

硒、硅配施对镉胁迫下杂交稻中镉及矿质元素的影响

代 邹, 王春雨, 李 娜, 蒋明金, 严奉君, 徐 徽, 孙永健, 马 均*

(四川农业大学水稻研究所, 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室, 四川 温江 611130)

摘 要:硒(Se)、硅(Si)在减少植物对 Cd 的吸收方面有着积极作用。以籽粒低镉积累杂交籼稻宜香 2115 和籽粒高镉积累杂交籼稻川谷优 2348 为材料进行大田试验,研究 Se、Si 及其配施对杂交籼稻 Cd 及矿质营养元素含量的影响。结果表明:Se、Si 对水稻茎、叶、穗和糙米中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn、Se 和 Si 含量有显著影响。川谷优 2348 中 Cd、Ca、Cu、Mn 和 Zn 含量均显著高于宜香 2115,Se 和 Si 含量则低于后者。Se、Si 降低宜香 2115 茎秆 Cd、Cu、Mn 含量、穗部 Cu 含量及川谷优 2348 叶片 Cd 含量,增加了两个品种叶片及川谷优 2348 茎秆中 Ca 含量。Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理显著降低宜香 2115 茎秆中 Zn、叶片中 Cd、川谷优 2348 茎秆 Mn 以及穗部 Ca 含量,促进宜香 2115 叶片 Cu、Zn 含量的升高;Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理抑制川谷优 2348 茎秆 Cd、Zn 和宜香 2115 穗部 Zn 的积累,促进川谷优 2348 茎秆中 Cu 和穗部 Mn、Zn 的积累。所有 Se、Si 处理均降低宜香 2115 穗部 Cd 含量,但高浓度 Se 处理下川谷优 2348 穗部 Cd 含量下降幅度变小甚至略升。宜香 2115 在单施 6 $\mu\text{mol/L}$ Se 下糙米 Cd 含量最低,川谷优 2348 则在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 和 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 下糙米 Cd 含量最低。

关键词:杂交水稻; 镉胁迫; 硒、硅配施; 矿质元素

doi:10.13304/j.nykjdb.2016.169

中图分类号:S511

文献标识码:A

文章编号:1008-0864(2017)01-0108-10

Effects of Combined Application of Selenium and Silicon on Cadmium and Mineral Elements in Hybrid Rice (*Oryza sativa* L.) under Cadmium Stress

DAI Zou, WANG Chunyu, LI Na, JIANG Mingjin, YAN Fengjun, XU Hui,
SUN Yongjian, MA Jun*

(Key Laboratory of Crop Ecophysiology and Farming System in Southwest China, Ministry of Agriculture;
Rice Research Institute, Sichuan Agricultural University, Sichuan Wenjiang 611130, China)

Abstract: Selenium (Se) and silicon (Si) have active roles in reducing Cd uptake in plants. Taking hybrid cultivars Yixiang 2115 with low-Cd accumulation in grain and Chuanguyou 2348 with high-Cd accumulation in grain as material, this study carried out field experiment to investigate the effects of Se, Si and their mixed treatment on Cd and mineral element concentrations of these 2 rice cultivars. The results showed that Se and Si treatments had significant effects on the contents of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn, Se and Si in rice stem, leaf, ear and brown rice. The contents of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn in Chuanguyou 2348 were much higher than that in Yixiang 2115, except Se and Si. Se and Si could reduce Cd, Cu and Mn contents in Yixiang 2115 stem, Cu contents in panicle of Yixiang 2115, and Cd content in leaf blade of Chuanguyou 2348; and increased Ca contents in leaf blades of both varieties and in Chuanguyou 2348 stem. Si + 6 $\mu\text{mol/L}$ Se treatments significantly reduced Zn content in stem and Cd content in leaf blades of Yixiang 2115, Mn accumulation in stem and Ca content in panicle of Chuanguyou 2348; stimulated the increase of Cu, Zn contents in leaf blades of Yixiang 2115. Si + 12 $\mu\text{mol/L}$ Se treatment suppressed the accumulation of Cd, Zn in Chuanguyou 2348 stem and Zn accumulation in panicle of Yixiang 2115, and stimulated the

收稿日期:2016-03-28; 接受日期:2016-04-22

基金项目:“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAD16B05, 2012BAD04B13, 2013BAD07B13); 四川省科技支撑计划项目(2014NZ0040, 2014NZ0041, 2014NZ0047); 四川省育种攻关专项(2011NZ0098-15)资助。

作者简介:代 邹,博士研究生,研究方向为水稻重金属吸收转运。E-mail: daizou1989@163.com。* 通信作者:马 均,教授,博士生导师,研究方向为作物栽培生理。E-mail: majunp2002@163.com

accumulation of Cu in stem and Mn, Zn in panicle of Chuanguyou 2348. All Se and Si treatments decreased Cd contents in Yixiang 2115 panicle, but with 12 $\mu\text{mol/L}$ Se treatment the decreasing range of Cd content in Chuanguyou 2348 panicle, became small and even changed to slightly increase. Under single 6 $\mu\text{mol/L}$ Se treatment, brown rice of Yixiang 2115 had the minimum Cd concentration, while Chuanguyou 2348 got the minimum Cd contents in brown rice under Si + 6 $\mu\text{mol/L}$ Se and 12 $\mu\text{mol/L}$ Se treatments.

