

苗期小麦和水稻对硒酸盐/亚硒酸盐的吸收及转运机制

陈思杨, 江荣风, 李花粉*

(中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:采用营养液培养方法研究了苗期小麦和水稻对硒酸盐(Na_2SeO_4)和亚硒酸盐(Na_2SeO_3)的吸收及转运机制. 营养液中供给 Na_2SeO_4 时,正常培养的水稻地上部和根中硒的含量分别 $30.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $39.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,水稻吸收的硒有 80% 从根转移到了地上部;小麦地上部和根中硒的含量分别为 $1.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $6.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,62% 从根转移到了地上部. 而供给 Na_2SeO_3 时,正常培养的水稻地上部和根中硒的含量分别为 $4.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $230 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;小麦地上部和根中硒的含量分别为 $1.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $88.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,仅有 8.2% 从根转移到了地上部. 缺磷培养对水稻和小麦吸收硒的影响存在差异,与正常培养相比,缺磷培养水稻的地上部、地下部硒含量降低,而小麦的地上部、地下部硒含量增加. 小麦根系吸收 SeO_3^{2-} 的米氏常数(K_m)是水稻的 8.7 倍,其最大吸收速率($V_{\max}$)比水稻低 14%,小麦和水稻对亚硒酸盐的吸收差异主要是根系对 SeO_3^{2-} 的亲合力. 本研究揭示了水稻和小麦对硒酸盐和亚硒酸盐的吸收和转运机制,为作物强化富硒提供了理论依据. 作物吸收的硒酸盐向地上部的转移速率很快,而亚硒酸盐主要累积在根中.

关键词: 硒酸盐;亚硒酸盐;植物;吸收;转运

中图分类号: X173 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)01-0284-06

Uptake and Translocation of Selenate or Selenite by Wheat and Rice Seedlings

CHEN Si-yang, JIANG Rong-feng, LI Hua-fen

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

Abstract: Solution culture experiments were carried out to study the uptake and translocation of selenate (Na_2SeO_4) or selenite (Na_2SeO_3) by wheat and rice seedlings. When supplied with Na_2SeO_4 in nutrient solution, the concentrations of selenium (Se) in normal shoots and roots of rice were $30.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $39.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, and the absorbed Se was quickly translocated to shoots accounting for 80% of the total uptake. Se concentrations in wheat shoots and roots were $1.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $6.99 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, accounting for 62% in shoots. However, when supplied with Na_2SeO_3 , Se concentrations in shoots and roots of rice were $4.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $230 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectively, $1.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $88.3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in shoots and roots of wheat respectively, and only 8.2% was transferred to shoots. The influence of phosphorus (P) starvation on Se uptake was different for rice and wheat seedlings. Comparing to normal plants, the Se concentrations in the shoots and roots of rice under P starvation condition were decreased, however increased for wheat. In Na_2SeO_3 uptake kinetics, K_m of wheat seedlings was 8.7 folds of that of rice, and the affinity of wheat root to selenite was much weaker than that of rice. The Se uptake rate of wheat ($V_{\max}$) was 14% lower than that of rice. The uptake and translocation mechanisms of selenate and selenite by rice and wheat seedlings were revealed. And the results demonstrate that the absorbed selenate is quickly translocated to shoot and selenite is mainly accumulated in root. These results provide basic information for biofortification of crops with Se.

Key words: selenate; selenite; plants; uptake; transport

食用富硒作物或富硒酵母可以达到抗癌的功效,并且人类对植物来源硒的利用率大于动物性硒^[1]. 缺硒多在以谷类为主食的居民中发生,人群从谷物中获得的硒占饮食摄取总硒的 70%^[2]. 利用生物强化生产富硒农产品是增加人类饮食中硒摄入量的重要途径^[3]. 然而不同植物对不同形态硒的吸收及富集机制不同^[4-6],植物对亚硒酸盐的吸收速率与硒酸盐的吸收速率相似^[7],甚至有时候吸收速率更快^[8]. 但是植物吸收的硒酸盐很容易从根部转移到地上部,而亚硒酸盐及其代谢产物主要累积在根部^[4,7,9]. 硒与硫由于其相似的物理化学性质,它们之间存在拮抗作用,且对于硒和硫在土壤-

