

黄太庆, 江泽普, 邢颖, 等. 水稻对外源硒的吸收利用研究[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(5): 449-455.

HUANG Tai-qing, JIANG Ze-pu, XING Ying, et al. Effects of Exogenous Selenium on Paddy Rice Growth, Selenium Uptake and Accumulation[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 449-455.

水稻对外源硒的吸收利用研究

黄太庆, 江泽普*, 邢颖, 廖青, 梁潘霞, 刘永贤

(广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007)

摘要: 硒是人体必需的微量营养元素, 食物是人体硒的主要来源, 外源硒调控是生产富硒农产品的重要手段之一。通过盆栽试验, 研究外源硒添加条件下水稻对硒的吸收利用问题。结果表明, 土壤添加外源硒为 $0.2\sim 0.6\text{ mg Se}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土的条件下, 对水稻的生长性状没有显著影响, 但能显著增加水稻各部位的全硒含量。硒在水稻体内各部位的含量大小关系为: 稻根>茎叶>糙米>精米>谷壳; 但在各主要部位的总累积大小为: 茎叶>糙米>精米>稻根>谷壳。在自然土壤上硒相对更多地富集于水稻根系, 而外源添加四价硒处理, 水稻吸收的硒相对更容易转移至地上部位, 甚至更容易在糙米和精米中富集。水稻植株对外源硒的吸收利用率为 $2.87\%\sim 3.75\%$, 地上部和籽粒累积外源硒的量占添加外源硒总量分别为 $2.60\%\sim 3.45\%$ 和 $0.94\%\sim 1.32\%$ 。

关键词: 亚硒酸钠; 水稻; 累积; 利用率

中图分类号: Q945.78

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)05-0449-07

doi: 10.13254/j.jare.2017.0076

Effects of Exogenous Selenium on Paddy Rice Growth, Selenium Uptake and Accumulation

HUANG Tai-qing, JIANG Ze-pu*, XING Ying, LIAO Qing, LIANG Pan-xia, LIU Yong-xian

(Agricultural Resource and Environment Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Science, Nanning 530007, China)

Abstract: Selenium (Se) is an essential micronutrient for humans which mainly comes from food, Se amendment to soil is one of important ways to produce selenium-enriched foods. In this paper, pot experiment had been taken at four exogenous selenite levels ($0, 0.2, 0.4\text{ mg Se}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil and $0.6\text{ mg Se}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil) to investigate the effects of Se amendment to soil on paddy rice growth, Se uptake and accumulation. With Se adding levels to soil ranged from 0.2 to $0.6\text{ mg Se}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, there were no significant effect on rice growth, but the total Se concentrations in paddy rice fractions increased significantly. The total Se concentrations in paddy rice fractions were in the following order: root>straw>unpolished rice>polished rice>husk, but the total Se accumulations in paddy rice fractions were in the following order: straw>unpolished rice>polished rice>root>husk. When paddy rice grew on the natural soil, Se relatively more enriched in roots, while the treatment amended with selenite, rice absorption of Se transported to the aboveground parts more efficiently, even more easily accumulated in unpolished and polished rice. The utilization of paddy rice, aboveground biomass and grain accumulated added-selenium were $2.87\%\sim 3.75\%$, $2.60\%\sim 3.45\%$ and $0.94\%\sim 1.32\%$ respectively.

Keywords: sodium selenite; paddy rice; accumulation; utilization rate

硒(Se)作为人体必需营养元素, 与人的身体健康有密切关系。食物作为人体硒的主要来源, 全球有 10

亿人口每日硒摄入量不足^[1]。中国有 72% 的县市土壤存在不同程度的缺硒^[2], 在低硒土壤中生产出的食物往往硒含量较低。在缺硒地区通过生物富硒强化提高植物中硒的含量是改善人体硒营养的有效途径^[3]。

生物强化的方法主要有内源强化和外源强化两种^[4]。内源强化主要有选育富硒的作物品种^[5-6], 有研究认为品种或基因型差异在水稻硒累积的变异上起很大的作用^[7]。周鑫斌等^[8]研究认为, 富硒的水稻品种具

收稿日期: 2016-03-16

基金项目: 广西科技计划项目(桂科攻 1598006-5-13, 桂科合 415104001-22); 广西农业科学院科技发展基金和基础科研业务费项目(桂农科 2015JM23, 桂农科 2017YZ03); 广西农业科学院成果转化项目(农成转 2015005)

