

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2017.07.008

叶面施硒对水稻各生育期镉汞吸收的影响^①

张璐, 周鑫斌, 苏婷婷

西南大学 资源环境学院, 重庆 400716

摘要: 试验通过水稻叶面喷施不同质量浓度亚硒酸钠(0.2, 1.5, 5.0 mg/L), 研究亚硒酸钠对水稻体内镉、汞积累和转运的影响。结果表明, 叶面喷施亚硒酸钠(<1 mg/L)能够明显提高籽粒中的硒的质量分数, 对水稻各生育期各部位镉的质量分数以及迁移无影响, 却能够明显降低成熟期籽粒汞的质量分数和次级迁移系数(STI)。喷施质量浓度过高(5 mg/L)会促进孕穗期、成熟期镉向茎叶和籽粒中的迁移, 从而使茎叶和籽粒中镉的质量分数增加, 但是对水稻各部位的汞的质量分数和迁移无影响。因此孕穗期和成熟期是硒影响水稻体内镉、汞积累的关键时期, 喷施亚硒酸钠对水稻吸收和转运重金属的影响结果与喷施质量浓度以及金属阳离子的特性有关。

关键词: 水稻; 硒; 重金属

中图分类号: S511.4⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2017)07-0050-07

重金属在土壤中不易随水淋滤, 且不能被土壤微生物分解, 同时具有生物放大和富集效应, 因此严重威胁着我们的农田生态系统和食品安全^[1-2]。如镉元素进入人体后可损害血管导致组织缺血引起多系统损伤^[3]。同种植物不同器官, 不同生长阶段对汞、镉的吸收积累和分布, 都具有一定的变化规律。通常镉、汞进入植物细胞后, 会与细胞内的谷胱甘肽(GSH)、植物络合素(PCs)、金属硫蛋白等发生络合, 以络合物形式运往液泡内储存起来, 从而使细胞液中游离 Cd^{2+} , Hg^{2+} 的浓度降低, 减轻毒害作用^[4-6]。因此叶片中高质量浓度 GSH 或 PCs 很可能有助于叶肉细胞对镉、汞离子的络合和固定, 减少其向水稻籽粒中的运输。硒是一种人和动物必需的微量元素, 每日适量的硒摄入, 可以延缓衰老, 增强免疫力, 降低心血管疾病和癌症的发生率^[7]。在植物体内硒对 GSH 系统具有增强作用, 且能够影响植物螯合肽(PCs)的合成^[8-9], 近些年关于硒对重金属的拮抗作用是研究热点。Zhang 等^[10]报道, 在贵州万山汞矿附近随着土壤中硒的质量分数的升高, 稻米中硒质量分数上升, 土壤中的 IHg 和 $Me-Hg$ 向稻米中的转运率降低。Hu 等^[11]研究表明, 在土壤中施用 0.5 mg/kg 亚硒酸钠, 糙米中的硒的质量分数增加, 籽粒中镉的累积量下降了 44.4%。张海英等^[12]发现, 草莓喷施 2.5~5.0 mg/L 适宜质量浓度亚硒酸钠能够有效抑制草莓叶片和果实对重金属镉和铅的吸收。叶面施硒是提高水稻籽粒硒的质量分数非常重要的途径^[13], 通过叶面喷施亚硒酸钠抑制水稻吸收和转运重金属的研究还未见报道。本研究通过给水稻喷施不同质量浓度亚硒酸钠, 研究喷施亚硒酸钠对水稻吸收和转运镉、汞的影响, 以为大米安全生产提供一定的技术及理论支撑。

① 收稿日期: 2015-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(31372141, 31672238); 中央高校基本科研业务费专项资金(XDJK2013B04, 52362015xk06)。

作者简介: 张璐(1991-), 女, 河南安阳人, 硕士, 主要从事植物营养研究。

通信作者: 周鑫斌, 博士, 副教授。

1 实验材料与方法

1.1 实验材料

盆栽试验所用土壤采自紫色土肥力和肥料效益国家监测基地的表层紫色土(0~15 cm),理化性质如表 1 所示,供试水稻品种为 Q 优 1 号,土壤培养试验在自然光的温室大棚中进行.种子催芽后,水稻幼苗在石英砂中生长 20 d,待水稻幼苗生长到约 15 cm 左右开始移栽.

