

富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理^①

周鑫斌, 施卫明*, 杨林章

(土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

摘要: 采用盆栽试验方法研究了富 Se 与非富 Se 水稻(秀水 48 和丙 9652)对土壤中 Se 吸收累积的生育期动态变化和 Se 在水稻植株不同部位的分配差异。结果表明: 随着生长发育期的推进, 水稻在拔节期对 Se 累积量骤增, 从拔节期到灌浆期水稻 Se 的累积量占总 Se 累积量的 65% ~ 77%, 说明这一段时期是水稻吸收 Se 的关键时期, 水稻生命周期中吸收的 Se 大部分在这个时期完成。在水稻苗期, 秀水 48 较高的 Se 吸收量是由于其根系对亚硒酸盐吸收能力较高。而在籽粒成熟期, 两个品种生物量和 Se 吸收量没有差异, 无论在低 Se 土壤还是加 Se 土壤上, 秀水 48 籽粒 Se 含量都显著高于丙 9652, 这说明水稻对土壤 Se 的吸收是非恒定的, 富 Se 水稻秀水 48 比非富 Se 水稻丙 9652 有较强的 Se 吸收能力和较强的 Se 转运能力, 但是, Se 在两个水稻品种的籽粒和其他器官中的分配差异是引起籽粒 Se 含量差异的一个重要原因。土壤不施 Se 时植株各器官 Se 含量顺序依次为根>叶>茎>籽粒, Se 易于向营养体富集, 土壤施亚硒酸盐后植株各器官 Se 含量则为根>籽粒>叶>茎, 表现出 Se 向籽粒富集的特征。

关键词: 水稻; 硒; 积累; 分配

中图分类号: S131+.2

硒(Se)是人和动物的必需营养元素之一, 很多疾病如克山病、大骨节病、动物白肌病与人体缺 Se 有关^[1-4], 我国低 Se 土类占全部土类的 75% 以上^[5]。Se 对人类健康的影响已经引起了广泛的关注^[6]。补充和调节人体 Se 微量营养需要的根本途径是农产品 Se 水平的调节, 而后者依赖土壤-植物系统中 Se 的有效供应^[7]。目前, 对 Se 的吸收、转运、积累和代谢研究主要集中在 Se 超积累植物上^[8-9], 有关于水稻对 Se 的吸收和累积报道很少^[10]。人体 Se 营养的获得主要依靠饮食, 在我国, 人们以大米为主食, 因而提高水稻籽粒 Se 含量对人体健康至关重要。已有的研究工作已证明土壤有效 Se 可能是水稻 Se 水平的主要控制因子, 同时品种或基因型差异在水稻 Se 水平的变异上起很大的作用^[11]。在自然状态下, Se 由土壤经植物向人体、动物体传递, 植物是这个传递系统的中间环节, 植物对土壤中痕量营养元素的吸收可能随着生长期而改变^[12]。

目前, 已经发现富 Se 水稻与非富 Se 水稻籽粒 Se 含量相差 3 倍, 有关研究籽粒 Se 含量差异原因的试验, 大部分集中在苗期^[2]。没有提供造成籽粒 Se 含量差异的直接原因, 应加强这方面的研究。本文研究富 Se 与

非富 Se 水稻在整个生育期中对土壤 Se 的吸收和累积的动态变化, 为揭示不同水稻品种籽粒积累 Se 的差异机理提供证据。为多方面认识痕量元素在土壤-植物系统中的生物有效性及其控制机制提供科学依据, 同时通过研究植物对 Se 的生物富集特点, 无论是对通过施 Se 提高植物含 Se 量, 调控生态环境与人体 Se 营养平衡, 还是为进一步研究 Se 对植物的营养、生理功能均有一定的理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验采用盆栽方法, 土壤取自江苏省宜兴市水稻土(黄泥土), pH 6.50, 有机质含量为 13.0 g/kg, 全 N 0.97 g/kg, 有效 P、有效 K 分别为 7.54、116.0 mg/kg, 土壤总 Se 0.19 mg/kg, 土壤有效 Se 17.0 μg/kg。所取土壤经风干并全部过筛孔直径为 3 mm 的筛后混匀, 待用。高 Se 土壤通过人工加入亚硒酸钠(Na_2SeO_3)获得, 加入的 Se 量为 1.5 mg/kg 干土。

