

林小兵,张秋梅,周利军,等. 南方红壤区喷施叶面硅肥对水稻 Cd 累积的影响[J]. 土壤与作物,2022,11(4):428 – 436.
LIN X B,ZHANG Q M,ZHOU L J,et al. Effects of foliar silicon fertilizer on rice cadmium accumulation in red soil region of Southern China[J]. Soils and Crops,2022,11(4):428 – 436.

南方红壤区喷施叶面硅肥对水稻 Cd 累积的影响

林小兵¹, 张秋梅², 周利军¹, 张小生², 刘进法³, 陈锋², 陈绪龙⁴, 王乐⁵

(1. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 江西 南昌 331717;
2. 新余市农业科学研究中心, 江西 新余 338000; 3. 新余市现代农业科技园管理委员会, 江西 新余 338000;
4. 厦门玛塔生态股份有限公司, 福建 厦门 361000; 5. 新余市渝水区农业科学研究中心, 江西 新余 338000)

摘 要: 为研究叶面硅肥对水稻糙米的降镉 (Cd) 效果, 在新余市典型 Cd 污染农田开展田间试验, 于水稻拔节期、扬花期喷施两种叶面硅肥作为处理 (编号为 F1 和 F2), 以喷施清水作为对照 (CK), 探讨叶面硅肥对水稻各部位 Cd 迁移、转化和籽粒产量的影响。结果表明: 与 CK 相比, F1 和 F2 处理水稻产量增加了 4.70% ~ 6.26%; 而糙米中 Cd 含量显著降低了 33.3% ~ 56.0% ($P < 0.05$)。水稻叶片和谷壳中硅 (Si) 显著增加了 25.2% ~ 134% ($P < 0.05$)。喷施叶面硅肥处理的茎秆和谷壳中拮抗系数均显著高于 CK ($P < 0.05$), 相关性表明糙米中 Cd 含量与谷壳中 Cd 含量呈显著正相关关系, 而与谷壳和茎秆中 Si 含量呈显著负相关关系。异地验证试验表明, 在低 Cd 污染区 ($0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 喷施叶面硅肥可以有效降低糙米中 Cd 含量, 使其控制在糙米标准值 ($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 以下。

关键词: 镉污染; 水稻; 叶面硅肥; 产量; 拮抗系数

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 2095 – 2961 (2022) 04 – 428 – 09

Effects of foliar silicon fertilizer on rice cadmium accumulation in red soil region of Southern China

LIN Xiaobing¹, ZHANG Qiumei², ZHOU Lijun¹, ZHANG Xiaosheng², LIU Jinfa³, CHEN Feng², CHEN Xulong⁴, WANG Le⁵
(1. Jiangxi Institute of Red Soil, National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 331717, China; 2. Agricultural Science Research Center of Xinyu, Xinyu 338000, China; 3. Xinyu Management Committee of Modern Agricultural Science and Technology Park, Xinyu 338000, China; 4. Amoy Mata Ecological Company Limited by Shares, Xiamen 361000, China; 5. Agricultural Science Research Center of Yushui District, Xinyu 338000, China)

Abstract: In order to understand the effects of foliar silicon fertilizer on cadmium (Cd) reduction in brown rice as well as on Cd migration, transformation in different parts of rice and grain yield, a field experiment was carried out in a typical Cd – contaminated farmland in Xinyu City, including three treatments, two kinds of foliar silicon fertilizer (F1 and F2) and water as a control (CK), sprayed at jointing and blooming stages. The results showed that compared with CK, the rice yields of F1 and F2 treatments increased by 4.70% ~ 6.26%, the Cd in brown rice significantly decreased by 33.3% ~ 56.0% ($P < 0.05$). Silicon (Si) in leaves and husks increased by 25.2% ~ 134% ($P < 0.05$) at harvest. The antagonistic coefficient in stem and husk of foliar silicon fertilizer treatment was significantly higher than that of CK ($P < 0.05$). The Cd content in brown rice was positively correlated with the Cd contents in husk, but negatively correlated with the Si content in husk and stem. The off – site verification test showed that foliar silicon fertilizer effectively reduced the Cd in brown rice in low Cd polluted areas ($0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), which was below the standard value ($0.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$).

Key words: cadmium pollution; rice; foliar silicon fertilizer; yield; antagonism coefficient

收稿日期: 2022 – 05 – 01; 修回日期: 2022 – 06 – 13.
基金项目: 江西省重点研发计划项目 (20212BBG73027); 江西省重大科技研发专项项目 (20194ABC28010).
第一作者简介: 林小兵 (1992 –), 男, 助理研究员, 主要从事土壤资源与环境生态研究. E – mail: linxiaobing14@mails.ucas.ac.cn.
通信作者: 王乐 (1982 –), 男, 工程师, 主要从事农业农村科技教育与环保能源研究. E – mail: ysqnyj@163.com.

