

硒酸钠添加下苗期水稻中硒-汞的分布特征

贺宇^{1,2,3}, 袁林喜^{1,2,3}, 汤杰夫⁴, 尹雪斌^{1,2,3*}

- (1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥 230026;
2. 中国科学技术大学先进技术研究院功能农业工程中心联合实验室, 合肥 230088;
3. 江苏省硒生物工程研究中心, 苏州 215123; 4. 中国科学技术大学纳米科学技术学院, 苏州 215123)

摘要: 采用土培盆栽实验研究了在不同外源硒(硒酸钠)梯度(0, 1 mg·kg⁻¹, 5 mg·kg⁻¹)与外源汞(硫酸汞)梯度(0, 0.5 mg·kg⁻¹, 1 mg·kg⁻¹)条件下, 苗期水稻根与地上部分中硒与汞的分布特征。结果显示, 外源硒抑制了苗期水稻根与苗对汞的吸收与积累, 苗期水稻对汞的吸收随外源硒增加而呈现降低趋势, 5 mg·kg⁻¹是外源硒处理与无硒处理组相比水稻根部汞含量的下降最多, 达到 36.83%, 并使水稻苗的汞含量维持在较低水平。而外源汞添加量 1 mg·kg⁻¹时水稻苗中硒含量达到(58.16±0.17) mg·kg⁻¹, 是相应无汞添加组的 20.12 倍, 说明外源汞添加在一定程度上促进了苗期水稻对硒的吸收与累积。整体而言, 水稻苗中的硒-汞的吸收迁移具有一定的相互作用, 尤其在水稻苗中的硒-汞富集系数存在显著负相关关系($r=0.48$), 其可能的机制是硒在水稻根部与汞结合形成硒-汞络合物从而抑制水稻地上部分对汞的吸收, 这对于利用硒酸钠来降低苗期水稻地上部分对汞的累积提供了数据基础。

关键词: 硒; 汞; 苗期水稻; 分布特征

中图分类号: S511; X173

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X(2017)04-0726-06

Distribution characteristics of selenium and mercury in seedling rice under selenate fortification

HE Yu^{1,2,3}, YUAN Linxi^{1,2,3}, TANG Jiefu⁴, YIN Xuebin^{1,2,3}

- (1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026;
2. Institute of Advanced Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230088;
3. Jiangsu Bio-Engineering Centre of Selenium, Suzhou 215123;
4. Nano Science and Technology Institute, University of Science and Technology of China, Suzhou 215123)

Abstract: An experiment was conducted to evaluate the bioaccumulation and interaction of selenium (Se) and mercury (Hg) in seedling rice via an indoor pot experiment. The germinated seedling rice was exposed to three different levels of Se as Na₂SeO₄ (0, 1 and 5 mg·kg⁻¹) and Hg as HgSO₄ (0, 0.5 and 1 mg·kg⁻¹) for 3 weeks. The results showed that the Hg concentration in shoots tended to decrease with increased Se concentration, and the Hg concentration in roots decreased by 36.8% when the Se concentration was 5 mg·kg⁻¹ compared with the no Se group. Moreover, Hg, in a certain extent, promoted the uptake and accumulation of Se in seedling rice at low concentrations, and the Se contents in seedling rice was 20.12 times higher than those of no Hg group when the exogenous Hg concentration was 1 mg·kg⁻¹. Overall, a negative relationship was observed between the bioaccumulation factors (BAF) of Se and Hg in shoots, and the possible reason might be the formation of Se-Hg complex and block the uptake of Hg to shoots. The present findings could provide data basis to relieve the accumulation of Hg via Na₂SeO₄ fertilizer during seedling.

