

富硒和非富硒水稻品种苗期硒吸收和转运差异

张联合^{1,2}, 郁飞燕¹, 施卫明²

(1 河南科技大学, 河南洛阳 471003; 2 土壤与农业可持续发展重点实验室 (中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 利用水培试验研究了富 Se 和非富 Se 水稻品种苗期 Se 吸收和转运差异。结果表明: 不同供 Se 水平, 富 Se 水稻品种根系 Se 吸收速率和茎叶 Se 含量明显高于非富 Se 品种, 而两类品种间根部 Se 含量无明显差异。低 Se 水平下 (20 $\mu\text{g/L}$), 富 Se 品种茎叶/根 Se 总量比明显高于非富 Se 品种。可见 Se 吸收转运差异可能是引起两类水稻品种稻米 Se 含量差异的主要原因。

关键词: 富硒和非富硒品种; 根系硒吸收速率; 茎叶硒含量; 茎叶/根硒总量比; 差异
中图分类号: S1; S511

硒 (Se) 是人和动物必需的微量营养元素, 克山病、大骨节病和地方性疾病如肝癌、大肠癌、氟中毒、白痴病等的发病率与环境中 Se 水平低有关^[1-2]。在医学上 Se 被用于癌症预防^[3-5]。因此, 在 Se 缺乏地区, 适当提高居民摄 Se 量对增强人体免疫力和预防疾病等具有更重要作用。水稻是我国主要粮食作物, 通过提高稻米 Se 含量, 以饮食方式增加人体摄 Se 量是一种比较理想的补 Se 途径。在水稻 Se 蛋白中, Se 主要以 Se 代蛋氨酸和 Se 代半胱氨酸两种结合形态存在^[6], Se 在蛋白质组分中的分布为谷蛋白>球蛋白>清蛋白>醇溶蛋白^[7]。文献显示^[8], 在缺 Se 或低 Se 区稻米 Se 含量很低, 根据推荐的成人摄 Se 量^[9-13], 这类稻米中的 Se 难以满足人们的生理需要。目前, 人们主要借助叶面喷施亚硒酸盐的方式来提高稻米中 Se 含量, 并取得明显效果^[14-16]。但是, 该措施不仅增加了生产成本, 而且长期喷 Se 还可能存在潜在的环境风险问题。研究表明^[1], 在淹水还原条件下, 土壤中的有效 Se 主要以 4 价 Se 形式存在。本研究通过比较富 Se 和非富 Se 水稻品种苗期 4 价 Se 吸收和运转差异, 进一步探讨影响和控制稻米 Se 含量的关键因素, 为今后利用水稻自身遗传潜力提高土壤 Se 的利用效率提供重要的理论依据。

1 材料和方法

1.1 水培试验

根据稻米中 Se 含量^[17], 选定稻米含 Se 量高和典型水稻品种 (富 Se 和非富 Se 品种), 在人工光照生长室内水培。每天光照时间为 14 h, 光照强度为 300 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$, 白天温度 24 $^{\circ}\text{C}$, 夜晚 18 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度为

67%。籽粒萌发 3 天的幼苗用 1/2 的木村营养液^[18]预培养, 3 天后改用全量木村营养液。选取长势一致的 12 天龄的不同品种幼苗各 48 株, 分别转入含 20 $\mu\text{g/L}$ 和 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 营养液 (体积 18 L) 木村营养液中进行培养^[20]。3 次重复。营养液每 3 天换 1 次, 每天调节 pH 至 5.5。处理 6 天和 12 天后收获取样, 先在 105 $^{\circ}\text{C}$ 杀青 30 min, 然后在 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至恒重, 测定茎叶重和根干重。

1.2 消化分析^[19]