1.2 供试植物

富 Se 水稻品种秀水 48 与非富 Se 水稻品种丙 9652。

①基金项目: 国家十五重大科技专项子课题: “河网区面源污染控制成套技术”项目(2002AA601012)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 周鑫斌(1978—), 男, 山西河曲人, 博士研究生, 主要从事水稻 Se 营养代谢与调控的研究。E-mail: xbzhou@issas.ac.cn

1.3 试验设计与实施

试验处理共 4 个, 即两个水稻品种和两种土壤 Se 水平交互配置 (CK×X, 未加 Se 土壤与秀水 48; CK×B, 未加 Se 土壤与丙 9652; +Se×X, 加 Se 土壤与秀水 48; +Se×B, 加 Se 土壤与丙 9652) 采用 30 cm×30 cm 的塑料桶装土, 每桶装风干土 5 kg, 施尿素、磷酸二氢钾化学试剂配置的复合肥料 (N:P:K = 1:1:1) 各 0.2 kg。采取催芽后移苗的方式, 每盆移苗 2 株, 分苗期、分蘖期、拔节期、灌浆期、成熟期采样, 15 次重复, 分别测定植株各器官生物量、Se 含量。试验于 2004 年 5~11 月在中国科学院南京土壤研究所温室进行。

1.4 样品处理

在水稻各生育期苗期, 分蘖期, 拔节期, 灌浆期, 成熟期采样, 分根、茎、叶和籽粒部分, 经去离子水反复冲洗干净, 60℃ 烘干, 粉碎, 过 80 目筛, 供 Se 的分析测定。

1.5 样品测定

1.5.1 样品 Se 的消化 称取粉碎的植株样品 0.3000 g, 置于消煮管中, 加入混合酸 ($\text{HNO}_3:\text{HClO}_4 = 4:1$) 5 ml, 浸泡过夜, 次日, 将消煮管置于消化炉上, 逐渐升温, 60℃ 消化 2 h, 100℃ 消化 1 h 后, 加混合酸 2.5 ml 升温到 170℃ 消化 2 h, 至溶液颜色变为无色并冒白烟后, 冷却, 加入 1:1 HCl 2.5 ml, 100℃ 继续加热

至无色并冒白烟, 冷却, 定容至 25 ml 用于测定^[11]。

1.5.2 Se 的测定 消化后的待测液中的 Se 含量用 AF-610A 原子荧光光谱仪测定。测定条件为: PMT 电压 280V; HCl 全阴极电流 80 mA; 载气流量 800 ml/min; 进样体积 1.0 ml; 原子化器高度 7 mm; 原子化器温度室温; 采样泵速 100 r/min; 采样时间 18 s; 停泵时间 5 s。植株以国家标准物质茶叶 (GWB07605) 为内标, 测定回收率为 98.6%±5%。

2 结果与讨论

2.1 富 Se 与非富 Se 水稻品种对 Se 的吸收

从表 1 看出, 在水稻苗期, 富 Se 水稻秀水 48 在未施 Se 土壤和施 Se 土壤上吸收的 Se 量分别是非富 Se 水稻品种丙 9652 的 2.1 和 1.5 倍, 干物质重分别是其 1.2 和 1.4 倍, 吸 Se 量和干物质在苗期差异显著。水稻成熟时, 无论种植在低 Se 土壤还是施 Se 土壤, 秀水 48 和丙 9652 吸收的总 Se 量没有差异, 干物质重也没有显著差异。但两个水稻品种无论种植在低 Se 土壤还是施 Se 土壤上, 籽粒 Se 含量差异显著, 秀水 48 的含 Se 量显著高于丙 9652 (图 1)。秀水 48 和丙 9652 苗期吸 Se 量差异显著, 成熟期差异不显著, 这意味着两品种水稻植株在全生育期中 Se 的吸收动态是不相同的。