植物中相互作用的研究集中于 SO_4^{2-} 和 SeO_4^{2-} ^[10,11],而亚硒酸盐的吸收受 SO_4^{2-} 的抑制很小^[6], PO_4^{3-} 对亚硒酸盐吸收的抑制作用可能更大^[12-14]. 在根系吸收动力学参数中, $V_{\max}$ 和 K_m 这 2 个参数可用来鉴别作物种类或品种间矿物质营养吸收的差异^[15].

水稻是我国的主要粮食作物,然而在 523 个水稻样品检测中,95% 的水稻中硒含量低于 200

收稿日期: 2010-01-26; 修订日期: 2010-03-30

基金项目: 公益性行业科研专项(2008030030); 国家科技支撑计划项目(2008BADA4B01); 国家自然科学基金项目(41073094)

作者简介: 陈思杨(1984~),女,硕士,主要研究方向为环境污染生态, E-mail: siyang0607@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lihuafen@cau.edu.cn

$\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[16]. 有研究表明浮游水生植物和旱地作物对亚硒酸盐和硒酸盐的吸收转运规律不同^[6,17-19]. 因此,本研究选取我国主要的 2 种农作物小麦和水稻作为对象,分析其对不同形态硒的吸收及转运机制,以期为生物强化生产富硒农产品提供理论基础.

1 材料与方法

1.1 植物培养

小麦(*Triticum aestivum* L. 品种为京东 8 号)和水稻(*Oryza sativa* L. 品种为越富),其中水稻为北方品种,种子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,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 mmol/L CaCl_2 溶液中漂浮的网格上,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 pH 6.0 的营养液中培养. 小麦采用 1/5 Hoagland 溶液,营养液组成为($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$): KNO_3 1.0、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 1.0、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.457、 KH_2PO_4 0.1、 $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 H_3BO_3 3×10^{-3} 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2×10^{-4} 、Fe(III)-EDDHA [ethylenediamine-di(*o*-hydroxyphenylacetic acid)] 6×10^{-2} 、MES (2-morpholinoethanesulphonic acid, KOH 调节 pH 值为 6.0) 2.0. 水稻采用 1/2 Kimura 溶液,营养液组成为: KNO_3 0.091、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 0.183、 $\text{MgSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.274、 KH_2PO_4 0.1、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 0.183、 $\text{MnSO}_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 H_3BO_3 3×10^{-3} 、 $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 $\text{ZnSO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1×10^{-3} 、 $\text{CuSO}_4\cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 2×10^{-4} 、Fe(III)-EDDHA 6×10^{-2} ,用 MES 缓冲溶液保持营养液 pH 值在 6.0 左右. 植物生长在 25℃/14 h 光照和 20℃/10 h 黑暗条件下、相对湿度为 60%~70%、光照强度为 240 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 的人工生长室中,小麦 24 h 连续通气.

1.2 试验处理

1.2.1 正常、缺硫和缺磷培养

小麦和水稻分别在营养液中生长 3 周后,转入正常、缺硫(将硫酸盐更换为对应的氯化物)、缺磷(将磷酸盐更换为对应的氯化物)营养液中,设置 3 个重复,每隔 3 d 更换一次营养液. 1 周后,在营养液中分别添加 10 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Na_2SeO_4 或 Na_2SeO_3 , 24 h 后收获,并将植株地上部与根部分离. 植株生

长在容积为 1.5 L 的聚乙烯塑料盆中,每盆移入 2 株植株.

