



**硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响**

胡婧怡, 陶荣浩, 周晓天, 张慧敏, 胡含秀, 高羽欣, 谢君豪, 马友华

引用本文:

胡婧怡,陶荣浩,周晓天,张慧敏,胡含秀,高羽欣,谢君豪,马友华. 硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1308–1318.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0666>

**您可能感兴趣的其他文章**

**Articles you may be interested in**

**叶面阻隔联合土壤钝化对水稻镉吸收转运的影响**

谭骏, 潘丽萍, 黄雁飞, 邢颖, 陈锦平, 刘永贤, 张超兰

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 981–987 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0629>

**有机肥替代部分化肥结合外源硒对白术的促生作用**

周武先, 张美德, 王华, 段媛媛, 艾伦强, 黄东海, 罗孝荣, 张宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 457–465 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0228>

**外源硒对川党参生长的影响及其可能作用机制**

周武先, 刘翠君, 段媛媛, 张美德, 艾伦强, 魏海英, 张雅娟

农业资源与环境学报. 2021, 38(4): 618–625 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0382>

**3种改良剂对连作川党参生长及土壤生化性质的影响**

周武先, 刘翠君, 何银生, 吴海棠, 段媛媛, 魏海英, 艾伦强, 张美德

农业资源与环境学报. 2021, 38(1): 43–52 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0201>

**稻米镉关键积累时期研究**

彭鸥, 铁柏清, 叶长城, 张淼, 刘孝利, 魏祥东, 孙健

农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 272–279 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0035>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

胡婧怡, 陶荣浩, 周晓天, 等. 硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1308–1318.

HU J Y, TAO R H, ZHOU X T, et al. Effects of silicon and selenium fertilizer on Cd and Pb uptake and accumulation in rice [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1308–1318.

## 硅和硒肥叶面调控对水稻镉铅吸收积累的影响

胡婧怡, 陶荣浩, 周晓天, 张慧敏, 胡含秀, 高羽欣, 谢君豪, 马友华\*

(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)

**摘要:**为深入探讨硅和硒肥叶面调控对镉铅污染农田水稻安全性的影响,通过田间试验,设置硅和硒肥叶面调控处理,单次用量均为  $1.5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,加水稀释400倍后,在水稻生长的分蘖期、抽穗期和灌浆期进行硅和硒肥叶面调控,研究其对镉铅污染农田水稻产量、糙米镉铅含量、镉铅吸收转运及糙米氮磷钾含量的影响。结果表明,抽穗期和灌浆期均喷施硅肥较对照显著增产4.49%,叶面喷施硒肥处理较对照显著增产3.21%~5.08% ( $P < 0.05$ )。抽穗期和灌浆期均喷施硅(33.64%)或硒(34.67%)降低镉铅的效果显著高于抽穗期或灌浆期单次喷施 ( $P < 0.05$ ),分蘖期、抽穗期和灌浆期3个生育时期喷施硅或硒肥与2个生育时期喷施相比则差异不显著 ( $P > 0.05$ )。喷施硅肥或硒肥2次及以上均能够使糙米镉含量降至国家标准(GB 2762—2022)限值以下 ( $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),喷施1次能够使糙米铅含量降至标准限值以下 ( $< 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。稻谷糙米中镉铅含量随喷施次数的增加而降低。硅和硒肥叶面调控能够降低水稻植株对镉铅的富集能力,镉铅富集系数降幅分别为10.86%~27.00%和4.35%~69.57%。硅和硒肥叶面调控可降低水稻植株中镉铅向糙米转运的能力,进而降低糙米镉铅含量。硅和硒肥叶面调控处理糙米中硅和硒含量分别为  $2.227 \sim 2.550 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $0.145 \sim 0.176 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,均较对照显著提升 ( $P < 0.05$ ),在水稻不同生育时期喷施叶面硅或硒肥2次及以上对糙米氮磷钾含量提升效果更为显著 ( $P < 0.05$ )。综合分析,在水稻抽穗期和灌浆期叶面喷施硅或硒肥共2次均能够将糙米中镉铅含量降至国家标准限值以下,同时能够提高糙米中氮磷钾的含量,且具有可操作性和较高的经济效益。

**关键词:** 镉; 铅; 硅; 硒; 叶面调控; 农田; 水稻

中图分类号: X53; X173; S511 文献标志码: A 文章编号: 2095-6819(2023)06-1308-11 doi: 10.13254/j.jare.2022.0666

### Effects of silicon and selenium fertilizer on Cd and Pb uptake and accumulation in rice

HU Jingyi, TAO Ronghao, ZHOU Xiaotian, ZHANG Huimin, HU Hanxiu, GAO Yuxin, XIE Junhao, MA Youhua\*

(Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Control of Anhui Province, College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** To study the safety of silicon and selenium fertilizer leaf regulation on rice polluted with cadmium and plumbum, the field experiment was set with silicon and selenium fertilizer leaf surface regulation treatment at the single dosage of  $1.5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ , after adding water to dilute 400 times. The silicon and selenium fertilizer leaf surface regulation test is carried out at the tillering stage, heading stage and filling stage of rice growth. The effects of cadmium and plumbum pollution on rice yield, concentration in brown rice, absorption and transport in different parts of rice, and nitrogen, phosphorus, and potassium concentration in brown rice were studied. The results showed that the yield with spraying silicon fertilizer twice at the heading and filling stage was 4.49% higher than that compared with the control. Foliar selenium fertilizer treatment could significantly increase yield by 3.21%–5.08%, compared with the control ( $P < 0.05$ ). The effect of spraying silicon (33.64%) or selenium (34.67%) twice at heading stage and filling stage for reducing cadmium and plumbum was significantly higher than that of single spraying only at heading stage or filling stage ( $P < 0.05$ ). According to the national standard for food

收稿日期: 2022-09-22 录用日期: 2022-11-17

作者简介: 胡婧怡(1996—),女,安徽合肥人,硕士研究生,从事农田土壤污染修复研究。E-mail: hujingyi1001@foxmail.com

\*通信作者: 马友华 E-mail: yhma2020@qq.com

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(17030701053)

safety(GB 2762—2022), spraying silicon fertilizer or selenium fertilizer twice or more can make the cadmium concentration in brown rice reach the standard ( $<0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), and spraying once can make the plumbum concentration in brown rice reach the standard ( $<0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). The concentration of cadmium and plumbum in brown rice decreased with the increase in spraying times. Leaf control of silicon and selenium fertilizer could reduce the enrichment capacity of cadmium and plumbum in rice plants, and the reduction of cadmium and plumbum enrichment coefficient was 10.86%–27.00% and 4.35%–69.57%, respectively. The leaf surface regulation of silicon and selenium fertilizer can reduce the cadmium and plumbum concentration in brown rice by reducing the ability of heavy metal cadmium and plumbum in rice to transport to brown rice. The concentration of silicon and selenium in brown rice was 2.227–2.550  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and 0.145–0.176  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, which was significantly increased by leaf surface regulation of silicon and selenium fertilizer ( $P<0.05$ ). Spraying leaf silicon or selenium fertilizer twice or more during rice growth period increased the concentration of nitrogen, phosphorus, and potassium in brown rice more significantly ( $P<0.05$ ). According to comprehensive analysis, spraying silicon or selenium twice on the leaves of rice at heading stage and filling stage can reduce the concentration of cadmium and plumbum in brown rice to below the limit value specified in national standard for food safety, and improve the concentration of nitrogen, phosphorus, and potassium in brown rice, which is operable and has high economic benefits.

