

# 亚硒酸盐/硒酸盐及相互作用对水稻吸收及转运硒的影响

黄青青, 陈思杨, 王 琪, 乔玉辉, 江荣风, 李花粉\*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

**摘要:** 采用分根装置及营养液水培方法研究了硒酸盐( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ )和亚硒酸盐( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ )及其在植物体内相互作用对水稻吸收及转运硒的影响, 以及水稻根系对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收动力学。分根装置中水稻根系左右两侧都供给亚硒酸盐或硒酸盐时, 水稻根系硒含量分别为  $117.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $9.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 地上部硒含量分别为  $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和  $6.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 硒向植株地上部的转移系数分别为 0.01 和 0.69; 分根装置中右侧供给  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  的水稻根系硒含量为  $103.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 左侧供给  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  的水稻根系硒含量为  $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 地上部硒含量为  $6.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 转移系数为 0.10。亚硒酸盐的供给促进了水稻根系对硒酸盐的吸收, 而硒酸盐对水稻吸收亚硒酸盐的影响不显著。吸收动力学结果显示, 水稻根系对  $\text{SeO}_3^{2-}$  的最大吸收速率是  $\text{SeO}_4^{2-}$  的 13 倍, 但是水稻根系对  $\text{SeO}_3^{2-}$  的亲合力低于对  $\text{SeO}_4^{2-}$  的亲合力。

**关键词:** 硒酸盐; 亚硒酸盐; 共存; 分根; 转运

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)11-2098-06 doi:10.11654/jaes.2014.11.004

## Effects of Selenite/Selenate and Their Coexistence in Plant on Selenium Uptake and Translocation in Rice

HUANG Qing-qing, CHEN Si-yang, WANG Qi, QIAO Yu-hui, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen\*

(College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Selenium (Se) exists as both selenate and selenite in soil, and plant roots can take up these two ions. A root splitting system experiment was carried out to study the effect of selenite/selenate and their coexistence in plant on selenium (Se) uptake and translocation in rice seedlings. Selenate ( $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ ) and selenite ( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ ) uptake kinetics by rice were also investigated in solution culture. When both sides of the root splitting system was supplied with either  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  or  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ , the concentration of Se was  $117.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $9.85 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  in rice roots, and  $1.39 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $6.14 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  in rice shoots, respectively. Transfer factor of Se from roots to shoots was respectively 0.01 and 0.69. However, when the system was supplied with  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  in one side and  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  in the other side, Se concentration in rice roots was  $103.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  on  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ -supplied side and  $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  on  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$ -supplied side. The Se concentration in rice shoots was  $6.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  and Se transfer factor was 0.10. The coexistence of selenite in rice plant enhanced selenate uptake by rice seedlings, while the existence of selenate had no significant effect on selenite uptake. The selenite uptake rate was 13 times greater than that of selenate. The affinity of rice root to selenite was weaker than that of selenate.

**Keywords:** selenate; selenite; coexistence; root split technique; translocation

硒是人和动物必需的微量营养元素之一, 是构成含硒蛋白与含硒酶的重要组分, 具有抗氧化、抗癌、

提高机体免疫力等多种生物学功能<sup>[1-2]</sup>。研究已证实人体的 40 多种疾病与缺硒有关, 如克山病、癌症、脑血管疾病、肌营养不良、白内障等<sup>[3-4]</sup>。在世界范围内, 人体缺硒现象非常普遍, 可能有 5~10 亿人缺硒<sup>[5]</sup>。中国是世界上缺硒最严重的国家之一, 从地图上看, 存在一条从东北到西南走向的低硒带, 约有 1 亿多人口因膳食结构中硒含量不足, 造成人体低硒状态<sup>[6-7]</sup>。饮食是人体摄入硒的主要途径, 其中植物硒是饮食中主要

收稿日期: 2014-05-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(41073094); 农业部公益性行业专项(201303106)