表 1 不同水稻品种苗期和成熟期的干物质重 (g) 和总 Se 量 (μg/株)
Table 1 Dry weight and total Se in rice plants different in cultivar and growing period

处理	品种	苗期		成熟期	
		干物质重	总 Se	干物质重	总 Se
CK	秀水 48	2.33 a	0.51 c	55.4 a	23.8 b
	丙 9652	1.91 b	0.24 d	51.4 a	23.4 b
加 Se	秀水 48	2.51 a	5.98 a	53.3 a	120.5 a
	丙 9652	1.76 b	4.08 b	45.9 a	116.3 a

注: 表中数值为平均值±SD, n=3; 同一列不同字母代表差异达 $p<0.05$ 显著水平。

2.2 富 Se 与非富 Se 水稻吸收累积 Se 的生育期动态变化

为了分析富 Se 与非富 Se 水稻 Se 阶段相对累积百分比参数, 对含义定义如下: Se 的阶段累积量指作物某一生长发育期内 Se 元素的累计量 ($\text{Se } \mu\text{g/plant}$); Se 阶段相对累积百分比指作物各个生育阶段 Se 累积量占总 Se 累积量的百分比。水稻植株的 Se 阶段相对累积百分比如图 2 所示, 从苗期到成熟期, 水稻在各个生育期对 Se 的累积量是不相等的, 这与王其兵等^[15]对落花生的研究结果相似, 说明植株对土壤 Se 的吸收具有主动吸收的特点。随着植株的生长发育, 干物质

和 Se 元素的累积量不断增加, 水稻整个生育期中, 水稻在拔节期对 Se 累积量骤增, 至成熟期达到高峰, 即水稻干物质累积的高峰。从拔节期到灌浆期水稻 Se 的累积量占总 Se 累积量的 65%~77%, 说明这一段时期是水稻 Se 吸收的关键时期, 水稻吸收的大部分 Se 是在这个时期完成的。这意味着两品种水稻在全生育期中 Se 的吸收动态是非恒定的。

施 Se 土壤上种植的水稻不同生育时期植株不同部位 Se 含量动态变化见图 2。两水稻品种 Se 主要分布在根中, 茎、叶和籽粒中 Se 含量较少。这与前人的研究结果相似, 水稻吸收的 4 价 Se 绝大部分滞留在根

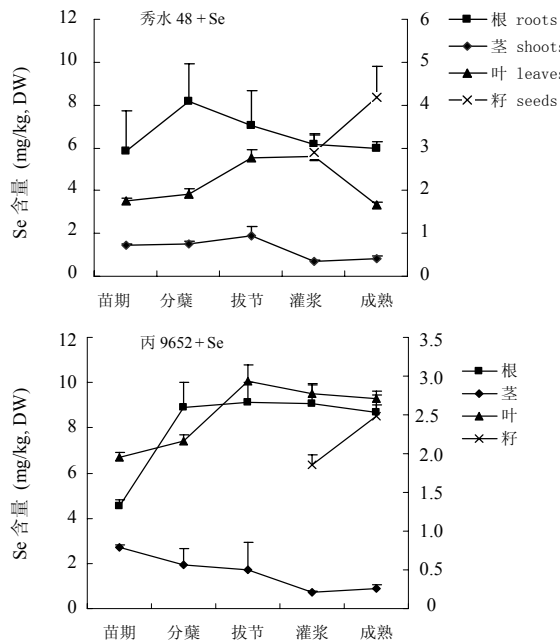


图 1 水稻不同生育期各器官 Se 含量动态变化
Fig. 1 Dynamics of Se contents in different organs of rice plants different in growing period

