

硒对水稻镉毒性的影响及其机制的研究

庞晓辰¹, 王 辉², 吴泽赢¹, 王 爽¹, 刘楚焯¹, 何国秀¹, 葛 滢^{1*}

(1.南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; 2.河南科技大学环境工程系, 河南 洛阳 471023)

摘要:为探究外源四价硒[Se(IV)]对水稻镉(Cd)吸收和分布的影响,采用水培试验方法,参考稻田土壤淹水后硒的主要存在形态,研究外源 Se(IV)对不同浓度 Cd 处理下水稻 Cd 吸收、转运的影响及其解毒机制。结果表明,在低浓度 Cd 处理($0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)下,外源 Se(IV)对水稻 Cd 的积累和分布影响不显著,但在高浓度 Cd 处理($5.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)下,外源 Se(IV)会显著降低水稻对 Cd 的吸收和转运。不同浓度 Cd 处理均会增加水稻对 Se 的吸收,影响 Se 在水稻体内的分布,并且显著减少 Se 向地上部的转运。Cd、Se 复合处理会导致水稻地下部非蛋白巯基(NPT)含量增加,同时改变 Cd 在地下部的亚细胞分布,使细胞壁组分的 Cd 含量上升,细胞可溶物质组分和细胞器组分的 Cd 含量下降,从而减少 Cd 向茎叶的转运,降低地上部的膜脂过氧化程度。由于试验所选用的水稻品种对 Cd、Se 抗性较强,不同处理下水稻地上部抗氧化酶活性与总抗氧化容量差异均不显著,且水稻生物量及表型特征也无显著差异。

关键词:水稻;镉;硒;转运;亚细胞分布;非蛋白巯基

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)09-1679-07 **doi:**10.11654/jaes.2014.09.002

Alleviation by Selenium of Cadmium Toxicity to Rice and Its Mechanisms

PANG Xiao-chen¹, WANG Hui², WU Ze-ying¹, WANG Shuang¹, LIU Chu-ye¹, HE Guo-xiu¹, GE Ying^{1*}

(1.College of Resource and Environmental Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2.Department of Environmental Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

Abstract: Minimizing cadmium (Cd) accumulation in rice grain is crucial to food safety. In this study, a hydroponic experiment was performed to investigate the effects of exogenous selenite [Se(IV)], a dominant Se species in rice paddy soils after flooding, on Cd absorption, translocation and detoxification in rice under different Cd concentrations. Selenite markedly reduced Cd accumulation and translocation in rice in high Cd ($5.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) treatment but had no significant influence in low Cd ($0.5 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) treatment. However, Cd at both low and high concentrations increased Se absorption but reduced Se transport to the aboveground part of rice. Combined Cd-Se treatment enhanced root non-protein thiol (NPT) concentrations, changed Cd subcellular distributions in rice root, with increased Cd in cell walls and decreased Cd in cellular organelles and soluble fractions, thus reducing Cd translocation to the aboveground and lipid peroxidation in the cell membrane of rice shoot. Due to the strong tolerance of the rice cultivar to Se and Cd, the activities of antioxidant enzymes and total anti-oxidation capacity in rice shoot did not differ significantly among various treatments, and rice biomass and phenotypic characteristics were unaffected either.

Keywords: rice; cadmium; selenium; translocation; sub-cellular distribution; non-protein thiols

当前稻田土壤镉(Cadmium, Cd)污染已成为一个不容忽视的农业环境问题。据 1980 年中国农业环境报告,我国农田 Cd 污染面积为 9333 hm^2 ;而在 2003

年有报道认为污染面积为 1.33 万 hm^2 [1-2]。Cd 因其在土壤中的移动性较高,容易被水稻根系吸收并转运至籽粒,对人体健康造成极大威胁 [3]。例如,2009 年湖南收获的稻米中 Cd 含量超标,严重影响国民食品安全。水稻是一种容易吸收和累积 Cd 的作物 [4],为控制稻米 Cd 污染,国内外学者重点对稻田土壤 Cd 活性变化、水稻 Cd 吸收转运以及营养元素抑制 Cd 吸收等方面进行了研究 [5-9]。因此,寻找减少水稻吸收和转

收稿日期:2014-03-04

基金项目:国家自然科学基金(30700479);教育部高等学校博士点基金(20090097110035;20110097110004)

