

丁浩男,潘荣庆,吕浩能,等. 叶面施用有机硒、有机硅对水稻累积镉、砷的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(14):215-220.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2023.14.029

# 叶面施用有机硒、有机硅对水稻累积镉、砷的影响

丁浩男,潘荣庆,吕浩能,班国富,何 焯,凌华荣,张 强,黄智刚

(广西大学农学院/广西农业环境与农产品安全重点实验室,广西南宁 530004)

**摘要:**为研究叶面施用有机硒、有机硅处理对不同种水稻品种富集重金属(砷、镉)的影响,选用 10 个晚稻品种及有机硒(A)、有机硅(B) 2 种试剂进行田间试验,测定和分析各处理间水稻各部位砷、镉含量差异。结果表明:水稻各个部位对重金属砷、镉的累积存在明显的差异。镉在水稻中的富集规律为茎>叶>稻米;砷在水稻中的富集规律为叶>茎>稻米。喷施有机硒(A)、有机硅(B)后,水稻稻米砷含量相较于 CK 处理分别下降了 17.0%、29.9%;稻米镉含量分别下降了 44.8%、44.2%,均显著低于对照处理。同时,喷施有机硒(A)后水稻叶镉含量相较于 CK 处理下降了 17.3%,喷施有机硅(B)后水稻叶砷含量相较于 CK 处理下降了 17.9%,二者均显著低于 CK 处理。相较于 CK 处理,试验所用试剂未对水稻茎砷、镉含量产生显著影响。喷施有机硒(A)、有机硅(B)后,根际土壤 pH 值及砷、镉含量相较于 CK 处理差异不显著。研究表明,施用有机硒(A)、有机硅(B)均可以抑制砷、镉重金属在水稻稻米中的富集,且有机硒(A)可以抑制重金属镉在水稻叶的富集,有机硅(B)可以抑制重金属砷在水稻叶的富集。

**关键词:**有机硒;有机硅;田间试验;重金属;水稻;镉;砷

**中图分类号:**S511.06 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2023)14-0215-06

水稻是我国主要的粮食作物,全国有 60% 左右的人口将稻米作为主食,水稻安全生产对我国粮食安全至关重要<sup>[1]</sup>。我国土壤重金属砷、镉污染严

重,2014 年,原环保部和国土资源部联合发布的调查公告显示,我国砷、镉点位污染超标率分别为 2.7%、7.0%<sup>[2]</sup>。镉、砷是生物毒性很强,在土壤中易于流动性的重金属元素,土壤重金属含量超过安全值会造成土壤及耕地污染,对作物生长产生毒害作用<sup>[3-4]</sup>。土壤砷、镉污染修复和水稻作物的安全种植问题亟待解决。

硅、硒是一种常见的金属元素,提高水稻植株抵御逆境胁迫的能力,促进水稻新陈代谢顺利进

收稿日期:2022-09-28

基金项目:广西创新驱动发展专项(编号:桂科 AA17204078)。

作者简介:丁浩男(1998—),男,山西朔州人,硕士研究生,主要从事农业面源污染与生态治理研究。E-mail:2117392008@st.gxu.edu.cn。

通信作者:黄智刚,博士,副教授,主要从事农业面源污染与生态治理研究。E-mail:19950048@gxu.edu.cn。

[23] 闫建伟,赵 源,张乐伟,等. 改进 Faster-RCNN 自然环境下识别刺梨果实[J]. 农业工程学报,2019,35(18):143-150.

[24] Gao F F, Fu L S, Zhang X, et al. Multi-class fruit-on-plant detection for apple in SNAP system using Faster R-CNN[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 176: 105634.

[25] 彭红星,黄 博,邵园园,等. 自然环境下多类水果采摘目标识别的通用改进 SSD 模型[J]. 农业工程学报,2018,34(16):155-162.

[26] 张恩宇,成云玲,胡广锐,等. 基于 SSD 算法的自然条件下青苹果识别[J]. 中国科技论文,2020,15(3):274-281.

[27] 王昱潭,薛君蕊. 改进 SSD 的灵武长枣图像轻量化目标检测方法[J]. 农业工程学报,2021,37(19):173-182.

[28] 薛月菊,黄 宁,涂淑琴,等. 未成熟芒果的改进 YOLOv2 识别方法[J]. 农业工程学报,2018,34(7):173-179.

[29] 唐榕钊,伍锡如. 基于改进 YOLO-V3 网络的百香果实时检测[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2020,38(6):32-39.

