

基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应

郑晶, 鲍广灵, 陶荣浩, 吴承龙, 马友华, 叶文玲

引用本文:

郑晶, 鲍广灵, 陶荣浩, 吴承龙, 马友华, 叶文玲. 基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 974–982.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0693>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 215–222 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1201>

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>

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>

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>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

郑晶, 鲍广灵, 陶荣浩, 等. 基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(5): 974–982.

ZHENG J, BAO G L, TAO R H, et al. Effects of basal and foliar selenium fertilizers in reducing cadmium and increasing selenium in selenium-enriched, cadmium-polluted rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(5): 974–982.



开放科学 OSID

基施与叶面施硒肥对富硒镉污染农田水稻降镉增硒的效应

郑晶¹, 鲍广灵¹, 陶荣浩¹, 吴承龙², 马友华¹, 叶文玲^{1*}

(1. 农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室, 安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230031; 2. 石台富硒农业试验站, 石台县农业农村局, 安徽 池州 245100)

摘要:为探讨基施硒肥和叶面施硒肥在轻度镉污染的富硒土壤中对水稻降镉增硒的效果, 在田间试验条件下, 通过设置基施硒肥、叶面施硒肥和基施硒肥+叶面施硒肥3个处理, 以常规施肥作为对照, 对成熟期水稻产量、各部位镉和硒含量、富集与转运系数以及土壤中镉的形态进行测定分析。结果表明: 叶面施硒肥能显著提高水稻产量。基施硒肥后, 土壤pH提高了0.19个单位, 提高率为3.01%, 同时降低了土壤中镉的弱酸提取态含量, 降低率为2.96%, 促进了镉从弱酸提取态向可氧化态和残渣态转变, 从而降低了土壤中镉的有效性。而叶面施硒肥能显著降低水稻对镉转运特别是秸秆到糙米的转运系数, 降低率达15.13%, 同时提高水稻对硒的转运特别是根到秸秆的转运系数, 提高率达18.69%。不同硒肥处理下, 糙米中镉含量为0.159~0.183 mg·kg⁻¹, 硒含量为0.216~0.244 mg·kg⁻¹, 不同硒肥处理均能使糙米达到降镉增硒的效果, 且叶面施硒肥处理相较于基施硒肥处理的效果更好, 并在基施硒肥和叶面施硒肥同时使用下的效果最佳, 其对糙米中镉含量的降低率达26.39%, 硒含量的提升率达41.50%。综上, 在轻度镉污染的富硒土壤中, 基施硒肥或叶面施硒肥均能有效降低水稻籽粒中镉含量并提高稻米对硒的富集, 且基施硒肥+叶面施硒肥处理是降低糙米镉含量与提高糙米硒含量综合效果最好的一种措施。

关键词:水稻; 硒肥; 镉; 转运和累积

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2024)05-0974-09 doi:10.11654/jaes.2023-0693

Effects of basal and foliar selenium fertilizers in reducing cadmium and increasing selenium in selenium-enriched, cadmium-polluted rice fields

ZHENG Jing¹, BAO Guangling¹, TAO Ronghao¹, WU Chenglong², MA Youhua¹, YE Wenling^{1*}

(1. Key Laboratory of Farmland Ecology Conservation and Pollution Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230031, China; 2. Shitai Selenium Enriched Agricultural Experiment Station, Agricultural and Rural Bureau of Shitai County, Chizhou 245100, China)

Abstract: To investigate the effects of basal and foliar selenium fertilizers in reducing cadmium and increasing selenium in rice grown in selenium-enriched soil with mild cadmium contamination, in the present study, the yield of rice in the maturity stage, contents of cadmium and selenium in various tissues, enrichment and transport coefficients, and morphology of cadmium in the soil were determined and analyzed using field experiments. Three treatments (viz., basal selenium fertilizer, foliar selenium fertilizer, and basal selenium fertilizer + foliar selenium fertilizer) were investigated, with conventional fertilizer application used as the control. The results showed that the foliar selenium fertilizer significantly increased rice yield. After application of the basal selenium fertilizer, the soil pH value rose by 0.19 units, an increase of 3.01%. The basal selenium fertilizer also reduced the weak acid extractable state of cadmium in the soil at a rate of 2.96%,

收稿日期: 2023-08-25 录用日期: 2023-10-23

作者简介: 郑晶 (1997—), 男, 四川宜宾人, 硕士研究生, 主要从事农田土壤重金属污染修复研究。E-mail: 2459264646@qq.com

*通信作者: 叶文玲 E-mail: wlyc@ahau.edu.cn

基金项目: 安徽省高校自然科学基金项目(KJ2021A0138); 安徽省重点研发计划项目(2022m07020004)

Project supported: Natural Science Research Program of Anhui University (KJ2021A0138); Key Research and Development Program of Anhui Province (2022m07020004)

promoting the transition of cadmium from the weak acid extractable state to the oxidizable and residual states, thereby reducing the effectiveness of the heavy metal in the soil. The foliar selenium fertilizer significantly reduced the cadmium transfer coefficient of rice, especially from straw to brown rice, with a reduction rate of 15.13%. Additionally, it improved the selenium transfer coefficient of rice, especially from root to straw, with an increase rate of 18.69%. Under the different selenium fertilizer treatments, the cadmium content in brown rice ranged from $0.159 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $0.183 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ and the selenium content ranged from $0.216 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ to $0.244 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. The different selenium fertilizer treatments were able to achieve the effects of reducing cadmium and enhancing selenium in brown rice, with the foliar selenium fertilizer producing better effects than the basal selenium fertilizer. The effects were the best when both fertilizers were used simultaneously, whereupon the cadmium content in brown rice was reduced by 26.39% and the selenium content was enhanced by 41.50%. It can be seen that in selenium-rich soil with mild cadmium contamination, either the basal selenium fertilizer or foliar selenium fertilizer can effectively reduce the cadmium content in rice grains and improve their enrichment of selenium, with the simultaneous application of both fertilizers yielding the best results. In conclusion, the simultaneous application of the two selenium fertilizers yields the best combination of reducing the cadmium content and increasing the selenium content in brown rice.