表 1 土壤基本理化性质

土壤类型	pH	有机质/ (g · kg ⁻¹)	碱解氮/ (mg · kg ⁻¹)	速效磷/ (mg · kg ⁻¹)	速效钾/ (mg · kg ⁻¹)	全汞/ (mg · kg ⁻¹)	全硒/ (mg · kg ⁻¹)
水稻土	6.6	18.73	112.31	12.76	79.60	0.053	0.235

1.2 实验设计

试验设置 1 个 Cd 水平(1.5 mg/kg 土), 3 个 Na₂SeO₃ · 5H₂O 水平(0.2, 1.0 和 5.0 mg/L), 喷施等量清水做对照, 1 个 Hg 水平(2.0 mg/kg 土)与 3 个 Na₂SeO₃ · 5H₂O 水平(0.2, 1.0 和 5.0 mg/L), 喷施等量清水做对照, 共 8 个处理, 9 次重复, 共 72 盆. 每盆装土 10 kg. Cd, Hg 以溶液的形式与土壤混合均匀, 按每 kg 土 192 mg P (KH₂PO₄), 132 mg K(KCl), 321 kg N(CO(NH₂)₂)施用底肥. 淹水老化平衡 4 周后, 挑选长势一致的水稻幼苗移栽到盆中, 每盆栽种 2 株, 并放于温室中培养, 生长温度为 25~30 °C. 在拔节期开始喷施硒, 以后每间隔 10 d 喷施 1 次, 于水稻籽粒成熟前 20 d 左右停止. 喷施程度以叶正反面均与布满雾状水滴为度. 在整个试验期间, 盆内土壤始终保持淹水状态. 在拔节期, 孕穗期, 和成熟期中, 每个处理分别收获 3 盆用于分析和测定.

1.3 样品收获与测定

水稻拔节期, 孕穗期, 成熟期分别取样, 测定其叶片中的丙二醛(MDA)浓度, 丙二醛(MDA)浓度采用硫代巴比妥酸法^[14]测定.

将水稻分为根和地上部两部分, 分别用去离子水洗净, 60 °C 烘干, 并记录干质量, 样品质量测定后粉碎, 测定各部位硒、镉、汞质量分数.

硒、汞的测定: 水稻样品烘干粉碎后用 HNO₃—H₂O₂ (体积比 3 : 1)消解, 用 6 mol/L 盐酸还原, 用氢化物发生—原子荧光光谱法测定^[14].

镉的测定: 水稻样品烘干粉碎后用硝酸—高氯酸(3 : 1)消化后, 用原子吸收分光光度计测定^[18].

1.4 数据处理

数据处理中计算公式:

初级迁移系数 PTI=茎叶中汞累积量/根汞累积量

次级迁移系数 STI=穗(籽粒)中汞累积量/茎中汞累积量

试验所得数据采用应用 Excel2007 和 SPSS13.0 软件对试验数据进行统计和单因素方差分析, 不同处理浓度间采用 LSD 法检验其结果是否有统计学意义($p < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 叶面喷硒对水稻各生育期生物量的影响

不同质量浓度的喷硒处理, 水稻各生育期的生物量如表 2 所示, 结果表明, 施用 1.5 mg/kg 镉, 2.0 mg/kg 汞没有对水稻产生毒害作用, 随着喷硒质量浓度的增加水稻各部位的生物量与对照无明显差异. 说明喷硒对水稻各部位生物量无影响.

表 2 不同生育期水稻各部位生物量(g/盆, 干质量)

处 理			拔节期		孕穗期			成熟期		
Cd/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Hg/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Se/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	根	茎叶	根	茎叶	穗	根	茎叶	籽粒
1.5	0	0	1.76a	3.05a	7.84a	17.75a	4.89a	9.84a	18.99a	14.18a
		0.2	1.62a	3.13a	7.92a	17.97a	4.99a	9.96a	19.21a	14.46a
		1	1.71a	3.02a	7.86a	17.63a	4.87a	9.87a	19.13a	15.25a
		5	1.72a	2.93a	7.79a	18.05a	4.94a	9.97a	18.99a	14.20a
0	2	0	1.68a	2.96a	8.04a	17.90a	5.04a	9.78a	19.19a	15.16a
		0.2	1.66a	3.20a	8.01a	17.96a	4.81a	9.93a	18.88a	14.74a
		1	1.59a	2.89a	8.08a	17.84a	5.03a	9.91a	19.13a	14.81a
		5	1.63a	3.06a	7.93a	17.94a	4.91a	9.89a	19.52a	14.35a