[30] 张兆国,张振东,李加念,等. 采用改进 YoloV4 模型检测复杂环境下马铃薯[J]. 农业工程学报,2021,37(22):170-178.

[31] Fan S X, Liang X T, Huang W Q, et al. Real-time defects detection for apple sorting using NIR cameras with pruning-based YOLOV4 network[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 193: 106715.

[32] 王 卓,王 健,王泉雄,等. 基于改进 YOLOv4 的轻量级苹果实时检测方法[J/OL]. 农业机械学报. [2022-10-01]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1964.S.20220520.1636.008.html>.

[33] 高芳芳,武振超,索 睿,等. 基于深度学习与目标跟踪的苹果检测与视频计数方法[J]. 农业工程学报,2021,37(21):217-224.

[34] Tan M X, Pang R M, Le Q V. EfficientDet: scalable and efficient object detection [C]//2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2020:10778-10787.

行,从而促进水稻生长<sup>[5-6]</sup>。叶面施肥相较于传统的土壤施肥方式,是水稻吸收营养元素的一种方式,叶面施用硒肥和硅肥是增加水稻硒、硅营养来源的有效方式<sup>[7-8]</sup>。有研究发现,在重金属污染的水稻田,水稻叶面施用硒肥、硅肥均可降低重金属对水稻的毒害作用,减少水稻稻米对重金属的吸收,从而降低水稻稻米中重金属的含量有效防控水稻重金属污染<sup>[7-9]</sup>。

目前,关于施用有机硅、有机硒对不同水稻品种累积砷、镉影响的报道较少,相关研究以单一重金属镉为主<sup>[10]</sup>,相关试验以室内盆栽试验研究为主。但有研究发现,水稻在室内盆栽试验和野外大田试验条件下的生长环境对重金属元素的吸收和积累具有一定的差异<sup>[10-11]</sup>。本研究在广西百色市德保县某重金属污染区开展田间大田试验,探究叶面喷施有机硒、有机硅对不同水稻品种地上各个部位重金属砷、镉积累和分布的影响,以及水稻地上各部位累积砷、镉的规律。

## 1 试验方法与设计

### 1.1 试验设计

试验在广西壮族自治区百色市德保县某重金属污染区进行,选用广西种植的 10 个晚稻品种(分别为桂育 12、华浙优 1 号、68 优金占、凯丰优 158、裕丰优 158、Y 两优 143、荃香优 822、又香优龙丝苗、又香优雅丝苗、野香优明月丝苗),每个品种设置对照(CK)、叶面喷洒有机硒(A)、叶面喷洒有机硅(B)这 3 个处理进行完全随机试验。试验设置 30 个处理,每个处理重复 4 次,共计 120 个小区,每个小区面积为(5×4) m<sup>2</sup>。2020 年 7 月中旬进行育秧,2020 年 8 月初通过人工种植的方式进行水稻插秧移栽。2020 年 9 月 21 日水稻进入分蘖期,对原液稀释 100 倍后,进行人工喷洒。2020 年 10 月 4 日,按照第 1 次喷洒的方式进行第 2 次喷洒。有机硒主要成分为有机硒(含量≥85 g/L)、水不溶物(含量≤10 g/L)、Na(含量≤10 g/L);有机硅主要成分为有机硅(含量≥120 g/L),P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、N、K<sub>2</sub>O,含量均≥170 g/L。2 种试剂中镉(Cd)含量均<10 mg/kg,As 含量均<10 mg/kg。

### 1.2 采样方法与样品分析

1.2.1 样品采集 每个处理采用五点采样法混合采集的 5 株收获期水稻样品,同时每个小区采集 2 份混合土壤,一份为根际土壤,一份为非根际土壤。

水稻样品用去离子水洗净后,放入烘箱 105 ℃ 杀青 30 min,水稻自然风干至恒质量后,将水稻各部位分开后粉碎,土壤样品自然风干后研磨过筛。

1.2.2 样品测定 土壤 pH 值采用电位法测定,土水比为 1 g : 2.5 mL,采用荧光光谱法测定水稻茎、叶总砷(As)和总镉(Cd)含量,土壤和稻米交由广西西大检测有限公司通过电感耦合等离子体原子发射光谱仪测定砷(无机砷)和总镉含量。