Keywords: rice; selenium fertilization; cadmium; transport and accumulation

硒(Se)是人类生存必不可少的微量营养元素之一,在人体内的多种生理过程中发挥着重要作用,具有抗氧化、抗癌、增强免疫力等多种功效^[1-3]。硒缺失会增加得多种疾病的风险,包括免疫功能障碍、癌症、心血管疾病、心脏病以及克山病和大骨节病等^[4-5]。对于大多数人而言,饮食特别是农产品是硒摄入的主要来源,因此,富硒食物对人类的硒营养十分重要^[6-7]。根据中国营养学会营养调查报告可知,中国成年人每天硒的摄入量仅为 $26.63 \mu\text{g}$, 36%~61%的居民每日摄硒量不足,与中国营养学会推荐的人均每天 $60\sim 240 \mu\text{g}$ 的硒摄入量相差甚远^[3,8]。大米作为我国最主要的粮食作物,是我国居民摄入硒的主要来源^[9-11]。因此,在富硒地区发展富硒水稻,通过提高稻谷中硒的含量来提高我国居民摄硒量是一可行措施^[12]。

由于地质原因,天然富硒土壤中通常伴随着镉(Cd)等重金属^[13-15],镉在土壤中会被植物根系吸收,再转移到植物地上部并在可食用部分积累,最终通过食用进入人体^[16-17]。长期食用镉含量超标食品会导致例如骨质疏松、肝肾功能受损等多种疾病,严重威胁人类的健康^[18-19]。研究表明,食用大米是镉进入人体的主要来源,因为水稻比其他谷物更容易吸收和积累镉^[20-24]。富硒农田土壤由于地质因素易伴生镉而导致农田土壤存在一定镉污染,从而易导致水稻籽粒中镉含量超标,这使得在富硒地区种植水稻、发展富硒农产品存在一定的障碍^[6,25-26]。

镉与硒存在一定的拮抗作用^[27],但天然富硒地区仍存在水稻籽粒中镉含量超标现象^[26]。为降低天然富硒地区水稻籽粒中镉含量,减少富硒地区农产品重金属超标风险,需采取相应措施阻止水稻对镉的吸

收。在中、轻度镉污染条件下,硒肥的施用能在一定程度上缓解重金属对植物的毒害,并降低植物对土壤中重金属的吸收,从而有效降低水稻籽粒对镉的积累^[28],同时硒肥还能提高水稻产量和水稻籽粒中硒含量^[29-30]。然而研究表明,硒肥的不同施用方式会对作物产生不同的影响^[31]。潘荣庆等^[32]发现叶面施硒肥可以很好地阻控水稻糙米对镉的富集。Hu等^[33]发现土壤中施入硒肥不仅可以有效降低糙米中镉的含量,而且也能提高糙米中硒的含量。

不同硒肥运用于天然富硒地区的田间试验研究相对较少,其在富硒农田土壤中的效应需要进一步在田间试验中验证,并对其作用机制进行系统化和深入探讨。本文研究单施叶面硒肥、基施硒肥及二者联合对我国南方典型中、轻度镉污染富硒农田中稻米镉的阻控效果及其机制,探究硒肥的不同施用方式在富硒镉污染农田条件下水稻镉、硒积累特征,以期富硒镉污染农田稻米降镉增硒技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2021年在安徽省池州市石台县进行,该地区为亚热带湿润气候,光照充足,四季分明,且冬夏长,春秋短,年平均气温为 16°C , 平均降水量为 $1\,626.4 \text{ mm}$ 。在试验小区划分前,对整块试验小区按照五点取样法采集 $0\sim 20 \text{ cm}$ 的1个混合土壤样品作背景土壤,测定指标背景值。经测定该小区土壤理化性质为: pH 6.19, 有机质为 $25.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮为 $2.02 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮为 $141.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷为 $23.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾为 $140.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总硒为 $0.57 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 总镉为 $0.68 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效态镉为 $0.255 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验材料与设计

供试的水稻品种为在当地适宜种植的玉针香。叶面硒肥为安徽罗壳智沣农业科技有限公司提供的有机富硒液体肥(含硒量 $\geq 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 6.0~7.0);富硒有机肥料由山东绿福地生物科技有限公司提供(N、P、K $\geq 5\%$, 有机质 $\geq 45\%$, Se $\geq 0.1\%$, pH 6.2);复合肥(17-17-17)以及追肥所需的尿素(N $\geq 46.0\%$)均来自当地农资市场。试验共设计4个处理:对照(CK),基施450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合肥;基施硒肥(JS),基施300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合肥与150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-1}$ 富硒有机肥料;叶面施硒肥(YM),基施450 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合肥,孕穗期、灌浆期分别叶面喷施1500 $\text{mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机富硒液体肥;基施硒肥+叶面施硒肥(JY),基施300 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 复合肥与150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 富硒有机肥料,孕穗期、灌浆期分别叶面喷施1500 $\text{mL} \cdot \text{hm}^{-2}$ 有机富硒液体肥。