1.2.2 水稻和小麦根系对亚硒酸盐的吸收动力学

小麦和水稻分别在正常营养液中生长 3 周,然后将植株转移入 300 mL 烧杯,每个烧杯中放置 2 株植株,设置 3 个重复. 吸收液为 7 个浓度水平的 Na_2SeO_3 基础营养液($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$): 0、0.1、0.5、1.0、5.0、10、20,溶液 pH 均为 6.0,60 min 后收获植株地下部.

1.3 样品的分析测定

分取植株的地上部和地下部,用去离子水洗净,吸水纸吸干. 在 105℃ 烘箱中杀青 30 min,然后在 65℃ 烘干 48 h,称量干重,经烘干的植株密封待用. 植物样全量消解,采用 HNO_3 - HClO_4 消解法,消解过程中温度控制在 160℃ 以内,用 2.5 mL 6 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ HCl 还原,冷却定容. 用北京吉天仪器有限公司的 AFS-920 型双道原子荧光光度计测定样品中硒含量. 整个测定过程中采用西红柿叶子(GBZ51001-94 ESP-1)和空白样品加标回收进行分析质量控制.

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). 吸收动力学数据使用 SigmaPlot 软件拟合米氏方程[Michaelis-Menten equation: $V = V_{\max} \cdot c / (K_m + c)$]曲线,式中 V 表示根系吸收离子的速率,单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; K_m 表示根系对所吸收离子的亲和力, K_m 愈小,表示亲和力愈大,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $V_{\max}$ 表示吸收所能达到的最大速率, $V_{\max}$ 愈大,表示吸收的内在潜力愈大,单位为 $\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$; c 表示溶液的离子浓度,单位为 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$.

2 结果与分析

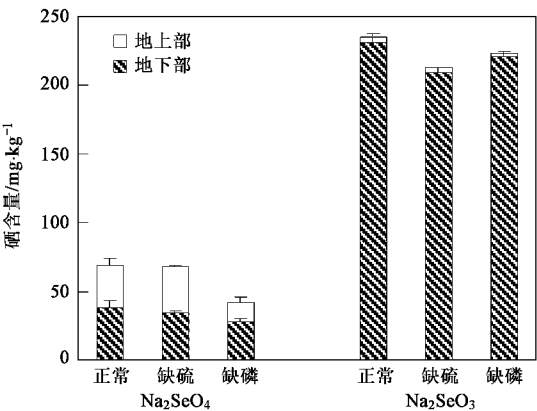
2.1 阴离子对硒酸盐/亚硒酸盐吸收的影响

2.1.1 小麦和水稻幼苗对硒的吸收累积

缺硫和缺磷培养对水稻和小麦的生物量影响不显著,但是缺磷培养水稻生物量略有降低,水稻生长对磷素更敏感.

供给 Na_2SeO_4 的水稻地上部硒含量显著高于供给 Na_2SeO_3 的,地下部情况相反,并且地下部硒含量均高于地上部(图 1). 供给同形态硒时,缺硫、缺磷处理与正常营养液培养相比,供给 Na_2SeO_4 的水稻地下部硒含量无显著差异,地上部硒含量差异显著,缺硫和正常水稻硒含量是缺磷水稻 2.5 倍和 2.3 倍,缺磷处理影响了水稻吸收的硒酸盐向地上部的

转运;供给 Na_2SeO_3 ,水稻地下部硒含量明显高于地上部,正常培养、缺硫和缺磷各处理地下部硒含量分别比地上部高 226、205、218 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,但在不同处理间没有显著差异. 供给不同形态硒,小麦地下部硒含量差异显著,地下部硒含量均高于地上部硒含量,供给 Na_2SeO_3 ,正常培养、缺硫和缺磷各处理地下部硒含量分别比地上部高 87.0、83.5、138 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2). 供给同形态硒,缺硫、缺磷处理与正常营养液培养相比,供给 Na_2SeO_4 的小麦地上部或地下部硒含量差异均不显著;供给 Na_2SeO_3 ,地上部硒含量差异显著,缺磷小麦地上部硒含量分别为正常和缺硫小麦的 2.1 和 2.4 倍.