0 引 言

随着工业化、城市化和集约化农业的快速发展，不断增加的工业“三废”、农药及化肥、污水灌溉、生活垃圾等导致土壤重金属污染问题日益突出^[1]。2014 年全国土壤污染状况调查公报显示，耕地土壤重金属镉（Cd）点位超标率最为严重，高达 7.0%^[2]。水稻（*Oryza sativa* L.）作为我国最主要的粮食作物，对重金属 Cd 具有很强的吸收富集能力，并通过食物链对人体身体健康产生不利影响^[3-4]。如何有效降低稻米中重金属 Cd 含量，对确保粮食安全极为重要，也是当前急需解决的热点问题。

我国 Cd 污染农田安全利用措施主要包括农艺调控、石灰调酸、土壤钝化及叶面阻控技术等^[5-6]。在不同的修复技术中，叶面阻控具有成本低、品种多、施用期长、操作简单等特点^[7]。研究表明：施用叶面肥不仅可以增加水稻产量和提高水稻品质，还可以有效降低水稻对重金属的积累^[8-9]。目前，我国大面积施用的叶面阻控剂以硅（Si）类为主^[5]。水稻是典型的喜硅类作物，施用硅肥可以阻隔水稻根茎叶重金属向糙米中转运^[10]，施用叶面硅肥可使水稻籽粒重金属 Cd 含量降低 28% ~ 50%^[11]，主要原因是硅作为水稻生长的必需元素，可增强细胞壁的机械性能，改变 Cd 的化学形态和亚细胞分布，进而减少 Cd 向地上部的转移^[12-13]。硅肥对糙米降 Cd 效果还受施用时期和土壤污染程度的影响。张世浩^[14]试验发现拔节期施硅水稻精米中 Cd 含量最小；唐熙雯等^[15]研究表明轻度污染喷施叶面硅肥糙米中 Cd 含量低于标准值。

新余市是典型的工业城市，因工业发展过程中导致的环境污染，引起部分耕地出现稻谷 Cd 超标现象，为保障粮食安全，急需对受污染耕地进行修复治理和安全利用。基于此，本研究在新余市酸性中度 Cd 污染农田，选取 2 种叶面硅肥研究其对水稻各部位（根系、茎秆、叶片、谷壳、糙米）中 Cd、Si 含量及产量的影响，以期明确：（1）施用叶面硅肥对水稻糙米的降 Cd 效果；（2）叶面硅肥在水稻植株重金属 Cd 吸收、转运和积累过程；同时，通过异地验证叶面硅肥对糙米降 Cd 效果的稳定性，为 Cd 污染稻田安全利用提供技术支撑和理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究地概况

试验区位于江西省新余市渝水区珠珊镇州下村（27°47'13"N，114°59'21"E），属亚热带湿润季风气候，年均气温 17.7℃，年均降雨量 1 595 mm。试验区为红壤性水稻土，质地为粉壤，试验前 0 ~ 20 cm 土层土壤有机质含量 24.95 g·kg⁻¹，pH 值 5.36，土壤全 Cd 含量 0.85 mg·kg⁻¹，属于中度污染。

1.2 试验设计

本试验共设计 3 个处理，CK（清水对照），F1（叶面硅肥 1），F2（叶面硅肥 2），随机区组排列，3 次重复。试验小区面积为 30 m²，小区之间以田埂隔开，田埂上覆薄膜，各小区采用单排单灌，严控串灌，其它管理与大田生产管理一致。

叶面硅肥 1 购自广东佛山，水剂，主要成分为 Si ≥ 85 g·L⁻¹、pH 5.0 ~ 7.0、Na ≤ 10 g·L⁻¹、水不溶物 ≤ 10 g·L⁻¹；叶面硅肥 2 购自湖北武汉，粉剂，其主要含量为 Si ≥ 20%、K₂O ≥ 15.0%、水不溶物 ≤ 3%、Na ≤ 3.0%。大田试验于 2020 年 7 月 30 日种植水稻幼苗，种植方式为直播。在 9 月 15 日（水稻拔节期）喷洒第一次叶面硅肥，于 9 月 20 日取第一次植株样品；在 10 月 7 日（水稻扬花期）喷洒第二次叶面硅肥，于 10 月 12 日取第二次植株样品，于 11 月 12 日（收获期）进行取样和测产。晚稻品种为清香丝苗（新余市农业科学研究所选育水稻品种）。叶面硅肥 1 和叶面硅肥 2 分别兑水稀释 500 倍进行叶面喷施，于水稻拔节期和扬花期喷施，施用量为每次 1 500 ml·hm⁻²（参考产品提供的用量）。

为进一步验证叶面硅肥对水稻糙米的降 Cd 效果，分别于 2020 年在新余市渝水区珠珊镇洲下村（中

稻, 土壤全 Cd 含量为 $0.85\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、新余市渝水区鹄山乡鹄山村 (晚稻, 土壤全 Cd 含量为 $0.31\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、新余市渝水区珠珊镇埠下村 (早晚稻, 土壤全 Cd 含量为 $0.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)、新余市渝水区珠珊镇埠下村 (中稻, 土壤全 Cd 含量为 $0.42\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 进行田间试验。