Key words: hybrid rice; cadmium stress; combined application of selenium and silicon; mineral element

随着现代工业和现代农业的迅速发展,造成了我国耕地严重的重金属污染问题,我国目前被重金属污染的农业土地面积约 2.5 万 hm^2 。每年重金属污染导致的粮食减产超过 1 000 万 t,被重金属污染的粮食超过 1 200 万 t,经济损失达到 200 亿元人民币^[1]。据 2014 年环境保护部和国土资源部联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[2]指出,我国土壤无机污染物中,镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍的点位超标率分别为 7.0%、1.6%、2.7%、2.1%、1.5%、1.1%、0.9%和 4.8%。镉(cadmium,Cd)是植物生长所不需要的重金属元素,其化学性质使它易于被植物根系吸收进入植物体内,造成叶片卷曲、光合作用下降、组织坏死等生理毒害作用,严重的可导致植物死亡^[3]。

水稻生长过程中能大量吸收 Cd,Cd 污染不仅导致水稻产量降低,还会在水稻籽粒中大量积累,使人类 Cd 暴露风险增加。Cd 通过食物链在人体内富集,造成包括痛痛病、肾衰竭和癌症在内的诸多健康问题^[4, 5]。硅(silicon,Si)作为地壳中含量仅次于氧(oxygen,O)的元素,对水稻生长发育有着重要作用。施 Si 可显著提高 Cd 胁迫下水稻叶绿素 a 含量、抗氧化物酶活性、水稻生物量,降低水稻对 Cd 的吸收^[6-9]。硒(selenium,Se)是人体必需微量元素,在人体抗氧化代谢中有重要作用,缺 Se 可导致人类心肌病、视力退化以及多发性脑脊硬化等疾病发生^[10,11]。研究表明,适当浓度 Se 处理能够减少植物对砷(arsenic,As)、Cd 等重金属的吸收,并可一定程度上修复因重金属造成的生理损伤^[12-14]。

Cd 胁迫下,水稻体内 Cd 含量会普遍增加。

研究表明,Cd 主要通过铁、锌等二价金属离子转运蛋白进入水稻体内,Fe、Ca、Cu、Mn、Zn 等矿质元素含量也会发生改变。不同水稻或同一水稻不同部位间含量变化都存在显著差异^[5,15,16]。前人研究主要集中在 Cd 胁迫下水稻体内 Cd 及其矿质元素含量的变化,对于 Cd 胁迫下 Se、Si 配施对水稻各器官中 Cd 及其他矿质元素含量影响的研究较少。本课题组前期试验结果表明,杂交籼稻宜香 2115 和川谷优 2348 产量表现接近,2014 年宜香 2115 和川谷优 2348 的产量分别为 8 794 kg/hm^2 和 8 878 kg/hm^2 ,两个品种籽粒的镉含量分别为 0.96 mg/kg 和 2.41 mg/kg ,后者籽粒镉含量是前者的 2.51 倍(未发表数据)。本研究以上述两个杂交籼稻为试验材料,研究 Se、Si 配施对水稻体内 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响,以期探明不同籽粒镉积累、水稻 Cd 积累及其他矿质元素含量的变化规律,为水稻优质安全生产提供实践和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2015 年在四川省温江区四川农业大学水稻研究所试验田进行,前作为大蒜。土壤基础理化性质见表 1。试验田块土壤呈酸性,土壤全 Cd 含量达到 4.75 mg/kg ,严重超过《土壤环境质量标准》^[17]中所规定的二级土壤标准,属重度 Cd 污染土壤,在此田块进行水稻生产将会有很大的食品安全风险。

表 1 土壤基础理化性质
Table 1 Basic physical and chemical properties of soil.

全氮(g/kg) Total N (g/kg)	全磷(g/kg) Total P (g/kg)	速效钾(mg/kg) Available K (mg/kg)	pH	有机质(g/kg) Organic matter (g/kg)	有效镉(mg/kg) Available Cd (mg/kg)	全镉(mg/kg) Total Cd (mg/kg)
1.19	0.52	180	6.39	27.91	1.47	4.75

试验选用本课题组前期筛选出的两个中粳迟熟杂交稻品种:宜香 2115(籽粒低 Cd 积累)和川谷优 2348(籽粒高 Cd 积累)。宜香 2115 由四川农业大学农学院提供,川谷优 2348 购自四川竹丰种业有限公司。

1.2 试验设计与处理

采用二因素裂区试验设计,不同水稻品种为主因素 P:宜香 2115(P_1),川谷优 2348(P_2);不同的 Se(Na_2SeO_3)、Si 处理为副因素 T(各处理中 Se、Si 具体用量见表 2)。共 12 个处理,重复 3 次,共 36 个小区。

表 2 不同处理中 Se、Si 用量
Table 2 Dosage of selenium and silicon in different treatments.

处理 Treatment	Si (kg/hm^2)	Se ($\mu mol/L$)
CK	0	0
T_1	150	0
T_2	0	6
T_3	150	6
T_4	0	12
T_5	150	12

经过消毒、浸种后催芽的水稻种子在 2015 年 3 月 29 日播种,采用旱育秧,秧田土壤中未检出 Cd。在 4 月 30 日选取长势一致的秧苗移栽,移栽规格为行株距 33.3 cm×16.7 cm,每穴栽单株,小区面积为 12.8 m²。小区之间做高 20 cm、宽 30 cm 田埂,田埂用塑料薄膜包住,防止窜肥。磷钾肥按 P₂O₅ 75 kg/hm²和 K₂O 150 kg/hm²作底肥一次性施入;氮肥按 180 kg/hm²以基肥:蘖肥:穗肥=3:3:4比例施用;Si 肥作为基肥与磷钾肥一起施入;Se(Na_2SeO_3)溶液 3 L 在水稻抽穗期用电动喷雾器在早上 9:00~10:00 均匀喷施于水稻叶片上,CK 喷施 3 L H₂O,相邻小区在喷施处理时使用塑料薄膜隔开,防止 Se 溶液喷施进其他小区。其余田间管理按水稻高产栽培管理措施管理至成熟期。

1.3 测定项目与方法

水稻各部位 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn、Se、Si 含量测定:在成熟期每个小区取水稻地上部分稻株 5 株,将地上部分按茎、叶、穗 3 部分分样并分开包装,

用烘箱在 105℃杀青 1 h 后,调节温度至 75℃烘至恒重。另取一部分穗阴干后,用糙米机制得糙米。烘干后的样品以及阴干的糙米用不锈钢粉碎机粉碎,过 60 目筛。准确称量过 60 目筛的样品 0.500 0 g 置于聚四氟乙烯烧杯中,加入体积比为 3:1 的 HNO₃-HClO₄混酸溶液 20 mL,放置过夜。然后在电热板上进行消煮,当样品消煮至完全澄清时,将聚四氟乙烯烧杯中的消煮液转移到 50 mL 容量瓶中并用去离子水清洗聚四氟乙烯烧杯 3 次,清洗液一并转入容量瓶中,去离子水定容。定容后的溶液使用定量滤纸过滤到干净的聚乙烯塑料瓶内,使用电感耦合原子发射光谱仪(ICP-AES,美国热电公司)进行分析测定。

