

不同调理剂对富硒高镉农田水稻降镉增硒效果研究

曹迟, 鲍广灵, 陶荣浩, 王垚, 马中文, 吴承龙, 廖霞, 马友华

引用本文:

曹迟, 鲍广灵, 陶荣浩, 王垚, 马中文, 吴承龙, 廖霞, 马友华. 不同调理剂对富硒高镉农田水稻降镉增硒效果研究[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(10): 2155–2164.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-1298>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同粒径贝壳粉对水稻吸收镉与硒的影响

潘丽萍, 谭骏, 刘斌, 邢颖, 黄雁飞, 陈锦平, 刘永贤

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2134–2140 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0244>

钝化剂联合农艺措施修复镉污染水稻土

陈思慧, 张亚平, 李飞, 沈凯, 岳修鹏

农业环境科学学报. 2019, 38(3): 563–572 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0587>

生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响

文炯, 李祖胜, 许望龙, 陈鸽, 白玲玉, 曾希柏, 吴家梅

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2496–2502 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0419>

外源硒和耐硒细菌对镉胁迫下水稻生长、生理和硒镉积累的影响

王波, 张然然, 杨如意, 石晓菁, 苏楠楠, 朱濛, 咎树婷

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2710–2718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0437>

不同生育期施用硅肥对水稻吸收积累镉硅的影响

彭华, 田发祥, 魏维, 周宇健, 官迪, 柳赛花, 纪雄辉

农业环境科学学报. 2017, 36(6): 1027–1033 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0288>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

曹迟, 鲍广灵, 陶荣浩, 等. 不同调理剂对富硒高镉农田水稻降镉增硒效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(10): 2155-2164.

CAO C, BAO G L, TAO R H, et al. Effects of different conditioners on reducing cadmium and increasing selenium in rice in selenium-rich and high-cadmium farmland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(10): 2155-2164.

不同调理剂对富硒高镉农田水稻降镉增硒效果研究

曹迟¹, 鲍广灵¹, 陶荣浩¹, 王焱¹, 马中文¹, 吴承龙², 廖霞¹, 马友华^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036; 2. 石台县农业技术推广中心富硒农业试验站, 安徽 石台 245100)

摘要:为探讨不同修复措施对硒镉高背景区水稻的降镉增硒效果, 在田间试验条件下, 设置不同土壤调理剂处理进行效果对比, 分析其对水稻产量、不同部位镉硒吸收转运、土壤pH、有效态镉含量及镉的化学形态等的影响。结果表明: 除单施钙镁磷肥外, 其余处理产量均较对照显著增加, 增产范围在11.95%~25.98%。不同调理剂均较对照降低籽粒中镉含量以及提升硒含量, 各处理下籽粒硒含量均达到《富硒稻谷》标准, 除石灰处理外其余各调理剂处理籽粒镉含量均在食品安全国家标准(0.2 mg·kg⁻¹)以下, 其中生物有机肥对水稻籽粒降镉增硒效果最好。相较对照, 施用不同调理剂土壤pH值增加0.10~0.61个单位, 从而降低了土壤有效态镉的含量, 使土壤镉向残渣态转化。其中森美思处理下土壤镉的弱酸提取态降幅最大, 达到17.59%; 生物有机肥处理下土壤镉的可还原态降幅最大, 为40.13%。钙镁磷肥+硫酸钾、森美思和生物有机肥处理下投入产出比显著高于其余处理, 分别为3.39、3.31和3.18。综合来看, 在硒镉高背景土壤中安全生产富硒水稻时, 施用生物有机肥可以有效降低土壤镉有效性, 抑制水稻中镉的迁移转运并促进籽粒对硒的富集, 且具有较高的经济效益和可操作性。

关键词:富硒土; 镉; 水稻; 吸收与转运; 富集系数; 土壤调理剂

中图分类号: X173; X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)10-2155-10 doi:10.11654/jaes.2022-1298

Effects of different conditioners on reducing cadmium and increasing selenium in rice in selenium-rich and high-cadmium farmland rice

CAO Chi¹, BAO Guangling¹, TAO Ronghao¹, WANG Yao¹, MA Zhongwen¹, WU Chenglong², LIAO Xia¹, MA Youhua^{1*}

(1. Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention and Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 2. Selenium-enriched Agricultural Experimental Station of Shitai Agricultural Technology Extension Center, Shitai 245100, China)

Abstract: The aim of the present study is to investigate the effects of different remedial measures on reducing cadmium and increasing selenium in rice in a high selenium and cadmium background area. Under field experimental conditions, the effects of different soil conditioners on rice yield, cadmium and selenium uptake and transportation in different parts of rice, soil pH, available cadmium content, and chemical forms of cadmium were analyzed. The yield of all treatments except single application of calcium magnesium phosphate fertilizer increased significantly compared with the control (11.95%–25.98%). The cadmium content of rice grain was decreased and the selenium content was increased by different conditioners compared with the control. The selenium content in rice grain reached the standard of "selenium-enriched rice" under all treatments. The cadmium content in rice grain treated with other conditioners except lime was below the National Food Safety Standard (0.2 mg·kg⁻¹). The bio-organic fertilizer treatment had the best effect on reducing cadmium

收稿日期: 2022-12-26 录用日期: 2023-02-23

作者简介: 曹迟(1998—), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 从事土壤重金属污染修复研究。E-mail: 2435412267@qq.com

*通信作者: 马友华 E-mail: yhma@ahau.edu.cn

基金项目: 安徽省科技重大攻关项目(17030701053)

Project supported: Major Science and Technology Project of Anhui Province, China(17030701053)

and increasing selenium in rice. Compared with the control, the pH value of the soil with different conditioners increased by 0.10–0.61 units, the content of available cadmium in the soil decreased, and soil cadmium was transformed into residual cadmium. The weak acid extractable fraction of cadmium in the soil treated with Senmeisi material decreased by 17.59%. The maximum reduction of soil cadmium reducible form was 40.13% under bio-organic fertilizer treatment. The input-output ratios under the treatments of calcium magnesium phosphate fertilizer + potassium sulfate, Senmeisi, and bio-organic fertilizer were significantly higher than the other treatments, being 3.39, 3.31, and 3.18 respectively. In conclusion, when selenium-rich rice is produced in soil with high background of selenium and cadmium, the application of bio-organic fertilizer could effectively reduce the availability of soil cadmium, inhibit the migration and transportation of cadmium in rice, and promote the enrichment of selenium in grains, and have high achievable economic benefits.