Key words: selenium (Se); mercury (Hg); seedling rice; distribution characteristics

汞是一种全球性重金属污染物, 土壤中的汞经过食物链的生物富集后进入人体^[1], 会对人体健康造成损害, 因此汞污染引起世界各国的广泛关注和重视^[2]。灌溉水源、化肥和农药的长期使用以及大

收稿日期: 2017-01-16

基金项目: 国家青年自然科学基金(NNSFC31400091), 中国科学技术大学先进技术研究院技术创新项目(2013-1-6), 江苏省青年自然科学基金(BK2012195, BK2012202)共同资助。

作者简介: 贺宇, 硕士研究生。E-mail: heyu523@mail.ustc.edu.cn

* 通信作者: 尹雪斌, 博士, 副教授。E-mail: xbyin@ustc.edu.cn

气沉降都可能造成土壤汞污染^[3], 我国土壤汞含量平均值为 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高于世界未污染土壤汞含量平均值 ($0.03 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[4]。汞污染会改变土壤的理化性质、破坏土壤微生物群落结构^[5]、抑制酶的活性、导致土壤中氮磷和有机物的正常转化失调^[6], 从而影响植物的生长和发育。植物对汞有较强的生物富集效应^[7], 农作物在汞的胁迫下生长受到抑制但组织并未完全受到破坏^[8], 使得被汞污染的农产品有可能直接威胁到人体健康。

硒是哺乳动物必需的微量元素之一, 具有提高免疫力、改善心血管疾病等重要的生理功能^[9], 同时硒对动物体内汞、砷、镉和铅等元素的毒性有拮抗作用^[10], 因此硒与重金属间的相互作用也逐渐成为环境科学领域的研究热点。硒与汞在自然条件下(如水体)可以自发结合形成一种稳定的络合物, 从而达到消除一部分汞污染影响的效应^[11], 这对于汞污染地区有着极为重要的意义^[12]。

尽管硒并非高等植物生长的必需营养元素^[13], 但硒对植物生长是有益的。硒可以缓解环境胁迫对植物的影响, 增强植物的抗氧化性并提高植物对环境胁迫的抵抗能力^[14]。低剂量的硒可以刺激植物生长发育, 并且提高农作物的产量和品质^[15]。同时, 硒还可以减少重金属对植物生长的影响^[16-17]。部分研究表明, 硒可以降低植物体对汞等重金属的吸收和转运, 从而缓解汞对植物的毒害作用^[18]。但植物中硒对重金属的拮抗作用随着硒或重金属的含量变化有可能转化为促进作用^[19], 因此在植物体中硒与汞元素间的相互作用机制尚不明确, 有待进一步探究。

水稻是全球主要的粮食作物之一, 水稻安全性问题一直以来备受关注^[20]。由于水田土壤会增加汞元素的毒性和生物有效性, 因此与旱地作物相比水稻更易累积汞元素而受到侵害^[21]。如贵州汞污染地区水稻含无机汞量可达 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 严重高于中国食品卫生标准 ($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[22]。我国稻米的汞含量呈现带状分布, 受污染程度由南到北和由东到西均呈现轻一重一轻的趋势^[23]。

在水稻生育过程中元素可反复多次从衰老器官向新生器官转移, 所以苗期水稻元素含量会一定程度上影响成熟水稻籽粒的元素含量^[24-25], 因此苗期水稻在水稻各时期研究中有着重要的作用。目前有研究发现适量添加硒可以抑制水稻籽粒中的汞含量, 并且汞含量会随着硒添加的增加而降低^[26]。同时, 硒添加对水稻籽粒中汞含量的拮抗效应与土壤中添加的硒汞间摩尔比有关^[27]。但目前研究采用硒

源均为亚硒酸钠, 针对硒酸钠开展的研究还较少。同时硒汞互作关注点一般在外源硒添加对水稻吸收汞的影响, 但外源汞的添加也可能会改变硒在水稻中的转运及积累进而影响水稻硒的生物强化^[28]。因此, 硒汞互作的研究虽然取得一定的进展, 但是两者在苗期水稻中相互作用仍需进一步探究^[29]。