1.4 数据整理与分析

使用 Excel 2013 进行数据整理,使用 DPS 7.05 进行方差分析和回归分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻茎秆中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

从表 3 可以看出,Se、Si 处理对茎秆中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量有显著影响。川谷优 2348 茎秆中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量均显著高于宜香 2115。

宜香 2115 茎秆中, Si、Se 显著降低 Cd 含量, T_5 处理效果最佳, T_1 与 T_5 差异不显著,两个处理分别比对照低 24.4%和 28.9%; T_4 处理中 Ca 含量比对照高 24.4%,与对照差异显著; T_1 ~ T_5 处理使茎秆中 Cu 含量显著降低,降幅在 13.3%~30%, T_5 处理降幅最大;所有 Si、Se 处理均降低了 Mn 含量,降幅在 1.9%~30.2%, T_5 降幅最大,比对照低 30.2%;对于 Zn 含量而言, T_1 和 T_3 处理分别比对照显著下降 12.1%和 26.3%。

T_4 处理使川谷优 2348 茎秆 Cd 含量比对照高 10.2%,差异显著, T_1 和 T_5 处理则使茎秆中 Cd 含量比对照分别下降 24.1%和 8.0%,差异显著;所有 Si、Se 处理均增加了茎秆中 Ca 的含量,以 T_5 增幅最大,比对照高 33.5%; T_1 ~ T_3 处理显著降低了茎秆 Cu 含量,而 T_5 处理则显著提高了 Cu 的含量,比对照高 17.0%; T_1 处理使茎秆中 Mn 含量相比对照下降 8.3%,差异显著, T_4 和 T_5 处理则使得茎秆中 Mn 含量显著增加,增幅分别为 20.0%和

表 3 不同处理对水稻茎秆中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

Table 3 Effects of different treatments on the concentrations of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn in the rice stem.

水稻品种 Rice variety	处理 Treatment	Cd(μg/g)	Ca(mg/g)	Cu(μg/g)	Mn(mg/g)	Zn(μg/g)
宜香 2115 Yixiang 2115	CK	41.4 a	17.6 b	29.6 a	5.3 a	240 ab
	T ₁	31.3 de	17.3 bc	24.4 bc	4.3 c	211 c
	T ₂	35.3 bc	17.0 bc	26.1 b	5.2 a	259 a
	T ₃	33.8 cd	16.0 c	23.5 c	3.9 cd	177 d
	T ₄	37.5 b	21.9 a	24.2 bc	4.7 b	232 abc
	T ₅	29.4 e	18.1 b	20.8 d	3.7 d	221 bc
	平均值 Average value	34.8 b	18.0 b	24.8 b	4.5 b	223 b
川谷优 2348 Chuanguyou 2348	CK	49.3 b	18.8 c	30.6 b	6.0 bc	330 b
	T ₁	37.4 d	24.2 ab	25.5 c	5.5 d	301 cd
	T ₂	48.1 bc	24.3 ab	25.2 c	6.3 b	316 bc
	T ₃	46.5 bc	22.9 b	23 d	5.7 cd	383 a
	T ₄	53.8 a	20.0 c	30.5 b	7.2 a	400 a
	T ₅	45.4 c	25.1 a	35.8 a	6.9 a	280 d
	平均值 Average value	46.8 a	22.6 a	28.4 a	6.3 a	335 a
F 值 F value	P	388 **	971 **	44.9 **	139 **	238 **
	T	19.2 **	6.2 **	19.5 **	9.9 **	5.9 **
	P×T	4.3 **	15.9 **	10.8 **	9.98 **	9.8 **

注:同一列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$),平均值后字母表示两品种间差异显著($P<0.05$),P、T 和 P×T 分别代表品种、处理和品种与处理的互作效应,**表示在 $P<0.01$ 水平下差异显著。
Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level in the same variety by different treatments; letters behind the average value indicate significant difference at $P<0.05$ level between two rice varieties; P, T, P×T represent variety, treatment and their interaction effects, respectively; ** indicates significant difference at $P<0.01$ level.

15.0%;T₁和T₅处理的Zn含量显著低于对照,降幅分别为8.8%和15.2%,T₃和T₄处理使茎秆中Zn含量比对照分别显著增加16.1%和21.2%。

以上结果表明,Se、Si处理对宜香2115和川谷优2348茎秆Cd含量影响存在差异。Si+12 μmol/L Se能最大限度降低宜香2115茎秆Cd含量,但单独Si处理就可最大限度降低川谷优2348茎秆Cd含量,Se与Si在川谷优2348茎秆Cd吸收上表现出一定的拮抗作用。

2.2 对叶片中Cd、Ca、Cu、Mn、Zn含量的影响

由表4可以看出,川谷优2348叶片中Cd、Ca、Cu、Mn、Zn含量显著高于宜香2115,Si、Se处理对叶片Cd、Ca、Cu、Mn、Zn含量有显著影响。

T₂和T₅处理显著增加宜香2115叶片中Cd含量,T₃和T₄处理时,叶片Cd含量较对照显著下降,降幅分别为11.8%和19.7%;T₁~T₅处理使Ca含量比对照增加5.4%~15.2%,T₂处理叶片Ca含量最高;T₃处理能够显著提高叶片Cu的含量,比对照增加12.8%,其他处理均使叶片中Cu含量下降,降幅在2.8%~30.5%,以T₁处理降幅最大;T₁、

T₃、T₄和T₅处理使叶片Mn含量较对照分别下降16.7%、26.9%、25.6%和24.4%,但T₂处理下叶片中的Mn含量比对照显著增加14.1%;T₁和T₄处理Zn含量相等,均比对照低7.5%,T₃处理则比对照高44.2%,差异显著。