Keywords: selenium-enriched soil; cadmium; rice; absorption and transport; enrichment coefficient; soil conditioner

硒(Se)是人类生存必不可少的微量元素之一,具有抗氧化、抗癌、增强免疫力等多种功效^[1-2]。硒摄入不足会导致人体处于不健康或亚健康状态,并引发多种疾病^[3-4]。水稻是我国一半居民的主要粮食作物,食用富硒稻米补硒被认为具有安全、经济等优点。为提高民众对硒的摄入量,亟需对富硒地区丰富的硒资源加以利用。但有学者研究发现,土壤中硒常常由于呈“类质同象”而与重金属镉(Cd)等存在一定伴生关系^[5-6],这对开发天然富硒地区来生产富硒农产品产生了一定的潜在健康风险^[7]。孙协平等^[8]通过对三峡库区(重庆段)的研究发现,硒与土壤中的镉、铬、砷等重金属元素均存在显著的关系,其中镉的迁移性和毒性较高,可通过食物链进入人体,对人体的健康造成威胁。因此如何降低天然硒、镉高背景区域农田水稻中镉含量,安全生产富硒稻米是当前亟需解决的现实问题^[9-12]。

与此同时,针对镉高背景下水稻的安全生产,优化施肥作为目前最主要的农艺调控措施,不仅对农业生产有重要的增产效果,而且对作物镉污染具有明显的调控作用^[13-14]。铵态氮能酸化水稻根际,导致根际土壤有效态镉增加,而硝态氮则能碱化水稻根际,降低根际土壤有效态镉的含量^[15]。李造煌等^[16]发现,碱性含钙磷肥能够提高稻田土壤pH,导致碳酸盐结合态和铁锰氧化物结合态镉分配系数增加,有效态镉含量减少。此外,磷酸根离子导致土壤表面负电荷增加,有效态镉被大量吸附,水稻镉积累量大幅度降低^[17-18]。相关研究表明,施用磷肥会使水稻根系的镉吸收能力增强^[19]。相关研究表明,除氯化钾促进水稻镉积累外,硫酸钾和硝酸钾等钾肥也能够有效调控水稻镉污染^[20-21]。另外,增施有机肥能够使土壤有机质含量增加,有机质富含活性基团,能够有效吸附重金属镉,从而使得镉生物有效性降低^[22]。

目前对于提高土壤硒的有效性,增强作物对硒的

吸收的研究主要包括价态、结合态两个方面。土壤中硒的有效性不仅取决于总硒的含量,而且更重要的是取决于土壤中硒的形态转化^[23-24]。土壤中的硒常以Se(0)的原子形态和Se(-II)、Se(IV)、Se(VI)3种带电荷态存在^[25],其中Se(VI)溶解度和生物有效性较高,其次是Se(IV),而Se(0)和Se(-II)的溶解度和生物有效性均较低^[26]。对于土壤结合的硒形态而言,可溶态硒和可交换态硒是易被植物吸收利用的硒形态,常被认为是有效态硒^[27],其包含+6、+4和-2三个价态,其中+6和+4价态也被认为是植物从土壤中吸收硒的最重要价态^[28]。虽然有关调理剂影响土壤有效态硒的报道较少,但是相关研究表明施用调理剂能够调节土壤性质,从而影响土壤硒形态的转化,进而改变土壤硒的环境化学行为和有效性^[29]。

当前关于施用调理剂对硒镉高背景下农田水稻降镉增硒效果的研究较少,因此本研究选取池州市石台县某硒镉高背景农田开展田间验证性试验,分析比较不同修复措施对水稻籽粒镉降低效果和不同组织硒含量的提升状况,探索在水稻产量不降低,稻米中镉含量达标的同时增加水稻籽粒硒含量的修复措施,为镉污染富硒稻田安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于安徽省池州市石台县仙寓镇某硒镉高背景地。该地成土母质为寒武系荷塘组页岩残坡积物风化物,土壤类型为水耕人为土^[30],土壤质地为重壤土。该地区为亚热带湿润气候。参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)及《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)要求,本试验田耕地土壤重金属镉含量为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高于筛选值($0.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但低于农用地土壤污染风险管控值($2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),有效态镉

含量为 $0.275 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;土壤总硒含量为 $0.54 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,属于高硒等级($0.4\sim 3.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),有效态硒含量为 $0.046 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验区土壤基本理化性质:pH 6.19,有机质 $25.6 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 $16.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 $2.28 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 $153.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试材料

供试水稻品种为适宜当地种植的玉针香(湘审稻2009038)。

土壤调理材料:钙镁磷肥(GML)、石灰(SH)、天脊土壤调理剂(TJ)、森美思纳米材料(SMS)、生物有机肥(YJF)和生物炭(SWT)。其中,GML由湖北金山磷化股份有限公司提供、TJ由天脊煤化工集团股份有限公司提供、SMS由安徽芜湖格丰环保科技有限公司提供、YJF由安徽蚌埠莱姆佳生物科技股份有限公司提供、SWT由河南商丘三利新能源有限公司提供,各材料化学性质见表1。

表1 土壤调理材料化学性质

Table 1 Chemical properties of soil conditioning materials

| 材料 Material | pH | 总镉 Total cadmium/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) | 说明 Remark |
|----------------|---------|--|---|
| GML | 8.5 | — | $\text{CaO}\geq 25\%$ 、 $\text{MgO}\geq 5\%$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\geq 12\%$ |
| SH | 12.8 | 0.015 | $\text{CaO}\geq 85\%$ |
| TJ | 8.0~8.5 | — | $\text{CaCO}_3\geq 40\%$ |
| SMS | 11~13 | 0.102 | $\text{SiO}_2\geq 4\%$ 、 $\text{CaO}\geq 5\%$ 、 $\text{Mg}\geq 4\%$ |
| YJF | 7.8 | 0.560 | 有机质含量为 $538 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{N}\geq 0.74\%$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\geq 0.42\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}\geq 1.91\%$ |
| SWT | 8.8~9.5 | 0.095 | 有机碳含量为 $460 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5\geq 0.21\%$ 、 $\text{K}_2\text{O}\geq 3.97\%$ |

其他肥料:供试肥料17-17-17复合肥、氯化钾($\text{K}_2\text{O}\geq 60\%$)、硫酸钾($\text{K}_2\text{O}\geq 52\%$)以及追肥所需的尿素(总氮 $\geq 46.0\%$)均来源于当地市场。

1.3 试验设计与样品处理

试验小区面积为 20 m^2 ($4 \text{ m}\times 5 \text{ m}$),随机区组排列,共设置8种处理,每个处理设置3次重复,各小区用塑料薄膜覆盖的埂隔开。

田间小区试验处理及材料用量如表2所示,在施用基肥前7 d施用土壤调理材料。基肥采用51%(17-17-17)氮磷钾复合肥,用量为 $450 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。水稻于2019年6月移栽,栽培密度即水稻直播密度为 $13 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}$,各处理于分蘖期追施 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素,穗期追施 $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 尿素和 $75 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 氯化钾。于2019年10月下旬收获后测产并采样。

表2 田间小区试验处理及材料用量

Table 2 Experimental treatment and material consumption in field plot

| 处理类型 Processing type | 修复材料 Repair material | 施用量 Application rate/ ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) | 说明 Remark |
|-------------------------|-------------------------|--|--------------|
| CK | — | — | 常规施肥 |
| GML1 | 钙镁磷肥 | 450 | 常规施肥 |
| TJ | 天脊土壤调理剂 | 1 500 | 常规施肥 |
| SH | 石灰 | 1 500 | 常规施肥 |
| GML2 | 钙镁磷肥 | 450 | 穗期钾肥施用硫酸钾 |
| SMS | 森美思纳米材料 | 1 500 | 常规施肥 |
| YJF | 生物有机肥 | 1 500 | 基肥减少33% |
| SWT | 生物炭 | 1 500 | 基肥减少33% |

注:各处理氮磷钾施用量和追肥用量保持一致。

Note: The application rate of N, P and K in each treatment is consistent with the application rate of topdressing.

