

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0995

俞朝,周其耀,詹丽钊,等.叶面喷施纳米硅肥对2个辣椒品种镉积累的阻控作用[J].生态与农村环境学报,2024,40(12):1687-1692.

YU Chao,ZHOU Qi-yao,ZHAN Li-chuan,et al.Inhibition Effects of Foliar Spraying of Nano-Si Fertilizer on Cd Accumulation of Two Pepper Varieties[J]. Journal of Ecology and Rural Environment,2024,40(12):1687-1692.

叶面喷施纳米硅肥对2个辣椒品种镉积累的阻控作用

俞朝¹,周其耀²,詹丽钊¹,胡智鹏²,李超¹,胡帅栋¹,马璐瑶²,冯英² (1. 嵊州市农业农村局,浙江绍兴 312499; 2. 浙江大学环境与资源学院/污染环境修复与生态健康教育部重点实验室,浙江杭州 310058)

摘要: 纳米硅肥可阻控作物对重金属的吸收积累,但对重金属积累能力不同品种的作用效应少有研究。在镉(Cd)污染设施菜地采用田间小区试验,研究了叶面喷施纳米硅肥对辣椒Cd低积累品种(JY)和高富集品种(GJ)产量、植株各部位镉含量和果实营养品质的影响。结果表明,喷施纳米硅肥增产效果显著,不施纳米硅肥的对照处理2个品种各部位Cd含量存在显著差异,其中JY果实Cd含量比GJ低44.7%;叶面喷施纳米硅肥显著降低可食部Cd含量,并使JY果实Cd含量降低至GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》规定的限量值以下。进一步分析发现,叶面喷施纳米硅肥显著增加可溶性蛋白含量和可溶性糖含量。研究结果表明,叶面喷施纳米硅肥与低积累品种联用不仅可实现该污染设施菜地的安全生产,而且在增产的同时提高辣椒的营养品质。

关键词: Si; Cd; 叶面肥; 安全生产; 茄果类作物

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4831(2024)12-1687-06

Inhibition Effects of Foliar Spraying of Nano-Si Fertilizer on Cd Accumulation of Two Pepper Varieties. YU Chao¹, ZHOU Qi-yao², ZHAN Li-chuan¹, HU Zhi-peng², LI Chao¹, HU Shuai-dong¹, MA Lu-yao², FENG Ying² (1. Bureau of Agriculture and Rural Affairs of Shengzhou, Shaoxing 312499, China; 2. Key Laboratory of Environment Remediation and Ecological Health, Ministry of Education / College of Environmental Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Nano silicon (Nano-Si) fertilizer can inhibit the absorption and accumulation of heavy metals by crops, but its effects on varieties with different accumulation capacity of heavy metals were rarely studied. In this study, a field plot experiment was conducted in a cadmium (Cd) contaminated greenhouse to study the effects of foliar spraying nano-Si fertilizer on the yield of single plant, Cd concentration in various parts of plants, and fruit nutritional quality of both the variety with low accumulation capacity (JY) and the variety with high accumulation capacity (GJ). The results show that foliar spraying nano-Si fertilizer significantly increased the yield of fruits. And in CK treatments, an obvious difference in Cd concentration in various parts of plants was observed between the two varieties, among which fruit Cd concentration of JY was 44.7%, lower than that of GJ. Foliar spraying of nano-Si fertilizer significantly reduced Cd concentration of the edible part, leading to a lower Cd concentration of JY fruit than the limit value of the National Food Safety Standard (GB 2762–2022). Further analysis reveals that foliar spraying Nano-Si fertilizer significantly increased soluble protein and soluble sugar concentration of fruits. These results indicate that foliar nano-Si fertilizer could not only help to achieve safety production of the polluted greenhouse when combined with low Cd accumulation plant variety, but also improve the nutritional quality and yield of pepper.