**Keywords:** cadmium; plumbum; silicon; selenium; leaf regulation; farmland; rice

当前,随着工农业的快速发展,重金属污染受到广泛关注。2014年公布的《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤镉点位超标率为7%。镉进入人体后,可能引发各种疾病,严重影响人体健康<sup>[1]</sup>。叶面阻控技术是降低水稻镉积累的农艺调控措施之一<sup>[2-4]</sup>,主要通过喷施叶面阻控剂,利用阻控剂与镉铅等重金属竞争叶面细胞上的结合位点及螯合作用,降低重金属的活性,进而抑制重金属由叶片经穗轴向籽粒中转运<sup>[5]</sup>。叶面阻控技术可通过提高叶面细胞抗氧化酶的活性、促进水稻生长发育和改善水稻抗逆性,提高水稻抗性和阻控能力。

硅是作物生长不可或缺的微量元素,对生长发育起着重要的作用<sup>[6]</sup>。硅可以促进水稻的生长发育,改善其抗逆性,降低细胞膜的通透性和加强水稻对重金属镉的抗性<sup>[7]</sup>。目前喷施的叶面阻控剂多为含硅材料,硅从叶片进入水稻体内后可向根部移动,与镉铅发生沉淀反应,阻止镉铅向上运输,从而减少作物地上可食用部位镉铅的含量<sup>[8]</sup>。研究表明,施硅在降低稻米镉含量的同时,也能提高稻米品质。黄崇玲等<sup>[9]</sup>发现,与土壤施硅相比,叶面喷施硅溶胶降低水稻镉含量的能力更强。Wang等<sup>[10]</sup>研究发现,叶面喷施纳米硅不仅可以抑制镉从作物根部到地上部位的迁移,而且有助于作物生长。王世华等<sup>[11]</sup>通过盆栽试验发现,水稻在喷施有机硅和无机硅后,稻米中镉的含量分别下降44%和53%。

硒对促进作物生长发育和新陈代谢具有重要作用<sup>[12]</sup>。作物通过硒的生物强化作用,能够提高籽粒中硒含量,进而促进人体对硒的吸收<sup>[13]</sup>。研究发现,硒能与土壤中镉铅等重金属产生拮抗作用,降低植物对

重金属镉铅的吸收<sup>[14-15]</sup>,特别是硒能与重金属镉相结合形成难溶的 $\text{CdSeO}_3$ ,使其难以被作物吸收。研究表明,叶面喷施硒不仅可以显著提高水稻籽粒有机硒含量,而且能降低水稻砷、镉和汞等多种重金属的积累,提高水稻抗逆性<sup>[16]</sup>。管恩相等<sup>[17]</sup>研究表明,水稻喷施叶面硒肥可以使稻米增产16.2%,镉含量下降8.6%~17.8%。因而,利用硒与镉铅等重金属之间的拮抗作用,对种植在镉铅污染农田上的水稻喷施硒肥,可实现水稻安全生产。

当前我国南方地区的部分农田存在铅镉复合污染,以往的研究多聚焦在喷施叶面阻控剂能否在单一污染的农田降低作物重金属,但是对叶面阻控剂种类、喷施次数和喷施量等方面的研究相对较少,对喷施叶面阻控剂在降低农作物重金属的同时补充其可食用部分的氮磷钾等元素的研究也鲜有报道。本研究通过田间试验,探讨了不同生长期喷施硅、硒叶面肥对水稻镉铅吸收的影响,以期对镉铅复合污染农田修复及农产品安全利用提供理论和实践依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

试验地为安徽省铜陵市义安区某镉铅复合污染农田。土壤pH值为6.06,土壤镉全量为 $2.612 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,高于农用地土壤污染风险管控值,有效态镉为 $1.213 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ;铅全量为 $186.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,高于农用地土壤污染风险筛选值,有效态铅为 $60.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤硒含量为 $0.171 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效硒含量为 $0.064 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,土壤有机质含量为 $19.37 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全氮含量为 $0.83 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,碱解氮含量为 $83.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,有效磷含量

为  $18.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 速效钾含量为  $156.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 1.2 试验设计

试验处理:①不喷施处理CK:分蘖期、抽穗期、灌浆期各喷施清水1次。②硅肥处理:Si-1:抽穗期喷施叶面硅肥1次,其余时期喷施清水;Si-2:灌浆期喷施叶面硅肥1次,其余时期喷施清水;Si-3:抽穗期和灌浆期喷施叶面硅肥各1次(共2次),其余时期喷施清水;Si-4:分蘖期、抽穗期和灌浆期喷施叶面硅肥各1次(共3次)。③硒肥处理:Se-1:抽穗期喷施叶面硒肥1次,其余时期喷施清水;Se-2:灌浆期喷施叶面硒肥1次,其余时期喷施清水;Se-3:抽穗期和灌浆期喷施叶面硒肥各1次(共2次),其余时期喷施清水;Se-4:分蘖期、抽穗期和灌浆期喷施叶面硒肥各1次(共3次)。

试验材料:供试的水稻品种为当地适宜种植的桂朝2号。叶面硒肥为有机富硒肥( $\text{Se} \geq 5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 6~7),叶面硅肥为液体硅肥( $\text{Si} \geq 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ , pH 10~11),均由安徽罗壳智洋农业科技有限公司生产。每次喷施叶面肥用量为  $1.5 \text{ L} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,加水  $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,稀释400倍后,各处理统一在晴天的9:00—10:00完成喷施,均匀喷施于叶面正反面及稻穗上,以液滴挂满叶面及稻穗为佳。

田间试验于2021年6月16日—9月27日开展,小区试验设计采用区组随机分布,共9个处理,每个处理小区设置3次重复,共计27个处理小区,每个小区面积为  $20 \text{ m}^2$ ,各小间用水泥护埂,清洁水灌溉,截断污染源。按照当地高产栽培技术施肥量施肥,基肥采用45%(15-15-15)复合肥  $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,在插秧前1~2 d施入,水稻密度(株行距)为  $13 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ;20 d后施尿素  $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作返青分蘖肥,施用钾肥  $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,水稻孕穗期追施尿素  $112.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作孕穗肥。

## 1.3 样品采集

样品于2021年9月27日水稻成熟期采集并实际测产。植株样品采集按梅花形取样法在每个小区采取水稻5株。土壤样品在采集水稻样品当日采集,在采集水稻样品的点位处直接采集水稻根区土壤(0~20 cm),并组成混合土样,土样质量约  $1500 \text{ g}$ 。水稻植株先后用自来水和去离子水清洗干净,再将整株分为根部、茎叶和稻谷。根部和茎叶于  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青30 min,  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒质量;稻谷晒干后按照农业行业标准《米质测定方法》(NY/T 83—2017)出糙,分离出糙米和壳。各部位样品测定干质量后,利用不锈

钢粉碎机进行粉碎。土壤样品在阴凉处风干后,粉碎研磨过10目筛和100目筛,装入自封袋备用。

## 1.4 样品测定

水稻样品中多种元素的测定参照《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268—2016),用美国赛默飞(iCAP 7000 Series)电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定水稻不同部位重金属镉、铅含量和糙米中硅、硒含量。糙米氮和磷元素用AA3型连续流动分析仪(SEAL XY-2 SAMPLER)测定,钾元素含量在火焰光度计(Sherwood 410)上测定。土壤样品中全量镉、铅含量根据《土壤质量 铅、镉的测定》(GB/T 17141—1997)中石墨炉原子吸收分光光度法测定,土壤有效态镉(DTPA-Cd)和有效态铅(DTPA-Pb)的测定根据《土壤质量 有效态铅和镉的测定》(GB/T 23739—2009),用德国耶拿(Z700P)原子吸收分光光度计测定。

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,分析结果均在允许误差范围内。

## 1.5 数据分析与统计

根据以下公式计算相关指标:

富集系数(BCF)=地上部某种元素含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/土壤该种元素含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