本研究以土培盆栽苗期水稻为研究材料, 通过定量施加外源硒 (Na_2SeO_4) 和外源汞 (HgSO_4) 探究苗期水稻中硒和汞的分布特征及其可能的相互作用关系, 以期在苗期通过施用含硒肥料或营养剂的方式降低水稻汞的累积提供数据支撑与科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试水稻品种为盐粳 10 号, 种子由中国科学技术大学先进技术研究院功能农业工程中心联合实验室提供。种子发芽前经过蒸馏水浸泡, 去掉浮粒后用 30% 双氧水消毒 15 min。种子消毒后置于多孔育秧盘中, 育秧盘中土壤供试土壤为水稻土, 采集自苏州市车坊镇农田表层, 经测定土壤中含硒量为 0.22 ± 0.01 ($n=6$), 含汞量为 $(31.44 \pm 2.82) \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($n=6$)。实验所添加硒肥采用硒酸钠 (Na_2SeO_4) 溶液, 所添加汞盐采用硫酸汞 (HgSO_4) 溶液。研究场所位于江苏省硒生物工程研究中心。

1.2 实验设计

水稻种子播种, 塑盘育秧, 播种前向育秧盘中土壤添加硒肥与汞盐。汞硒摩尔比 $< 1:1$ 时植物中汞含量较低且硒含量较丰富^[27], 在此基础上设计本实验的硒汞添加量, 如表 1 所示添加外源硒与汞, 实验组共 9 组, 每组设置 3 个平行样。植物生长在温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 60%~70%、自然光照条件的植物培养室中, 各个实验组培育环境均相同。

表 1 外源硒/汞添加梯度设计

Hg/mg·kg ⁻¹	Se/mg·kg ⁻¹		
	0	1	5
0	A	B	C
0.5	D	E	F
1	G	H	K

1.3 样品处理与测定

育秧 3 周后, 将水稻苗分为地上部分(苗)和地下部分(根)采集。植物材料用去离子水清洗晾干, 置于烘箱中 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 粉碎备用。同

时,将培育水稻苗的根系土壤样品自然阴干,磨细,过 100 目筛备用。

土壤及植物样品总硒消解方法均采用浓硝酸-高氯酸联合消解法,消化完成冷却后用盐酸进行还原,产物定容过滤,用蒸馏水定容至 25 mL 待测。土壤及植物样品测定总汞消解方法采用浓硝酸-过氧化氢联合消解法,消化产物经冷却后加入硝酸铁溶液,摇匀后待测。样品中总硒与总汞含量均采用北京瑞利仪器有限公司 AF-2200 双道原子荧光光度计进行测定。

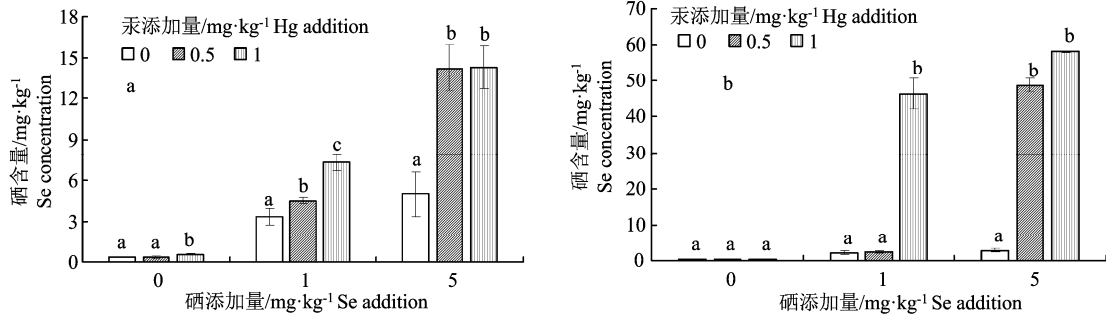
1.4 数据处理

数据结果采用平均值和标准误差来表示,统计结果及图表绘制通过 Orgin 8.0 及 Excel 2013 软件完成。分析结果由 IBM SPSS Statistics 19.0 软件完成,主要采用了以下几种方法进行差异显著性分析:单因素 ANOVA 检验、双样本 T 检验、双样本 Kolmogorov-Smirnov (K-S) 检验等。