作者简介: 黄太庆(1985—), 男, 广西柳州人, 硕士研究生, 助理研究员, 从事土壤生态与高值农业研究。E-mail: htaiqing@163.com

* 通信作者: 江泽普 E-mail: lzjeep@163.com

有很强的向地上部转运硒的能力。外源强化主要有土施硒肥^[9]、喷施硒叶面肥^[10]、硒液肥浸种^[11]等。许多研究发现,硒肥的施用可以显著提高作物中硒的含量,并能改善作物的品质^[12]。低浓度外源硒($\leq 2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)促进作物根的生长^[13],而高浓度时根系出现被毒害现象,根冠比下降、还原活力降低、根系的生物量减少^[14]。

水稻是世界上重要的粮食作物,提高稻谷中硒含量对平衡人体硒素营养有重要意义。在自然土壤条件下,水稻根系、茎叶和籽粒中的硒含量均随着土壤硒含量增加而增加,并呈现根系>茎叶>籽粒的特点,在水稻籽粒中则为米糠>精米>谷壳;在不同的土壤硒含量水平下,同一水稻品种硒向籽粒的运转和累积相对恒定,其运转系数为 0.53~0.59^[15]。目前,对于外源硒调控水稻硒含量的研究较多,但是土壤外源硒添加条件下,水稻对外源硒的吸收、运输和累积的过程则没有系统的研究。土壤中累积过多的外源硒,可能会对土壤造成污染,水稻对外源硒的利用率还未见报道。本研究通过盆栽试验研究外源硒添加条件下水稻的硒素营养吸收和利用过程,将有助于加深对水稻硒素营养的认识,为水稻合理施用硒肥提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与土壤性状

试验于 2015 年 4—7 月在广西农业科学院科研核心试验区的大棚内进行,盆栽土壤采自广西农业科学院试验农场的水稻田,土壤主要养分含量为:全氮 0.16%、全磷 0.12%、全钾 1.24%、有机质 $25.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全硒 $0.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效硒含量 $0.031 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (碳酸氢钠法),土壤 pH 值为 6.10。

1.2 作物品种

试验采用的水稻品种为常规优质籼稻品种:柳沙油占 202。

1.3 试验设计

盆栽试验共设 4 个处理,即在原来土壤条件下使土壤中硒含量分别提高 $0 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土(Se0)、 $0.2 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土(Se1)、 $0.4 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土(Se2)、 $0.6 \text{ mg Se} \cdot \text{kg}^{-1}$ 土(Se3)。添加的外源硒为亚硒酸钠(Na_2SeO_3) (西亚试剂公司生产,分析纯,硒含量 $\geq 44.7\%$)。先将采集的土壤晾干、粉碎、过 2 mm 筛,后装入直径为 30 cm、高为 22 cm 的盆中。每盆装土 8 kg,每个处理 3 次重复。水稻移栽前,使每盆保持水层 1~2 cm,将土壤浸泡 10 d 以上,后将亚硒酸钠溶解,按试验方案添加

到土壤中;加入基肥,搅拌均匀;沉淀 0.5 d 后,移栽水稻,秧苗秧龄为 20 d,每盆种植 2 穴,每穴两苗。按照常规施肥管理,基肥为复合肥(15-15-15) $2.0 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$;移栽后 10 d 第 1 次追肥,尿素 $0.7 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$;孕穗期进行第 2 次追肥,尿素 $0.35 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$,氯化钾 $0.5 \text{ g} \cdot \text{盆}^{-1}$ 。在水稻够苗后进行晒盆 10 d 左右,控制无效分蘖。

1.4 样品采集与分析

1.4.1 株高与分蘖

在水稻晒盆之前,每隔 10 d 左右调查 1 次水稻的株高与分蘖,并在水稻收获之时,记录水稻的株高和有效穗数。

1.4.2 样品采集与制备

稻谷样品:水稻成熟后,剪下每个有效穗,并进行脱粒,用水选法,分离实粒和空瘪粒,晒干后分别称重,并进行考种。对于实粒稻谷,分别用砻谷机和精米机制备得谷壳、糙米和精米 3 个样品,粉碎后制备得样品,待测。