秸秆-糙米转运系数( $\text{TF}_{\text{秸秆-糙米}}$ )=水稻糙米重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/水稻秸秆重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

根-秸秆转运系数( $\text{TF}_{\text{根-秸秆}}$ )=水稻秸秆重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/水稻根重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

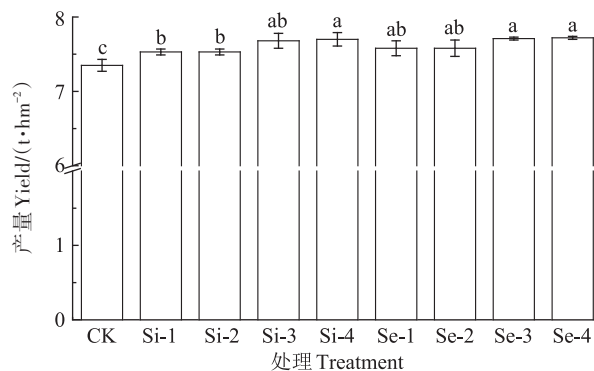
根-糙米转运系数( $\text{TF}_{\text{根-糙米}}$ )=水稻糙米重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )/水稻根重金属含量( $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )

采用Excel 2016进行数据整理,试验数据使用SPSS 23.0进行方差分析和相关性分析。处理间的比较采用最小显著性差异法(LSD),图表中的数据均采用平均值±标准差表示,差异显著水平为  $P < 0.05$ 。采用Origin 2017制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 叶面喷施硅和硒肥对水稻产量的影响

由图1可知,叶面喷施硅肥产量在  $7.53 \sim 7.70 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间,较CK显著提升了  $2.45\% \sim 4.81\%$  ( $P < 0.05$ ),其中在抽穗期-灌浆期2次喷施( $4.49\%$ )增产的效果与仅在抽穗期( $2.45\%$ )或灌浆期( $2.51\%$ )1次喷施处理差异不显著( $P > 0.05$ );而在分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施的增产效果达到了  $4.81\%$ ,与喷施2次处理



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 differences among treatments ( $P<0.05$ ). The same below.

图1 叶面喷施硅和硒肥对水稻产量的影响

Figure 1 Effect of spraying silicon and selenium on rice yield

差异不显著( $P>0.05$ )。叶面喷施硒肥产量在7.58~7.72 t·hm<sup>-2</sup>之间,较CK显著提升了3.21%~5.08% ( $P<0.05$ )。

## 2.2 叶面喷施硅和硒肥对水稻镉铅含量的影响

### 2.2.1 叶面喷施硅和硒肥对糙米镉含量的影响

由图2可知,叶面硅肥处理糙米镉含量在0.189~0.258 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了11.43%~35.12%,其中在抽穗期-灌浆期2次喷施(33.64%)的效果与仅在抽穗期(11.43%)或灌浆期(15.31%)1次喷施处理差异显著( $P<0.05$ ),分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施(35.12%)对糙米降镉效果与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。叶面硒肥处理下糙米镉含量在0.173~0.222 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了23.69%~40.61%,其中在抽穗期-灌浆期2次喷施(38.65%)的效果与仅在抽穗期(23.69%)或灌浆期(25.61%)1次喷施处理差异显著( $P<0.05$ ),分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施(40.61%)对糙米降镉效果与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。

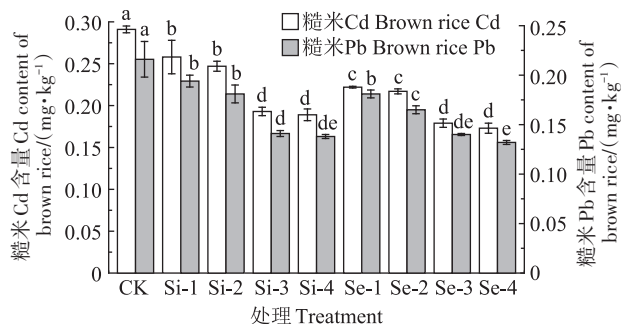


图2 叶面喷施硅和硒肥对糙米镉铅含量的影响

Figure 2 Effect of spraying silicon and selenium on cadmium and plumbum content in brown rice

著( $P>0.05$ )。喷施硅肥或硒肥2次及以上均能够将糙米中镉含量降低至《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的限量值以下。

叶面硅肥处理下糙米铅含量在0.138~0.194 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了10.45%~36.06%。其中在抽穗期-灌浆期2次喷施(34.67%)的效果与仅在抽穗期(10.45%)或灌浆期(16.46%)1次喷施处理具有显著差异( $P<0.05$ ),分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施(36.06%)对糙米降铅效果与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。叶面硒肥处理下糙米铅含量在0.132~0.181 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了16.32%~38.83%,其中在抽穗期-灌浆期2次喷施(35.28%)的效果与仅在抽穗期(16.32%)或灌浆期(23.86%)1次喷施处理具有显著差异( $P<0.05$ ),分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施(38.83%)对糙米降铅效果与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。1次喷施硅肥或硒肥即可将糙米中铅含量降低至《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的限量值以下。

### 2.2.2 叶面喷施硅和硒肥对水稻植株镉含量的影响

由表1可知,叶面硅肥处理下稻壳和秸秆镉含量分别在0.048~0.057 mg·kg<sup>-1</sup>和0.776~0.821 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK分别下降了17.39%~30.43%和7.55%~12.61%,稻壳和秸秆镉含量除仅在抽穗期喷施与CK相比差异不显著外( $P>0.05$ ),其余3个处理与CK间均存在显著差异( $P<0.05$ )。根镉含量在1.128~1.148 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了4.81%~6.47%,但差异不显著( $P>0.05$ )。

叶面硒肥处理下稻壳镉含量在0.056~0.066 mg·

表1 叶面喷施硅和硒肥对水稻植株镉含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)

Table 1 Effect of spraying silicon and selenium on Cd content in rice plant(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	稻壳Cd Shell Cd	秸秆Cd Straw Cd	根Cd Root Cd
CK	0.069±0.006a	0.888±0.019a	1.206±0.027a
Si-1	0.057±0.004abc	0.821±0.054ab	1.148±0.026a
Si-2	0.048±0.003c	0.816±0.038b	1.138±0.031a
Si-3	0.048±0.014c	0.782±0.029b	1.134±0.066a
Si-4	0.052±0.012bc	0.776±0.027b	1.128±0.033a
Se-1	0.062±0.007abc	0.826±0.075ab	1.145±0.042a
Se-2	0.056±0.007abc	0.819±0.076ab	1.153±0.015a
Se-3	0.066±0.004ab	0.716±0.017c	1.129±0.150a
Se-4	0.064±0.005abc	0.720±0.011c	1.153±0.036a

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.

kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了4.35%~19.84%,但与CK相比差异不显著( $P>0.05$ )。秸秆镉含量在0.716~0.826 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了6.95%~19.34%,在抽穗期-灌浆期2次喷施的效果(19.34%)要好于仅在抽穗期(6.95%)或灌浆期(7.74%)1次喷施,且具有显著差异( $P<0.05$ ),而在分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施与2次喷施处理之间差异不显著( $P>0.05$ )。根镉含量在1.129~1.153 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK下降了4.39%~6.38%,但差异不显著( $P<0.05$ )。

### 2.2.3 叶面喷施硅和硒肥对水稻植株铅含量的影响

由表2可知,叶面硅肥处理下稻壳、秸秆和根的铅含量分别在0.236~0.282、2.663~3.414 mg·kg<sup>-1</sup>和0.881~1.044 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK分别下降了12.42%~26.71%、3.31%~24.58%和31.22%~41.97%,除灌浆期喷施硅肥处理秸秆铅含量外,稻壳、秸秆和根铅含量与CK均具有显著差异( $P<0.05$ )。其中在抽穗期-灌浆期喷施2次对降低稻壳(29.29%)和秸秆(47.26%)铅含量