1.3 样品测定

采用 5 点取样法采集水稻植株, 通过 $\text{HNO}_3-\text{H}_2\text{O}_2$ 消解-电感耦合等离子体光谱仪测定水稻根、茎、叶、谷壳、糙米等器官中 Cd 和 Si 含量。植株分析方法参考生态地球化学评价动植物样品分析方法^[16]。

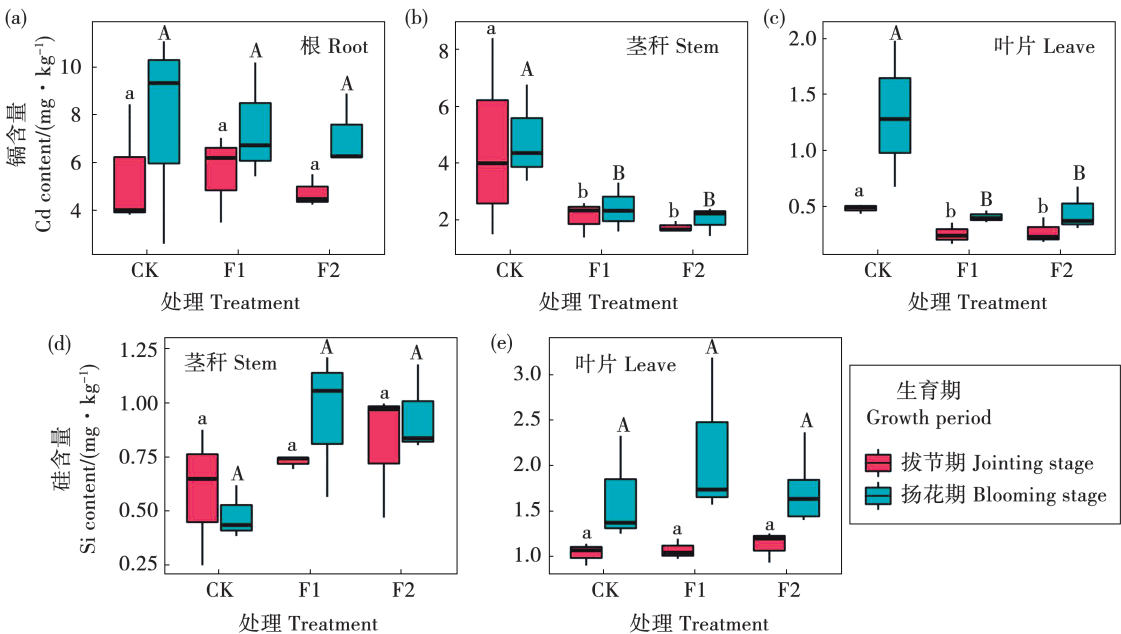
1.4 数据分析

通过 R 语言 (www.r-project.org, R 4.2.0) 统计软件对试验数据进行方差分析和相关性分析, 采用 R 语言程序包 ggplot2 进行绘图, 采用 Tukey HSD 法对数据进行差异显著性 ($P<0.05$)。转运系数用水稻茎秆、叶片和谷壳中 Cd 元素与糙米中 Cd 元素比值表示; 拮抗系数用水稻茎秆、叶片和谷壳中 Si 元素与相对应部位中 Cd 元素比值表示。

2 结果与分析

2.1 水稻各部位 Cd 与 Si 含量

水稻拔节期, 施用叶面硅肥水稻根系中 Cd 含量 ($F=0.17, P=0.85$, 图 1a)、茎秆中 Si 含量 ($F=0.59, P=0.58$, 图 1d) 和叶片中 Si 含量 ($F=0.34, P=0.73$, 图 1e) 均无显著差异。与 CK 相比, F1 和 F2 茎秆中 Si 含量增加了 23.7%~37.3%, 叶片中 Si 含量增加了 3.9%~9.7%。施用 F1 和 F2 处理茎秆中 Cd 含量显著低于 CK ($F=6.20, P=0.03$, 图 1b), 分别降低了 53.8% 和 62.2% ($P<0.05$); 叶片中 Cd 含量也显著低于 CK ($F=5.92, P=0.02$, 图 1c), 分别降低了 47.9% 和 43.8% ($P<0.05$)。



注: 图中小写字母表示拔节期 Cd 和 Si 含量在不同处理间差异显著 ($P<0.05$), 大写字母表示扬花期 Cd 和 Si 含量在不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase and capital letters indicate Cd or Si content have significant differences between treatments at jointing stage and blooming stage, respectively ($P<0.05$). The same is as below.