作者简介:庞晓辰(1988—),女,江苏人,硕士研究生,主要从事环境污染控制与生物修复研究。E-mail: xiaoc.pang@gmail.com

* 通信作者:葛 滢 E-mail: yingge711@njau.edu.cn

运 Cd 的途径非常重要。

硒(Selenium, Se)是一种人体和动物所必需的微量营养元素,研究表明,Se 是多种酶和蛋白质的重要组成部分,具有提高人体免疫力、抗衰老、预防癌变等功能,而缺 Se 会导致克山病、大骨节病等疾病,影响人体健康。最近一项对世界稻米 Se 含量的普查结果表明,绝大多数稻米 Se 的含量低于人体的营养需求^[10]。在缺 Se 地区,叶面喷 Se 或者土壤施 Se 是提高稻米 Se 含量的重要手段^[11]。

目前,有关水稻 Cd、Se 相互作用及 Se 影响水稻 Cd 积累的研究鲜有报道,但李正文等^[12]通过多个水稻品种籽粒 Cd、Se 含量的测定,发现两种元素之间存在负相关关系,为通过增强水稻 Se 营养来解除 Cd 的积累和毒性提供了新的理论依据。此外, Lin 等^[13]的研究发现,苗期水稻 Se(IV)预处理可以减少水稻对 Cd 的吸收,增强水稻抗氧化能力。梁程等^[14]的研究也发现 Se(VI)可以降低水稻体内 Cd 含量,缓解 Cd 对水稻的毒性作用。本研究在前期试验的基础上,参考稻田土壤淹水后 Se 的主要存在形态,采用水培试验,选择还原态 Se(IV),研究其对水稻 Cd 吸收、积累、转运的影响及其解毒机制。

1 材料与方法

1.1 植物培养和试剂

供试水稻(*Oryza sativa* L.)品种为 K 优 818,使用时选取饱满的种子,表面用 15%的双氧水浸泡 30 min 消毒,洗净后用去离子水浸种 24 h。黑暗中 38 ℃破胸 24 h 后 32 ℃催芽,3 d 之后接受光照(日:32 ℃ 12 h;夜:28 ℃ 12 h)。所用试剂纯度均为分析纯或更高。

1.2 胁迫试验

水稻幼苗培养至 3 叶期时移栽到塑料桶中培养,每盆 4 穴,每穴 4 株幼苗。根据幼苗生长状况供给营养液,营养液配方参照国际水稻研究所(IRRI)推荐的标准配方。将移苗后的水稻分为以下 6 组处理:0.5 Cd(低浓度 Cd 处理,0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$);5.0 Cd(高浓度 Cd 处理,5.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$);0.1 Se(0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se);0.5 Cd+0.1 Se(0.5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd+0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se);5.0 Cd+0.1 Se(5.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd+0.1 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se),以正常培养的水稻为对照。Cd 以 $\text{CdCl}_2\cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 形态添加,Se(IV)以 Na_2SeO_3 形态添加。每个处理重复 3 次,处理 9 d 后收获,营养液每隔 3 d 更换一次。收获的水稻用 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 预冷的 CaCl_2 溶液浸泡地下部 15 min 以去除根表吸附的 Se、Cd,然后将样品植株分为地上部和

地下部,用液氮冷冻后备用。

1.3 元素含量测定

分别取水稻地上部和地下部,用去离子水洗净,吸水纸吸干。放入 105 ℃烘箱中杀青 15 min,70 ℃烘至恒重。将水稻干样剪碎后用电热消解法[$\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ ($V:V=4:1$)]消解,加 1.25 mL 浓盐酸还原定容,用 AFS-920 型双道原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司)测定样品中的 Se 含量。用 ICP-AES(Perkin-Elmer Optimal 2100 DV)测定样品中的 Cd 含量。

1.4 水稻地下部 Cd 的亚细胞分布

将 5 g 水稻地下部样品匀浆[蔗糖 250 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; Tris-HCl 缓冲液(pH7.5)50 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$;二硫苏糖醇(DTT)1 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$],用差速离心法^[15]将样品分为细胞壁(F1)、细胞器(F2)和细胞可溶部分(F3),以 4:1($V:V$)的 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 混酸消解 F1 和 F2,所得样品定容至 25 mL, F3 直接定容至 25 mL,用 ICP-AES 测定各组分 Cd 含量。