作者简介: 黄青青(1987—), 女, 江西九江人, 博士生, 研究方向为环境化学。E-mail: hqcauedu@126.com

\* 通信作者: 李花粉 E-mail: lihuafen@cau.edu.cn

硒源,通过生物强化生产富硒农产品是增加人类饮食中硒摄入量的一个重要途径<sup>[8-9]</sup>。

植物主要从土壤中吸收硒,土壤中的硒一般以硒酸盐和亚硒酸盐的形态存在。植物根系对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收机制不同。硒酸盐同硫酸盐一样,通过植物根部相同的吸收位置被根系吸收,并且这两种离子在吸附和吸收过程中发生激烈竞争<sup>[10]</sup>。与硒酸盐的吸收机制不同,研究表明在长期的水培试验中,亚硒酸盐的吸收受到磷酸盐的抑制<sup>[11-13]</sup>,且 Zhang 等<sup>[14]</sup>研究证实亚硒酸盐可以通过磷酸盐转运子被植物根系吸收。

目前在富硒农产品的开发中,主要是研究植物对单一形态硒的吸收,而关于不同形态硒共存时植物对硒的吸收方面的研究较少<sup>[13,15]</sup>。Li 等<sup>[13]</sup>研究发现硒酸盐和亚硒酸盐共存时,硒酸盐的存在抑制小麦根系对亚硒酸盐的吸收,且亚硒酸盐存在抑制根系吸收的硒酸盐向地上部迁移。但 Li 等的研究是在供给等浓度不同形态硒的混合溶液中进行的。水稻是我国的主要粮食作物,是居民营养和能量的主要来源,其硒含量高低与人体硒营养密切相关,而对供给不同形态硒对水稻硒的吸收和转运方面认识还十分缺乏。本研究采用分根装置培养方式,避免硒酸盐、亚硒酸盐混合后产生交互影响,分析硒酸盐、亚硒酸盐共存时对水稻吸收硒及其在水稻体内迁移的影响,为富硒农产品的安全生产和调控提供科学认识。

## 1 材料与方法

### 1.1 植物培养

水稻 (*Oryza sativa* L. 品种为越富),北方粳稻品种,由中国农业大学植物营养学重点实验室提供。种子发芽前用自来水浮选去掉瘪粒,然后用 30%  $H_2O_2$  消毒 15 min,洗净后在饱和  $CaSO_4$  中浸泡过夜。待种子吸涨后,置于  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $CaCl_2$  溶液漂浮的网格上,使种子半浸入溶液,当叶子展开时,挑选大小一致的幼苗洗净,移至 pH5.5 的 1/2 Kimura 营养液中培养。营养液组成 ( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ):  $KNO_3$  0.091、 $Ca(NO_3)_2\cdot 4H_2O$  0.183、 $MgSO_4\cdot 7H_2O$  0.274、 $KH_2PO_4$  0.1、 $(NH_4)_2SO_4$  0.183、 $MnSO_4\cdot H_2O$   $1\times 10^{-3}$ 、 $H_3BO_3$   $3\times 10^{-3}$ 、 $(NH_4)_6Mo_7O_{24}$   $1\times 10^{-3}$ 、 $ZnSO_4\cdot 7H_2O$   $1\times 10^{-3}$ 、 $CuSO_4\cdot 5H_2O$   $2\times 10^{-4}$ 、 $Fe(III)-EDDHA$   $6\times 10^{-2}$ 。用 MES (2-morpholinoethanesulphonic acid) 缓冲溶液保持营养液 pH 值在 5.5 左右。植物生长在  $25\text{ }^\circ\text{C}/14\text{ h}$  光照和  $20\text{ }^\circ\text{C}/10\text{ h}$  黑暗条件下、相对湿度为 60%~70%、光照强度为  $240\text{ }\mu\text{mol}\cdot$

