分为环境因素和水稻基因型(图 3)。环境因素主要包括土壤的理化性质、根表铁膜、土壤共存离子、土壤微生物。其中土壤 pH、有机质、Eh 是主控因子, 直接决定了镉的化学形态和生物有效性, 是其他因素发挥作用的基础; 根表铁膜通过吸附、共沉淀等界面反应改变镉的有效性, 属于界面调控因子; 共存离子通过竞争位点、吸附等方式, 土壤微生物通过细胞表面吸附、络合等方式, 分别阻碍镉向水稻植株的迁移, 二者同属阻控因子; 水稻基因型由于镉吸收和转运相关基因存在表达差异, 属于内在调控因子。

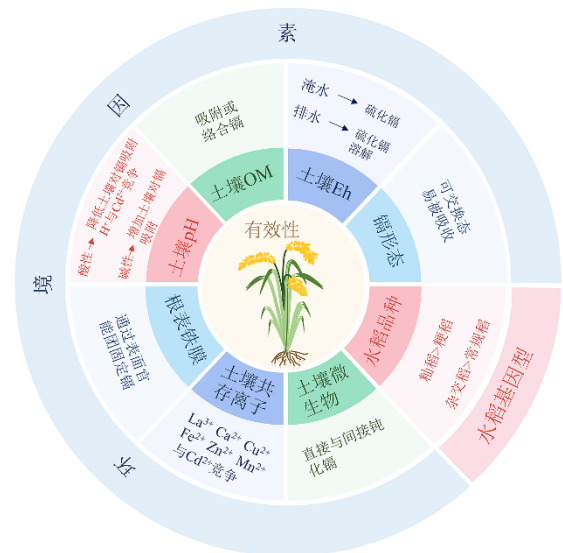


图3 影响水稻吸收、转运镉的主要因素

Fig.3 Diagram of the primary factors influencing cadmium uptake and transport in rice

4.1 土壤理化性质

4.1.1 土壤 pH

土壤 pH 与土壤镉的活性、生物富集数之间具有显著的相关性^[117]。有研究显示, 土壤 pH 与稻米镉生物富集数呈极显著负相关 ($r=-0.45$, $p<0.01$)^[118]。其原因是随着 pH 升高, 土壤溶液 Cd^{2+} 的

一级水解常数(pK_1)增大,加速离子水解,形成羟基金属形态 $CdOH^+$,该形态在土壤吸附点位上的亲和力高于金属离子 Cd^{2+} ,可导致镉吸附量显著增加^[119]。当土壤pH升高时,土壤可交换态镉含量及其占总量的百分比下降;当土壤pH下降,即土壤酸化加速了镉的活化,提高土壤中有毒金属的活性和植物有效性,促进了水稻对镉的吸收和积累,从而增加水稻籽粒中镉的含量^[120-121]。此外,当土壤溶液pH降低时,大量的 H^+ 会与 Cd^{2+} 争夺土壤表面的吸附位点, H^+ 优先被吸附,导致 Cd^{2+} 的吸附位点减少,从而降低土壤对镉的固定能力^[122-123];Biswash等^[124]施用生物炭提高了土壤淹水过程中的pH,从而降低了土壤有效态镉的含量,进而抑制了水稻对镉的吸收和积累,最终将水稻籽粒中的镉含量降低到国家食品安全限值(0.2 mg/kg)以下。

4.1.2 土壤有机质

有机质是土壤的重要组成部分,可通过两种方式影响水稻对镉的吸收转运,一是通过改善土壤理化性质(pH、Eh),增强土壤对镉的吸附能力,有机质所含大量官能团能与镉发生络合作用,或是直接吸附镉离子,形成稳定的金属络合物,降低镉在土壤中的生物有效性和迁移性。其中,有机质对土壤镉生物有效性的影响,现有研究结论并不一致,部分研究表明在有机质含量高的土壤中,镉的生物有效性明显较低^[125]。比如,施加油菜籽粕(7.5~30.0 kg/hm²)可使有机质含量提高7.8%~25.0%,土壤中有效态镉含量降低8.1%~36.4%,水稻籽粒中镉含量降低3.1%~31.3%^[126]。然而,另有研究表明,有机质分解形成的腐殖质中的富里酸(FA)与镉形成络合物,能提高土壤中镉的迁移性和生物有效性^[127-128];有机质还会分解形成小分子有机酸同样能与镉发生络合作用,研究表明^[129]该类有机酸可降低土壤对镉的吸附能力,提高土壤中镉的生物有效性。此外,土壤中镉的形态不仅取决于土壤有机质含量,还与土壤有机质组分(溶解性有机质, Dissolved Organic Matter, DOM)和(颗粒态有机质, Particulate Organic Matter, POM)存在密切关联。Wu等^[130]研究发现DOM中的羧基官能团增强了镉在针铁矿表面81.7%的吸附能力,使镉得到了有效固定。另外,李秋言和赵秀兰^[131]研究紫色水稻土中POM对重金属的富集特征,研究发现POM中镉平均富集系数为2.14,表现出一定的富集作用。

4.1.3 土壤氧化还原电位

土壤氧化还原电位(Eh)是土壤中多种氧化物与还原物质化学反应的综合体现,代表土壤氧化性、还原性的相对程度,是以电位反映土壤所处氧化还原状态的指标^[132]。在稻田特殊的水分管理模式下,淹水时Eh通常较低,土壤中的 SO_4^{2-} 被还原成 S^{2-} ,与 Cd^{2+} 形成CdS沉淀,此时土壤镉的生物有效性降低,相反,排水时Eh通常较高,CdS沉淀重新被氧化分解,镉得以活化,此时土壤镉的生物有效性明显升高^[133]。在稻田土壤中,Eh和pH的变化常常同时发生,间接调控铁锰氧化物对镉的吸附行为^[134];稻田土壤(pH为5.02~5.94)处于淹水环境下,其pH值会升高,使铁锰氧化物表面提供了更多吸附位点,降低了镉的有效性;然而,在排水过程中,Eh上升,铁锰氧化物降低对镉的吸附,同时镉的有效性也在随之增加^[135]。因此,土壤Eh是影响镉生物有效性的关键环境因子^[136]。有研究表明,土壤Eh与水稻地上部镉累积量呈极显著正相关关系($r=0.985$)^[137]。Chen等^[138]的研究证实了这一点,他们发现土壤Eh较高的灌溉入水口区域的水稻籽粒镉含量最高,而在Eh较低的出水口区域水稻籽粒镉含量最低,从而导致水稻籽粒镉含量出现6~7倍的空间变异。因此,维持淹水环境,降低土壤Eh,能显著抑制水稻对镉的吸收与转运,从而有效降低稻米中的镉积累。