2 结果与分析

2.1 苗期水稻中硒的分布特征

图 1 (a) 给出了不同外源硒与外源汞添加条件下,苗期水稻根部中硒含量分布。对照处理(无外源硒添加)水稻根部中硒含量随着外源添加汞增加呈现小幅度增加,但各处理间无显著差异。采用 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源硒浓度处理时,随着外源添加汞的增加,苗期水稻根部硒含量呈现显著增长,尤其 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源汞处理时含硒量达到 $(7.26 \pm 0.60) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ($n=3$),比未添加汞的处理组增加了 118%。在外源硒添加浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 水平下,苗期水稻根部中的硒含量随着外源汞含量增加也有呈现增加的趋势,添加 0.5 和 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源汞的处理组分别比无外源汞添加组分别增加 186% 和 187%,且 2 组处理间无显著差异。



同一浓度外源硒添加组中字母相同表示无显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

The same letter indicates no significant difference ($P < 0.05$) at the same increased Se concentrations. The same below

图 1 苗期水稻根 (a) 和苗 (b) 中的硒含量分布

Figure 1 The Se concentration in roots (a) and shoots (b) of rice seedlings

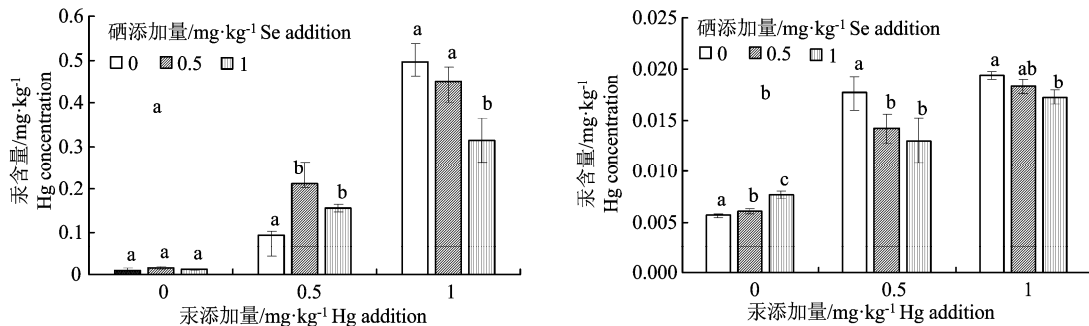


图 2 苗期水稻根 (a) 和苗 (b) 中的汞含量分布

Figure 2 The Hg concentration in roots(a) and shoots(b) of rice seedlings

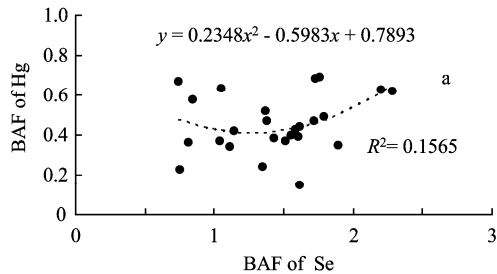
图 1 (b) 显示了不同外源硒与外源汞添加条件下,水稻苗中硒含量的变化。对照处理组(无外源硒添加)水稻苗中硒含量随着外源汞的添加无显著差异。采用外源硒浓度 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理时,水稻苗的硒含量在 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源汞处理时显著高于前两组处理,分别比前两组增加 17.9 倍和 18.0 倍。在外源

硒添加浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的水平下,水稻苗中的硒含量随着外源汞含量增加而增加,添加 0.5 和 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的外源汞的水稻苗硒含量都显著高于无外源汞处理,分别增加 16.9 倍和 19.12 倍。可以看出,水稻苗对硒含量不仅会随着外源硒添加量的增加而增加,也会随着同一外源硒浓度下的外源汞添加量