表2 叶面喷施硅和硒肥对水稻植株铅含量的影响(mg·kg<sup>-1</sup>)  
Table 2 Effect of spraying silicon and selenium on Pb content in rice plant(mg·kg<sup>-1</sup>)

处理 Treatment	稻壳 Pb Shell Pb	秸秆 Pb Straw Pb	根 Pb Root Pb
CK	0.322±0.016a	3.531±0.202a	1.518±0.081c
Si-1	0.272±0.027bc	3.177±0.065b	1.044±0.032d
Si-2	0.282±0.025bc	3.414±0.074a	0.954±0.072d
Si-3	0.262±0.004cd	2.798±0.095c	0.889±0.015d
Si-4	0.236±0.013d	2.663±0.101c	0.881±0.051d
Se-1	0.299±0.004ab	0.982±0.034d	2.538±0.180a
Se-2	0.301±0.007ab	0.913±0.040d	2.621±0.083a
Se-3	0.284±0.009bc	0.864±0.032d	2.534±0.103a
Se-4	0.254±0.014cd	0.844±0.057d	2.297±0.189b

的效果要好于仅在抽穗期(11.89%和24.85%)或灌浆期(23.07%和26.28%)1次喷施,且差异显著( $P<0.05$ ),但硅肥处理之间根铅含量差异不显著( $P<0.05$ )。

叶面硒肥处理下稻壳和秸秆铅含量分别在0.254~0.301 mg·kg<sup>-1</sup>和0.844~0.982 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK分别下降了7.14%~21.12%和72.19%~76.10%,分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施处理稻壳铅含量与抽穗期或灌浆期1次喷施处理具有显著差异( $P<0.05$ )。叶面硒肥处理下根铅含量在2.297~2.621 mg·kg<sup>-1</sup>之间,较CK提高了51.32%~72.66%,且差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 叶面喷施硅和硒肥对水稻镉铅富集和转运的影响

#### 2.3.1 叶面喷施硅和硒肥对水稻镉富集和转运的影响

由表3可知,叶面喷施硅和硒肥对水稻地上部富集镉能力具有显著差异( $P<0.05$ ),相较于CK,叶面喷施硅和硒肥处理水稻地上部镉富集能力降幅分别为10.86%~23.00%和14.86%~27.00%,在抽穗期-灌浆期喷施2次对降低镉的富集效果要好于仅在抽穗期或灌浆期1次喷施,且差异显著( $P<0.05$ )。相较于CK,硅肥处理水稻根-秸秆和秸秆-糙米镉的转运能力降幅分别在4.27%~25.61%和2.72%~6.39%之间,硒肥处理水稻根-秸秆和秸秆-糙米镉的转运能力降幅分别在17.38%~26.52%和2.04%~15.08%之间。在抽穗期-灌浆期喷施2次硅肥或硒肥对降低镉由地下部分向地上部分转运的效果要好于仅在抽穗期或灌浆期1次喷施,且差异显著( $P<0.05$ )。叶面喷施硅和硒肥相较于CK均有效抑制了根中的镉向糙米中转运,硒肥处理对降低水稻富集和转运镉的效果要好于硅肥处理。

#### 2.3.2 叶面喷施硅和硒肥对水稻铅富集和转运的影响

由表4可知,叶面喷施硅和硒肥对水稻地上部富

表3 叶面喷施硅和硒肥对水稻镉富集和转运的影响

Table 3 Effect of spraying silicon and selenium fertilizer on Cd accumulation and transport in rice

处理 Treatment	土壤 Cd Soil Cd	BCF	TF <sub>根-秸秆</sub> TF <sub>Root-Straw</sub>	TF <sub>秸秆-糙米</sub> TF <sub>Straw-Brown rice</sub>	TF <sub>根-糙米</sub> TF <sub>Root-Brown rice</sub>
CK	2.617±0.036a	0.700±0.019a	0.736±0.009a	0.328±0.003a	0.242±0.004a
Si-1	2.661±0.097a	0.624±0.046b	0.716±0.039a	0.314±0.011a	0.224±0.013ab
Si-2	2.632±0.044a	0.605±0.025b	0.718±0.028a	0.302±0.013a	0.217±0.002b
Si-3	2.613±0.044a	0.541±0.015cd	0.691±0.046a	0.248±0.011bc	0.171±0.005de
Si-4	2.609±0.086a	0.539±0.029cd	0.689±0.044a	0.244±0.011bc	0.168±0.011de
Se-1	2.648±0.097a	0.596±0.012b	0.721±0.039a	0.271±0.023b	0.194±0.006c
Se-2	2.664±0.114a	0.580±0.035bc	0.712±0.074a	0.266±0.024bc	0.188±0.005cd
Se-3	2.599±0.037a	0.521±0.008d	0.643±0.093a	0.250±0.012bc	0.160±0.017e
Se-4	2.624±0.041a	0.511±0.011d	0.625±0.010a	0.241±0.013c	0.151±0.010e

表4 叶面喷施硅和硒肥对水稻铅富集和转运的影响

Table 4 Effect of spraying silicon and selenium fertilizer on Pb accumulation and transport in rice

处理 Treatment	土壤 Pb Soil Pb	BCF	TF <sub>根-秸秆</sub> TF <sub>Root-Straw</sub>	TF <sub>秸秆-糙米</sub> TF <sub>Straw-Brown rice</sub>	TF <sub>根-糙米</sub> TF <sub>Root-Brown rice</sub>
CK	176.95±2.53a	0.023±0.001a	0.062±0.007c	2.333±0.242c	0.142±0.005c
Si-1	177.99±4.82a	0.020±0.001b	0.061±0.003c	3.044±0.116b	0.186±0.006a
Si-2	174.16±5.34a	0.022±0.001a	0.053±0.002c	3.591±0.233a	0.190±0.005a
Si-3	171.30±4.51a	0.019±0.000b	0.051±0.002c	3.146±0.088b	0.159±0.005b
Si-4	178.96±6.70a	0.017±0.001c	0.052±0.003c	3.028±0.213b	0.157±0.007b
Se-1	171.64±3.37a	0.009±0.001d	0.184±0.008a	0.388±0.015d	0.071±0.005d
Se-2	180.51±5.27a	0.008±0.001d	0.180±0.011a	0.349±0.026d	0.063±0.003de
Se-3	177.05±8.55a	0.007±0.001d	0.162±0.006b	0.341±0.017d	0.055±0.003e
Se-4	177.67±8.18a	0.007±0.000d	0.157±0.010b	0.369±0.034d	0.058±0.003e

集铅能力具有明显影响,相较于CK,叶面喷施硅和硒肥处理水稻地上部对铅富集能力降幅分别为4.35%~26.09%和60.87%~69.57%,在抽穗期-灌浆期喷施硅肥2次对降低铅的富集效果要好于仅在抽穗期或灌浆期1次喷施,但硒肥处理下喷施2次与1次差异不显著( $P>0.05$ )。相较于CK,硅肥处理水稻秸秆-糙米转运铅的能力降低了1.61%~16.13%,硒肥处理水稻根-秸秆和根-糙米转运铅的能力分别降低了83.37%~85.38%和50.00%~61.27%。硒肥处理对降低水稻富集和转运铅的效果要好于硅肥处理。

## 2.4 叶面喷施硅和硒肥对糙米硅和硒及氮磷钾含量的影响

### 2.4.1 叶面施硅和硒肥对糙米硅和硒含量的影响

由图3可知,叶面硅肥处理糙米中硅含量在2.227~2.550  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,较CK均显著提升( $P<0.05$ )。其中,在抽穗期-灌浆期2次喷施(35.64%)对糙米中硅含量的提升效果要好于在抽穗期(24.19%)或灌浆期(25.46%)1次喷施,分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。叶面硒