4.1.4 土壤中镉的形态

重金属的有效态指土壤中能被生物吸收利用或产生毒害效应的重金属形态,生物毒理学者更侧重于土壤中重金属的毒性生物有效态,即土壤重金属直接进入生物体消化系统并可以被消化道溶解吸收的部分^[139]。Tessier等^[140]将土壤重金属分为5种不同的化学态,即可交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态、有机物结合态、残渣态。其中,可交换态镉较容易被水稻吸收利用,有机结合态镉属于潜在可利用的形态,而其他形态则属于不容易被水稻吸收利用的形态^[141]。Liu等^[142]采用连续提取法对水稻根系吸附重金属的结合形态进行了研究,结果表明,在镉胁迫下水稻根系中镉主要以交换态存在,并且稻米镉含量与土壤中可交换态的镉呈显著正相关($r=0.651, p<0.01$)^[143]。不同水分管理模式下,土壤pH、Eh、铁锰均会发生改变;淹水条件下,不同酸碱性土壤pH均趋于中性、Eh下降,土壤中铁锰氧化物结合态的镉含量增加,有效态镉含量降

低;水稻籽粒的镉含量降低^[144]。杨鹏等^[145]研究表明与旱作处理相比,淹水处理使土壤中可交换态镉的含量降低 29.6%,使籽粒镉含量降低 44.1%。另外,许多研究表明土壤总镉含量与稻米镉含量相关性较差($r=0.09$, $p>0.05$; $r=-0.063$, $p>0.05$)^[146-147]。因此,水稻对镉的吸收积累主要取决于土壤中的有效态镉的含量,并非土壤总镉含量。

4.2 根表铁膜

水稻为了抵抗淹水和其他环境胁迫,能通过通气组织将大气中的氧气输送到根系,水稻根系通气组织将在根际释放氧气,在根际形成局部微氧化环境使周围还原性 Fe^{2+} 氧化成 Fe^{3+} , 从而形成红色或红棕色的铁氧化物胶膜附着在根表及在土壤颗粒中沉积^[148-149]。根表铁膜可以通过表面官能团的沉淀、共沉淀和络合等作用固定镉,降低水稻对镉的吸收^[150-152]。Zhang 等^[153]发现施用螯合铁能提高水稻根表铁膜对镉的固定(与对照组相比增加 109%~150%),同时降低土壤中镉的有效性和水稻籽粒镉含量,降幅分别达 23.7%~39.2%、29.8%~46.2%。根表铁膜的形成受到水分管理、土壤铁含量等因素的影响。不同水分管理会改变土壤的 pH 和 Eh,影响水稻根系泌氧量和土壤氧化限度,进而影响根表铁膜的形成和厚度,及其对镉的吸附固定作用^[154]。土壤处于长期淹水时(低 Eh),根表铁膜因铁还原菌(FeRB)介导的还原作用发生溶解,铁膜减少,原先被铁膜吸附的镉被释放到土壤溶液中^[155-157]。但大部分释放出来的镉可重新通过共沉淀的方式结合到新的铁氧化物中^[158]。另外,铁是构成根表铁膜的基本元素,其浓度与价态对根表铁膜的形成具有决定性作用,随着外源 Fe^{2+} 的添加,根表铁膜的含量呈上升趋势^[159]。

4.3 土壤共存离子

土壤中的共存离子一方面作为营养成分为植物生长提供必需的营养元素,另一方面可以与镉相互作用,影响水稻对镉的吸收。它们的作用方式主要包括竞争阳离子通道、调控基因表达、物理吸附和络合等^[160]。存在于根际土壤溶液中的阳离子(La^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Cu^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 和 Mn^{2+})对植物吸收镉表现出抑制作用^[161]。以镉和锌为例,其因化学性质相似,理论上两者在植物体内存在竞争关系,因此锌能在一定程度上抑制水稻对镉的吸收,对水稻起到一定保护作用^[162]。例如, Ma 等^[163]通过使用不同的浓度和不同尺寸锌肥对水稻进行叶面喷施,

研究结果发现所有处理均能显著降低水稻籽粒中 41%~61% 的镉浓度。赵萍等^[164]研究发现在短期(3天)内,0.4 mmol/L 锌可减少 10 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫下水稻幼苗对镉的吸收积累量,降幅达 28.4%。

4.4 土壤微生物

微生物通过多种机制调控土壤-水稻系统中镉的生物有效性及其在水稻组织中的累积,主要包括直接钝化与间接钝化两类途径。首先,直接钝化机制涉及微生物通过细胞表面吸附、络合作用、离子交换以及螯合作用等方式降低土壤中镉的生物有效性。例如微生物分泌的胞外聚合物(Extracellular Polymeric Substances, EPS)是一种富含羧基、羟基等官能团的高分子聚合物,这些官能团作为吸附位点与 Cd^{2+} 等重金属离子发生络合作用,进而固定重金属并防止其进入细胞^[165-166]。Gu 等^[167]研究发现与单一镉胁迫(100 $\mu\text{mol/L}$ 镉)相比,施用浓度为 100 mg/L 的 EPS 能显著降低水稻茎部和根系中的镉含量,分别减少了 79.6% 和 53.8%。其次,间接钝化作用是指微生物的代谢产物如硫酸盐、碳酸盐、磷酸盐、草酸盐、氢氧根离子等可以与 Cd^{2+} 形成不可溶性的镉沉淀^[168]。例如,尿素常在微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)中作为外源底物,其在脲酶催化下水解生成 NH_4^+ 和 CO_3^{2-} ,导致体系 pH 值升高,进而诱导镉离子形成碳酸盐沉淀或与方解石(CaCO_3)共沉淀^[169]。硫酸盐还原菌(SRB)在厌氧条件下还原 SO_4^{2-} 生成 S^{2-} ,与 Cd^{2+} 形成 CdS 沉淀^[170]。丛枝菌根真菌(Arbuscular mycorrhizal fungi)等可通过吸附、矿化、沉淀和溶解等机制改变镉的生物有效性^[171]。目前,已有异常球菌属菌株(*Deinococcus sp.* NH1)、霍氏肠杆菌 BG200、芽孢杆菌菌株(NMTD17, GBSW22 和 LLTC96)等菌株被鉴定出具有高镉耐受性,能缓解镉胁迫对水稻生长的抑制作用^[172-174]。此外,异化铁还原菌以铁氧化物为电子受体,使铁氧化物发生还原溶解,进而导致铁氧化物中原本固定的镉发生释放^[175]。