在T₁~T₅处理下川谷优2348叶片Cd含量比对照下降了26.0%~56.9%,T₁降幅最大;叶片中的Ca含量则在T₂、T₄和T₅下分别比对照处理提高6.6%、11.4%和12.1%;T₁和T₃处理使得叶片中Cu含量较对照显著降低,而T₄和T₅处理则较对照显著增加,增幅分别为6.6%和25.2%;除T₄处理使叶片Mn含量显著升高外,其余施用Si、Se处理下川谷优2348叶片Mn含量显著低于对照,降幅在12.8%~26.6%之间,以T₁处理降幅最大;T₁~T₃处理叶片Zn含量均显著低于对照,T₄和T₅处理显著提高叶片Zn含量,增幅分别为5.8%和59.1%。

由此可见,Se、Si处理中只有Si+6 μmol/L Se处理和12 μmol/L Se处理能减少宜香2115叶片中Cd的含量,但均降低川谷优2348叶片中Cd

表 4 不同处理对水稻叶中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on the concentrations of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn in the rice leaf.

水稻品种 Rice variety	处理 Treatment	Cd(μg/g)	Ca(mg/g)	Cu(μg/g)	Mn(mg/g)	Zn(μg/g)
宜香 2115 Yixiang 2115	CK	15.2 b	71.1 d	14.1 b	7.8 b	120 b
	T ₁	16.2 b	74.5 cd	9.8 e	6.5 c	101 c
	T ₂	18.2 a	81.9 a	13.7 bc	8.9 a	124 b
	T ₃	13.4 c	75.3 bc	15.9 a	5.7 c	173 a
	T ₄	12.2 c	79.2 ab	10.8 d	5.8 c	101 c
	T ₅	18.8 a	76.3 bc	13.1 c	5.9 c	111 bc
	平均值 Average value	15.7 b	76.4 b	12.9 b	6.7 b	122 b
川谷优 2348 Chuanguyou 2348	CK	28.8 a	89.5 d	15.1 c	9.4 a	154 b
	T ₁	12.4 d	91.0 d	11.4 e	6.9 d	119 c
	T ₂	21.3 b	95.4 bc	15.4 bc	8.0 bc	128 c
	T ₃	20.0 bc	91.6 cd	14.1 d	7.3 cd	131c
	T ₄	19.8 bc	99.7 ab	16.1 b	10.6 a	165 b
	T ₅	18.5 c	101.3 a	18.9 a	8.2 b	245 a
	平均值 Average value	20.1 a	94.8 a	15.2 a	8.4 a	157 a
F 值 F value	P	241 **	1 088 **	814 **	60.8 **	50.7 *
	T	25.2 **	8.2 **	47.7 **	11.0 **	13.5 **
	P×T	30.9 **	2.2	28 **	11.8 **	22.5 **

注:同一列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$),平均值后字母表示两品种间差异显著($P<0.05$),P、T 和 P×T 分别代表品种、处理和品种与处理的互作效应,* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。
Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level in the same variety by different treatments; letters behind the average value indicate significant difference at $P<0.05$ level between two rice varieties; P, T, P×T represent variety, treatment and their interaction effects, respectively; * and ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

含量,这表明 Se 和 Si 的互作效应对宜香 2115 叶片中 Cd 含量的影响与 Se 的浓度存在密切关系。此外,Se、Si 处理还能促进两品种叶片 Ca 含量的增加。

2.3 对穗部 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

从表 5 可以看出,川谷优 2348 穗部 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量均显著高于宜香 2115,不同 Si、Se 处理对穗部 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量影响显著。

所有 Si、Se 处理都显著降低宜香 2115 穗部 Cd 含量,T₁处理效果最佳,比对照低 18.2%,T₄处理降幅最小,与对照相比降低 10.6%;Ca 含量在 T₃和 T₅处理下分别比对照升高 15.0%和 17.5%,差异显著,其余 Si、Se 处理与对照相当;穗部 Cu 含量表现为对照处理显著高于 Si、Se 处理,其中 T₅处理 Cu 含量最低,为对照处理的 73%;穗部 Mn 含量在处理间差异不显著;穗部 Zn 含量在对照下最高,但与 T₁~T₄处理下的 Zn 含量差异并不显著,仅显著高于 T₅处理。

川谷优 2348 穗部 Cd 含量在 T₁~T₄处理比对照低 4.1%~24.7%,T₃处理为最低;T₃处理使川

谷优 2348 穗部 Ca 含量较对照显著降低 19.6%,T₄处理 Ca 含量最高,比对照高 43.1%;T₁处理可以显著降低川谷优 2348 穗部 Cu 含量,而 T₂~T₅处理穗部 Cu 含量则高于对照处理,其中 T₃和 T₅处理与对照差异显著;在 T₄和 T₅处理下,穗部 Mn 含量显著高于对照处理,其中以 T₄处理含量最高;T₅处理能够显著提高川谷优 2348 穗部 Zn 含量,比对照提高 38.4%,其余 Si、Se 处理与对照差异不显著。

由此可见,Se、Si 处理都能降低宜香 2115 和川谷优 2348 穗部 Cd 含量,但对川谷优 2348 穗部 Cd 含量的降低幅度更大。这表明,Se、Si 对于高镉积累水稻品种穗部 Cd 含量积累的抑制作用更为明显。此外,Se、Si 处理下两品种达到最低 Cd 含量的处理不一致,说明宜香 2115 和川谷优 2348 穗部 Cd 含量对两种元素的敏感性存在差异。

2.4 对糙米中 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

从表 6 可以看出,宜香 2115 糙米中 Cd 含量显著低于川谷优 2348。两品种糙米 Cd 含量在 5 个处理下比对照均下降,其中宜香 2115 在单施

表 5 不同处理对水稻穗部 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

Table 5 Effects of different treatments on the concentrations of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn in the rice panicle.