富硒有机肥在种植前2~3 d同复合肥一起均匀施入。有机富硒液体肥每1500 mL加水600 kg,稀释400倍,人工均匀喷施于水稻叶面正反面及稻穗上。各小区于水稻分蘖期追施75 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 尿素。试验小区面积为20 m^2 (4 m $\times$ 5 m),每个处理设置3次重复,随机排列,小区四周起垄并用聚乙烯薄膜相互间隔,防止小区之间水肥相互渗透。各小区苗数一致,水稻其他日常管理根据当地的常规标准进行。成熟后各小区水稻单打单收进行测产。

1.3 样品采集与测定

于10月下旬水稻成熟期分别采集植株样品和土壤样品,各小区以五点取样法采集水稻样品,土壤样品为水稻样根部周围土壤。采集后的水稻植株按根部、茎叶和籽粒分离,各部位先后用自来水和去离子水清洗干净,根部与茎叶于105 $^{\circ}\text{C}$ 下杀青30 min,再降到40 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量,籽粒自然风干后分别制成糙米、精米和米壳。所有植株样品粉碎后过筛,装于干燥自封袋备用。植株不同部位样品中总镉和总硒的测定参照《食品安全国家标准 食品中镉的测定》(GB 5009.15—2014)和《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93—2017)。土壤样品采集后在阴凉处风干,风干期间除去土壤中根系等杂物,并将大土块破碎为小土块,完全风干后粉碎研磨单独过2 mm(10目)和0.149 mm(100目)尼龙网筛,装入自封袋备用。土壤中总镉和总硒的测定参照《土壤质量 镉、铅的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》(GB/T 17141—1997)和《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104—2006)。土壤中不同形态镉参照改进后的BCR法进行处理得

试剂溶液^[34]。植株和土壤中镉含量采用德国耶拿Z700P原子吸收分光光度计进行测定,植株和土壤中硒含量采用原子荧光光度计(普析通用PF5)进行测定。土壤其他基本理化性质参照鲍士旦^[35]的《土壤农化分析》。在样品检测分析过程中,采用空白对照和平行样品进行数据质量控制。

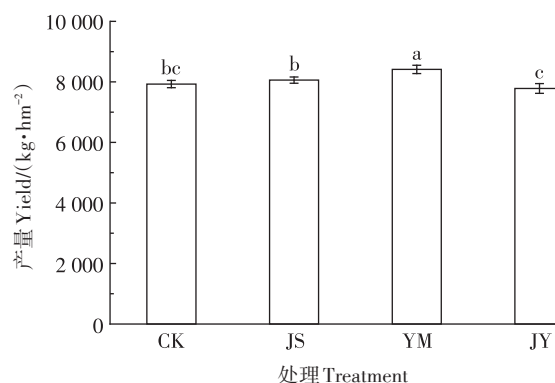
1.4 数据分析

采用Excel 2016进行数据整理,试验数据通过SPSS 22.0进行方差分析,采用Origin 2018制图。用Duncan检验显著性差异,文中提到的差异具有显著性均指 $P < 0.05$ 。利用水稻的富集系数(BCF)和迁移系数(TF)分别表征水稻对镉的吸收和转运能力。糙米富集系数(BCF_{糙米})为糙米中镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与土壤总镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的比值;根到茎叶的转运系数(TF_{茎叶/根})为茎叶中镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与根中镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的比值;茎叶到籽粒的转运系数(TF_{籽粒/茎叶})为糙米中镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)与茎叶中镉含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的比值。

2 结果与分析

2.1 不同硒肥对水稻产量的影响

图1为不同处理下水稻产量的变化,可见各处理下水稻产量范围为7 809.30~8 834.25 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,CK处理水稻产量为7 928.45 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。相较于CK,JS和YM处理均能提高水稻产量,但YM处理水稻增产效果更好,提升率为6.10%,JS处理水稻产量提升幅度仅为1.64%,效果不显著,而JY处理却导致水稻产量



JS为基施硒肥,YM为叶面施硒肥,JY为基施硒肥+叶面施硒肥。不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

JS is the base of selenium fertilizer, YM is leaf surface selenium fertilizer, JY is base application of selenium fertilizer + foliar selenium fertilizer.

Different letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$). The same below.

图1 不同处理对水稻产量的影响

Figure 1 Effects of different treatments on rice yield

下降1.84%,但产量与CK处理相比差异不显著。

2.2 不同硒肥对水稻各部位镉、硒含量和富集、转运的影响

2.2.1 水稻不同部位镉含量的差异

表1为不同处理下水稻各部位的镉含量,在水稻各部位中镉的分布规律为根部>茎叶>糙米>精米>壳。CK处理下糙米中镉含量为0.216 mg·kg⁻¹,超过了我国《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中所规定的糙米中镉限量值(0.2 mg·kg⁻¹),打磨成精米后,镉含量降低到0.199 mg·kg⁻¹,虽降低到限量值以下,但降低镉含量效果并不显著,仍存在一定超标风险。

添加硒肥后糙米中镉含量为0.159~0.182 mg·kg⁻¹,显著低于CK处理,达到了我国食品卫生安全标准。镉含量的降低效果为JY>YM>JS,其中JY处理对降低水稻糙米中镉含量效果最好,降低率达到26.39%,而YM处理对降低糙米中镉含量的效果相较JS处理更好。将糙米打磨成精米后,镉含量进一步降低为0.154~0.159 mg·kg⁻¹,各处理的降低效果为JY>YM>JS。

水稻根、茎叶和壳中的镉含量在添加硒肥后同样有所降低,降低效果最好的仍为JY处理,降低率分别为15.40%、21.13%和11.11%。与籽粒不同的是,JS处理相较于YM处理能更有效地降低水稻根、茎叶和壳中的镉含量。