内^[11-16]。两个水稻品种茎和籽粒 Se 含量动态基本相似，茎中 Se 含量随着生育期有缓慢减少趋势，它们之间最显著差异就是根和叶中 Se 浓度含量的变化，两品种根 Se 含量从苗期到分蘖期逐渐增加，而到分蘖期后，秀水 48 根中 Se 含量从分蘖期到成熟一直下降，而丙 9652 根中 Se 含量相对保持平缓。水稻收获时，富 Se 水稻秀水 48 根中 Se 含量是 6.0 mg/kg (DW)，而丙 9652 根中 Se 含量为 8.69 mg/kg (DW)。两品种水稻叶中 Se 含量和根中 Se 含量呈现相似的趋势，水稻成熟时，秀水 48 叶中 Se 含量是 1.16 mg/kg (DW)，而丙 9652 叶中 Se 含量为 2.71 mg/kg (DW)。两个品种根中 Se 含量都超过其他组织 Se 含量，两个品种根中 Se 含量变化不同，有可能是两个品种对 Se 的转运上的差异造成的，水稻生育后期，富 Se 水稻秀水 48 与非富 Se 水稻丙 9652 相比，其对根系 Se 有较强的向上转运能力，同时可以把根和叶中的 Se 较多的转向籽粒中。根据我们以前的研究结果，秀水 48 根系有较强的吸收亚硒酸盐能力，同时也能将吸收的亚硒酸盐转化为有机 Se，同时秀水 48 也有较强的运转含 Se 氨基酸的能力，能够把根中的 Se 较多地运输到地上部^[2]，使得根中 Se 含量在分蘖期后逐渐下降，而丙 9652 相对于秀水 48 来

说，更多的 Se 滞留在根中。

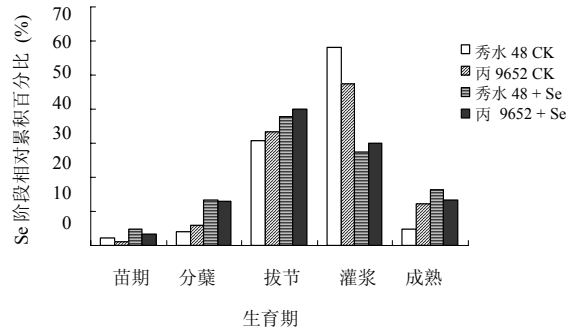


图 2 水稻不同生长发育期 Se 累积动态
Fig. 2 Dynamics of Se accumulation in rice plants

那么造成两个品种籽粒中 Se 含量差异的原因是什么呢？Se 在水稻不同器官中的分布如图 3 所示。由图 3 可知，在水稻根中 Se 的含量比较高，土壤不施 Se 时如图 3 (a) CK，籽粒富 Se 品种秀水 48 各器官中，以根系 Se 含量最高，其次依次是：叶=茎>籽粒，丙 9652 为根>叶>茎>籽粒。在施 Se 土壤上如图 3 (b) +Se，籽粒富 Se 品种秀水 48 各器官中，以根中 Se 含量最高，其次依次是：籽粒>茎>叶，而对丙 9652 而言，根>籽粒>叶>茎。这说明，富 Se 与非富 Se 水稻品种，Se 在植株各器官中的分配有不同的趋势。这些结果提示 Se 在供应充分时容易向地上部迁移和向籽粒富集，而在 Se 供应不足条件下，低 Se 品种中 Se 向生殖器官的转移和积累被抑制。前人^[17-19]对大豆施亚硒酸钠和不施 Se 的试验结果也表明，施 Se 时 Se 易向籽粒富集，供 Se 不充分时则没有表现出明显的籽粒富集现象。

成熟期两品种 Se 在各个器官中的分布如图 4 和图 5 所示，在低 Se 土壤上，两品种 Se 大部分滞留在根中，秀水 48 有 55.7% 的 Se 分布在根中，而丙 9652 有 66.0% 分布在根中；秀水 48 有 13.0% 分布在叶中，而丙 9652 有 16.2% 分布在叶中；秀水 48 有 8.43% 的 Se 分布在籽粒中，丙 9652 有 3.25% 的 Se 分布在籽粒中。对于生长在高 Se 土壤上的两品种来说，秀水 48 有 26.1% 的 Se 分布在根中，而丙 9652 有 30.9% 分布在根中；秀水 48 有 20.3% 的 Se 分布在叶中，而丙 9652 有 32.5% 分布在叶中；秀水 48 有 38.8% 的 Se 分布在籽粒中，而丙 9652 有 24.6% 分布在籽粒中。由上面可知，富 Se 水稻秀水 48 无论是低 Se 土壤还是施 Se 土壤，Se 在根中和叶中的比例都低于非富 Se 品种丙 9652，而秀水 48 籽粒含 Se 比例都高于丙 9652。根据总的生物量和总吸收 Se 量是相同的，两水稻品种籽粒