1.5 抗氧化酶类活性、可溶性蛋白含量、膜脂过氧化程度和总抗氧化容量的测定

取地上部鲜样 0.5 g 左右,用 5 mL 提取液(0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸盐缓冲液, pH7.8)匀浆后 12 000 $\times$ g 离心 10 min,所有操作均在 4 ℃下进行。上清液为粗酶液,用于测定可溶性蛋白。SOD 活性用氮蓝四唑法^[16]测定, CAT 活性测定参考紫外吸收法^[16]测定, POD 活性用愈创木酚法^[16]测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法^[16]测定。所有酶的活性单位均为 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\text{ protein}$ 。膜脂过氧化用比色法^[16]测定,水稻地上部膜脂过氧化程度用硫代巴比妥酸反应物(TBARS)的总量来表征,单位是 $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\text{ fresh weight}$ 。

植物总抗氧化容量(T-AOC)采用 T-AOC 试剂盒(南京建成生物公司)进行测定,以每毫克蛋白 1 min 内在 520 nm 处吸光度增加 0.01 为一个抗氧化活力单位(U),T-AOC 的单位为 $\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}\text{ protein}$ 。

1.6 数据分析

所有数据均采用三次重复的平均值 $\pm$ 标准偏差来表示。不同处理间的差异显著性采用 SPSS 13.0 统计分析软件在 95%的置信区间下以 One way ANOVA 进行分析。采用 SigmaPlot 12.0 进行数据分析与绘图。

2 结果与分析

2.1 硒对镉污染水稻生长的影响

与对照相比,Se、Cd 处理后水稻植株长势差异不显著,单独 Se 处理在一定程度上会增加水稻根长,但

与其他处理相比并无显著差异(图 1)。另外,不同处理条件下,水稻株高和干重的规律也无显著差异(图 1、图 2)。说明本试验所用水稻品种的耐性较强,Se、Cd 处理的毒性效应不明显。

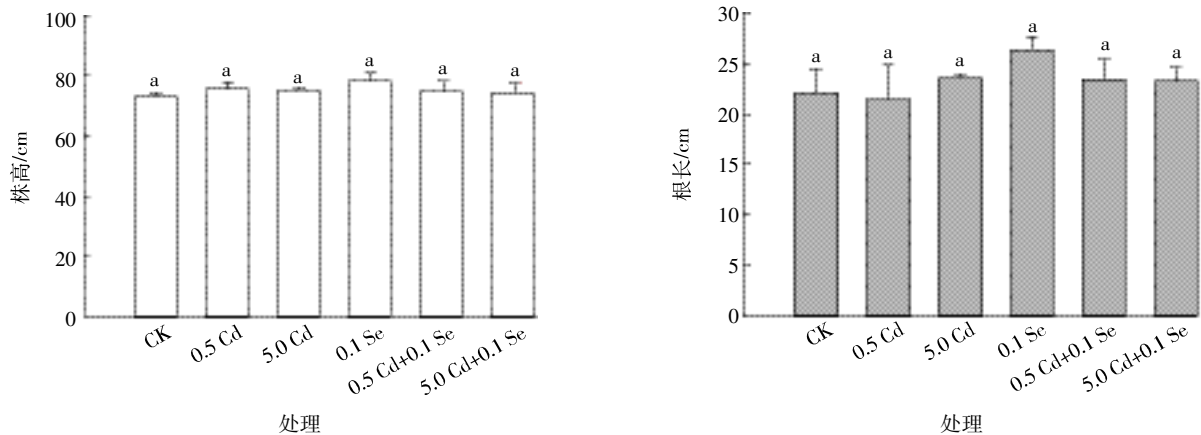
2.2 硒对镉污染水稻体内硒、镉吸收与转运的影响

由表 1 可知,水稻对 Cd 的吸收随外源 Cd 浓度的增加而增大。与单一 Cd 处理相比,外源 Se 的添加导致高浓度 Cd 处理下水稻地下部 Cd 含量和地上部 Cd 含量显著下降(分别降低 164.53、16.59 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),但外源 Se 的添加对低浓度 Cd 处理无显著影响。

不同浓度的 Cd 处理不会对水稻地下部的 Se 含量产生显著影响。但与单一 Se 处理相比,Cd 的添加会显著增加水稻地下部 Se 含量(高浓度 Cd 和低浓度 Cd 处理下分别增加 59.12、57.05 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。另一方面,不同浓度的 Cd 处理会显著降低水稻地上部的 Se 含