4.5 水稻品种

除了以上外部环境因素能影响水稻吸收镉之外,不同的水稻品种也是影响水稻吸收镉的因素之一。研究发现水稻籽粒镉积累能力表现为籼稻>粳稻^[176-177]。在镉胁迫下,籼稻籽粒镉含量是粳稻籽粒镉含量 1.84~4.14 倍($p<0.05$)^[178]。杂交稻和常规稻对镉的积累能力也存在差异,一般表现为杂交籼稻>杂交粳稻>常规籼稻>常规粳稻^[179]。还有学

者研究了不同品种水稻籽粒之间的镉浓度差异。其中,王宇豪等^[180]通过系统研究发现,川优 3203、川优 6203、德梗 6 号和沈优 17 等品种表现出较低的镉积累能力。此外,Cao 等^[181]的研究也证实了品种间的镉积累差异,发现秀水 817、佳优 08-1 和春优 689 等品种具有相对较低的镉积累特性。不同水稻品种镉积累能力与其表达的调控基因有关,低镉积累水稻品种通过高表达铁转运蛋白 *OsLRT1*、*Os-PCR1*、*OsMTP1* 来阻控水稻对镉的吸收,高镉积累水稻品种则是通过高表达转运基因 *OsHMA3*、*Os-CCX2*、*OsNRAMP5* 和 *OsHAM9* 来促进水稻对镉的吸收^[182]。Tang 等^[83]利用 CRISPR/Cas9 技术敲除 *OsNRAMP5* 后水稻籽粒镉含量始终低于 0.05 mg/kg,而野生型水稻籽粒镉含量高达 0.33~2.90 mg/kg。目前,已成功培育出西子 3 号、低镉臻两优 8612 等低镉积累水稻,并且已在湖南、江西省种植超过 80 万 hm^2 ,这一进展有助于缓解我国稻米镉超标问题^[183-185]。

综上所述,水稻对镉的吸收、转运受到土壤内部环境因素以及水稻基因型影响,深入研究各因素对水稻吸收镉的机理有助于实现水稻吸收镉的有效管控。

5 展望

目前,土壤-水稻系统镉污染研究已在来源解析、富集机制及影响因素等方面取得诸多进展,但针对复杂场景下的污染管控与安全生产仍存在关键科学问题亟待突破,未来可重点围绕以下方向深化研究:

1) 碳酸盐岩地质高背景区土壤-水稻系统中镉的生物有效性及其调控机制需进一步厘清。该系统中镉的来源多样,不同来源镉的生物有效性存在显著差异。自然来源(碳酸盐岩风化)的镉以铁锰

结合态、残渣态为主,生物有效性较低;而人为源的镉(如大气沉降、工矿业活动)通常以可交换态的形式存在,具有较高的生物可利用性与迁移性。然而,在部分地质高背景地区,普遍存在“土壤镉有效性低-稻米镉超标”的矛盾现象,其核心在于土壤镉有效性、根际微环境调控及水稻吸收适配机制的耦合作用尚不明确。未来应聚焦该类区域,结合同位素示踪、同步辐射等技术,揭示土壤-水稻系统中镉的赋存形态演变规律,为地质高背景区稻田安全利用提供理论支撑。

2) 选育低镉积累水稻品种是控制稻米镉污染的重要方向。尽管 *OsNramp5*、*OsHMA3* 等关键转运蛋白已被识别,但目前培育低镉积累水稻主要基于上述有限转运蛋白,而具有水稻育种应用价值的低镉积累基因仍相对稀缺。未来需进一步借助基因编辑、转录组学与代谢组学联用技术,揭示水稻吸收转运镉的机制,系统解析镉在水稻体内的转运通路及调控节点,挖掘更多低镉累积关键基因,加快耐镉且高产优质的水稻品种选育与推广,从源头降低稻米镉超标风险。

3) 水稻对镉的吸收积累主要取决于土壤中的有效态镉的含量,并非土壤总镉含量。已经开展的部分工作表明,镉有效态与水稻镉含量的相关性远好于土壤总镉含量。目前,因提取方法和研究区域差异导致土壤镉有效态提取效率和适用情况差异性较大,缺乏针对喀斯特地区土壤有效态镉的普适性浸提方法。因此,未来应着力于筛选或优化适用于喀斯特地区土壤的化学提取方法,并耦合 DGT 等动态监测技术以提高生物有效性预测精度;厘清关键影响因素,并在此基础上制定针对喀斯特地区的土壤有效态镉标准分析方法与风险评价方法体系,推动监测结果的规范化与可比性。

参 考 文 献

- [1] 邹长伟,江玉洁,黄虹. 重金属镉的分布、暴露与健康风险评价研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(6): 225-243.
- [2] 寇志安,张婉霞,张梓坤,等. 微生物技术在土壤重金属污染修复中的应用研究进展[J]. 世界生态学, 2023, 12(2): 138-145.
- [3] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 国土资源通讯, 2014(8): 26-29.
- [4] 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): 4006-4016.
- [5] Zhong S X, Li X M, Li F B, et al. Cadmium uptake and transport processes in rice revealed by stable isotope fractionation and Cd-related gene expression[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150633.
- [6] Li H, Luo N, Li Y W, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 622-630.
- [7] Birla D S, Malik K, Sainger M, et al. Progress and challenges in improving the nutritional quality of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Critical Reviews in

