

淹水灌溉协同钝化剂对水稻Cd吸收和积累的影响

李畅, 曾鹏, 杨文, 冯奕康, 张玥, 王德正, 辜娇峰, 廖柏寒, 周航

引用本文:

李畅, 曾鹏, 杨文, 冯奕康, 张玥, 王德正, 辜娇峰, 廖柏寒, 周航. 淹水灌溉协同钝化剂对水稻Cd吸收和积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 535–542.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0503>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

水分管理、铁硅材料与生物炭对不同水稻品种吸收镉的影响及其机制

罗小丽, 鞠琳, 姚爱军, 刘冲, 杨燕花, 曹健, 汤叶涛, 仇荣亮

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1506–1513 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1319>

生物炭耦合水分管理对稻田土壤As–Cd生物有效性及稻米累积的影响

李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 杨蕊嘉, 何钟响, 刘孝利, 铁柏清, 孙健

农业环境科学学报. 2018, 37(4): 696–704 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1505>

田间水肥管理措施及石灰施用对水稻Cd As积累的影响

颜惠君, 王伯勋, 唐仲, 杨雨萍, 王学东, 段桂兰, 赵方杰

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1448–1455 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0573>

联合施肥对复合污染农田水稻As、Cd吸收的影响

卢维宏, 张乃明, 苏友波, 李懋松, 熊润忠, 秦太峰

农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2217–2226 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0573>

蚕沙与海泡石联合施用对水稻根际土壤Cd生物有效性及籽粒Cd富集的影响

刘顺翔, 胡钧铭, 吴昊, 林大松, 张俊辉, 李婷婷, 韦翔华, 蒋鑫, 刘斌

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1686–1695 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1403>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李畅, 曾鹏, 杨文, 等. 淹水灌溉协同钝化剂对水稻Cd吸收和积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(3): 535–542.

LI C, ZENG P, YANG W, et al. Effects of flooding irrigation combined with passivators on Cd uptake and accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(3): 535–542.



开放科学 OSID

淹水灌溉协同钝化剂对水稻Cd吸收和积累的影响

李畅¹, 曾鹏^{1,2,3}, 杨文⁴, 冯奕康⁴, 张玥¹, 王德正¹, 辜娇峰^{1,2,3}, 廖柏寒^{1,2,3}, 周航^{1,2,3*}

(1. 中南林业科技大学环境科学与工程学院, 长沙 410004; 2. 湿地与土壤生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410004; 3. 稻米品质安全控制湖南省工程实验室, 长沙 410004; 4. 怀化市中方县农业农村局, 湖南 怀化 418005)

摘要: 在严格管控区Cd污染稻田开展田间试验, 探讨淹水灌溉协同石灰和土壤调理剂对土壤Cd的有效性, 以及水稻Cd吸收和积累的影响。结果表明: 淹水灌溉协同钝化修复技术可有效降低土壤Cd的有效性和水稻Cd的吸收和积累。淹水灌溉协同石灰和调理剂处理下, 土壤pH值较对照显著($P<0.05$)提高0.97个单位, 且土壤有效态Cd含量以及水稻根、茎和叶片Cd含量较对照分别显著($P<0.05$)降低36.4%、63.0%、80.3%和42.4%, 糙米Cd含量降至 $0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。淹水灌溉协同石灰和调理剂处理还显著抑制Cd向糙米部位的累积。糙米Cd的富集系数和Cd累积量较对照分别显著($P<0.05$)降低67.8%和62.8%。因此, 淹水灌溉协同土壤钝化修复技术是一种有效实现Cd污染稻田水稻安全生产的措施。

关键词: 土壤Cd污染; 水稻; 安全利用; 淹水灌溉; 钝化修复

中图分类号: S511; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)03-0535-08 doi:10.11654/jaes.2023-0503

Effects of flooding irrigation combined with passivators on Cd uptake and accumulation in rice

LI Chang¹, ZENG Peng^{1,2,3}, YANG Wen⁴, FENG Yikang⁴, ZHANG Yue¹, WANG Dezheng¹, GU Jiaofeng^{1,2,3}, LIAO Bohan^{1,2,3}, ZHOU Hang^{1,2,3*}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China; 2. Hunan Provincial Key Laboratory of Wetland and Soil Ecological Remediation, Changsha 410004, China; 3. Hunan Provincial Engineering Laboratory of Rice Quality and Safety Control, Changsha 410004, China; 4. Zhongfang Agriculture and Rural Bureau, Huaihua 418005, China)

Abstract: A field experiment was conducted in a strictly controlled area of a soil cadmium (Cd)-contaminated paddy field to investigate the effects of flooding irrigation combined with lime and soil passivators on the availability of Cd in soil, Cd uptake, and accumulation in rice. The results showed that flooding irrigation combined with passivators could effectively reduce Cd availability in the soil and Cd uptake and accumulation in rice. The soil pH under the treatment of flooding irrigation combined with lime and soil passivators was increased by 0.97 units relative to the control, while the soil available Cd content, as well as the Cd content in roots, stems and leaves of rice were decreased by 36.4%, 63.0%, 80.3%, and 42.4%, respectively. The treatment of flooding irrigation combined with lime and soil passivators reduced the content of Cd in brown rice to $0.15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Furthermore, the Cd accumulation in brown rice was significantly inhibited by the flooding irrigation combined with the lime and soil passivator treatment. Compared to the control, the Cd bioconcentration factor and total Cd accumulation in brown rice decreased by 67.8% and 62.8%, respectively. Therefore, flooding irrigation combined with passivators was an effective measure to achieve rice safety production in the Cd-contaminated rice fields.