肥处理糙米中硒含量在0.145~0.176  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,均较CK显著提升( $P<0.05$ )。其中,在抽穗期-灌浆期2次喷施(59.36%)对糙米中硅含量的提升效果要好于在抽穗期(41.01%)和灌浆期(33.30%)1次喷施,分蘖期-抽穗期-灌浆期3次喷施与2次喷施处理差异不显著( $P>0.05$ )。

### 2.4.2 叶面施硅和硒肥对糙米氮磷钾含量的影响

由图4可知,叶面硅肥和硒肥处理水稻籽粒中氮含量分别在10.37~13.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间。在抽穗期-灌浆期喷施2次硅肥(37.73%)和硒肥(32.98%)对糙米中氮含量提升效果要好于仅在某生育时期1次喷施,且差异显著( $P<0.05$ )。糙米中磷和钾的含量分别在1.07~1.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和11.53~12.52  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,硅肥处理下较CK分别提高了2.11%~20.78%和6.30%~15.46%,硒肥处理下较CK分别提高了9.33%~17.17%和6.73%~11.22%。

## 2.5 叶面施硅和硒肥经济效益

本试验所涉及的叶面调控材料和水稻价格以及种子、化肥、机械、人工等成本价格结合市场调查得

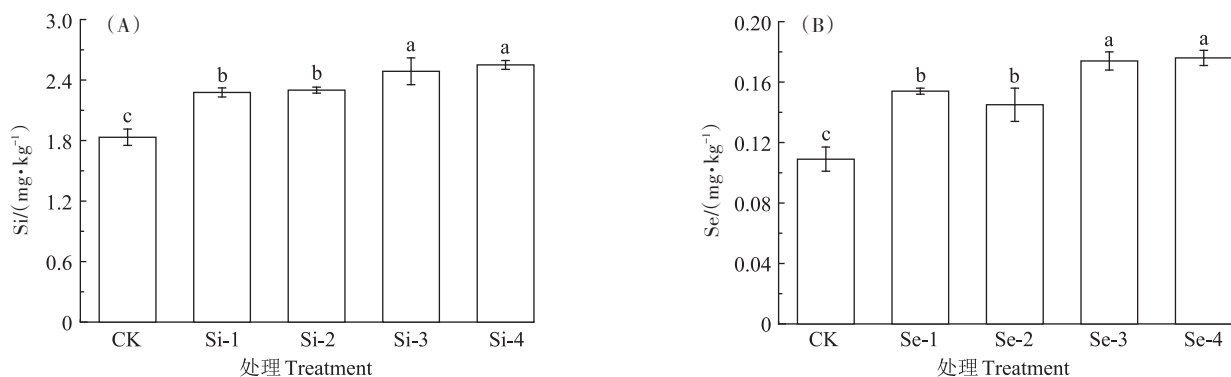


图3 叶面施硅和硒肥对糙米硅和硒含量的影响

Figure 3 Effect of foliar silicon and selenium application on silicon and selenium content of brown rice

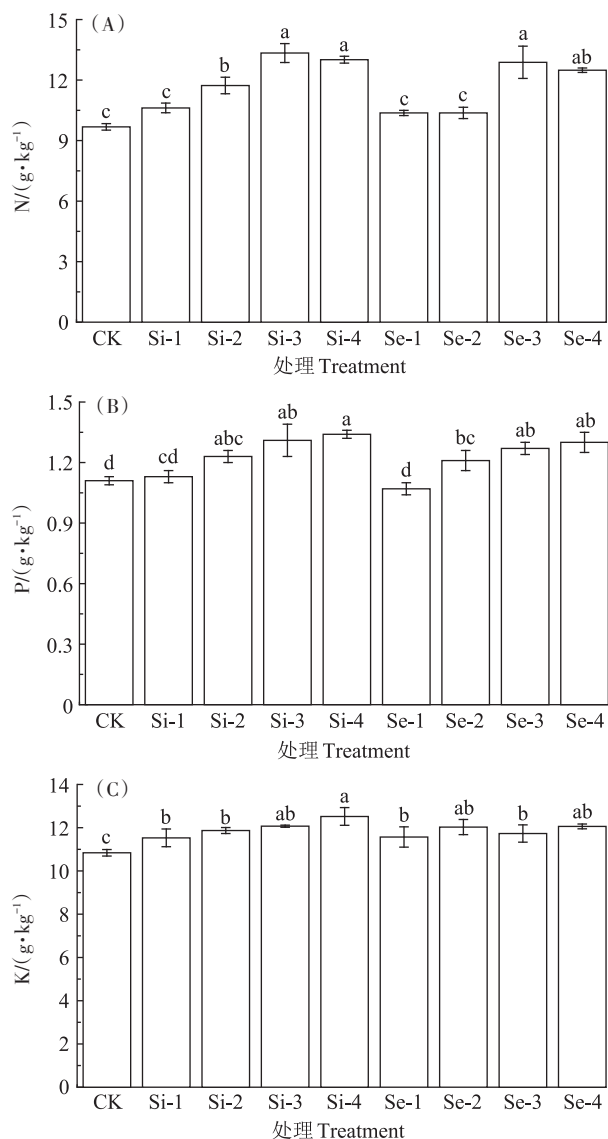


图4 叶面施硅和硒肥对糙米氮磷钾含量的影响

Figure 4 Effect of foliar silicon and selenium application on N, P and K content of brown rice

出。由图1可知,仅在抽穗期或灌浆期喷施1次叶面硅或硒肥无法将糙米中重金属含量降低至标准限量值以下,因此,水稻单价按市场价格60%折算,在其他管理水平一致的基础上,经济效益对比如表5所示。投入产出比较高的处理是Si-3、Si-4和Se-3,分别为1:1.80、1:1.78和1:1.72,叶面喷施硅肥的投入产出比显著高于喷施硒肥,而2次与3次喷施硅肥处理则差异不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 叶面喷施硅和硒肥对水稻镉铅积累和转运的影响

硅通过参与水稻体内的生理代谢活动进而抑制

水稻植株对镉的吸收及转运<sup>[18]</sup>。有研究表明,硅在水稻的生长周期中发挥重要的作用,水稻吸收硅后可以抑制镉向水稻可食用部位迁移,从而缓解重金属镉对水稻的毒害,降低镉向人体输入的风险<sup>[19-20]</sup>。研究表明,剑叶是稻穗光合碳水化合物的主要来源,同时也是整个水稻体内矿物质再运输的来源之一,在剑叶长出前喷施叶面硅肥,水稻能够将镉较多地富集或滞留于茎部和叶部,有效抑制镉向水稻可食用部位迁移<sup>[21-23]</sup>。徐奕等<sup>[24]</sup>研究发现,叶面喷施硅肥可以使水稻糙米、颖壳和秸秆镉含量分别降低34.9%、30.1%和34.0%。黄崇玲等<sup>[25]</sup>的研究表明,喷施0.2%硅胶溶液可以使稻米中镉含量下降60.55%。本研究中,在水稻抽穗期-灌浆期喷施2次叶面硅肥,使水稻糙米中镉含量较CK下降了11.43%~35.12%,铅含量较CK下降了10.45%~36.06%,与前人研究结果相符。硅在运输过程中,会在质外体通道内大量积累,与镉铅等重金属形成沉淀,限制其在质外体的运输,降低水稻质外体运输路径的通透性,并被分隔在液泡中或被吸附固定在节间,降低镉铅等重金属在水稻体内的转运,减少籽粒对镉的吸收<sup>[26-27]</sup>。王世华等<sup>[11]</sup>研究发现,在重金属复合污染条件下,叶面施用纳米硅肥后水稻籽粒对镉铅的吸收量显著降低。本研究中,水稻秸秆-糙米镉的转运能力降幅在2.04%~15.08%之间,有效抑制了镉铅向水稻糙米中转移。

