

掺杂硒·硫的硅基叶面阻控剂对水稻富集镉的影响

唐守寅, 胡露, 熊琪, 田一君, 甘露, 林炜, 任准, 王诗龙, 袁海伟*

(环保桥(湖南)生态环境工程股份有限公司, 湖南长沙 410205)

摘要 [目的]研究掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂对水稻富集镉(Cd)的影响。[方法]在中度Cd污染区开展水稻喷施不同用量掺杂硒、硫(7 500、9 000 mL/hm²)的硅基叶面阻控剂的田间小区试验。[结果]施用掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂,可使稻谷产量增加1.87%~8.97%;稻米Cd含量降低25.93%~46.67%;茎中Cd含量增加14.38%~37.89%,对根、叶中Cd含量的影响不大;Cd从茎到籽实的转运系数显著降低,降幅达34.48%~62.50%。[结论]采用硅、硒、硫耦合原理抑制Cd在水稻植株内的迁移是可行有效的;抑制Cd从茎到籽实的转运是能够显著降低稻米Cd含量的主要原因。

关键词 叶面阻控剂;水稻;镉;硅;硒;硫

中图分类号 X53 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)17-0061-04

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2021.17.017



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Selenium and Sulfur Doped Silica-based Leaf Surface Inhibitor on Cadmium Enrichment in Rice

TANG Shou-yin, HU Lu, XIONG Qi et al (Hunan Huanbaoqiao Ecology and Environment Engineering Co., Ltd., Changsha, Hunan 410205)

Abstract [Objective] To study the effect of silicon-based foliar inhibitor doped with selenium and sulfur on cadmium enrichment in rice. [Method] Field plot experiments were carried out in moderate cadmium contaminated areas by spraying different amounts of silicon-based foliar inhibitor (7 500 and 9 000 mL/hm²) doped with selenium and sulfur. [Result] The yield of rice increased by 1.87%–8.97% by applying silicon-based foliar inhibitor doped with selenium and sulfur; cadmium content of rice was reduced by 25.93%–46.67% by applying silicon-based foliar inhibitor doped with selenium and sulfur; cadmium content in rice stem was increased by 14.38%–37.89% by applying silicon-based foliar inhibitor doped with selenium and sulfur, which had little effect on cadmium content in rice root and leaf; The transfer factor from stem to seed decreased significantly by 34.48%–62.50% by applying silicon-based foliar inhibitor doped with selenium and sulfur. [Conclusion] It was feasible and effective to inhibit the migration of cadmium in rice plants by the coupling principle of silicon, selenium and sulfur, and the main reason for the significant reduction of cadmium content in rice was the inhibition of cadmium transport from stem to seed.

Key words Foliar resistance control agent; Rice; Cadmium; Silicon; Selenium; Sulfur

近年来,我国土壤重金属污染问题日趋严重,对人们的身体健康产生很大威胁。据统计,目前我国受污染的耕地面积近0.1亿hm²,污水灌溉污染耕地216.67万hm²,固体废物堆存占地和毁田13.33万hm²,合计约占耕地总面积的10%以上,其中多数集中在经济较发达地区。每年因土壤污染而减少的粮食产量高达1 200万t,直接经济损失达200余亿元。水稻对重金属具有较强的富集能力,其体内积累的重金属通过食物链进入人体后,会给人类身体健康带来潜在的危害。我国人口众多,在污染的耕地上种出安全的农作物是当前农业环境领域迫切需要解决的重大问题。

目前针对耕地重金属污染的修复方法主要是通过改造土壤-植物系统的土壤端,降低土壤中重金属有效性和稀释土壤中重金属浓度来减少农作物对重金属的吸收。这些方法包括化学钝化法(施用石灰、土壤调理剂等钝化剂)、植物修复法(栽种超积累植物)、物理混合法、微生物修复法。但是,这些方法还存在修复效率低、费用高、操作烦琐、效果不稳定等问题。