所有用到的玻璃器皿提前用 100 ml/L HCl 溶液浸泡清洗以减少 Se 污染。称取一定量上述处理过的植株根、茎叶样品于 100 ml 的消煮管中, 加入 5 ml 混合酸 ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4=4:1$), 所用酸都为优级纯试剂, 静置过夜后在 150 ~ 165 $^{\circ}\text{C}$ 条件下消化至淡黄色, 再加 2.5 ml 混合酸, 加热至完全消化, 冷却至 100 $^{\circ}\text{C}$, 加入 2.5 ml 6 mol/L HCl, 继续加热至冒白烟为止^[20], 冷却后定容至 25 ml, 用原子荧光光谱法测定^[21]。茶叶标样 (GBW07605 (GSV-4) (0.072 mg/kg Se) 和空白与样品同时消化, Se 回收率为 89% ~ 93%^[22]。

2 结果与讨论

2.1 不同基因型水稻品种苗期根系 Se 吸收速率差异

用植株单位时间累积 Se 总量/根干重代表苗期根系 Se 吸收速率。结果表明 (表 1), 20 $\mu\text{g/L}$ 和 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天时, 富 Se 水稻品种根系 Se 吸收速率分别是非富 Se 水稻品种的 1.23 倍和 1.33 倍, 当供 Se 时间延长到 12 天时, 富硒品种分别是非富硒品种的 1.34 倍和 1.27 倍。可见不同供 Se 水平和供 Se 时间下,

①基金项目: 河南科技大学校人才基金资助。

作者简介: 张联合 (1970—), 男, 河南扶沟人, 博士, 副教授, 主要从事植物营养生理研究。E-mail: zlianhe@eyou.com

富 Se 水稻品种根系平均 Se 吸收速率均高于非富 Se 水稻品种。

就个体品种而言, 富 Se 类型品种间的根系 Se 吸收速率也存在很大差异, 如玉田大白芒具有较高 Se 吸收速率, 而 Carharoli Se 吸收速率始终很低。在 20 $\mu\text{g/L}$ 供 Se 水平下, 玉田大白芒吸收速率分别是 Carharoli 的 4.17 倍(处理 6 天)和 5.18 倍(处理 12 天); 在 300 $\mu\text{g/L}$ 供 Se 水平下, 前者是后者的 1.58 倍和 1.67 倍。在非富 Se 品种中, 也有些品种 Se 累积速率较高, 如嘉 99103 和凤稻 9 号。说明富 Se 品种类

型虽然根系平均 Se 吸收速率较高, 但就个体而言, 并非富 Se 品种根系都具有较高的 Se 吸收速率。

此外, 表 1 结果还显示, 当供 Se 水平从 20 $\mu\text{g/L}$ 提高到 300 $\mu\text{g/L}$ 时, 富 Se 和非富 Se 两类水稻品种苗期根系 Se 吸收速率显著增加。处理 6 天时, 两类水稻品种根系 Se 累积速率分别提高到 6.31 ~ 16.08 倍和 7.02 ~ 11.80 倍; 供 Se 时间延长到 12 天时, 根系 Se 累积速率分别提高到 6.31 ~ 16.08 倍和 7.02 ~ 11.80 倍。由此可见, 苗期不同水稻品种根系具有极强的 Na_2SeO_3 吸收能力。

表 1 不同基因型水稻品种苗期根 Se 吸收速率差异比较 (mg/(kg 干重·天))

Table 1 Comparison in selenium uptake rate between different genotypes of rice at the seedling stage