硒可以与多种重金属产生拮抗作用,使重金属在细胞点位上发生移动或者改变细胞膜对重金属的通透性来影响重金属在植物体内的运转<sup>[27]</sup>。硒和镉铅都能与蛋白质中半胱氨酸的巯基结合,外源硒供应水平可使水稻体内谷胱甘肽过氧化物酶底物中的谷胱甘肽含量增加,从而减少水稻对镉铅的吸收<sup>[28-29]</sup>。罗盼军等<sup>[30]</sup>研究发现,生物炭与叶面硒肥联合施用可以降低生菜镉含量。Hu等<sup>[31]</sup>研究发现,硒可以减少重金属在植物体内的积累,随着硒浓度的增加,水稻植株各器官和稻米中镉含量显著下降。还有研究表明,硒能减轻镉对水稻生长的抑制作用,降低水稻籽粒镉含量<sup>[32]</sup>。本研究中,不同时期喷施叶面硒肥水稻糙米镉含量较CK下降了23.69%~40.61%,铅含量较CK下降了16.32%~38.83%。Wan等<sup>[33]</sup>研究发现,亚硒酸能降低镉在水稻内的转运系数。刘永贤等<sup>[34]</sup>研究发现在水稻孕穗期和抽穗期前3d各喷施一次硒可使水稻籽粒镉含量降低83.33%。本研究中,叶面喷施硒肥处理降低了水稻根-糙米和秸秆-糙米镉铅的转运能力,有效抑制了根中的镉向糙米中转运。



表5 叶面施硅和硒肥经济效益分析

Table 5 Analysis of economic benefits of silicon and selenium foliar fertilization

处理 Treatment	投入/(元·hm <sup>-2</sup> ) Input/(yuan·hm <sup>-2</sup> )			总投入/(元·hm <sup>-2</sup> ) Total input/(yuan·hm <sup>-2</sup> )	总产出/(元·hm <sup>-2</sup> ) Total output/(yuan·hm <sup>-2</sup> )	投入产出比 Input-output ratio
	叶面材料 Blade material	肥料 Fertilizer	其他 Other			
CK	0	1 215	9 500	10 715	11 842±61b	1:1.10
Si-1	117	1 215	9 500	10 892	11 739±69b	1:1.08
Si-2	117	1 215	9 500	10 892	11 747±62b	1:1.08
Si-3	354	1 215	9 500	11 069	19 955±263a	1:1.80
Si-4	531	1 215	9 500	11 246	20 016±245a	1:1.78
Se-1	480	1 215	9 500	11 195	11 827±157b	1:1.06
Se-2	480	1 215	9 500	11 195	11 826±172b	1:1.06
Se-3	960	1 215	9 500	11 675	20 052±44a	1:1.72
Se-4	1 440	1 215	9 500	12 155	20 067±47a	1:1.65

注:水稻单价2.6元·kg<sup>-1</sup>,若存在重金属超标,则水稻单价按照60%计算;其他投入包括种子、农药、机械、人工等。

Note: The unit price of rice is 2.6 yuan·kg<sup>-1</sup>. If heavy metals exceed the standard, the unit price of rice is calculated as 60%. Other inputs include seeds, pesticides, machinery, labor, etc.

### 3.2 叶面喷施硅和硒肥对水稻糙米硅硒富集的影响

水稻在不同生育时期对硅的吸收能力具有差异。研究表明,水稻在分蘖-抽穗期对硅的吸收能力最强,该阶段吸收硅量约占生育期总吸硅量的65.3%~66.5%,在移栽-分蘖期对硅的吸收能力最弱,吸收硅量约为9.1%~9.6%<sup>[35]</sup>。当硅酸被转运到木质部后,在蒸腾作用下很快被转运到地上部各个组织器官中积累<sup>[36]</sup>。不同水稻生育时期硅的分配利用状况也不同。研究表明,在水稻孕穗期后,硅元素开始向穗运输进而向籽粒中转移,整个水稻生育期,硅的分配与利用经历了由叶鞘到叶片,再由叶片到穗的分配和转运过程<sup>[37]</sup>。本研究中,在抽穗期和灌浆期2次喷施硅肥使糙米中硅含量较CK提升了35.64%。适量的硒可以促进植物生长,改善营养品质。相关研究表明,叶面喷施硒肥有利于促进硒向大豆、小麦等作物籽粒中迁移富集<sup>[38-39]</sup>。王玉荣等<sup>[40]</sup>在研究油菜硒富集特征时发现,外源硒施用浓度为0.5 mg·kg<sup>-1</sup>时,硒主要积累在根、茎等营养器官中;施硒浓度增加至5 mg·kg<sup>-1</sup>时,各器官硒含量表现为角果壳>籽粒>茎>根,籽粒与角果壳的硒含量占植株总硒含量的59.22%。陈金等<sup>[41]</sup>研究发现硒供应充分时硒易向大豆籽粒中富集。刘永贤等<sup>[34]</sup>研究发现,在孕穗期和抽穗期喷施含硒叶面肥可使糙米硒含量达到0.21~0.56 mg·kg<sup>-1</sup>,为对照的2.1~7.0倍。本试验中,喷施叶面硒肥的时期(抽穗期和灌浆期)正是硒在籽粒中累积的高峰期,稻米中硒含量较CK增加了33.30%~61.47%,实现了稻米富硒化和硒肥资源的高效利用。但也有研究表明,虽然硒对动植物的生长发育有益,但硒浓度过高不仅对植物

有毒害作用,而且存在严重的食品安全隐患<sup>[42-43]</sup>。刘慧等<sup>[44]</sup>研究发现,当食品中硒含量>2 mg·kg<sup>-1</sup>时会有中毒风险。作物籽粒硒含量与施硒量密切相关,过度追求高富硒值而增加施硒量,易造成籽粒硒含量超过安全值,甚至带来食品安全风险。

### 3.3 叶面喷施硅和硒肥对促进作物生长及产量的影响

硅和硒是对水稻生长有益的金属元素,能提高水稻的抗逆性,促进水稻生长与新陈代谢顺利进行,提高水稻抵御各种逆境胁迫的能力,提高水稻产量<sup>[45]</sup>。水稻叶面适量施用硅、硒元素能提高水稻植株的抗氧化能力,从而提高水稻抵御恶劣环境的能力促进水稻植株生长,增加水稻产量<sup>[46-47]</sup>。研究表明,叶面喷施水溶性硅肥可提高水稻产量2.80%~7.88%<sup>[48]</sup>。本试验中,不同时期喷施叶面硅肥使水稻产量提高了2.45%~4.81%,与前人研究结果相符。硅可促进根系生长与发育,提高叶片叶绿素含量,进而增强水稻光合作用,同时硅可改变镉在叶片中的亚细胞分布,刺激抗氧化酶基因的表达,缓解镉产生的氧化胁迫<sup>[49]</sup>。因此,硅在提高水稻产量的同时,还可提升稻米的养分含量,增加稻穗中的氮元素,促进植物对磷的吸收,并增强对病虫害的抵御能力。本研究中,叶面喷施硅肥可以使糙米中氮、磷、钾含量均得到了显著的提升,分别较CK增加了9.71%~31.73%、2.11%~20.78%和6.30%~15.46%,与前人研究结果一致。水稻对硒的吸收是一个非恒定的主动吸收过程,在水稻生长的幼苗阶段,硒主要累积在根系、顶叶和嫩叶中;随着水稻的生长发育,硒开始在各器官中累积,对硒的富集高峰期在拔节期至灌浆期。朱文东<sup>[50]</sup>在水稻分蘖期和