近年来相关研究表明,硅可以提高植物对重金属毒害的

抗性,利用方便且廉价,已引起人们的高度重视。施硅能将地上部的镉(Cd)沉积于茎部和叶部的细胞壁中,形成Si-Cd的复合物,进而减轻Cd向果穗部的迁移及其在穗部的积累,增强水稻的抗逆性,明显缓解水稻重金属毒害。在Cd污染土壤上施用富含硅的高炉渣对水稻的生物学产量和稻米产量并无显著影响,但稻米中Cd含量显著下降^[1]。作为植物有益元素,硅可以缓解植物铝毒在高粱、大麦和大豆等作物上的表现也已得到证实。此外,一些研究还表明,通过给水稻叶面喷施含硒制剂或者含硫制剂也可以在一定程度上降低稻米中Cd的积累^[2-3]。通过给农作物叶面喷施阻控剂,从土壤-植物系统的植物端抑制重金属在可食部位的积累正成为耕地重金属修复的新思路。但是,目前的研究大都集中于单一硅、硒、硫制剂对抑制Cd的研究,鲜有硅、硒、硫复合制剂抑Cd效果的报道。笔者试图通过田间小区试验,探讨在实际大田种植条件下,掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂对水稻富集Cd的影响,以期Cd污染耕地高效叶面阻控技术提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况 试验地分2个区域:①益阳市桃江县石牛江镇增塘村;②益阳市赫山区泥江口镇大坝塘村。2个区域均属于双季稻产区,稻田灌溉水分别来源于水库、河流,水资源充足,灌溉设施好。试验田土壤基本理化性质见表1。

1.2 供试材料 供试叶面阻控剂为环保桥(湖南)生态环境工程股份有限公司生产的掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂,液

基金项目 长沙市科技计划(kh1801224);四川省重大科技专项(2018-SZDX0029);农业农村部产地环境污染防治重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室开放。

作者简介 唐守寅(1990—),男,湖北松滋人,工程师,硕士,从事重金属污染修复研究。*通信作者,高级工程师,硕士,从事土壤防治研究。

收稿日期 2020-12-30

体, pH 10.49, 含硅(Si) 101.6 g/L、钠(Na) 66.05 g/L、硒(Se) 0.31 g/L、水不溶物 2.16 g/L、砷(As) 0.418 mg/L、镉(Cd) 0.05 mg/L、铅(Pb) 0.212 mg/L、汞(Hg) 0.032 mg/L、

铬(Cr) 21.7 mg/L。供试品种为湘早籼 45, 购置于湖南永益农业科技发展有限公司, 是湖南省普遍栽种的籼稻常规稻品种。

表 1 试验地土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil in the test plot

试验地点 Test site	全氮 TN g/kg	pH	全镉 Total Cd mg/kg	有机质 OM g/kg	碱解氮 OP mg/kg	有效磷 AP mg/kg	速效钾 AK mg/kg
桃江县 Taojiang County	2.31	5.7	1.32	37.8	175	37.1	209
赫山区 Heshan District	1.76	5.4	0.93	32.8	145	20.1	158

1.3 小区试验 设 3 个处理, 每处理 3 次重复, 每个试验点共 9 个小区。随机区组排列, 小区面积 21 m², 试验地周围设置 2.5 m 宽的保护行。CK: 常规施肥+喷施清水 450 kg/hm²; F₁: 常规施肥+分别在分蘖期和孕穗期喷施楚戈牌叶面阻控剂, 每次用 3 750 mL/hm² 兑水 450 kg 叶面喷施, 合计用叶面阻控剂 7 500 mL/hm²; F₂: 常规施肥+分别在分蘖期和孕穗期喷施楚戈牌叶面阻控剂, 每次用 4 500 mL/hm² 兑水 450 kg 叶面喷施, 合计用叶面阻控剂 9 000 mL/hm²。

供试早稻于 2019 年 3 月 26 日播种, 湿润育秧, 4 月 18 日移栽, 移栽密度 273 465 茺/hm²。移栽前人工翻耕 2 遍, 各小区作田埂, 并用地膜覆盖, 单排单灌。于 4 月 17 日结合整地, 施用尿素 300 kg/hm²、钙镁磷肥 750 kg/hm²、氯化钾 300 kg/hm² 作基肥, 4 月 27 日施尿素 150 kg/hm²、氯化钾 150 kg/hm² 作分蘖肥。5 月 9 日 F₁、F₂ 处理喷施分蘖期叶面阻控剂, 6 月 6 日 F₁、F₂ 处理喷施孕穗末期叶面阻控剂。各处理中耕除草、病虫害防治和灌溉等栽培措施完全一致。供试早稻于 7 月 11 日分小区分别取植株样, 并进行经济性状分析, 7 月 15 日收获。每小区单打单收单晒计算产量。