- Food Science and Nutrition, 2017, 57(11): 2455-2481.
- [8] Baruah S G, Chabukdhara M. Heavy metal(loid)s contamination assessment in jhum soil-rice system, Arunachal Pradesh, Northeast India[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 142: 107478.
- [9] 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.
- [10] 张丽, 侯萌瑶, 安毅, 等. 生物炭对水稻根际微域土壤Cd生物有效性及水稻Cd含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4): 665-671.
- [11] Rohman A, Helmiyati S, Penggalih M, et al. Rice in health and nutrition[J]. International Food Research Journal, 2014, 21: 13-24.
- [12] Uraguchi S, Mori S, Kuramata M, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2009, 60(9): 2677-2688.
- [13] 蒋玉艳, 马宁, 蒙浩洋, 等. 广西居民重金属膳食摄入水平及其健康风险评估[J]. 中国食品卫生杂志, 2021, 33(2): 191-195.
- [14] 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.
- [15] Aoshima K, Horiguchi H. Historical lessons on cadmium environmental pollution problems in Japan and current cadmium exposure situation [M]//Cadmium Toxicity. Singapore: Springer Singapore, 2019: 3-19.
- [16] Aoshima K. Itai-itai disease: renal tubular osteomalacia induced by environmental exposure to cadmium: historical review and perspectives[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2016, 62(4): 319-326.
- [17] 湖南株洲千人离奇镉中毒[C]. 中国微量元素科学研究会第十三届学术研讨会. 中国山东威海. 2006: 2.
- [18] Genchi G, Sinicropi M S, Lauria G, et al. The effects of cadmium toxicity[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(11): 3782.
- [19] National Toxicology Program. Report on carcinogens[R]. Research Triangle Park: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2016.
- [20] Shi J J, Shi Y, Feng Y L, et al. Anthropogenic cadmium cycles and emissions in Mainland China 1990-2015[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 230: 1256-1265.
- [21] Kapusta P, Stanek M, Szarek-Łukaszewska G, et al. Long-term moss monitoring of atmospheric deposition near a large steelworks reveals the growing importance of local non-industrial sources of pollution[J]. Chemosphere, 2019, 230: 29-39.
- [22] Yao C, Yang Y D, Li C X, et al. Heavy metal pollution in agricultural soils from surrounding industries with low emissions: assessing contamination levels and sources[J]. Science of the Total Environment, 2024, 917: 170610.
- [23] 吴嘉仪, 曹磊, 郭丹, 等. 湖南某典型冶炼区大气沉降重金属分布特征及健康风险评估[J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(6): 2132-2141.
- [24] 米雅竹, 梁家妮, 周俊, 等. 典型冶炼厂大气沉降区农田耕层土壤重金属(Cd、Cu、Pb)输入输出平衡研究[J]. 土壤学报, 2024, 61(5): 1339-1348.
- [25] Liu H L, Zhou J, Li M, et al. Chemical speciation of trace metals in atmospheric deposition and impacts on soil geochemistry and vegetable bioaccumulation near a large copper smelter in China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 413: 125346.
- [26] Liu H L, Wang H T, Zhao H, et al. Speciation, bioaccumulation, and toxicity of the newly deposited atmospheric heavy metals in soil-earthworm (*Eisenia fetida*) system near a large copper smelter[J]. Science of the Total Environment, 2024, 924: 171700.
- [27] Cai L M, Wang Q S, Luo J, et al. Heavy metal contamination and health risk assessment for children near a large Cu-smelter in Central China[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 725-733.
- [28] Zhou J, Xia R Z, Landis J D, et al. Isotope evidence for rice accumulation of newly deposited and soil legacy cadmium: a three-year field study [J]. Environmental Science & Technology, 2024, 58(39): 17283-17294.
- [29] Xu D M, Fu R B, Liu H Q, et al. Current knowledge from heavy metal pollution in Chinese smelter contaminated soils, health risk implications and associated remediation progress in recent decades: a critical review[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 286: 124989.
- [30] Zeng J Q, Luo X H, Cheng Y Z, et al. Spatial distribution of toxic metal(loid)s at an abandoned zinc smelting site, Southern China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 425: 127970.
- [31] Li P Z, Lin C Y, Cheng H G, et al. Contamination and health risks of soil heavy metals around a lead/zinc smelter in southwestern China[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 113: 391-399.
- [32] Yang Y Y, Li C, Yang Z F, et al. Application of cadmium prediction models for rice and maize in the safe utilization of farmland associated with tin mining in Hezhou, Guangxi, China[J]. Environmental Pollution, 2021, 285: 117202.
- [33] Bi X Y, Feng X B, Yang Y G, et al. Environmental contamination of heavy metals from zinc smelting areas in Hezhong County, western Guizhou, China[J]. Environment International, 2006, 32(7): 883-890.
- [34] 崔斌, 王凌, 张国印, 等. 土壤重金属污染现状与危害及修复技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(1): 373-375, 447.
- [35] Liu T T, Wang Z. Contamination and health risk assessment of heavy metals in soil surrounding an electroplating factory in JiaXing, China[J]. Scientific Reports, 2024, 14: 4097.
- [36] Wu Q H, Leung J Y S, Geng X H, et al. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: implications for dissemination of heavy metals[J]. Science of the Total Environment, 2015, 506: 217-225.