$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$  的人工生长室中。

### 1.2 试验处理

#### 1.2.1 亚硒酸盐和硒酸盐共存时水稻对硒的吸收及转运的影响

水稻幼苗在营养液中培养三周后,挑选大小一致的幼苗转移到特制的分根装置中(图 1)。分根装置由 PVC 材质制成,分为左右两室,中间用挡板隔开,两侧小室互不相通,每侧小室的容积为 550 mL。另外,在每侧小室的底部有一个直径为 1 cm 的小孔,在水稻培养过程中小孔用胶塞堵住,在更换营养液或收苗时,打开胶塞,两侧营养液分别从两个小孔中流出,避免两侧溶液混合污染。在分根处理过程中,每个分根装置中培养两株幼苗,将植株根系平均分成两部分,一部分置于左侧小室,另一部分置于右侧小室。在分根处理过程中,往两侧小室中分别添加浓度为  $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的  $Na_2SeO_4(Se^{6+})$  或  $Na_2SeO_3(Se^{4+})$  营养液,每个处理设置 3 个重复,试验处理方案详见表 1。处理 24 h 后,将植株地上部与根部分离,同时将分根装置中左右两室的根系分开收获。将水稻幼苗根系和地上

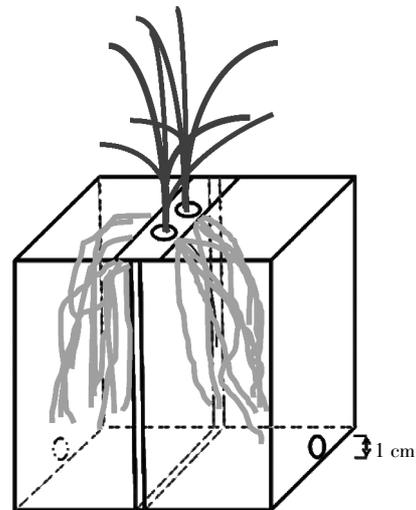


图 1 分根装置示意图

Figure 1 Root splitting system

表 1 分根试验方案设计

Table 1 Experimental design

处理 1 Treatment 1	处理 2 Treatment 2	处理 3 Treatment 3
硒浓度 Se concentration	硒浓度 Se concentration	硒浓度 Se concentration
左侧 Left Se <sup>4+</sup>	右侧 Right Se <sup>4+</sup>	左侧 Left Se <sup>6+</sup>
右侧 Right Se <sup>6+</sup>	左侧 Left Se <sup>4+</sup>	右侧 Right Se <sup>4+</sup>

注:各处理均为同浓度( $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )、不同形态硒的基础营养液。

Note: All treatments received Se with the same concentrations but different forms.

部用去离子水洗净,吸水纸吸干。在 105 °C 烘箱中杀青 30 min,然后在 65 °C 烘干 48 h,称干重。植物根系样品采用全量消解,地上部样品用粉碎机粉碎,自封袋中密封待用。

### 1.2.2 水稻根系对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收动力学

水稻在正常营养液中生长 3 周,挑选大小一致的幼苗转移到一系列不同硒浓度的吸收液中。水稻对硒的吸收动力学试验在容积为 300 mL 的烧杯中进行,每个烧杯中放置 2 株幼苗,设置 3 个重复。吸收液为 7 个浓度水平的  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  或  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  基础营养液 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ),浓度梯度为 0、0.1、0.5、1.0、5.0、10、20,溶液 pH 均为 5.5,处理 60 min 后收获植株地下部。收样时先将植物根系在  $0.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$   $\text{CaSO}_4$  溶液中浸泡 15 min,然后将植株地上部与根部分离,将水稻幼苗根系用去离子水洗净,吸水纸吸干。消解过程中直接取鲜样进行全量消解。

### 1.3 样品的分析测定

植物样品采用  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  方法消解,在消解过程中温度控制在 160 °C 以内,用 2.5 mL  $6\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  HCl 还原,冷却定容。消解液用原子荧光光度计(北京吉天仪器有限公司 AFS-920 双道原子荧光光度计)测定溶液中硒含量。整个测定过程中采用西红柿叶子(GS-BZ51001-94 ESP-1)和空白样品进行全程质量控制。