2.2.2 水稻不同部位硒含量的差异

自然富硒地区种植的水稻籽粒中硒含量相较于

一般地区高,所有处理下糙米和精米中硒含量为0.173~0.244 mg·kg⁻¹和0.102~0.160 mg·kg⁻¹(表2),均符合《富硒稻谷》(GB/T 22499—2008)中大米硒含量0.04~0.30 mg·kg⁻¹的标准。添加硒肥后,各处理糙米和精米中硒含量相较于CK分别提高了25.09%~41.50%和32.03%~56.86%,3个处理提升效果为JY>YM>JS,以JY处理对糙米和精米的增硒效果最好,硒含量分别达到0.244 mg·kg⁻¹和0.160 mg·kg⁻¹,提升幅度达到41.50%和56.86%,而YM处理相较于JS处理增加糙米和精米中硒含量的效果更好。

硒肥的使用同样提高了水稻根、茎叶和壳中的硒含量,与镉相同,土壤中硒在被水稻吸收后主要集中在水稻根部,JS、YM和JY 3个处理下根中硒含量相较于CK分别提升了18.50%、5.29%和16.85%,提升效果为JS>JY>YM,可以看出JS处理能更好地促进根对硒的吸收,而YM处理则是更多地促进了水稻茎叶、籽粒和壳对硒的吸收。

2.2.3 水稻各部位镉的富集和转运系数差异

为进一步分析不同硒肥处理对水稻体内镉积累的影响,采用富集系数(BCF)和转运系数(TF)来反映镉在水稻各部位的富集和转移能力(表3)。CK处理下水稻对镉的BCF_{糙米}、TF_{茎叶/根}和TF_{糙米/茎叶}分别为0.379、0.318和0.253。使用硒肥后水稻对镉的BCF_{糙米}、TF_{茎叶/根}和TF_{糙米/茎叶}均得到了显著降低。BCF_{糙米}的降低幅度为15.57%~23.39%,TF_{茎叶/根}的降低幅度为1.83%~6.78%,TF_{糙米/茎叶}降低幅度为0.33%~15.07%。

表1 不同处理对水稻各部位镉含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 1 Effects of different treatments on the Cd content of each part of rice(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	糙米 Brown rice	精米 White rice	壳 Shell	茎叶 Stem and leaf	根 Root
CK	0.216±0.003a	0.199±0.003a	0.063±0.002a	0.852±0.006a	2.681±0.044a
JS	0.182±0.005b	0.159±0.003b	0.057±0.003a	0.723±0.011c	2.317±0.031c
YM	0.167±0.003c	0.155±0.003b	0.060±0.001a	0.775±0.009b	2.555±0.028b
JY	0.159±0.002d	0.154±0.003b	0.056±0.010a	0.672±0.005d	2.268±0.019c

注:数据为平均值±标准差(n=3)。不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Data are represented with mean±standard deviation (n=3). Different letters indicate significant differences among treatments (P<0.05). The same below.

表2 不同处理对水稻各部位硒含量的影响(mg·kg⁻¹)

Table 2 Effects of different treatments on the Se content in each part of rice(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	糙米 brown rice	精米 white rice	壳 shell	茎叶 stem and leaf	根 root
CK	0.173±0.002d	0.102±0.001d	0.101±0.003c	0.233±0.003c	0.807±0.004c
JS	0.216±0.004c	0.135±0.001c	0.133±0.002b	0.283±0.003b	0.957±0.003a
YM	0.223±0.003b	0.143±0.002b	0.152±0.008a	0.292±0.006ab	0.850±0.003b
JY	0.244±0.003a	0.160±0.004a	0.146±0.008a	0.293±0.005a	0.943±0.006a

表3 不同处理对水稻镉富集和转运系数的影响

Table 3 Effects of different treatments on the enrichment and transport coefficients of Cd in rice

处理 Treatment	BCF 糙米	TF 茎叶/根	TF 糙米/茎叶
CK	0.379±0.006a	0.318±0.007a	0.253±0.015a
JS	0.320±0.009b	0.312±0.001a	0.252±0.010a
YM	0.292±0.006c	0.303±0.003b	0.215±0.016c
JY	0.279±0.003d	0.296±0.004b	0.237±0.012b

其中对BCF_{糙米}和TF_{茎叶/根}的降低效果最好的均为JY处理,其次为YM处理。而对于TF_{糙米/茎叶}降低效果最好的为YM处理,相较于CK下降了0.038。而JS处理的TF_{茎叶/根}和TF_{糙米/茎叶}与CK处理差异均不显著。

2.2.4 水稻各部位硒的富集和转运系数差异

不同硒肥的施用,不仅可以降低水稻对镉的吸收和转运,同时还能促进水稻对硒的吸收和转运(表4)。相较于CK,各处理对硒BCF_{糙米}的提升幅度为25.13%~41.53%,TF_{茎叶/根}的提升幅度为2.47%~18.71%,TF_{糙米/茎叶}的提升幅度为3.11%~10.14%。其中JY处理对BCF_{糙米}和TF_{糙米/茎叶}的提升效果最好,提升幅度分别为41.53%和10.14%。但对于TF_{糙米/茎叶},JS和YM处理的提升幅度分别为3.11%和3.51%,处理之间并无显著差异。而对于TF_{茎叶/根}则以YM处理的效果最好,提升幅度为18.71%。

表4 不同处理对水稻硒富集和转运系数的影响

Table 4 Effects of different treatments on the enrichment and transport coefficients of Se in rice