图 1 硅肥对水稻拔节期和扬花期不同部位中 Cd 和 Si 含量的影响

Fig. 1 Effects of foliar silicon fertilizer on Cd and Si contents in different parts of rice at jointing and blooming stages

水稻扬花期, 施用叶面硅肥水稻根系中 Cd 含量 ($F=0.03, P=0.97$, 图 1a)、茎秆中 Si 含量 ($F=3.70, P=0.08$, 图 1d)、叶片中 Si 含量 ($F=0.56, P=0.60$, 图 1e) 均无显著差异。与 CK 相比, F1

和 F2 茎秆中 Si 含量增加了 95.8% ~97.9%，叶片中 Si 含量增加了 8.48% ~31.5%。施用 F1 和 F2 处理茎秆中 Cd 含量显著低于 CK ($F=5.22$, $P=0.048$, 图 1b)，分别降低了 50.5% 和 58.6% ($P<0.05$)；叶片中 Cd 含量也显著低于 CK ($F=5.15$, $P=0.049$, 图 1c)，分别降低了 69.7% 和 65.9% ($P<0.05$)。

水稻收获期，与 CK 相比，F1 和 F2 处理的水稻茎秆中 Cd 含量分别显著降低了 33.3% 和 56.3% ($P<0.05$, 图 2a)。CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.75、0.52、0.33 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 CK 相比，F1 和 F2 处理的水稻糙米中 Cd 含量分别显著降低了 33.3% 和 56.0% ($P<0.05$, 图 2d)；施用硅肥处理中叶片 ($F=0.45$, $P=0.66$, 图 2b) 和谷壳 ($F=2.14$, $P=0.19$, 图 2c) 中 Cd 含量与 CK 相比差异均不显著。与 CK 相比，除 F2 处理使叶片和谷壳中的 Si 含量分别显著增加了 31.9% 和 134% 外，其余处理对不同部位中的 Si 含量均未产生显著影响。

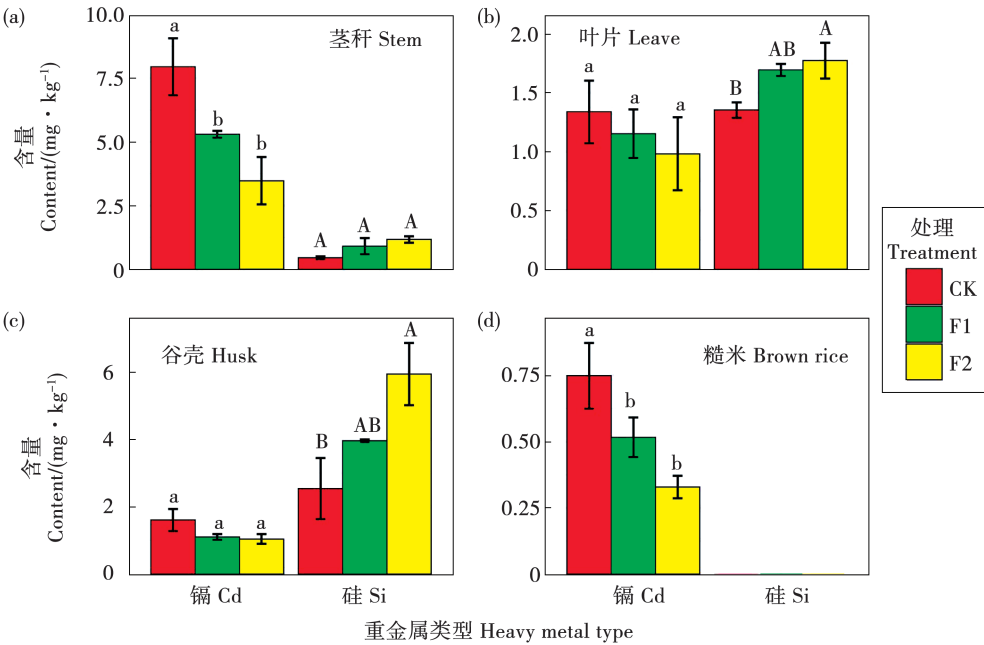


图 2 收获期喷施硅肥对水稻不同部位中 Cd 和 Si 含量的影响

Fig. 2 Effects of foliar silicon fertilizer on Cd and Si contents in different parts of rice at harvest

2.2 水稻 Cd 的转运系数及拮抗系数

从表 1 收获期水稻 Cd 转运系数及拮抗系数可知，总体上，与 CK 相比，喷施叶面硅肥后降低了水稻茎秆、叶片、谷壳中重金属 Cd 元素向糙米中 Cd 元素的转运系数，但差异均未达到显著水平；F1、F2 处理的茎秆和谷壳中的拮抗系数均显著高于 CK ($P<0.05$)。

表 1 收获期水稻 Cd 转运系数及拮抗系数

Table 1 Cd transport coefficient and antagonistic coefficient of rice at harvest

处理 Treatment	TF			AF _{Si/Cd}		
	茎秆 - 糙米	叶片 - 糙米	谷壳 - 糙米	谷壳 Husk	茎秆 Stem	叶片 Leaf
	Stem - Brown rice	Leaf - Brown rice	Husk - Brown rice			
CK	0.11 a	0.57 a	0.53 a	1.94 b	0.06 b	1.11 a
F1	0.10 a	0.49 a	0.49 a	3.65 a	0.17 a	1.57 a
F2	0.10 a	0.40 a	0.32 a	5.71 a	0.37 a	2.12 a

注：TF 代表转运系数；AF 代表拮抗系数。不同小写字母代表处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Note: TF indicates transport coefficient; AF indicates antagonistic coefficient. Different small letters indicate significant differences between treatments at $P<0.05$.