### 1.4 数据的处理

试验数据为 3 次重复的平均值和标准误差,采用 SAS 软件进行方差分析(多重比较采用 Duncan 法),使用 SigmaPlot 软件进行绘图。转移系数(S/R)=地上部硒含量/根系硒含量;硒吸收效率=总吸硒量/根干重。吸收动力学数据使用 SigmaPlot 软件拟合米氏方程曲线 [Michaelis-Menten equation:  $V = V_{\text{max}} \cdot C / (K_m + C)$ ], 其中  $V$  表示根系吸收离子的速率,  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ;  $K_m$  表示根系对所吸收离子的亲和力,  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ,  $K_m$  愈小表示亲和力愈大;  $V_{\text{max}}$  表示吸收所能达到的最大速率,  $\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $V_{\text{max}}$  愈大表示吸收的内在潜力愈大;  $C$  表示溶液的离子浓度,  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同供硒条件对水稻各部分硒含量的影响

分根和加硒处理对水稻根系和地上部的生物量没有显著的影响 ( $P > 0.05$ , 数据未给出)。

加硒处理 24 h 后,测定水稻根系和地上部硒含量。不同价态的硒对水稻根系和地上部硒含量有显著的影响 ( $P < 0.05$ ),并且在分根装置左右侧供给不同价

态硒时对水稻根系硒含量也有显著的影响 ( $P < 0.05$ )。对于整株水稻来说,处理 1 的体内硒含量最高,其次是处理 2,最后是处理 3(图 2a)。对于水稻地上部硒含量来说,处理 3 的地上部硒含量显著高于处理 1,前者是后者的 4.4 倍。此外,在处理 2 中,测得其地上部硒含量( $6.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )略高于处理 3( $6.14\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),但是远高于处理 1( $1.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,图 2b)。对于水稻根系硒含量来说,处理 1 和处理 3 中分根装置,左右两侧的水稻根系硒含量均没有显著的差异;但处理 2 中左右两侧的水稻根系硒含量有显著的差异(图 2c)。另外,处理 1 的水稻根系硒含量要显著高于处理 3;在处理 2 中,右侧水稻根系硒含量( $101.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )显

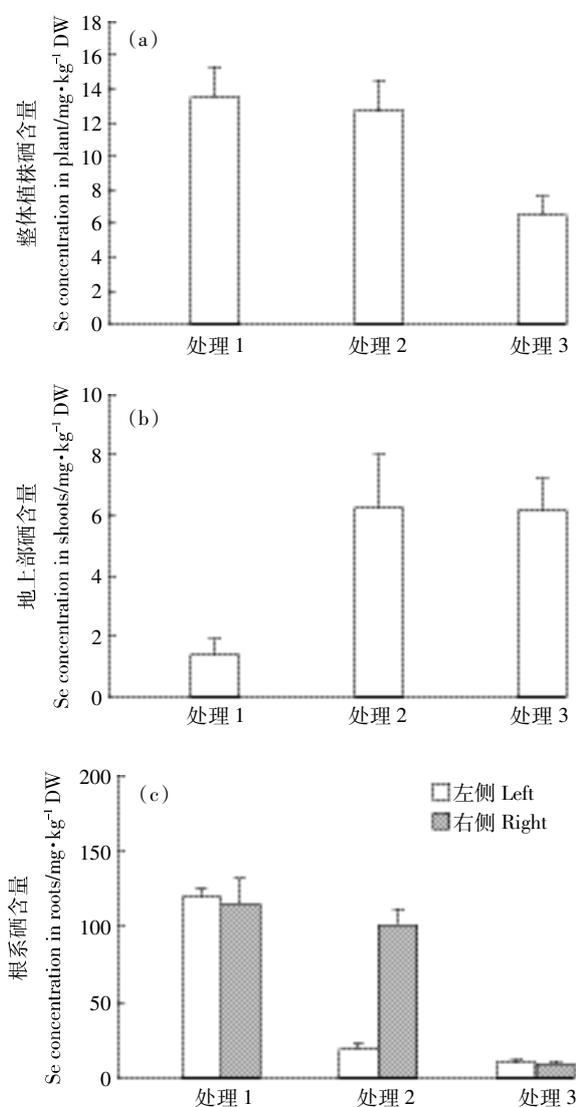


图 2 分根加硒处理 24 h 后硒在整株水稻(a),地上部(b)和左、右侧根(c)的浓度

Figure 2 Selenium concentrations in whole rice plants(a), shoots (b), left roots and right roots(c) after 24 h of different treatments

