

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 Min, ZHOU Jun, LIU Hai-long, 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.

叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏^{1,2,3}, 周俊^{1,2,3}, 刘海龙^{1,2,3}, 胡远妹^{1,2,3}, 徐磊^{1,2,3}, 梁家妮^{1,2,3}, 黄贵凤⁵, 周静^{1,3,4*}

(1. 中国科学院南京土壤研究所土壤环境与污染修复重点实验室, 南京 210008; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 国家红壤改良工程技术研究中心, 中国科学院红壤生态实验站, 江西 鹰潭 335211; 4. 江西省重金属污染生态修复工程技术研究中心, 南昌 330096; 5. 贵溪市环境保护局, 江西 贵溪 335400)

摘要:为研究水稻叶面喷施硅硒溶液联合稻田不同水分管理对中轻度镉污染农田水稻镉吸收转运特征的影响,在田间设置4种叶面喷施处理和2种水分管理交互的裂区试验,共8个处理:稻田常规水分管理下,叶面喷施去离子水(W1CK)、硅溶胶(W1Si)、亚硒酸钠溶液(W1Se)、硅硒等体积混合液(W1SS);孕穗后期稻田持续淹水管理下,叶面喷施去离子水(W2CK)、硅溶胶(W2Si)、亚硒酸钠溶液(W2Se)、硅硒等体积混合液(W2SS)。结果表明,叶面喷施硅硒溶液处理和孕穗后期淹水处理对水稻生长和产量性状均没有显著影响。常规水分管理下,与对照W1CK处理相比,W1Si和W1Se处理分别降低水稻糙米中镉含量的71.7%和61.9% ($P < 0.01$),同时镉从水稻根到茎的转运系数分别降低27.4%和34.5%,从茎到叶的转运系数分别增加46.5%和55.3%。孕穗后期持续淹水管理下,W2CK处理与W1CK处理相比糙米镉含量降低57.5% ($P < 0.05$),而叶面喷施硅硒溶液处理组与W2CK相比,糙米中镉的含量没有显著差异 ($P > 0.05$)。水稻叶面喷施硅硒溶液和孕穗后期稻田持续淹水,可以有效阻止镉在水稻体内的迁移,显著降低水稻糙米对镉的积累。叶面喷施硅硒联合稻田孕穗后期淹水管理对水稻糙米降镉效果未见协同效应。

关键词:叶面喷施; 硅; 硒; 水稻; 镉; 水分管理

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)02-0215-08 doi:10.11654/jaes.2017-1201

Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management

GAO Min^{1,2,3}, ZHOU Jun^{1,2,3}, LIU Hai-long^{1,2,3}, HU Yuan-mei^{1,2,3}, XU Lei^{1,2,3}, LIANG Jia-ni^{1,2,3}, HUANG Gui-feng⁵, ZHOU Jing^{1,3,4*}

(1. Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. National Engineering and Technology Research Center for Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan 335211, China; 4. Jiangxi Heavy Metal Pollution Ecological Restoration Engineering Technology Research Center, Nanchang 330096, China; 5. Guixi Environmental Protection Agency, Guixi 335400, China)

Abstract: The aim of the present study was to investigate the combined effect of foliar applications and water management on the uptake and transport of cadmium by rice. Field experiments were conducted to test the interactive effects of four foliar treatments and two water treatments, foliar treatments included deionized water (W1CK), a silica solution (W1Si), a sodium selenite solution (W1Se), and a 1:1 mixture of the silicon and selenium solutions (W1SS), two water treatments included conventional water management and continuous flooding during

收稿日期: 2017-09-03 录用日期: 2017-11-22

作者简介: 高敏(1991—),女,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染修复。E-mail: mgao@issas.ac.cn

*通信作者: 周静 E-mail: zhoujing@issas.ac.cn

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAD05B01); “973”项目(2013CB934302); 国家自然科学基金项目(4157146)

Project supported: National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (2015BAD05B01); National Key Basic Research Program of China (973 Program) (2013CB934302); The National Natural Science Foundation of China (4157146)

the late booting stage. Neither foliar spraying nor flooding had a significant effect on the growth or yield of brown rice. However, under conventional water management, the W1Si and W1Se treatments reduced the cadmium content of the brown rice by 71.7% and 61.9% ($P < 0.01$), respectively, when compared to the control treatment (W1CK), and the root-to-stem transfer coefficient decreased by 27.4% and 34.5%, respectively, whereas the stem-to-leaf transfer coefficient increased by 46.5% and 55.3%, respectively. Under continuous flooding during the late booting stage, the W2CK treatment reduced the cadmium content of the brown rice by 57.5% ($P < 0.01$), when compared to W1CK treatment, whereas the W2Si, W2Se, and W2SS treatments had no significant effect ($P > 0.05$). Even though the foliar Si and Se sprays and continuous flooding during the booting stage could both be used to prevent the migration of cadmium in rice plants and to reduce the accumulation of cadmium in brown rice, the combination of foliar treatment and water management failed to exhibit a synergistic effect on the cadmium content of brown rice.