2.3 喷施叶面硅肥对水稻籽粒产量的影响

由图 3 可以看出，水稻籽粒产量为 7 955 ~9 505 kg·hm⁻²。不同处理下水稻籽粒产量表现为 F2 > F1 > CK，与 CK 相比，喷施 F1 处理下的水稻籽粒产量增加了 4.70%，喷施 F2 处理下的水稻籽粒产量增加了 6.26%，但是统计分析表明配施叶面硅肥的水稻籽粒产量与对照没有明显差异。

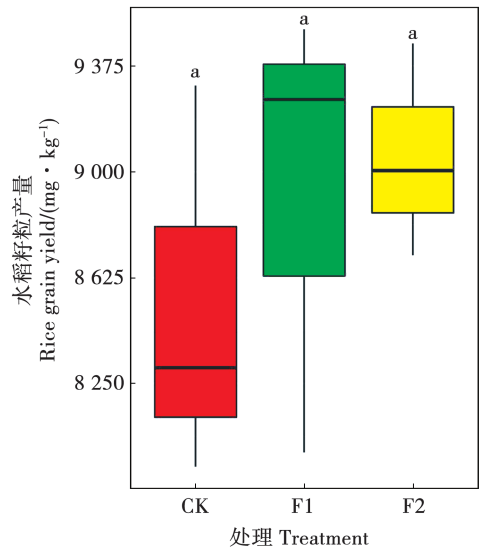


图 3 喷施叶面硅肥对水稻籽粒产量的影响

Fig. 3 Effects of foliar silicon fertilizer on rice grain yield

2.4 收获期水稻各部位 Cd 和 Si 含量的相关性分析

为探讨水稻各部位 Cd 与 Si 含量的相关性，进一步了解喷施叶面硅肥下糙米 Cd 的吸收机制，本文分析了糙米、茎秆、叶片、谷壳中 Cd 含量及其茎秆、叶片、谷壳中 Si 含量的相关性。表 2 中相关性结果显示，糙米中 Cd 含量与谷壳中 Cd 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)，而与谷壳中、茎秆中 Si 含量呈显著负相关关系 ($P < 0.05$)。同时，谷壳中 Cd 含量与茎秆中 Cd 含量呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

表 2 收获期水稻 Cd、Si 含量间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between Cd and Si contents in rice at harvest

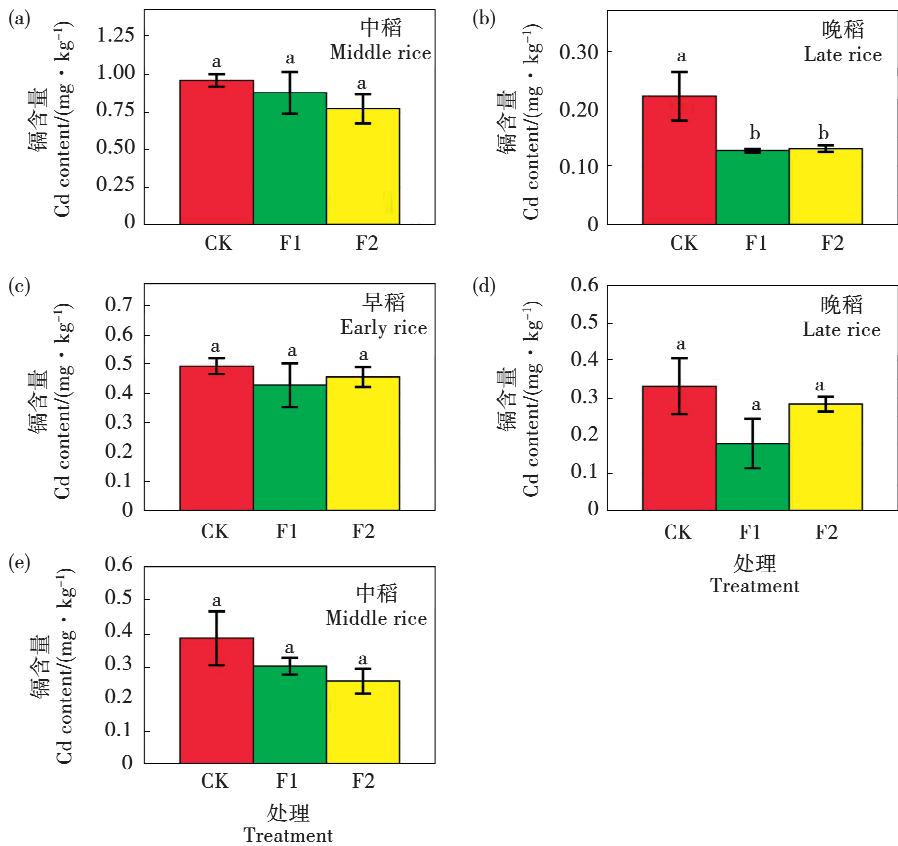
	Cd			Si		
	谷壳 Husk	茎秆 Stem	叶片 Leaf	谷壳 Husk	茎秆 Stem	叶片 Leaf
Cd 糙米 Brown rice	0.62 *	0.51	0.50	-0.73 *	-0.60 *	-0.45
Cd 谷壳 Husk	—	0.72 *	0.15	-0.49	-0.28	-0.33
Cd 茎秆 Stem	0.72 *	—	0.32	-0.38	-0.50	-0.46
Cd 叶 Leaf	0.15	0.32	—	-0.11	-0.31	-0.51

注：* 表示两指标间相关性显著 ($P < 0.05$)。
Note: * indicates significant difference between two coefficients at $P < 0.05$.

