

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2013.06.005

砷-硒交互作用对水稻吸收转运砷和硒的影响^{*}

胡 莹 黄益宗^{**} 刘云霞

(中国科学院生态环境研究中心, 北京, 100085)

摘 要 采用溶液培养法,研究了两种形态无机 As 与四价 Se 交互作用对水稻吸收转运 As 和 Se 的影响. 结果表明,不同形态 As 与 Se 交互作用对水稻吸收转运 As 和 Se 影响较大,Se(IV)显著地提高水稻根系而降低水稻茎叶对 As 的吸收积累. 与对照处理相比,在 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III) 和 As(V) 处理下添加 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(IV) 分别导致水稻根系 As 含量提高 59.5% 和 21.3%,而水稻茎叶 As 浓度减少 10.4% 和 21.9%. As(III) 或 As(V) 处理显著降低水稻茎叶对 Se 的吸收积累,但 As(V) 处理对水稻根系积累 Se 没有影响. 在 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(IV) 处理下,添加 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III) 和 $1.0 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(V) 导致水稻茎叶 Se 浓度分别比对照处理降低 41.9% 和 30.3%. Se(IV) 与 As(III) 或 As(V) 对水稻转运 As、Se 的能力具有交互拮抗作用. 研究结果表明,在 As 污染农田中,可通过施用 Se 肥来提高植物的 Se 营养,降低植物对 As 的吸收积累,从而降低 As 对人体健康的危害.

关键词 水稻, As, Se, 交互作用.

砷(As)是一种毒性较强的环境污染物,在世界范围内广泛存在于土壤、水和食物中,严重威胁着人类的健康和生命安全. 近年来由于东南亚地区 As 污染问题的日益严重,这个问题已引起全世界的极大关注^[1]. 尤其在孟加拉国大部分地区地下水中 As 浓度严重超标,用含 As 的地下水灌溉农田导致水稻秸秆、稻壳和籽粒中的 As 含量不断提高^[2]. 亚洲地区是水稻的主要生产区,也是大米的消费区,As 通过食物链进入人体而对人体产生危害已成为全球非常突出且急需解决的环境问题之一. 环境中的 As 主要以无机砷和有机砷两种形式存在,与有机砷相比,无机砷具有更高的毒性. 无机砷包括三价砷 As(III) 和五价砷 As(V) 两种形式. 已有研究表明,水稻根际土壤溶液中三价砷和五价砷并存,而三价砷为主要存在形态^[3].

硒(Se)是人类及动物体内必需的微量元素之一,它具有许多重要的生物功能,是一些抗氧化物酶和谷胱甘肽过氧化物酶的组成成分^[4],同时也具有抗癌及抗艾滋病等功能^[5-6]. 在中国部分地区由于缺 Se 导致的地方性疾病克山病和大骨节病严重影响了当地居民的健康^[7]. 人体所需的 Se 主要是通过饮食来摄取,而谷物是 Se 及其它微量元素的重要来源,因此通过食用富 Se 大米是解决人体缺 Se 的有效途径之一. 研究表明,在碱性土壤或是通气性良好的土壤条件下,Se 主要以六价形式存在;而在酸性至中性土壤中,或是在还原条件的土壤如稻田土中,Se 主要以四价形式存在^[8-9]. 关于 Se 对植物吸收转运 Hg、Cd、Pb 等重金属的拮抗作用研究已有过一些报道. Thangavel 等^[10]发现,低浓度的 Se 对 Hg 胁迫下的马齿苋起到保护作用,而随着 Se 和 Hg 浓度的提高,Se 的这种保护作用下降,而协同毒害作用增强. 张海英等^[11]报道,适宜浓度的 Se 可清除膜脂过氧化产物丙二醛(MDA),保护细胞膜的完整性,有效地抑制草莓叶片和果实对重金属 Cd 和 Pb 的吸收. Munoz 等^[12]研究表明,Se 可以通过抑制膜脂过氧化和增加抗氧化酶的活性来提高植物的抗氧化胁迫能力,Se 对植物 Cd 胁迫的缓解机理主要有两方面:(1)将 Cd 从细胞的代谢活性位点清除;(2)减少氧自由基.