- [37] 王学锋, 何聪聪. 新乡市环宇大道工业区周边土壤重金属的污染特征和评价[J]. 土壤通报, 2012, 43(4): 962-966.
- [38] 戴高乐. 湖南省典型水稻种植区土壤镉生态风险评价[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [39] Zhu H H, Chen C, Xu C, et al. Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 219: 99-106.
- [40] 申智林. 湖南做好水稻大文章[N]. 人民日报海外版, 2024-05-06(5).
- [41] 李俊海. 全球水资源短缺与粮食危机[J]. 生态经济, 2021, 37(3): 5-8.
- [42] 黄春国, 王鑫. 我国农田污灌发展现状及其对作物的影响研究进展[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(22): 10692-10693, 10755.
- [43] 辛术贞, 李花粉, 苏德纯. 我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2271-2278.
- [44] 付玉豪, 李凤梅, 郭书海, 等. 沈阳张士灌区彰驿站镇土壤与水稻植株镉污染分析[J]. 生态学杂志, 2017, 36(7): 1965-1972.
- [45] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2152-2159.
- [46] 景琪, 许炜怡, 曾锐, 等. 污水处理厂再生水回用于农田灌溉的影响与效果[J]. 环境工程, 2023, 41(S1): 584-591.
- [47] Hu J, Wang Z, Williams G D Z, et al. Evidence for the accumulation of toxic metal(loid)s in agricultural soils impacted from long-term application of phosphate fertilizer[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 167863.
- [48] Chen X X, Liu Y M, Zhao Q Y, et al. Health risk assessment associated with heavy metal accumulation in wheat after long-term phosphorus fertilizer application[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262: 114348.
- [49] 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.
- [50] Kubier A, Wilkin R T, Pichler T. Cadmium in soils and groundwater: a review[J]. *Applied Geochemistry*, 2019, 108: 104388.
- [51] Huang R, Li Y Q, Li F, et al. Phosphate fertilizers facilitated the Cd contaminated soil remediation by sepiolite: Cd mobilization, plant toxicity, and soil microbial community[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 234: 113388.
- [52] Xu W J, Hou S Z, AmanKhan M, et al. Effect of water and fertilization management on Cd immobilization and bioavailability in Cd-polluted paddy soil[J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130168.
- [53] Kuang X L, Si K Y, Song H J, et al. Lime-phosphorus fertilizer efficiently reduces the Cd content of rice: Physicochemical property and biological community structure in Cd-polluted paddy soil[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 749946.
- [54] 吴正勇, 熊媛, 康娟, 等. 钙镁磷肥协同硅对水稻镉积累的影响[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(9): 125-135.
- [55] 马桥, 陈斌, 赵颖玥, 等. 钙镁磷肥-碳酸钾-石灰配施对稻米镉积累的影响[J]. 土壤通报, 2024, 55(3): 819-829.
- [56] 涂理达, 周慧平, 姚臻晖, 等. 磷肥钝化修复重金属污染土壤及其环境风险[J]. 环境工程学报, 2022, 16(7): 2267-2277.
- [57] 胡鹏杰, 詹娟, 刘娟, 等. 土壤重金属地质高背景成因、风险与管控研究进展[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1363-1377.
- [58] 李博, 刘旭, 余涛, 等. 岩溶地质高背景区土壤镉(Cd)富集机理研究现状[J]. 岩矿测试, 2025, 44(5): 937-951.
- [59] 程志中, 谢学锦. 中国西南地区76种元素地球化学填图[J]. 物探化探计算技术, 2007, (S1): 174-179+6+7.
- [60] 郭超, 文字博, 杨忠芳, 等. 典型岩溶地质高背景土壤镉生物有效性及其控制因素研究[J]. 南京大学学报(自然科学), 2019, 55(4): 678-687.
- [61] 王莹, 刘意章, 张永祥, 等. 西南典型地质高背景区与矿业活动区稻田土壤剖面镉分布特征及生物有效性研究[J]. 地球与环境, 2025, 53(1): 34-43.
- [62] 杨寒雯, 刘秀明, 刘方, 等. 喀斯特高镉地质背景区水稻镉的富集、转运特征与机理[J]. 地球与环境, 2021, 49(1): 18-24.
- [63] 黄雁飞, 黄玉溢, 陈桂芬, 等. 桂西北岩溶区大田条件下不同水稻品种的镉累积特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(8): 1929-1937.
- [64] Liu Z, Sun G Y, Wu X, et al. Analysis of cadmium sources in surface soil in typical karst regions: anthropogenic input contribution and atmospheric transport impact[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2026, 504: 141349.
- [65] Liu Y Z, Xiao T F, Perkins R B, et al. Geogenic cadmium pollution and potential health risks, with emphasis on black shale[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2017, 176: 42-49.
- [66] 邓帅, 段佳辉, 宁墨兔, 等. 典型黑色岩系地质高背景区土壤和农产品重金属富集特征与污染风险[J]. 环境科学, 2023, 44(4): 2234-2242.
- [67] 刘意章, 陈梓杰, 叶太平, 等. 重庆巫山地区上二叠统黑色岩系中镉等有害元素赋存状态及环境意义[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2021, 40(4): 938-945.
- [68] Zhong C, Feng Z X, Jiang W, et al. Evaluation of geogenic cadmium bioavailability in soil-rice system with high geochemical background caused by black shales[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(2): 1053-1063.
- [69] Duan Y R, Yang Z F, Yu T, et al. Geogenic cadmium pollution in multi-medians caused by black shales in Luzhai, Guangxi[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 113905.
- [70] 刘进, 潘月鹏, 师华定. 华北地区农田土壤镉来源及大气沉降的贡献[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1698-1708.
- [71] Yan Y, Sun Q Q, Yang J J, et al. Source attributions of cadmium contamination in rice grains by cadmium isotope composition analysis: a field study[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 210: 111865.
- [72] 郝社锋, 任静华, 范健, 等. 江苏某市水稻籽粒重金属富集特征及健康风险评价[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(2): 217-222, 228.
- [73] Vasudhevan P, Pu S Y, Sridevi G, et al. Uptake and translocation of cadmium and trace metals in common rice varieties at different growth stages[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2024, 46(9): 365.

- [74] 陈洁, 王娟, 王怡雯, 等. 影响不同农作物镉富集系数的土壤因素[J]. 环境科学, 2021, 42(4): 2031-2039.
- [75] 石一珺, 徐颖菲, 倪中应, 等. 杭州市主要农作物对镉的富集差异及其影响因素[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(7): 1230-1233.
- [76] 张耿苗, 赵钰杰. 诸暨市不同作物对土壤镉铅吸收的研究: 富集系数和安全阈值[J]. 中国农学通报, 2022, 38(18): 100-106.
- [77] 王国兰, 王玥, 李旭, 等. 千河下游土壤-小麦系统重金属富集特征及风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(4): 80-86.
- [78] 贾彪, 赵宝平, 张茹, 等. 不同钝化剂对镉污染小麦镉富集及产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2024, 44(5): 648-657.
- [79] 董欣欣. 不同玉米品种对土壤重金属镉积累富集特性研究[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2022, 34(4): 22-26.
- [80] Sanderson D V, Voutchkov M, Benkeblia N. Bioaccumulation of cadmium in potato tuber grown on naturally high levels cadmium soils in Jamaica[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 909-915.
- [81] Zhang Y P, Wu Y E, Yang A M, et al. Assessment of cadmium content of potato grown in Weining County, Guizhou Province, China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2017, 189(5): 226.
- [82] Jing H N, Yang W T, Chen Y L, et al. Exploring the mechanism of Cd uptake and translocation in rice: future perspectives of rice safety[J]. Science of the Total Environment, 2023, 897: 165369.
- [83] Tang L, Mao B G, Li Y K, et al. Knockout of *OsNramp5* using the CRISPR/Cas9 system produces low Cd-accumulating indica rice without compromising yield[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 14438.
- [84] Zhao Z Q, Xi M Z, Jiang G Y, et al. Effects of IDSA, EDDS and EDTA on heavy metals accumulation in hydroponically grown maize (*Zea mays*, L.)[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 181(1-3): 455-459.
- [85] Sasaki A, Yamaji N, Yokosho K, et al. *Nramp5* is a major transporter responsible for manganese and cadmium uptake in rice[J]. The Plant Cell, 2012, 24(5): 2155-2167.
- [86] Takahashi R, Ishimaru Y, Senoura T, et al. The *OsNRAMP1* iron transporter is involved in Cd accumulation in rice[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(14): 4843-4850.
- [87] Ishimaru Y, Suzuki M, Tsukamoto T, et al. Rice plants take up iron as an Fe^{3+} -phytosiderophore and as Fe^{2+} [J]. The Plant Journal, 2006, 45(3): 335-346.
- [88] Ueno D, Yamaji N, Kono I, et al. Gene limiting cadmium accumulation in rice[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(38): 16500-16505.
- [89] 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.
- [90] Chang J D, Huang S, Yamaji N, et al. *OsNRAMP1* transporter contributes to cadmium and manganese uptake in rice[J]. Plant, Cell & Environment, 2020, 43(10): 2476-2491.
- [91] Yang Y J, Xiong J, Chen R J, et al. Excessive nitrate enhances cadmium (Cd) uptake by up-regulating the expression of *OsIRT1* in rice (*Oryza sativa*)[J]. Environmental and Experimental Botany, 2016, 122: 141-149.
- [92] Miyadate H, Adachi S, Hiraizumi A, et al. *OsHMA3*, a PIB-type of ATPase affects root-to-shoot cadmium translocation in rice by mediating efflux into vacuoles[J]. New Phytologist, 2011, 189(1): 190-199.
- [93] Säumel I, Kotsyuk I, Hölscher M, et al. How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany[J]. Environmental Pollution, 2012, 165: 124-132.
- [94] 万建明, 祁俊生, 李廷真, 等. 叶片大气重金属吸收对植物的影响研究进展[J]. 植物科学学报, 2023, 41(5): 694-704.
- [95] 卢绘, 张银龙, 吴永波. 植物叶面吸收污染物机制研究进展[J]. 环境化学, 2020, 39(12): 3371-3383.
- [96] Ma C, Xie P, Yang J, et al. Evaluating the contributions of leaf organ to wheat grain cadmium at the filling stage[J]. Science of the Total Environment, 2022, 833: 155217.
- [97] Xia R Z, Zhou J, Sun Y F, et al. Stable isotope ratios trace the rice uptake of cadmium from atmospheric deposition via leaves and roots[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(44): 16873-16883.
- [98] Du B Y, Xia R Z, Obrist D, et al. Tracing atmospherically deposited cadmium accumulation in rice using stable isotopes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2025, 494: 138524.
- [99] Wang J, Wu B, Zhou L, et al. Cadmium contamination in Asian rice (*Oryza sativa* L.): Mechanistic insights from soil sources to grain accumulation and mitigation strategies[J]. Plants, 2025, 14(18): 2844.
- [100] 宋瑜, 马艳华, 唐希望, 等. 重金属镉(Cd)在植物体内转运途径研究进展[J]. 中国环境管理干部学院学报, 2019, 29(3): 56-59.
- [101] 杨菲, 唐明凤, 朱玉兴. 水稻对镉的吸收和转运的分子机理[J]. 杂交水稻, 2015, 30(3): 2-8.
- [102] Clemens S, Ma J F. Toxic heavy metal and metalloid accumulation in crop plants and foods[J]. Annual Review of Plant Biology, 2016, 67: 489-512.
- [103] Yamaji N, Xia J X, Mitani-Ueno N, et al. Preferential delivery of zinc to developing tissues in rice is mediated by P-type heavy metal ATPase *OsHMA2*[J]. Plant Physiology, 2013, 162(2): 927-939.
- [104] Satoh-Nagasawa N, Mori M, Nakazawa N, et al. Mutations in rice (*Oryza sativa*) heavy metal ATPase 2 (*OsHMA2*) restrict the translocation of zinc and cadmium[J]. Plant and Cell Physiology, 2012, 53(1): 213-224.