### 1.3 数据分析

使用 SPSS 19.0 软件进行方差分析和差异显著性检验(Duncan's 法, $P < 0.05$ )。使用 Excel 2016 进行表格制作。

重金属的富集系数计算公式:重金属富集系数(BCF) = 植株重金属含量(mg/kg)/土壤重金属含量(mg/kg)。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻各部位砷、镉含量的影响

由表 1 可知,喷施有机硒、有机硅后,相较于 CK,水稻茎重金属镉、砷含量差异不明显,3 个处理间镉、砷含量差异均不显著。从单一品种上看施用有机硒、有机硅后,不同处理对不同水稻品种茎镉、砷含量的影响不同。喷施有机硒后,相较于 CK 又香优雅丝苗水稻茎砷含量下降百分比超过 20%,Y 两优 143 水稻茎镉含量下降百分比超过 30.0%,其他品种茎镉、砷含量下降百分比均未超过 20%;喷施有机硅后,相较于 CK 凯丰优 158 和 68 优金占水稻茎砷含量下降百分比超过 20%,又香优龙丝苗水稻茎镉含量下降百分比超过 20%,其他品种茎镉、砷含量下降百分比均未超过 20%。喷施有机硒后,除又香优雅丝苗外,其他品种茎砷含量降低效果不明显,除 Y 两优 143 外,其他品种茎镉含量降低效果不明显;喷施有机硅后,除凯丰优 158 和 68 优金占外,其他品种茎砷含量降低效果不明显,除又香优龙丝苗外,其他品种茎镉含量降低效果不明显。

由表 2 可知,喷施有机硒后,水稻叶重金属砷含量为(0.645 ± 0.184) mg/kg,与 CK 差异不显著。从单一品种上看,喷施有机硒后除桂育 12、又香优雅丝苗 2 个品种水稻叶砷含量下降超过 20% 外,其他品种下降百分比均未超过 20%;喷施有机硅后,水稻叶砷含量为(0.540 ± 0.166) mg/kg,显著低于喷施有机硒和 CK,除 Y 两优 143 和又香优龙丝苗外,其他品种在喷施有机硅后,水稻叶砷含量均有

表1 不同处理水稻茎重金属砷、镉含量

重金属	品种	CK 的重金属含量 (mg/kg)	喷施有机硒(A)		喷施有机硅(B)	
			重金属含量(mg/kg)	增长率(%)	重金属含量(mg/kg)	增长率(%)
As	桂育12	0.367 ± 0.022	0.332 ± 0.015	-9.5	0.390 ± 0.026	6.3
	华浙优1号	0.262 ± 0.163	0.297 ± 0.022	13.4	0.255 ± 0.053	-2.7
	68 优金占	0.347 ± 0.125	0.307 ± 0.140	-11.5	0.277 ± 0.053	-20.1
	凯丰优158	0.232 ± 0.129	0.280 ± 0.226	20.7	0.180 ± 0.113	-22.4
	裕丰优158	0.222 ± 0.121	0.262 ± 0.140	18.0	0.250 ± 0.150	12.6
	Y 两优143	0.325 ± 0.044	0.340 ± 0.048	4.6	0.337 ± 0.027	3.7
	荃香优822	0.347 ± 0.137	0.345 ± 0.075	-0.6	0.337 ± 0.035	-2.9
	又香优龙丝苗	0.252 ± 0.025	0.205 ± 0.083	-18.6	0.247 ± 0.108	-2.0
	又香优雅丝苗	0.240 ± 0.048	0.170 ± 0.100	-29.1	0.202 ± 0.025	-15.8
	野香优明月丝苗	0.205 ± 0.081	0.310 ± 0.063	51.2	0.182 ± 0.118	-11.2
平均值	0.280 ± 0.107a	0.285 ± 0.111a	1.8	0.276 ± 0.116a	-1.42	
Cd	桂育12	0.275 ± 0.042	0.247 ± 0.085	-10.1	0.297 ± 0.069	8.0
	华浙优1号	0.227 ± 0.029	0.240 ± 0.037	5.7	0.222 ± 0.009	-2.2
	68 优金占	0.297 ± 0.055	0.335 ± 0.026	12.8	0.307 ± 0.009	3.4
	凯丰优158	0.332 ± 0.020	0.395 ± 0.020	19.0	0.305 ± 0.035	-8.1
	裕丰优158	0.287 ± 0.058	0.270 ± 0.046	-5.9	0.305 ± 0.023	6.3
	Y 两优143	0.380 ± 0.021	0.262 ± 0.022	-31.0	0.385 ± 0.040	1.3
	荃香优822	0.322 ± 0.012	0.345 ± 0.020	7.1	0.317 ± 0.092	-1.6
	又香优龙丝苗	0.310 ± 0.029	0.302 ± 0.009	-2.6	0.235 ± 0.061	-24.1
	又香优雅丝苗	0.322 ± 0.075	0.355 ± 0.025	10.2	0.300 ± 0.011	-6.8
	野香优明月丝苗	0.312 ± 0.044	0.340 ± 0.021	9.0	0.300 ± 0.068	-3.8
平均值	0.306 ± 0.053a	0.309 ± 0.060a	1.0	0.297 ± 0.061a	-2.9	