Key words: Si; Cd; foliar fertilizer; safe production; solanaceous vegetables

辣椒(*Capsicum annuum*)作为蔬菜和重要的调味品深受大家喜爱,其种植面积位居全国蔬菜作物第2位^[1],约占全球辣椒种植面积的40%^[2]。作为易于在可食部富集镉(Cd)的作物^[2-5],辣椒是我国西南重金属地质高背景地区的重要经济来源^[1]。调查显示,贵州、云南、重庆等地区辣椒Cd含量为

收稿日期: 2023-11-06

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22D010002); 浙江省重点研发计划“尖兵”项目(2023C02002)

① 通信作者 E-mail: 25051652@qq.com

② 共同通信作者 E-mail: yfeng@zju.edu.cn

0.233~0.346 mg·kg⁻¹, 高于我国其他地区^[6]。广东、浙江等南方地区菜地土壤 Cd 污染较为严重, 导致蔬菜作物 Cd 含量超标事件频发^[7]。辣椒 Cd 含量超标不仅影响其产量、品质和风味, 而且给人体健康带来了潜在风险^[5-6]。

大量研究证明, 施用硅(Si)肥可有效缓解土壤重金属胁迫对植物生长的抑制和毒害作用^[8-11], 降低可食部重金属含量^[11]。研究发现, 红壤中施硅钙肥显著增加辣椒产量和经济效益^[12]。在 Cd 胁迫下, 叶面喷施 Na₂SiO₃ 溶液促进辣椒果实发育和产量形成, 减少 Cd 的吸收及向地上部转移^[13]。纳米硅是人工合成的直径在 1~100 nm 之间的晶体二氧化硅颗粒, 可附着于植株叶片表皮细胞, 形成具有角质双硅层的细胞壁, 促进植株细胞分裂、拉长, 从而增大生物量的积累^[14], 也可穿透植物细胞壁和细胞膜, 被植物吸收利用^[15-16], 从而提高植物对逆境胁迫的抗性。TRIPATHI 等^[17]发现, 纳米硅可减少铬(Cr)在豌豆苗体内的积累, 降低活性氧含量, 减轻铬的毒害作用。CUI 等^[18]发现, 聚集在水稻细胞壁上的纳米硅材料与镉形成了复合物, 从而阻碍了细胞对金属镉的吸收。叶面喷施纳米硅通过抑制 Cd 向籽粒的迁移, 促进钾(K)、镁(Mg)和铁(Fe)从最上节向穗轴的迁移, 从而减少了 Cd 在水稻籽粒中的积累^[19]。HUSSAIN 等^[20]发现, 硒(Se)和纳米硅联用可以降低糙米 Cd 和铅(Pb)含量, 同时增加 Se 含量。PAN 等^[21]发现, 叶面施纳米硅在低浓度砷胁迫下对水稻砷吸收的抑制效果显著, 主要通过根系液泡固定和节点硅-砷共沉淀 2 个途径降低稻米砷的累积。HE 等^[14]发现, 纳米二氧化硅(nSiO₂)可促进大麦植株生长, 提高叶绿素含量, 改善光合作用, 降低根中丙二醛(MDA)含量和叶片 Cd 浓度, 缓解 Cd 的胁迫作用。然而, 纳米硅肥对作物重金属富集能力迥异的品种作用效应, 尤其是与低积累品种的联用效应还少有研究。

因此, 研究以 2 个对镉积累能力差异明显的辣椒品种为材料, 通过田间小区试验, 比较叶面喷施纳米硅肥对不同品种可食部 Cd 含量及营养品质的影响, 为南方酸性 Cd 污染农田辣椒安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

镉低积累品种“金玉 2313”(JY)和高富集品种“港椒”(GJ)购自杭州勿忘农种子子公司。供试纳米硅肥购自绿油油生物肥料有限公司, $\rho(\text{SiO}_2) > 200$

g·L⁻¹, pH 值为 9.0~11.0, 加水稀释 500 倍, 每个小区每次施肥 1 500 mL。

1.2 田间试验地点和试验设计

小区试验地点位于杭州某农场的设施大棚, 为潴育型水稻土泥质田。土壤的基本理化性质为: pH 值为 5.51(水土质量比为 2.5), CEC 为 8.80 cmol·kg⁻¹, $w(\text{有机质})$ 为 27.60 g·kg⁻¹, $w(\text{全氮})$ 为 3.34 g·kg⁻¹, $w(\text{全磷})$ 为 2.80 g·kg⁻¹, $w(\text{全钾})$ 为 0.35 g·kg⁻¹, $w(\text{有效磷})$ 为 66.09 mg·kg⁻¹, $w(\text{速效钾})$ 为 94.47 mg·kg⁻¹, $w(\text{全镉})$ 为 0.80 mg·kg⁻¹。