土壤样品和植株样品于2019年10月20日水稻成熟期采集。土壤样品置于阴凉通风处自然风干后用非金属磨土盘研磨,分别过10、60目和100目筛,储存备用。成熟期植株样品带回实验室立即用自来水清洗,用超纯水润洗,分为籽粒、秸秆、根部,于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青30 min, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒质量,研磨后备用。

1.4 样品测定

土壤有效态镉(DTPA-Cd)的测定参照GB/T 23739—2009,采用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计火焰法测定^[31]。土壤有效态硒的测定参照NY/T 3420—2019,利用AFS测定。土壤与植株不同组织样品中总镉的测定分别根据GB/T 17141—1997和GB/T 500915—2003,利用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计石墨炉法测定^[31]。植株与土壤样品中总硒的测定分别参照GB 5009.93—2017和NY/T 1104—2006,利用原子荧光光度计(普析通用PF5)测定^[30]。土壤中镉的不同形态采用改进后的BCR三步连续提取法测定^[32]。常规方法测定土壤理化指标^[33]。以国家标准参比物质——土壤样品(GBW07461)和植物样品(GBW10045)进行质量控制^[31],国标样分析结果均在允许误差范围内。

富集系数(BCF)是植物体内不同部位某种元素含量与土壤中该种元素含量的比值。

重金属转运系数(TF)是指植物地上部分某种元素含量与地下部该种元素含量的比值。

总产出为水稻产量与水稻单价的乘积^[31]。

投入产出比(ROI)为所获得的产出总收入与所投入的总成本的比值^[31]。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据整理, 试验数据使用 SPSS 23.0 进行分析, 采用 Origin 2017 绘图。数据表示为平均值±标准差, 用 Duncan's 检验显著性差异, 用 Pearson 相关系数(双尾)表示数据间相关性($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 不同调理剂对水稻产量的影响

从图1中可以看出, 不同处理下水稻产量在 6 836.75~8 612.64 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。与 CK 处理相比, 各处理均有一定增产效果, 增产幅度在 4.02%~25.98% 之间, 其中 SMS 处理水稻增产效果最好, 且显著高于 CK ($P < 0.05$)。除 GML1 处理外, 其余调理剂处理均与 SMS 处理产量差异不显著 ($P > 0.05$)。

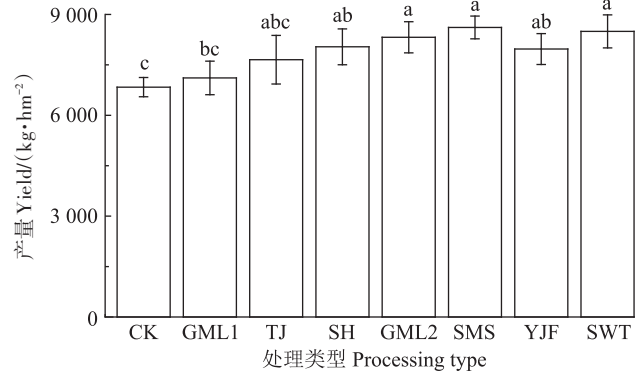
2.2 不同调理剂对水稻镉、硒吸收、富集和转运的影响

2.2.1 水稻各部位镉、硒含量的差异

由表3可以看出, 镉、硒在水稻不同部位的分布情况均为根部>秸秆>籽粒。除 CK、SH 处理外各处理籽粒镉含量均低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017) 规定的限量值; 且各处理下籽粒硒含量均在《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008) 规定的标准范围内。

其中, 根部、秸秆和籽粒中镉的含量分别为 0.63~0.97、0.34~0.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.12~0.32 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相较于 CK, 不同处理水稻各部位镉含量均有所降低。其中, TJ 处理对根中镉含量的降低效果最为显著, 达到了 35.05%; GML2 处理对秸秆中镉含量降低效果最为显著, 达到了 34.62%; SWT 处理对籽粒中镉含量的降低效果最为显著, 达到了 62.50%。

其中, 根部、秸秆和籽粒中硒的含量范围分别为



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同调理剂对水稻产量的影响

Figure 1 Effects of different conditioners on rice yield

0.79~1.29、0.24~0.43 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 0.10~0.18 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相较于 CK 处理, 各处理对水稻根部硒的含量降幅为 0.78%~38.76%, 并且各处理均能提高水稻秸秆和籽粒中硒含量, 其中 SH 处理对秸秆和籽粒中硒含量的提升效果最为显著。

2.2.2 水稻各部位镉、硒富集和转运系数的差异

由表4可知, 相较于 CK 处理, 各处理均显著降低了水稻籽粒镉的富集系数, 降幅为 28.07%~61.40%, 同时有效提升了籽粒对硒的富集系数, 增幅为 10.53%~73.68%。SWT、YJF、TJ 处理下, 籽粒对镉的富集系数显著低于其他处理; 对于硒的富集系数, 除 SMS 处理外, 其余各处理均显著高于 CK 处理。

除 TJ 处理外, 其余处理水稻秸秆/根之间镉的转运系数与 CK 相比差异不显著, 其中 GML2 处理下秸秆/根的镉转运系数降幅最大, 为 14.81%; 对于水稻籽

表3 不同调理剂水稻植株各部位镉、硒含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 3 Contents of cadmium and selenium in different parts of rice plant under different conditioners ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

| 处理类型 Processing type | 籽粒 Grain | | 秸秆 Straw | | 根部 Root | |
|-------------------------|-------------|--------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| | Cd | Se | Cd | Se | Cd | Se |
| CK | 0.32±0.02a | 0.10±0.01e | 0.52±0.03a | 0.24±0.02c | 0.97±0.03a | 1.29±0.05a |
| GML1 | 0.20±0.02bc | 0.13±0.01ed | 0.46±0.03b | 0.29±0.01bc | 0.84±0.03b | 1.03±0.03d |
| TJ | 0.14±0.01d | 0.15±0.02bc | 0.44±0.03b | 0.34±0.02b | 0.63±0.03c | 1.28±0.03a |
| SH | 0.23±0.01b | 0.18±0.01a | 0.42±0.03b | 0.43±0.07a | 0.73±0.04bc | 1.14±0.02bc |
| GML2 | 0.18±0.01c | 0.15±0.02bc | 0.34±0.04c | 0.33±0.01b | 0.73±0.04bc | 1.10±0.03c |
| SMS | 0.19±0.02c | 0.12±0.01de | 0.35±0.01c | 0.33±0.02b | 0.73±0.02bc | 1.19±0.03b |
| YJF | 0.14±0.02d | 0.17±0.02ab | 0.36±0.01c | 0.31±0.02b | 0.76±0.03b | 1.20±0.01b |
| SWT | 0.12±0.02d | 0.14±0.02bcd | 0.35±0.01c | 0.31±0.02b | 0.64±0.10c | 0.79±0.05e |

注: 同列不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$). The same below.