植物受 As 毒害时,As 与蛋白质中的巯基结合,使酶及组织蛋白的活性受到抑制,导致活性氧自由基的积累、植物络合素产生、谷胱甘肽减少及膜脂过氧化等现象^[13]. 相反,Se 是抗氧化剂,它可以通过增

2012 年 9 月 27 日收稿.

^{*} 国家重金属污染治理专项“广西环江县大环江流域土壤重金属污染治理工程项目”;国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07212-001-05)资助.

^{**} 通讯联系人, Tel: 010-62849158; E-mail: hyz@ rcees. ac. cn

加硫醇及谷胱甘肽来抑制膜脂过氧化,从而减轻 As 对植物的氧化胁迫^[14]. 目前国际上关于 As、Se 交互作用的研究还只限于蜈蚣草^[14-15]、绿豆^[16]、大麦^[17]及苜蓿^[18]等少量植物的研究,我国曾在水稻^[19]方面有过报道,但这些研究都是关于 Se 与单一 As 形态的交互作用.

本试验采用溶液培养法探讨了四价硒[Se(Ⅳ)]与两种 As 形态[As(Ⅲ)、As(Ⅴ)]交互作用对水稻吸收、积累及转运 As、Se 的影响.

1 材料与方 法

1.1 植物培养

水稻(*Oryza sativa* L.)品种嘉花 1 号由嘉兴农业科学院提供. 水稻种子经 30% H₂O₂消毒 10 min 后,用去离子水洗净,播种于湿润的珍珠岩中培养. 2 周后,挑选生长一致的水稻苗移栽到 1/3 强度的营养液中培养 1 周,然后换成全营养液继续培养 1 周至水稻长出 4 片叶子. 培养器皿采用 500 mL 的 PVC 管(直径 7.5 cm;高 14 cm),每盆种植 1 株水稻苗. 营养液配方见表 1.

表 1 水稻营养液营养元素组成

Table 1 Components of nutrient elements in rice hydroponic solution

微量营养元素	浓度/($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)	大量营养元素	浓度/($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Fe(Ⅱ)-EDTA	50.0	NHNO ₃	5.0
H ₃ BO ₄	10.0	K ₂ SO ₄	2.0
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	1.0	CaCl ₂	4.0
CuSO ₄ ·5H ₂ O	1.0	MgSO ₄ ·7H ₂ O	1.5
MnSO ₄ ·H ₂ O	5.0	KH ₂ PO ₄	1.3
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.5		
CoS ₄ ·7H ₂ O	0.2		

试验在可控光温的生长室中进行:14 h 的光照(260—350 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$),白天温度为 28 ℃,夜间为 20 ℃,相对湿度为 60%—70%.

1.2 试验处理

水稻幼苗在全营养液中培养 1 周后,将其分别转移至不加处理的对照(CK)和含不同形态 As 及 Se(Ⅳ)的溶液中. 试验设计为:处理 1: CK;处理 2: 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅲ);处理 3: 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅴ);处理 4: 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(Ⅳ);处理 5: 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅲ) + 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(Ⅳ);处理 6: 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅴ) + 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(Ⅳ). 营养液中 As 和 Se 的处理浓度均为 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,三价砷(As(Ⅲ))以 NaAsO₃、五价砷(As(Ⅴ))以 Na₃AsO₄·12H₂O、四价硒(Se(Ⅳ))以 Na₂SeO₃形式加入. 每天更换 1 次营养液,处理 3 d 收获,每个处理设 4 个重复.

1.3 样品处理与分析

收获后的水稻植株样品处理:将其根系剪下,单独 As 处理的根系放入含有 1.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ K₂HPO₄, 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ca(NO₃)₂和 5.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 2-吗啉乙磺酸(MES)溶液中冰浴 15 min,以除去根表吸附的 As^[3]. 单独 Se 处理的根系放入含有 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ K₂SO₄, 0.5 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Ca(NO₃)₂和 5.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ MES 溶液中冰浴 15 min,以除去根表吸附的 Se^[20]. As、Se 交互试验的水稻根系在以上两种溶液中各冰浴 15 min,然后连同水稻地上部一起在冷冻干燥机中冷冻干燥 48 h,取出后称其干重并磨碎备用.