采用完全随机区组设计, 设置叶面喷施纳米硅肥处理和喷施清水对照, 每个处理设 3 次重复, 每个品种 6 个小区, 共 12 个小区, 每个小区面积 6 m²(2 m×3 m), 小区之间间隔 3 行, 不作喷肥处理, 以避免喷施肥料时互相干扰。2020 年 1 月 16 日育苗, 4 月 1 日移栽, 每个小区定植 15 株, 在 5 月 14 日、5 月 23 日、6 月 1 日分 3 次将纳米硅肥或清水均匀喷施在叶片上, 现配现用, 其他的农艺管理措施与常规管理保持一致, 6 月 20 日采样分析。

1.3 样品采集及分析

1.3.1 植物和土壤样品采集

每个小区选择 3 株辣椒连根拔起, 采集土壤, 混匀并剔除杂物, 自然风干后碾碎过筛密封保存。洗去根上附着的土壤, 将植株分成地上部和地下部, 用自来水冲洗干净, 然后用去离子水洗涤 3 次。将洗净晾干水分的植物样品按根、茎叶、果实分类后, 称量鲜重(FW)。取出一半样品, 在 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 然后在 65 °C 烘干至恒重并称取干重(DW)。

1.3.2 叶绿素含量的测定

用丙酮-乙醇比色法测定新鲜叶片的叶绿素含量。称取 0.50 g 鲜叶, 放入丙酮-乙醇溶液中暗处理 24 h, 通过紫外分光光度计(Lambda350V vis, PerkinElmer, Singapore)测定 663 和 645 nm 波长处的吸光度(A_{663} 和 A_{645}), 用下式计算叶绿素含量(C_Y):

$$C_Y = 20.2 \times A_{645} + 8.02 \times A_{663} \quad (1)$$

式(1)中, C_Y 为叶绿素含量, mg·kg⁻¹。

1.3.3 植株镉含量的测定

准确称量 0.20 g 干样置于聚四氟乙烯消煮管中, 加入 1 mL H₂O₂ 和 5 mL HNO₃, 160 °C 消煮过夜至完全澄清, 过滤后加水定容至 30 mL, 使用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS, plasma Quant, Germany)测定。采用国家标准物质研究中心植物标准物质 GBW(E)100348 进行质量控制。采用下列公式计

算果实 Cd 的转运系数 (F_T) 和富集系数 (F_{BC})^[22]:

$$F_T = C_G / C_R, \quad (2)$$

$$F_{BC} = C_G / C_T. \quad (3)$$

式(2)~(3)中, C_G 为果实 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_R 为根系 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; C_T 为土壤 Cd 含量, $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3.4 可溶性蛋白、可溶性糖和维生素 C 含量的测定

采用考马斯亮蓝比色法测定果实可溶性蛋白含量, 蒽酮-硫酸比色法在 620 nm 波长处测定可溶性糖含量, 2,6-二氯吡啶酚滴定法测定维生素 C (VC) 含量^[23]。

1.3.5 土壤理化性质和 Cd 含量的测定

用 pH 计在质量比 1 : 2.5 的土壤-水悬浮液中测定 pH 值, 用 EDTA-铵盐快速法测定阳离子交换量, 重铬酸钾氧化-外加加热法测定有机质含量, 凯氏定氮法测定全氮含量, 高氯酸硝酸消化-钼锑抗比色法测定全磷含量, NaOH 熔融法测定全钾含量, NaHCO_3 -钼锑抗比色法测定有效磷含量, NH_4OAc -火焰光度法测定有效钾含量^[21]。

准确称取 0.20 g 土壤样品, 用 5 mL HNO_3 、1 mL HClO_4 和 1 mL HF 在 180 °C 下消煮 10 h, 以土壤标准物质 GBW07429 为质控样品同步消煮, 用于 ICP-MS (Plasma Quant, Germany) 测定。

1.4 数据分析

采用 SPSS 20.0 和 Excel 2016 软件进行数据分析与作图, 采用双因素方差分析 (ANOVA) 和 Duncan 多重比较法检验进行 0.05 水平下的差异显著性分析。

表 1 各指标品种和施肥处理两因素方差分析的 P 值

Table 1 P value of two factors variance analysis of plant varieties and fertilization treatments for each indicator

指标	小区产量	叶绿素含量	可溶性蛋白含量	可溶性糖含量	维生素 C 含量	果实 Cd 含量	茎叶 Cd 含量	根系 Cd 含量	根际土壤 Cd 含量	根际土壤 pH 值	转运系数	富集系数
品种	0.039	0.948	0.000	0.003	0.094	0.000	0.000	0.032	0.626	0.798	0.000	0.000
施肥处理	0.044	0.053	0.034	0.023	0.174	0.007	0.394	0.887	0.246	0.977	0.070	0.149
品种×施肥处理	0.280	0.654	0.187	0.504	0.479	0.186	0.600	0.816	0.749	0.977	0.814	0.724