著高于左侧( $18.9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。此外,在处理2中,左侧供给  $\text{Se}^{6+}$  的水稻根系硒含量高于处理3,而右侧供给  $\text{Se}^{4+}$  的水稻根系硒含量低于处理1。

## 2.2 不同供硒条件对水稻各部分吸硒量以及硒在水稻中分布的影响

由表2可知,加硒处理24 h后,处理2的水稻幼苗吸硒量最高,为  $3.29 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ ,分别为处理1和处理3的1.27倍和3.83倍。对于地上部而言,处理2的水稻幼苗地上部硒含量为  $1.39 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ ,为处理1的5.56倍;对于根系而言,处理2的水稻幼苗地上部硒含量为  $1.90 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ ,为处理3的14.6倍(表3)。此外,分根和加硒处理对硒在水稻根系和地上部所占百分比有显著的影响( $P < 0.05$ )。在处理1中,水稻根系所吸收的硒主要是在根系累积,水稻根系硒所占百分比达到91.3%;而在处理3中,水稻根系所吸收的硒主要是在地上部累积,水稻地上部硒所占百分比为84.1%;在处理2中,水稻根系硒所占百分比为58.0%,低于处理1,但是显著高于处理3(15.9%),而地上部则是相反的情况,处理2中水稻地上部硒所占百分比为42.0%,高于处理1(8.7%),而低于处理3。

## 2.3 不同供硒条件下水稻对硒的吸收量、硒的转移系数和吸收效率的影响

从表3可以看出,硒向植株地上部的转移系数在三个处理间存在显著差异( $P < 0.05$ )。其中,处理3的S/R值最高,为0.69,其次是处理2,处理1的S/R值最低,只有0.01。另外,比较水稻对不同价态硒的吸收效率可知,处理1的硒吸收效率约为处理3的2倍,而与处理2无显著差异。另外,处理2的硒吸收效率为处理1和处理3这两者硒吸收效率之和的58%。

## 2.4 水稻对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收动力学

水稻对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收速率均随溶液中硒浓度的增加而增大,且吸收曲线符合 Michaelis-Menten 方程(图3和表4)。供给等浓度硒时,水稻对

表3 分根加硒处理24 h后水稻对硒的转移系数和吸收效率

试验处理 Treatment	转移系数(S/R) Transfer factor	硒吸收效率/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ root DW}$ Se uptake efficiency
处理1	$0.01 \pm 0.003c$	$128.4 \pm 13.0a$
处理2	$0.10 \pm 0.026b$	$111.6 \pm 18.0ab$
处理3	$0.63 \pm 0.043a$	$65.4 \pm 17.4b$