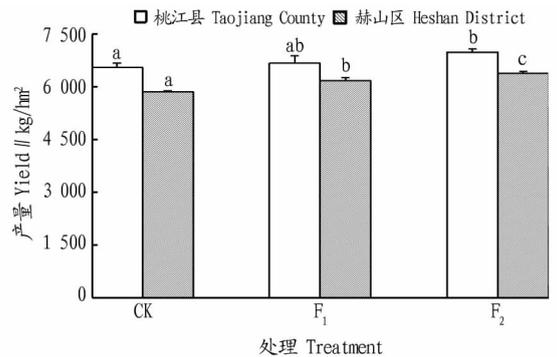
1.4 采样与分析方法 水稻植株样品于收获前 1~3 d 采集, 单个小区内采用五点取样法连根采集整根植株。每个分点取植株 2 株, 装入网袋中保存并编号。采集的水稻植株样品带回实验室用去离子水洗净, 分离成根、茎、叶、稻谷几个部分, 根、茎、叶烘干(70 ℃)至恒重后用不锈钢粉碎机粉碎, 稻谷经小型脱壳机将稻壳和糙米分开后粉碎。根、茎、叶及糙米中的 Cd 含量采用混酸消煮, 原子吸收分光光度计测定^[4]。

1.5 数据处理 试验数据为 3 次重复平均值, 采用 Excel 2010 和 SPSS 19.0 进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同叶面阻控剂用量对水稻产量的影响 从图 1 可见, 在桃江试验区, 相比于 CK, 喷施叶面阻控剂 7 500、9 000 mL/hm² 后(F₁、F₂ 处理), 水稻产量分别增加 1.87%、6.63%, 其中 F₂ 较 CK 有显著差异。在赫山试验区, 相比于 CK, F₁、F₂ 处理的水稻产量分别增加 5.32%、8.97%, 均较 CK 有显著差异。赫山试验区的水稻产量普遍低于桃江试验区。这说明喷施叶面阻控剂可在一定程度上提高水稻产量, 当用量较大时增产效果显著。

2.2 不同叶面阻控剂用量对水稻稻米 Cd 含量的影响 从



注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicated significant differences between treatments ($P < 0.05$)

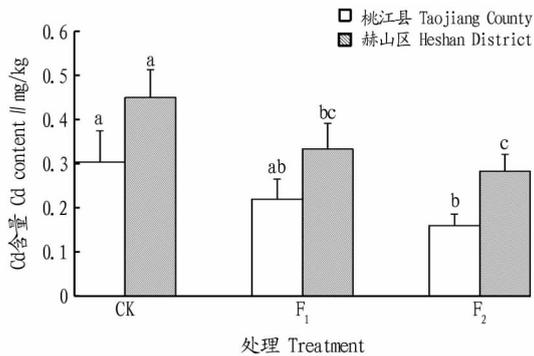
图 1 不同叶面阻控剂下稻谷产量的变化

Fig. 1 Variation of rice yield under different leaf resistance control agents

图 2 可见, 在桃江试验区, CK 稻米 Cd 含量为 0.30 mg/kg, 超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的限值(0.20 mg/kg)0.5 倍, F₁、F₂ 处理可使稻米 Cd 含量较 CK 分别降低 26.67%、46.67%, 其中 F₂ 降低到 0.16 mg/kg(符合国标), 且相对于 CK 有显著差异。在赫山试验区, CK 稻米 Cd 含量为 0.45 mg/kg, 超过《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中规定的限值(0.20 mg/kg)1.25 倍, 处理 F₁、F₂ 可使稻米 Cd 含量较 CK 分别降低 25.93%、37.04%, 相对于 CK 均具有显著差异。这说明水稻喷施叶面阻控剂可有效降低稻米中 Cd 含量。