$P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2.2 叶面喷施纳米硅肥对 2 个品种不同部位镉含量的影响

方差分析显示, 品种对果实 Cd 含量有极显著影响 (表 1), JY 果实中 Cd 含量为 $0.051 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW) 和 $0.674 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW), 远低于 GJ 的 $0.093 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW) 和 $1.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW), 两者之间差异达到极显著水平。GB 2762—2017《食品安全国

2 结果与分析

2.1 叶面喷施纳米硅肥对 2 个品种可食部产量和叶绿素含量的影响

双因素方差分析结果显示, 相比喷施清水对照, 叶面喷施纳米硅肥显著增加了可食部产量, 品种“金玉 2313” (JY) 的小区产量高于“港椒” (GJ), 而两者的交互作用则没有显著影响 (图 1、表 1)。叶面喷施纳米硅肥处理 GJ 果实产量较对照增加了 6.4%, JY 则增加了 17.3%, 说明叶面硅肥有一定的增产作用。

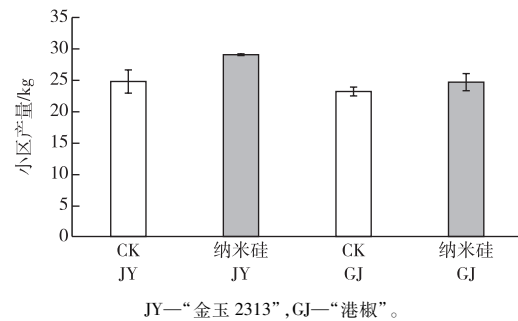


图 1 叶面纳米硅肥和品种对辣椒小区产量的影响

Fig. 1 Effects of foliar nano-Si and varieties on the fruit yield of pepper

2 个品种的叶绿素含量没有显著差异, JY 为 $1.50 \sim 1.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW), GJ 为 $1.49 \sim 1.53 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ (FW)。尽管喷施硅肥后 2 个品种叶绿素含量有所增加, 但是方差分析发现品种和施肥处理及其交互作用对叶绿素含量的影响均未达显著水平 (表 1)。

家标准《食品中污染物限量》规定的茄果类蔬菜 Cd 污染限值为 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW), 可见 2 个品种均已超标。叶面喷施纳米硅肥极显著降低了果实 Cd 含量, JY 平均含量下降 11.9%, 分别为 $0.045 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW) 和 $0.580 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (DW), 低于 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW) 的国家标准, 实现了安全生产, 而 GJ 港椒则下降到 $0.079 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (FW) 和 $1.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

(DW), 虽未能实现安全生产, 但下降幅度更大且达到了极显著水平(图 2)。而品种和肥料处理的交互效应对果实 Cd 含量的影响不显著(表 1)。

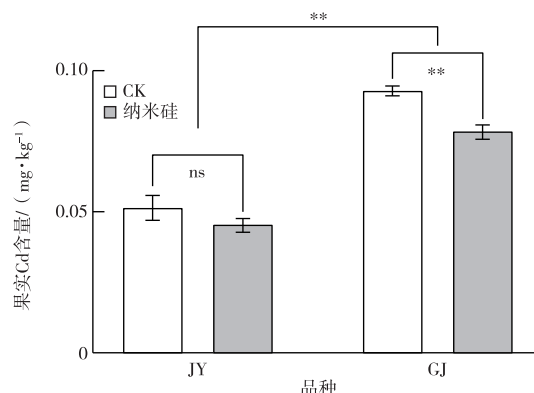
2 个品种茎叶 Cd 含量差异极显著, 其中 JY 为 $0.332 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GJ 为 $0.671 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。方差分析显示, 施肥处理及其与品种的交互作用对叶片 Cd 含量的影响均未达到显著水平(表 1)。

与茎叶类似, 2 个品种根系 Cd 含量差异显著, 其中 JY 为 $1.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, GJ 为 $1.90 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (表 2)。方差分析显示, 施肥处理及其与品种的交互作用对根系 Cd 含量的影响也未达到显著水平(表 1)。

2.3 不同处理下可食部营养品质比较

方差分析显示, 2 个品种可食部营养品质差异极显著(表 3), 其中 JY 的果实可溶性蛋白和可溶性糖含量均极显著低于 GJ, 而两者 VC 含量相当。叶面喷施纳米硅肥显著提高了果实可溶性蛋白和可溶性糖含量, 但对 VC 含量的影响未达显著水平。