Keywords: foliar spray; silica; selenite; rice; cadmium; water management

镉是人体非必需且生物毒性很强的重金属元素^[1],也是土壤中重要污染物之一,即使较低的镉浓度对土壤生物活性、多样性、植物生长甚至是人体健康都有严重威胁^[2-3]。水稻是世界主要的粮食产物,土壤镉污染会造成稻米镉含量超过粮食安全国家标准($Cd < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),食用镉超标大米是人体镉积累的主要来源^[4-5],对人体健康造成严重危害。土壤镉污染转移到食物链是一个全球环境问题,近年来稻米镉超标问题引起了广泛关注^[4,6-7]。

硅是一种常见的类金属元素,虽然不是植物生长发育所必需的,但其能促进植物生长,提高植物生长的抗逆性^[8],在缓解土壤重金属镉对植物的毒害过程中扮演着重要角色^[9]。然而,中国南方土壤中由于脱硅富铁铝化作用,植物可利用性硅含量较少^[9],适当提高植物可利用硅含量,对植物阻控镉污染具有一定积极作用^[10]。硒是人类和动物的必需微量元素,其可以减轻镉、砷、汞等多种重金属的毒性,并且是抗氧化酶(谷胱甘肽过氧化物酶和硫氧还蛋白还原酶)的活性中心^[11],可通过改变抗氧化酶的活性和对营养元素的吸收提高植物的抗性^[12]。与传统的土壤施肥相比,叶面施肥是作物吸收营养元素的方式之一,通过向水稻叶面喷施硅和硒是增加水稻硅、硒营养来源的有效途径。研究表明,喷施叶面肥能显著降低水稻对镉的吸收^[13]。此外,在水稻的全生育期进行淹水也能够有效阻控土壤中的有效态镉向水稻地上部运输^[14],但叶面阻控技术联合水分管理对稻米镉阻控效果的报道不

多。本文针对我国南方典型的中轻度镉污染农田,研究叶面喷施硅硒阻控剂联合水分管理对稻米镉吸收及转运特征的影响,为重金属污染农田的稻米安全生产技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验区位于江西省鹰潭市贵溪市江南村(东经 $117^{\circ}11'54''$,北纬 $28^{\circ}17'27''$),该地区为亚热带季风气候,年平均降水量 $1\,881.8 \text{ mm}$,年平均气温 18.4°C 。根据中国土壤分类系统中的系统分类,供试土壤属于铁渗水耕人为土,其基本理化性质列于表 1,根据中国土壤环境质量标准(GB 15618—2008),属于镉中轻度污染。供试晚稻品种为五优华占,是江西省农业厅 2016 年主推品种,属于三系杂交迟熟偏早晚稻品种。

本试验共设置了 8 个处理,其操作规程见表 2。试验小区面积 $16 \text{ m}^2 (4 \text{ m} \times 4 \text{ m})$,每个处理 3 个重复,随机区组排列,四周设保护行。每个小区均单设进、排水口,田埂用 6 丝的聚乙烯薄膜相互间隔至犁底层,以防止水、肥相互渗透,施肥参照当地水稻的常规施肥,以水稻专用复合肥作基肥,施用量为 $600 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分蘖期追施尿素 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,水稻育苗前用 5%次氯酸钠溶液对水稻种子表面消毒 15 min,用自来水冲洗后催芽。水稻长至二叶一心时选均匀一致的幼苗进行移栽,移栽时间为 2016 年 7 月 22 日,水稻收获时间为 2016 年 11 月 4 日。叶面喷施硅溶胶阻控剂的制备

表 1 供试土壤基本理化性质
Table 1 Characteristics of the tested soil

有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	活性硅/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH	全镉/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
29.50	1.75	1.02	11.3	213.15	27.26	107.50	35.42	5.53	0.82

表 2 试验处理及操作规程
Table 2 Treatments and experimental design

处理名称	具体操作规程
W1CK	常规水分管理,即在水稻分蘖期晒田 7 d,灌浆到成熟期晒田 15 d,其他时期保持 3~4 cm 水层,叶面喷施等量去离子水
W1Si	常规水分管理+叶面喷施 2.5 mmol·L ⁻¹ 硅溶胶
W1Se	常规水分管理+叶面喷施 40 mg·L ⁻¹ 亚硒酸钠溶液
W1SS	常规水分管理+叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液等体积混合液
W2CK	孕穗后期持续淹水,即除分蘖期有 7 d 晒田外,其他时期均保持 3~4 cm 水层,叶面喷施等量去离子水
W2Si	孕穗后期持续淹水+叶面喷施 2.5 mmol·L ⁻¹ 硅溶胶
W2Se	孕穗后期持续淹水+叶面喷施 40 mg·L ⁻¹ 亚硒酸钠溶液
W2SS	孕穗后期持续淹水+叶面硅溶胶和亚硒酸钠溶液等体积混合液