2 个试验区具有相当的 Cd 含量水平, 且采用了同样的水稻品种。在同一叶面阻控剂喷施水平下, 赫山区稻米 Cd 含量显著高于桃江县, 这可能主要是由于赫山区的土壤 pH 较低所致。因为在一定范围内, 土壤 Cd 的植物有效性会随着土壤 pH 的降低而升高, 进而导致植物对其富集能力的增强。

2.3 不同叶面阻控剂用量对水稻各部位 Cd 含量的影响 由表 2 可知, 在桃江试验区, 喷施叶面阻控剂会增加水稻根、茎中 Cd 含量, 但是会降低叶中 Cd 含量。相比于 CK, F₁、F₂ 根中 Cd 含量分别增加 3.54%、12.63%, 但较 CK 均无显著差异。相比于 CK, F₁、F₂ 茎中 Cd 含量分别增加 22.11%、37.89%, 其中 F₂ 较 CK 有显著差异。相比于 CK, F₁、F₂ 叶中 Cd 含量分别降低 8.70%、15.22%, 但较 CK 均无显著差异。



注:不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$)

图2 不同叶面阻控剂用量下稻米 Cd 含量的变化

Fig. 2 Changes of Cd content in rice with different leaf resistance agents

与桃江试验区不同,在赫山试验区,喷施叶面阻控剂会降低水稻根中 Cd 含量,但是会增加水稻茎、叶中 Cd 含量。相比于 CK, F₁、F₂ 根中 Cd 含量分别降低 1.58%、9.09%,但较 CK 均无显著差异。相比于 CK, F₁、F₂ 茎中 Cd 含量分别增加 14.38%、18.30%,与 CK 均无显著差异。相比于 CK, F₁、F₂ 叶中 Cd 含量分别增加 9.80%、0,与 CK 均无显著差异。上述结果说明,施用掺杂硒、硫硅基叶面阻控剂主要可增加水稻茎中 Cd 含量,对水稻根、叶中 Cd 含量影响不大。

表2 不同叶面阻控剂用量下水稻各部位 Cd 含量

Table 2 Cd content of rice parts under different leaf resistance control agents mg/kg

试验地 Test site	处理 Treatment	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf
桃江县 Taojiang County	CK	1.98±0.19 a	0.95±0.13 a	0.46±0.08 a
桃江县 Taojiang County	F ₁	2.05±0.09 a	1.16±0.11 ab	0.42±0.07 a
	F ₂	2.23±0.12 a	1.31±0.10 b	0.39±0.26 a
赫山区 Heshan District	CK	2.53±0.13 a	1.53±0.07 a	0.51±0.16 a
赫山区 Heshan District	F ₁	2.49±0.10 a	1.75±0.08 a	0.56±0.04 a
	F ₂	2.30±0.11 a	1.81±0.05 a	0.51±0.13 a

注:同一试验地同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the same column in the same experimental site indicate significant difference at 0.05 level

2.4 不同叶面阻控剂用量对 Cd 在水稻植株内迁移的影响 由表 3 可知,在桃江试验区, F₁、F₂ 的 TF_{根—茎} 较 CK 分别增加 16.33%、20.41%,但与 CK 相比均无显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{茎—叶} 较 CK 分别降低 26.53%、40.82%,但与 CK 相比均无显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{茎—籽实} 较 CK 分别降低 40.63%、62.50%,与 CK 相比显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{叶—籽实} 较 CK 均降低 15.00%,较 CK 均无显著差异。赫山区试验结果与桃江区类似。F₁、F₂ 的 TF_{根—茎} 较 CK 分别增加 14.75%、29.51%,但与 CK 无显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{茎—叶} 较 CK 分别降低 5.88%、17.65%,但与 CK 均无显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{茎—籽实} 较 CK 分别降低 34.48%、44.83%,与 CK 相比均有显著差异。F₁、F₂ 的 TF_{叶—籽实} 较 CK 分别降低 35.11%、37.23%,但与 CK 相比均无显著差异。这表明施用掺杂硒、硫硅基叶面阻控剂主要

可抑制 Cd 在茎—叶、茎—籽实、叶—籽实过程中的转运,特别是在茎—籽实中的转运。

表3 不同叶面阻控剂用量下 Cd 在水稻植株内的转移系数

Table 3 Transfer coefficient of Cd in rice plants under different amounts of leaf inhibitor