齐穗期各喷施1次富硒营养液,与对照相比,水稻增产达18.77%。本研究中,叶面喷施硒肥使水稻产量较CK增加了3.21%~5.08%,同时也使糙米中氮磷钾含量得到提升。

#### 4 结论

(1)喷施叶面硅和硒肥能够使水稻增产。在抽穗期和灌浆期2次喷施硅肥较对照增产4.49%,显著高于抽穗期或灌浆期单次喷施;叶面喷施硒肥能够使水稻增产3.21%~5.08%。

(2)喷施叶面硅和硒肥能够降低糙米中镉铅含量。总体呈现出喷施的次数越多糙米镉铅含量越低的趋势,喷施2次及以上能够将糙米中镉铅含量降低至《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2022)中规定的限量值以下。

(3)叶面喷施硅和硒肥能够降低水稻植株对镉铅的富集能力,降幅分别为10.86%~27.00%和4.35%~69.57%,叶面喷施硅和硒肥通过降低秸秆-糙米镉铅转运系数进而降低糙米中镉铅含量。

(4)叶面喷施硅和硒肥能够提高糙米中硅和硒含量,喷施次数越多提升幅度越显著,喷施2次及以上能够更加显著提高糙米中氮磷钾含量。

综上,叶面喷施 $1.5\text{ L}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的硅或硒肥能够使水稻增产,在降低糙米中镉铅含量的同时,增加其硅或硒以及氮磷钾含量,在抽穗期和灌浆期2次喷施具有更强的可操作性和经济性。

#### 参考文献:

- [1] CAO X Y, FU M Y, BI R C, et al. Cadmium induced BEAS-2B cells apoptosis and mitochondria damage via MAPK signaling pathway[J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128346.
- [2] 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 & Experimental Botany*, 2016, 122: 141-149.
- [3] DUAN G L, SHAO G S, TANG Z, et al. Genotypic and environmental variations in grain cadmium and arsenic concentrations among a panel of high yielding rice cultivars[J]. *Rice*, 2017, 10(1): 9.
- [4] 赵娜娜, 彭鸥, 刘玉玲, 等. 不同形态硫叶面喷施对水稻镉积累影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(7): 1387-1401. ZHAO N N, PENG O, LIU Y L, et al. Effect of foliar spraying different forms of sulfur on cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(7): 1387-1401.
- [5] WU H, CUI L, ZENG G, et al. The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review[J]. *Critical Reviews in Biotechnology*, 2017, 37(6): 754-

- 764.
- [6] 张燕, 王宏航, 黄奇娜, 等. 施肥调控水稻镉污染的研究与应用进展[J]. *中国稻米*, 2022, 28(4): 6-11, 18. ZHANG Y, WANG H H, HUANG Q N, et al. Advances in research and application of fertilization related to cadmium contamination in rice[J]. *China Rice*, 2022, 28(4): 6-11, 18.
- [7] CHEN R, ZHANG C B, ZHAO Y L, et al. Foliar application with nano-silicon reduced cadmium accumulation in grains by inhibiting cadmium translocation in rice plants[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(3): 2361-2368.
- [8] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 调理剂及农艺措施对污染稻田中水稻吸收镉的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(3): 574-584. PENG O, LIU Y L, TIE B Q, et al. Effects of conditioning agents and agronomic measures on cadmium uptake by rice in polluted rice fields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(3): 574-584.
- [9] 黄崇玲, 雷静, 顾明华, 等. 土施和喷施硅肥对镉污染农田水稻不同部位镉含量及富集的影响[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(4): 1532-1535. HUANG C L, LEI J, GU M H, et al. Effects of soil and foliar applications of silicon fertilizer on Cd content and its bioconcentration factors in different parts of rice growing in cadmium contaminated soil [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(4): 1532-1535.
- [10] WANG S H, WANG F Y, GAO S C, et al. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(4): 2837-2845.
- [11] 王世华, 罗群胜, 刘传平, 等. 叶面施硅对水稻籽实重金属积累的抑制效应[J]. *生态环境*, 2007(3): 875-878. WANG S H, LUO Q S, LIU C P, et al. Effects of leaf application of nanometer silicon to the accumulation of heavy metals in rice grains[J]. *Ecology and Environment*, 2007(3): 875-878.
- [12] CHANEY R L, REEVES P G, RYAN J A, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *Biometals*, 2004, 17(5): 549-553.
- [13] CHU J Z, YAO X Q, ZHANG Z N. Responses of wheat seedlings to exogenous selenium supply under cold stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2010, 136(3): 355-363.
- [14] 吴拓铮, 詹娟, 周嘉文, 等. 不同调理剂对农田镉污染稳定效果及水稻吸收的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 572-578. WU T Z, ZHAN J, ZHOU J W, et al. Effects of different passivators on immobilizing cadmium in soil and reducing cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.) in contaminated paddy soil[J]. *Soils*, 2022, 54(3): 572-578.
- [15] 范健, 任静华, 廖启林, 等. 苏南典型区农田土壤硒-镉拮抗作用研究[J]. *土壤*, 2021, 53(5): 1023-1032. FAN J, REN J H, LIAO Q L, et al. Antagonism between Se and Cd in typical farmland soil in southern Jiangsu Province[J]. *Soils*, 2021, 53(5): 1023-1032.
- [16] 杨静, 王瑞昕, 方正, 等. 叶面喷施硅和硒对水稻砷积累及光合参数的影响[J]. *土壤*, 2022, 54(3): 547-555. YANG J, WANG R X, FANG Z, et al. Effect of foliage spraying Si and Se on As accumulation and photosynthetic parameters of rice[J]. *Soils*, 2022, 54(3): 547-555.