水稻品种		20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3		300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3	
		处理 6 天	处理 12 天	处理 6 天	处理 12 天
富 Se	秀水 48	8.62 \pm 0.96	4.78 \pm 0.08	78.20 \pm 3.83	38.70 \pm 3.06
	大岛	5.62 \pm 0.01	5.67 \pm 0.05	56.89 \pm 0.06	23.04 \pm 0.29
	Carharoli	2.78 \pm 0.01	2.63 \pm 0.10	43.90 \pm 0.33	28.67 \pm 0.99
	宝农 2 号	5.41 \pm 0.50	7.78 \pm 0.98	57.03 \pm 0.59	37.90 \pm 1.97
	曲阳大稻	4.07 \pm 0.03	6.45 \pm 0.12	65.45 \pm 0.60	49.24 \pm 0.72
	玉田大白芒	11.64 \pm 1.85	13.63 \pm 0.60	73.47 \pm 3.10	45.54 \pm 2.37
	京引 119	4.38 \pm 0.08	2.72 \pm 0.02	56.28 \pm 1.95	31.50 \pm 1.36
	平均	6.07	6.24	61.60	36.37
非富 Se	丙 96-52	5.44 \pm 0.17	3.49 \pm 0.10	44.35 \pm 0.91	31.77 \pm 2.95
	嘉 99103	5.58 \pm 0.33	6.20 \pm 0.38	45.04 \pm 0.42	27.09 \pm 0.46
	锡稻 11	3.95 \pm 0.49	6.82 \pm 0.17	46.60 \pm 0.92	30.43 \pm 0.80
	丙 94-08	4.78 \pm 0.01	3.41 \pm 0.19	46.55 \pm 0.17	21.36 \pm 0.47
	凤稻 9 号	5.6 \pm 0.16	5.18 \pm 0.03	39.31 \pm 0.85	24.70 \pm 0.45
	浙湖 98-20	4.23 \pm 0.09	4.23 \pm 0.10	47.40 \pm 0.85	35.64 \pm 0.98
	S. Andrea	4.73 \pm 0.09	3.15 \pm 0.01	55.22 \pm 0.10	29.70 \pm 2.03
	平均	4.93	4.64	46.35	28.67

2.2 不同基因型水稻品种苗期茎/根 Se 总量比差异

研究结果显示(表 2), 20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天和 12 天, 富 Se 水稻品种茎叶/根 Se 总量比分别是非富 Se 水稻品种的 1.81 倍和 1.99 倍; 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天和 12 天, 富硒水稻品种茎叶/根 Se 总量比分别是非富硒水稻品种的 1.16 倍和 0.92 倍。说明在低 Se 水平下, 富 Se 水稻品种 Se 转运能力比非富 Se 品种具有明显的优势; 而在较高的供 Se 水平下, 两类水稻品种 Se 转运能力差异较小。就个体而言, 富 Se 水稻品种中的秀水 48 茎/根 Se 总量比最大, 非富 Se 水稻品种中的锡稻 11 最小。20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天或 12 天时, 秀水 48 分别是锡稻 11 的 3.93 倍和 3.28 倍; 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天或 12 天时, 前者分别是后者的 2.44 倍和 3.30 倍。此外, 供 Se 水平对两种

不同类型品种的茎/根 Se 总量比影响不同。富 Se 品种供 Se 6 天或 12 天, 20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理的平均茎/根 Se 总量比分别是 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理的平均茎/根 Se 总量比的 1.45 倍和 1.83 倍; 而非富 Se 品种 20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理的平均茎/根 Se 总量比略小于 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理的平均茎/根 Se 总量比。可见, 对于富 Se 品种而言, 在较低的供 Se 水平下, 根部向茎叶部具有较强的 Se 转运能力; 而对于非富 Se 品种而言, 在较低的供 Se 水平下, 根部 Se 向茎叶部的转运能力较差, 提高供 Se 水平, 反而有利于提高根部 Se 向茎叶部的转运。我国一些河流的 Se 含量在 0.04 ~ 5.00 $\mu\text{g/L}$ 之间, 可溶性 Se 含量在 0.01 ~ 0.80 $\mu\text{g/L}$ 之间^[23]。由于淹水土壤中有效 Se 浓度很低, 根系在长期的吸收过程中, 根际 Se 可能处于亏缺状态, 在这种情况下,

与非富 Se 水稻品种相比，富 Se 水稻品种根系吸收的 Se 可能更多地转运到茎叶部。

表 2 结果显示，多数情况下水稻品种苗期茎/根 Se 总量比 > 1。而 Adel Zayed^[24] 研究发现，供应 20 $\mu\text{mol/L}$ 的 Na_2SeO_3 时，茎/根 Se 总量比 < 0.5，这种差异原因在于本研究中 Na_2SeO_3 浓度较低，仅有 20 $\mu\text{g/L}$ 和 300 $\mu\text{g/L}$ 。从实验结果看，有许多水稻品种在 20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理时的茎/根 Se 总量比大于 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理的茎/根 Se 总量比，可见供 Se 水平低时，根部吸收的 Se 更易于向茎叶部位转运，原因很可