品种和肥料处理的交互效应对果实营养品质的影响均不显著(表 1)。



JY—“金玉 2313”, GJ—“港椒”。
ns 表示 $P \geq 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

图 2 叶面纳米硅肥对辣椒果实镉含量的影响
Fig. 2 Effects of foliar nano-Si on cadmium concentration in pepper fruit

表 2 叶面纳米硅肥对不同部位 Cd 含量以及果实 Cd 转运系数和富集系数的影响

Table 2 Effect of foliar nano-Si on Cd concentration of different parts of plants, and on Cd transfer factor and bio-concentration factor of fruits

处理	茎叶 Cd 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$		根系 Cd 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$		土壤 Cd 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$	
	JY	GJ	JY	GJ	JY	GJ
对照	0.332 ± 0.290	$0.671 \pm 0.013^{**}$	1.660 ± 0.130	1.900 ± 0.043	0.777 ± 0.024	0.773 ± 0.021
纳米硅	0.323 ± 0.030	$0.636 \pm 0.019^{**}$	1.670 ± 0.095	1.870 ± 0.022	0.760 ± 0.015	0.744 ± 0.011

处理	pH 值		转运系数		富集系数	
	JY	GJ	JY	GJ	JY	GJ
对照	5.520 ± 0.041	5.510 ± 0.064	0.409 ± 0.049	$0.625 \pm 0.015^*$	0.872 ± 0.115	$1.540 \pm 0.088^*$
纳米硅	5.520 ± 0.078	5.510 ± 0.305	0.347 ± 0.002	$0.547 \pm 0.043^{**}$	0.766 ± 0.056	$1.370 \pm 0.078^{**}$

* 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。JY 为“金玉 2313”, GJ 为“港椒”。

表 3 叶面纳米硅肥对不同品种叶绿素含量和营养品质的影响

Table 2 Effects of foliar nano-Si on chlorophyll content and nutritional quality of pepper with different varieties

指标处理	叶绿素含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$		可溶性蛋白含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$		可溶性糖含量/%		维生素 C 含量/ $(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	
	JY	GJ	JY	GJ	JY	GJ	JY	GJ
对照	1.500 ± 0.004	1.530 ± 0.024	1.580 ± 0.014	$1.860 \pm 0.038^{**}$	2.150 ± 0.089	2.43 ± 0.059	0.621 ± 0.004	0.637 ± 0.021
纳米硅	1.480 ± 0.010	1.540 ± 0.023	1.610 ± 0.011	$1.960 \pm 0.030^{**}$	2.340 ± 0.033	$2.55 \pm 0.016^{**}$	0.631 ± 0.005	0.669 ± 0.018

** 表示 $P < 0.01$ 。JY 为“金玉 2313”, GJ 为“港椒”。

2.4 叶面喷施纳米硅肥对土壤镉含量和 pH 值的影响

收获后土壤 Cd 平均含量为 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值为 5.51(表 2)。双因素方差分析发现, 品种、施肥处理及两者的交互效应对土壤 Cd 含量和 pH 值的影响均未达显著水平(表 1)。

2.5 不同处理可食部 Cd 的转运系数和富集系数比较

计算不同处理可食部 Cd 的转运系数和富集系数并进行双因素方差分析, 发现品种间差异显著,

施肥处理及其与品种的交互效应对转运系数和富集系数的影响均未达到显著水平(表 1)。JY 根-果 Cd 的转运系数为 0.41, 喷施叶面纳米硅肥后降至 0.35; GJ 根-果转运系数在喷施硅肥后由 0.63 降至 0.55。喷施叶面纳米硅肥使果实 Cd 富集系数在一定程度上下降, 其中 JY 由 0.87 降至 0.77, 而 GJ 由 1.54 降至 1.37(表 2)。