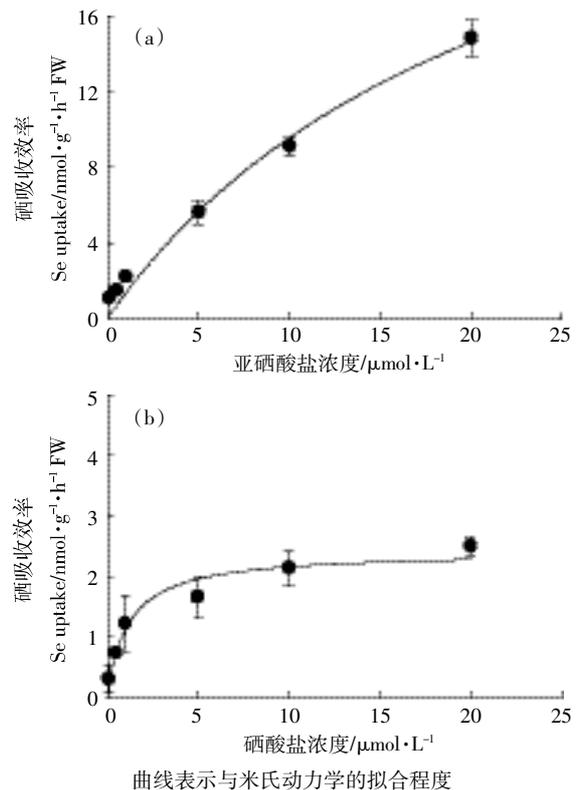


图3 苗期水稻根系对亚硒酸盐(a)和硒酸盐(b)的吸收动力学  
Figure 3 Kinetics of selenite(a) and selenate(b) influx to roots of rice seedlings within 60 min

亚硒酸盐的吸收速率明显高于硒酸盐。在供给硒酸盐浓度为  $10 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,水稻对硒酸盐的吸收曲线已趋于平缓,而供给亚硒酸盐浓度为  $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,水稻对亚硒酸盐的吸收曲线仍有增长的趋势。此外,水稻

表2 分根加硒处理24 h后水稻各部分硒吸收量以及硒的分布( $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ )

Table 2 Selenium accumulation and distribution in different parts of rice seedlings in root-splitting system( $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ )

试验处理 Treatment	吸硒量/ $\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ Se accumulation			吸 Se 量百分数/% Se distribution	
	总量 Total amount	地上部 Shoot	根系 Root	地上部 Shoot	根系 Root
处理1	$2.58 \pm 0.57a$	$0.25 \pm 0.11b$	$2.33 \pm 0.46a$	$8.7 \pm 2.3c$	$91.3 \pm 2.3a$
处理2	$3.29 \pm 0.84a$	$1.39 \pm 0.43a$	$1.90 \pm 0.52a$	$42.0 \pm 8.5b$	$58.0 \pm 8.5b$
处理3	$0.86 \pm 0.22b$	$0.73 \pm 0.20ab$	$0.13 \pm 0.01b$	$84.1 \pm 1.9a$	$15.9 \pm 1.9c$

注:同一列中不同字母代表有显著差异( $P < 0.05$ )。下同。

Note: The different letters within the same column indicate the significant difference ( $P < 0.05$ ). The same below.

表4 苗期水稻根系对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收动力学的参数  
Table 4 Kinetic parameters for  $\text{Na}_2\text{SeO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{SeO}_4$  uptake by roots of rice seedlings

试验处理 Treatment	最大吸收速率 $V_{\max}/\text{nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$	$P$	米氏常数 $K_m/$ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	$P$
$\text{Na}_2\text{SeO}_3$	31.4±7.89	0.016	22.8±9.33	0.071
$\text{Na}_2\text{SeO}_4$	2.41±0.17	0.002 0	1.15±0.35	0.032

根系对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收动力学参数存在差异:水稻对亚硒酸盐的吸收动力学中,最大吸收速率  $V_{\max}$  和米氏常数  $K_m$  分别为  $31.4 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $22.8 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ ;水稻对硒酸盐的吸收动力学中,最大吸收速率  $V_{\max}$  和米氏常数  $K_m$  分别为  $2.41 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$  和  $1.15 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。水稻根系对硒酸盐的亲合力远大于亚硒酸盐,但是水稻根系对亚硒酸盐的吸收速率大于对于硒酸盐的吸收速率。两者对比综合考虑,水稻根系对亚硒酸盐的吸收潜力更大。