样品的分析采用微波消解法,准确称取磨碎好的样品 0.200 g(不足的按实际重量称取),放入 100 mL 聚四氟乙烯消解罐中,加入 5 mL 优级纯的浓硝酸后,放入微波加速反应系统中(MARS5, CEM Microwave Technology Ltd. USA)进行消解. 消解程序为:首先加热至 120 ℃,保持 5 min,然后经 15 min 升温到 160 ℃,再保持 15 min,最后降温到 60 ℃完成消解. 设空白处理和标准样品(GBW07605)处理,以确定测定过程的准确度和用于回收率的计算. 消煮后的样品,用超纯水稀释,定容至 50 mL,过滤. 样品中的 As、Se 含量用安捷伦公司 Agilent 7500a 的 ICP-MS 进行测定.

1.4 数据分析

转运系数(Translocation factor):水稻地上部 As 或 Se 浓度与根中 As 或 Se 浓度的比值,表示水稻根系转运 As 或 Se 至茎叶的能力.
采用统计软件 SPSS11.0 对试验数据进行方差分析及多重比较.

2 结果与讨论

2.1 两种形态的 As 和Se(Ⅳ)及其交互作用对水稻生长的影响

水稻植株经过 1.0 μmol·L⁻¹ As(Ⅲ)、As(Ⅴ)和Se(Ⅳ)处理 3 d 后,其茎叶和根系干重变化见表 2. 从表 2 可以看出,在没有 As 的处理中,添加Se(Ⅳ)可显著地降低水稻茎叶和根系的干重,分别比对照降低了 20.4% 和 19.2%. 但是在有 As 的处理中,添加Se(Ⅳ)对水稻茎叶和根系干重的影响不显著,这可能与 As、Se 的处理时间较短有关. 据报道 As 处理对不同基因型水稻生物量的影响较大^[21]. 本研究结果表明,单独添加 1.0 μmol·L⁻¹ Se(Ⅳ)可导致水稻根系和茎叶生物量显著降低,说明Se(Ⅳ)可抑制水稻幼苗的生长,这和以往的文献报道相一致^[22-23].

表 2 As(Ⅲ)、As(Ⅴ)和Se(Ⅳ)及其交互作用下的水稻生物量
Table 2 Biomass of rice shoots and roots under As(Ⅲ), As(Ⅴ) and Se(Ⅳ) and their interaction

处理	茎叶干重/g			根系干重/g		
	0	+ As(Ⅲ)	+ As(Ⅴ)	0	+ As(Ⅲ)	+ As(Ⅴ)
0	0.103 ± 0.008a	0.087 ± 0.006a	0.096 ± 0.004a	0.026 ± 0.002a	0.022 ± 0.002a	0.025 ± 0.001a
+ Se(Ⅳ)	0.082 ± 0.005b	0.097 ± 0.011a	0.088 ± 0.006a	0.021 ± 0.001b	0.024 ± 0.003a	0.023 ± 0.002a

注:不同字母表示处理 P<0.05 水平差异显著.

2.2 Se 对水稻吸收积累 As 的影响

由于对照(不添加 As 或 Se 处理)中的植株未检测到 As 或 Se,因此,该部分试验数据未列出. 对数据进行方差分析,结果表明,Se 对水稻根系及茎叶吸收积累 As 影响显著(图 1). 添加Se(Ⅳ)显著(P<0.05)促进了水稻根系对As(Ⅲ)及As(Ⅴ)的吸收. 与不加 Se 的对照处理相比,添加 1.0 μmol·L⁻¹ Se(Ⅳ)分别导致水稻根系 As 含量提高 59.5% 和 21.3% (图 1a). 然而,Se(Ⅳ)显著(P<0.05)地降低了As(Ⅲ)和As(Ⅴ)处理的水稻茎叶中 As 浓度. 与不加 Se 的对照相比,添加 1.0 μmol·L⁻¹ Se(Ⅳ)分别导致水稻茎叶 As 浓度减少 10.4% 和 21.9% (图 1b).