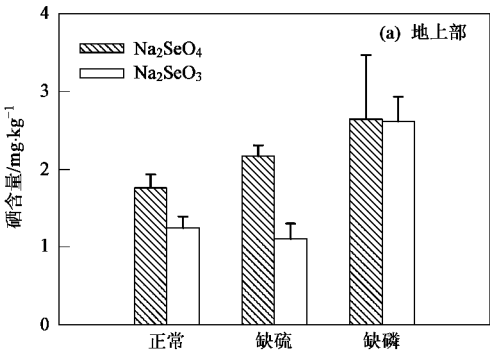


图中数据表示均值 + 标准误差,地上部、地下部: $p < 0.001$,下同

图 1 硫酸根和磷酸根对水稻吸收硒酸盐或亚硒酸盐的影响

Fig.1 Effects of sulphate and phosphate on the Se concentration of rice seedlings supplied with selenate or selenite

水稻地上部和地下部的硒吸收总量在供给 Na_2SeO_4 和 Na_2SeO_3 之间存在显著差异(表 1),相同处理,供给 Na_2SeO_4 的水稻地上部硒累积量是供给 Na_2SeO_3 的 5.0 ~ 7.8 倍,而地下部硒累积量,后



者约为前者的 6.0 倍. 无论是 Na_2SeO_4 还是 Na_2SeO_3 ,水稻吸硒总量、地上部硒累积量和地下部硒累积量均表现为:正常 > 缺硫 > 缺磷. 供给 Na_2SeO_3 ,缺磷水稻的吸硒总量比正常培养水稻减少 37%,地下部硒累积量在 3 个处理之间差异显著,与正常水稻相比,缺硫和缺磷水稻地下部硒累积量分别减少 15% 和 34%. 小麦地下部的硒累积量在供给 Na_2SeO_4 和 Na_2SeO_3 之间差异显著(表 2),相同处理下供给 Na_2SeO_3 的地下部硒累积量是供给 Na_2SeO_4 的 9.2 ~ 14 倍,地上部硒累积量也存在差异;吸硒总量在供给 Na_2SeO_4 和 Na_2SeO_3 间差异显著,同一处理后后者约为前者的 4.0 ~ 5.8 倍. 供给同形态硒的不同处理,无论是 Na_2SeO_4 还是 Na_2SeO_3 ,小麦的吸硒总量、地上部硒累积量和地下部硒累积量均表现为:缺磷 > 缺硫 > 正常.

表 1 硫酸根或磷酸根对苗期水稻硒累积量(硒酸盐或亚硒酸盐)的影响¹⁾/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

Table 1 Effects of sulphate or phosphate on the Se amount of rice seedlings supplied with selenate or selenite/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

试验处理		硒累积量		
		总量	地上部	地下部
Na ₂ SeO ₄	正常	14.1 ± 2.1 ab	11.5 ± 1.8 a	2.6 ± 0.5 d
	缺硫	12.5 ± 2.7 b	10.2 ± 2.5 a	2.3 ± 0.2 d
	缺磷	5.20 ± 1.2 c	3.50 ± 1.2 b	1.7 ± 0.2 d
Na ₂ SeO ₃	正常	17.9 ± 0.7 a	1.8 ± 0.9 b	16.1 ± 0.4 a
	缺硫	15.0 ± 0.5 ab	1.3 ± 0.3 b	13.7 ± 0.3 b
	缺磷	11.3 ± 1.2 b	0.7 ± 0.2 b	10.6 ± 1.1 c

1)地上部硒累积量 = 地上部硒含量 × 地上部干重,地下部相同;表中数据为均值 ± 标准误差,同一列中相同字母代表没有显著差异,下同

2.1.2 硒在小麦和水稻中的分布

供给水稻 Na_2SeO_3 或 Na_2SeO_4 ,缺硫、缺磷对地上部硒所占百分比的影响不显著(图 3),供给 Na_2SeO_4 时,缺硫水稻中硒向地上部的转移率高于正常水稻 2.7%,缺磷水稻则降低 7.1%. 水稻吸收