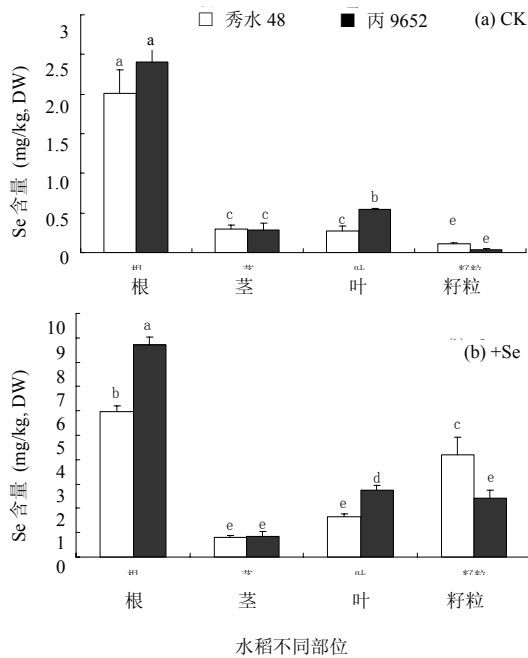


图 3 成熟期不同水稻品种各个器官 Se 含量分布
(误差线代表 SD, n=3)

Fig. 3 Se concentrations in organs of rice plants different in cultivars

产量也没有显著差异 (数据未列出)。由此可知, 不同品种的根系储积 Se 的转运能力不同, 秀水 48 与丙 9652 相比较而言, 能够把根部和叶中的 Se 更多的向籽粒运输, 从而使得籽粒 Se 含量有差异。这可能是与两品种的 Se 转运蛋白的含量与转运效率有关。很明显, Se 在两水稻品种的籽粒和其他器官中的分配差异是引起籽粒 Se 含量差异的一个重要原因。

有关于 Se 在高等植物中的吸收转运机制不是十分清楚, Se 可以在木质部以氨基酸的形式很快转运到地上部^[20]。在本试验中造成水稻籽粒 Se 含量差异的原因一是富 Se 水稻秀水 48 比非富 Se 水稻丙 9652 有较强的根系 Se 吸收能力; 二是吸收的 Se 在体内不同器官的分配差异。富 Se 水稻在根和叶中 Se 含量百分比低于非富 Se 水稻根和叶的百分比, 而籽粒中 Se 含量百分比高于非富 Se 水稻, 而这种根系和籽粒中 Se 浓度在两个品种间的相反关系说明, 水稻根中 Se 浓度也许是一个有用的判断籽粒低 Se 的生理指标。

3 结论

(1) 土壤不施 Se 时植株各器官中 Se 含量顺序依次为根>叶≈茎>籽粒, Se 易于向营养体富集, 土壤施亚硒酸盐后植株各器官中 Se 含量则为根>籽粒>叶>茎, 表现出 Se 向籽粒富集的特征。水稻对 Se 的富集是一个非恒定的过程, 从拔节期到灌浆期水稻 Se 的累积量占总 Se 累积量的 65%~77%, 说明这一段时期是水稻 Se 吸收的关键时期, 水稻吸收的大部分 Se 是在这个时期完成的。

(2) 富 Se 与非富 Se 水稻, Se 在植株各器官中的分配不同。无论是在低 Se 土壤还是在施 Se 土壤中, 相对于非富 Se 水稻丙 9652 而言, 富 Se 水稻秀水 48 能够把根部和叶中的 Se 更多的向籽粒运输, 从而使得籽粒有较高的 Se 含量。秀水 48 比丙 9652 有较强的根系 Se 吸收能力, 同时 Se 在两水稻品种的籽粒和其他器官中的分配差异也是引起籽粒 Se 含量差异的一个重要原因, 秀水 48 可把根和叶中的 Se 较多地转运到籽粒, 从而使得其籽粒 Se 含量较高。