Keywords: soil Cd contamination; rice; safe utilization; flooding irrigation; passivation

收稿日期: 2023-06-26 录用日期: 2023-08-21

作者简介: 李畅 (1996—), 男, 湖南长沙人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: lichang0731@qq.com

*通信作者: 周航 E-mail: zhouhang4607@163.com

基金项目: 湖南省重点研发计划项目 (2021NK2027); 湖南省自然科学基金项目 (2021JJ31159)

Project supported: Key Research and Development Program of Hunan Province, China (2021NK2027); Natural Science Foundation of Hunan Province, China (2021JJ31159)

生态环境部发布的《2021年中国生态环境状况公报》表明,影响我国农用地土壤环境质量的主要污染物是重金属,其中镉(Cd)为首要污染物。而在我国南方,Cd污染带来的健康风险正在增加^[1]。尤其在湖南省,部分地区超过70%的稻米中Cd含量超过食品污染物标准限值(GB 2672—2022)^[2]。因此,对Cd污染农田实施经济、持续的修复治理技术措施,实现安全生产刻不容缓。

农田重金属污染土壤的修复方法主要有化学淋洗、异位固化、原位钝化、农艺调控等。其中原位钝化技术因具有高效、便捷、快速等优点^[3],在农田重金属污染土壤修复治理过程中得到广泛应用。目前常用的钝化剂主要有碱性物质或碱性肥料类、含磷类、黏土矿物类以及有机肥类等^[4]。其中,石灰类矿物能显著提高土壤pH,从而降低土壤中重金属的活性,减少作物对重金属的吸收^[5]。大量研究结果表明石灰是最适合用于钝化土壤中Cd的低成本碱性物质^[6-7]。有研究表明,施用石灰能使严格管控区Cd污染稻田早稻糙米Cd含量降低22.6%~38.7%,晚稻糙米Cd含量降低22.9%~31.8%^[8]。施用富含硅钙的土壤调理剂可降低土壤中DTPA提取态Cd含量并改变土壤中Cd的赋存形态,使水稻糙米Cd含量降低23.1%~71.5%^[9],且其对于不同水稻品种均表现出较好的降Cd效果^[10]。有研究表明,施用石灰和富硅钙的土壤调理剂可钝化不同污染源及不同程度的Cd污染土壤中的Cd,并降低糙米中的Cd含量^[11],此外石灰和富含硅钙的土壤调理剂价格低廉且易得,广泛应用于我国南方多省的酸性农田土壤Cd污染修复治理。

有研究发现,淹水处理可降低土壤氧化还原电位(Eh),促进土壤中硫酸盐还原菌等厌氧型微生物的生长^[12]。硫酸盐还原菌可将土壤中的 SO_4^{2-} 还原成 S^{2-} , S^{2-} 可与 Cd^{2+} 形成CdS沉淀从而降低Cd在土壤中的活性^[13],进而降低水稻对Cd的吸收和积累^[14]。笔者前期研究也发现^[15],全生育期淹水灌溉处理能降低土壤Eh值并提升土壤pH值,有效减少水稻对Cd的吸收,水稻糙米Cd含量降至 $0.06\sim 0.10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。杨小粉等^[16]的研究表明长期淹水灌溉显著降低了水稻各部位Cd含量,并有效抑制Cd从茎叶向籽粒的转运。然而,在严格管控区Cd污染稻田仅实施淹水灌溉、钝化剂等单一技术措施均难以实现水稻的安全生产^[17]。单施石灰很难使得严格管控区Cd污染稻田晚稻糙米Cd含量达到国家安全食用标准^[8];而在酸性Cd污染土壤中,单施硅钙基土壤调理剂对于糙米Cd的降低

效果也有待提高^[18]。因此在严格管控区需进一步开展淹水灌溉、土壤钝化剂等多种技术措施联合对水稻Cd吸收和积累的影响研究^[19]。

本着价格低廉的原则,选取石灰、土壤调理剂2种钝化剂,通过在Cd污染稻田严格管控区开展田间试验,研究淹水灌溉协同石灰和市售土壤调理剂对土壤Cd生物有效性,以及水稻生长和Cd吸收累积的影响,以期为严格管控区Cd污染稻田修复和安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点和材料

田间试验地点位于湖南省怀化市中方县铜湾镇竹元头村($27^{\circ}34'14.75''\text{N}$, $110^{\circ}14'43.75''\text{E}$)的某Cd污染严格管控区稻田,供试稻田土壤初始pH值为5.15,有机质含量为 $30.22\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,阳离子交换量(CEC)为 $42.36\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,土壤总Cd含量与有效态Cd含量分别为 $1.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.206\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验地区2022年日平均气温 17°C ,年降水量 $1\,137.4\text{ mm}$ 。水稻品种为晶两优华占(籼型两系杂交一季稻),由袁隆平农业高科技股份有限公司提供。