水稻品种 Rice variety	处理 Treatment	Cd(μg/g)	Ca(mg/g)	Cu(μg/g)	Mn(mg/g)	Zn(μg/g)
宜香 2115 Yixiang 2115	CK	6.6 a	4.0 b	8.9 a	0.46 a	80 a
	T ₁	5.4 d	4.1 b	8.2 b	0.45 a	74 ab
	T ₂	5.6 c	3.7 b	7.1 d	0.41 a	72 ab
	T ₃	5.7 bc	4.6 a	7.1 d	0.48 a	69 ab
	T ₄	5.9 b	4.1 b	7.6 c	0.41 a	68 ab
	T ₅	5.7 c	4.7 a	6.5 e	0.43 a	67 b
	平均值 Average value	5.8 b	4.2 b	7.6 b	0.44 b	72 b
川谷优 2348 Chuanguyou 2348	CK	7.3 a	5.1 c	7.8 b	0.59 cd	86 bc
	T ₁	5.7 c	5.0 c	7.0 c	0.52 d	77 c
	T ₂	5.9 c	5.8 b	8.1 b	0.62 bc	92 b
	T ₃	5.5 d	4.1 d	8.9 a	0.53 d	89 b
	T ₄	7.0 b	7.3 a	8.2 b	0.83 a	90 b
	T ₅	7.3 a	6.1 b	8.9 a	0.68 b	119 a
	平均值 Average value	6.5 a	5.5 a	8.2 a	0.63 a	92 a
F 值 F value	P	562 **	367 **	68.7 *	126 **	40.6 *
	T	69.8 **	10.6 **	4.1 **	3.5 *	3.7 *
	P×T	22.9 **	13.9 **	27.2 **	6.9 **	5.8 **

注:同一列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$),平均值后字母表示两品种间差异显著($P<0.05$),P、T 和 P×T 分别代表品种、处理和品种与处理的互作效应,* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level in the same variety by different treatments; letters behind the average value indicate significant difference at $P<0.05$ level between two rice varieties; P, T, P×T represent variety, treatment and their interaction effects, respectively; * and ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

表 6 不同处理对水稻糙米 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量的影响

Table 6 Effects of different treatments on the concentrations of Cd, Ca, Cu, Mn, Zn in the brown rice.

水稻品种 Rice variety	处理 Treatment	Cd(μg/g)	Ca(mg/g)	Cu(μg/g)	Mn(mg/g)	Zn(μg/g)
宜香 2115 Yixiang 2115	CK	2.6 a	1.1 b	11.3 a	84 b	61 b
	T ₁	2.5 ab	1.4 a	11.1 a	97 a	68 a
	T ₂	2.0 d	0.9 c	10.0 b	66 cd	47 cd
	T ₃	2.2 c	0.9 c	9.2 d	69 c	44 d
	T ₄	2.4 ab	0.9 c	9.7 bc	58 e	46 cd
	T ₅	2.3 c	0.9 c	9.6 c	62 de	49 c
	平均值 Average value	2.3 b	1.0 a	10.2 b	73 b	53 a
川谷优 2348 Chuanguyou 2348	CK	3.9 a	1.0 b	10.5 c	80 b	56 a
	T ₁	3.4 b	0.9 c	10.1 d	73 c	52 b
	T ₂	2.8 c	1.1 a	10.7 bc	81 b	56 a
	T ₃	2.5 d	1.1 a	11.0 ab	81 b	57 a
	T ₄	2.5 d	1.0 b	11.1 a	90 a	54 a
	T ₅	2.7 c	1.0 b	9.5 e	79 b	51 b
	平均值 Average value	3.0 a	1.0 a	10.5 a	81 a	54 a
F 值 F value	P	174.85 **	0.20	25.52 *	222.97 **	1.16
	T	29.77 **	28.83 **	21.96 **	11.20 **	20.63 **
	P×T	12.63 **	65.88 **	33.28 **	32.92 **	28.53 **

注:同一列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$),平均值后字母表示两品种间差异显著($P<0.05$),P、T 和 P×T 分别代表品种、处理和品种与处理的互作效应,* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。

Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level in the same variety by different treatments; letters behind the average value indicate significant difference at $P<0.05$ level between two rice varieties; P, T, P×T represent variety, treatment and their interaction effects, respectively; * and ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

6 $\mu\text{mol/L}$ Se 下最低,比对照低 23.1%;川谷优 2348 在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 与单施 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下最低,比对照低 35.9%。两品种糙米 Ca 含量差异不显著,但单施 Si 肥促进宜香 2115 Ca 含量增加,但却显著降低川谷优 2348 糙米 Ca 含量。宜香 2115 糙米 Cu 含量显著低于川谷优 2348, Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 使宜香 2115 糙米 Cu 含量比对照降低 18.6%, Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 使川谷优 2348 糙米 Cu 含量比对照下降 9.5%,差异均达到显著水平。宜香 2115 中糙米中 Mn 含量显著低于川谷优 2348,单施 Si 肥处理下,宜香 2115 的 Mn 含量最高,单施 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下 Mn 含量最低;川谷优 2348 糙米 Mn 含量在单施 Si 肥下最低,单施 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 下最高。两品种糙米中 Zn 含量差异不显著,但宜香 2115 处理间变化幅度较大,在单施 Si 肥处理下其糙米中 Zn 含量较对照显著提高,而其余各处理糙米的 Zn 含量显著低于对照;

川谷优 2348 糙米中 Zn 含量只在 T_1 和 T_5 处理下显著低于对照。

2.5 水稻不同器官 Se 和 Si 含量比较

从表 7 可以看出,品种、不同处理及二者互作均极显著影响水稻各部位 Se 含量,不同品种对水稻穗部 Si 含量影响不显著。宜香 2115 各部位 Se 含量均显著高于川谷优 2348。与对照相比,两品种不同部位 Se 含量在 5 个处理中均增加,且都在单施 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 溶液时达到最大,宜香 2115 和川谷优 2348 茎、叶、穗和糙米中 Se 含量在此处理下分别比对照高 5.2 倍、3.2 倍、3.2 倍、5.9 倍和 5.9 倍、3.0 倍、3.3 倍、6.7 倍。两品种水稻各部分中 Si 含量在施 Si 的处理中都升高。其中,在 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下,宜香 2115 和川谷优 2348 茎和穗部 Si 含量都达到最大值,分别是自对照的 1.7 倍、1.3 倍和 1.8 倍、2.0 倍。两品种叶片 Si 含量却在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下含量最高,分别是

表 7 不同处理对水稻各部位 Se 和 Si 含量的影响

Table 7 Effects of different treatments on the contents of Se and Si in different parts.