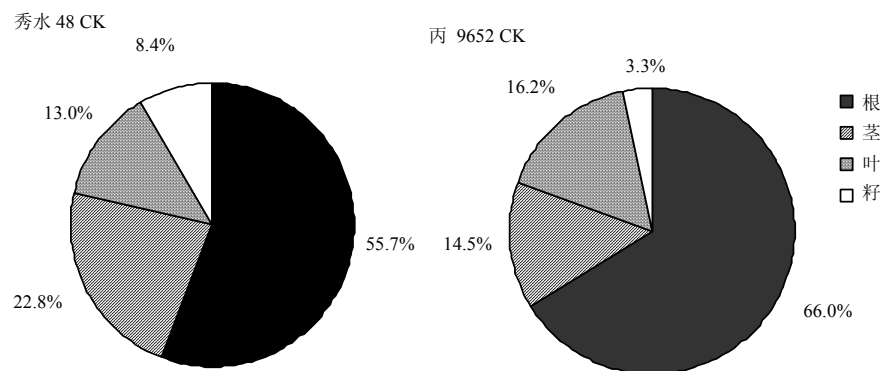


图 4 未施 Se 土壤上成熟期两水稻品种中 Se 在不同部位的分布

Fig. 4 Distribution of Se in organs of rice plants different in cultivar at the maturing stage in the CK

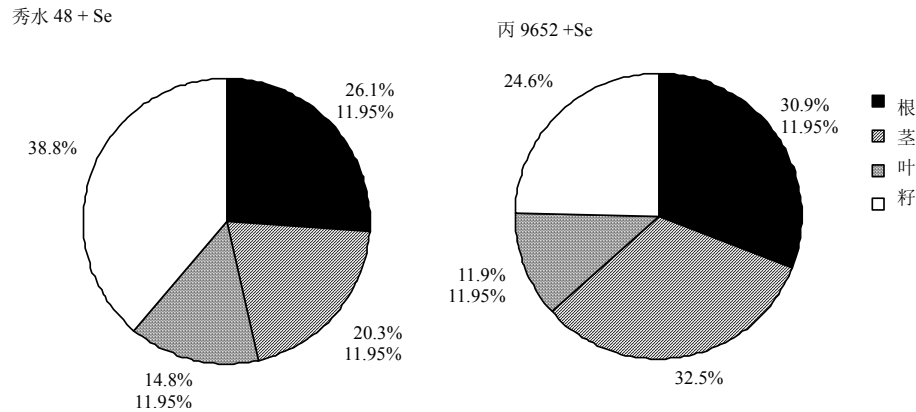


图 5 施 Se 土壤上成熟期两水稻品种中 Se 在不同部位的分布

Fig. 5 Distribution of Se in organs of rice plants different in cultivar at the maturing stage in soils applied with Se

参考文献:

- [1] 中国科学院地理研究所地方病室. 我国低硒带与克山病大骨节病关系研究. 环境科学, 1989, 7(4): 89
- [2] Zhang LH, Shi WM, Wang XC. Difference in selenium accumulation in shoots of two rice cultivars. Pedosphere, 2006, 16(5): 646-653
- [3] 杜振宇, 史衍玺, 王清华. 土壤施硒对萝卜吸收转化硒及品质的影响. 土壤, 2004, 36 (10): 56-60
- [4] 章海波, 骆永明, 吴龙华, 张甘霖, 赵其国, 黄铭洪. 香港土壤研究 II. 土壤硒含量、分布及其影响因素. 土壤学报, 2005, 42 (3): 404-410
- [5] 布和敖斯尔, 张东威, 刘力. 土壤硒区环境分异及安全阈值的. 土壤学报, 1995, 32 (2): 186-193
- [6] 李永华, 王五一, 雒昆利, 杨林生. 大巴山区土壤中的硒和氟. 土壤学报, 2004, 41(1): 61-67
- [7] 张艳玲, 潘根兴. 江苏省几种低硒土壤中硒的形态分布及生物有效性. 植物营养与肥料学报, 2002, 8 (3): 355-359
- [8] De Souza MP, Elizabeth AH, Pilon-Smits CML, Hwang SB, Tai J, Todd SU, Honma, LY, Terry N. Rate-limiting steps in selenium assimilation and volatilization by Indian Mustard. Plant Physiol., 1998, 117: 1487-1494
- [9] Lewis BG, Johnson CM, Broyer TC. Volatile selenium in higher plants: The production of dimethyl selenide in cabbage leaves by enzymatic cleavage of Se-methylselenomethionine selenonium salt. Plant and Soil, 1974, 40: 107-118
- [10] Zayed AM, Lytle CM, Terry N. Accumulation and volatilization of different chemical species of selenium by plants. Planta. 1998, 206: 284-292
- [11] Zhang LH, Shi WM, Wang XC. Difference in selenite absorption between high- and low- selenium rice cultivars and its mechanism. Plant and Soil, 2006, 258: 1-11
- [12] Peijnenburg W. Quantification of metal bio-availability for lettuce in field soils. Arch. Environ. Contam. Toxicol., 2000, 39: 420-430
- [13] 彭安, 王子健, Whanger P D 等编著. 硒的环境生物无机化学. 北京: 中国环境科学出版社, 1995: 1-40
- [14] Severson RC, Fisher JR, Scott E, Gough LP. Proceeding of the 1990 Billings land reclamation symposium on selenium in arid and semiarid environments. Geological Survey Circular, Western United States. US, 1991: 55-64
- [15] 王其兵, 吴金媛, 赵义芳, 乔玉辉. 落花生不同器官对硒元素的吸收和累积动态研究. 植物学报, 1997, 39 (2): 164-168
- [16] Arvy MP. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*). J. Exp. Bot., 1993, 44: 1083-1087
- [17] 胡秋辉, 杨文美, 潘根兴. 喷施硒对大豆品质和大豆食品硒水平的影响. 中国油料作物学报, 2001 (3): 42-45
- [18] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 陈历程. 叶面喷硒对低硒地区大豆不同组分和硒形态分布的影响. 南京农业大学学报, 2003, 26(1): 37-40
- [19] 陈金, 潘根兴. 不同硒水平下两种大豆对土壤中硒吸收积累的生育期动态. 大豆科学, 2003, 22(4): 278-282
- [20] Gissel-Nielsen G. Uptake and translocation of selenium75 in Zea mays. I.A.E.A., 1979, 235: 427-436

Genotypical Differences and Characteristics of Se Uptake and Accumulation in Rice

ZHOU Xin-bin, SHI Wei-ming, YANG Lin-zhang

(*State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture (Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences), Nanjing 210008, China*)

Abstract: A pot experiment of planting two cultivars (Xiushui-48 and Bing-9652) of rice in two soils with different total Se levels was conducted to study dynamics of Se uptake and accumulation in these plants during different growing periods. Results showed that with the plants growing and entering their jolting stage, rice began rapid Se accumulation. The amount of Se accumulated by the plants during the period from jointing to booting accounted for 65% ~77% of the total Se accumulation of the plants, suggesting that this is a key Se absorption period of the plants. At the seedling stage, Cultivar Xiushui-48 absorbed more Se than the other because its roots are more capable of absorbing selenite, while the two cultivars differed slightly in biomass and Se uptake at the maturing stage, regardless of whether the soil was high or low in soil Se, cultivar Xiushui-48 was more higher than the other in Se content in grains, which suggests that Se uptake by rice is not constant. Compared with cultivar Bing-9652 in the low Se treatment, cultivar Xiushui-48 in the high Se treatment was high in capacity of accumulating and translocating Se. The difference between the two cultivars in Se distribution in grains and other plant organs was the major cause leading to difference in Se content in grains between the two. In the low Se treatments, the organs of rice plants were in the order of roots > shoots $\approx$ leaves > seeds in terms of Se content, showing a trend of accumulating in vegetative organs, whereas in the high Se treatments, they in the order of roots > grains > leaves > stems, showing a trend of accumulating in grains.

Key words: Rice, Selenium, Accumulation, Partitioning