石灰由洪江市建方建材有限公司提供,主要成分为氧化钙($\text{CaO}\geq 70\%$)。土壤调理剂由南京宁粮生物工程有限公司提供,主要成分为氧化钙($\text{CaO}\geq 33\%$)、二氧化硅($\text{SiO}_2\geq 28\%$)、氧化镁($\text{MgO}\geq 5\%$)和氧化钾($\text{K}_2\text{O}\geq 2\%$),pH为10~12。石灰和土壤调理剂中的Cd含量分别为 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验共设置4个不同处理,并依照前期试验结果设置钝化剂施用量,分别为施加 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 石灰(T1)、施加 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 调理剂(T2)、淹水灌溉(T3)、淹水灌溉并施加 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 石灰和 $150\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 调理剂的协同修复处理(T4),以不施加任何修复措施作为对照(CK)。试验区每个处理田块面积约为 333.3 m^2 ,每个处理重复3次。每公顷地种植水稻约18.75万穴,每穴两株。各处理田块中间以田埂间隔,田埂宽20~30 cm,高约30 cm,用塑料薄膜包裹覆盖防止漏水、串水。2022年6月中下旬在各样方中进行水稻晚稻插秧,各样方四侧均设置3行水稻保护行。T3和T4处理保持全生育期淹水灌溉。T1和T2处理的水分管理方式与农户常规田间管理一致。水稻追肥及病虫害防治情况与农户常规田间管理一致。

在水稻种植的成熟期进行采样收获(9月23日)。

每个田块按照S型布点法采集15株水稻植株。将植株置于尼龙网袋带回实验室后依次用自来水、蒸馏水、超纯水洗净,105℃杀青,70℃烘干至恒质量。水稻植株分根、茎、叶、糙米和谷壳5个部位分别称取干质量,粉碎后用塑料密封袋保存备用。同时采集水稻相应根际土壤,土样自然风干,磨碎,过10目和100目尼龙筛,保存待测。

1.3 样品分析和测定

土壤pH值用酸度计(PHS-3C,雷磁)测定,固液比为1:2.5;土壤CEC采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定;土壤总Cd含量采用王水-高氯酸消解^[20],土壤有效态Cd含量采用DTPA提取(GB/T 23739—2009),消解液和浸提液中的Cd含量采用ICP-AES(ICP 6300, ThermoFisher)测定。水稻植株Cd含量采用干灰化法消解(GB/T 5009—2003),消解液中的Cd含量采用石墨炉-原子吸收分光光度计(240Z, Agilent)测定。消解过程以国家标准物质——土壤[GBW(E)-070009]和湖南大米[GBW 10045(GSB-23)]进行质量控制,Cd的回收率分别为101%~103%和98%~101%。

1.4 数据分析

富集系数(BCF)为植物不同部位Cd含量与土壤总Cd含量的比值^[21]。

水稻各部位Cd累积量为水稻某部位Cd含量与该部位生物量的乘积。

协同修复技术理论效果: $W=[1-(1-W_1) \times (1-W_2) \times (1-W_3)] \times 100\%$

式中: $W_1 \sim W_3$ 分别为T1~T3处理下水稻各部位Cd含量降低百分比。

采用Microsoft Office 2016、IBM SPSS Statistics 19.0进行数据分析和统计,所有数据为3个重复样本的平均值±标准偏差。所有图采用Origin 2016进行绘制。采用ANOVA单因素分析法和Duncan比较法

分析不同处理间的差异, $P<0.05$ 表示不同处理之间具有显著差异。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻生长及产量的影响

从表1可看出,T1、T2、T3和T4处理下水稻分蘖数和根部生物量与CK处理相比无显著差异。与CK处理相比,T2和T4处理下水稻株高显著提高了18.5%和10.4% ($P<0.05$),水稻地上部位生物量提高了23.1%和26.9%,产量提高了27.8%和31.3%,表明施加土壤调理剂能一定程度促进水稻的生长。同时,T4处理下水稻地上部位生物量较T3处理显著提高了42.5% ($P<0.05$),产量较T1处理显著提高了57.8% ($P<0.05$),表明淹水灌溉协同石灰和土壤调理剂可一定程度促进水稻的生长和产量的提高。

2.2 不同处理对土壤pH和CEC的影响

淹水灌溉协同石灰和调理剂处理下水稻根际土壤pH值和CEC变化分别如图1(a)和图1(b)所示。由图1(a)可知,与CK处理相比,T1~T4处理下土壤pH值均显著提升 ($P<0.05$),尤其是T4处理下土壤pH值增幅可达0.97个单位。同时,T4处理下土壤pH值较T1和T2处理分别显著提高0.52个和0.32个单位。由图1(b)可看出,T1和T4处理下土壤CEC较CK分别提高8.1%和5.0%,但差异不显著。因此,淹水灌溉协同石灰和调理剂能显著提高土壤pH。

2.3 不同处理对土壤Cd生物有效性的影响

由图2看出,在T1~T4处理下土壤DTPA提取态Cd含量均低于CK处理,尤其是T4处理下土壤DTPA提取态Cd含量显著降低36.4%。同时T4处理下土壤DTPA提取态Cd含量较T1、T2和T3处理分别降低5.6%、10.6%和14.7%,表明淹水灌溉协同石灰和调理剂能进一步有效降低土壤Cd的生物有效性。

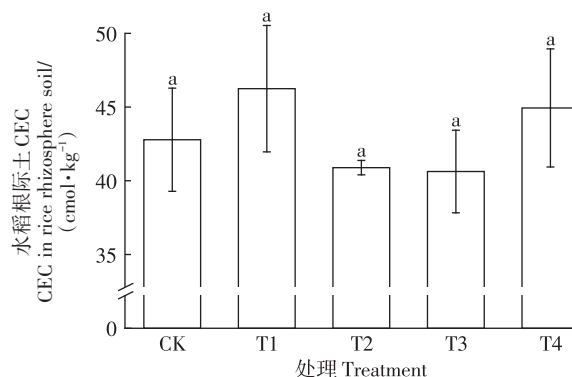
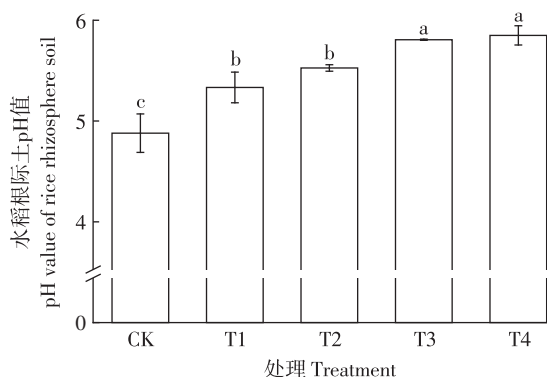
表1 淹水灌溉协同钝化剂处理下水稻株高、分蘖数和生物量的变化