量,与单一 Se 处理相比,高浓度 Cd 和低浓度 Cd 处理使水稻地上部 Se 含量分别下降 21.36、18.11 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与水稻地下部 Se 含量结果相似,Cd 胁迫浓度的高低也不会对水稻地上部的 Se 含量产生显著影响。

重金属从地下部向地上部的转移率是判断植物吸收、分配与转运重金属的一个非常重要的指标,常以地上与地下重金属元素含量的比值(S/R)来表示;分配率用各部分元素积累量占植株元素总积累量的百分比来表示,体现元素在植物体内的分布情况。随着 Cd 浓度的增加,水稻 Cd 转移率显著下降,外源 Se 的添加对水稻 Cd 转移率没有显著影响。与单一 Se 处理相比,外源 Cd 的添加会显著降低水稻 Se 转移率;水稻对 Cd 的分配规律则不受外源 Se 的影响,不同处理条件下 Cd 主要积累在水稻地下部。单一 Se 处理时 Se 主要存在于地下部,外源 Cd 的添



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$). The same below

图 1 水稻株高和根长

Figure 1 Shoot height and root length of rice plants

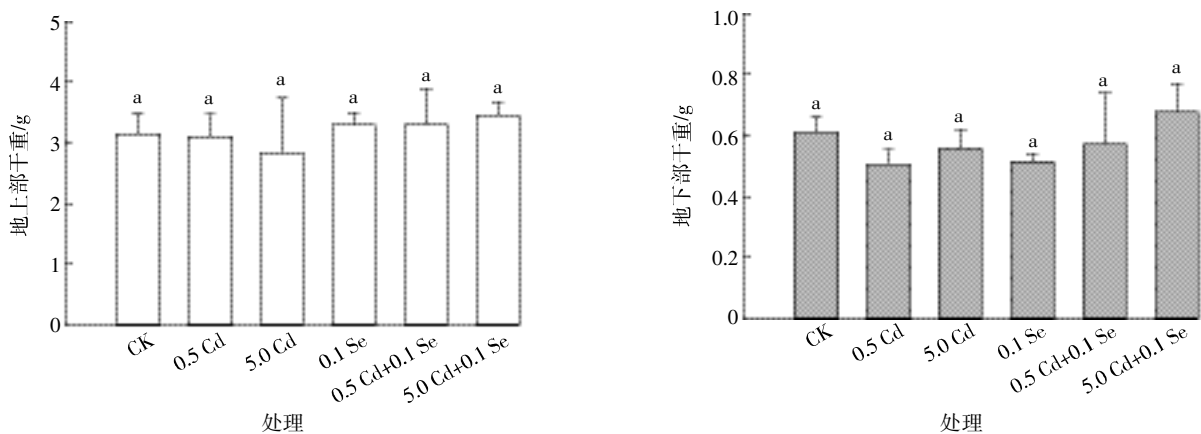


图 2 水稻地上和地下部干重

Figure 2 Dry weight of shoots and roots of rice plants

加会显著提高水稻地下部的 Se 含量, 且与低浓度 Cd 胁迫相比, 高浓度 Cd 胁迫会显著增加 Se 在地下部的积累。

2.3 硒对镉污染水稻地下部镉亚细胞分布的影响

由表 2 可知, 不同处理条件下 Cd 在水稻地下部亚细胞水平上分布规律一致, Cd 主要积累在细胞壁(F1)上, 其次积累在细胞可溶物质(F3)中, 而细胞器(F2)上含量最少。随着 Cd 的处理浓度增加, F3 中 Cd 含量所占比例也相应增加。在低浓度 Cd 处理下, 外源 Se 的添加对水稻地下部 Cd 的亚细胞分布无显著影响; 但是, 在高浓度 Cd 处理下, 外源 Se 的添加会显著降低水稻地下部各组分中 Cd 的含量。从分配率数据可知, 高浓度 Cd 处理下外源 Se 的添加会显著降低水稻地下部 F2 的分配率, 而对 F1 和 F3 的分配率无显著影响。