水稻品种 Rice variety	处理 Treatment	Se($\mu\text{g/g}$)				Si(mg/g)			
		茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	糙米 Brown rice	茎 Stem	叶 Leaf	穗 Panicle	糙米 Brown rice
宜香 2115 Yixiang 2115	CK	0.30 f	0.74 f	0.57 f	0.32 d	59.33 c	101.67 f	77.67 d	0.36 e
	T_1	0.34 e	0.80 e	0.61 e	0.33 d	93.33 b	130.33 c	86.33 c	0.56 c
	T_2	0.81 c	1.58 c	1.23 d	1.02 c	61.67 c	111.33 e	67.00 e	0.40 d
	T_3	0.72 d	1.45 d	1.29 c	1.03 c	91.33 b	155.67 a	93.00 b	0.67 a
	T_4	1.56 a	2.36 a	1.84 a	1.89 a	60.33 c	121.33 d	70.33 e	0.42 d
	T_5	1.34 b	2.02 b	1.70 b	1.68 b	99.00 a	150.33 b	102.67 a	0.61 b
	平均值 Average value	0.84 a	1.49 a	1.21 a	1.04 a	77.50 a	128.44 a	82.83 a	0.50 a
川谷优 2348 Chuanguyou 2348	CK	0.22 f	0.61 e	0.43 d	0.21 e	52.00 cd	94.00 d	60.33 d	0.25 c
	T_1	0.28 e	0.62 e	0.44 d	0.22 e	81.00 b	128.67 c	81.67 c	0.44 a
	T_2	0.41 d	1.28 d	1.01 c	0.92 d	49.67 d	94.00 d	63.67 d	0.31 b
	T_3	0.63 c	1.45 c	1.06 b	1.10 c	92.00 a	164.33 a	112.33 b	0.46 a
	T_4	1.30 a	1.83 a	1.40 a	1.48 a	54.00 c	96.00 d	63.33 d	0.31 b
	T_5	1.00 b	1.63 b	1.37 a	1.29 b	95.33 a	159.33 b	122.33 a	0.48 a
	平均值 Average value	0.64 b	1.24 b	0.95 b	0.87 b	70.67 b	122.72 b	83.94 a	0.38 b
F 值 F value	P	140.77 **	126.52 **	442.04 **	128.70 **	129.31 **	36.33 **	0.98	510.87 **
	T	1662.24 **	1336.20 **	1272.59 **	1280.87 **	252.47 **	562.72 **	273.93 **	88.45 **
	P×T	25.86 **	37.05 **	16.93 **	31.89 **	3.95 **	37.28 **	38.37 **	3.04 *

注:同一列数据后不同字母表示同一品种不同处理间差异显著($P<0.05$),平均值后字母表示两品种间差异显著($P<0.05$),P、T 和 P×T 分别代表品种、处理和品种与处理的互作效应,* 和 ** 分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平下差异显著。
Note: Different letters in the same column indicate significant difference at $P<0.05$ level in the same variety by different treatments; letters behind the average value indicate significant difference at $P<0.05$ level between two rice varieties; P, T, P×T represent variety, treatment and their interaction effects, respectively; * and ** indicate significant difference at $P<0.05$ and $P<0.01$ levels, respectively.

其对照的 1.5 倍和 1.7 倍。宜香 2115 糙米中 Si 含量在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下含量最高;川谷优 2348 在 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下糙米中 Si 含量最高,但与 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下的 Si 含量差异不显著。

3 讨论

矿质营养对植物生长和代谢作用有着重要意义,Cd 胁迫会改变植物体内矿质元素的吸收^[5, 16]。茎是植物转运矿质营养的重要部位,根系吸收的养分通过主动或者被动运输向地上部进行转运以满足植物地上部分对矿质元素的需求。本试验中,籽粒低镉积累品种宜香 2115 茎中的 Cd、Cu、Mn 含量都在 $T_1 \sim T_5$ 处理下出现不同程度下降,籽粒高镉积累品种川谷优 2348 茎中 Cd、Mn、Zn 含量却在喷施 12 $\mu\text{mol/L}$ 处理达到最大,说明不同镉积累品种水稻茎中的矿质元素含量在 Se、Si 及其共同处理下存在明显差别。Se 对植物存在着“浓度效应”,即低浓度的 Se 促进植物的生长发育,高浓度 Se 则抑制植物的生长发育^[18]。川谷优 2348 在 T_4 (喷施 Se 12 $\mu\text{mol/L}$) 处理下 Cd、Mn、Zn 含量最大,说明川谷优 2348 比宜香 2115 能耐受更高浓度的 Se。宜香 2115 在 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下茎 Cd、Cu、Mn 含量最低,川谷优 2348 茎秆中的 Ca、Cu、Mn 含量最高,但 Zn 含量却最低。这些结果表明 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理对籽粒低积累品种茎秆中 Cd、Cu、Mn 和籽粒高镉积累品种茎秆中的 Zn 积累产生抑制作用,而对籽粒高镉积累品种茎秆中的 Ca、Cu、Mn 的积累产生促进作用。

叶是植物进行光合作用的器官,Cd 胁迫下叶片矿质元素含量变化可导致叶绿素含量下降、抗氧化酶活性等和矿质元素密切相关的生理活动受到影响^[19, 20]。林莉^[21]研究表明,3 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理可以抑制 50 $\mu\text{mol/L}$ 的 Cd 处理诱导水稻叶片中 Fe、Zn 含量的上升。刘文星^[22]在 Se 对不同耐镉特性烟草大量及微量元素的影响研究表明 Se 增加 Cd 胁迫下烟草叶片中 Zn、Mn、Ca 的含量。本试验中,喷施 6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理使宜香 2115 叶片 Cd 含量显著增加,说明在低 Se 处理能够促进低镉积累品种叶片 Cd 的积累,川谷优 2348 叶片 Cd 含量在 Si、Se 处理下显著低于对照,且在单施