2.5 喷施叶面硅肥对水稻糙米中 Cd 含量的异地验证效果

图 4a 中 CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.96、0.88、0.77 mg·kg⁻¹，与 CK 相比，F1 和 F2 处理中稻糙米 Cd 含量降低了 8.3% ~19.8%，但差异不显著；图 4b 中 CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.22、0.13、0.13 mg·kg⁻¹，F1 和 F2 处理晚稻糙米 Cd 含量与 CK 相比显著降低了 40.9% ~

45.5% ($P<0.05$)；图 4c 中 CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.49、0.43、0.46 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与 CK 相比，F1 和 F2 处理早稻糙米 Cd 含量降低了 6.12%~12.2%，但差异不显著；图 4d 中 CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.33、0.18、0.28 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与 CK 相比，F1 和 F2 处理晚稻糙米 Cd 含量降低了 15.2%~45.5%，差异也不显著；图 4e 中 CK、F1 和 F2 处理的糙米中 Cd 含量分别为 0.39、0.30、0.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，与 CK 相比，F1 和 F2 处理中稻糙米 Cd 含量降低了 23.1%~33.3%，但差异并未达到显著水平。



注：(a) 图土壤 Cd 含量为 0.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；(b) 图土壤 Cd 含量为 0.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；(c) 图和 (d) 图土壤 Cd 含量均为 0.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；(e) 图土壤 Cd 含量为 0.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Note: The soil Cd content in the figure (a) is 0.85 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；The soil Cd content in the figure (b) is 0.31 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；The content of soil Cd is 0.55 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in figure (c) and figure (d)；The soil Cd content in the figure (e) is 0.42 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图 4 叶面硅肥对水稻糙米 Cd 含量的异地验证效果

Fig. 4 Effects of foliar silicon fertilizer on Cd in brown rice in different locations

3 讨 论

水稻是喜硅类作物，施用硅肥可以加速水稻生长，间接克服非生物和生物胁迫^[10]。本研究中喷施叶面硅肥后使水稻籽粒产量增加了 4.70%~6.26%。杨国英等^[17]研究表明，施用硅肥不仅增加了粳稻产量 2.7%~7.1%，还改善了糙米率、精米率、蛋白质含量等水稻品质。张宇鹏等^[18]研究也发现，喷施叶面肥后使水稻增产 3.24%，与本研究类似。Si 元素可以促进水稻的生长发育，改善水稻的抗逆性，提升水稻叶片中叶绿素的含量和加强水稻对重金属 Cd 的抗性^[19]。本试验中的两种叶面硅肥除了含有大量的 Si 元素，还有锌、铁、锰等微量元素和有机质、氮、磷、钾等营养物质，可以有效调节水稻生理特征，促进

叶片光合作用，从而提升水稻的产量和品质。

徐奕等^[20] 试验发现叶面喷施硅肥后降低了水稻地上部 Cd 含量，但对根系中 Cd 含量没有显著影响，且增加硅肥喷施次数可以进一步提高水稻降 Cd 效果，本试验也发现与 CK 相比，水稻拔节期和扬花期喷施叶面硅肥后，显著降低了水稻茎秆和叶片中 Cd 含量（43.8% ~69.7%），且收获期糙米 Cd 含量显著降低了 33.3% ~ 56.0%。大量试验表明，喷施叶面硅肥后可以有效降低水稻糙米中重金属 Cd 含量（18.9% ~57.14%）^[21-23]。

试验中硅肥处理的茎秆和谷壳中拮抗系数（AF_{Si/Cd}）均显著高于 CK，相关性也表明糙米中 Cd 含量与谷壳中 Cd 含量呈显著正相关关系，而与谷壳和茎秆中 Si 含量呈显著负相关关系，说明叶面喷施硅肥后增加了水稻体内的 Si 元素，并阻控水稻重金属 Cd 的富集。赵颖等^[24] 研究表明由于硅在作物地上部的沉淀而阻止了镉向上的迁移，减少作物地上部镉积累，从而降低稻米中重金属镉含量。此外，Cd 元素可以与 Si 元素在质外体形成沉淀作用^[25]，同时在运输过程中，Si 元素会在质外体通道内大量积累，限制了 Cd 在质外体的运输，从而降低 Cd 在水稻体内的转运^[26]。试验中选用的两种叶面硅肥，含有大量的硅元素以及有机质、氮、磷、钾、锌、铁、锰、铜等营养物质，水稻叶面喷施硅肥后，有机硅、黄腐酸、有机酸等 Cd 的拮抗剂，使重金属 Cd 向水稻地上部位运转受到抑制，减少了 Cd 向糙米中运转和积累。