Table 1 Chang of plant height, tiller number and biomass of rice under flooding irrigation combined with passivators

处理 Treatment	株高 Plant height/cm	分蘖数 Tiller number	根部生物量/(g·株 ⁻¹) Root biomass/(g·plant ⁻¹)	地上部位生物量/(g·株 ⁻¹) Aboveground biomass/(g·plant ⁻¹)	糙米生物量/(g·株 ⁻¹) Brown rice biomass/(g·plant ⁻¹)	产量 Yield/(kg·hm ⁻²)
CK	81.0±1.0c	22±5a	9.1±1.4a	163.5±36.1ab	54.5±19.3ab	20 437.3±7 246.6ab
T1	83.0±1.0c	25±4a	7.2±1.5a	156.3±25.0ab	45.4±2.3b	17 006.1±868.9b
T2	96.0±1.0a	26±2a	7.6±1.3a	201.2±32.1ab	69.7±12.7a	26 125.5±4 762.7a
T3	93.5±4.0a	24±1a	7.7±1.4a	145.6±37.1b	51.7±3.6ab	19 379.3±1 364.6ab
T4	89.3±2.1b	25±2a	8.4±0.8a	207.4±15.7a	71.6±8.8a	26 832.6±3 294.7a

注:不同小写字母表示不同处理间具有显著差异, $P<0.05$ 。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at $P<0.05$. The same below.



不同小写字母表示不同处理间具有显著差异, $P < 0.05$ 。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments at $P < 0.05$. The same below

图1 淹水灌溉协同钝化修复下土壤pH值和CEC的变化

Figure 1 Changes of soil pH value and CEC under flooding irrigation

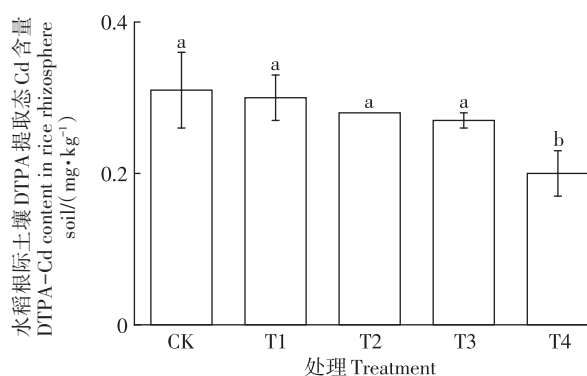


图2 淹水灌溉协同钝化修复下土壤有效态Cd含量的变化

Figure 2 Changes of soil available Cd content under flooding irrigation and passivation restoration

2.4 不同处理对水稻Cd吸收和累积的影响

由图3可知,在T1和T2处理下水稻茎部Cd含量与CK相比分别显著降低57.9%和63.5% ($P < 0.05$),谷壳Cd含量分别显著降低45.0%和60.8% ($P < 0.05$),但糙米Cd含量无显著降低,表明单一石灰和调理剂可一定程度降低水稻对Cd的吸收。然而,T3和T4处理下水稻各部位Cd含量较CK处理均显著降低 ($P < 0.05$),其中根降低了40.4%和63.0%,茎降低了72.1%和80.3%,叶降低了54.3%和42.4%,谷壳降低了57.2%和61.5%,糙米部位降低了51.4%和67.8%,尤其是T4处理下糙米Cd含量为 $0.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,达到食品安全国家标准(GB 2762—2022),表明淹水灌溉协同石灰和调理剂可有效降低水稻Cd吸收并实现糙米的安全生产。

2.5 不同处理对水稻Cd总累积量和富集能力的影响

由图4可知,淹水灌溉、石灰和调理剂,以及淹水灌溉协同两种调理剂均能有效降低水稻各部位Cd的

BCF值。尤其在T4处理下,水稻根、茎、叶、谷壳和糙米对Cd的BCF值较CK处理分别显著降低63.0%、80.3%、42.5%、20.1%和67.8% ($P < 0.05$),表明淹水灌溉协同石灰和调理剂能有效降低水稻各部位对Cd的富集能力。

由图5可进一步看出,T1~T4处理下水稻Cd总累积量均显著低于CK处理 ($P < 0.05$),降低了36.0%~66.5%。其中,水稻地上和地下部位Cd累积量均在T4处理下达到最小值。T4处理下,水稻根、谷壳和糙米的Cd累积量较CK处理分别显著降低65.3%、64.4%和62.8% ($P < 0.05$),表明淹水灌溉协同石灰和调理剂能有效降低水稻对Cd的累积。