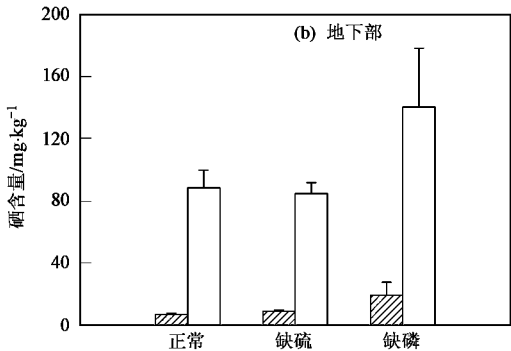


图 2 硫酸根和磷酸根对小麦地上部和地下部硒酸盐或亚硒酸盐含量的影响

Fig.2 Effects of sulphate and phosphate on the Se concentration of wheat seedlings supplied with selenate or selenite

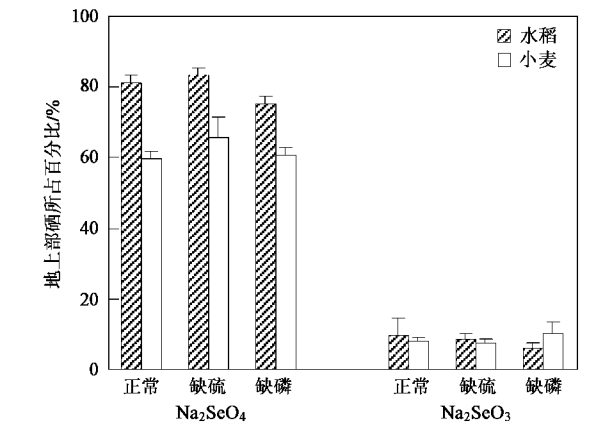
的 Na_2SeO_4 和 Na_2SeO_3 在植株地上部和地下部的分配差异显著,仅在水稻吸收硒的 24 h 中,吸收 Na_2SeO_4 的 80% 从植株地下部迁移到地上部,而吸收 Na_2SeO_3 的只有约 7.9% 迁移到植株地上部.

表 2 硫酸根或磷酸根对苗期小麦硒累积量(硒酸盐或亚硒酸盐)的影响/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

Table 2 Effect of sulphate or phosphate on the Se amount of wheat seedlings supplied with selenate or selenite/ $\mu\text{g}\cdot\text{pot}^{-1}$

试验处理	硒累积量		
	总量	地上部	地下部
Na_2SeO_4	正常	2.08 ± 0.01 d	1.25 ± 0.05 bc
	缺硫	3.57 ± 0.09 d	2.13 ± 0.09 ab
	缺磷	4.43 ± 0.71 d	2.71 ± 0.52 a
Na_2SeO_3	正常	10.37 ± 1.64 c	0.83 ± 0.11 c
	缺硫	14.37 ± 0.22 b	1.13 ± 0.20 bc
	缺磷	25.68 ± 0.47 a	2.36 ± 0.62 ab

供给小麦 Na_2SeO_3 或 Na_2SeO_4 , 缺硫、缺磷对地上部硒所占百分比的影响没有显著差异(图 3). 与正常培养小麦相比,缺磷小麦向地上部迁移硒的比例均增大;缺硫小麦吸收 Na_2SeO_3 向地上部迁移的比例略低于正常小麦,吸收 Na_2SeO_4 的迁移比例高于正常小麦 9.3%. 同样小麦吸收的 Na_2SeO_4 和 Na_2SeO_3 在植株地上部和地下部的分配差异显著,仅在小麦吸收硒的 24 h 中,吸收 Na_2SeO_4 的 62% 从植株地下部转移到地上部,而吸收 Na_2SeO_3 的只有 8.5% 转移到植株地上部.