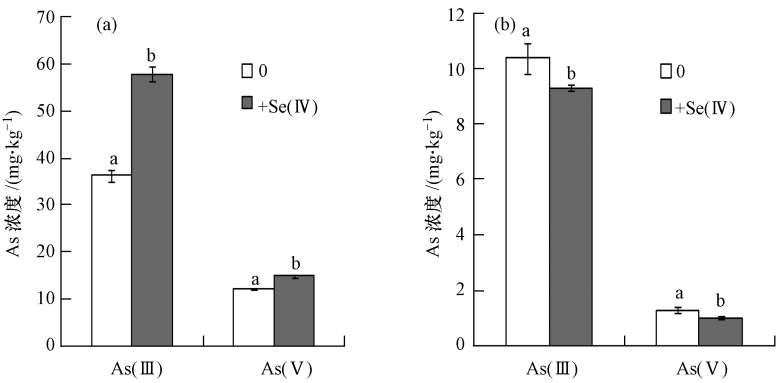


图 1 不同形态 As 处理下,Se 对水稻根系(a)和茎叶(b)中 As 浓度的影响
(不同字母表示处理间 P<0.05 水平差异显著)

Fig. 1 Effect of Se on the As concentration in rice roots (a) and shoots (b) under different As species treatments

水稻根系及茎叶中 As 积累的总量结果表明(表 3),加Se(Ⅳ)显著(P<0.05)促进了As(Ⅲ)处理的水稻根系中 As 积累的总量,但也显著(P<0.05)降低了茎叶中 As 的总量,与不加 Se 的对照相比,根系中增加了 75.5%,而茎叶中降低了 26.3%. 虽然加Se(Ⅳ)对As(Ⅴ)处理的水稻根系中 As 积累的总量影响不显著,但也显著(P<0.05)降低了 As(Ⅴ)处理茎叶中 As 的总量,与不加 Se 的对照相比,茎叶中

降低了 31.5%。

在淹水的土壤环境中,五价砷容易被还原成三价砷,所以三价砷是稻田土壤中 As 的主要存在形式.水稻吸收三价砷和五价砷的方式不同,根系通过水通道途径吸收As(Ⅲ)^[24],而通过磷的高亲和力吸收系统来吸收As(Ⅴ)^[25]. Abedin 等研究水稻吸收不同形态 As 的吸收动力学,结果表明水稻吸收三价砷和五价砷都是主动吸收的过程,所以需要能量作为动力,而且在浓度较高时吸收的三价砷高于五价砷^[3]. 这与本研究结果相一致,从图 1 和表 3 可以看出,三价砷处理的水稻无论是根系还是茎叶中 As 含量都明显高于五价砷处理的水稻,这可能也因为五价砷与磷化学性质相似,在水稻的吸收转运过程中存在相互的竞争抑制. 由于在还原性的稻田土壤中 As 主要以As(Ⅲ)形式存在,所以水稻 As 污染的问题不容忽视. As 可以使植物产生氧化胁迫从而导致植物代谢和生长过程受阻^[26],而 Se 可以作为抗氧化剂或者直接参与到植物体内抗 As 氧化胁迫的机制中^[14]. 从本研究结果来看,Se(Ⅳ)显著地促进了 As 在水稻根系中的积累,却降低了水稻茎叶中 As 的浓度. As 与 Se 的这种交互作用机制目前还不是很清楚,有待进一步研究.