3 讨论

大量研究结果表明, 同种作物不同品种对重金

属吸收积累能力存在较大差异,因而可以筛选重金属低积累品种用于污染农田的安全利用^[7]。刘峰等^[24]采用盆栽试验和小区试验比较 71 个辣椒品种对 Cd 累积的差异,发现 5 个可在镉含量低于 0.58 mg · kg⁻¹条件下安全种植的低积累品种资源;刘青栋^[25]研究发现朝天椒果实 Cd 含量高于线椒和杂交椒,这一结果被赵首萍等^[5]证实。柴冠群等^[2]的大田试验结果显示,在 0.42 mg · kg⁻¹轻度镉污染农田,11 个辣椒品种果实 Cd 含量均已超标,其中 10 个品种果实镉富集系数 ≥ 1。研究发现,在 0.8 mg · kg⁻¹镉污染农田,2 个品种果实 Cd 含量均超过了食品安全国家标准的限量值,且各部位 Cd 含量表现为根 > 果实 > 茎叶,说明辣椒果实易于富集镉^[2-4]。低积累品种 JY 各部位(包括根系、茎叶和果实)Cd 含量显著低于高富集品种 GJ,果实 Cd 的转运系数和富集系数也极显著低于 GJ(表 1~3)。刘青栋^[25]发现,酸性镉污染土壤中辣椒的根-果转运系数小于 1,果实 Cd 富集系数大于 1。与其类似,该研究发现 2 个品种根-果转运系数均小于 1, GJ 果实富集系数大于 1,而 JY 果实富集系数小于 1(表 2),这些结果说明低积累品种对 Cd 吸收、转运、积累能力均低于高富集品种。

叶面喷施阻控剂或微量元素肥料是重金属污染农田安全利用的重要调控措施^[26-27]。Si 主要通过形成二氧化硅作为物理屏障和形成硅酸溶液进入植物体^[11]。外源施 Si 通过增加叶片 Si 含量提高抗氧化系统活性,改善光合作用特性,提高叶片 NO、脯氨酸和 H₂S 等物质含量,降低辣椒叶片 Cd 含量,增强植物对 Cd 的耐受性^[14,28]。在 Cd 胁迫下,叶面喷施有机 Si 或无机 Si 明显减少 Cd 在 2 个辣椒品种果实中的蓄集^[3]。叶面施 Si 还降低 Cd 胁迫下番茄叶片的最小荧光值(F_0)和 K 相对可变荧光(V_k),稳定 Cd 胁迫下番茄叶片光合系统的结构和功能,缓解 Cd 胁迫对番茄叶片光合性能的抑制^[29],增强黄瓜叶片光合作用,提高抗氧化酶系统活性^[30]。纳米硅由于其独特的物理性质,在阻控作物重金属吸收积累方面优于离子硅^[31],已用于阻控水稻对 As、Cd 等重金属的吸收^[18,20-21,31-32]。与上述这些研究结果一致,研究发现叶面施用纳米硅肥降低了辣椒可食部 Cd 含量,尤其是高富集品种降低了 15.5%,达到极显著水平(表 1、图 2),并使低积累品种实现了安全生产,同时增加了辣椒产量(表 1、图 1),提升了可食部可溶性蛋白含量和可溶性糖含量(表 3)。这些结果说明,低积累品种和叶面纳米硅肥联用可以实现污染土壤辣椒的安全生产,提高产