能与亚硒酸盐在根内的代谢有密切的关系。研究表明，水稻根系吸收 SeO_3^{2-} 后不是直接运转到地上部分，而是在根系内代谢成有机 Se^[25-27]，然后再向茎叶部位转运。与无机 Se 相比，有机 Se 更易于向茎叶部位转运^[22]，显然根部 Se 向茎叶部位的转运受根内代谢影响。外界供 Se 水平低时，根系吸收的 Se 总量有限，根系能很快把吸收到的亚硒酸盐转化成有机 Se 而转运到茎叶部位，但浓度较高时 (20 $\mu\text{mol/L}$)^[24]，根系内的无机 Se 转化为有机 Se 需要一个过程，因此向茎叶部转运相对较慢，从而导致茎/根 Se 总量比下降。

表 2 不同基因型水稻品种苗期茎/根 Se 总量比差异比较

Table 2 Comparison in total Se in shoots/roots between different genotypes of rice at the seedlings stage

水稻品种		20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3		300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3	
		处理 6 天	处理 12 天	处理 6 天	处理 12 天
富 Se	秀水 48	3.18 \pm 0.18	3.61 \pm 0.41	1.61 \pm 0.05	2.21 \pm 0.04
	大岛	1.61 \pm 0.01	1.00 \pm 0.07	0.87 \pm 0.06	0.65 \pm 0.06
	Carharoli	1.14 \pm 0.09	1.23 \pm 0.04	1.52 \pm 0.08	0.85 \pm 0.01
	宝农 2 号	1.75 \pm 0.28	1.23 \pm 0.01	1.01 \pm 0.08	0.82 \pm 0.02
	玉田大白芒	1.39 \pm 0.03	2.99 \pm 0.08	1.31 \pm 0.06	1.11 \pm 0.04
	曲阳大稻	3.10 \pm 0.08	4.55 \pm 0.18	1.79 \pm 0.09	1.82 \pm 0.08
	京引 119	1.11 \pm 0.06	1.73 \pm 0.16	1.04 \pm 0.09	1.45 \pm 0.16
	平均	1.9	2.33	1.31	1.27
非富 Se	丙 96-52	1.08 \pm 0.21	1.24 \pm 0.04	1.07 \pm 0.02	0.79 \pm 0.03
	嘉 99103	1.29 \pm 0.05	0.71 \pm 0.01	0.89 \pm 0.11	1.20 \pm 0.14
	锡稻 11	0.81 \pm 0.01	1.10 \pm 0.09	0.66 \pm 0.09	0.67 \pm 0.03
	丙 94-08	1.21 \pm 0.09	1.20 \pm 0.04	0.88 \pm 0.01	2.25 \pm 0.14
	凤稻 9 号	1.08 \pm 0.21	1.51 \pm 0.29	0.49 \pm 0.02	2.91 \pm 0.05
	浙湖 98-20	1.19 \pm 0.10	0.80 \pm 0.08	3.18 \pm 0.35	0.76 \pm 0.01
	S. Andrea	0.70 \pm 0.03	1.66 \pm 0.12	0.74 \pm 0.02	1.10 \pm 0.14
	平均	1.05	1.17	1.13	1.38

2.3 不同基因型水稻品种苗期植株 Se 含量差异

表 3 显示，20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天和 12 天，富 Se 水稻品种茎叶 Se 含量分别是非富 Se 品种的 1.40 倍和 1.32 倍；300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天和 12 天，前者茎叶 Se 含量分别是后者的 1.20 倍和 1.17 倍。但是富 Se 品种与非富 Se 品种根部 Se 含量差异很小（表 4）。从表 3、表 4 还可以看出，富 Se 品种与非富 Se 品种随着 Na_2SeO_3 处理浓度增加和处理时间的延长，根、茎叶 Se 含量显著提高。20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理 6 天后，所有供试水稻品种幼苗茎、根 Se 含量平均为 3.35 和 13.44 mg/g 干重，当供 Se 浓度提高到 300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 时，幼苗茎、根 Se 浓度分别提高到 39.62 和 160.97 mg/g 干重。当供 Se 时间延长 6 天后，20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 供应