粒/秸秆的镉转运系数,各处理相比于CK均有不同程度下降,其中TJ处理的转运系数最低,为0.32,与CK相比具有显著差异($P<0.05$),对降低水稻籽粒/秸秆中镉转运能力效果最好。

不同处理对Se各部位的转运能力也有差异,其中SWT处理对水稻秸秆/根转运Se的能力最强,YJF处理对水稻籽粒/秸秆转运Se的能力最强。

2.3 不同调理剂处理下根际土壤pH和有效态镉及镉化学形态

2.3.1 水稻成熟期根际土壤pH和有效态镉含量

由表5可知,相较于CK,不同处理下水稻成熟期根际土壤pH均有所提升,其中在SH处理下,土壤pH为6.47,提升幅度最为显著,达到了10.41%。

不同处理下,水稻成熟期根际土壤有效态镉含量范围为0.180~0.313 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与CK相比,不同处理下根际土壤有效态镉含量均有所下降,其中SH处理根际土壤有效态镉含量为0.180 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,降幅最为显著,达到了41.94%。GML1、YJF和SWT处理根际土壤有效态镉含量差异不显著。TJ、GML2和SMS处理根际土壤有效态镉含量降幅分别达到了38.71%、35.48%和34.98%,处理间差异不显著。

2.3.2 水稻成熟期根际土壤镉的化学形态比较

由图2可知,与CK相比,不同处理均能显著降低土壤镉的弱酸提取态和可还原态含量,其中SMS处理下,土壤镉的弱酸提取态含量降低幅度最为显著,达到了17.59%;YJF处理下,土壤镉的可还原态含量降幅最高,为40.13%。相比于CK,各处理均能显著提高土壤镉的残渣态含量,同时可有效提高土壤镉的可氧化态含量,其中YJF处理下土壤中残渣态镉含量增加最显著,达到27.01%;SMS和YJF处理相比于其余处理显著增加土壤中可氧化态镉的含量,较CK增幅

表5 不同调理剂对水稻成熟期土壤pH和有效态镉含量的影响
Table 5 Effects of different conditioners on soil pH and DTPA-Cd content at rice maturity stage

| 处理类型 Processing type | 土壤pH Soil pH | 有效态镉 DTPA-Cd/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) |
|-------------------------|-----------------|--|
| CK | 5.86±0.03f | 0.313±0.010a |
| GML1 | 6.05±0.02d | 0.235±0.017b |
| TJ | 6.17±0.06c | 0.195±0.011c |
| SH | 6.47±0.03a | 0.180±0.005c |
| GML2 | 6.21±0.03c | 0.196±0.007c |
| SMS | 6.35±0.02b | 0.198±0.015c |
| YJF | 6.19±0.02c | 0.230±0.010b |
| SWT | 5.96±0.02e | 0.252±0.009b |

分别为35.03%和32.13%。

2.4 不同调理剂处理下水稻各部位镉、硒含量及各形态镉含量之间相关性分析

2.4.1 水稻各部位镉、硒含量的相关性

不同处理下水稻各部位镉、硒含量的相关性分析结果如表6所示,水稻籽粒、秸秆和根镉含量之间均存在极显著正相关关系($P<0.01$),水稻籽粒、秸秆硒含量之间均存在极显著正相关关系($P<0.01$)。水稻中各部位镉含量与硒含量间存在负相关关系,其中水稻籽粒硒含量与根镉含量、根镉含量与秸秆硒含量之间存在显著负相关关系($P<0.05$)。

2.4.2 水稻籽粒镉含量与成熟期土壤各形态镉含量的相关性

从表7可以看出,水稻籽粒镉含量与各形态镉含量之间均存在显著相关性($P<0.05$)。其中,水稻籽粒镉含量与镉的弱酸提取态和可还原态呈极显著正相关关系($P<0.01$),与残渣态呈极显著负相关关系($P<0.01$)。土壤各形态镉含量之间(除可氧化态与残渣

表4 不同调理剂对水稻镉、硒的富集和转运系数

Table 4 Accumulation and transfer coefficient of cadmium and selenium in rice under different conditioners

| 处理类型 Processing type | Cd | | | Se | | |
|-------------------------|---|--|--|---|--|--|
| | BCF _{籽粒} /BCF _{Grain} | TF _{籽粒/根} /TF _{Straw/Root} | TF _{籽粒/秸秆} /TF _{Grain/Straw} | BCF _{籽粒} /BCF _{Grain} | TF _{籽粒/根} /TF _{Straw/Root} | TF _{籽粒/秸秆} /TF _{Grain/Straw} |
| CK | 0.57±0.03a | 0.54±0.01b | 0.62±0.03a | 0.19±0.02e | 0.19±0.02c | 0.42±0.03bc |
| GML1 | 0.36±0.03bc | 0.55±0.04b | 0.44±0.05b | 0.24±0.02cd | 0.28±0.01b | 0.45±0.03abc |
| TJ | 0.25±0.01d | 0.69±0.07a | 0.32±0.04c | 0.28±0.03bc | 0.27±0.01b | 0.44±0.04abc |
| SH | 0.41±0.02b | 0.58±0.06ab | 0.56±0.06a | 0.33±0.01a | 0.37±0.06a | 0.43±0.05abc |
| GML2 | 0.32±0.02c | 0.46±0.03b | 0.55±0.04a | 0.28±0.03bc | 0.30±0.01b | 0.45±0.06abc |
| SMS | 0.34±0.02c | 0.48±0.03b | 0.55±0.02a | 0.21±0.01de | 0.28±0.02b | 0.35±0.01c |
| YJF | 0.25±0.03d | 0.48±0.02b | 0.40±0.04bc | 0.31±0.02ab | 0.26±0.02b | 0.54±0.07a |
| SWT | 0.22±0.03d | 0.56±0.12b | 0.36±0.04bc | 0.27±0.02bc | 0.39±0.02a | 0.47±0.05ab |