是通过改进的 Liu 等^[15]的制备方法,即将 22.4 mL 正硅酸乙酯(TEOS)与 22 mL 水混合,然后缓慢加入 440 mL 乙醇和 10 mL 盐酸,将混合物在室温下搅拌 2 h,然后在 40 ℃下搅拌 6 h,定容至 1 L,得到 50 mmol·L⁻¹ SiO₂ 溶胶储备液,使用前稀释 20 倍得到含 2.5 mmol·L⁻¹ SiO₂ 溶胶。叶面喷施亚硒酸钠溶液的配制为溶解 40 mg 亚硒酸钠固体于 1 L 水中。叶面喷施硅硒等体积混合阻控剂的配制是将以上硅溶胶和亚硒酸钠溶液两者等体积混合。硅溶胶、亚硒酸钠溶液、硅硒等体积混合液的 pH 值分别为 2.33、8.27、2.81,其粒径分布由动态光散射仪(DLS, Nanobrook 90 Plus PALS)测定,结果如图 1 所示。

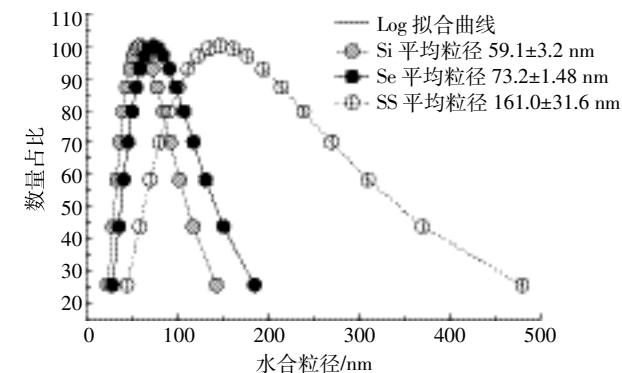


图 1 三种叶面喷施溶液的粒径

Figure 1 Particle size of the three foliar spray solutions

所有处理的叶面喷施量均为 100 mL·m⁻²,并于喷施前每升加入 1 mL 吐温 80,以便于被植物附着。叶面喷施时期为水稻分蘖盛期 2016 年 8 月 31 日和齐穗期 2016 年 9 月 23 日,根据当地叶面肥喷施习惯,选择下午 4 时左右进行喷施。

1.2 样品采集与分析

水稻样品于成熟期采集,每小区随机取 6 株,考察有效分蘖数、有效穗数、穗粒数、千粒重和结实率等

产量构成因素。植株分为根、茎、叶和籽粒,样品用去离子水冲洗后,在 105 ℃下杀青 30 min,然后在 75 ℃下烘干至恒重,称重、粉碎过 60 目筛。植物样品中的镉含量通过 HNO₃-HClO₄(V:V=4:1)消解后,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(Optima 8000, USA)测定。实验中使用购于北京物理与地球化学研究所的分析标准物质菠菜(GBW10015)以及空白样对实验误差进行校正。

1.3 相关参数计算

不同处理组的统计分析及方差分析(Turkey HSD)由 IBM SPSS[®] Statistics 22.0(SPSS, USA)软件计算。使用 Origin 9.0 作图, R 语言 ade4 程序包进行主成分分析。

转运系数(TF_{根到茎})=水稻茎中镉浓度(mg·kg⁻¹)/水稻根中镉浓度(mg·kg⁻¹)

转运系数(TF_{茎到糙米})=水稻糙米中镉浓度(mg·kg⁻¹)/水稻茎中镉浓度(mg·kg⁻¹)

转运系数(TF_{茎到叶})=水稻叶中镉浓度(mg·kg⁻¹)/水稻茎中镉浓度(mg·kg⁻¹)

2 结果与分析

2.1 叶面喷施硅硒溶液联合水分管理对水稻产量及其构成要素的影响

由表 3 可知,常规水分管理下,与对照 W1CK 处理相比,叶面喷施处理 W1Se、W1Si、W1SS 显著提高水稻穗粒数 16.0%~18.6%(P<0.05),而对水稻产量、有效穗数、结实率及千粒重等要素均没有显著影响(P>0.05);孕穗后期持续淹水管理下,与对照 W1CK 处理相比,W2CK、W2Si 和 W2Se 处理显著提高水稻穗粒数 21.1%~29.5%(P<0.05)。两种水分管理条件下,叶面喷施处理对其他产量构成要素如水稻有效穗数、结实率以及千粒重等均有一定提高,但结果并不