表 3 不同形态 As 处理下,Se 对水稻根系及茎叶中 As 总量的影响

处理	根系 As/μg		茎叶 As/μg	
	+ As(Ⅲ)	+ As(Ⅴ)	+ As(Ⅲ)	+ As(Ⅴ)
0	0.791 ± 0.07b	0.303 ± 0.02a	1.008 ± 0.02a	0.130 ± 0.01a
+ Se(Ⅳ)	1.388 ± 0.05a	0.345 ± 0.02a	0.743 ± 0.04b	0.089 ± 0.00b

注:不同字母表示处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著.

2.3 As 对水稻吸收积累 Se 的影响

添加As(Ⅲ)显著地促进了水稻根系对Se(Ⅳ)的吸收积累($P < 0.001$,图 2a),此处理下水稻根系 Se 浓度比对照处理提高 42.7%,但是添加As(Ⅴ)对水稻根系吸收积累 Se 影响不显著. 图 2b 为Se(Ⅳ)处理下不同形态 As 对水稻茎叶 Se 浓度的影响,从图中可以看出,在 $1.0\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(Ⅳ)处理下,水稻茎叶里的 Se 浓度显著地受到不同形态 As 的影响($P < 0.001$). 添加As(Ⅲ)和As(Ⅴ)均显著地降低了水稻茎叶中 Se 的浓度,且As(Ⅲ)比As(Ⅴ)对水稻茎叶中 Se 浓度的影响更大($P < 0.05$). 在 $1.0\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅲ)和 $1.0\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(Ⅴ)处理下水稻茎叶中 Se 浓度分别比对照处理降低 41.9% 和 30.3%.

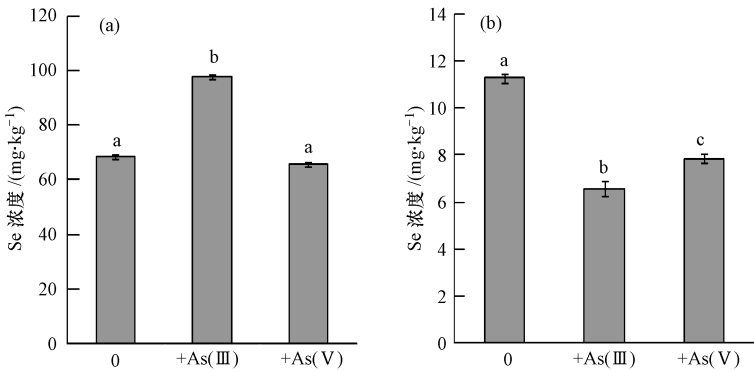


图 2 Se(Ⅳ)处理下不同形态 As 对水稻根系(a)和茎叶(b)中 Se 浓度的影响
(不同字母表示处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著)

Fig.2 Effect of different As species on the Se concentration in rice roots (a) and shoots (b) under Se(Ⅳ) treatment

进一步从水稻根系及茎叶中 Se 的积累量来分析,其结果与根系及茎叶中 Se 浓度趋势一致(表 4),即As(Ⅲ)显著地促进了水稻根系对Se(Ⅳ)的积累,根系中 Se 总量增加了 64.4%,但是As(Ⅴ)对水稻根系积累 Se 的总量影响不显著. As(Ⅲ)和As(Ⅴ)都显著($P < 0.05$)地降低了茎叶中 Se 总量,与对照相比分别降低了 30.9% 和 24.8%. 植物吸收Se(Ⅳ)为被动吸收,受呼吸抑制剂影响很小^[27]. 但最近已有研究报道,小麦吸收Se(Ⅳ)受代谢抑制剂(CCCP)和磷酸盐的抑制,缺磷可促进小麦吸收Se(Ⅳ)^[28]. 研究结果显示,水稻对Se(Ⅳ)的吸收积累受不同形态的 As 影响较大,As(Ⅲ)促进了水稻根系的 Se 积累,

但却降低水稻茎叶的 Se 积累. As(V)对水稻根系中的 Se 含量影响不大,但却显著降低水稻茎叶中的 Se 含量. 这可能与As(III)和As(V)在水稻体内的吸收转运机制不同有关.