- [105] Tan L T, Zhu Y X, Fan T, et al. *OsZIP7* functions in xylem loading in roots and inter-vascular transfer in nodes to deliver Zn/Cd to grain in rice [J]. *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2019, 512(1): 112-118.
- [106] Hao X H, Zeng M, Wang J, et al. A node-expressed transporter *OsCCX2* is involved in grain cadmium accumulation of rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 476.
- [107] Clemens S, Aarts M G M, Thomine S, et al. Plant science: the key to preventing slow cadmium poisoning[J]. *Trends in Plant Science*, 2013, 18 (2): 92-99.
- [108] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(4): 1796-1806.
- [109] 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.
- [110] Wang F J, Tan H F, Zhang Y T, et al. Salicylic acid application alleviates cadmium accumulation in brown rice by modulating its shoot to grain translocation in rice[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128034.
- [111] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants: the relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant and Soil*, 2011, 347(1): 105-114.
- [112] Kobayashi N I, Tanoi K, Hirose A, et al. Characterization of rapid intervascular transport of cadmium in rice stem by radioisotope imaging[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(2): 507-517.
- [113] Xia R Z, Zhou J, Cui H B, et al. Nodes play a major role in cadmium (Cd) storage and redistribution in low-Cd-accumulating rice (*Oryza sativa* L.) cultivars[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 859: 160436.
- [114] Zhang J L, Zhu Y C, Yu L J, et al. Research advances in cadmium uptake, transport and resistance in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Cells*, 2022, 11 (3): 569.
- [115] Kashiwagi T, Shindoh K, Hirotsu N, et al. Evidence for separate translocation pathways in determining cadmium accumulation in grain and aerial plant parts in rice[J]. *BMC Plant Biology*, 2009, 9(1): 8.
- [116] Shimo H, Ishimaru Y, An G, et al. Low cadmium (*LCD*), a novel gene related to cadmium tolerance and accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(15): 5727-5734.
- [117] 何洋飘, 梁斌, 陈榜巧, 等. 成都平原东北部高地地质背景下水稻土镉生物有效性及稻米中镉积累的影响因素[J]. *西南科技大学学报*, 2022, 37(3): 38-43, 97.
- [118] 谢宜. 不同pH稻田下土壤有效态镉与稻米镉含量的相关性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2019.
- [119] Xian X F. Response of kidney bean to concentration and chemical form of cadmium, zinc, and lead in polluted soils[J]. *Environmental Pollution*, 1989, 57(2): 127-137.
- [120] Lu H L, Li K W, Nkoh J N, et al. Effects of the increases in soil pH and pH buffering capacity induced by crop residue biochars on available Cd contents in acidic paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2022, 301: 134674.
- [121] 陈楠, 张昊, 杨慧敏, 等. 土壤pH对土壤镉形态及稻米镉积累的影响[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2018, 44(2): 176-182, 209.
- [122] Gao Y N, Liu N, Meng F Y, et al. The fate of cadmium during the hydrolysis and solid-state transformation of iron[J]. *Water Research*, 2025, 283: 123840.
- [123] Shi Y, Sheng A X, Zhang F J, et al. Roles of the SOM and clay minerals in alleviating the leaching of Pb, Zn, and Cd from the Pb/Zn smelter soil: multi-surface model and DFT study[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 940: 173536.
- [124] Biswash M R, Li K W, Xu R K, et al. Alteration of soil pH induced by submerging/drainage and application of peanut straw biochar and its impact on Cd(II) availability in an acidic soil to indica-Japonica rice varieties[J]. *Environmental Pollution*, 2024, 356: 124361.
- [125] Liu H L, Li M, Zhou J, et al. Effects of soil properties and aging process on the acute toxicity of cadmium to earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(4): 3708-3717.
- [126] Yang W T, Jing H N, Yang L Y, et al. Effects of rapeseed residue organic fertilizer on cadmium toxicity in soil and its uptake and transfer by rice plants (*Oryza sativa* L.)[J]. *Land Degradation & Development*, 2023, 34(10): 2791-2802.
- [127] Li Q, Chen X J, Chen X, et al. Cadmium removal from soil by fulvic acid-aided hydroxyapatite nanofluid[J]. *Chemosphere*, 2019, 215: 227-233.
- [128] Esringü A, Turan M, Cangönül A. Remediation of Pb and Cd polluted soils with fulvic acid[J]. *Forests*, 2021, 12(11): 1608.
- [129] 杨龙, 彭相英, 容群, 等. 低分子有机酸对土壤镉影响机制研究[J]. *农业与技术*, 2025, 45(21): 79-84.
- [130] Wu S Y, Chi J L, Fang L P, et al. Cadmium immobilization on Fe oxyhydroxides enhanced by DOM using single-molecule determinations[J]. *Environmental Science & Technology*, 2025, 59(7): 3771-3779.
- [131] 李秋言, 赵秀兰. 紫色水稻土颗粒有机质对重金属的富集特征[J]. *环境科学*, 2017, 38(5): 2146-2153.
- [132] Rinklebe J, Antić-Mladenović S, Frohne T, et al. Nickel in a serpentine-enriched Fluvisol: redox affected dynamics and binding forms[J]. *Geoderma*, 2016, 263: 203-214.
- [133] Fulda B, Voegelin A, Kretzschmar R. Redox-controlled changes in cadmium solubility and solid-phase speciation in a paddy soil as affected by reducible sulfate and copper[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(22): 12775-12783.