注:同行不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。增长率表示与CK相比,处理A、B重金属含量的增长率。表2、表3同。

表2 不同处理水稻叶重金属砷、镉含量

重金属	品种	CK 的重金属含量 (mg/kg)	喷施有机硒(A)		喷施有机硅(B)	
			重金属含量(mg/kg)	增长率(%)	重金属含量(mg/kg)	增长率(%)
As	桂育12	0.722 ± 0.146	0.557 ± 0.177	-22.8	0.522 ± 0.074	-27.7
	华浙优1号	0.717 ± 0.092	0.660 ± 0.081	-7.9	0.525 ± 0.067	-26.7
	68 优金占	0.640 ± 0.066	0.710 ± 0.287	10.9	0.537 ± 0.165	-16.0
	凯丰优158	0.512 ± 0.138	0.810 ± 0.024	58.2	0.352 ± 0.167	-31.2
	裕丰优158	0.590 ± 0.050	0.532 ± 0.206	-9.8	0.532 ± 0.076	-9.8
	Y 两优143	0.520 ± 0.071	0.597 ± 0.092	14.8	0.770 ± 0.050	48.1
	荃香优822	0.585 ± 0.012	0.802 ± 0.063	37.1	0.555 ± 0.083	-5.1
	又香优龙丝苗	0.777 ± 0.035	0.627 ± 0.068	-19.3	0.805 ± 0.028	3.6
	又香优雅丝苗	0.607 ± 0.080	0.355 ± 0.047	-41.5	0.452 ± 0.038	-25.5
	野香优明月丝苗	0.912 ± 0.086	0.797 ± 0.109	-12.6	0.352 ± 0.089	-61.4
平均值	0.658 ± 0.180a	0.645 ± 0.184a	-2.0	0.540 ± 0.166b	-17.9	
Cd	桂育12	0.155 ± 0.020	0.095 ± 0.010	-38.7	0.167 ± 0.015	7.7
	华浙优1号	0.237 ± 0.029	0.220 ± 0.024	-7.2	0.282 ± 0.049	19.0
	68 优金占	0.192 ± 0.039	0.150 ± 0.024	-21.8	0.142 ± 0.012	-26.0
	凯丰优158	0.267 ± 0.038	0.232 ± 0.017	-13.1	0.277 ± 0.042	3.7
	裕丰优158	0.240 ± 0.043	0.147 ± 0.069	-38.7	0.187 ± 0.012	-22.0
	Y 两优143	0.237 ± 0.085	0.310 ± 0.008	30.8	0.212 ± 0.022	-10.5
	荃香优822	0.232 ± 0.022	0.107 ± 0.020	-53.8	0.200 ± 0.029	-13.7
	又香优龙丝苗	0.227 ± 0.009	0.225 ± 0.058	-0.9	0.217 ± 0.035	-4.4
	又香优雅丝苗	0.292 ± 0.030	0.257 ± 0.034	-11.9	0.235 ± 0.036	-19.5
	野香优明月丝苗	0.342 ± 0.015	0.262 ± 0.037	-23.3	0.307 ± 0.022	-10.2
平均值	0.242 ± 0.060a	0.200 ± 0.075b	-17.3	0.223 ± 0.057ab	-7.9	

所降低,其中野香优明月丝苗效果最好,相对于 CK 砷含量下降了 61.4%。喷施有机硒后,水稻叶镉含量为(0.200 ± 0.075) mg/kg,显著低于 CK,除 Y 两优 143 和又香优龙丝苗外,其他品种在喷施有机硒后,水稻叶镉含量均有明显降低,其中荃香优 822 效果最好,相对于 CK 镉含量下降了 53.8%;喷施有机硅后水稻叶镉含量为(0.223 ± 0.057) mg/kg,与喷施有机硒和 CK 相比含量差异不显著,除水稻品种 68 优金占、裕丰优 158 效果较为明显外,其他品种水稻叶镉含量下降均未超过 20%。综上所述,与 CK 处理相比,除 Y 两优 143 和又香优龙丝苗品种外,水稻叶面喷施有机硅可以有效降低水稻叶砷含量,除 Y 两优 143 和又香优龙丝苗品种外,叶面喷施有机硒可以有效降低水稻叶镉含量。