表 4 Se(IV)处理下不同形态 As 对水稻根系和茎叶中 Se 总量的影响

Table 4 Effect of different As speciation on the total Se amount in rice root and shoot under Se(IV) treatment

处理	根系 / μg	茎叶/ μg
0	1.442 $\pm$ 0.11b	0.923 $\pm$ 0.05a
+ As(III)	2.370 $\pm$ 0.25a	0.638 $\pm$ 0.02b
+ As(V)	1.518 $\pm$ 0.10b	0.694 $\pm$ 0.04b

注:不同字母表示处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著.

2.4 Se 对水稻转运不同形态 As 能力的影响

As 被水稻根系吸收后,由水稻根系转运至地上部的茎叶中,转运系数可用来表示水稻根系向地上部转运 As 的能力. 图 3 表明,在As(III)处理下,添加 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(IV)显著地抑制了 As 从水稻根系向地上部的转运 ($P < 0.001$),As 转运系数与对照处理相比降低了 43.3%. 同样在As(V)处理下,添加 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se(IV)也显著地降低了 As 从水稻根系向地上部的转运 ($P < 0.05$),As 转运系数与对照处理相比降低 35.2%. 图 3 显示,水稻对As(III)的吸收转运能力明显高于As(V),添加Se(IV)可显著抑制As(III)及As(V)向地上部的转运,这一结果表明,Se 在 As 从水稻根系向茎叶中的转运过程起到了拮抗作用,这与其它关于陆地植物的研究结果相一致. Feng 等^[15]研究显示,添加 Se 抑制了 As 从蜈蚣草根系向地上部的转运. Malik 等^[16]也报道,在 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As 处理下的绿豆添加 5 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Se 后,可显著促进了绿豆的生长,并且减少了绿豆对 As 的吸收. Khattak 等^[18]在对苜蓿的研究中也证明了 Se 能够降低苜蓿茎叶中的 As 浓度. 而本文的结果进一步证明 Se 同样会抑制 As 在水生植物中的转运. 因此可以考虑通过添加 Se 来减少 As 在水稻籽粒中的积累,从而降低人们由于食用含 As 大米而带来的健康风险.

2.5 不同形态 As 对水稻转运 Se 能力的影响

从图 4 看出,在Se(IV)处理下添加不同形态 As 对水稻转运 Se 有显著影响($P < 0.05$),Se 转运系数呈下降趋势,添加As(III)比添加As(V)对水稻转运 Se 影响更大. 与对照处理相比,添加 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(III)和 1.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ As(V) 分别导致水稻 Se 转运系数降低 59.3% 和 27.7%. Se(IV)被植物吸收后大部分被转化成有机 Se 储存在植物根系中,小部分被转运至植物地上部^[29-31]. 图 4 显示,Se(IV)处理下水稻 Se 的转运系数在 0.07—0.17 之间,说明水稻吸收的Se(IV)向地上部转运的数量很少. 从图 4 还可以看出,As 处理显著地降低水稻对 Se 的转运能力,且As(III)的影响要大于As(V),由于稻田土壤中 As 主要以As(III)形式存在,因此可以推断 As 污染将会导致水稻籽粒中 Se 含量降低. 据 Williams 等^[32]报道,随着稻田中 As 浓度的增加,水稻籽粒中 Se 含量明显降低.

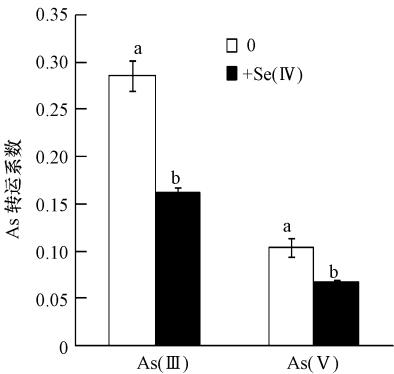


图 3 Se 对水稻转运 As 的影响
(不同字母表示处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著)