量和营养品质。后续应进一步开展深入研究,以阐明叶面纳米硅肥阻控辣椒低积累品种镉吸收积累的分子生理机制,为低积累品种和叶面阻控剂联用技术的发展应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 李欣欣,李桃,徐卫红,等.不同辣椒品种镉吸收与转运的差异[J].中国蔬菜,2017,9:32-36. [LI Xin-chen, LI Tao, XU Wei-hong, et al. Differences Between Cadmium Uptake and Translocation among Different Pepper Varieties[J]. China Vegetables, 2017, 9: 32-36.]
- [2] 柴冠群,蔡景行,吴道明,等.十一个辣椒品种的镉富集和转运能力比较[J].南方农业,2023,17(9):56-60,74.
- [3] 刘吉振,徐卫红,王慧先,等.硅对不同辣椒品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J].中国蔬菜,2011,10:69-75. [LIU Ji-zhen, XU Wei-hong, WANG Hui-xian, et al. Effect of Silicon on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of *Capsicum annum* L.[J]. China Vegetables, 2011, 10: 69-75.]
- [4] 范成五,柴冠群,刘桂华,等.叶面喷施硅对辣椒镉阻控效果[J].北方园艺,2021,23:57-63. [FAN Cheng-wu, CHAI Guan-qun, LIU Gui-hua, et al. Effect of Foliar Spraying of Silicon Fertilizer On Cadmium Content Reduction in Pepper[J]. Northern Horticulture, 2021, 23: 57-63.]
- [5] 赵首萍,叶雪珠,张棋,等.不同辣椒品种镉吸收积累能力及关键期研究[J].植物营养与肥料学报,2021,27(4):695-705. [ZHAO Shou-ping, YE Xue-zhu, ZHANG Qi, et al. The Capacity and Critical Stage of Cd Absorption and Accumulation of Different Pepper Cultivars [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(4): 695-705.]
- [6] WANG Z, YAO J, TU C, et al. Determination of Cadmium in Chinese Pepper and its Health Implications Based on Bioaccessibility[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(8): 20297-20309.
- [7] 冯英,马璐瑶,王琼,等.我国土壤-蔬菜作物系统重金属污染及其安全生产综合农艺调控技术[J].农业环境科学学报,2018,37(11):2359-2370. [FENG Ying, MA Lu-yao, WANG Qiong, et al. Heavy-metal Pollution and Safety Production Technologies of Soil-vegetable Crop Systems in China[J]. Journal of Agro-environment Science, 2018, 37(11): 2359-2370.]
- [8] ADREES M, ALI S, RIZWAN M, et al. Mechanisms of Silicon-Mediated Alleviation of Heavy Metal Toxicity in Plants: A Review[J]. Ecotoxicological and Environmental Safety, 2015, 119: 186-97.
- [9] KHAN I, AWAN SA, RIZWAN M, et al. Effects of Silicon on Heavy Metal Uptake at the Soil-Plant Interphase: A Review[J]. Ecotoxicological and Environmental Safety, 2021, 222: 112510.
- [10] ZHAO K, YANG Y, ZHANG L, et al. Silicon-Based Additive on Heavy Metal Remediation in Soils: Toxicological Effects, Remediation Techniques, and Perspectives[J]. Environmental Research, 2022, 205: 112244.
- [11] 苏素苗,杨春雷,饶雄飞,等.硅对植物抗逆性影响的研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(6):160-168. [SU Su-miao,