2.4 硒对镉污染水稻地上部抗氧化酶活性和地下部非蛋白巯基物质的影响

如表 3 所示, 单一 Cd 处理下, 低浓度 Cd 处理不会对水稻地上部产生显著的氧化损伤; 在高浓度 Cd 处理下, 水稻地上部膜脂过氧化程度显著增加。外源 Se 的添加导致水稻细胞的膜脂过氧化程度增高, 表现为 TBARS 含量的显著增加。从 TBARS 数据可知,

Cd 处理在一定程度上缓解了 Se 的毒害作用。这可能与 Se、Cd 在水稻体内的转运有关, 单一 Se 处理时 Se 转移率较外源 Cd 加入时要显著提高(见表 1 转移率数据), 从而造成地上部较严重的氧化胁迫。与 Cd 复合处理时, Se 更多积累在地下部。因此, 复合处理时地上部细胞膜脂过氧化程度降低。

受到 Se、Cd 胁迫后, 地上部的 SOD 比活力与对照相比均有所提高, 高浓度 Cd 处理下 SOD 比活力的增加要低于低浓度 Cd 处理, 但无显著差异。不同处理下的 CAT 比活力规律与 POD 相似, 低浓度 Cd 处理下 CAT 和 POD 比活力最高, 外源 Se 的添加会使 CAT 和 POD 的比活力降低, 但高浓度 Cd 处理下无此规律。

植物体内抗氧化系统包括 SOD、POD、CAT 等酶以及 GSH-Px、V_C、V_E 和 GSH 等小分子, 其总体变化可由 T-AOC 描述。试验结果表明, 水稻在不同处理下地上部 T-AOC 与对照相比无显著差异(表 3), 与水稻生长数据体现的规律一致。

非蛋白巯基物质(Non-protein thiol, NPT)主要由富含巯基的物质组成, 包括植物螯合肽(PCs)、谷胱甘肽(GSH)、 γ -谷氨酰半胱氨酸(γ -EC)、半胱氨酸(Cysteine)等^[17], 是植物重金属解毒机制中的主要物

表 1 水稻体内 Cd 和 Se 的含量、转移率
Table 1 Content, translocation rates of Cd and Se in rice plants

处理	Cd 含量/mg·kg ⁻¹ DW		Se 含量/mg·kg ⁻¹ DW		转移率/%	
	地上部	地下部	地上部	地下部	Cd	Se
CK	—	—	—	—	—	—
0.5 Cd	23.2±0.77c	337±5.16c	—	—	6.89±0.33a	—
5.0 Cd	89.1±2.94a	1688±8.77a	—	—	5.28±0.16b	—
0.1 Se	—	—	44.7±3.45a	68.0±9.85b	—	66.6±9.63a
0.5 Cd+0.1 Se	24.1±1.49c	342±4.43c	26.6±2.52b	125±27.5a	7.05±0.47a	22.0±5.43b
5.0 Cd+0.1 Se	72.5±1.49b	1523±10.4b	23.4±3.01b	127±6.93a	4.76±0.13b	18.4±2.70b

注: 不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$); —表示低于检测限。下同。

Note: Different letters indicate significant differences between treatments($P<0.05$). —indicates values below detection limit. The same below.

表 2 水稻地下部 Cd 含量亚细胞分布
Table 2 Subcellular distribution of Cd in rice roots

处理	Cd 含量/mg·kg ⁻¹ FW			分配率/%		
	F1	F2	F3	F1	F2	F3
CK	—	—	—	—	—	—
0.5 Cd	17.7±1.80c	1.46±0.26b	4.31±1.34c	75.4ab	6.27a	18.4b
5.0 Cd	98.6±20.1a	10.4±3.14a	51.0±5.07a	61.2b	6.61a	32.2a
0.1 Se	—	—	—	—	—	—
0.5 Cd+0.1 Se	19.2±3.71c	1.23±0.86b	3.90±1.59c	79.8a	4.63a	15.5b
5.0 Cd+0.1 Se	73.0±17.8b	1.41±0.56b	27.6±7.97b	71.2ab	1.49b	27.3ab

表 3 水稻地上部 TBARS、SOD、CAT、POD、T-AOC 活性/含量与地下部 NPT 含量

Table 3 TBARS, SOD, CAT, and POD activities and T-AOC content in rice shoots and NPT content in rice roots