处理水稻幼苗茎、根 Se 含量分别提高到 5.86 和 23.41 mg/g 干重；300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 时，水稻幼苗茎、根 Se 含量分别提高到 52.99 和 201.10 mg/g 干重。可见，不同水稻品种，其根和茎叶都具有极强的 Se 累积能力。

3 结论

(1) 不同基因型水稻品种苗期根系 Se 吸收速率差异很大。不同的供 Se 水平，富 Se 品种根系 Se 吸收速率显著高于非富 Se 品种。就个体而言，富 Se 品种中存在根系吸收速率低，而非富 Se 品种中存在 Se 吸收速率高的情况。

(2) 低 Se 水平下，富 Se 水稻品种 Se 转运能力比非富 Se 品种具有明显的优势。20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3 处理

表 3 不同浓度 Se 处理水稻幼苗茎叶 Se 含量 (mg/g 干重)

Table 3 Selenium concentrations in shoots of rice seedlings different in Se treatment rate

水稻品种		20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3		300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3	
		处理 6 天	处理 12 天	处理 6 天	处理 12 天
富 Se	秀水 48	6.32 \pm 0.55	7.16 \pm 0.26	52.58 \pm 0.48	58.08 \pm 3.79
	大岛	3.19 \pm 0.10	6.26 \pm 0.48	34.69 \pm 1.45	26.77 \pm 2.55
	Carharoli	2.32 \pm 0.90	3.75 \pm 0.10	41.72 \pm 0.66	44.27 \pm 1.25
	宝农 2 号	3.66 \pm 0.14	8.24 \pm 0.10	41.48 \pm 0.04	52.65 \pm 4.15
	玉田大白芒	6.26 \pm 0.48	8.63 \pm 0.35	55.13 \pm 5.02	75.39 \pm 2.58
	曲阳大稻	4.98 \pm 0.77	8.18 \pm 0.25	53.51 \pm 3.00	71.42 \pm 1.38
	京引 119	2.69 \pm 0.12	4.15 \pm 0.53	42.2 \pm 2.92	59.77 \pm 1.67
	平均	4.2	6.62	45.9	55.48
非富 Se	丙 96-52	3.18 \pm 0.39	4.38 \pm 0.17	37.67 \pm 1.29	47.71 \pm 7.11
	嘉 99103	3.31 \pm 0.14	5.27 \pm 0.46	32.78 \pm 0.21	41.86 \pm 1.54
	锡稻 11	2.63 \pm 0.09	8.37 \pm 0.17	31.40 \pm 2.24	41.55 \pm 2.21
	丙 94-08	3.5 \pm 0.06	5.09 \pm 0.19	38.77 \pm 2.13	48.93 \pm 0.21
	凤稻 9 号	3.39 \pm 0.20	7.59 \pm 0.59	17.64 \pm 2.15	60.41 \pm 1.61
	浙湖 98-20	2.81 \pm 0.09	4.10 \pm 0.07	53.31 \pm 1.39	51.04 \pm 4.75
	S. Andrea	2.13 \pm 0.12	3.70 \pm 0.35	31.65 \pm 0.66	40.67 \pm 1.44
	平均	2.99	5.5	34.75	47.45

表 4 不同浓度 Se 处理水稻幼苗根 Se 含量 (mg/g 干重)

Table 4 Selenium concentrations in roots of rice seedlings different in Se treatment rate