的增加而变化。

2.2 苗期水稻中汞的分布特征

图 2 (a) 显示了不同外源硒与外源汞添加条件下, 苗期水稻根部中汞含量分布。对照处理(无外源汞添加)苗期水稻根部的汞含量随着外源硒浓度升高无显著差异。在外源汞处理浓度达到 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 根部汞含量随外源硒增加有小幅增



加趋势, $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒添加和 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒添加两组处理比无外源汞处理的小麦根部汞含量显著提升, 分别升高了 132%和 69%, 但两组处理间并无显著性差异。 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源汞处理后, 水稻根部汞含量随外源硒的添加呈现出降低趋势, $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒和 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒添加比无外源硒处理组显著降低, 分别降低 8.7%和 36.8%。

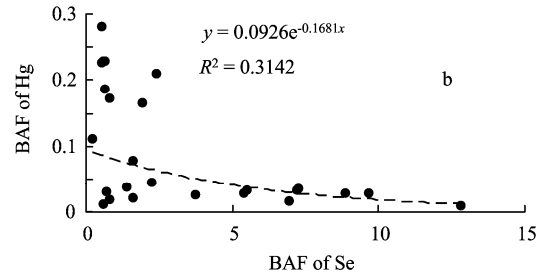


图 3 苗期水稻中根 (a) 和苗 (b) 中 BAF_{Se} 和 BAF_{Hg} 的关系

Figure 3 The relationship of BAF_{Se} and BAF_{Hg} in roots(a) and shoots(b) of rice seedlings

图 2 (b) 显示了不同外源硒与外源汞添加条件下, 水稻苗中汞含量变化。在无外源汞添加的对照组中, 水稻苗中汞含量随着外源硒的添加有小幅度增加, 但各处理组间无显著差异。外源汞处理浓度增加至 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 外源硒处理添加量的增加使水稻苗的汞含量呈现降低趋势, $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒和 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒处理皆比无外源硒处理组显著降低, 分别降低 19.7%和 26.5%。外源汞处理浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, 苗期水稻苗中的汞含量随着外源硒含量增加呈降低趋势, $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒和 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 外源硒处理的汞含量比无外源硒处理分别降低 5.6%和 11.2%, 但各处理间没有显著差异。

2.3 硒汞的相互作用对水稻中硒汞富集的影响

生物富集系数 (BAF) 可以更好的描述苗期水稻对硒和汞的吸收能力及其相互作用^[30], 生物富集系数=水稻组织中元素含量/土壤元素含量。将苗期水稻根与苗中硒和汞生物富集系数 ($n=27$) 进行投图, 得到水稻根与地上部分硒-汞富集系数间关系图 (见图 3)。可以看出, 苗期水稻根和地上部分中硒与汞含量呈现出明显差异, 水稻地上部分部硒含量是对应水稻根的 0.5~3 倍, 而水稻根部汞含量是对应水稻地上部分的 5~20 倍。苗期水稻根部对汞的富集能力强于水稻苗 ($\text{BAF}_{\text{根Hg}}=0.45\pm 0.15$, $\text{BAF}_{\text{苗Hg}}=0.09\pm 0.09$); 苗期水稻苗中硒的富集能力则强于水稻根部 ($\text{BAF}_{\text{根Se}}=1.43\pm 0.44$, $\text{BAF}_{\text{苗Se}}=3.38\pm 3.54$)。苗期水稻的根与苗中汞与硒的富集系数的分布差异明显, 苗期水稻根部更易富集外源添加的汞元素而水稻苗中更易富集硒元素。水稻根部硒与汞的富集

系数线性趋势无明显规律 ($r_{\text{根}}^2 < 0.1$), 而水稻苗中硒与汞的富集系数总体上呈现出负相关 ($r_{\text{苗}}=0.48$), 即随着水稻苗中硒含量的提高苗中的汞的含量逐渐降低。可见, 在土壤中添加外源硒后, 水稻对汞的吸收会有一定程度抑制, 并且这种抑制作用可以体现在苗期水稻的地上部分。