处理	地上部					地下部
	TBARS 含量/ nmol·g ⁻¹	SOD 比活力/ U·mg ⁻¹ prot	CAT 比活力/ U·mg ⁻¹ prot	POD 比活力/ U·mg ⁻¹ prot	T-AOC/ U·mg ⁻¹ prot	NPT 含量/ mg·kg ⁻¹
CK	10.00±0.954e	7.721±1.732b	72.95±10.12b	346.6±55.89b	4.487±1.159a	485.3±146.7c
0.5 Cd	9.231±0.697e	15.07±3.008a	181.8±38.70a	717.6±200.6a	3.050±1.410a	443.6±216.5c
5.0 Cd	11.61±0.369d	10.23±0.712ab	86.31±9.639b	350.0±107.2b	5.832±1.209a	862.1±11.27b
0.1 Se	23.67±0.747a	11.46±2.475ab	110.7±23.83b	260.4±86.08b	6.050±0.519a	888.6±102.9b
0.5 Cd+0.1 Se	17.40±0.774c	11.99±2.847ab	74.71±13.69b	276.2±8.802b	6.131±0.765a	923.5±56.25b
5.0 Cd+0.1 Se	19.71±0.414b	15.83±1.699a	100.7±6.627b	298.7±98.51b	5.194±0.262a	1297±139.5a

质之一。巯基可与 Cd 结合,钝化细胞内的 Cd,从而达到解毒的目的。低浓度 Cd 处理下 NPT 的含量变化不大,但高浓度 Cd 处理下水稻地下部的 NPT 含量显著上升。单一 Se 处理也会使水稻地下部 NPT 含量增加,且 Se、Cd 复合处理会显著增加水稻地下部 NPT 的含量,这一现象在高浓度和低浓度 Cd 处理下均存在,且在高浓度 Cd 处理下 NPT 含量达到最高(1 296.78 mg·kg⁻¹)。

3 讨论

研究表明,Se 可与其他重金属结合成难溶性复合物,抑制植物对重金属的吸收,减少植株体内重金属的累积^[18],也可能将重金属从植物代谢活跃的细胞点位上移除或通过改变细胞膜对重金属的通透性,从而影响重金属在植物体内的转运^[19]。因此,外源 Se 处理可减少水稻 Cd 污染的风险^[13]。

本研究表明,在单一 Se 处理下,Se 的转移率较高,此现象与张联合等^[20]所得的结论相同。有研究表明,水稻根系吸收 SeO₃²⁻后不是直接运转到地上部,而是在根系内代谢成有机 Se^[21-23],然后再向地上部转运。与无机 Se 相比,有机 Se 更易于向地上部转运^[24],因此地下部 Se 向地上部的转运可能受根内 Se 的代谢影响,但 Cd 是否抑制了无机 Se 向有机 Se 转化的过程尚无明确结论。比较 Cd 处理与对照的转移率和分配率可知,经 Cd 处理后的水稻,大部分 Cd 累积在植株地下部,与 Küpper 等^[25]的研究结果相似。Cd 会影响水稻中 Se 的分布,显著降低 Se 的转移率,促使 Se 积累在水稻地下部,且这一现象在高浓度 Cd 处理下更加显著。此外,Cd 还可以显著降低外源 Se 处理下水稻地上部 TBARS 含量。但 Se 对水稻体内 Cd 的分布无显著影响,在高浓度 Cd 处理下 Se 会减少水稻对 Cd 的吸收、转运。

本研究发现,Cd 主要积累在细胞壁(F1)上,其次是细胞可溶物质(F3)中,细胞器(F2)上含量最少(表 2)。由于植物细胞壁上的基因带有负电荷,有利于对 Cd²⁺的吸附^[26],植物细胞可以将 Cd 吸附于细胞壁上,使其被阻挡在细胞质之外,这是水稻对 Cd 耐性的一种体现。将 Cd 积累在细胞可溶物质中,而不是积累在进行生物代谢活动的细胞器上,则是水稻应对 Cd 毒性的另一种方式。Li 等^[27]研究发现,在小麦地下部的亚细胞水平上,Cd 更倾向于与细胞可溶物质组分中的热稳固蛋白(HSP)结合,因此能降低 Cd 的移动性,减小 Cd 对细胞的危害。外源 Se 的加入会降低植株各部分 Cd 含量,减少 Cd 的毒害。Shanker 等^[28]通过盆栽试验发现 Se 可以降低萝卜对 Hg 的吸收,原因可能是 Se 和 Hg 在土壤中形成不溶的复合物。因此 Se 与 Cd 很可能形成 CdSeO₃,使 Cd 的溶解性下降,吸收量降低。