3 讨论

在本试验中,淹水灌溉协同石灰和调理剂处理下水稻株高和产量与CK相比均有显著增加的趋势(表1)。有研究表明,淹水灌溉协同钝化修复措施中的土壤调理剂富含大量水稻生长所必需的微量营养元素如Ca、Si等,可一定程度上促进水稻分蘖和光合作用物质积累^[22-23],从而促进水稻生长并提高水稻产量。外源施加Si显著提高了水稻光合速率和蒸腾效率,显著改善了其光合作用^[24]。因此可以推测,淹水灌溉协同钝化修复有利于水稻的生长和产量的提高。

本试验发现,T1~T4处理下土壤pH均高于CK处理(图1),而土壤DTPA提取态Cd含量均低于CK处理(图2)。石灰和土壤调理剂均属于碱性物质,可有效调节土壤酸碱度从而提高土壤pH。同时,连续淹水处理也可使微酸性土壤的pH提升至中性^[15,25],而pH值是控制土壤Cd有效性的关键驱动因素。本试

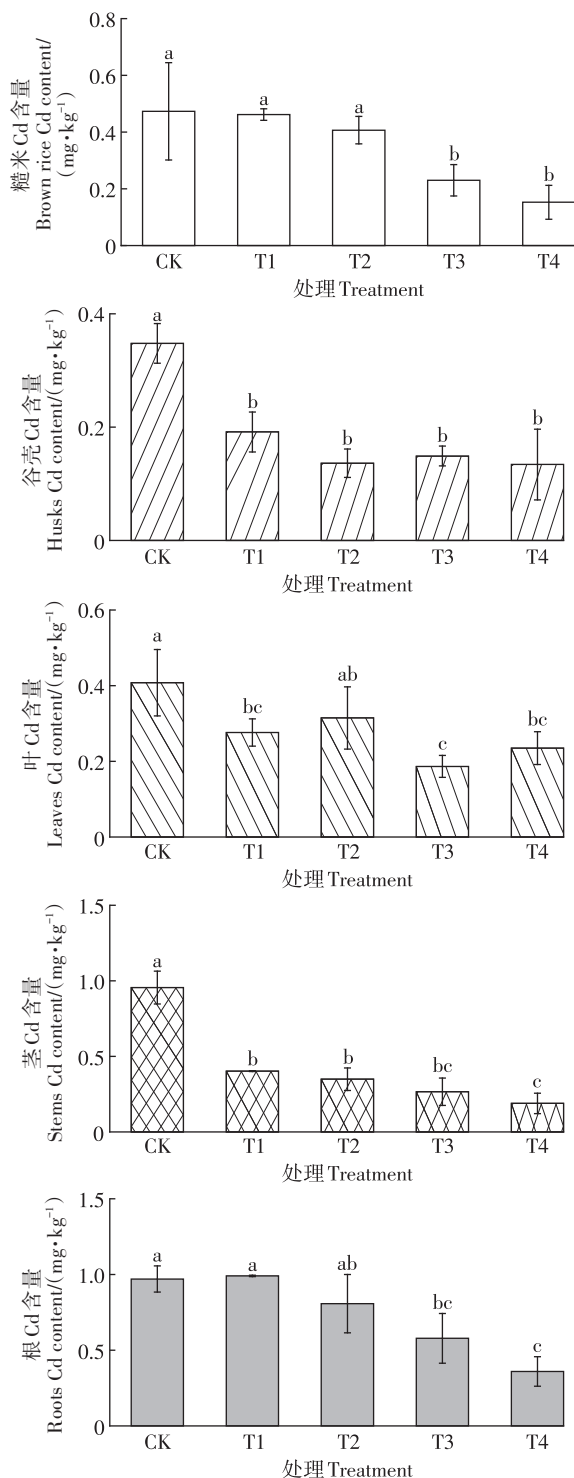


图3 淹水灌溉协同钝化修复下水稻各部位Cd含量的变化
Figure 3 Changes of Cd content in different parts of rice under flooding irrigation and passivation restoration

验中T4处理下土壤中有效态Cd含量与CK相比显著降低(图2)。土壤pH值的升高,可增加土壤中Fe(Ⅲ)氧化物对Cd的吸附能力^[25],促进Cd²⁺与OH⁻形成金属氧化物沉淀,从而导致土壤中有效态Cd显著降

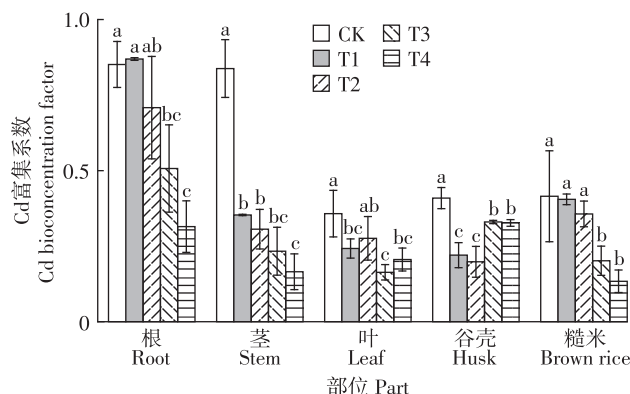
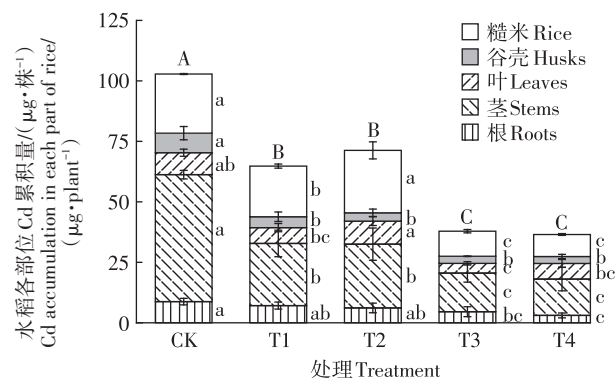


图4 淹水灌溉协同钝化修复下水稻各部位富集系数的变化
Figure 4 Changes of BCF in different parts of rice under flooding irrigation and passivation rest



不同大写字母代表各处理间水稻Cd总累积量差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示处理间水稻不同部位Cd累积量差异显著($P<0.05$)。Different capital letters represent significant differences in the total Cd accumulation of rice among different treatments ($P<0.05$); different lowercase letters indicated significant differences in Cd accumulation in different parts of rice ($P<0.05$).