表 3 不同处理对水稻产量及其构成要素的影响

Table 3 Effects of foliar treatment and water management on the grain yield of rice

处理	产量/g·株 ⁻¹	有效穗/穗·株 ⁻¹	穗粒数/个·穗 ⁻¹	结实率/%	千粒重/g
W1CK	86.59±8.90a	25±2.52a	156±4.77c	0.82±0.02a	26.58±1.27a
W1Se	97.37±34.30a	25±6.56a	182±6.60b	0.87±0.04a	24.02±3.24a
W1Si	111.97±20.03a	27±3.22a	181±3.93b	0.86±0.05a	26.64±0.12a
W1SS	99.36±12.50a	25±1.53a	185±6.54ab	0.86±0.03a	24.78±3.51a
W2CK	106.36±6.41a	25±1.73a	190±13.45ab	0.86±0.02a	25.91±1.20a
W2Se	109.00±10.77a	23±1.53a	202±4.04a	0.89±0.02a	26.31±1.31a
W2Si	109.00±11.63a	26±2.65a	189±2.08ab	0.85±0.04a	25.92±0.63a
W2SS	96.35±6.33a	26±2.68a	172±5.57bc	0.87±0.01a	24.43±3.17a

注:同一列数据后的不同字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$), $n=3$ 。
Note: Values followed by different letters within a column differ significantly, at the 0.05 level, $n=3$.

显著($P>0.05$)。综上所述,与对照 W1CK 相比,除了 W2SS 处理的各处理均能显著提高水稻穗粒数,而其他水稻产量构成要素在各处理间则没有显著差异($P>0.05$)。

2.2 叶面喷施硅硒溶液联合水分管理对水稻各器官镉含量的影响

由图 2 可知,常规水分处理下,与 W1CK 对照处理相比,W1Si 处理水稻糙米镉含量显著降低 71.7% ($P<0.01$),W1Se 处理糙米镉含量显著降低 61.9% ($P<0.05$),W1SS 处理稻米镉含量显著降低 36.9% ($P<0.05$)(图 2A),同时 W1Si、W1Se、W1SS 处理分别降低水稻根系镉含量 45.8%、26.8%、25.3% ($P<0.05$)(图 2B),分别降低水稻茎镉含量 59.7%、51.0%、24.7% ($P<0.05$)(图 2D),W1Si 处理显著降低水稻叶片镉含量 37.9%,W1Se 处理和 W1SS 处理对水稻叶片镉含量没有显著影响($P>0.05$)(图 2C)。孕穗后期持续淹水处理下,W2CK 与 W1CK 对照处理相比水稻糙米中镉含量降低 57.5% ($P<0.05$),同时根镉含量也显著降低 ($P<0.05$),茎和叶中镉含量则没有显著差异($P>0.05$); W2Si、W2Se 处理与 W2CK 处理相比,水稻茎中镉含量显著降低,根、叶片、糙米中镉含量均没有显著差异 ($P>0.05$),W2SS 处理与 W2CK 处理相比水稻糙米和茎中镉的含量显著提高 ($P<0.05$),水稻茎中镉含量也提高 27.4%,但两者差异不显著。综上所述,常规水分管理下,叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液能够有效降低水稻对镉的吸收;稻田孕穗后期持续淹水处理也是能够有效降低水稻镉吸收的另外一种方式;叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液联合稻田孕穗后期持续淹水管理显著降低水稻对镉的吸收,但是其降低的效果与两种措施单独使用效果一致,未见协同效应。

2.3 叶面喷施硅硒溶液联合水分管理对水稻镉转运系数的影响

重金属转运系数(TF)反映重金属在植物体内的转运,是判断植物吸收、分配与转运重金属的一个重要指标。由图 3 可知,水稻重金属镉转运系数大小排序为 $TF_{根到茎}>TF_{茎到叶}>TF_{茎到糙米}$ 。与对照 W1CK 处理相比,W1Se、W2Si 和 W2Se 处理均能显著降低 $TF_{根到茎}$,分别降低 34.5%、31.4%和 34.0% ($P<0.05$),其他处理对 $TF_{根到茎}$ 没有显著影响。叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液在稻田两种水分管理方式下均能提高 $TF_{茎到叶}$,其中叶面喷施硅溶胶达到显著水平,即与对照 W1CK 处理相比,W1Si 处理和 W2Si 处理分别提高 $TF_{茎到叶}$ 55.3% 和 55.9% ($P<0.05$),其他处理对 $TF_{茎到叶}$ 没有显著影响。W2CK 处理与 W1CK 处理相比, $TF_{茎到糙米}$ 显著降低 47.3% ($P<0.05$),而其他处理对 $TF_{茎到糙米}$ 没有显著影响 ($P>0.05$)。