试验地 Test site	处理 Treatment	TF _{根—茎}	TF _{茎—叶}	TF _{茎—籽实}	TF _{叶—籽实}
桃江县 Taojiang County	CK	0.49±0.11 a	0.49±0.09 a	0.32±0.10 a	0.69±0.30 a
桃江县 Taojiang County	F ₁	0.57±0.08 a	0.36±0.03 a	0.19±0.04 b	0.54±0.60 a
	F ₂	0.59±0.02 a	0.29±0.17 a	0.12±0.03 b	0.54±0.30 a
赫山区 Heshan District	CK	0.61±0.06 a	0.34±0.10 a	0.29±0.03 a	0.94±0.32 a
赫山区 Heshan District	F ₁	0.70±0.01 a	0.32±0.01 a	0.19±0.04 b	0.61±0.15 a
	F ₂	0.79±0.06 a	0.28±0.08 a	0.16±0.02 b	0.59±0.22 a

注:同一试验地同列不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the same column in the same experimental site indicate significant difference at 0.05 level

3 讨论

(1) 该研究结果表明,喷施掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂对水稻增产效果较为明显,这主要由于硅是水稻的“第四元素”,可有效促进水稻的生长发育。沉积于植株体内的硅在提高细胞壁强度的同时增强了水稻抗病虫和抗倒伏的抗逆性能,改善了群体的受光度,降低了水稻的蒸腾作用,减轻了水分胁迫等作用^[5]。

(2) 该研究结果表明,施用掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂主要增加了水稻茎中 Cd 含量,显著降低了稻米 Cd 含量,这与硅、硒、硫的联合作用紧密相关。叶面喷施的硅能够迅速被水稻吸收^[1],并在水稻表皮、茎、叶鞘以及维管组织中形成硅化细胞^[6],与细胞壁上的半纤维素形成带负电的螯合物,从而增加对 Cd 的吸附和阻隔^[7],进而缓解 Cd 对水稻的毒害。Wang 等^[8]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 Cd 的毒害。刘传平等^[9]和王世华^[10]的研究进一步表明,土壤 Cd 浓度为 2.0 mg/kg 时,叶面喷施有机硅溶胶使稻米中 Cd 含量从 CK 的 0.827 mg/kg 下降到 0.134 mg/kg。作为植物生长的有益元素^[11],硒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 Cd 对水稻幼苗的毒害^[12]。Wan 等^[2]研究表明,外源添加亚硒酸钠能够显著降低水稻对 Cd 的吸收,采用亚硒酸钠溶液进行叶面喷施可使中轻度 Cd 污染水稻田中水稻糙米 Cd 含量由 1.13 mg/kg 降低到 0.48 mg/kg。叶面喷施亚硒酸钠溶液能够降低水稻对 Cd 的吸收,这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^[13],诱导由褪黑素参与 Cd 耐受机制^[14]。适当的硫可以促进水稻的生长,同时可以降低 Cd 对植株的毒害作用。硫素同化和谷胱甘肽代谢增强可降低 Cd 易位^[3],清除过量 Cd 引发的活性氧,同时促进植物体内非蛋白巯基(NPT)、GSH 和 PCs 等含硫化合物合成^[15]。Cd 与 PCs 结合后,被运输至液泡,形成高分子量的复合物,从而使细胞处于无毒化状态^[16],抑制 Cd 向其他细胞器中转运,保证细胞器功能正常运转。该研究所采用的掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂将硅、硒、硫三大非金属元素抑制水稻富

集重金属的原理结合起来,在土壤理化性质不同的2个试验地均表现出较好的降Cd效果,说明采用硅、硒、硫耦合原理抑制Cd在水稻植株内的迁移是可行有效的。

(3)Cd在水稻植株的转移基本遵循根→茎→叶→糙米或者根→茎→糙米的顺序^[17-18]。Cd在水稻植株相邻部位之间的转移是其从根到糙米转运过程中的组成环节,每个环节的转运能力都会影响糙米中Cd的富集。该研究中,施用掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂主要可抑制Cd在茎到叶、茎到籽实、叶到籽实过程中的转运,特别是从茎到籽实的转运。水稻茎中的Cd极易迁移到叶^[19],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Cd发生沉淀反应,最终将Cd滞留在运输途径中,降低其向上的转运能力^[20]。另外,水稻茎中的节点部位是Cd由木质部向韧皮部转运的中心器官^[21],尤其是水稻从上往下第1个节点,表现出最强的Cd拦截能力^[22]。与此同时,该研究中茎一籽实的转运系数实际上涵盖了茎到叶、叶到籽实的累积作用,这3个过程之间的关系以及硅、硒、硫交互作用下对Cd从茎到籽实转运过程的抑制原理仍有待进一步研究。