NPT 是植物重金属解毒机制中的主要物质之一,可钝化细胞内的 Cd,将其转运至液泡内储存,从而达到解毒和降低转运的目的。本试验发现,低浓度 Cd 处理下 NPT 的含量变化不显著,但高浓度 Cd 处理下水稻地下部的 NPT 含量显著上升。这一现象与王芳等^[29]、安志装等^[17]得出的结论相同。Schützendubel 等^[30]研究发现,Se 和 Cd 都会与某些蛋白质中半胱氨酸(Cysteine)的巯基部分结合,而 Se 又是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的组成部分,外源 Se 的供应可能会使水稻体内 GSH-Px 的底物之一 GSH 含量增加,促进 Cd 与巯基的结合,降低 Cd 的毒性,从而使水稻地下部 NPT 含量增加。

与对照相比,低浓度 Cd 处理提高了水稻地上部 SOD、CAT 和 POD 的活性(表 3),而高浓度 Cd 处理下,这些酶的活性下降,这种相反的变化趋势可能与地上部 Cd 的含量变化有关。Shah 等^[31]和 Maksymiec

等^[32]认为,高浓度 Cd 胁迫导致过多氧自由基产生,抑制 SOD 等抗氧化酶的活性。外源 Se 增加了 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd 处理下水稻 SOD 活性,体现了 Se 对 Cd 胁迫的缓解效应。但本试验 Se、Cd 浓度较低且暴露时间不长,水稻地上部的总抗氧化容量(T-AOC)变化不显著,水稻生长也未受到抑制。

4 结论

(1)Se 能降低 Cd 的吸收,增强 Cd 在细胞壁上的吸附。(2)Se 可以提高水稻根细胞 NPT 含量,促进 Cd 的络合。

这些变化有助于缓解 Cd 的毒性效应,降低 Cd 向茎叶的转运。由于试验浓度偏低且水稻抗性较强,各处理水稻地上部抗氧化酶活性与总抗氧化容量差异均不显著,水稻生长也未受影响。

参考文献:

- [1] 王凯荣. 我国农田镉污染现状及其治理利用对策[J]. 农业环境保护, 1997, 16(6):274-278.
WANG Kai-rong. The situation of farmland cadmium pollution and strategies of its control and use in our country[J]. *Agro-environmental Protection*, 1997, 16(6):274-278.
- [2] 崔力拓, 耿世刚, 李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技, 2006(11):184-185.
CUI Li-tuo, GENG Shi-gang, LI Zhi-wei. The situation of farmland cadmium pollution and its control strategies in our country[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2006(11):184-185.
- [3] 邓湘雄, 王慧中, 徐祥彬, 等. 水稻镉耐性研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版), 2009, 8(6):457-462.
DENG Xiang-xiong, WANG Hui-zhong, XU Xiang-bin, et al. Research advances of heavy metal cadmium tolerance of rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Journal of Hangzhou Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 8(6):457-462.
- [4] Nocito F F, Lancilli C, Dendena B, et al. Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant Cell Environment*, 2011, 34(6):994-1008.
- [5] 黄丹丹, 葛 滢, 周权锁. 淹水条件下土壤还原作用对镉活性消长行为的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(2):373-380.
HUANG Dan-dan, GE Ying, ZHOU Quan-suo. Effect of redox processes on soil Cd activity under submerged conditions[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(2):373-380.
- [6] 葛 滢, 黄丹丹, 周权锁. 添加有机物料对淹水土壤 Cd 活性影响机制的研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(10):1093-1099.
GE Ying, HUANG Dan-dan, ZHOU Quan-suo. Influence of organic material addition on the variation of Cd activity in submerged soils[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(10):1093-1099.
- [7] Uraguchi S, Mori S, Kuramata S, et al. Root-to-shoot Cd translocation via the xylem is the major process determining shoot and grain cadmium accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2009, 60(9):2677-2688.
- [8] Shimo H, Ishimaru Y, An G, et al. Low cadmium(LCD), a novel gene related to cadmium tolerance and accumulation in rice[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2011, 62(15):5727-5734.
- [9] Zhang C H, Ge Y, Yao H, et al. Iron oxidation-reduction and its impacts on cadmium bioavailability in paddy soils: A review[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*, 2012, 6(4):509-517.
- [10] Williams P N, Lombi E, Sun G X, et al. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(15):6024-6030.
- [11] Chen L, Yang F, Xu J, et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(18):5128-5130.
- [12] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒 Cd、Cu 和 Se 的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3):112-115.
LI Zheng-wen, ZHANG Yan-ling, PAN Gen-xing, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake[J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3):112-115.
- [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, 253:343-351.
- [14] 梁 程, 林匡飞, 张 雯, 等. 不同浓度硫处理下硒镉交互胁迫对水稻幼苗的生理特性影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(5):857-866.
LIANG Cheng, LIN Kuang-fei, ZHANG Wen, et al. Effects of sulfur and selenium treatment on plant growth and some physiological characteristics of rice under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5):857-866.
- [15] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckermia nivea* L. Gaud[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 62:389-395.
- [16] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
WANG Xue-kui. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 2nd Edition. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] 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):728-733.
AN Zhi-zhuang, WANG Xiao-chang, YAN Wei-dong, et al. Effects of sulfate and cadmium interaction on cadmium accumulation and content of nonprotein thiols in rice seedling[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5):728-733.
- [18] Shanker K, Mishra S, Srivastava S, et al. Effect of selenite and selenate on plant uptake and translocation of mercury by tomato (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Plant and Soil*, 1996, 183(2):233-238.
- [19] Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, et al. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress[J]. *Journal of Plant*