注: 表中数据为平均值 \pm SD, 同一列栏中不同小写字母表示数据差异具有统计学意义($p < 0.05$, Duncan); 下同。

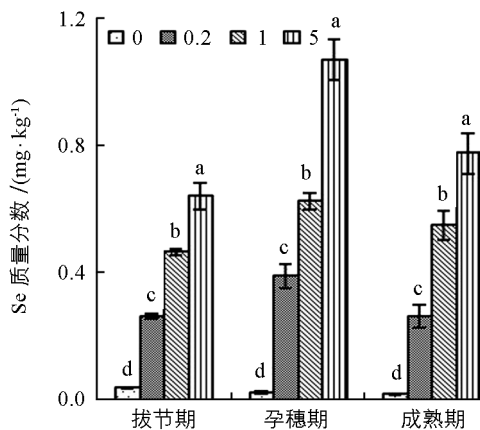
2.2 喷施亚硒酸钠对水稻叶片中丙二醛(MDA)浓度的影响

从表 4 可以看出, 当水稻生长在镉污染土壤中时, 叶面喷施亚硒酸钠处理对拔节期 MDA 浓度无明显影响. 孕穗期当喷施亚硒酸钠质量浓度小于 1 mg/L 时, 各处理叶片中的 MDA 浓度无明显差异, 但是当喷施亚硒酸钠质量浓度为 5 mg/L 时, 叶片中的 MDA 浓度显著增加为 1.097 和 0.983 $\mu\text{mol/L}$, 分别比对照升高 19.0% 和 14.7%, 说明亚硒酸钠质量浓度过高水稻叶肉细胞脂质过氧化程度增强. 在停止喷施亚硒酸钠后, 成熟期各处理间 MDA 浓度与对照组无明显差异.

2.3 喷施亚硒酸钠对水稻茎叶和籽粒中硒、镉质量分数的影响

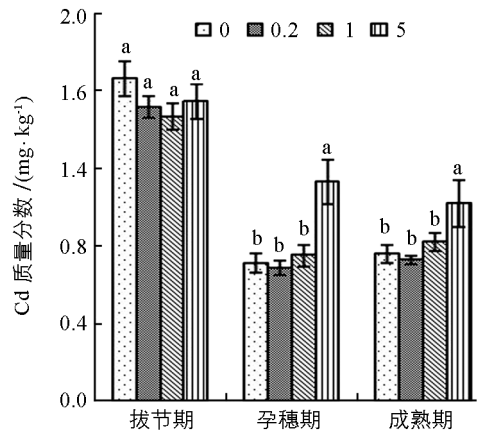
从图 1 可以看出随着喷硒的增大水稻叶片中的硒质量分数升高. 各处理不同时期水稻地上部硒质量分数从大到小依次为孕穗期、成熟期、拔节期. 从图 2 可以看出当喷施亚硒酸钠量相同时, 水稻茎叶镉质量分数在拔节期最高, 平均为 1.549 mg/kg, 约为孕穗期和成熟期的 1.47~2.42 倍. 随着喷施亚硒酸钠质量浓度的增大, 拔节期茎叶的镉质量分数无明显差异, 孕穗期和成熟期当喷硒质量浓度小于 1.0 mg/L 时地上部的镉质量分数与对照差异不明显, 当喷施亚硒酸钠质量浓度为 5 mg/L 时, 孕穗期地上部的镉质量分数为 1.130 mg/kg, 成熟期为 1.019 mg/kg, 比对照分别上升 58.4% 和 34.4%.

由表 4 可以看出籽粒中的硒质量分数随着喷施亚硒酸钠质量浓度的增大而增加. 且当喷硒量 $< 1 \text{ mg/L}$ 时, 随着喷施质量浓度的增大, 籽粒中的镉质量分数无明显变化. 当喷施亚硒酸钠质量浓度为 5 mg/kg 时, 籽粒中的镉质量分数升高为 0.385 mg/kg, 比对照增加 65%. 说明低质量浓度亚硒酸钠对水稻籽粒的镉质量分数无影响, 高质量浓度亚硒酸钠将使籽粒中的 Cd 质量分数升高.