3 讨论

水稻是一种非硒累积植物, 但水稻对硒也具有一定的富集能力, 可以将硒主动转运吸收进而提高各部位硒含量^[31]。Geng 等^[32]研究显示高硒土壤可以显著提高水稻各部分中的硒含量, 并且水稻中的硒含量会随着土壤中硒含量增加而增加; 姜超强等^[33]发现土壤硒含量与水稻各部分存在显著正相关, 这些研究结果均与本研究结果一致。此外, 本研究发现各处理中苗期水稻地上部分中硒含量高于水稻根部, 上述结果与陈思杨等^[34]的结论相同: 这是由于硒酸盐未在水稻根部参与新陈代谢反应, 从而导致更多的硒可以运移到水稻的地上部分。在相同外源硒添加浓度下, 外源汞的添加会促进苗期水稻中硒含量升高, 在较高外源硒 ($< 5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 及较高外源汞 ($< 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 处理下这种协同作用尤为明显, 类似现象同样出现在刘达等^[35]的研究中, 他们认为主要原因可能与重金属元素在较高浓度下会对水稻组织造成损伤, 从而通过加强硒元素的主动运输来降低重金属对植物的损害。这一硒-汞协同作用的现象也出现在 Zhou 等^[26]和陈姗姗等^[36]的研究中, 但外源汞添加促进苗期水稻吸收外源硒酸钠的

机理还有待进一步研究。

目前大量文献表明外源亚硒酸钠的添加可以抑制植物对汞的吸收, 硒与汞发生拮抗作用可能是由于硒-汞络合物的产生^[29,37]。硒-汞络合物的存在已被多种检测手段所证实: 采用高效液相色谱与 ICP-MS 相结合的检测手段探测到硒-汞复合物存在于大豆根部^[38], 利用 SRXRF、XANES 等金属组学研究技术也检测到硒-汞结合形式的化合物^[39-40]。本研究中的苗期水稻长期处在浸润的环境中, 其根际环境具有微生物活动强、pH 值低和根部呼吸作用显著等特点, 外源添加的亚硒酸钠可能在其根部还原为 Se^{2-} , 进而与土壤中的游离态 Hg^{2+} 结合为稳定的 Se-Hg 化合物^[27]。但是由于本实验外源硒采用了亚硒酸盐, 外源硒添加对水稻中汞的降低量并没有亚硒酸钠为硒源的研究显著^[26], 造成这一现象的原因可能与亚硒酸钠的化学性质相关。Li 等^[41]发现小麦对亚硒酸盐和亚硒酸盐的吸收转换具有显著的差别, 当硒源采用亚硒酸钠时小麦根中出现了还原态的含硒氨基酸(如硒代蛋氨酸, 硒代半胱氨酸等), 而硒源变为亚硒酸钠时小麦根部及地上部分均以亚硒酸盐形态为主。由于外源亚硒酸钠较难在水稻根部转化为还原态硒, 从而导致硒对汞的抑制作用较低。另外, 水稻苗中硒与汞生物的富集系数存在较为明显的负相关, 可能表明硒与汞存在一定的拮抗作用, 使得汞由水稻根部向水稻苗的转移富集发生阻碍, 可能由于硒络合物在根部的形成达到阻碍水稻体外汞元素迁移, 实现水稻苗对汞吸收的限制, 间接降低了汞对植物所造成的危害^[26-27]。

4 结论

(1) 在亚硒酸钠的干预条件下, 苗期水稻苗中硒的含量显著高于根部。随着亚硒酸钠增加, 苗期水稻根部的硒含量显著增加。外源汞(硫酸汞)的添加显著促进了苗期水稻根与苗对硒的吸收与累积。

(2) 苗期水稻汞的分布在根与苗中有差异。与水稻苗相比, 水稻根部汞含量更高。外源亚硒酸钠添加抑制了苗期水稻根部对汞的吸收与累积, 并且将水稻苗中的汞含量控制在较低水平($<15 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