地上部硒所占百分数 = 地上部硒累积量/总量

图 3 硫酸盐和磷酸盐对水稻/小麦吸收的硒酸盐和亚硒酸盐向地上部转移的影响

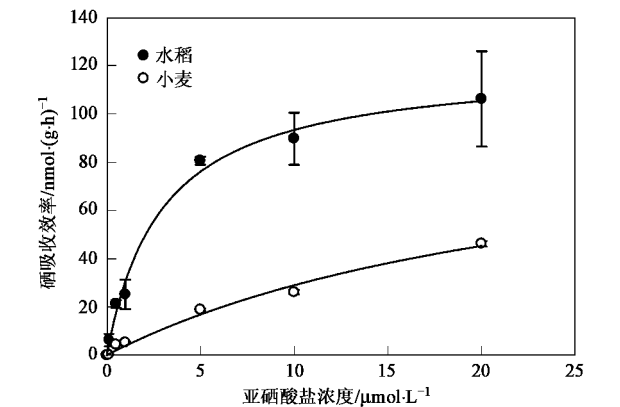
Fig. 3 Effects of sulphur (S) and phosphorus (P) starvation on the proportion of Se (selenate or selenite) distributed to shoots of rice or wheat

比较 2 种植物地上部硒所占百分比,供给 Na_2SeO_4 时,水稻与小麦之间差异显著,前者高出后

者 24% ~ 36%,而供给 Na_2SeO_3 时二者几乎没有差异. 这说明水稻对硒酸盐的迁移能力比小麦强,二者对亚硒酸盐的迁移能力相似.

2.2 水稻和小麦根系对亚硒酸盐的吸收动力学

水稻和小麦对亚硒酸盐的吸收速率均随溶液中亚硒酸盐浓度的增加而增大,吸收曲线符合 Michaelis-Menten 方程(图 4),吸收动力学参数达到显著水平(表 3). 供给等浓度亚硒酸盐,水稻对硒的吸收速率明显高于小麦. 供给亚硒酸盐浓度达到最大的 $20\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,水稻对硒的吸收曲线趋于平缓,小麦对硒的吸收曲线仍有增长的趋势.



图中曲线表示与米氏动力学的拟合程度

图 4 苗期水稻和小麦根系对亚硒酸盐的吸收动力学差异

Fig. 4 Kinetics of selenite influx to roots of rice and wheat seedlings within 1 hour

水稻和小麦根系对 Na_2SeO_3 的吸收动力学参数差异,主要表现在米氏常数 K_m 的变化(表 3),小麦的 K_m 是水稻的 8.7 倍,水稻根系对亚硒酸盐的亲和力远大于小麦. 植株根系吸收亚硒酸盐所能达到的最大速率 $V_{\max}$ 也存在一定差异,水稻吸收亚硒酸盐时所能达到的最大吸收速率 $V_{\max}$ 比小麦高 17%,因此,水稻根系对亚硒酸盐的吸收潜力更大.

表 3 苗期水稻和小麦根系对 SeO_3^{2-} 吸收动力学的参数差异

Table 3 Differences of kinetics parameters of SeO_3^{2-} uptake by roots of rice and wheat at the seedling stage

项目	吸收动力学参数			
	最大吸收速率 $V_{\max}$ $/\text{nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$	P	米氏常数 K_m $/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	P
水稻	121 ± 5.72	$<0.000\ 1$	2.94 ± 0.5	$0.001\ 8$
小麦	104 ± 24.4	$0.008\ 1$	25.7 ± 9.5	$0.042\ 4$

3 讨论

已有的研究表明硒酸盐的吸收是通过硫酸盐转运子进行的^[10,11],缺硫处理下,植物根系可上调硫

酸盐转运子的基因表达^[20,21],当将植物置于硒酸盐环境中,就能吸收更多的硒. 供给硒酸盐,缺硫处理小麦地上部和地下部硒含量均增加(图2),与 Zayed 等^[22]和 Li 等^[23]的结果类似. 缺硫处理水稻对硒酸盐的累积量减少(表1),也许是因为此品种水稻对硒酸盐的吸收不是通过硫酸盐转运子进行的.