本研究中喷施的 F1 和 F2 处理均没有将水稻糙米中 Cd 含量降低到 0.2 mg·kg⁻¹ 以下，可能是因为试验田土壤 Cd 含量较高导致。异地验证试验表明，喷施叶面硅肥后，晚稻对糙米降 Cd 效果要好于早稻，可能原因是早稻时期雨水较多，降低了叶面肥的施用效果，而晚稻雨水较少，同时喷施叶面肥还可以增加水分，促进水稻对硅元素的吸收。同时异地验证试验还表明，喷施叶面硅肥后糙米中 Cd 含量降低了 6.1% ~45.5%，但仅仅在轻度 Cd 污染（0.31 mg·kg⁻¹）农田使糙米中 Cd 含量低于标准值 0.2 mg·kg⁻¹ 以下，而在中重度 Cd 污染（>0.42 mg·kg⁻¹）修复过程中，叶面肥还需要结合石灰调酸、土壤钝化、品种筛选、水分管理等技术^[27-28]。今后需要试验验证喷施叶面硅肥与土壤钝化剂、水肥调控、低积累水稻品种等措施对中重度 Cd 污染农田水稻糙米降 Cd 效果。

4 结 论

（1）喷施叶面硅肥可以有效降低水稻茎秆、叶片、谷壳和糙米中的 Cd 含量，并提高水稻各部位中 Si 含量和水稻籽粒产量，该技术可以减少稻米 Cd 污染风险。

（2）相关性表明糙米中 Cd 含量与谷壳和茎秆中 Si 含量呈显著负相关关系，Si 与 Cd 的拮抗效应可以阻控水稻糙米中 Cd 的积累。

（3）异地验证试验表明，轻度 Cd 污染施用叶面硅肥可以有效降低糙米 Cd 含量且低于标准值 0.2 mg·kg⁻¹ 以下，而中重度 Cd 污染农田修复需采取土壤钝化、农艺调控及种植低积累品种等综合措施改良。

参考文献（References）：

[1] HUANG Y, WANG L Y, WANG W J, et al. Current status of agricultural soil pollution by heavy metals in China: a meta - analysis [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 3034 - 3042.

[2] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报 [R]. 北京: 环境保护部, 国土资源部, 2014.

Ministry of Environmental Protection and Ministry of Land and Resources of PRC. National soil pollution status survey report [R]. Beijing: Ministry of Environmental Protection, Ministry of Land and Resources of PRC, 2014.

[3] ZHAO F J, MA Y B, ZHU Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies [J]. Environmental Science and Technology, 2015, 49 (2): 750 - 759.

- [4] SHI L, GUO Z H, LIANG F, et al. Effect of liming with various water regimes on both immobilization of cadmium and improvement of bacterial communities in contaminated paddy: a field experiment [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16 (3): 498.
- [5] 林小兵, 张秋梅, 武琳, 等. 南方镉污染水稻产区土壤调理剂、叶面阻控剂产品调查与分析 [J]. 环境生态学, 2021, 3 (9): 57–64.
- LIN X B, ZHANG Q M, WU L, et al. Investigation and analysis of soil conditioner and foliar resistance control agent in rice growing area of cadmium pollution in South China [J]. Environmental Ecology, 2021, 3 (9): 57–64.
- [6] 牛明芬, 胡思雨, 史奕, 等. 农业土壤重金属污染原位修复技术 [J]. 土壤与作物, 2018, 7 (4): 439–448.
- NIU M F, HU S Y, SHI Y, et al. Advances of *in situ* remediation for heavy metal pollution in agricultural soils [J]. Soils and Crops, 2018, 7 (4): 439–448.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 李冠男, 黄立华, 黄金鑫, 等. 盐碱地水稻结实初期不同叶面肥喷施对稻米品质的影响 [J]. 土壤与作物, 2020, 9 (2): 126–135.
- LI G N, HUANG L H, HUANG J X, et al. Effects of different foliar fertilizers application at early filling stage on rice quality in saline–sodic soil [J]. Soils and Crops, 2020, 9 (2): 126–135.
- [10] 魏宾纭, 周航, 刘佳炜, 等. 不同水分管理模式联合叶面喷施硅肥对水稻 Cd 累积的影响 [J]. 环境科学, 2020, 41 (8): 3855–3861.
- WEI B Y, ZHOU H, LIU J W, et al. Effects of different treatments with water management combined with leaf spraying silicon fertilizer on Cd accumulation in rice [J]. Environmental Science, 2020, 41 (8): 3855–3861.
- [11] 刘家豪, 赵龙, 孙在金, 等. 叶面喷施硫对镉污染土壤中水稻累积镉的机制研究 [J]. 环境科学研究, 2019, 32 (12): 2132–2138.
- LIU J H, ZHAO L, SUN Z J, et al. Protective effect of foliar application of sulfur on rice under the stress of Cd [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32 (12): 2132–2138.
- [12] 李江遐, 张军, 马友华, 等. 硅对镉胁迫条件下两个水稻品种镉亚细胞分布、非蛋白巯基物质含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (6): 1066–1071.
- LI J X, ZHANG J, MA Y H, et al. Effects of silicon on cadmium accumulation and non–protein thiol content in the seedlings of two rice varieties under cadmium stress [J]. Journal of Agro–Environment Science, 2018, 37 (6): 1066–1071.
- [13] 王强锋, 李芹, 侯勇, 等. 微生物菌剂联合叶面硅、铁对水稻 Cd 积累分布的影响 [J]. 西南农业学报, 2022, 35 (2): 405–411.
- WANG Q F, LI Q, HOU Y, et al. Effects of microbial fertilizer with foliar application of organosilicone and EDDHA–Fe on Cd accumulation in rice [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35 (2): 405–411.
- [14] 张世浩. 施硅量和施硅时期对镉污染土壤中水稻植株镉积累与转运的调控 [D]. 广州: 华南农业大学, 2016.
- ZHANG S H. Regulation of the amount and the time of silicon application on the cadmium accumulation and translocation in the rice (*Oryza sativa*. L) grown under the cadmium–polluted soil [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.
- [15] 唐熙雯, 周旋, 黄凤球, 等. 不同污染程度耕地下稻米镉综合治理效果研究 [J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36 (10): 1339–1346.
- TANG X W, ZHOU X, HUANG F Q, et al. Study on the effect of comprehensive treatment technology on rice cadmium content under different Cd polluted cultivated land [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36 (10): 1339–1346.
- [16] 中华人民共和国国土资源部. 生态地球化学评价动植物样品分析方法 第1部分: 锂、硼、钒等19个元素量的测定 电感耦合等离子体质谱: DZ/T 0253. 1–2014 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- Ministry of Land and Resources of the People’s Republic of China. Analytic methods for biologic samples in eco–geochemistry assessment.