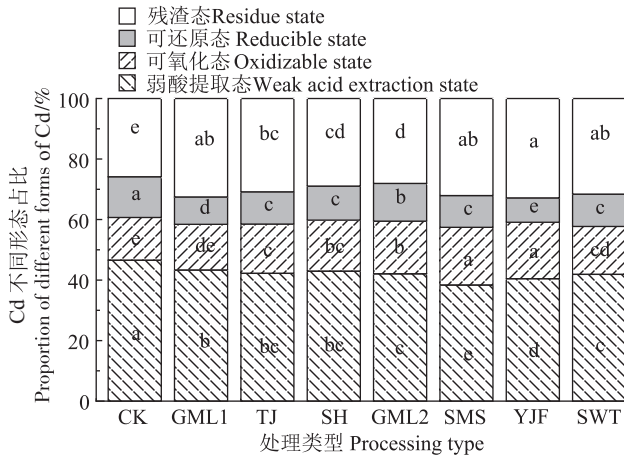


图2 不同调理剂对水稻成熟期土壤镉形态的影响

Figure 2 Effects of different conditioners on cadmium fractions in soil at rice maturity stage

态之间)均存在显著相关关系($P < 0.05$),其中,弱酸提取态与可氧化态、可还原态与残渣态、弱酸提取态与残渣态之间呈极显著负相关关系($P < 0.01$)。

2.5 不同调理剂处理的经济效益分析

本试验所涉及的农业投入品和水稻价格以及种子、农药、机械、人工等成本价格均结合市场调查得出,具体价格以市场实际价格为准。在其他管理水平一致的基础上,经济效益对比如表8所示。投入产出比较高的是GML2、SMS和YJF处理,分别为3.39、3.31

和3.18。

3 讨论

3.1 不同调理剂对土壤pH、有效态镉及镉形态转化的影响

土壤pH对重金属元素在土壤中的溶解沉淀起调控作用,提升土壤pH能显著降低重金属在土壤中的有效性和迁移能力^[30]。本研究结果表明,施用不同土壤调理剂使土壤pH增加了0.10~0.61个单位的同时,使土壤有效态镉最大降幅达41.94%。石灰以及森美思等碱性物质的施用促使重金属镉生成碳酸盐、氢氧化物沉淀,而且土壤中的铁、锰等离子能与氢氧根结合形成羟基化合物沉淀,为镉等重金属离子提供更多的吸附位点,从而降低土壤中镉的有效性^[34]。生物有机肥中大量的有机质可以增强土壤酸碱缓冲能力,并且有机肥中含有能与H⁺和重金属阳离子相互作用的羟基、氨基等官能团,因此能有效提高土壤pH^[35]。而本研究中,生物碳和钙镁磷肥处理对土壤pH提升作用有限,可能是因为土壤的缓冲性能较强,导致调理剂对土壤的pH影响较小^[36]。土壤镉形态与水稻镉含量密切相关,其中可还原态镉是土壤镉形态中的有效部分,能被植物吸收利用,与水稻籽粒镉含量显著正相关,可作为土壤污染的评判指标^[37]。而残渣态活性最小,最难被生物利用^[38]。生物有机肥主要通过提高

表6 不同调理剂处理下成熟期水稻各部位镉、硒含量的相关性

Table 6 Correlation of cadmium and selenium contents in different parts of rice at mature stage under different conditioners

| | 籽粒镉 Grain Cd | 秸秆镉 Straw Cd | 根镉 Root Cd | 籽粒硒 Grain Se | 秸秆硒 Straw Se | 根硒 Root Se |
|--------------|--------------|--------------|------------|--------------|--------------|------------|
| 籽粒镉 Grain Cd | 1.000 | | | | | |
| 秸秆镉 Straw Cd | 0.666** | 1.000 | | | | |
| 根镉 Root Cd | 0.742** | 0.584** | 1.000 | | | |
| 籽粒硒 Grain Se | -0.389 | -0.328 | -0.510* | 1.000 | | |
| 秸秆硒 Straw Se | -0.218 | -0.372 | -0.417* | 0.648** | 1.000 | |
| 根硒 Root Se | -0.404 | -0.360 | -0.343 | -0.121 | 0.001 | 1.000 |

注:** 在 0.01 级别(双尾)相关性显著。* 在 0.05 级别(双尾)相关性显著。下同。

Note:** indicates the correlation is extremely significant at the level of 0.01; * indicates the correlation is significant at the level of 0.05. The same below.

表7 不同调理剂处理下水稻籽粒镉含量与成熟期土壤各形态镉含量的相关性

Table 7 Correlation between cadmium contents in rice grains and cadmium fractions in soil at maturity stage under different conditioners

| | 籽粒镉 Grain Cd | 弱酸提取态 Weak acid extraction | 可氧化态 Oxidizable state | 可还原态 Reducible state | 残渣态 Residue state |
|----------------------------|--------------|----------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|
| 籽粒镉 Grain Cd | 1.000 | | | | |
| 弱酸提取态 Weak acid extraction | 0.634** | 1.000 | | | |
| 可氧化态 Oxidizable state | -0.463* | -0.839** | 1.000 | | |
| 可还原态 Reducible state | 0.599** | 0.525** | -0.406* | 1.000 | |
| 残渣态 Residue state | -0.676** | -0.710** | 0.374 | -0.886** | 1.000 |

表8 不同调理剂间经济效益分析

Table 8 Economic benefit analysis of different conditioners

| 处理类型 Processing type | 投入 Input/(元·hm ⁻²) | | | 总投入 Total input/(元·hm ⁻²) | 总产出 Total output/(元·hm ⁻²) | 投入产出比 Input-output ratio |
|-------------------------|--------------------------------|---------------|----------|--|---|-----------------------------|
| | 调理剂 Conditioner | 肥料 Fertilizer | 其他 Other | | | |
| CK | — | 2 437.5 | 9 500 | 11 937.50 | 12 306±515c | 1.03±0.04d |
| GML1 | 292.5 | 2 437.5 | 9 500 | 12 230.00 | 35 559±2 496b | 2.91±0.20bc |
| TJ | 2 025 | 2 437.5 | 9 500 | 13 962.50 | 38 269±3 613ab | 2.74±0.26c |
| SH | 810 | 2 437.5 | 9 500 | 12 747.50 | 14 467±959c | 1.13±0.08d |
| GML2 | 292.5 | 2 475.0 | 9 500 | 12 267.50 | 41 604±2 316a | 3.39±0.19a |
| SMS | 1 080 | 2 437.5 | 9 500 | 13 017.50 | 43 063±1 691a | 3.31±0.13a |
| YJF | 1 125 | 1 912.5 | 9 500 | 12 537.50 | 39 853±2 295ab | 3.18±0.18ab |
| SWT | 5 250 | 1 912.5 | 9 500 | 16 662.50 | 42 480±2 451a | 2.55±0.15c |

注:富硒水稻单价为5.0元·kg⁻¹,若存在镉超标,则水稻单价按照1.8元·kg⁻¹计算;其他成本包括种子、农药、机械、人工,等。

Note: The unit price of selenium-rich rice is 5.0 ¥·kg⁻¹. If cadmium exceeds the standard, the unit price of rice is calculated as 1.8 ¥·kg⁻¹; Other costs including seeds, pesticides, machinery, labor, etc.