由表 3 可知,喷施有机硒、有机硅后水稻稻米重金属砷含量分别为(0.219 ± 0.057)、(0.185 ± 0.078) mg/kg,均显著低于 CK;喷施有机硒后,水稻稻米重金属砷含量相较于 CK 下降了 17.0%,除裕丰优 158 外,其他品种在喷施有机硒后,水稻稻米重金属砷含量均有所降低,其中桂育 12 和又香优雅丝苗作用效果最明显,稻米重金属砷含量下降了

27.8%;喷施有机硅后,水稻稻米重金属砷含量相较于 CK 下降了 29.9%,其中桂育 12 作用效果最明显,砷含量下降了 54.4%。喷施有机硒、有机硅后水稻稻米重金属镉含量分别为(0.100 ± 0.025)、(0.101 ± 0.026) mg/kg,两者均显著低于 CK;喷施有机硒后,水稻稻米重金属镉含量相较于 CK 下降了 44.8%,其中又香优雅丝苗作用效果最明显,含量下降了 63.8%;喷施有机硅后,水稻稻米重金属镉平均含量相较于 CK 下降了 44.2%,其中又香优雅丝苗作用效果最明显,稻米重金属镉含量下降了 58.1%。综上所述,与 CK 相比,除喷施有机硒未能降低水稻品种裕丰优 158 稻米砷含量外,喷施有机硒、有机硅均可以有效降低水稻稻米对砷和镉的含量,降低水稻稻米重金属砷和镉的吸收。

## 2.2 不同处理对水稻植株各部位重金属富集的影响

重金属富集系数(BCF)代表水稻植株各部位对土壤重金属的吸收富集能力,是指各部位重金属含量与土壤中重金属含量的比值,富集系数越大说明富集重金属的能力越强。由表 4 可知,在 CK 中水稻茎、叶、稻米对砷的富集系数分别为 0.021 ± 0.008、0.049 ± 0.012、0.020 ± 0.005,对镉的富集系

表 3 不同处理水稻稻米重金属砷、镉含量

重金属	品种	CK 的重金属含量 (mg/kg)	喷施有机硒(A)		喷施有机硅(B)		
			重金属含量(mg/kg)	增长率(%)	重金属含量(mg/kg)	增长率(%)	
As	桂育 12	0.312 ± 0.029	0.225 ± 0.044	-27.8	0.142 ± 0.061	-54.4	
	华浙优 1 号	0.280 ± 0.018	0.245 ± 0.073	-12.5	0.195 ± 0.098	-30.3	
	68 优金占	0.262 ± 0.015	0.202 ± 0.022	-22.9	0.172 ± 0.067	-34.3	
	凯丰优 158	0.227 ± 0.039	0.192 ± 0.035	-15.4	0.167 ± 0.109	-26.4	
	裕丰优 158	0.200 ± 0.048	0.232 ± 0.038	16.0	0.180 ± 0.068	-10.0	
	Y 两优 143	0.237 ± 0.110	0.190 ± 0.049	-19.8	0.167 ± 0.057	-29.5	
	荃香优 822	0.220 ± 0.027	0.195 ± 0.079	-11.3	0.180 ± 0.074	-18.1	
	又香优龙丝苗	0.262 ± 0.053	0.225 ± 0.054	-14.1	0.182 ± 0.068	-30.5	
	又香优雅丝苗	0.395 ± 0.036	0.285 ± 0.042	-27.8	0.265 ± 0.128	-32.9	
	野香优明月丝苗	0.245 ± 0.041	0.197 ± 0.087	-19.5	0.197 ± 0.058	-19.5	
	平均值	0.264 ± 0.068a	0.219 ± 0.057b	-17.0	0.185 ± 0.078c	-29.9	
	Cd	桂育 12	0.135 ± 0.017	0.09 ± 0.014	-33.3	0.082 ± 0.015	-39.2
		华浙优 1 号	0.150 ± 0.036	0.095 ± 0.005	-36.6	0.097 ± 0.045	-35.3
68 优金占		0.167 ± 0.035	0.097 ± 0.025	-41.9	0.097 ± 0.012	-41.9	
凯丰优 158		0.235 ± 0.027	0.102 ± 0.009	-56.5	0.102 ± 0.020	-56.5	
裕丰优 158		0.150 ± 0.014	0.097 ± 0.032	-35.3	0.095 ± 0.017	-36.6	
Y 两优 143		0.157 ± 0.041	0.127 ± 0.053	-19.1	0.140 ± 0.031	-10.8	
荃香优 822		0.170 ± 0.049	0.100 ± 0.029	-41.1	0.085 ± 0.005	-50.0	
又香优龙丝苗		0.167 ± 0.037	0.105 ± 0.025	-37.1	0.097 ± 0.017	-41.9	
又香优雅丝苗		0.227 ± 0.018	0.082 ± 0.009	-63.8	0.095 ± 0.019	-58.1	
野香优明月丝苗		0.252 ± 0.017	0.102 ± 0.018	-59.5	0.117 ± 0.033	-53.5	
平均值		0.181 ± 0.030a	0.100 ± 0.025b	-44.8	0.101 ± 0.026b	-44.2	