图5 淹水灌溉协同钝化修复下水稻各部位Cd累积量的变化
Figure 5 Changes of Cd accumulation in different parts of rice under flooding irrigation and passivation rest

低。淹水灌溉还可刺激铁还原菌和硫还原菌活性,促进根际土壤中Fe(Ⅲ)和S的还原,增加Fe²⁺和S²⁻的含量,进而促进Cd与无定形铁氧化物和硫化物或铁硫化物的结合,从而降低有效态Cd含量^[26]。土壤调理剂中富含的Si离子可与土壤中的Cd形成Si-Cd络合物^[21],从而降低土壤中Cd的有效性。因此,淹水灌溉协同钝化修复相较于单一修复处理更能有效地降低土壤中Cd的生物有效性。

在淹水灌溉协同钝化修复处理下,水稻体内Cd含量、Cd累积量、Cd的富集能力均显著降低(图3~图5),且淹水处理对降低水稻糙米部位Cd含量的效果均明显好于施加石灰和调理剂处理(表2),表明淹水

灌溉在降低水稻Cd累积过程中起着重要的作用。有研究表明,持续淹水处理显著下调水稻根部 *OsNramp1* 和 *OsLCD* 基因的相对表达量,进而降低水稻Cd的累积量^[27]。长期淹水灌溉可促进水稻根际径向氧损失(ROL)屏障形成,从而促进水稻根表铁膜的形成,进而减少水稻对Cd的吸收^[28]。淹水灌溉措施可使梭状芽胞杆菌等厌氧菌的丰度增加,导致更多的Cd保留在根细胞壁中,从而抑制Cd从根到茎部的迁移转运^[29]。Zeng等^[30]通过连续两季淹水灌溉使得严格管控区Cd污染稻田中Cd在水稻茎到叶的转运系数显著降低28.1%~51.1%,土壤可交换态Cd含量显著降低46.2%~55.2%,糙米Cd含量也显著降低。石灰和调理剂的施用也能够降低水稻植株中Cd的含量^[31]。调理剂中富含的营养元素阳离子(如Ca²⁺等)可与Cd²⁺竞争阳离子吸收通道^[5],进而降低水稻植株中Cd的积累。Wei等^[32]的研究发现,同时施用石灰和富Si的土壤调理剂可提高土壤pH值,且Si²⁺可通过增加Cd在细胞壁和植物汁液中的吸附和沉淀来减少其向质外体和共质体的运输。Yang等^[33]在Cd污染农田施用LS(石灰+海泡石)的长期定位研究表明,LS连续三季均有效降低了土壤有效态Cd含量并降低了水稻Cd累积风险,且在三季连续施用4 500 kg·hm⁻² LS时,土壤酸可提取态Cd含量显著降低了81.7%,水稻糙米Cd含量小于0.2 mg·kg⁻¹。Li等^[34]在淹水灌溉条件下施加坡面霉石后,土壤有效态Cd和糙米Cd含量分别降低了17.6%~44.1%和16.7%~55.6%,糙米Cd含量也小于0.2 mg·kg⁻¹。综上分析可知,淹水灌溉协同钝化修复处理对降低水稻Cd吸收与转运的效果好于单一淹水灌溉处理和单一钝化修复处理。淹水灌溉

协同钝化修复措施主要通过淹水灌溉措施使得土壤有效态Cd含量降低,水稻植株对Cd的吸收减少,并进一步通过施用石灰和调理剂提高土壤pH值、钝化土壤中的Cd,降低水稻植株对Cd的转运,从而达到更好的修复效果。

本试验结果表明,在Cd污染严格管控区稻田,淹水灌溉协同钝化修复(石灰+调理剂+淹水灌溉)可有效降低土壤中Cd的生物有效性和水稻Cd吸收,在该措施下,水稻糙米Cd含量低于国家安全食用标准(GB 2762—2022),且该措施有一定的增产效果。通过以糙米Cd含量降低百分数为指标计算出协同修复措施降低糙米Cd含量的理论效果与实际效果相比较(表2),可看出T4处理降低糙米Cd含量的实际效果(67.8%)好于理论效果(59.3%)。同时单一技术处理中T3对糙米Cd含量降低达到51.4%,明显高于钝化剂处理,表明组合技术中淹水灌溉处理对于降低糙米Cd含量的贡献高于钝化剂处理。本试验中使用的石灰和硅钙基土壤调理剂较为廉价,每公顷成本为4 500~6 000元,操作也较为便利。对于灌溉而言,在Cd污染土壤中种植水稻应采取全生育期淹水以保证其产量和食用安全,但在水资源紧张时也可考虑采取间歇灌溉的方式^[35]。也有相关研究表明,在碱性土壤,如石灰性土壤中,长期淹水灌溉并不能有效降低土壤中Cd的有效性,而应考虑其他水分管理措施^[36-37],且在碱性土壤中施用石灰或含钙的土壤调理剂可能会导致土壤pH降低、土壤Cd的活化和作物产量降低^[38]。因此,在酸性Cd污染严格管控区稻田,淹水灌溉协同钝化修复措施是一种有效修复农田、降低水稻Cd积累的方法。在后期的研究中,淹水灌溉协同钝化修复效果的长效性、稳定性还需开展长期定位研究。