处理 Treatment	BCF 糙米	TF 茎叶/根	TF 糙米/茎叶
CK	0.557±0.005d	0.289±0.004c	0.740±0.008b
JS	0.697±0.013c	0.296±0.005c	0.763±0.018b
YM	0.720±0.010b	0.343±0.005a	0.766±0.016b
JY	0.788±0.008a	0.311±0.003b	0.815±0.017a

2.3 不同硒肥对土壤pH、有机质及镉形态的影响

2.3.1 土壤pH及有机质的变化

土壤pH和有机质是影响土壤中重金属有效性的重要因素,不同处理对水稻根际土壤pH和有机质的影响如图2所示。相较于CK处理,JS和JY两个处理导致土壤pH分别显著上升0.19个和0.17个单位(图2A),提升幅度为3.01%和2.74%;同时有机质含量也分别上升了1.43 g·kg⁻¹和0.61 g·kg⁻¹(图2B),提升幅度为8.17%和3.51%,但有机质提升效果无显著性差异。而YM处理下对土壤pH和有机质均无显著变化。

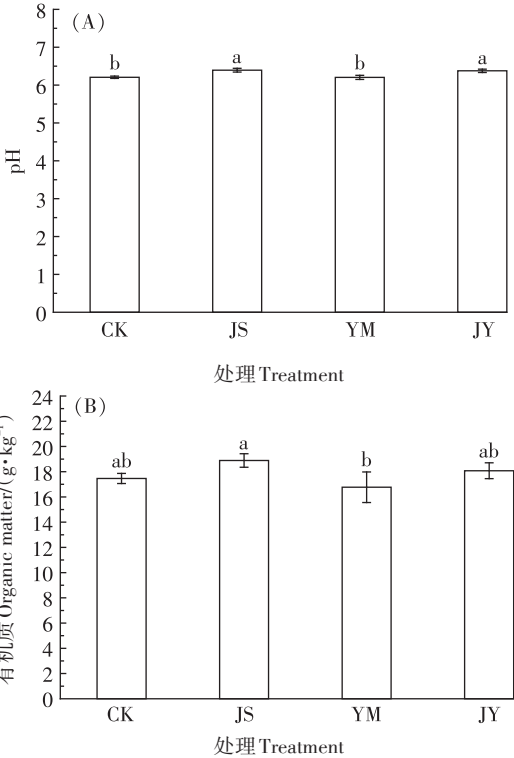


图2 不同处理对水稻根际土壤pH和有机质的影响

Figure 2 Effects of different treatments on pH and organic matter of rice rhizosphere soil

2.3.2 水稻根际土壤中镉形态的变化

利用改进的BCR提取法,可将土壤中的镉分为弱酸提取态、可氧化态、可还原态和残渣态,不同形态的镉在土壤中的迁移率有很大的区别,其中弱酸提取态的迁移率最高,也是最容易被植物吸收的,而残渣态则最不易被植物吸收利用。由图3中CK可以看出,供试土壤中的镉主要以弱酸提取态为主,达45%以上,这表明土壤中镉的生物有效性较高,水稻更容易吸收重金属镉,其次为可还原态和残渣态,分别占20.72%和22.14%,两者占比之和也达到40%以上,而可氧化态占比较小。添加硒肥后,在JS和JY处理下,土壤中镉的弱酸提取态和可氧化态相较于CK均有所降低,弱酸提取态分别下降了2.96%和4.34%,可氧化态分别下降了0.89%和0.28%;而可还原态和残渣态则有所提高,可还原态分别提高了2.15%和2.51%,残渣态分别提高了1.70%和2.11%。YM处理对土壤中镉的各个形态几乎都没有影响。

3 讨论

3.1 不同硒肥对水稻产量的影响

硒在植物体内可以抑制镉诱导自由基对植物的

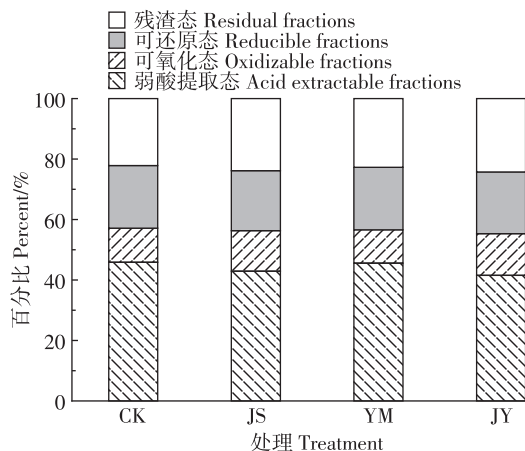


图3 不同处理对水稻根际土壤中镉形态分级的影响

Figure 3 Effects of different treatments on the classification of cadmium forms in rice rhizosphere soil

危害,或通过调控植物螯合态酶的活性,使镉离子在植物体内形成螯合蛋白,从而减轻镉对植物的毒害^[36]。Boldrin等^[37]研究发现亚硒酸盐或硒酸盐应用于土壤或水稻叶面均能增加水稻籽粒产量,且叶面施用硒提升效果更显著,另外施用硒肥还可以通过提高植物叶绿素水平,改善光合作用,减弱镉对植物生长的抑制,提高水稻硒含量^[38-39]。本试验结果表明,叶面施硒肥显著提高了水稻产量,基施硒肥处理虽然也提高了水稻产量但相较对照处理并无显著变化。基施硒肥与叶面施硒肥同时使用后,水稻产量相较于对照处理反而降低,这可能是由于在富硒土壤上使用基施硒肥和叶面施硒肥后,植物在吸收较多的硒后会抑制自身的生长发育^[40-41],导致水稻产量下降。前人研究也发现,硒对作物生长存在双重作用,适量可促进产量的增加,而浓度过高则会产生抑制作用^[42]。