(3) 由于汞在一定程度上促进了水稻对亚硒酸盐的吸收, 并且在水稻根际部位部分硒与汞发生拮抗作用, 水稻苗中硒与汞的生物富集系数存在负相关($r=0.48$)。

参考文献:

- [1] JERNELÖV A, LANN H, JERNELOV A. Mercury accumulation in food chains[J]. *Oikos*, 1971, 22(3):403-406.
- [2] NAKAGAWA R, YUMITA Y. Change and behavior of residual mercury in paddy soils and rice of Japan[J]. *Chemosphere*, 1998, 37(8): 1483-1487.
- [3] 胡文友, 黄标, 马宏卫, 等. 南方典型设施蔬菜生产系统镉和汞累积的健康风险[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1045-1055.
- [4] 洪春来, 贾彦博, 杨肖娥, 等. 农业土壤中汞的生物地球化学行为及其生态效应[J]. *土壤通报*, 2007, 38(3): 590-596.
- [5] MÜLLER A K, WESTERGAARD K, CHRISTENSEN S, et al. The effect of long-term mercury pollution on the soil microbial community[J]. *FEMS Microbiol Ecol*, 2001, 36(1): 11-19.
- [6] 和文祥, 朱铭莪, 张一平. 土壤脲酶与汞关系中的作物效应 [J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2002, 30(2): 68-71.
- [7] PERGENT-MARTINI C. *Posidonia oceanica*: a biological indicator of past and present mercury contamination in the mediterranean sea[J]. *Mar Environ Res*, 1998, 45(2): 101-111.
- [8] MISHRA A, CHOUDHURI M A. Amelioration of lead and mercury effects on germination and rice seedling growth by antioxidants[J]. *Biol Plantarum*, 1998, 41(3): 469-473.
- [9] WALLACE K, KELSEY K T, SCHNED A, et al. Selenium and risk of bladder cancer: a population-based case-control study[J]. *Cancer Prev Res*, 2009, 2(1): 70-73.
- [10] JONNALAGADDA S B, RAO P V V P. Toxicity, bioavailability and metal speciation[J]. *Comp Biochem Phys C*, 1993, 106(3): 585-595.
- [11] XIA X Q, YANG Z F, XUE Y, et al. Geochemical circling of soil Se on the southern Song-Nen Plain, Heilongjiang Province[J]. *Geoscience*, 2012, 26(5):850-849.
- [12] LEONZIO C, FOCARDI S, FOSSI C. Heavy metals and selenium in stranded dolphins of the Northern Tyrrhenian (NW Mediterranean)[J]. *Sci Total Environ*, 1992, 119: 77-84.
- [13] 张驰, 吴永尧, 彭振坤. 植物硒的研究进展[J]. *湖北民族学院学报(自然科学版)*, 2002, 20(3):58-62.
- [14] HE PP, LV X Z, WANG G Y. Effects of Se and Zn supplementation on the antagonism against Pb and Cd in vegetables[J]. *Environ Int*, 2004, 30(2): 167-172.
- [15] KUMAR M, BIJO A J, BAGHEL R S, et al. Selenium and spermine alleviate cadmium induced toxicity in the red seaweed *Gracilaria dura* by regulating antioxidants and DNA methylation[J]. *Plant Physiol Bioch*, 2012, 51: 129-138.
- [16] 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, 39(2): 22-27.
- [17] GAILER J. Arsenic-selenium and mercury-selenium bonds in biology[J]. *Coordin Chem Rev*, 2007, 251(1): 234-254.
- [18] 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].