土壤pH、有机质含量以及生物酶活性等影响土壤中镉的赋存形态,从而降低土壤有效态镉含量^[35]。薛毅等^[39]的研究表明紫泥田连续4 a施有机肥后,土壤交换态镉含量下降11%,土壤有机态镉含量则升高14%,而土壤碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和残渣态镉含量均未发生显著的变化。本研究中施用生物有机肥处理能有效提高水稻成熟期内土壤的pH,并且生物有机肥的施用提高了土壤有机质含量,而且通过土壤对有机质的吸附提高了土壤颗粒对重金属镉离子的吸附能力,促使土壤中镉赋存形态由弱酸提取态向可还原态转化,显著降低可交换态镉所占比例,提高残渣态镉所占比例。本研究结果与前人研究结果基本一致^[39]。而王良梅等^[40]的研究表明,施用有机物料后根际土壤中可交换态及有机结合态的镉含量相比于对照明显提高。有机肥对农田镉赋存形态的不同影响,或许是不同有机肥施入土壤后腐殖质含量的不同变化所致^[41]。也有学者认为,有机质对重金属活性的影响与其组分和含量有关,小分子有机酸与重金属生成溶解度较高的有机络合物时有利于活化重金属^[39],而大分子有机酸与重金属形成溶解度较低的有机螯合物时会钝化重金属^[42]。含磷化合物可以有效降低土壤中重金属的生物有效性和生物毒性。研究表明磷肥中的磷酸根溶解后可与重金属生成沉淀,使土壤中重金属降低活性并向残渣态转化^[43]。本研究中钙镁磷肥处理显著提高土壤残渣态镉的含量同样证明了这一点。

3.2 不同调理剂对水稻镉含量的影响

大量研究表明,镉在水稻新陈代谢旺盛的器官中积累较多,在营养器官中积累相对较少,其累积规律

一般为根部>茎叶>籽粒,与本文研究结果一致^[37]。降低水稻籽粒中镉含量主要有两种途径:一是降低土壤中镉生物有效性,将活性镉钝化为络合物或螯合物;二是阻控水稻各部位的镉向籽粒转运。Yoshida等^[44]发现不同钝化剂组合降低了土壤中重金属的有效态含量,进而降低了玉米籽粒中重金属含量。李超等^[37]研究认为水稻各器官镉含量与土壤镉有效性呈极显著正相关关系,土壤中多种有效态重金属含量和水稻籽粒中重金属含量达到了显著性正相关。本试验对不同处理下水稻籽粒镉含量与根际土壤不同形态镉含量间进行了相关性分析,同样发现水稻籽粒镉的积累与土壤中弱酸提取态及可还原态镉含量呈极显著正相关。根系向地上部转运是水稻籽粒中镉的主要来源,阻控水稻对镉的吸收或被吸收后阻止镉向地上部转运,可以一定程度降低籽粒镉含量^[35-36]。本研究中GML2处理下秸秆/根的转运系数显著降低,或由于GML2处理富含大量硫酸钾,而硫是植物生长发育的必需元素之一,可以和重金属形成有机化合物,从而减轻镉在水稻中的转运^[34]。有研究指出水稻根系吸收到籽粒镉积累要经过3个过程:根系的活化和吸收、木质部的装载和运输以及韧皮部向籽粒中的进一步转移^[34]。本研究中各处理籽粒镉含量的降低是由于土壤镉有效性的降低从而抑制了根系对镉的吸收和籽粒中镉的积累,各处理间水稻镉籽粒/秸秆的转运系数降低证明了这一点。水稻对镉的富集系数的大小与水稻籽粒镉含量密切相关,本研究中生物炭以及生物有机肥的施用,显著降低了水稻籽粒对镉的富集。这可能是由于生物炭具有孔隙发达、比表面积大、吸附性强等特点,能够在提高土壤pH的同时改

善土壤结构,增强土壤对镉离子和有机物的吸附能力,达到钝化的作用^[35],该处理下糙米降镉率为62.5%,达到了较好的修复效果。同样施用生物有机肥一方面通过提高pH和有机质含量促使土壤中镉由弱酸提取态向可还原态转化^[36],另一方面由于生物有机肥中含有的较高活性生物酶,能够促进微生物代谢^[41],从而降低土壤中有效态镉含量,多重因素共同抑制了水稻对土壤中镉的吸收,进而显著减少了糙米中镉积累量,但也有18 a的定位试验表明,施用有机肥使糙米镉含量显著增加,这可能是由于有机肥中含有一定量的镉^[43],长期施用增加土壤中镉和有效态镉的含量,从而使糙米镉含量显著增加。因此关于生物有机肥施用在镉污染耕地上的施用年限有待进一步研究。

3.3 不同调理剂对水稻硒含量的影响

研究发现,土壤中硒形态按水溶性及其结合强度可以分为可溶态硒、可交换态硒、铁锰氧化物结合态硒、有机结合态硒和残渣态硒^[27]。土壤硒元素的生物有效性主要取决于可溶态硒、可交换态硒的含量^[44],并且其与植物摄硒量一般呈正相关关系。而土壤硒形态转化受土壤pH、Eh、有机质等因素影响。在碱性土壤中硒元素主要赋存形式为硒酸盐,其可被植物直接吸收利用,生物有效性高^[25]。但是在中性和酸性土壤中硒元素主要以亚硒酸盐的形式存在,此形态下的硒元素很容易被土壤中的黏粒及胶体组分吸附固定,亦或与金属氧化物形成难溶性络合物,因此不易被植物吸收利用^[26]。在本研究中,各处理均可提高水稻不同部位硒含量,其中施用石灰对水稻籽粒中硒含量的提升效果最为明显:一方面可能是由于石灰的施入提升了土壤pH,增加了土壤中有效硒的含量;另一方面或许是土壤中钙含量增加,钙与镉竞争植物根系上的吸收位点,降低水稻籽粒对镉的吸收,从而减少了镉与硒竞争在蛋白质的半胱氨酸的巯基上结合,增加了水稻地上部对硒的转运^[45]。同样生物有机肥带进土壤中的大量有机化合物可以络合土壤中的金属元素,降低其结合态重金属的化学活性^[46],导致金属结合体的硒酸盐化合物的溶解和释放,从而提高硒的有效性。另外,有机肥、生物炭等会改善土壤的结构和生物学性质,促进微生物的活性,使得土壤硒大量释放。由此可见,不同调理剂可通过改善土壤理化性质等因素,提高土壤硒的生物有效性,进而增加水稻对土壤硒的吸收。本研究结果显示水稻对天然富硒土壤中硒的吸收和积累主要集中在根和秸秆,而籽粒中硒的