Fig.3 Effect of Se on As translocation in rice

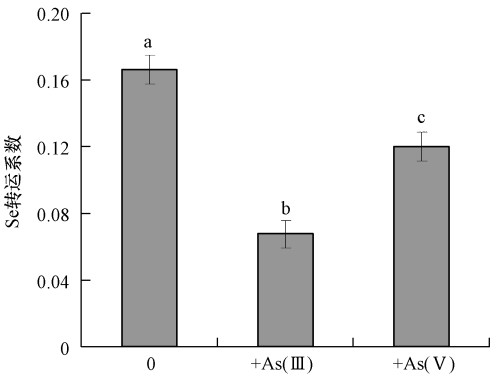


图 4 Se(IV)处理下不同形态 As 对水稻转运 Se 的影响
(不同字母表示处理间 $P < 0.05$ 水平差异显著)

Fig.4 Effect of different As species on Se translocation in rice under Se(IV) treatment

3 结论

(1) 添加Se(Ⅳ)显著地提高水稻根系而降低水稻茎叶对As的吸收积累。

(2) As(Ⅲ)处理显著地提高水稻根系但显著降低水稻茎叶对Se的吸收积累。As(Ⅴ)处理除了显著地降低水稻茎叶对Se的吸收积累外,对水稻根系积累Se没有影响。

(3) Se(Ⅳ)显著地抑制As(Ⅲ)和As(Ⅴ)从水稻根系向地上部的转运能力,同样As(Ⅲ)和As(Ⅴ)均显著地抑制Se从水稻根系向茎叶的转运能力,且As(Ⅲ)的影响比As(Ⅴ)大。

参 考 文 献

- [1] Meharg A A. Arsenic in rice-understanding a new disaster for South-East Asia [J]. Trends in Plant Science, 2004, 9: 415-417
- [2] Rahman M A, Hasegawa H, Rahman M M, et al. Arsenic accumulation in rice (*Oryza sativa* L.): Human exposure through food chain [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, 69: 317-324
- [3] Abedin M J, Feldmann J, Meharg A A. Uptake kinetics of arsenic species in rice plants [J]. Plant Physiology, 2002, 128: 1120-1128
- [4] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase [J]. Science, 1973, 179: 588-590
- [5] Clark L C, Combs G F, Turnbull B W, et al. Effects of selenium supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin. A randomized controlled trial. Nutritional prevention of cancer study group [J]. Journal of the American Medical Association, 1996, 276: 1957-1963
- [6] Combs G F, Clark L C, Turnbull B W. Reduction of cancer risk with an oral supplement of selenium [J]. Biomedical and Environmental Sciences. 1997, 10: 227-234
- [7] Fordyce F M, Zhang G D, Green K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China [J]. Applied Geochemistry, 2000, 15: 117-132
- [8] Elrashidi M A, Adriano D C, Workman S M, et al. Chemical-equilibria of selenium in soils — a theoretical development [J]. Soil Science, 1987, 144: 141-152
- [9] 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: 436-442
- [10] Thangavel P, Sulthana A S, Subburam V. Interactive effect of selenium and mercury on the restoration potential of leaves of the medicinal plant, *Portulaca oleracea* Linn [J]. Science of the Total Environment, 1999, 243-244: 1-8
- [11] 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
- [12] Munoz A H S, Wrobel K, Corona J F G, et al. The protective effect of selenium inorganic forms against cadmium and silver toxicity in mycelia of *Pleurotus ostreatus* [J]. Mycological Research, 2007, 111: 626-632
- [13] Hartley-whitaker J, Ainsworth G, Meharg A A. Copper and arsenate induced oxidative stress in *Holcus Lanatus* L. clones with differential sensitivity [J]. Plant, Cell and Environment, 2001, 24: 713-722
- [14] Srivastava M, Ma L Q, Rathinasabapathi B, et al. Effects of selenium on arsenic uptake in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L [J]. Bioresource Technology, 2009, 100: 1115-1121
- [15] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. Interactive effects of selenium and arsenic on their uptake by *Pteris vittata* L. under hydroponic conditions [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 65: 363-368
- [16] Malik A J, Goel S, Kaur N, et al. Selenium antagonises the toxic effects of arsenic on mungbean (*Phaseolus aureus* Roxb.) plants by restricting its uptake and enhancing the antioxidative and detoxification mechanisms [J]. Environmental and Experimental Botany, 2012, 77: 242-248
- [17] Ebbs S, Weinstein L. Alteration of selenium transport and volatilization in barley (*Hordeum vulgare*) by arsenic [J]. Journal of Plant Physiology, 2001, 158: 1231-1233
- [18] Khattak R A, Page A L, Parker D R, et al. Accumulation and interactions of arsenic, selenium, molybdenum and phosphorus in Alfalfa [J]. Journal of Environmental Quality, 1991, 20: 165-168
- [19] 廖宝凉, 徐辉碧, 花蓓, 等. 硒、砷在水稻体内的相互作用及其自由基机理的研究 [J]. 广东微量元素科学, 1996, 3(4): 1-6
- [20] 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,
- [21] 刘文菊, 胡莹, 毕淑芹, 等. 苗期水稻吸收和转运砷的基因型差异研究 [J]. 中国农学通报, 2006, 22(6): 356-360
- [22] 吴永尧, 罗泽民, 彭振坤. 不同供硒水平对水稻生长的影响及水稻对硒的富集作用 [J]. 湖南农业大学学报, 1998, 24(3): 176-179
- [23] 吴秀峰, 陈平. 硒对水稻幼苗生长和生理特性的影响 [J]. 农业与技术, 2004, 24(5): 76-79
- [24] Meharg A A, Jardine L. Arsenite transport into paddy rice (*Oryza sativa*) roots [J]. New Phytologist, 2003, 157: 39-44
- [25] Abedin M J, Cresser M S, Meharg A A, et al. Arsenic accumulation and metabolism in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Environmental Science and Technology, 2002, 36: 962-968
- [26] Meharg A A, Hartley-Whitaker J. Arsenic uptake and metabolism in arsenic resistant and nonresistant plant species [J]. New Phytologist,