水稻品种		20 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3		300 $\mu\text{g/L}$ Na_2SeO_3	
		处理 6 天	处理 12 天	处理 6 天	处理 12 天
富 Se	秀水 48	12.3 \pm 0.41	12.3 \pm 0.37	177.87 \pm 5.72	144.73 \pm 12.56
	大岛	13.3 \pm 2.26	33.93 \pm 4.38	179.41 \pm 8.91	165.8 \pm 6.86
	Carharoli	7.7 \pm 0.04	14 \pm 0.85	103.16 \pm 6.32	186.7 \pm 4.75
	宝农 2 号	12.04 \pm 0.14	40.08 \pm 0.25	169.79 \pm 12.32	250.33 \pm 0.10
	曲阳大稻	11.96 \pm 0.64	26.88 \pm 8.03	141.04 \pm 13.58	234.53 \pm 2.82
	玉田大白芒	13.64 \pm 0.15	21.51 \pm 5.79	178.05 \pm 5.65	232.53 \pm 4.56
	京引 119	12.25 \pm 0.20	11.98 \pm 2.20	165.34 \pm 0.20	156.86 \pm 22.28
	平均	11.88	22.96	159.24	195.92
非富 Se	丙 96-52	15.57 \pm 1.20	18.88 \pm 3.88	128.2 \pm 2.36	214.41 \pm 2.13
	嘉 99103	14.83 \pm 1.58	43.01 \pm 4.49	144.8 \pm 15.00	144.8 \pm 14.93
	锡稻 11	13.71 \pm 2.09	38.36 \pm 4.36	163.71 \pm 2.25	219.91 \pm 8.39
	丙 94-08	13.39 \pm 0.70	18.8 \pm 0.90	142.76 \pm 7.01	136.48 \pm 6.20
	凤稻 9 号	15.95 \pm 2.28	25.01 \pm 0.28	161.56 \pm 16.76	257.23 \pm 13.10
	浙湖 98-20	11.15 \pm 1.09	27.86 \pm 3.66	66.12 \pm 7.99	243.51 \pm 13.65
	S. Andrea	16.46 \pm 2.74	14.52 \pm 1.36	193.37 \pm 2.74	166.45 \pm 0.27
	平均	14.44	26.63	142.93	197.54

下, 富 Se 品种茎叶/根 Se 总量比明显高于非富 Se 品种; 当供 Se 水平提高到 300 $\mu\text{g/L}$ 时, 两种类型品种的茎/根 Se 总量比无显著差异。可见由于淹水条件下土壤中有效 Se 浓度低, 富 Se 水稻品种具有明显的转运优势, 这可能是引起两类水稻品种稻米 Se 含量差异的

重要原因。

(3) 不同供 Se 水平, 富 Se 品种茎叶 Se 含量明显高于非富 Se 品种, 而两品种间根部 Se 含量无显著性差别。

(4) 不同水稻品种苗期均具有极强的 Se 累积能

力。提高供 Se 水平和延长供 Se 时间, 水稻苗期根系 Se 吸收速率、根和茎叶 Se 含量显著提高。

参考文献:

- [1] Wang ZJ, Gao YX. Biogeochemical cycling of Se in Chinese environments. *Applied Geochemistry*. 2001, 16: 1345-1351
- [2] 彭安, 王子健, Whanger PD, Combs GF, Yeh JY. 北京: 硒的环境生物无机化学. 中国环境科学出版社, 1995
- [3] Forchhammer K, Boeck A. Biology and Biochemistry of the element selenium. *Naturwissenschaften*, 1991, 78: 497-504
- [4] Clark LC, Combs GF Jr, Turnbull BW, Slate EH, Chalker DK, Chow J, Davis LS, Glover RA, Graham GF, Gross EG. Effects of Se supplementation for cancer prevention in patients with carcinoma of the skin: A randomized controlled trial. *Nutritional Prevention of Cancer Study Group. J. Am. Med. Assoc.*, 1996, 276:1957-1963
- [5] Combs GF Jr, Turnbull BW. Reduction of cancer risk with oral supplement of Se. *Biomed Environ. Sci.*, 1997, 10: 227-234
- [6] 吴永尧, 罗泽民, 陈建英, 詹重慈. 水稻硒蛋白及其Se结合形态研究. *华中师范大学学报*, 2000, 34 (2): 223-225
- [7] 吴永尧, 罗泽民, 彭振坤. 水稻对Se的生物富集分布. *湖南师范大学学报*, 1998, 21 (4): 76-79
- [8] 李健, 郑春江等. 环境背景值数据手册. 北京: 中国环境科学出版社. 1990
- [9] Murphy J, Cashman KD. Se content of a range of Irish foods. *Food Chemistry*, 2001, 74: 493-498
- [10] Recommended Dietary Allowances 10th ed. Washington DC: National Academy Press, 1980, 217
- [11] Pyrzynska K. Determination of Se species in environmental samples. *Microchim. Acta.*, 2002, 140: 55-629
- [12] National research council recommended dietary allowances 10th ed. Food and Nutrition Board. Subcommittee on the tenth edition of the RDAS. Washington DC: Natl. Academic Press, 1989
- [13] Krystyna P. Determination of selenium species in Environmental Samples. *Microchim. Acta*, 2002, 140: 55-629
- [14] Gissel-Nielsen GU, Gupta C, Lamand M, Westermarck T. Se in soils and plants and its importance in livestock and human. *Adv. Agron.*, 1984, 37:397
- [15] Cao ZH, Wang XC, Yao DH, Zhang XL, Wong MH. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta. *Environment International*, 2001, 26: 335-339
- [16] Hu QH, Chen LC, Xu J, Zhang Y, Pan GX. Determination of selenium concentration in rice and the effect of foliar application of Se-enriched fertilizer or sodium selenite on the selenium content of rice. *J. Sci. Food Agric.*, 2002, 82: 869-872
- [17] Zhang LH, Shi WM, Wang XC, Zhou XB. Genotypic difference in selenium accumulation in rice seedlings and correlation with selenium content in brown rice. *J. Plant Nutrition*, 2006, 29 (9): 1601-1618
- [18] 薛应龙, 夏镇澳. 植物生理学实验手册. 上海: 上海科学技术出版社, 1985: 63
- [19] 张联合, 施卫明, 王校常. 不同因素对水稻离体根吸收四价硒影响. *土壤*, 2006, 38 (4): 417-421
- [20] Murphy J, Cashman KD. Se content of a range of Irish foods. *Food Chemistry*, 2001, 74: 493-498
- [21] Gámiz-Gracia L, Luque de Castro MD. Determination of Se in nutritional supplements and shampoos by flow injection-hydride generation-atomic fluorescence spectrometry. *Talanta*, 1999, 50: 875-880
- [22] Zhang LH, Shi WM, Wang XC. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars. *Pedosphere*, 2006, 16 (5): 646-653
- [23] Wang Z, Peng A. Influences of dissolved organic matter on speciation and bioavailability of selenium in Kaschin-beck disease area. *Environ. Sci.*, 1991, 12: 86-90
- [24] Zayed A, Lytle CM, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of Se by plants. *Planta*, 1998, 206: 284-292
- [25] de Souza MP, Lytle CM., Mulholland MM, Otte ML, Terry N. Selenium assimilation and volatilization from dimethylselenio-propionate by Indian Mustard. *Planta*, 2003, 218: 71-78
- [26] Leustek T, Saito K. Sulfate transport and assimilation in plants. *Plant Physiol.*, 1999, 120: 637-643
- [27] Pilon-Smits EAH, Hwang S, Lytle CM, Zhu YL, Tai JC, Bravo RC, Chen YC, Leustek T, Terry N. Overexpression of ATP sulfurylase in indian mustard leads to increased selenate uptake, reduction, and tolerance. *Plant Physiology*, 1999, 119: 123-132

Difference of Selenium Uptake and Transport in Seedlings Between Enriched- and Non-Enriched-Selenium Rice Cultivars

ZHANG Lian-he^{1,2}, YU Fei-yan¹, SHI Wei-ming²

(1 *Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471003, China*; 2 *State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

Abstract: Difference of selenium uptake and transport in seedlings between enriched- and non-enriched-selenium rice cultivars was studied using hydroponic experiments. The results showed that the Se-enriching cultivar was much higher than the common cultivar in Se absorption rate and Se concentration in leaves, but they were quite similar in Se concentration in roots. So the former was significantly higher than the latter in ratio of total selenium in shoots against total selenium in roots, particularly when the selenium level was lower (20 µg/L). It was quite obvious that the difference in Se concentration between the two rice cultivars might be attributed to their difference in Se uptake and transportation.

Key words: Se-enrich and common rice cultivars, Selenium absorption rate, Se concentration in shoots, Ratio of shoot/root total selenium, Difference