含量则相对较低,水稻根系硒含量较高的原因可能是由于水稻体内转移的硒是硒酸盐形态,而亚硒酸盐转化为硒酸盐的过程较根部吸收亚硒酸盐的过程慢,从而导致水稻根部常累积大量的硒^[45]。这与张均华等^[46]的研究结果类似,表明水稻对硒的富集一般在营养器官。本研究中不同处理下成熟期水稻各部位镉、硒含量之间呈负相关,但相关性不显著。目前国内外对于天然富硒土壤中硒、镉的相互作用的相关报道较少,还需对天然富硒土壤中是否存在硒、镉拮抗现象进一步研究,这对保障富硒水稻在天然硒镉高背景农田的安全生产具有指导性作用,有利于提高农业生产经济性。

4 结论

(1)施用不同调理剂均能够使水稻产量较空白增加,其中森美思调理剂增产效果最好,达到了25.98%。

(2)各处理下籽粒硒含量均符合《富硒稻谷》规定要求;除石灰处理外其余各调理剂处理籽粒镉含量均在食品安全国家标准($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)以下,其中生物有机肥处理对水稻降镉增硒效果最好。

(3)施用土壤调理剂均能不同程度地抑制水稻各部位对镉的转运吸收,同时显著促进水稻籽粒对硒的富集。

(4)施用不同调理剂能够在提高土壤pH值的同时降低土壤中有效态镉的含量,提高土壤中镉残渣态的含量。

(5)投入产出比较高的处理分别是钙镁磷肥+硫酸钾(3.39)和森美思(3.31)以及生物有机肥(3.18)。

参考文献:

- [1] BROWN K M, ARTHUR J R. Selenium, selenoproteins and human health: a review[J]. *Public Health Nutrition*, 2001, 4(2): 593-599.
- [2] 殷行行, 郑向群, 丁永祯, 等. 亚硒酸盐对旱稻吸收、转运砷及其氧化胁迫的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(5): 817-825. YIN X X, ZHENG X Q, DING Y Z, et al. Effect of selenite on arsenic uptake, translocation and oxidative stress of upland rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 817-825.
- [3] 熊咏民, 杨晓莉, 张丹丹, 等. 硒的生物学效应与环境相关性疾病的研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50(6): 1105-1112. XIONG Y M, YANG X L, ZHANG D D, et al. Research progress in biological function of selenium and environmentally associated diseases[J]. *Soils*, 2018, 50(6): 1105-1112.
- [4] IZQUIERDO A, CASAS C, HERRERO E. Selenite-induced cell death in *Saccharomyces cerevisiae*: protective role of glutaredoxins[J]. *Microbiology*, 2010, 156: 2608-2620.

- [5] 张泽洲. 典型农作物中硒形态分析及其硒-镉相互作用研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019: 3-4. ZHANG Z Z. Selenium speciation and selenium-cadmium interaction in staple crops[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2019: 3-4.
- [6] DU Y, LUO K, NI R, et al. Selenium and hazardous elements distribution in plant soil-water system and human health risk assessment of lower Cambrian, southern Shaanxi, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2018, 40(5): 2049-2069.
- [7] 潘丽萍, 刘永贤, 黄雁飞, 等. 土壤-植物体系中硒与重金属镉的相互作用[J]. 生物技术进展, 2017, 7(5): 480-485. PAN L P, LIU Y X, HUANG Y F, et al. Interaction between selenium and cadmium in soil-plant system[J]. *Current Biotechnology*, 2017, 7(5): 480-485.
- [8] 孙协平, 周广文, 罗友进, 等. 硒镉伴生对富硒土壤柑橘生长及生理代谢的影响[J]. 核农学报, 2020, 34(3): 661-668. SUN X P, ZHOU G W, LUO Y J, et al. Effect of selenium cadmium associated on growth and physiological metabolism of citrus in Se-enriched soil[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(3): 661-668.
- [9] 王晓蓉, 郭红岩, 林仁漳, 等. 污染土壤修复中应关注的几个问题[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(2): 277-280. WANG X R, GUO H Y, LIN R Z, et al. Issues in need of consideration for remediation of contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2): 277-280.
- [10] ZHANG H J, ZHANG X Z, LI T X, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 277-286.
- [11] 王锐. 典型富硒区硒镉来源与土地安全区划研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019: 1-8. WANG R. Study on selenium and cadmium sources and land safety zoning in typical Se-enriched areas[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2019: 1-8.
- [12] 沈燕春. 贵池富硒区伴生重金属及其生物效应研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2011: 6-9. SHEN Y C. Research of the selenium-rich area in Guichi associated with heavy metals and its biological effects[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2011: 6-9.
- [13] 张燕, 黄奇娜, 邵国胜, 等. 水稻镉污染相关农艺调控技术研究与应用进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(2): 15-20. ZHANG Y, HUANG Q N, SHAO G S, et al. Advances in research and application of agronomic control technologies related to cadmium contamination in rice [J]. *China Rice*, 2021, 27(2): 15-20.
- [14] 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 等. 田间条件下养分调控八宝景天 Cd 修复效率[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4226-4233. GUO J M, YANG J X, YANG J, et al. Effect of nutrient regulation and control on Cd accumulation efficiency of *Hylotelephium spectabile* under field conditions [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(9): 4226-4233.
- [15] JALLOH M A, CHEN J H, ZHEN F R, et al. Effect of different N fertilizer forms on antioxidant capacity and grain yield of rice growing under Cd stress[J]. *Pubmed*, 2009, 162(2/3): 1081-1085.
- [16] 李造煌, 杨文毅, 邹佳玲, 等. 钙镁磷肥对土壤 Cd 生物有效性和糙米 Cd 含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2322-2330. LI Z H, YANG W T, ZOU J L, et al. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer on Cd bioavailability in soil and Cd contents in rice[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2322-2330.
- [17] LI H, YANG Z L, DAI M G, et al. Input of Cd from agriculture phosphate fertilizer application in China during 2006—2016[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698: 134149.
- [18] MAO P, ZHUANG P, LI F, et al. Phosphate addition diminishes the efficacy of wollastonite in decreasing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 441-450.
- [19] DING Y, WANG Z G, REN M L, et al. Iron and callose homeostatic regulation in rice roots under low phosphorus[J]. *BMC Plant Biology*, 2018, 18: 326.
- [20] LIN W, ZHOU Q X, SUN Y B. Intensification of *Solanum nigrum* L. remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(10): 915-920.
- [21] 衣纯真, 傅桂平, 张福锁. 不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响[J]. 中国农业大学学报, 1996, 1(3): 65-70. YI C Z, FU G P, ZHANG F S. Effect of different potash fertilizers on Cd uptake and translocation in rice[J]. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(3): 65-70.
- [22] 郭毅轩, 赵秀兰. 颗粒有机质对水稻镉吸收及转运的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(11): 5180-5188. GUO Y X, ZHAO X L. Effect of particulate organic matter on cadmium uptake and transport in rice[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(11): 5180-5188.
- [23] WANG D, DINH Q T, THU T T A, et al. Effect of selenium riched organic material amendment on selenium fraction transformation and bioavailability in soil[J]. *Chemosphere*, 2018, 199: 417-426.
- [24] ZHANG Q, CHEN H, HUANG D, et al. Water managements limit heavy metal accumulation in rice: dual effects of iron-plaque formation and microbial communities[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 687: 790-799.
- [25] ULLAH H, LIU G J, YOUSAF B, et al. A comprehensive review on environmental transformation of selenium: recent advances and research perspectives[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(2): 1003-1035.
- [26] WANG M, CUI Z, XUE M, et al. Assessing the uptake of selenium from naturally enriched soils by maize (*Zea mays* L.) using diffusive gradients in thinfilms technique (DGT) and traditional extractions[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 689: 1-9.
- [27] CHANG C, YIN R, WANG X, et al. Selenium translocation in the soil-rice system in the Enshi seleniferous area, central China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 83-90.
- [28] WANG D, XUE M, WANG Y, et al. Effects of straw amendment on selenium aging in soils: mechanism and influential factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 871-881.
- [29] TAO R H, HU J Y, CAO C, et al. Effect of LMWOAs on maize remediation of cadmium and plumbum pollution in farmland[J]. *Sustainability*, 2022, 14(21): 14580.
- [30] 高雅, 胡晨, 张春雷, 等. 安徽石台地区富硒土壤分布及硒的富集迁移规律探讨[J]. 西北地质, 2022, 55(2): 284-291. GAO Y, HU C, ZHANG C L, et al. Study on the distribution of selenium-rich soil and the regularity of selenium enrichment-migration in Shitai area,