数分别为  $0.143 \pm 0.031$ 、 $0.112 \pm 0.029$ 、 $0.084 \pm 0.024$ , 水稻各个部位对镉的富集明显高于对砷的富集, 水稻地上各部位砷、镉的富集系数大小顺序分别为叶 > 茎 > 稻米、茎 > 叶 > 稻米。与 CK 相比, 喷施有机硒、有机硅后, 水稻茎对镉、砷的富集系数差异不明显; 施用有机硅水稻叶对砷的富集系数显著低于喷施有机硒, 但 2 个处理相较于 CK 差异不显著; 与喷施有机硒和 CK 相比, 喷施有机硅可以显著降低水稻稻米对砷的富集; 喷施有机硒、有机硅后, 水稻叶和稻米对镉的富集系数均显著低于 CK。综上所述, 喷施有机硒、有机硅不能有效降低茎对镉、砷的富集, 但二者可以有效降低水稻叶和稻米对镉的富集, 同时有机硅还可以有效降低水稻叶和稻米对砷的富集。

表 4 不同处理对水稻重金属富集系数 (BCF) 的影响

重金属	处理	富集系数 (BCF)		
		茎	叶	稻米
As	CK	0.021 ± 0.008a	0.049 ± 0.012ab	0.020 ± 0.005a
	有机硒 (A)	0.024 ± 0.009a	0.054 ± 0.016a	0.019 ± 0.004a
	有机硅 (B)	0.023 ± 0.010a	0.046 ± 0.014b	0.015 ± 0.006b
	平均值	0.023 ± 0.009	0.050 ± 0.014	0.017 ± 0.005
Cd	CK	0.143 ± 0.031a	0.112 ± 0.029a	0.084 ± 0.024a
	有机硒 (A)	0.137 ± 0.026a	0.089 ± 0.035b	0.044 ± 0.012b
	有机硅 (B)	0.131 ± 0.029a	0.098 ± 0.025b	0.044 ± 0.010b
	平均值	0.137 ± 0.029	0.100 ± 0.031	0.057 ± 0.025

注: 同列数据后不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ )。表 5 同。

### 2.3 不同处理对水稻根际土壤 pH 值及砷、镉含量的影响

由表 5 可知, 相较于 CK, 喷施有机硒、有机硅后, 3 个处理间水稻根际土壤 pH 值差异不显著。喷施有机硒、有机硅后, 水稻根际土壤砷、镉含量与 CK 差异均不显著。说明, 水稻叶面喷施有机硒、有机硅对根际土壤砷、镉含量、根际土壤 pH 值无显著影响。

表 5 不同处理对水稻根际土壤 pH 值及砷、镉含量的影响

处理	pH 值	As 含量 (mg/kg)	Cd 含量 (mg/kg)
CK	7.99 ± 0.11a	13.73 ± 1.54a	2.22 ± 0.18a
有机硒 (A)	8.00 ± 0.14a	13.88 ± 1.08a	2.20 ± 0.10a
有机硅 (B)	7.98 ± 0.11a	13.82 ± 1.31a	2.21 ± 0.13a
平均值	7.99 ± 0.12	13.81 ± 1.31	2.21 ± 0.14