4 结论

(1)喷施掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂可在一定程度上提高水稻产量,当用量较大时在水稻的增产效果显著。

(2)喷施掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂可有效降低稻米中Cd含量,增加水稻茎中Cd含量,对水稻根、叶中Cd含量影响不大。采用硅、硒、硫耦合原理抑制Cd在水稻植株内的迁移是可行有效的。

(3)喷施掺杂硒、硫的硅基叶面阻控剂后,稻米Cd含量能有效降低的主要原因是硒、硫、硅耦合作用下,水稻植株内茎一籽实的转运受到了较大程度的抑制。

参考文献

- [1] 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.
- [2] WAN Y N, YU Y, WANG Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: Influence of different forms of selenium[J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2016, 133: 127-134.
- [3] LIANG T S, DING H, WANG G D, et al. Sulfur decreases cadmium translocation and enhances cadmium tolerance by promoting sulfur assimilation

and glutathione metabolism in *Brassica chinensis* L. [J]. Ecotoxicology & environmental safety, 2016, 124: 129-137.

- [4] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中镉的测定: GB 5009.15—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] MITANI N, MA J F, IWASHITA T. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Plant & cell physiology, 2005, 46(2): 279-283.
- [6] YAMAJI N, MITATNI N, MA J F. A transporter regulating silicon distribution in rice shoots [J]. Plant cell, 2008, 20(5): 1381-1389.
- [7] GREGER M, KABIR A H, LANDBERG T, et al. Silicate reduces cadmium uptake into cells of wheat [J]. Environmental pollution, 2016, 211: 90-97.
- [8] 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.
- [9] 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. 广州: 广东省土壤学会, 2006.
- [10] 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.
- [11] ZHU Y G, PILON-SMITS 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.
- [12] 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(2): 343-351.
- [13] 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.
- [14] FENG R W, WEI C Y, TU S X. The roles of selenium in protecting plants against abiotic stresses [J]. Environmental & experimental botany, 2013, 87: 58-68.
- [15] 孙惠莉, 吕金印, 贾少磊. 硫对镉胁迫下小白菜叶片 AsA-GSH 循环和植物络合素含量的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1294-1301.
- [16] 潘瑶. 硫肥缓解水稻镉毒害的机理研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2015.
- [17] 潘瑞焱. 植物生理学 [M]. 6版. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [18] 吕书记, 蒋奇晋, 齐绍武. 植物阻滞剂对水稻中镉的吸收和运转的影响 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43(29): 143-144, 146.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.

(上接第48页)

- [18] 李琦瑶, 陈爱国, 王程栋, 等. 低温胁迫对烤烟幼苗光合荧光特性及叶片结构的影响 [J]. 中国烟草学报, 2018, 24(2): 30-38.
- [19] PALTA J P, WHITAKER B D, WEISS L S. Plasma membrane lipids associated with genetic variability in freezing tolerance and cold acclimation of *Solanum* species [J]. Plant physiology, 1993, 103(3): 793-803.

- [20] 鲍思伟. 自然降温过程中云锦杜鹃抗寒适应性研究——水分、渗透调节物的动态变化与低温半致死温度的关系 [J]. 福建林业科技, 2005, 32(2): 13-16.
- [21] 刘艳阳, 李俊周, 陈磊, 等. 低温胁迫对小麦叶片细胞膜脂质过氧化产物及相关酶活性的影响 [J]. 麦类作物学报, 2006, 26(4): 70-73.
- [22] 彭昌操, 孙中海. 低温锻炼期间柑桔原生质体 SOD 和 CAT 酶活性的变化 [J]. 华中农业大学学报, 2000(4): 384-387.