- Anhui, China[J]. *Northwestern Geology*, 2022, 55(2):284-291.
- [31] 陶荣浩, 袁旭峰, 吴新德, 等. 修复肥料和紫云英对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(1):76-86. TAO R H, YUAN X F, WU X D, et al. Effects of repair fertilizer and milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) on cadmium uptake and accumulation in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(1):76-86.
- [32] 张朝阳, 彭平安, 宋建中, 等. 改进BCR法分析国家土壤标准物质中重金属化学形态[J]. 生态环境学报, 2012, 21(11):1881-1884. ZHANG C Y, PENG P A, SONG J Z, et al. Utilization of modified BCR procedure for the chemical speciation of heavy metals in Chinese soil reference material[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(11):1881-1884.
- [33] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1997. BAO S D. Analysis of soil agricultural chemistry[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1997.
- [34] 吴霄霄, 曹榕彬, 米长虹, 等. 重金属污染农田原位钝化修复材料研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(3):253-263. WU X X, CAO R B, MI C H, et al. Research progress of *in-situ* passivated remedial materials for heavy metal contaminated soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(3):253-263.
- [35] HUANG D L, LIU L S, ZENG G M, et al. The effects of rice straw biochar on indigenous microbial community and enzymes activity in heavy metal-contaminated sediment[J]. *Chemosphere*, 2017, 174:545-553.
- [36] TIAN X, LI T, YANG K, et al. Effect of humic acids on physicochemical property and Cd(II) sorption of multiwalled carbon nanotubes[J]. *Chemosphere*, 2012, 89(11):1316-1322.
- [37] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11):2143-2154. LI C, AI S Y, TANG M D, et al. Effects of a mineral conditioner on the forms of Cd in paddy soil and Cd uptake by rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11):2143-2154.
- [38] 杨兰, 李冰, 王昌全, 等. 伴随阴离子对土壤Cd形态转化的影响[J]. 生态环境学报, 2015, 24(5):866-872. YANG L, LI B, WANG C Q, et al. Effect of accompanying anions on the Cd²⁺ fraction transformation in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(5):866-872.
- [39] 薛毅, 盛浩, 张亮, 等. 有机肥和土壤调理剂对中稻的降镉效应[J]. 湖南农业科学, 2018(11):42-45. XUE Y, SHENG H, ZHANG L, et al. Effects of organic fertilizer and soil conditioner on cadmium reduction in middle-season rice[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(11):42-45.
- [40] 王良梅, 周立祥, 占新华, 等. 水田土壤中水溶性有机物的产生动态及对土壤中重金属活性的影响: 田间微区试验[J]. 环境科学学报, 2004, 24(5):858-864. WANG G M, ZHOU L X, ZHAN X H, et al. Dynamics of dissolved organic matter and its effect on metal availability in paddy soil: field micro-plot trials[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2004, 24(5):858-864.
- [41] 陈芬, 余高, 吴涵茜, 等. 中药渣生物有机肥对镉-汞复合污染土壤的钝化效果[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2020, 46(6):737-747. CHEN F, YU G, WU H Q, et al. Effects of bio-organic fertilizer made from Chinese traditional herb residues on heavy metal passivation in Cd and Hg compound-contaminated soils[J]. *Journal of Zhejiang University(Agriculture & Life Sciences)*, 2020, 46(6):737-747.
- [42] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3):243-252. LIU X Z, MA Z H, ZHAO X J. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):243-252.
- [43] 李本银, 黄绍敏, 张玉亭, 等. 长期施用有机肥对土壤和糙米铜、锌、铁、锰和镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1):129-135. LI B Y, HUANG S M, ZHANG Y T, et al. Effect of long-term application of organic fertilizer on Cu, Zn, Fe, Mn and Cd in soil and brown rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(1):129-135.
- [44] YOSHIDA S, IWATAKA M, FUCHIGAMI T, et al. *In vitro* assessment of bioavailability of selenium from a processed Japanese anchovy, Niboshi[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269(15):436-441.
- [45] 王昊, 张悦, 王欣, 等. 硅酸盐调控抑制水稻对富硒水稻土中Cd吸收[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22):225-233. WANG H, ZHANG Y, WANG X, et al. Suppression of silicates regulation on Cd uptaking of rice in Se-rich paddy soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22):225-233.
- [46] 张均华, 朱练峰, 禹盛苗, 等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10):2900-2906. ZHANG J H, ZHU L F, YU S M, et al. Selenium cycling and transformation in paddy field and selenium nutrition of rice: a review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10):2900-2906.

(责任编辑:李丹)