4 结论

(1)淹水灌溉协同钝化修复可一定程度促进水稻的生长和生产。在淹水灌溉协同施加石灰和钝化剂处理下水稻株高和产量较对照分别增加10.4%和31.3%。

(2)淹水灌溉协同钝化修复措施可降低土壤中Cd的生物有效性,以及水稻对Cd的吸收。在淹水灌溉协同施加石灰和调理剂处理下,土壤有效态Cd含量和糙米Cd含量较对照分别降低了36.4%和67.8%,且糙米Cd含量低于食品安全国家标准。

(3)淹水灌溉协同钝化修复技术降低了水稻对

表2 淹水灌溉协同钝化修复措施对于糙米Cd含量降低理论与实际效果比较

Table 2 Comparison of the theoretical and practical effects of flood irrigation and passivation restoration measures on the reduction of Cd content in brown rice

技术类型 Technological type	处理 Treatment	糙米Cd含量降低百分比 Percentage reduction of Cd content in brown rice/%
单一技术处理 Single technology processing	T1	2.5
	T2	14.1
	T3	51.4
组合技术处理 Combined technology processing	T4理论效果 Theoretical effect in T4	59.3
	T4实际效果 Actual effect in T4	67.8

Cd的吸收与转运,是一种有效用于严格管控区Cd污染稻田的安全生产技术措施。

参考文献:

- [1] MU T, WU T, ZHOU T, et al. Geographical variation in arsenic, cadmium, and lead of soils and rice in the major rice producing regions of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 677:373–381.
- [2] 倪小英, 许艳霞, 梅广, 等. 主要重金属在污染稻谷籽粒中的分布规律研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(1):7–11. NI X Y, XU Y X, MEI G, et al. Distribution of major heavy metals in rice grains[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2017, 32(1):7–11.
- [3] 王林, 徐应明, 孙国红, 等. 海泡石和磷酸盐对镉铅污染稻田土壤的钝化修复效应与机理研究[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2):314–320. WANG L, XU Y M, SUN G H, et al. Effect and mechanism of immobilization of paddy soil contaminated by cadmium and lead using sepiolite and phosphate[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2):314–320.
- [4] 单世平, 郭照辉, 付祖姣, 等. 降低水稻镉吸收原位钝化修复技术及其作用机理[J]. 生态科学, 2015, 34(4):175–179. SHAN S P, GUO Z H, FU Z J, et al. Research on *in situ* immobilization remediation and its mechanism of reducing cadmium absorption by rice[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(4):175–179.
- [5] 李林峰, 王艳红, 李义纯, 等. 调理剂耦合水分管理对双季稻镉和铅累积的阻控效应[J]. 环境科学, 2022, 43(1):472–480. LI L F, WANG Y H, LI Y C, et al. Inhibitory effects of soil amendment coupled with water management on the accumulation of Cd and Pb in double-cropping rice[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(1):472–480.
- [6] HAMID Y, TANG L, SOHAIL M I, et al. An explanation of soil amendments to reduce cadmium phytoavailability and transfer to food chain [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 660:80–96.
- [7] INKHAM R, KIJJANAPANICH V, HUTTAGOSOL P, et al. Low-cost alkaline substances for the chemical stabilization of cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 250:109395.
- [8] 周亮, 肖峰, 肖欢, 等. 施用石灰降低污染稻田上双季稻镉积累的效果[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4):780–791. ZHOU L, XIAO F, XIAO H, et al. Effects of lime on cadmium accumulation of double-season rice in paddy fields with different cadmium pollution degrees[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(4):780–791.
- [9] WANG H Y, WEN S L, CHEN P, et al. Mitigation of cadmium and arsenic in rice grain by applying different silicon fertilizers in contaminated fields[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(4):3781–3788.
- [10] SUN G X, ZHANG L, CHEN P, et al. Silicon fertilizers mitigate rice cadmium and arsenic uptake in a 4-year field trial[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2021, 21(1):163–171.
- [11] 谢运河, 纪雄辉, 田发祥, 等. 不同Cd污染特征稻田施用钝化剂对水稻吸收积累Cd的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(2):1242–1250. XIE Y H, JI X H, TIAN F X, et al. Effect of passivator on Cd uptaking of rice in different Cd pollution characteristics paddy soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2):1242–1250.
- [12] 李明远, 张小婷, 刘汉斌, 等. 水分管理对稻田土壤铁氧化物形态转化的影响及其与镉活性变化的耦合关系[J]. 环境科学, 2022, 43(8):4301–4312. LI M Y, ZHANG X T, LIU H Y, et al. Effects of water management on the transformation of iron oxide forms in paddy soils and its coupling with changes in cadmium activity[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8):4301–4312.
- [13] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930–3939. JI X H, LIANG Y C, LU Y H, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930–3939.
- [14] 吴佳, 纪雄辉, 魏维, 等. 水分状况对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7):1427–1434. WU J, JI X H, WEI W, et al. Effect of water levels on cadmium and arsenic absorption and transportation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7):1427–1434.
- [15] TIAN T, ZHOU H, GU J, et al. Cadmium accumulation and bioavailability in paddy soil under different water regimes for different growth stages of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2019, 440:327–339.
- [16] 杨小粉, 伍湘, 汪泽钱, 等. 水分管理对水稻镉吸收积累的影响研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(1):2091–2101. YANG X F, WU X, WANG Z Q, et al. Effects of water management on the absorption and accumulation of cadmium and arsenic in rice[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(10):2091–2101.
- [17] 曹雪清, 徐晓燕, 韩磊, 等. 全生育期淹水联合钝化材料对重度Cd污染下水稻生长和镉富集的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(11):2498–2506. CAO Y Q, XU X Y, HAN L, et al. Effects of continuous flooding associated immobilizing treatments on growth and Cd accumulation in rice in heavy Cd polluted soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(11):2498–2506.
- [18] 李娜, 贺红周, 冯爱焯, 等. 渝西地区镉轻度污染稻田安全利用技术[J]. 环境科学, 2019, 40(10):4637–4646. LI N, HE H Z, FENG A X, et al. Safe utilization of paddy soils lightly polluted with cadmium in western Chongqing[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(10):4637–4646.
- [19] YE X X, LI H Y, ZHANG L G, et al. Amendment damages the function of continuous flooding in decreasing Cd and Pb uptake by rice in acid paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 147:708–714.
- [20] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. LU R K. Methods for agrochemical analysis of soil[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [21] 高子翔, 周航, 杨文强, 等. 基施硅肥对土壤镉生物有效性及水稻镉累积效应的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(12):5299–5307. GAO Z X, ZHOU H, YANG W T, et al. Impacts of silicon fertilizer as base manure on cadmium bioavailability in soil and on cadmium accumulation in rice plants[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(12):