- YANG Chun-lei, RAO Xiong-fei, *et al.* Progress on Effects of Silicon on Plant Stress Resistance [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2022, 41(6): 160-168.]
- [12] 刘黎, 孙锐锋, 肖厚军, 等. 红壤土施用石灰、硅钙肥对辣椒生长的影响 [J]. 浙江农业科学, 2012, 9: 1265-1267. [LIU Li, SUN Rui-feng, XIAO Hou-jun, *et al.* The Effect of Applying Lime and Silicon Calcium Fertilizer on the Growth of Chili Pepper in Red Soil [J]. Zhejiang Agricultural Science, 2012, 9: 1265-1267.]
- [13] 柴冠群, 隋岩峰, 杨帆, 等. 叶面喷施 Na_2SiO_3 对朝天椒产量、品质与 Cd 吸收累积的影响 [J]. 河南农业科学, 2023, 52(7): 109-116. [CHAI Guan-qun, SUI Yan-feng, YANG Fan, *et al.* Effects of Foliar Spraying of Na_2SiO_3 on the Yield, Quality and Cd Uptake of Pod Pepper [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(7): 109-116.]
- [14] HE S, LIAN X, ZHANG B, *et al.* Nano Silicon Dioxide Reduces Cadmium Uptake, Regulates Nutritional Homeostasis and Antioxidative Enzyme System in Barley Seedlings (*Hordeum Vulgare* L.) Under Cadmium Stress [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(25): 67552-67564.
- [15] 孙德权, 陆新华, 胡玉林, 等. 纳米硅材料对植物生长发育影响的研究进展 [J]. 热带作物学报, 2019, 40(11): 2300-2311. [SUN De-quan, LU Xin-hua, HU Yu-lin, *et al.* Research Progress of Silica Nanoparticle Effects on the Growth and Development of Plants [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(11): 2300-2311.]
- [16] 杨然. 外源硅对番茄幼苗低温耐受性的调控效应研究 [D]. 太原: 山西农业大学, 2022. [YANG Ran. Regulation Effect of Exogenous Silicon on Low Temperature Tolerance of Tomato Seedlings [D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2022.]
- [17] TRIPATHI D K, SINGH V P, PRASAD S M, *et al.* Silicon Nanoparticles (Sinp) Alleviate Chromium (VI) Phytotoxicity in *Pisum Sativum* (L.) Seedlings [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 96: 189-198.
- [18] CUI J, LIU T, LI F, *et al.* Silica Nanoparticles Alleviate Cadmium Toxicity in Rice Cells; Mechanisms And Size Effects [J]. Environmental Pollution, 2017, 228: 363-369.
- [19] CHEN R, ZHANG C, ZHAO Y, *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.
- [20] HUSSAIN B, LIN Q, HAMID Y, *et al.* Foliage Application of Selenium and Silicon Nanoparticles Alleviates Cd and Pb Toxicity in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712: 136497.
- [21] PAN D D, HUANG G Y, YI J C, *et al.* Foliar Application of Silica Nanoparticles Alleviates Arsenic Accumulation in Rice Grain; Co-Localization of Silicon and Arsenic in Nodes [J]. Environmental Science: Nano, 2022, 9: 1271-1281.
- [22] WANG Y, SU Y, LU S. Cd Accumulation and Transfer in Pepper (*Capsicum annuum* L.) Grown in Typical Soils of China; Pot Experiments [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(36): 36558-36567.
- [23] 李子双, 王薇, 张世文, 等. 氮磷与硅钙肥配施对辣椒产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 458-466. [LI Zi-shuang, WANG Wei, ZHANG Shi-wen, *et al.* Effect of Nitrogen, Phosphorus and Silicon Calcium Fertilizer on Yield and Quality of Pepper [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(2): 458-466.]
- [24] 刘峰, 弭宝彬, 魏瑞敏, 等. 基于聚类分析法筛选低镉累积辣椒品种 [J]. 园艺学报, 2017, 44(5): 979-986. [LIU Feng, MI Bao-bin, WEI Rui-min, *et al.* Screening out of Cd-Pollution-Safe Pepper Cultivars by Clustering Analysis [J]. Acta Horticulturae Sinica, 2017, 44(5): 979-986.]
- [25] 刘青栋. 镉在土壤-辣椒体系迁移富集及其耦合关系探究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2019. [LIU Qing-dong. Study on Migration and Enrichment of Cadmium in Soil-Pepper System and Its Coupling Relationship [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.]
- [26] HUANG Y, HUANG B, SHEN C, *et al.* Boron Supplying Alters Cadmium Retention in Root Cell Walls and Glutathione Content in *Capsicum annuum* [J]. Journal of Hazardous Materials, 2022, 432: 128713.
- [27] XIN J, YUAN H, YANG L, *et al.* Effect of Boron Supply on the Uptake and Translocation of Cadmium in *Capsicum annuum* [J]. Ecotoxicological and Environmental Safety, 2023, 257: 114925.
- [28] KAYA C, AKRAM N A, ASHRAF M, *et al.* Exogenously Supplied Silicon (Si) Improves Cadmium Tolerance in Pepper (*Capsicum annuum* L.) by Up-Regulating the Synthesis Of Nitric Oxide and Hydrogen Sulfide [J]. Journal of Biotechnology, 2020, 316: 35-45.
- [29] 张泽锦, 唐丽, 李跃建. 叶面喷施硅对镉胁迫番茄叶片 PS II 电子传递的影响 [J]. 西南农业学报, 2020, 33(12): 2897-2904. [ZHANG Ze-jin, TANG Li, LI Yue-jian. Effects of Foliar Silicon Application on Electron Transport of PS II in Tomato Leaves under Cadmium Stress [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(12): 2897-2904.]
- [30] 于敏敏, 樊文华, 刘奋武, 等. 硅和硒对镉胁迫下黄瓜幼苗光合作用和抗氧化酶系统的影响 [J]. 河南农业科学, 2023, 52(1): 116-124. [YU Min-min, FAN Wen-hua, LIU Fen-wu, *et al.* Effects of Silicon and Selenium on Photosynthesis and Antioxidant Enzyme System of Cucumber Seedlings under Cadmium Stress [J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2023, 52(1): 116-124.]
- [31] 王世华. 叶面喷施纳米硅增强水稻抗重金属毒害机理研究 [D]. 南京: 南京农业大学, 2007. [WANG Shi-hua. Foliar Application of Nanometer Silicon Increase Heavy Metal Resistance in Rice (*Oryza sativa* L.) and Its Mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2007.]
- [32] EL-SAADONY M T, SAAD A M, SOLIMAN S M, *et al.* Role of Nanoparticles in Enhancing Crop Tolerance to Abiotic Stress; A Comprehensive Review [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 946717.

作者简介: 俞朝(1973—), 男, 浙江嵊州人, 高级农艺师, 主要研究方向为种养结合绿色循环农业。E-mail: 33406041@qq.com

(责任编辑: 陈 昕)