3.2 不同硒肥影响水稻各部位对镉的吸收

本试验中,添加两种硒肥显著降低了水稻糙米和精米中镉含量,但作用机理不同。Huang等^[43]发现土壤中添加外源硒后,硒酸盐及其在土壤中的产物可能与镉发生热力学反应,形成植物无法直接吸收的Cd-Se复合物,从而降低水稻根系对镉的吸收。采用基施硒肥后,土壤中的镉由弱酸提取态向还原态和残渣态转变,镉的生物可利用性降低,水稻根对镉的吸收也显著降低,进而降低了作物籽粒中的镉含量^[44]。还有研究表明,根表面的铁斑能阻止根对重金属的吸收,硒肥的施用会增加铁斑从而减少根对镉的吸收^[45-46]。其次,外源硒的施用还可能会影响根际微环境^[47],基施外源硒可通过提高土壤pH来固定土壤中

的镉,减少土壤溶液中的镉含量^[43]。这与本试验结果一致,基施硒肥和基施硒肥+叶面施硒肥处理分别使土壤pH提升了0.19个和0.17个单位,但单独叶面施硒肥对土壤pH无影响,因此土壤pH的提升主要是由于采用了基施硒肥。

叶面施硒肥可以通过降低水稻镉转运系数从而降低水稻籽粒中镉的含量^[48],本研究也得到相同的结果。叶面喷施硒肥后,水稻根对镉的吸收同样减少,但效果不显著,而根到茎叶特别是茎叶到籽粒的转运系数显著下降。此外,低浓度的镉会显著抑制水稻的生长与光合作用^[49]。而Gao等^[50]通过研究发现叶面施硒肥不仅可以减少镉从根到茎、从茎到糙米的迁移,同时糙米中的镉含量还与光合作用呈负相关,叶面施硒肥能够改善光合作用,减少水稻对镉的吸收。

3.3 不同硒肥影响水稻各部位对硒的吸收

施用硒肥能提高水稻籽粒中硒的含量。研究发现,pH是影响土壤中硒的价态和溶解度的重要因素,硒在中性至碱性环境中主要以硒酸盐的形式存在,而在酸性条件下则主要以亚硒酸盐的形式存在,尽管硒酸盐与亚硒酸盐都具有高度水溶性,但亚硒酸盐易被土壤中如铁氧化物、黏土矿物等固相强烈吸附,导致在土壤中的溶解度较低,因而硒酸盐相较于亚硒酸盐更容易被水稻吸收^[51-53]。Eich-Greatorex等^[54]也发现,在pH 5~7范围内,随着pH值的增加,土壤中硒的利用率增加。在基施硒肥后,土壤pH得到提高,促进了水稻对硒的吸收,提高了水稻糙米、精米等各部位的硒含量。其次,基施硒肥还可以增加土壤中有效态硒的含量^[55],促进水稻对硒的吸收。

叶面施硒肥同样提高了水稻糙米、精米等各部位的硒含量,这与前人研究结果相似^[56-57],且叶面施硒肥相较于基施硒肥水稻籽粒硒含量更高。有研究表明水稻籽粒中硒的含量受硒的施用方式、来源以及这些因素之间的相互作用的影响,虽然土壤和叶面硒的施用均能提高水稻籽粒硒含量,但土壤中施用硒酸盐对于提高水稻籽粒中硒含量效果更好^[37]。这与本研究结果不同,可能是由于硒肥的种类、施用量和土壤中硒的背景值等因素的不同,导致叶面施硒肥的施用效果更好。同时在镉胁迫下,硒在水稻中的吸收和转运同样受镉的影响^[27,39]。并在基施硒肥和叶面施硒肥后,两者相互作用使得该处理相较于单施一种硒肥水稻中硒含量更高。

在轻度镉污染自然富硒土壤条件下,施用硒肥能有效降低水稻糙米和精米中镉含量,同时进一步提高

糙米中的硒含量。但硒肥的不同施用方式,以及土壤中硒的形态均会对水稻的降镉增硒效果产生不同的影响。后续可进一步探究硒肥种类、施用方式、用量以及硒形态对水稻糙米中镉、硒含量和土壤中镉的影响和作用机理,根据土壤和种植环境的实际情况进行综合考虑,从而更好地达到降镉增硒的效果。

4 结论

(1)在轻度镉污染富硒土壤下,叶面施硒肥对水稻有一定的增产效果,基施硒肥与基施硒肥+叶面施硒肥对水稻产量无显著影响。

(2)硒肥的施用可使糙米中的镉含量降低至我国食品安全限量标准以内。基施硒肥能通过提高土壤pH、降低有效态镉含量和水稻对镉的吸收,从而降低糙米中的镉含量,而叶面施硒肥主要通过降低水稻对镉的转运来降低糙米中的镉含量,并在两种硒肥同时施用时效果最好。

(3)硒肥的施用还提高了水稻对硒的吸收,增加了糙米中的硒含量。叶面施硒肥相较于基施硒肥对水稻籽粒中硒含量的提升效果更好,同样以基施硒肥和叶面施硒肥同时使用的水稻籽粒硒含量最高。

参考文献:

- [1] FORDYCE F M. Selenium deficiency and toxicity in the environment [M]. Amsterdam:Essentials of Medical Geology, 2013:375-416.
- [2] RAYMAN M P. Selenium and human health[J]. *Lancet*, 2012, 379 (9822):1256-1268.
- [3] DINH Q T, CUI Z W, HUANG J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: a review [J]. *Environment International*, 2018, 112:294-309.
- [4] WHITE P J. Selenium accumulation by plants[J]. *Annals of Botany*, 2016, 117(2):217-235.
- [5] YANG R, LIU Y Q, ZHOU Z K. Selenium and selenoproteins, from structure, function to food resource and nutrition[J]. *Food Science and Technology Research*, 2017, 23(3):363-373.
- [6] CASHMAN K D, KIELY M. EURRECA: estimating vitamin D requirements for deriving dietary reference values[J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2013, 53(10):1097-1109.
- [7] NAVARRO-ALARCON M, CABRERA-VIQUE C. Selenium in food and the human body: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3):115-141.
- [8] ZHANG B, WEI Y, YAN S, et al. Characterization of selenium accumulation of different rice genotypes in Chinese natural seleniferous soil[J]. *Plant Soil and Environment*, 2019, 65(1):15-20.
- [9] WANG Y D, WANG X, WONG Y S. Generation of selenium-enriched rice with enhanced grain yield, selenium content and bioavailability through fertilisation with selenite[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(3):2385-2393.
- [10] WILLIAMS P N, LOMBI E, SUN G X, et al. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15):6024-6030.
- [11] LIN L, ZHOU W, DAI H, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235:343-351.
- [12] WU Z, BANUELOS G S, LIN Z Q, et al. Biofortification and phytoremediation of selenium in China[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6(6):136-145.
- [13] YU T, HOU W, HOU Q, et al. Safe utilization and zoning on natural selenium-rich land resources: a case study of the typical area in Enshi County, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(9):2803-2818.
- [14] YANG R Y, HE Y H, LUO L F, et al. The interaction between selenium and cadmium in the soil-rice-human continuum in an area with high geological background of selenium and cadmium[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 222:112526.
- [15] YU T, HOU W L, HOU Q Y, et al. Safe utilization and zoning on natural selenium-rich land resources: a case study of the typical area in Enshi County, China[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020, 42(9):2803-2818.
- [16] XU H Z, YAN J P, QIN Y, et al. Effect of different forms of selenium on the physiological response and the cadmium uptake by rice under cadmium stress[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(19):6991.
- [17] QIAO J T, LIU T X, WANG X Q, et al. Simultaneous alleviation of cadmium and arsenic accumulation in rice by applying zero-valent iron and biochar to contaminated paddy soils[J]. *Chemosphere*, 2018, 195:260-271.
- [18] TEMPLETON D M, LIU Y. Multiple roles of cadmium in cell death and survival[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2010, 188(2):267-275.
- [19] ZHANG W L, DU Y, ZHAI M M, et al. Cadmium exposure and its health effects: a 19-year follow-up study of a polluted area in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 470/471:224-228.
- [20] LIU N, JIANG Z, LI X, et al. Mitigation of rice cadmium (Cd) accumulation by joint application of organic amendments and selenium (Se) in high-Cd-contaminated soils[J]. *Chemosphere*, 2020, 241:125106.
- [21] MEHARG A A, NORTON G, DEACON C, et al. Variation in rice cadmium related to human exposure[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(11):5613-5618.
- [22] XIE L H, TANG S Q, WEI X J, et al. The cadmium and lead content of the grain produced by leading Chinese rice cultivars[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217:217-224.
- [23] CHEN J, HUANG X Y, SALT D E, et al. Mutation in OsCADT1 enhances cadmium tolerance and enriches selenium in rice grain[J]. *New Phytologist*, 2020, 226(3):838-850.
- [24] RIAZ M, KAMRAN M, RIZWAN M, et al. Cadmium uptake and translocation: selenium and silicon roles in Cd detoxification for the