### 3 讨论

硒酸盐和亚硒酸盐是可以被植物根系吸收的两种主要形态的硒。水稻根系对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收动力学试验结果显示,水稻根系对硒酸盐和亚硒酸盐的亲合力和吸收速率不同,对此可能的解释是与植物根系对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收过程有关。目前多数研究表明硒酸盐同硫酸盐一样,是在植物根部相同的吸收位置通过高亲和力的硫酸盐转运子被根系吸收<sup>[16-19]</sup>。与硒酸盐的吸收机制不同,研究表明在长期的水培试验中,亚硒酸盐的吸收受到磷酸盐的抑制<sup>[11-12]</sup>,Zhang 等<sup>[14]</sup>研究证实亚硒酸盐可以通过磷酸盐转运子被植物根系吸收。硒酸盐是通过高亲和力的硫酸盐转运子被植物吸收,硫酸盐转运子对硒酸盐的亲合力可能要高于磷酸盐转运子对亚硒酸盐的亲合力,但是磷酸盐转运子对亚硒酸盐的吸收速率可能要高于硫酸盐转运子对硒酸盐的吸收速率,使水稻根系对亚硒酸盐的吸收潜力要大。此外,分根装置左右侧都供给亚硒酸盐时水稻苗期根系所吸收的硒主要是在根系累积,而左右侧都供给硒酸盐时根系所吸收的硒主要迁移到地上部并累积。植物吸收的硒从根向地上部的转移与运输取决于硒的形态,硒酸盐和亚硒酸盐在植物体内的移动性不相同。植物吸收的硒酸盐很容易从根转移到地上部,然而亚硒酸盐或是其代谢产物主要累积在根部,很难向地上部转移<sup>[22-23]</sup>。

分根装置左右侧分别供给不同价态硒时,亚硒酸盐的供给促进了水稻幼苗对硒酸盐的吸收以及其向

地上部迁移(图 2a,图 3),水稻幼苗地上部硒含量分别为亚硒酸盐和硒酸盐单独供给时的 4.50 和 1.02 倍,硒的转移系数为 0.10,是亚硒酸盐单独供给时的 10 倍左右(图 2b,表 3);而硒酸盐的供给抑制了水稻根系对亚硒酸盐的吸收,但抑制效果不显著(图 2a,图 2c)。硒酸盐和亚硒酸盐是通过根表不同的转运子被植物吸收<sup>[14,19]</sup>,植物吸收的硒然后经过硫的代谢途径在植物体进行代谢。Li 等<sup>[13,15]</sup>的试验结果发现,营养液中硒酸盐和亚硒酸盐共存对植物吸收硒的影响不大。因此,在分根装置中亚硒酸盐和硒酸盐共存时可以排除阴离子间竞争作用对水稻吸收硒的影响,但其具体的影响机制有待进一步的试验。加硒处理 24 h 后,在亚硒酸盐和硒酸盐单独供给,以及硒酸盐和亚硒酸盐共存时,水稻幼苗根系硒吸收总量分别为  $2.33$ 、 $0.13$ 、 $1.90 \mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ ,水稻地上部硒吸收量分别为  $0.25$ 、 $0.73$ 、 $1.39 \mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$ (表 2)。另外,在亚硒酸盐和硒酸盐共存时水稻根系的吸收速率为亚硒酸盐和硒酸盐单独供给时两者之和的 58%(表 2)。这说明水稻主要吸收亚硒酸盐,对亚硒酸盐的吸收潜力要大于硒酸盐,与亚硒酸盐和硒酸盐的吸收动力学研究得出的结果一致。

### 4 结论

(1)分根试验和吸收动力学试验结果表明水稻幼苗根系对亚硒酸盐的吸收潜力要大于硒酸盐。

(2)在环境中硒酸盐和亚硒酸盐共存时,亚硒酸盐的存在促进了水稻根系对硒酸盐的吸收,硒酸盐则抑制了水稻根系对亚硒酸盐的吸收,但抑制效果不显著。

#### 参考文献:

- [1] Brown K M, Arthur J R. Selenium, selenoproteins and human health: A review[J]. *Public health nutrition*, 2001, 4(26):593-599.
- [2] Rayman M P. The argument for increasing selenium intake[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2002, 61(2):203-215.
- [3] Rayman M P. The importance of selenium to human health[J]. *The Lancet*, 2000, 356(9225):233-241.
- [4] Fairweather-Tait S J, Bao Y, Broadley M R, et al. Selenium in human health and disease[J]. *Antioxidants & Redox Signaling*, 2011, 14(7):1337-1383.
- [5] Combs G F. Selenium in global food systems[J]. *British Journal of Nutrition*, 2001, 85(5):517-547.
- [6] 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992:102-106.
- LIAO Zi-ji. Environmental chemistry and biological effect of trace ele-