图中不同小写字母表示同一生育期喷施不同质量浓度亚硒酸钠差异具有统计学意义($p < 0.05$); 下同。

图 1 各生育期水稻茎叶硒质量分数



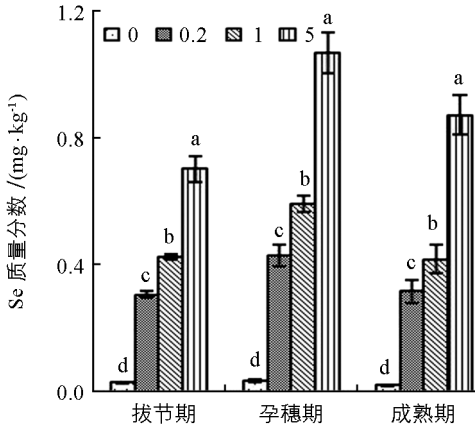
图中不同小写字母表示同一生育期喷施不同质量浓度亚硒酸钠差异具有统计学意义($p < 0.05$); 下同。

图 2 各生育期茎叶镉质量浓度

2.4 喷施亚硒酸钠对水稻茎叶和籽粒硒、汞质量分数的影响

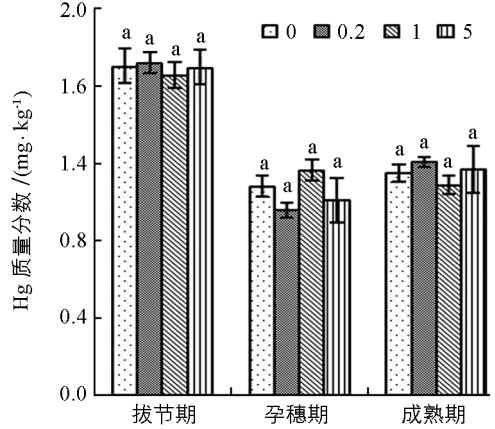
从图 3 可以看出随着喷施亚硒酸钠质量浓度的增加,水稻茎叶中的硒质量浓度增大,与对照差异显著.从图 4 可以看出随着喷硒质量浓度的增加各生育期茎叶中的汞质量浓度与对照无明显差异,说明喷硒能够提高茎叶中的硒质量浓度,但是对茎叶中的汞质量分数无影响.

从表 3 可见随着喷施亚硒酸钠质量浓度的增加,籽粒中的硒的质量分数逐渐升高,汞的质量分数先降低,后升高.当喷硒量 <1 mg/L 时籽粒中汞的质量分数平均为 0.371 mg/kg 比对照降低 24.7% .当喷硒质量浓度为 5 mg/L 时, Hg 质量浓度升高但依然低于对照组.说明喷施适量质量浓度的亚硒酸钠降低籽粒中的汞的质量分数.



图中不同小写字母表示同一生育期喷施不同质量浓度亚硒酸钠差异具有统计学意义($p < 0.05$);下同.

图 3 各生育期水稻茎叶硒质量分数



图中不同小写字母表示同一生育期喷施不同质量浓度亚硒酸钠差异具有统计学意义($p < 0.05$);下同.

图 4 各生育期水稻茎叶汞质量分数

表 3 籽粒中的硒、镉、汞质量分数

处 理	籽 粒		籽 粒		
	Se/(mg · L ⁻¹)	Se/(mg · kg ⁻¹)	Cd/(mg · kg ⁻¹)	Hg/(mg · kg ⁻¹)	
0.0		0.025d	0.233 b	0.017d	0.493a
0.2		0.283c	0.191b	0.306c	0.373b
1.0		0.349b	0.238b	0.412b	0.369b
5.0		0.530a	0.385a	0.485a	0.446a