一般认为磷酸根对硒酸盐的吸收抑制并不显著,因为它们不是化学相似元素. Khattak 等^[24]的土培试验表明,当磷酸盐浓度从 32 mmol/L 增大到 129 mmol/L,紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)地上部硒含量减少 25%,但这个浓度远远高于土壤溶液的磷浓度,所以磷酸盐对硒酸盐的抑制作用可能是相对有限的. 因此,缺磷培养水稻吸收的硒酸盐在地上部的累积没有增加,而是显著降低(图1、表1).

与硒酸盐不同,水稻对亚硒酸盐的吸收几乎不受硫酸盐的影响^[25],与正常培养水稻相比,缺硫水稻对亚硒酸盐的累积量没有增加(表1). 而有研究表明当磷酸盐浓度增大,亚硒酸盐的吸收降低 30%~50%^[7],Muchhal 等^[26]在对磷酸盐转运子的研究中指出通过缺磷处理,可以上调磷酸盐转运子的基因表达,这表明亚硒酸盐有可能是通过吸收磷酸盐的通道而被植物吸收的. Li 等^[23]的研究指出,缺磷条件下的小麦对亚硒酸盐的吸收增加,本试验中,缺磷小麦地上部和地下部硒含量也增加(图2). 但缺磷处理水稻对亚硒酸盐的吸收降低(图1),说明离子间的相互作用对不同植物种类也会表现出相异规律. 研究发现白羽扇豆缺磷时,可诱导形成大量的簇生根^[27],释放柠檬酸和苹果酸等有机酸,缓解或消除磷缺乏^[28]. 本研究中缺磷处理没有促进水稻对硒的吸收也可能是由于此品种水稻在缺磷条件下并没有作用于上调磷酸盐转运子的基因表达,而是缺磷环境诱导增加了根际分泌物(有机酸),这些有机酸可以分泌酸性磷酸酶水解有机磷,从而缓解了缺磷状况.

植物吸收的 Na_2SeO_4 大部分向地上部迁移, Na_2SeO_3 主要累积在地下部(图3),大部分研究都得出了类似的结论^[4,7,9,23],主要是由于吸收的亚硒酸盐在根部参与新陈代谢,与其代谢产物如有机硒化物累积在根部,只有极少向地上部迁移^[22].

供给 Na_2SeO_3 ,水稻根部硒含量显著高于小麦根部硒含量,说明水稻对亚硒酸盐的吸收能力比小麦强(图1、2),这与亚硒酸盐的吸收动力学研究得出的结果一致(图4). Zhang 等^[25]在不同水稻品种亚硒酸盐吸收动力学的研究中发现,秀水 48 是所有

供试水稻品种中吸收能力最强的,较高的根系吸收动力是水稻吸收亚硒酸盐能力强的一个直接原因,水稻对亚硒酸盐的吸收也存在基因型差异^[29].

4 结论

(1)水稻和小麦的硒含量差异显著,水稻各部分硒含量明显高于小麦. 环境中阴离子对植物吸收硒有一定影响,且对不同类型作物吸收硒的影响不同,缺磷对小麦吸收硒有促进作用,对水稻吸收硒有抑制作用.

(2)硒在植株体内转移及在各部分的分布主要取决于环境中硒的形态,水稻和小麦吸收的硒酸盐很快向地上部迁移,吸收的亚硒酸盐大部分累积在根部. 水稻吸收的硒向地上部的迁移能力大于小麦.

(3)水稻对亚硒酸盐的吸收能力比小麦强,水稻和小麦对亚硒酸盐的吸收能力差异主要体现在植物根系对离子的亲和力上,水稻根系对亚硒酸盐的亲和力远远大于小麦根系,对亚硒酸盐的吸收潜力也强于小麦.