- ments[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1992: 102-106.
- [7] 程伯容. 环境中若干元素的自然背景值及研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1983, 159-164.  
CHENG Bo-rong. The natural background value and research methods of elements in environment[M]. Beijing: Science Press, 1983, 159-164.
- [8] Lyons G, Stangoulis J, Graham R. High-selenium wheat: Biofortification for better health[J]. *Nutrition Research Reviews*, 2003, 16(1): 45-60.
- [9] Broadley M R, White P J, Bryson R J, et al. Biofortification of UK food crops with selenium[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2006, 65(2): 169-181.
- [10] Leggett J E, Epstein E. Kinetics of sulfate absorption by barley roots[J]. *Plant Physiology*, 1956, 31(3): 222.
- [11] Broyer T C, Johnson C M, Huston R P. Selenium and nutrition of Astragalus[J]. *Plant and Soil*, 1972, 36(1-3): 651-669.
- [12] Hopper J L, Parker D R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J]. *Plant and Soil*, 1999, 210(2): 199-207.
- [13] Li H F, McGrath S P, Zhao F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92-102.
- [14] Zhang L, Hu B, Li W, et al. OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice[J]. *New Phytologist*, 2013, 201(4): 1183-1191.
- [15] Longchamp M, Angeli N, Castrec-Rouelle M. Selenium uptake in Zea mays supplied with selenate or selenite under hydroponic conditions[J]. *Plant and Soil*, 2013, 362(1-2): 107-117.
- [16] Parker D R, Page A L, Bell P F. Contrasting selenate-sulfate interactions in selenium-accumulating and nonaccumulating plant species[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(6): 1818-1824.
- [17] Terry N, Zayed A M, De Souza M P, et al. Selenium in higher plants[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2000, 51(1): 401-432.
- [18] White P J, Bowen H C, Parmaguru P, et al. Interactions between selenium and sulphur nutrition in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(404): 1927-1937.
- [19] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants[J]. *Photosynthesis Research*, 2005, 86(3): 373-389.
- [20] Asher C J, Butler G W, Peterson P J. Selenium transport in root systems of tomato[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1977, 28(2): 279-291.
- [21] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, 44(6): 1083-1087.
- [22] De Souza M P, Pilon-Smits E A H, Lytle C M, et al. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian mustard[J]. *Plant Physiology*, 1998, 117(4): 1487-1494.
- [23] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants[J]. *Planta*, 1998, 206(2): 284-292.

## 欢迎订阅 2015 年《农业环境科学学报》

《农业环境科学学报》(原《农业环境保护》)是由农业部主管、农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会主办的全国性学术期刊。是中国科学引文数据库核心期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊,列于被引频次最高的中国科技期刊 100 名之内并入编《中国学术期刊(光盘版)》。本刊还被国外多家著名检索机构收录,如美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ),美国《剑桥科学文摘社网站:水系统、水科学与渔业文摘、环境工程、水资源文摘及环境科学与污染管理》等 7 种国际检索系统列为来源期刊。本刊主要刊登农业生态环境科学领域具有创新性的研究成果,包括新理论、新技术和新方法。读者对象为从事农业科学、环境科学、林业科学、生态学、医学和资源保护等领域的科技人员和院校师生。

《农业环境科学学报》为月刊,每月 20 日出版,大 16 开,208 页,每本定价 75.00 元,全年定价 900.00 元。国内外公开发行,全国各地邮局征订,邮发代号 6-64。如读者在当地邮局漏订,可通过邮局汇款至本刊编辑部补订。

编辑部地址:天津市南开区复康路 31 号

邮编:300191

电话:(022)23674336 传真:(022)23674336

电子信箱: caep@vip.163.com nyhjkxxb@vip.163.com

网址: <http://www.aes.org.cn>