[1] JERNELÖV A, LANN H, JERNELOV A. Mercury ac-

- Food Chem Toxicol, 1996, 34(9): 883-886.
- [19] EBBS S, LEONARD W. Alteration of selenium transport and volatilization in barley (*Hordeum vulgare*) by arsenic[J]. J Plant Physiol, 2001, 158(9): 1231-1233.
- [20] CHUAH T G, JUMASIAH A, AZNI I, et al. Rice husk as a potentially low-cost biosorbent for heavy metal and dye removal: an overview[J]. Desalination, 2005, 175(3): 305-316.
- [21] 刘慧, 马文, 戴九兰. 水稻汞污染研究进展[J]. 山东建筑大学学报, 2015, 30(2): 170-176.
- [22] YANG D Y, CHEN Y W, GUNN J M, et al. Selenium and mercury in organisms: interactions and mechanisms[J]. Environ Rev, 2008, 16: 71-92.
- [23] 朱智伟. 当前我国稻米品质状况分析[J]. 中国稻米, 2006(1): 1-4.
- [24] 陈丽华. 水稻的需肥特点及本田施肥技术[J]. 吉林农业, 2012(11): 73.
- [25] 田亚芹, 冯利平, 邹海平, 等. 不同水分和氮素处理对寒地水稻生育及产量的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(23): 6864-6871.
- [26] ZHOU X, WANG W, YU S, et al. Interactive effects of selenium and mercury on their uptake by rice seedlings[J]. Res J Appl Sci Eng Tech, 2013, 5(19): 4733-4739.
- [27] ZHANG H, FENG X, ZHU J, et al. Selenium in soil inhibits mercury uptake and translocation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Environ Sci Technol, 2012, 46(18): 10040-10046.
- [28] 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, 50(5): 612-624.
- [29] 王祖光, 崔丽巍, 赵甲亭, 等. 硒对汞毒性的拮抗作用及机理[J]. 中国科学(化学), 2016, 46(7): 677-687.
- [30] ARNOT J A, GOBAS F A. A review of bioconcentration factor (BCF) and bioaccumulation factor (BAF) assessments for organic chemicals in aquatic organisms[J]. Environ Rev, 2006, 14(4): 257-297.
- [31] 杜前进, 张永发, 唐树梅, 等. 水稻不同品种在海南富硒土壤中硒的吸收和分配机理[J]. 中国土壤与肥料, 2009(6): 37-40.
- [32] GENG J M, WANG W B, WU L L, et al. Comparative study on characteristics of selenium uptake and distribution between two rice cultivars[J]. Soils, 2014, 46(1): 66-69.
- [33] 姜超强, 沈嘉, 祖朝龙. 水稻对天然富硒土壤硒的吸收及转运[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 809-816.
- [34] 陈思杨, 江荣凤, 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.
- [35] 刘达, 涂路遥, 赵小虎, 等. 镉污染土壤施硒对植物生长及根际镉化学行为的影响[J]. 环境科学学报, 2016, 36(3): 999-1005.
- [36] 陈珊珊, 张崇玉, 张琴, 等. 硒与汞在冬小麦苗期的相互作用[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(1): 28-29.
- [37] ZHAO J, LI Y, LI Y, et al. Selenium modulates mercury uptake and distribution in rice (*Oryza sativa* L.), in correlation with mercury species and exposure level[J]. Metallomics, 2014, 6(10): 1951-1957.
- [38] YATHAVAKILLA S K V, Caruso J A. A study of Se-Hg antagonism in *Glycine max* (soybean) roots by size exclusion and reversed phase HPLC-ICPMS[J]. Anal Bioanal Chem, 2007, 389(3): 715-723.
- [39] MOUNICOU S, SHAH M, MEIJA J, et al. Localization and speciation of selenium and mercury in Brassica juncea: implications for Se-Hg antagonism[J]. J Anal Atom Spectrom, 2006, 21(4): 404-412.
- [40] ZHAO J, HU Y, GAO Y, et al. Mercury modulates selenium activity via altering its accumulation and speciation in garlic (*Allium sativum*) [J]. Metallomics, 2013, 5(7): 896-903.
- [41] LI H F, MCGRATH S P, ZHAO F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. New Phytol, 2008, 178(1): 92-102.