2.5 喷施亚硒酸钠对水稻体内镉、汞迁移(*PTI*, *STI*)的影响

从表 4 可以看出各处理镉的初级迁移率从大到小依次为成熟期、孕穗期、拔节期.喷施亚硒酸钠对拔节期镉的初级迁移系数(*PTI*)无影响.喷施低质量浓度亚硒酸钠(<1.0 mg/L)对孕穗期和成熟期镉的初级迁移系数(*PTI*)无影响,喷施质量浓度为 5 mg/L 时,孕穗期和成熟期初级迁移系数(*PTI*)分别为 0.957 和 0.908 ,比对照上升 38.4% 和 23.0% .喷施亚硒酸钠对孕穗期镉的次级迁移率(*STI*)无影响.当喷施质量浓度为 5 mg/L 时,成熟期镉的次级迁移率显著升高,约为对照的 1.23 倍.因此孕穗期和成熟期很可能是硒影响镉转运的关键时期.喷施低质量浓度的亚硒酸钠(<1.0 mg/L)时,水稻地上部 Cd 质量分数影响无统计学意义,喷施亚硒酸钠质量浓度过高将促进水稻对镉的吸收和转运.

各处理汞的初级迁移率(*PTI*)从大到小依次为成熟期、孕穗期、拔节期.喷施亚硒酸钠对水稻各生育期汞的初级迁移系数以及孕穗期汞的次级迁移系数无影响.当喷施亚硒酸钠质量浓度为 0.2 mg/L 时,成熟期汞的次级迁移系数为 0.233 ,比对照降低 27.9% .因此成熟期是硒影响汞转运的主要时期,喷施低质量浓度亚硒酸钠(0.2 mg/L)能够降低汞从茎叶向籽粒的转移.

表 4 各生育期水稻汞、镉转移率和叶片丙二醛(MDA)浓度

处 理			拔节期		孕穗期			成熟期		
Se/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	Cd/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	Hg/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	MDA/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	<i>PTI</i>	MDA/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	<i>PTI</i>	<i>STI</i>	MDA/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)	<i>PTI</i>	<i>STI</i>
0	1.5	0	0.487a	0.602a	0.923b	0.691b	0.153a	0.953a	0.738b	0.230b
0.2	1.5	0	0.550a	0.582a	0.740cd	0.609b	0.165a	0.863a	0.671b	0.197b
1	1.5	0	0.423a	0.482a	0.847bc	0.695b	0.137ab	0.803a	0.724b	0.231b
5	1.5	0	0.457a	0.513a	1.097a	0.957a	0.177a	0.817a	0.908a	0.283a
0	0	2.0	0.493a	0.450b	0.857b	0.578b	0.139b	0.817a	0.714b	0.323a
0.2	0	2.0	0.528a	0.465b	0.766c	0.653b	0.119b	0.780a	0.806b	0.233b
1	0	2.0	0.443a	0.458b	0.732d	0.667b	0.098b	0.793a	0.719b	0.257ab
5	0	2.0	0.547a	0.444b	0.983a	0.514b	0.139b	0.819a	0.748b	0.281a

3 讨 论

喷施硒能够显著的提高籽粒的中硒的质量分数(表 4), 但是因为硒与硫的化学性质相似, 硒能够影响含硫化合物的合成, 因此当硒质量分数高时会对植物产生毒害作用^[18]. 本研究结果显示喷施适量质量浓度硒($<1 \text{ mg/L}$)能够降低孕穗期水稻叶片 MDA 浓度, 硒质量浓度过高会加剧水稻细胞膜的脂质过氧化程度(表 3). Ding 等^[17]的研究也表明, 当营养液中的硒质量浓度为 0.2 mg/L 时能够降低水稻叶片中 MDA 的浓度, 当硒质量浓度提高到 0.8 mg/L 时, 叶片中 MDA 的浓度升高具有统计学意义. 因此在实际生产中喷施低质量浓度亚硒酸钠($<1 \text{ mg/L}$)为益.