- production of low Cd crops: a critical review[J]. *Chemosphere*, 2021, 273:129690.
- [25] DU Y J, LUO K L, NI R X, 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.
- [26] YANG B B, YANG C, SHAO Z Y, et al. Selenium (Se) does not reduce cadmium (Cd) uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) in naturally occurred Se-rich paddy fields with a high geological background of Cd[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 103(1):127-132.
- [27] GUO Y K, MAO K, CAO H R, et al. Exogenous selenium (cadmium) inhibits the absorption and transportation of cadmium (selenium) in rice[J]. *Environmental Pollution*, 2021, 268:115829.
- [28] LIN L, ZHOU W H, DAI H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235:343-351.
- [29] 杨益花, 袁卫明, 单建明, 等. 叶面硒肥施用量对稻谷总硒含量及产量的影响[J]. 河北农业科学, 2013(3):51-54. YANG Y H, YUAN W M, SHAN J M, et al. Effect of foliar selenium fertilizer on total selenium content and yield of rice[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2013(3):51-54.
- [30] YAN J, CHEN X, ZHU T, et al. Effects of selenium fertilizer application on yield and selenium accumulation characteristics of different japonica rice varieties[J]. *Sustainability*, 2021, 13(18):1-15.
- [31] 张秀锦, 柴冠群, 刘桂华, 等. 土壤-植物体系中施硒方式影响作物吸收转运镉的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2023, 51(1):10-12. ZHANG X J, CHAI G Q, LIU G H, et al. Research progress on effects of selenium application on cadmium uptake and transport by crops in soil plant system[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, 51(1):10-12.
- [32] 潘荣庆, 何卿姮, 韦昌江, 等. 不同叶面肥及水稻品种对水稻糙米重金属累积的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(6):712-719. PAN R Q, HE Q H, WEI C J, et al. Heavy metal accumulation in husk-removed grains as affected by foliar fertilizer application and rice variety[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37(6):712-719.
- [33] HU Y, NORTON G J, DUAN G L, et al. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. *Plant and Soil*, 2014, 384(1/2):131-140.
- [34] 张永利, 刘晓文, 陈启敏, 等. Tessier法和改进BCR法提取施加熟污泥后黄土中Cd的对比研究[J]. 环境工程, 2019, 37(5):34-38. ZHANG Y L, LIU X W, CHEN Q M, et al. Comparative study of Tessier method and modified BCR method for extracting Cd in loess amended by composted sludge[J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(5):34-38.
- [35] 鲍士旦. 土壤化学分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2000. BAO S D. Agrochemical analysis of soil[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [36] 贾宏昉, 宋家永, 王海红, 等. 硒对作物生理、生长发育及产量、品质的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(4):449-454. JIA H F, SONG J Y, WANG H H, et al. Research progress on the effect of selenium on physiological functions, growth, yield and quality of crops[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(4):449-454.
- [37] BOLDRIN P F, FAQUIN V, RAMOS S J, et al. Soil and foliar application of selenium in rice biofortification[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2013, 31(2):238-244.
- [38] GANGULY R, SARKAR A, DASGUPTA D, et al. Unravelling the efficient applications of zinc and selenium for mitigation of abiotic stresses in plants[J]. *Agriculture-Basel*, 2022, 12(10):1551.
- [39] HUANG B F, XIN J L, DAI H W, et al. Effects of Interaction between cadmium (Cd) and selenium (Se) on grain yield and Cd and Se accumulation in a hybrid rice (*Oryza sativa*) system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(43):9537-9546.
- [40] 韩丹, 熊双莲, 许自成, 等. 硒对烤烟生长、化学指标及矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10):2072-2079. HAN D, XIONG S L, XU Z C, et al. Effects of selenium on growth, chemical index and mineral nutrition contents of flue-cured tobacco[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2017, 31(10):2072-2079.
- [41] 蒋曦龙, 乔月彤, 李晓靖, 等. 叶面过量施硒对玉米产量、硒和矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(12):2841-2849. JIANG X L, QIAO Y T, LI X J, et al. Effects of foliar spraying of excessive selenium on yields and contents of selenium and mineral elements of maize[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2021, 35(12):2841-2849.
- [42] YAO X Q, CHU J Z, WANG G Y. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, 130(3):283-290.
- [43] HUANG Q Q, XU Y M, LIU Y Y, et al. Selenium application alters soil cadmium bioavailability and reduces its accumulation in rice grown in Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(31):31175-31182.
- [44] CHANG J D, HUANG S, KONISHI N, et al. Overexpression of the manganese/cadmium transporter OsNRAMP5 reduces cadmium accumulation in rice grain[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2020, 71(18):5705-5715.
- [45] HUANG G, DING C, GUO F, et al. Underlying mechanisms and effects of hydrated lime and selenium application on cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(23):18926-18935.
- [46] HUANG G, DING C, GUO F, et al. The optimum Se application time for reducing Cd uptake by rice (*Oryza sativa* L.) and its mechanism [J]. *Plant and Soil*, 2018, 431(1/2):231-243.
- [47] DONG J, MAO W H, ZHANG G P, et al. Root excretion and plant tolerance to cadmium toxicity: a review[J]. *Plant Soil and Environment*, 2007, 53(5):193-200.
- [48] 谭骏, 潘雨萍, 黄雁飞, 等. 叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6):981-987. TAN J, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of foliar fertilizer and passivator application on cadmium accumulation and transport in rice [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(6):

- 981–987.
- [49] CAO F B, CAI Y, LIU L, et al. Differences in photosynthesis, yield and grain cadmium accumulation as affected by exogenous cadmium and glutathione in the two rice genotypes[J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(3): 715–723.
- [50] GAO M, ZHOU J, LIU H L, et al. Foliar spraying with silicon and selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 631/632: 1100–1108.
- [51] LI H F, LOMBI E, STROUD J L, et al. Selenium speciation in soil and rice: influence of water management and Se fertilization[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(22): 11837–11843.
- [52] ZHOU X B, LI Y Y, LAI F. Effects of different water management on absorption and accumulation of selenium in rice[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(6): 1178–1182.
- [53] 魏玮, 李平, 周志高, 等. 不同外源硒在土壤中的有效性变化及其对小麦硒累积的影响[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 1003–1011. WEI W, LI P, ZHOU Z G, et al. Availability changes in different exogenous selenium fertilizers in soil and their effects on selenium accumulation in wheat[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 1003–1011.
- [54] EICH-GREATOR S, SOGN T A, OGAARD A F, et al. Plant availability of inorganic and organic selenium fertiliser as influenced by soil organic matter content and pH[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2007, 79(3): 221–231.
- [55] 胡华锋, 朱海, 介晓磊, 等. 基施硒肥对不同生育期紫花苜蓿干物质产量及土壤有效硒的影响[J]. *家畜生态学报*, 2014, 35(7): 67–71. HU H F, ZHU H, JIE X L, et al. Effect of Se application as basal fertilizer on dry matter yield and soil available Se in different growth stages of alfalfa[J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2014, 35(7): 67–71.
- [56] 朱春弟, 朱泯亦, 沈兴连, 等. 叶面喷施富硒水溶肥对水稻产量及稻米含硒量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2023, 64(1): 115–8. ZHU C D, ZHU M Y, SHEN X L, et al. Effects of spraying foliar selenium fertilizer on yield and selenium content in rice[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2023, 64(1): 115–118.
- [57] 高嵩, 李瑞春, 赵丹, 等. 叶面喷施有机硒肥对谷子生长和硒含量的影响[J]. *园艺与种苗*, 2023, 43(1): 89–91. GAO S, LI R C, ZHAO D, et al. Effects of foliar spraying organic selenium on millet growth and selenium content[J]. *Horticulture & Seed*, 2023, 43(1): 89–91.