2.4 不同处理与水稻镉含量及转运系数的主成分分析(PCA)

为进一步表明不同处理水稻吸收镉的影响,对 8 个处理下水稻各部分镉含量、转运系数以及产量要素的结果进行了主成分分析(图 4)。将 360 个数据基于维度简化方法进行主成分分析,结果显示前两个主要成分(PC1 和 PC2)可以解释的累积贡献率为 63.3%,分别占变异的 50.1%和 13.2%。由图 4 可知,W2CK 处理与 W1CK 处理(图中实线圈部分)分布在不同的区域,说明孕穗后期持续淹水处理与常规水分处理有较大的差异;W1Si 处理与 W1Se 处理(图中虚线圈部分)与 W1CK 处理分布在不同区域,说明常规水分管理下,叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液与对照相比有较大差异;另外,W2Si 处理及 W2Se 处理与 W2CK 处

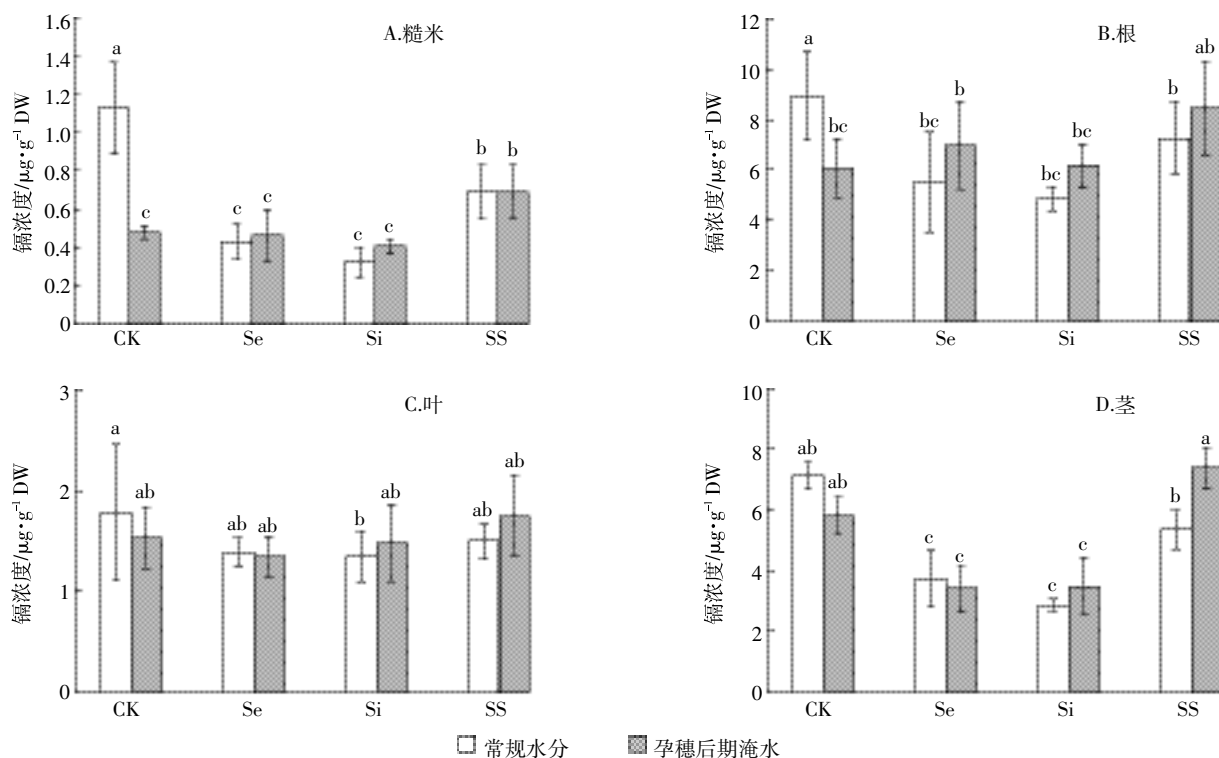


图 2 不同处理对水稻根、茎、叶和糙米镉含量的影响

Figure 2 Effect of water management and different foliar spray treatments on the uptake of cadmium by different parts of rice plants

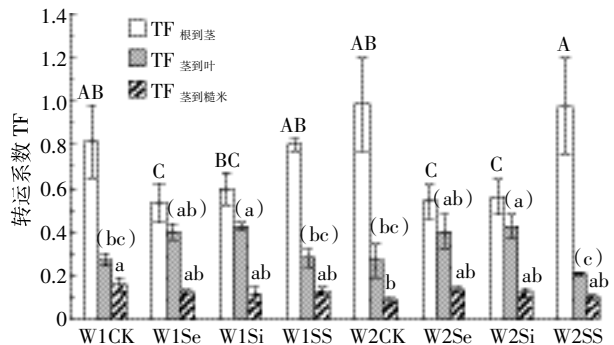
图中不同的转运系数的显著性差异(0.05)由不同类型字母表示, $n=3$ Significant differences ($P < 0.05$) in translocation factorsare represented by different letters, $n=3$