在植物体内镉主要以 PC-Cd 络合物或者是 Cd-GSH_x 络合物的形式运输, 较高的 GSH 和 PCs 质量分数有助于镉从根部向地上部的转移^[20]. 植物细胞中的谷胱甘肽质量浓度受到含硒 GSH-Px 和不含硒 GSH-Px 的影响^[21]. 施硒可以增强细胞内 GSH-Px 的活性^[13, 25], 增加细胞内 GSH 的质量浓度^[23]. 在本试验中, 喷施低质量浓度硒($<1 \text{ mg/L}$)对水稻叶片镉质量分数无影响, 当喷施质量浓度为 5 mg/L 时, 在孕穗期和成熟期茎叶和籽粒中镉质量分数、*PTI*、*STI* 明显升高(图 2, 表 4). 张雯等^[19]也报道, 给水稻幼苗叶面喷施质量浓度为 500 mg/L 亚硒酸钠, 地上部的总镉质量分数和叶片中可溶性镉的质量分数升高. 因此叶面施硒很可能使水稻体内的 GSH 和 PCs 质量分数升高, 从而加强了根部镉向地上部的运输, 这从侧面证明施硒能够降低植物体内 Cd 质量分数主要是因为施硒能够降低土壤中镉的有效性. Hu 等^[11]也表示, 在土壤中施用 0.5 mg/kg 的亚硒酸钠, 镉从土壤到铁膜镉的转移系数下降 71%, 而镉从茎叶向籽粒中的转运能力与对照差异分析无统计学意义($p > 0.05$). 由于喷施高质量浓度硒成熟期水稻籽粒中镉升高, 汞质量分数却有所降低(表 3), 因此植物体内镉的移动性很可能强于汞.

当前关于硒汞拮抗作用的研究结果表明施硒能够降低植物体内的汞质量分数主要有以下 3 个方面的原因, 在土壤中形成硒汞难溶物的形成来降低土壤中汞的有效性^[10]; 在植物根部硒汞大分子难溶物, 由于这种难溶物不能通过凯氏带, 从而减少汞向地上部的运输^[24]; 加强植物体内半胱氨酸对无机汞离子的络合, 降低其向籽粒中的转运^[25]. 在本实验中喷施对水稻各生育期茎叶中的汞质量分数和 *PTI* 无影响, 只有成熟期籽粒中汞质量分数和 *STI* 有所降低(图 4, 表 4), 这间接说明土壤是硒汞相互作用的主要场所.

4 结 论

1) 叶面喷施亚硒酸钠对拔节期和成熟期水稻叶片丙二醛(MDA)浓度无影响, 低质量浓度质量浓度硒($<1 \text{ mg/L}$)能够降低孕穗期水稻叶片 MDA 浓度, 质量浓度过高(5 mg/L)会加剧水稻细胞膜的脂质过氧化程度.

2) 叶面喷施低质量浓度亚硒酸钠($<1 \text{ mg/L}$)对水稻茎叶、籽粒中的镉质量浓度无影响。质量浓度过高(5 mg/L)会使促进孕穗期和成熟期镉向茎叶和籽粒中的迁移,从而使茎叶和籽粒中镉质量分数增加。

3) 叶面喷施低质量浓度亚硒酸钠($<1 \text{ mg/L}$)能够减少成熟期茎叶中汞向籽粒的迁移,从而使籽粒中的汞质量分数降低。但是喷施亚硒酸钠对水稻各生育期茎叶中的汞质量分数无影响。

参考文献:

- [1] 李 杰. 重庆市园地土壤重金属污染的初步调查 [J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2004, 26(3): 322—326.
- [2] 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.
- [3] 谢光武, 范 媛, 黎晓敏. 重庆道地黄连、青蒿的重金属含量研究 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2013, 38(8): 100—103.
- [4] 王 济, 王世杰. 土壤中重金属环境污染元素的来源及作物效应 [J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, 23(2): 113—120.
- [5] VERKLEIJ J A C, GOLAN-GOLDHIRSH A, ANTOSIEWISZ D M, et al. Dualities in Plant Tolerance to Pollutants and Their Uptake and Translocation to the Upper Plant Parts [J]. Environ Exp Bot, 2009, 67(1): 10—22.
- [6] SARWAR N, SAIFULLAH M, MALHI S S, et al. Role of Mineral Nutrition in Minimizing Cadmium Accumulation by Plants [J]. J Sci Food Agric, 2010, 90(6): 925—937.
- [7] SUN G X, LIU X, WILLIAMS P N, et al. Distribution and Translocation of Selenium from Soil to Grain and Its Speciation in Paddy Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Technology, 2010, 44(17): 6706—6711.
- [8] CARTES P, GIANFREDA L, MORA M L. Uptake of Selenium and Its Antioxidant Activity in Ryegrass When Applied as Selenate and Selenite Forms [J]. Plant and Soil, 2005, 276(1): 359—367.
- [9] SOBRINO-PLATA J, CARRASCO-GIL S, ABADIA J, et al. The Role of Glutathione in Mercury Tolerance Resembles Its Function Under Cadmium Stress in Arabidopsis [J]. Metallomics, 2014, 6(2): 356—366.
- [10] ZHANG H, FENG X B, ZHU J M. Selenium in Soil Inhibits Mercury Uptake and Translocation in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(18): 10040—10046.
- [11] HU Y, NORTON G J, DUAN G L, et al. Effect of Selenium Fertilization on the Accumulation of Cadmium and Lead in Rice Plants [J]. Plant and Soil, 2014, 384(1): 131—140.
- [12] 张海英, 韩 涛, 田 磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响 [J]. 园艺学报, 2011, 38(3): 409—416.
- [13] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响 [J]. 土壤学报, 2007, 44(1): 73—78.
- [14] 郭 璐. 作物对外源硒酸盐和亚硒酸盐动态吸收的差异及其机制研究 [D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2014.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科学出版社, 2000.
- [16] 赵世杰, 史国安, 董新纯. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2002.
- [17] DING Y, FENG R, WANG R, et al. A Dual Effect of Se on Cd Toxicity: Evidence from Plant Growth, Root Morphology and Responses of the Antioxidative Systems of Paddy Rice [J]. Plant and Soil, 2014, 375(1): 289—301.
- [18] PILON-SMITS E A H, QUINN C F. Selenium Metabolism in Plants [J]. Plant Cell Monographs, 2010, 17: 225—241.
- [19] 张 雯, 林匡飞, 周 健, 等. 不同硫浓度下叶面施硒对水稻幼苗镉的亚细胞分布及化学形态的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(5): 844—852.
- [20] 安志装, 王校常, 严蔚东, 等. 镉硫交互处理对水稻吸收累积镉及其蛋白巯基含量的影响 [J]. 土壤学报, 2004, 41(5): 728—734.
- [21] PERLA V, HOLM D G, JAYANTY S S. Selenium and Sulfur Content and Activity of Associated Enzymes in Selected Potato Germplasm [J]. Am. J. Potato Res, 2012, 89: 111—120.
- [22] XUE T L, HARTIKAINEN H, PIIRONEN V. Antioxidative and Growth-Promoting Effect of Selenium on Senescing [J]. Plant and Soil, 2001, 237(1): 55—61.

- [23] FENG R W, WEI C Y, TU S X, et al. Interactive Effects of Selenium and Antimony on the Uptake of Selenium, Antimony and Essential Elements in Paddy-Rice [J]. *Plant and Soil*, 2013, 365(1): 375–386.
- [24] ZHAO J T, LI Y Y, GAO Y X, et al. Selenium Modulates Mercury Uptake and Distribution in Rice (*Oryza sativa* L.), in Correlation with Mercury Species and Exposure Level [J]. *Metallomics Integrated Biometal Science*, 2014, 6(10): 1951–1957.
- [25] MENG B, FENG X B, QIU G G, et al. Localization and Speciation of Mercury in Brown Rice with Implications for Pan-Asian Public Health [J]. *Environ Sci Technol*, 2014, 48(14): 7974–7981.

Effects of Foliar Application of Selenium on Cadmium and Mercury Absorption in Different Growth Periods of Rice

ZHANG Lu, ZHOU Xin-bin, SU Ting-ting

School of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China

Abstract: Sodium selenite at 0.2, 1.5 or 5.0 mg/L was foliar sprayed onto rice to study its effects on the accumulation and transport of cadmium and mercury in the plants. The results showed that sodium selenite spraying at <1 mg/L significantly increased selenium content in the grains, reduced the mercury content in the seed and the secondary transport index of mercury in the rice plant, but it had no effect on the cadmium content in the seed and the transport of cadmium in rice plants. Sodium selenite spraying at a high concentration (5 mg/L) promoted the transport of cadmium, and thus increased the cadmium content in the shoot and the grain, but it had no effect on mercury content in rice and migration of mercury in rice plant. So the booting stage and the maturing stage are the critical period for selenium to influence the accumulation and transport of cadmium and mercury, and the results are different between different metal cations.

Key words: rice; selenium; heavy metal

责任编辑 包颖