- Physiology*, 2008, 165(8):833–844.
- [20] 张联合, 郁飞燕, 施卫明. 富硒和非富硒水稻品种苗期硒吸收和转运差异[J]. 土壤, 2007, 39(3):381–386.
- ZHANG Lian-he, YU Fei-yan, SHI Wei-ming. Difference of selenium uptake and transport in seedlings between enriched- and non-enriched-selenium rice cultivars[J]. *Soils*, 2007, 39(3):381–386.
- [21] de Souza M P, Lytle C M, Mulholland M M, et al. Selenium assimilation and volatilization from dimethylselenoniopropionate by Indian Mustard [J]. *Plant Physiology*, 2000, 122(4):1281–1288.
- [22] Leustek T, Saito K. Sulfate transport and assimilation in plants[J]. *Plant Physiology*, 1999, 120(3):637–644.
- [23] Pilon-Smits E A H, Hwang S, Lytle C M, et al. Overexpression of ATP sulfurylase in Indian mustard leads to increased selenate uptake, reduction, and tolerance[J]. *Plant Physiology*, 1999, 119(1):123–132.
- [24] Zhang L H, Shi W M, Wang X C. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(5):646–653.
- [25] Küpper H, Lombi E, Zhao F, et al. Cellular compartmentation of cadmium and zinc in relation to other elements in the hyperaccumulator *Arabidopsis halleri*[J]. *Planta*, 2000, 212(1):75–84.
- [26] Kabata A P, Pendias H. Trace elements in soil and plants[M]. CRC Press Inc., 1992:85–96.
- [27] Li D D, Zhou D M, Wang P, et al. Subcellular Cd distribution and its correlation with antioxidant enzymatic activities in wheat (*Triticum aestivum*) roots[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(4):874–881.
- [28] Shanker K, Mishra S, Srivastava S, et al. Study of mercury-selenium (Hg-Se) interactions and their impact on Hg uptake by the radish (*Raphanus sativus*) plant[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1996, 34(9):883–886.
- [29] 王芳, 丁杉, 张春华, 等. 不同镉耐性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4):625–629.
- WANG Fang, DING Shan, ZHANG Chun-hua, et al. Non-protein thiols, subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice cultivars with difference tolerance[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(4):625–629.
- [30] Schützendübel A, Schwanz P, Teichmann T, et al. Cadmium-induced changes in antioxidative systems, hydrogen peroxide content, and differentiation in Scots pine roots[J]. *Plant Physiology*, 2001, 127(3):887–898.
- [31] Shah K H, Ritambhara G K, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6):1135–1144.
- [32] Maksymiec W, Krupa Z. The effects of short-term exposition to Cd, excess Cu ions and jasmonate on oxidative stress appearing in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2006, 57(1–2):187–194.