图 3 不同处理对水稻镉转运系数的影响

Figure 3 Effect of water management and foliar spray treatments on Cd translocation factors

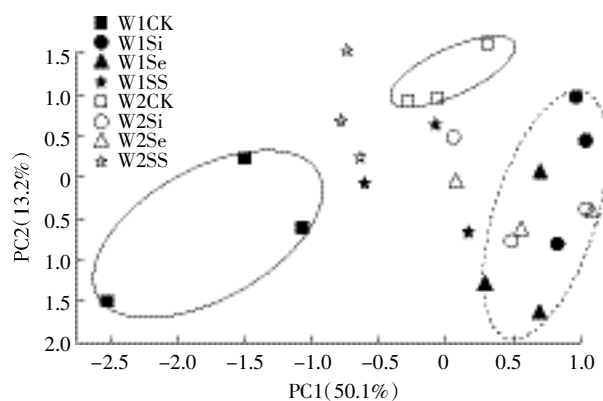


图 4 主成分分析图

Figure 4 Principal component analysis results from Cd concentration, translocation factors, and yield of rice of 8 treatments

理并没有分离,由此进一步说明,孕穗后期持续淹水管理下叶面喷施硅硒溶液与喷施去离子水相对水稻吸收镉没有较大差异。

3 讨论

常规水分管理下,叶面喷施硅溶胶能够分别降低水稻糙米、茎及叶中镉含量 71.7%、59.7%、37.9%,主

要是由于喷施的硅能够迅速以单硅酸的形式被水稻吸收^[16],并在水稻表皮、茎、叶鞘以及维管组织中形成硅化细胞^[17],与细胞壁上的半纤维素形成带负电的螯合物,从而增加对镉的吸附和阻隔^[18],进而缓解镉对水稻的毒害^[19]。Wang 等^[20]的研究表明,叶面喷施硅溶胶能够通过降低水稻体内 MDA 含量,增加水稻抗氧化能力来缓解水稻镉的毒害。Liu 等^[15]研究表明当土

壤中添加 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CdCl}_2$ 时,叶面喷施 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硅溶胶,糙米中镉的浓度降低 62%。刘传平等^[21]和王世华^[22]的研究进一步表明,土壤镉浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,叶面喷施有机硅溶胶使糙米中镉含量从对照的 $0.827 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。本研究叶面喷施硅溶胶使中轻度镉污染水稻田中水稻糙米镉含量由 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,虽未达到食品安全国家标准/食品中污染物限量($\text{Cd} < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),但其降低糙米镉含量的效果达到极显著水平($P < 0.01$)。

硒作为植物生长的有益元素^[23],近年来发现,它在缓解水稻重金属污染方面也有重要应用。研究表明,水稻外源施加低浓度的硒可以减轻镉对水稻幼苗的毒害^[24]。Wan 等^[19]研究表明外源添加亚硒酸钠能够显著降低水稻对镉的吸收,本试验采用亚硒酸钠溶液进行叶面喷施,使中轻度镉污染水稻田中水稻糙米镉含量由 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.48 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其降低糙米镉含量的效果低于喷施硅溶胶但高于喷施硅硒等体积混合液。叶面喷施亚硒酸钠溶液能够降低水稻对镉的吸收,可能是由于其能够调节植物体内活性氧(ROS)和抗氧化酶活性^[25],诱导由褪黑素参与的镉耐受机制^[26]。徐向华等^[27]研究表明,叶面喷施质量分数为 1% 的硒掺杂纳米硅溶胶,可以有效缓解水稻砷毒害,水稻籽粒砷含量下降 46%。

本试验所配制的硅硒等体积混合液,其对水稻糙米镉含量的降低效果与单独喷施硅溶胶、亚硒酸钠溶液相比较低,推测与等体积混合后胶体粒径增大有关。如图 1 所示,各溶液粒径大小顺序为硅溶胶<亚硒酸钠溶液<硅硒等体积混合液。硅溶胶平均粒径为 59.1 nm ,其降低水稻糙米镉含量的能力最强,硅硒混合液的平均粒径为 161.0 nm ,大于硅溶胶和亚硒酸钠溶液,其降低水稻糙米镉含量的能力最弱。我们的结果与 Cui 等^[28]研究结果一致,即粒径越小,抑制镉吸收效果越强。