- [134] Wang M, Wang L F, Zhao S W, et al. Manganese facilitates cadmium stabilization through physicochemical dynamics and amino acid accumulation in rice rhizosphere under flood-associated low pe+pH[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021, 416: 126079.
- [135] 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 & Technology, 2019, 53(5): 2500-2508.
- [136] Honma T, Ohba H, Kaneko-Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(8): 4178-4185.
- [137] 田桃, 曾敏, 周航, 等. 水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 343-351.
- [138] Chen H P, Wang P, Gu Y, et al. The within-field spatial variation in rice grain Cd concentration is determined by soil redox status and pH during grain filling[J]. Environmental Pollution, 2020, 261: 114151.
- [139] Ruby M V, Schoof R, Brattin W, et al. Advances in evaluating the oral bioavailability of inorganics in soil for use in human health risk assessment[J]. Environmental Science & Technology, 1999, 33(21): 3697-3705.
- [140] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. Analytical Chemistry, 1979, 51(7): 844-851.
- [141] 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 等. 土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2817-2824.
- [142] Liu Z D, Zhou Q, Hong Z N, et al. Effects of surface charge and functional groups on the adsorption and binding forms of Cu and Cd on roots of indica and Japonica rice cultivars[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1489.
- [143] 余敏芬, 戴婷, 同海鱼, 等. 贵州地质高背景区稻田土壤镉生物有效性预测方法评价[J]. 地球与环境, 2025, 53(1): 26-33.
- [144] Zhong S X, Liu T X, Li X M, et al. Cd isotope fractionation in a soil-rice system: roles of pH and mineral transformation during Cd immobilization and migration processes[J]. Science of the Total Environment, 2023, 900: 166435.
- [145] 杨鹏, 杜晨晴, 肖永讯, 等. 水分管理对滇东喀斯特高镉背景区水稻生长与镉含量的影响[J]. 农业环境科学学报: 1-15.
- [146] 黄苗, 杨国涛, 刁燕, 等. 四川盆地稻田土壤-水稻重金属富集与相关性评价[J]. 中国农学通报, 2025, 41(5): 103-109.
- [147] 周前航, 杨湜烟, 孙丽娟, 等. 典型沪南产区土壤-水稻系统多金属污染特征及其健康风险[J]. 环境科学, 2026, 47(3): 2048-2063.
- [148] Siddique A B, Rahman M M, Islam M R, et al. Influence of iron plaque on accumulation and translocation of cadmium by rice seedlings[J]. Sustainability, 2021, 13(18): 10307.
- [149] Yuan Z F, Ge T D, Guan D X, et al. Iron plaque in paddy: formation, properties, functions, and applications[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2026, 214: 110075.
- [150] Fu Y Q, Yang X J, Shen H. Root iron plaque alleviates cadmium toxicity to rice (*Oryza sativa*) seedlings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 534-541.
- [151] Zhang J Y, Zhou H, Zeng P, et al. Nano-Fe₃O₄-modified biochar promotes the formation of iron plaque and cadmium immobilization in rice root[J]. Chemosphere, 2021, 276: 130212.
- [152] Kong F Y, Zhou J H, Guan D X, et al. Role of iron manganese plaque in the safe production of rice (*Oryza sativa* L.) grains: field evidence at plot and regional scales in cadmium-contaminated paddy soils[J]. Science of the Total Environment, 2023, 903: 166183.
- [153] Zhang X H, Shuai H, Xu C, et al. Effects of EDTA-Fe on phytoavailability of cadmium and arsenic to rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2024, 288: 117409.
- [154] Wang J, Yu L, Qin L Y, et al. Low pe+pH inhibits Cd transfer from paddy soil to rice tissues driven by S addition[J]. Chemosphere, 2023, 335: 139126.
- [155] Lai W L, Zhang Y, Chen Z H. Radial oxygen loss, photosynthesis, and nutrient removal of 35 wetland plants[J]. Ecological Engineering, 2012, 39: 24-30.
- [156] Dai J, Tang Z, Jiang N, et al. Increased arsenic mobilization in the rice rhizosphere is mediated by iron-reducing bacteria[J]. Environmental Pollution, 2020, 263: 114561.
- [157] Zhang Q, Chen H F, Xu C, et al. Heavy metal uptake in rice is regulated by pH-dependent iron plaque formation and the expression of the metal transporter genes[J]. Environmental and Experimental Botany, 2019, 162: 392-398.
- [158] Muehe E M, Adaktylou I J, Obst M, et al. Organic carbon and reducing conditions lead to cadmium immobilization by secondary Fe mineral formation in a pH-neutral soil[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(23): 13430-13439.
- [159] Zhang Q Q, Yan Z Z, Li X Z. Ferrous iron facilitates the formation of iron plaque and enhances the tolerance of *Spartina alterniflora* to artificial sewage stress[J]. Marine Pollution Bulletin, 2020, 157: 111379.
- [160] 罗秋红, 吴俊, 柏斌, 等. 水稻镉吸收与转运机理的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1142-1151.
- [161] Lux A, Martinka M, Vaculik M, et al. Root responses to cadmium in the rhizosphere: a review[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 21-37.
- [162] Ali S, Bani Mfarrej M F, Hussain A, et al. Zinc fortification and alleviation of cadmium stress by application of lysine chelated zinc on different varieties of wheat and rice in cadmium stressed soil[J]. Chemosphere, 2022, 295: 133829.
- [163] Ma H R, Du B Y, You L Y, et al. Reduction of cadmium accumulation in rice and human exposure by foliar spraying zinc oxide nanoparticles[J].