## 3 讨论与结论

硒作为水稻生长的有益元素, 刘波等研究证

明<sup>[12]</sup>, 由于硒与重金属能结合生成一种较稳定的复合物, 同时不易被水稻根系吸收, 因此硒可以缓解重金属对水稻的毒害<sup>[13]</sup>。与上述结果相同, 本研究实验结果显示, 除裕丰优 158 外, 水稻叶面喷施有机硒后, 可以很好地降低水稻稻米砷、镉的含量, 相较于 CK, 稻米砷含量下降了 17.0%, 镉含量下降了 44.8%, 表明水稻叶面施用有机硒后可以降低稻米重金属含量, 主要是由于有机硒试剂溶液能够调节水稻体内活性氧和抗氧化酶的活性, 进而诱导褪黑素参与抑制重金属镉的吸收, 从而降低重金属镉向稻米中迁移和富集<sup>[14-15]</sup>。同时本研究发现, 除 Y 两优 143 外, 其他品种在喷施有机硒后, 水稻叶镉含量均有所降低, 相较于 CK, 水稻叶镉含量下降了 17.3%。水稻叶面喷施有机硒后, 对水稻叶砷的累积影响不大, 其含量相较于 CK 差异不显著。

硅是对水稻的有益元素, 有研究表明, 硅元素被水稻吸收后可以阻止重金属镉向地上部的迁移<sup>[16-18]</sup>。叶面施硅可以显著缓解重金属对水稻的毒害, 降低重金属进入食物链的风险<sup>[19-20]</sup>。本研究结果表明, 水稻叶面喷施有机硅后, 可以很好地降低水稻稻米砷、镉的含量, 相较于 CK, 稻米砷含量下降了 29.9%, 镉含量下降了 44.2%, 除 Y 两优 143 和又香优龙丝苗外, 其他品种在喷施有机硒后, 水稻叶砷含量均有所降低, 相较于 CK 水稻叶砷含量下降了 17.9%。同时本研究发现, 水稻叶面喷施有机硅后, 对水稻叶镉的累积影响不大, 其含量相较于 CK 处理差异不显著。水稻叶面施用硅肥后可以降低稻米重金属含量, 主要是由于施用硅肥可以降低水稻细胞膜的透性, 同时提高了水稻叶片的叶绿素含量, 从而有效降低水稻重金属含量; 另外硅在水稻地上部的沉淀阻止了重金属向水稻地上部的迁移<sup>[10,21]</sup>。

有研究发现, 硅、硒经叶面吸收后; 在减少叶片中镉富集的同时并未减少根系对镉的吸收, 而经根系吸收的镉主要富集于根和茎中, 因此水稻茎中镉的含量均未显著降低<sup>[11,15,22]</sup>。与上述结果相同, 本研究实验结果也表明, 施用有机硅、有机硒后均对水稻茎砷、镉的累积影响不大, 其含量相较于 CK 差异均不显著。

重金属在水稻茎、叶、稻米的累积量有所不同<sup>[23]</sup>, 各个部位镉含量遵循茎 ≥ 叶 > 稻米的规律, 各处理水稻不同部位的砷含量均表现为茎叶 > 籽粒<sup>[24-25]</sup>。上述研究结果与本研究结果相似, 在 CK 处理中, 10 个水稻品种中, 茎、叶和稻米镉平均含量分别为 ( $0.306 \pm 0.053$ )、( $0.242 \pm 0.060$ )、( $0.181 \pm$

0.030) mg/kg, 富集系数分别为  $0.143 \pm 0.031$ 、 $0.112 \pm 0.029$ 、 $0.084 \pm 0.024$ , 茎对镉的富集能力明显高于叶和稻米, 叶镉的富集能力明显高于稻米, 镉在水稻中的富集规律为茎 > 叶 > 稻米; 10 个水稻品种茎、叶和稻米砷平均含量分别为 ( $0.280 \pm 0.107$ )、( $0.658 \pm 0.180$ )、( $0.264 \pm 0.068$ ) mg/kg, 富集系数分别为  $0.021 \pm 0.008$ 、 $0.049 \pm 0.012$ 、 $0.020 \pm 0.005$ , 茎、叶对砷富集能力高于和稻米, 水稻茎、叶富集砷的能力与镉不同, 水稻叶对砷的富集能力明显高于茎, 砷在水稻中的富集规律为叶 > 茎 > 稻米。同时本研究发现, 水稻各个部位对镉的富集系数高于砷, 水稻对镉的富集能力大于砷。