- 5299–5307.
- [22] 刘杰, 罗尊长, 肖小平, 等. 土壤调理剂对冷浸田土壤特性及水稻生长的影响[J]. 土壤, 2016, 48(3): 529–533. LIU J, LUO Z C, XIAO X P, et al. Effects of amendments on soil properties and rice growth in cold water logged paddy field[J]. *Soils*, 2016, 48(3): 529–533.
- [23] ZHAO J, QIN S, PAN P, et al. Microbial driving mechanism of soil conditioner on reducing cadmium uptake by rice and improving soil environment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2023, 349: 108452.
- [24] LI L F, AI S Y, LI Y C, et al. Exogenous silicon mediates alleviation of cadmium stress by promoting photosynthetic activity and activities of antioxidative enzymes in rice[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2018, 37(2): 602–611.
- [25] 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.
- [26] ZHANG F, PENG R, WANG L, et al. Iron and sulfur reduction caused by different growth seasons inhibits cadmium transfer in the soil-rice system[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 236: 113479.
- [27] 陈江民, 杨永杰, 黄奇娜, 等. 持续淹水对水稻镉吸收的影响及其调控机理[J]. 中国农业科学, 2017, 50(17): 3300–3310. CHEN J M, YANG Y J, HUANG Q N, et al. Effects of continuous flooding on cadmium absorption and its regulation mechanisms in rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(17): 3300–3310.
- [28] LI H B, ZHANG H Q, YANG Y J, et al. Effects and oxygen-regulated mechanisms of water management on cadmium (Cd) accumulation in rice (*Oryza sativa*) [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157484.
- [29] XIAO B, HUANG J, GUO J, et al. Flooding-induced rhizosphere *Clostridium* assemblage prevents root-to-shoot cadmium translocation in rice by promoting the formation of root apoplastic barriers[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 439: 129619.
- [30] ZENG P, WEI B Y, ZHOU H, et al. Co-application of water management and foliar spraying silicon to reduce cadmium and arsenic uptake in rice: a two-year field experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151801.
- [31] CUNHA K P V D, NASCIMENTO C W A D, PIMENTEL R M D M, et al. Cellular localization of cadmium and structural changes in maize plants grown on a cadmium contaminated soil with and without liming [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 160(1): 228–234.
- [32] WEI X, ZHANG P, ZHAN Q, et al. Regulation of As and Cd accumulation in rice by simultaneous application of lime or gypsum with Si-rich materials[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(6): 7271–7280.
- [33] YANG W J, WANG S L, ZHOU H, et al. Combined amendment reduces soil Cd availability and rice Cd accumulation in three consecutive rice planting seasons[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2022, 111: 141–152.
- [34] LI J, XU Y. Immobilization remediation of Cd-polluted soil with different water condition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 607–612.
- [35] 易镇邪, 苏雨婷, 谷子寒, 等. 不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 364–368. YI Z X, SU Y T, GU Z H, et al. Effects of intermittent irrigation at different growth stages on yield components and cadmium accumulation of double-cropping rice in Cd-contaminated paddy field[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(5): 364–368.
- [36] WU G M, HU P J, ZHOU J W, et al. Sulfur application combined with water management enhances phytoextraction rate and decreases rice cadmium uptake in a *Sedum plumbizincicola*–*Oryza sativa* rotation[J]. *Plant and Soil*, 2019, 440(1/2): 539–549.
- [37] 柳小兰, 方慧, 王道平, 等. 土壤镉环境行为对水分管理模式的影响差异[J]. 环境科学与技术, 2022, 45(3): 104–110. LIU X L, FANG H, WANG D P, et al. Response difference of soil cadmium environmental behavior to water management mode[J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 45(3): 104–110.
- [38] LI L, MAO K, IPPOLITO J A, et al. Calcium amendments affect heavy metal bioavailability in acidic and calcareous soils[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2022, 19(10): 10067–10076.