- 2002, 154: 29-43
- [27] Terry N, Zayed A M, de Souza M P, et al. Selenium in higher plants [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 2000, 51: 401-432
- [28] Li H F, Mc Grath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite [J]. New Phytologist, 2008, 178:92-102
- [29] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44: 1083-1087
- [30] 陈思杨, 江荣风, 李花粉. 苗期小麦和水稻对硒酸盐、亚硒酸盐的吸收及转运机制 [J]. 环境科学, 2011, 32(1):284-289
- [31] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants [J]. Planta, 1998, 206: 284-292
- [32] Williams N P, Islam S, Islam R, Jahiruddin M, et al. Arsenic limits trace mineral nutrition (selenium, zinc, and nickel) in Bangladesh rice grain [J]. Environmental Science and Technology, 2009, 43: 8430-8436

Interactions between arsenic and selenium uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings

HU Ying HUANG Yizong* LIU Yunxia

(Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100085, China)

ABSTRACT

Interactive effects between arsenic(As) and selenite(Se) on uptake and translocation of As and Se in rice seedlings were investigated in hydroponic culture. The results showed that the interaction between different As species and Se significantly influenced As and Se uptake and translocation in rice. Se(IV) significantly increased As concentration in roots but decreased it in shoots. Under $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ As(III) or As(V) treatment, supply of $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se(IV) increased As concentration in roots by 59.5% and 21.3%, respectively, compared with the As(III) or As(V) treatment alone, but the As concentration in shoots decreased by 10.4% and 21.9% respectively. Similarly, As(III) or As(V) significantly decreased Se concentration in shoots, but did not affect Se accumulation in roots. Under $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Se(IV) treatment, Se concentration in shoots was declined by 41.9% and 30.3%, respectively, with supply of $1.0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ As(III) or As(V). There was an antagonistic interaction between Se(IV) and As(III) or As(V) in rice plant. These results imply that supply of Se can inhibit As uptake and accumulation in plants, and therefore, reduce As hazards to human health.

Keywords: rice, arsenic, selenium, interaction.