喷施硅叶面肥后土壤 pH 值并未发生变化, 根系对土壤重金属镉的吸收并未减少, 土壤重金属镉含量较对照差异不显著<sup>[26]</sup>。与上述结果相同, 本研究在喷施有机硒、有机硅后, 根际土壤 pH 值未发生显著变化, 且土壤砷、镉含量并未减少。

本研究结果表明, 喷施有机硒、有机硅后, 均能显著降低稻米砷、镉含量, 降低水稻稻米对镉的富集。喷施有机硒后, 水稻叶镉含量均有所降低, 喷施有机硅后, 水稻叶砷含量均有所降低。镉在水稻中的富集规律为茎 > 叶 > 稻米; 砷在水稻中的富集规律为叶 > 茎 > 稻米。喷施有机硒、有机硅后, 土壤根际土壤 pH 值未发生显著变化, 且土壤砷、镉含量并未减少。因此, 施用有机硒(A)、有机硅(B)均可以抑制重金属砷、镉在水稻稻米中的富集, 且有机硒(A)可以抑制重金属镉在水稻叶的富集, 有机硅(B)可以抑制重金属砷在水稻叶的富集。

#### 参考文献:

- [1] 施亚星, 吴绍华, 周生路, 等. 土壤-作物系统中重金属元素吸收、迁移和积累过程模拟[J]. 环境科学, 2016, 37(10): 3996-4003.
- [2] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [3] 程菁靓, 赵龙, 杨彦, 等. 我国长江中下游水稻产区铅污染分区划分方法研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 70-78.
- [4] 李超, 艾绍英, 唐明灯, 等. 矿物调理剂对稻田土壤镉形态和水稻镉吸收的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11): 2143-2154.
- [5] Yu H Y, Ding X D, Li F B, et al. The availabilities of arsenic and cadmium in rice paddy fields from a mining area: the role of soil extractable and plant silicon[J]. Environmental Pollution, 2016, 215: 258-265.
- [6] Davis C D, Tsuji P A, Milner J A. Selenoproteins and cancer prevention[J]. Annual Review of Nutrition, 2012, 32: 73-95.
- [7] Oliver D P, Wilhelm N S, Tiller K G, et al. Effect of soil and foliar applications of zinc on cadmium concentration in wheat grain[J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 1997, 37(6): 677.
- [8] 胡莹, 黄益宗, 黄艳超, 等. 硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(10): 4119-4125.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 等. 镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5545-5553.
- [12] 刘波, 黄道友, 周建利, 等. 硒与黄腐酸组配对水稻镉吸收的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 350-355, 362.
- [13] 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, 235/236: 343-351.
- [14] Ahmad P, Abd Allah E F, Hashem A, et al. Exogenous application of selenium mitigates cadmium toxicity in *Brassica juncea* L. (czern & cross) by up-regulating antioxidative system and secondary metabolites[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(4): 936-950.
- [15] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil[J]. Journal of Environmental Sciences, 2009, 21(2): 168-172.
- [16] 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.
- [17] 徐向华, 刘传平, 唐新莲, 等. 叶面喷施硒硅复合溶胶抑制水稻砷积累效应研究[J]. 生态环境学报, 2014, 23(6): 1064-1069.
- [18] 余侃, 肖秋水, 黄思思, 等. 生物有机硒对不同水稻品种主要性状、重金属含量及硒吸收的影响[J]. 南方农业学报, 2021, 52(5): 1206-1214.
- [19] 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.
- [20] 潘荣庆, 蓝清琛, 何卿姮, 等. 不同水稻品种及阻控剂对水稻各部位累积镉的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(2): 247-252.
- [21] 秦淑琴, 黄庆辉. 硅对水稻吸收镉的影响[J]. 塔里木农垦大学学报, 1996, 8(2): 17-20.
- [22] Feng R W, Wei C Y, Tu S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 87: 58-68.
- [22] 周金林, 陈能, 郭望模. 大田双季种植植稻籽粒镉积累差异研究[J]. 湖南农业科学, 2013(11): 26-28.
- [24] 陈慧茹, 董亚玲, 王琦, 等. 重金属污染土壤中 Cd、Cr、Pb 元素向水稻的迁移累积研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(12): 236-241.
- [25] 崔晓葵, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177-2184.
- [26] 杨扬, 高莉莉, 张慧, 等. 不同淹水处理对水稻体内砷富集的影响[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(23): 58-62.