Si 肥处理下叶片 Cd 含量最低,表明这些处理均抑制川谷优 2348 叶片中 Cd 的积累。此外,单施 6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下,宜香 2115 叶片中 Ca、Mn 含量最高,Cu、Zn 含量却在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下最高;川谷优 2348 叶片中的 Ca、Cu、Zn 含量在 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下最高,Mn 含量在 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 单独处理下最高。这些结果表明,宜香 2115 在低 Se 处理(T_2 和 T_3),川谷优 2348 在高 Se 处理(T_4 和 T_5)下能促进 Ca、Cu、Mn、Zn 的积累,表现出不同品种叶片中 Ca、Cu、Mn、Zn 含量对 Se 的敏感性差异。

Cd 胁迫下,水稻籽粒中 Cd 和其他矿质营养元素的含量会因品种以及不同的处理而存在差异^[23~25]。本试验中,宜香 2115 在 Si 单独处理下其穗部 Cd 含量最低,川谷优 2348 在 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠处理下 Cd 含量最低;就糙米中 Cd 含量而言,宜香 2115 在单施 6 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠下最低,川谷优 2348 在 12 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠处理与 Si+6 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠一样最低,可见穗部 Cd 含量与糙米 Cd 含量变化趋势存在不一致性。导致这一现象的原因可能是穗部样品包含枝梗、谷壳以及糙米 3 部分,单施 Si 虽可降低穗部整体的 Cd 含量,却并不减少宜香 2115 其他部位 Cd 向糙米中的转运;Si+6 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠处理可能降低包括糙米在内的川谷优 2348 穗部 Cd 含量,但 12 $\mu\text{mol/L}$ 亚硒酸钠处理则主要降低了其余部位 Cd 向糙米转移。赵颖等^[26]研究证明, Si 可以改变 Cd 在水稻体内的转运分配来减少水稻籽粒中 Cd 的含量。川谷优 2348 则是在 Si+低 Se 处理(T_3)其穗部 Cd 含量最低,可能的原因是低浓度的 Se 和 Si 配合施用产生协同效应,进一步降低川谷优 2348 穗部 Cd 的含量。徐向华等^[27]研究证明 Se 和 Si 共施较单独施 Se 能更有效降低水稻籽粒中砷(As)含量。Si+高 Se 处理可显著增加宜香 2115 穗部 Ca 的积累,但却显著地减少穗部 Cu 和 Zn 的积累;但在川谷优 2348 穗部中, Si+高 Se 处理却显著增加了 Ca、Cu 和 Zn 的含量。这些差异再次证明了 Cd 胁迫导致的穗部矿质营养的积累是一个复杂的过程,其与品种、处理等多种因素都有关系。

Se 和 Si 在水稻缓解 Cd 胁迫上积极作用,适当浓度 Se 和 Si 减少水稻对 Cd 的吸收,降低 Cd 胁迫导致的氧化胁迫伤害^[1, 6]。本试验中,宜香

2115 与川谷优 2348 在外施 Se 和 Si 条件下,体内的 Se 和 Si 含量都显著升高,但品种间存在显著差异,这与品种特性密切相关。两品种糙米中 Se 含量在 12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理较 Si+12 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理更高,其原因可能是高浓度 Se 与 Si 的互作,抑制 Se 向糙米内转运。Se+Si 处理促进两品种糙米中 Si 含量升高,其原因可能是 Se、Si 互作促进了 Si 向糙米中的转运。

本试验中,籽粒高镉积累品种川谷优 2348 体内 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn 含量均高于籽粒低镉积累品种宜香 2115,但 Se 和 Si 含量低于后者。Se、Si 及其共施处理显著影响两种水稻体内 Cd、Ca、Cu、Mn、Zn、Se 及 Si 积累。宜香 2115 和川谷优 2348 叶片对 Se 敏感度不同,宜香 2115 较川谷优 2348 对 Se 处理更敏感,低浓度 Se 处理能促进宜香 2115 叶片对 Ca、Cu、Mn、Zn 的吸收。宜香 2115 在单施 Si 肥 150 kg/hm^2 处理下能最大限度降低穗部 Cd 含量,川谷优 2348 在施 Si 肥 150 kg/hm^2 + 6 $\mu\text{mol/L}$ Se 处理下最大限度降低穗部 Cd 含量;糙米中 Cd 含量变化趋势与穗部 Cd 含量变化趋势的不同表明,Se、Si 处理对两个品种穗部 Cd 的分配存在着差异,这需要进一步深入研究。