- Exposure and Health, 2025, 17(4): 975-985.
- [164] 赵萍, 瞿花香, 张玉烛. 锌对镉胁迫下水稻幼苗镉吸收转运及根系形态的影响[J]. 广东农业科学, 2017, 44(5): 99-105.
- [165] Kondakindi V R, Pabbati R, Erukulla P, et al. Bioremediation of heavy metals-contaminated sites by microbial extracellular polymeric substances: a critical view[J]. Environmental Chemistry and Ecotoxicology, 2024, 6: 408-421.
- [166] Liu W, Zhang J S, Jin Y J, et al. Adsorption of Pb(II), Cd(II) and Zn(II) by extracellular polymeric substances extracted from aerobic granular sludge: efficiency of protein[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2): 1223-1232.
- [167] Gu T Y, Lu Y Q, Li F, et al. Microbial extracellular polymeric substances alleviate cadmium toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) by regulating cadmium uptake, subcellular distribution and triggering the expression of stress-related genes[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2023, 257: 114958.
- [168] 王杏, 王革娇, 史凯祥. 微生物镉解毒机制及微生物-植物互作修复研究进展[J]. 微生物学通报, 2023, 50(4): 1666-1680.
- [169] Lin H, Zhou M Y, Li B, et al. Mechanisms, application advances and future perspectives of microbial-induced heavy metal precipitation: a review[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2023, 178: 105544.
- [170] Huang H, Lv Y W, Tian K K, et al. Influence of sulfate reducing bacteria cultured from the paddy soil on the solubility and redox behavior of Cd in a polymetallic system[J]. Science of the Total Environment, 2023, 901: 166369.
- [171] 徐文婷, 陈国梁, 屈志慧, 等. 微生物在镉污染土壤修复中的应用及其作用机理[J]. 生物工程学报, 2023, 39(7): 2612-2623.
- [172] Li D D, Diao Z K, Shu A P, et al. *Deinococcus* sp. NH1 enhances cadmium tolerance in rice by modulating rhizosphere microbiome and plant metabolism[J]. Journal of Hazardous Materials, 2026, 506: 141623.
- [173] 毛双倍, 毛纯泽, 石於嘉, 等. 霍氏肠杆菌 BG200 的分离鉴定及其镉耐受性和对镉胁迫下水稻生长的影响[J]. 微生物学通报, 2025, 52(7): 3039-3057.
- [174] Ali Q, Ayaz M, Yu C J, et al. Cadmium tolerant microbial strains possess different mechanisms for cadmium biosorption and immobilization in rice seedlings[J]. Chemosphere, 2022, 303: 135206.
- [175] 李晨晨, 曾桃, 易筱筠, 等. 铁还原菌作用下含镉聚合硫酸铁絮体中铁还原与镉释放规律及其影响因素[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2): 778-786.
- [176] Lin X Y, Li H B, Juhasz A L, et al. Lower cadmium bioavailability and toxicity in Japonica rice than in indica rice: mechanisms and health implications[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 59(2): 1156-1169.
- [177] Li K, Cao C L, Ma Y B, et al. Identification of cadmium bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution[J]. Science of the Total Environment, 2019: 1022-1028.
- [178] Chen H R, Yang Y, Ye Y F, et al. Differences in cadmium accumulation between indica and Japonica rice cultivars in the reproductive stage[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 186: 109795.
- [179] Chen L M, Wu W G, Han F X, et al. Agronomic management and rice varieties controlling Cd bioaccumulation in rice[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(13): 2376.
- [180] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5545-5553.
- [181] Cao F B, Wang R F, Cheng W D, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, lead and copper in rice and approaches for reducing the accumulation[J]. Science of the Total Environment, 2014, 496: 275-281.
- [182] Feng K X, Li J X, Yang Y C, et al. Cadmium absorption in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(9): 8019.
- [183] Wang T K, Fu Y F, Song S F, et al. Xizi 3: a new rice variety with stable low-cadmium-accumulation characteristics[J]. Molecular Breeding, 2025, 45(2): 21.
- [184] Ji M N, Ning W, Su L, et al. Reducing cadmium uptake without compromising nitrogen uptake, photosynthesis, or yield in low-Cd hybrid rice [J]. Field Crops Research, 2025, 322: 109759.
- [185] Guan M Y, Xia Y C, Zhang W X, et al. A review of reducing cadmium pollution in the rice-soil system in China[J]. Foods, 2025, 14(10): 1747.

Research Progresses on Sources, Accumulation Processes, and Influencing Factors of Cadmium in the Soil-rice System

CHEN Huahui^{1,2}, QIAO Lu³, HU Haiyan¹, LIU Yizhang¹, LI Ping^{1,*}

(1. Laboratory of Karst Environmental Evolution and Ecological Security, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: Soil cadmium contamination has emerged as a prominent environmental issue affecting the safe production of rice and human health in China. As a staple crop, rice (*Oryza sativa* L.) exhibits a strong capacity for cadmium accumulation, readily transferring and concentrating cadmium from the soil into its grains. This leads to excessive cadmium levels in rice, posing a threat to human health through the food chain. This paper provides a systematic review of cadmium sources, accumulation processes, and influencing factors within the soil-rice system. It first clarifies the primary sources of cadmium in this system, identifying atmospheric deposition and industrial mining activities as the main anthropogenic sources. Weathering of carbonate rocks and black shales contributes to elevated background cadmium levels in the soils of southwest China. It then explains the pathways through which cadmium enters rice plants via root and leaf uptake, exploring key stages and mechanisms of cadmium migration and accumulation in grains. Among these processes, transporters such as *OsHMA3*, *OsNramp5*, and *OsZIP7* play crucial roles in regulating cadmium absorption and transport processes in rice plants. Furthermore, this paper focuses on discussing the primary factors affecting cadmium uptake, highlighting that variations in soil pH, Eh, and cadmium speciation significantly impact rice cadmium uptake and transport. Finally, it outlines future research directions, aiming to provide theoretical foundations and references for the remediation of cadmium-polluted farmland and the safe production of rice.

Keywords: cadmium; rice; transport mechanism; influencing factors