- Part 1; determination of the content of 19 elements including lithium, boron, vanadium, etc. Inductively coupled plasma mass spectrometry: DZ/T 0253. 1-2014 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2014.
- [17] 杨国英, 郭智, 盛婧, 等. 不同生育时期施用硅肥对优质食味粳稻产量和品质的影响 [J]. 中国稻米, 2021, 27 (1): 68-74+79.
- YANG G Y, GUO Z, SHENG J, et al. Effects of silicon fertilizer applied at different stages on grain yield and quality of *Japonica* rice with good eating quality [J]. China Rice, 2021, 27 (1): 68-74+79.
- [18] 张宇鹏, 谭笑潇, 陈晓远, 等. 无机硅叶面肥及土壤调理剂对水稻铅、镉吸收的影响 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (2): 388-393.
- ZHANG Y P, TAN X X, CHEN X Y, et al. Effects of inorganic silicon foliar fertilizer and soil conditioner on plumbum and cadmium absorption in rice [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29 (2): 388-393.
- [19] 邓思涵, 龙九妹, 陈聪颖, 等. 叶面肥阻控水稻富集镉的研究进展 [J]. 中国农学通报, 2020, 36 (1): 1-5.
- DENG S H, LONG J M, CHEN C Y, et al. Foliar fertilizers mitigate cadmium accumulation in rice: a review [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 36 (1): 1-5.
- [20] 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.
- [21] 李芳柏, 刘传平. 农作物重金属阻隔技术新型复合叶面硅肥及其产业化 [J]. 中国科技成果, 2013, (16): 77-78.
- LI F B, LIU C P. New compound foliar silicon fertilizer for crop heavy metal barrier technology and its industrialization [J]. China Science and Technology Achievements, 2013, (16): 77-78.
- [22] 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, 16 (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, 16 (3): 875-878.
- [23] 邓思涵, 龙九妹, 陈聪颖, 等. 水稻叶镉与米镉含量的相关性及其叶面肥对镉的阻控研究 [J]. 湖南农业科学, 2019 (2): 24-28.
- DENG S H, LONG J M, CHEN C Y, et al. Relationship of cadmium content in rice leaves with seeds and resistance of foliar fertilizer to cadmium [J]. Hunan Agricultural Sciences, 2019 (2): 24-28.
- [24] 赵颖, 李军. 硅对水稻吸收镉的影响 [J]. 东北农业大学学报, 2010, 41 (3): 59-64.
- ZHAO Y, LI J. Effect of silicon on cadmium uptake by rice [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2010, 41 (3): 59-64.
- [25] 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 N, 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 (Agriculture and Life Sciences), 2021, 47 (6): 768-776.
- [26] 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.
- [27] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 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 [J]. 农业环境科学学报, 2018, 37 (2): 215-222.
- GAO M, ZHOU J, LIU H L, et al. Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (2): 215-222.
- [28] 李嘉琳, 梁金明, 陈波华, 等. 叶面肥与不同类型钝化材料组合施用对水稻累积镉效应研究 [J]. 农业环境科学学报, 2019, 38 (10): 2338-2345.
- LI J L, LIANG J M, CHEN B H, et al. Effect of integrative remediation measures, based on foliar fertilizer and several passivation materials, on Cd accumulation in rice [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38 (10): 2338-2345.