参 考 文 献

- [1] 赵玉林,王 晓,武倩倩. 我国土壤重金属污染现状与治理方法[J]. 中国资源综合利用, 2014,32(3): 55-57.
Zhao Y L, Wang X, Wu Q Q. Analysis of the status and the treatment methods of heavy metal contaminated soil in China [J]. China Res. Comprehensive Utilization, 2014,32(3): 55-57.
- [2] 国土资源部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201404/t20140417_1312998.htm, 2014-04-17.
- [3] Iannone M F, Groppa M D, Benavides M P. Cadmium induces different biochemical responses in wild type and catalase-deficient tobacco plants[J]. Environ. Exp. Bot., 2015, 109: 201-211.
- [4] Uruguchi S, Fujiwara T. Rice breaks ground for cadmium-free cereals[J]. Curr. Opin. Plant Biol., 2013, 16(3): 328-334.
- [5] 刘春梅,罗盛国,王孟雪,等. 硒对镉胁迫下寒地水稻 Cd、Zn、Fe、Cu、Mn 含量的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 136-142.
Liu C M, Luo S G, Wang M X, et al.. Effects of selenium on cadmium, zinc, iron, copper, manganese content in rice under cadmium stress in cold climate [J]. J. Soil Water Conserv., 2014, 28(6): 136-142.
- [6] 孙 岩,韩 颖,李 军,等. 硅对镉胁迫下水稻生物量及镉的化学形态的影响[J]. 西南农业学报, 2013, 26(3): 1240-1244.
- [7] Sun Y, Han Y, Li J, et al.. Effect of Si on rice biomass and chemical species of Cd under Cd stress [J]. Southwest China J. Agric. Sci., 2013, 26(3): 1240-1244.
- [8] Wang S, Wang F, Gao S. Foliar application with nano-silicon alleviates Cd toxicity in rice seedlings[J]. Environ. Sci. Poll. Res., 2015, 22(4): 2837-2845.
- [9] Nwugo C C, Huerta A J. Effects of silicon nutrition on cadmium uptake, growth and photosynthesis of rice plants exposed to low-level cadmium[J]. Plant Soil, 2008, 311(1-2): 73-86.
- [10] Wu J, Shi Y, Zhu Y, et al.. Mechanisms of enhanced heavy metal tolerance in plants by silicon: A review[J]. Pedosphere, 2013, 23(6): 815-825.
- [11] 陈松灿,孙国新,陈 正,等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展[J]. 植物生理学报, 2014, (5): 612-624.
Chen S C, Sun G X, Chen Z, et al.. Progress on selenium metabolism and interaction with heavy metals in higher plants [J]. Acta Phytophysiol. Sin., 2014, (5): 612-624.
- [12] 张均华,朱练峰,禹盛苗,等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, (10): 2900-2906.
Zhang J H, Zhu L F, Yu S M, et al.. Selenium cycling and transformation in paddy field and selenium nutrition of rice: A review [J]. Chin. J. Appl. Ecol., 2012, (10): 2900-2906.
- [13] Mozafariyan M, Shekari L, Hawrylak-Nowak B, et al.. Protective role of selenium on pepper exposed to cadmium stress during reproductive stage[J]. Biol. Trace Elem. Res., 2014, 160(1): 97-107.
- [14] Hu Y, Norton G J, Duan G, et al.. Effect of selenium fertilization on the accumulation of cadmium and lead in rice plants[J]. Plant Soil, 2014, 384(1-2): 131-140.
- [15] 吴之琳,童心昭,尹雪斌,等. 硒提高植物拮抗重金属毒性的研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2014, (2): 22-27.
Wu Z L, Tong X Z, Yin X B, et al.. Research progress of selenium in improving plant antagonistic metal toxicity [J]. Grain Sci. Technol. Econ., 2014, (2): 22-27.
- [16] Przedpelska-Wasowicz E, Polatajko A, Wierzbicka M. The influence of cadmium stress on the content of mineral nutrients and metal-binding proteins in *Arabidopsis halleri*[J]. Water Air Soil Poll., 2012, 223(8): 5445-5458.
- [17] 陈京都,何 理,许 轲,等. 镉胁迫对不同基因型水稻生长及矿质营养元素吸收的影响[J]. 生态学杂志, 2013, (12): 3219-3225.
Chen J D, He L, Xu K, et al.. Growth and nutritional element absorption of different rice genotypes under cadmium stress [J]. Chin. J. Ecol., 2013, (12): 3219-3225.
- [18] 国家环境保护局. GB 15618-1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [19] 张 娜,袁菊红,胡绵好. 硒对紫云英的 Hormesis 效应及其生理响应研究[J]. 生物学杂志, 2015, 32(2): 42-47.
Zhang N, Yuan J H, Hu M H. Study of selenium on hormesis effect and physiological response of *Astragalus sinicus* [J]. J. Biol., 2015, 32(2): 42-47.
- [20] 袁思莉,余 垚,万亚男,等. 硒缓解植物重金属胁迫和累积的机制[J]. 农业资源与环境学报, 2014, (6): 545-550.
Yuan S L, Yu Y, Wan Y N, et al.. Mechanisms of selenium

- mitigating stress and accumulation of heavy metals in plants [J]. *J. Agric. Res. Environ.*, 2014, (6): 545-550.
- [20] 杨春刚,朱智伟,章秀福,等. 重金属镉对水稻生长影响和矿质元素代谢的关系[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(11): 176-178.
- Yang C G, Zhu Z W, Zhang X F, *et al.* Relation of cadmium effect on growth and mineral concentration of rice plant [J]. *Chin. Agric. Sci. Bull.*, 2005, 21(11): 176-178.
- [21] 林莉. 硒缓解水稻镉毒害的机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 硕士学位论文, 2011.
- Lin L. Mechanisms of alleviation effects of selenium application on cadmium toxicity in rice [D]. Hangzhou: Zhejiang University, Master Dissertation, 2011.
- [22] 刘文星. 外源硒缓解烟草镉毒害及基因型差异的机理研究[D]. 杭州:浙江大学, 硕士学位论文, 2015.
- Liu W X. Mechanisms of alleviation effects of selenium application on cadmium toxicity and genotypic difference in tobacco [D]. Hangzhou: Zhejiang University, Master Dissertation, 2015.
- [23] 邵国胜,陈铭学,王丹英,等. 稻米镉积累的铁肥调控[J]. *中国科学 C 辑:生命科学*, 2008, 38(2): 180-187.
- [24] 文志琦,赵艳玲,崔冠男,等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. *植物生理学报*, 2015, (8): 1280-1286.
- Wen Z Q, Zhao Y L, Cui G N, *et al.* Effects cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice [J]. *Acta Phytophysiol. Sin.*, 2015, (8): 1280-1286.
- [25] Sebastian A, Prasad M N V. Modulatory role of mineral nutrients on cadmium accumulation and stress tolerance in *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Environ. Sci. Poll. Res.*, 2015, 8(1): 1-10.
- [26] 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]. *J. Northeast Agric. Univ.*, 2010, 41(3): 59-64.
- [27] 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, (6): 1064-1069.
- Xu X H, Liu C P, Tang X L, *et al.* Foliar application of selenium-silicon sol reduced arsenic accumulation in rice [J]. *Ecol. Environ.*, 2014, (6): 1064-1069.