据报道,调节土壤水分状况,可以改变土壤中的有效态镉含量,进而影响植物对镉的吸收累积^[29]。纪雄辉等^[30]认为,随着土壤淹水程度的提高,水稻根系、茎叶和糙米各部分的镉含量均显著下降,主要是由于淹水降低了土壤氧化还原电位,增加根际土壤有效硫含量,与土壤中有有效态镉形成沉淀,从而降低土壤中有有效态镉的含量;李剑睿等^[32]的结果表明,淹水后根表 Fe^{2+} 的含量比常规处理增加了 1.2 倍,根表镉含量则是常规处理的 82.6%, Cd^{2+} 与 Fe^{2+} 对根表吸附点位的竞争作用导致根表镉含量下降,进而影响植物根系

对镉的吸收累积。另外,研究发现水稻吸收和积累镉的关键时期是扬花期后^[31],这个关键时期采用淹水措施能够显著降低糙米对镉的积累。本试验孕穗后期持续淹水处理,与常规水分管理相比糙米镉的含量由 $1.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降低效果显著($P < 0.05$)。

由此可见,水稻生长孕穗后期淹水是一种既能保证水稻产量(表 3),同时又能有效降低糙米镉含量的农艺措施。本试验中孕穗后期持续淹水联合叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠对糙米镉含量的降低效果与对照相比不显著,其原因可能是淹水后土壤镉的生物有效性低^[32],水稻各部分吸收的镉减少,叶面喷施可阻控的镉含量减少,故而没有显著降低糙米镉的含量。另外,水稻叶面喷施硅溶胶等阻控剂有降低水稻叶片表面蒸腾强度的作用,也降低了水稻对镉的吸收及向地上部分的转运^[22],因而叶面喷施硅硒溶液对水稻吸收和转运镉的效果有可能在一定程度上掩盖了淹水管理对水稻吸收镉的影响,故而本试验中叶面喷施硅硒溶液处理联合孕穗后期持续淹水管理的降镉效果未见协同效应。

两种水分管理下,叶面喷施硅溶胶、亚硒酸钠溶液降低了 $\text{TF}_{\text{根到茎}}$,提高了 $\text{TF}_{\text{茎到叶}}$,主要是由于喷施后由根向茎转运的镉减少^[33],使水稻茎中镉的浓度显著降低($P < 0.05$)。水稻茎中的镉极易迁移到叶^[34],史新慧等^[35]研究表明水稻叶片中含有一种能参与控制水稻内部硅沉积的结合蛋白,沉积的硅能与镉发生沉淀反应或发生分解与有机酸结合在液泡中,最终将镉滞留在运输途径中,降低其向上的转运系数。另外,水稻茎中的节点部位是镉由木质部向韧皮部转运的中心器官^[36],尤其是水稻从上往下第一个节点,表现出最强的镉富集能力^[37],而本试验叶面喷施硅硒溶液可能通过降低节点的镉富集能力,从而降低水稻茎中镉的含量,进而降低 $\text{TF}_{\text{根到茎}}$,提高 $\text{TF}_{\text{茎到叶}}$ 。孕穗后期持续淹水管理下,叶面喷施去离子水处理与常规水分管理相比 $\text{TF}_{\text{茎到糙米}}$ 显著下降,说明孕穗后期持续淹水措施能降低镉从茎转运到糙米,从而降低水稻糙米对镉的积累。

4 结论

(1)常规水分管理下,叶面喷施硅溶胶和亚硒酸钠溶液能显著降低水稻根、茎和糙米中镉的含量,降低镉从根到茎和从茎到糙米的转运,增加镉从茎到叶的转运。

(2)未喷施叶面阻控剂时,稻田孕穗后期持续淹水处理降低了镉从水稻茎向糙米的转运系数,显著降低水稻糙米对镉的积累。

(3)叶面喷施硅溶胶、亚硒酸钠溶液和硅硒等体积分混合液,与稻田孕穗后期淹水管理两项措施联合,水稻糙米降镉效果未见协同效应。

参考文献:

- [1] He S Y, He Z L, Yang X E, et al. Chapter four—soil biogeochemistry, plant physiology, and phytoremediation of cadmium-contaminated soils [J]. *Advances in Agronomy*, 2015, 134: 135–225.
- [2] Li X Q, Meng D L, Li J, et al. Response of soil microbial communities and microbial interactions to long-term heavy metal contamination [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 908–917.
- [3] Yousaf B, Liu G J, Wang R W, et al. Investigating the potential influence of biochar and traditional organic amendments on the bioavailability and transfer of Cd in the soil-plant system [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(5): 374.
- [4] Tsukahara T, Ezaki T, Moriguchi J, et al. Rice as the most influential source of cadmium intake among general Japanese population [J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 305(1/2/3): 41–51.
- [5] Cho Y A, Kim J, Woo H D, et al. Dietary cadmium intake and the risk of cancer: A meta-analysis [J]. *Plos One*, 2013, 8(9): e75087.
- [6] Stone R. Arsenic and paddy rice: A neglected cancer risk [J]. *Science*, 2008, 321(5886): 184.
- [7] Xie L H, Tang S Q, Wei X J, et al. The cadmium and lead content of the grain produced by leading Chinese rice cultivars [J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 217–224.
- [8] Ma J F, Tamai K, Yamaji N, et al. A silicon transporter in rice [J]. *Nature*, 2006, 440(7084): 688.
- [9] Yu H Y, Ding X, Li F, 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.
- [10] Klotzbücher T, Marxen A, Vetterlein D, et al. Plant-available silicon in paddy soils as a key factor for sustainable rice production in Southeast Asia [J]. *Basic & Applied Ecology*, 2014, 16(8): 665–673.
- [11] Zhang H, Feng X B, Zhu J M, et al. Selenium in soil inhibits mercury uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(18): 10040–10046.
- [12] Li M Q, Hasan M K, Li C X, et al. Melatonin mediates selenium-induced tolerance to cadmium stress in tomato plants [J]. *Journal of Pineal Research*, 2016, 61(3): 291–302.
- [13] 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): 677–681.
- [14] Arao T, Kawasaki A, Baba K, et al. Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(24): 9361–9367.
- [15] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2/3): 1466–1472.
- [16] Liang Y C, Sun W C, Zhu Y G, et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147(2): 422–428.
- [17] Yamaji N, Mitatni N, Ma J F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots [J]. *Plant Cell*, 2008, 20(5): 1381–1389.
- [18] Greger M, Kabir A H, Landberg T, et al. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat [J]. *Environmental Pollution*, 2015, 211: 90–97.
- [19] 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.
- [20] Wang S H, Wang F Y, Gao S C. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings [J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2015, 22(4): 2837–2845.
- [21] 刘传平, 李芳柏, 王世华. 不同纳米硅制剂及不同喷施时期对水稻镉吸收的影响 [C]//广东省土壤学会第九次会员代表大会暨学术交流会论文集. 2006.
- LIU Chuan-ping, LI Fang-bai, WANG Shi-hua. Effects of different nanosilica preparations and different spraying periods on cadmium uptake in rice [C]//Soil science society of Guangdong Province ninth member conference and academic exchange annual proceedings. 2006.
- [22] 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. Foliage application of Nano silicon increases heavy metal resistance in rice (*Oryza sativa* L.) and its mechanisms [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural College, 2007.
- [23] Zhu Y G, Pilonismit E A H, Zhao F J, et al. Selenium in higher plants: Understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation [J]. *Trends in Plant Science*, 2009, 14(8): 436–442.
- [24] Li L, Zhou W, Dai H, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2012, 235/236(2): 343–351.
- [25] Ahmad P, Allah E F A, 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.
- [26] Feng R, Wei C, Tu S. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses [J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2013, 87(87): 58–68.
- [27] 徐向华, 刘传平, 唐新莲, 等. 叶面喷施硅硒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.
- XU Xiang-hua, LIU Chuan-ping, TANG Xin-lian, et al. Foliar application of selenium-silicon sol reduced arsenic accumulation in rice [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(6): 1064–1069.
- [28] Cui J H, Liu T X, Li F B, et al. Silica nanoparticles alleviate cadmium toxicity in rice cells: Mechanisms and size effects [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 228: 363–369.
- [29] Tack F M. Watering regime influences Cd concentrations in cultivated spinach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 186: 201–206.

- [30] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9): 3930-3939.
- JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9): 3930-3939.
- [31] Rodda M S, Li G, Reid R J. The timing of grain Cd accumulation in rice plants; The relative importance of remobilisation within the plant and root Cd uptake post-flowering[J]. *Plant & Soil*, 2011, 347(1/2): 105-114.
- [32] 李剑睿, 徐应明, 林大松, 等. 水分调控和钝化剂处理对水稻土镉的钝化效应及其机理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7): 1316-1321.
- LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7): 1316-1321.
- [33] Wu Z C, Wang F H, Liu S, et al. Comparative responses to silicon and selenium in relation to cadmium uptake, compartmentation in roots, and xylem transport in flowering Chinese cabbage (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis*, var. *utilis*) under cadmium stress[J]. *Environmental & Experimental Botany*, 2016, 131: 173-180.
- [34] 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 Zhe, TIE Bo-qing, LEI Ming, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(7): 2762-2770.
- [35] 史新慧, 王 贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1112-1116.
- SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo. Research on mechanism of silicon improving the resistance of rice seedling to Cd [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1112-1116.
- [36] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet; Noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant[J]. *Plant Physiology*, 2010, 152(4): 1796-1806.
- [37] Li J R, Xu Y M. Immobilization remediation of Cd-polluted soil with different water condition[J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 193: 607-612.