- [17] 管恩相, 谭旭生, 刘洪, 等. 叶面施硒对稻米中镉等重金属含量影响的研究初报[J]. 种子科技, 2013, 31(5): 60-61, 63. GUAN E X, TAN X S, LIU H, et al. A preliminary study on the effects of foliar selenium application on the contents of heavy metals such as cadmium in rice[J]. *Seed Science & Technology*, 2013, 31(5): 60-61, 63.
- [18] 刘春成, 李中阳, 胡超, 等. 逆境条件下硅肥调控效应研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(4): 337-346. LIU C C, LI Z Y, HU C, et al. Advances in the regulation effects of silicon fertilizer under adversity stress[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(4): 337-346.
- [19] 彭华, 邓凯, 石宇, 等. 连续施硅对双季稻镉硅累积效应的影响[J]. 环境科学, 2022, 43(8): 4271-4281. PENG H, DENG K, SHI Y, et al. Impacts of uptake and accumulation of Cd on double rice-paddy soil by silicon fertilizer continuous application[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(8): 4271-4281.
- [20] 吕本春, 付利波, 湛方栋, 等. 绿肥作物矿化分解对土壤镉有效性的影响研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 431-441. LÜ B C, FU L B, ZHAN F D, et al. Research advance on the effect of mineralization and decomposition of green manure crops on soil cadmium availability[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(3): 431-441.
- [21] GRUSAK M A. Whole-root iron (III)-reductase activity throughout the life cycle of iron-grown *Pisum sativum* L. (Fabaceae): relevance to the iron nutrition of developing seeds[J]. *Planta*, 1995, 197(1): 111-117.
- [22] 刘永贤, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1588-1592. LIU Y X, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of selenium or silicon foliar fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(7): 1588-1592.
- [23] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2762-2770. CHEN Z, TIE B Q, LEI M, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2762-2770.
- [24] 徐奕, 李剑睿, 黄青青, 等. 坡缕石钝化与喷施叶面硅肥联合对水稻吸收累积镉效应影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(9): 1633-1641. XU Y, LI J R, HUANG Q Q, et al. Effect of palygorskite immobilization combined with foliar silicon fertilizer application on Cd accumulation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(9): 1633-1641.
- [25] 黄崇玲, 雷静, 顾明华, 等. 土施和喷施硅肥对镉污染农田水稻不同部位镉含量及富集的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(4): 1532-1535. HUANG C L, LEI J, GU M H, et al. Effects of soil and foliar applications of silicon fertilizer on Cd content and its bioconcentration factors in different parts of rice growing in cadmium contaminated soil[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(4): 1532-1535.
- [26] 魏晓, 张鹏博, 赵丹丹, 等. 水稻土施硅对土壤-水稻系统中镉的降低效果[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1600-1606. WEI X, ZHANG P B, ZHAO D D, et al. Cadmium status in paddy soil in a rice system under silicon fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(5): 1600-1606.
- [27] 朱臻, 杨相东, 徐章倩, 等. 农作物叶片对大气沉降重金属的吸收转运和积累机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 332-345. ZHU Z, YANG X D, XU Z Q, et al. Foliar uptake, translocation and accumulation of heavy metals from atmospheric deposition in crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 332-345.
- [28] 付天岭, 秦冉, 龚思同, 等. 喷施叶面阻隔剂对马铃薯Cd、Cu、Ni、Zn富集转运的影响[J]. 安全与环境学报, 2022, 22(4): 2217-2230. FU T L, QIN R, GONG S T, et al. Effect of foliar barrier agent on the enrichment and transport of Cd, Cu, Ni, Zn in potatoes[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2022, 22(4): 2217-2230.
- [29] 朱燕云, 吴文良, 赵桂慎, 等. 硒在动植物及微生物体中的转化规律研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 189-198. ZHU Y Y, WU W L, ZHAO G S, et al. Progress of selenium biological transformation in animals, plants, and microorganisms[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 189-198.
- [30] 罗盼军, 马倩倩, 武均, 等. 生物炭与叶面硒肥联合施用对生菜吸收镉及土壤镉形态的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(4): 956-964. LUO P J, MA Q Q, WU J, et al. Effects of combined application of biochar and foliar selenium spray on Cd uptake by lettuce and Cd forms in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(4): 956-964.
- [31] HU Y, DUAN G L, HUANG Y Z, et al. Interactive effects of different inorganic As and Se species on their uptake and translocation by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(5): 3955-3962.
- [32] 徐境懋, 顾明华, 韦燕燕, 等. 纳米硒和亚硒酸盐对镉污染土壤中水稻镉积累的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(10): 2727-2734. XU J M, GU M H, WEI Y Y, et al. Effects of nano-selenium and sodium selenite application on cadmium accumulation in rice planting in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2021, 52(10): 2727-2734.
- [33] WAN Y, YAO Y, QI W, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: influence of different forms of selenium[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 133: 127-134.
- [34] 刘永贤, 潘丽萍, 黄雁飞, 等. 外源喷施硒与硅对水稻籽粒镉累积的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(7): 1588-1592. LIU Y X, PAN L P, HUANG Y F, et al. Effects of selenium or silicon foliar fertilizer on cadmium accumulation in rice[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(7): 1588-1592.
- [35] 朱小平, 王义炳, 李家全. 水稻硅素营养特性的研究[J]. 土壤通报, 1995, 26(5): 232-233. ZHU X P, WANG Y B, LI J Q. Study on silicon nutritional characteristics of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1995, 26(5): 232-233.
- [36] MITANI N, MA J F, IASHITA T. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2005, 46(2): 279-283.
- [37] 张万洋, 李小坤. 水稻硅营养及硅肥高效施用技术研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2020(4): 231-239. ZHANG W Y, LI X K. Research progress on silicon nutrition and efficient application of silicon fertilizer in rice[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(4): 231-239.
- [38] NGIGI P B, LACHAT C, MASINDE P W, et al. Agronomic biofortifi-

- cation of maize and beans in Kenya through selenium fertilization[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2019, 41(6):2577-2591.
- [39] 晋永芬, 高炳德. 叶面硒肥对春小麦的富硒效应及硒素吸收分配的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2018(2):113-117. JIN Y F, GAO B D. Effect of selenium fertilizer on Se-enrich reaction and Se absorption and distribution of spring wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2018(2):113-117.
- [40] 王玉荣, 贾玮, 胡承孝, 等. 油菜硒的富集特征及其与土壤硒的关系[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(1):336-342. WANG Y R, JIA W, HU C X, et al. Characteristics of selenium accumulation in rape and the relationships between concentration of selenium in plant and in soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(1):336-342.
- [41] 陈金, 潘根兴, 李正文, 等. 不同硒水平下两种大豆对土壤中硒吸收积累的生育期动态[J]. *大豆科学*, 2003, 22(4):278-282. CHEN J, PAN G X, LI Z W, et al. Dynamics of Se uptake and accumulation in growth period by two soybean cultivars under different Se-levels of soil[J]. *Soybean Science*, 2003, 22(4):278-282.
- [42] ELKELISH A A, SOLIMAN M H, ALHAITHLOUL H A, et al. Selenium protects wheat seedlings against salt stress-mediated oxidative damage by up-regulating antioxidants and osmolytes metabolism[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 137:144-153.
- [43] 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]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35(12):2841-2849.
- [44] 刘慧, 杨月娥, 王朝辉, 等. 中国不同麦区小麦籽粒硒的含量及调控[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(9):1715-1728. LIU H, YANG Y E, WANG Z H, et al. Selenium content of wheat grain and its regulation in different wheat production regions of China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(9):1715-1728.
- [45] 李亚辉, 高庆超, 潘超, 等. 矿质元素对稻米品质影响研究进展[J]. *中国稻米*, 2022, 28(2):24-31. LI Y H, GAO Q C, PAN C, et al. Research progress on the effects of mineral elements on quality of rice [J]. *China Rice*, 2022, 28(2):24-31.
- [46] 张久明, 匡恩俊, 宿庆瑞, 等. 外源施硒对土壤酶活性、大豆籽粒硒及氨基酸含量的影响[J]. *长江大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(5):106-113. ZHANG J M, KUANG E J, SU Q R, et al. Effects of exogenous selenium application on soil enzyme activities, selenium and amino acid content of soybean seeds[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2022, 19(5):106-113.
- [47] 杜海萌, 韦还和, 余清源, 等. 水稻叶面肥研究的应用进展与展望[J]. *作物杂志*, 2022(3):33-38. DU H M, WEI H H, YU Q Y, et al. Application progress and prospect of rice foliar fertilizer[J]. *Crops*, 2022(3):33-38.
- [48] 茆卫华, 陈慧, 喷施叶面硅肥对水稻产量的影响初探[J]. *安徽农学通报*, 2009, 15(10):89-90. MAO W H, CHEN H. Effect of spraying silicon fertilizer on rice yield[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2009, 15(10):89-90.
- [49] 周其耀, 倪元君, 徐顺安, 等. 叶面调理剂对浙江东部镉污染农田水稻主栽品种安全生产的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2021, 47(6):768-776. ZHOU Q Y, NI Y J, XU S A, et al. Effects of foliar conditioners on safety production of main rice varieties in cadmium contaminated farmland in eastern Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang University(Agricultural and Life Science)*, 2021, 47(6):768-776.
- [50] 朱文东. 叶面喷施有机硒肥对稻米硒含量及品质的影响[J]. *湖北农业科学*, 2013, 52(8):1764-1767. ZHU W D. Application of selenium on foliar surface of rice could enhance the percentage of selenium and improve quality of rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2013, 52(8):1764-1767.