参考文献:

- [1] 余光辉,温瑛茂,何树悠,等. 广州市食物硒含量及居民硒摄入量[J]. 应用生态学报,2007,18(11):2600-2604.
- [2] 贾陆. 微量元素与健康[M]. 郑州:河南医科大学出版社,1999. 28-29.
- [3] Varo P, Alfthan G, Ekholm P, et al. Selenium intake and serum selenium in Finland: effects of soil fertilization with selenium[J]. American Journal Clinical Nutrition, 1988, 48:324-329.
- [4] Arvy M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants, *Phaseolus vulgaris* [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44:1083-1087.
- [5] Abrams M M, Shennan C, Zazoski J, et al. Selenomethionine uptake by wheat seedlings[J]. Agronomy Journal, 1990, 82:1127-1130.
- [6] Asher C J, Butler G W, Peterson P J. Selenium transport in root systems of tomato[J]. Journal of Experimental Botany, 1977, 23:279-291.
- [7] 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, 210:199-207.
- [8] Zhang Y L, Pan G X, Chen J, et al. Uptake and transport of selenite and selenate by soybean seedlings of two genotypes[J]. Plant and Soil, 2003, 253:437-443.
- [9] 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, 117:1487-1494.
- [10] 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.

[11] Sors T G, Ellis D R, Salt D E. Selenium uptake, translocation, assimilation and metabolic fate in plants [J]. Photosynthesis Research, 2005, **86**:373-389.

[12] 郑立,严小军,孙建,等. 日本真海带对硒的积累和生物转化[J]. 海洋学报,2005,**27**(5):119-124.

[13] Riedel G F, Sanders J G, Gilmour C C. Accumulation, transformation, and impact of selenium in freshwater phytoplankton and bacterioplankton communities [J]. Aquatic Microbial Ecology, 1996, **11**(1):43-51.

[14] Wang W X, Robert C H D. Effects of major nutrient additions on metal uptake in phytoplankton [J]. Environmental Pollution, 2001, **111**(2):233-240.

[15] 杨肖娥,孙羲. 不同水稻品种 NH_4^+ 和 NO_3^- 吸收的动力学[J]. 土壤通报,1991,**22**(5):222-224.

[16] 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.

[17] 喻达辉,刘少明. 钝顶螺旋藻对不同无机硒的吸收研究[J]. 海洋学报,2000,**22**(2):137-141.

[18] Flowers S W, Benayoum G. Influence of environmental factors on the selenium flux in two marine invertebrates [J]. Marine Biology, 1976, **37**(1):59-68.

[19] 黄峙,郑文杰,向军俭,等. 硫比值对钝顶螺旋藻有机化硒的影响及藻体中硒的形态、价态构成[J]. 海洋科学,2002,**26**(5):60-62.

[20] 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**(8):436-442.

[21] Buchner P, Stuiver C E E, Westerman S, *et al.* Regulation of sulfate uptake and expression of sulfate transporter genes in *Brassica oleracea* as affected by atmospheric H_2S and pedospheric sulfate nutrition [J]. Plant Physiology, 2004, **136**:3396-3408.

[22] Zayed A, Lytle C M, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants [J]. Planta, 1998, **206**:284-292.

[23] 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**:92-102.

[24] 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.

[25] Zhang L H, Shi W M, Wang X C. Difference in selenite absorption between high-and low-selenium rice cultivars and its mechanism[J]. Plant and Soil, 2006, **282**:183-193.

[26] Muchhal U S, Raghothama K G. Transcriptional regulation of plant phosphate transporters [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 1999, **96**:5868-5872.

[27] Johnson J F, Allan D L, Vance C P. Phosphorus stress-induced proteoid roots show altered metabolism in *Lupinus albus* [J]. Plant Physiology, 1994, **104**:657-665.

[28] Shu L Z, Shen J B, Rengel Z, *et al.* Formation of cluster roots and citrate exudation by *Lupinus albus* in response to localized application of different phosphorus sources [J]. Plant Science, 2007, **172**:1017-1024.

[29] 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.