茎叶样品:由 3 部分组成,即地下的茎秆、地上的茎叶和脱粒后的穗枝,烘干后称重,经粉碎制备得样品,待测。

根样品:水稻收获后,剪去地上部,让盆栽土风干,后粉碎土壤,筛选出全部根系,先用自来水冲洗附着的土壤,后用去离子水冲洗 1 遍,剪去非根系的茎秆部分,烘干后称重,经粉碎制备得样品,待测。

1.4.3 全硒含量的测定

称取植物样品 0.3000 g 至微波消解管中,加入 8 mL 浓硝酸,在 120°C 的电炉下预消解 30 min,转移到微波消解炉中,消解条件为:10 min 功率加到 800 W,在 800 W 保持 5 min;再需 10 min 将功率提高至 1400 W,保持 20 min;后冷却至 60°C ,取出样品。从微波消解炉中取出的样品还需在 120°C 的电炉上赶酸至液体体积剩下 2 mL,加入 5 mL 1:1 盐酸,再消煮 15 min。之后把消煮液转移至 50 mL 容量瓶中,用水定容。摇匀后用原子荧光光度计(吉天 AFS-9330)测定全硒含量。

1.4.4 外源硒的利用率

本研究把外源硒的吸收利用率按照各组织中累积量计算,分为植株利用率、地上部利用率和籽粒利用率:

外源硒利用率(%)=(外源硒处理各部位硒累积量-对照处理对应部位硒累积量)/外源添加硒总量 $\times 100$

1.5 数据统计分析

数据使用 Excel2007, JMP7.0 等软件进行数据

分析和制作图表,用 LSD 法分析各处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 外源硒对水稻生长的影响

2.1.1 外源硒对水稻株高和分蘖的影响

从图 1A 可以看出,在水稻种植土壤中添加外源硒处理 Se1、Se2、Se3 与对照(Se0)相比各处理间在水稻各生长期的株高差异不显著,各调查时期的株高变化为 42.6~46.2、66.3~70.2、82.0~83.1、86.6~89.9 cm 和 106.2~108.4 cm。各处理水稻生长至晒田期,各生长期分蘖数没有显著差异;但在水稻成熟期 Se2 处理的有效穗数要显著低于 Se1 处理,其他各处理间的差异不显著,有效穗变化顺序为 Se1>Se0>Se3>Se2(图 1B)。

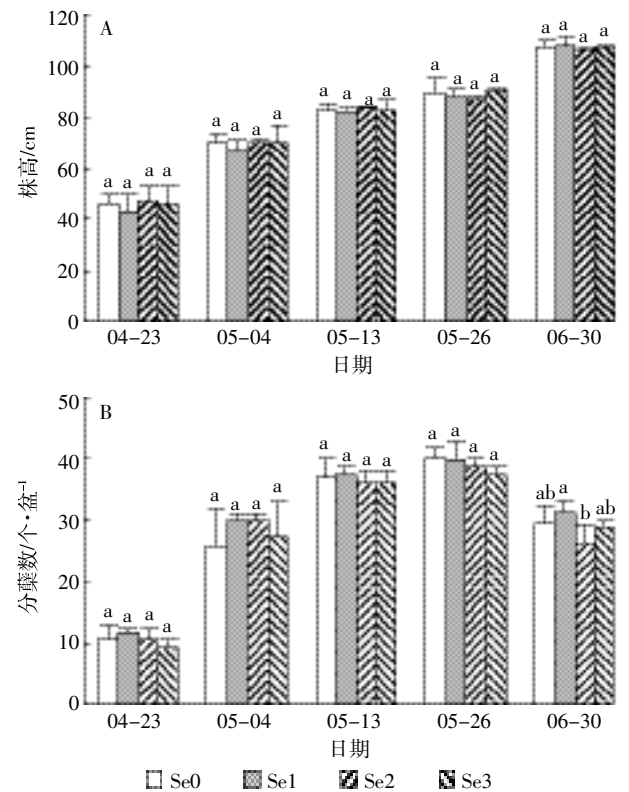
2.1.2 外源硒对水稻产量性状的影响

从表 1 可知,一定浓度的外源硒添加(Se1 和 Se2 水平)对水稻千粒重有积极影响,但 Se3 添加水平会降低水稻的千粒重,且显著低于 Se2 水平。与对照(Se0)相比,土壤添加外源硒降低了水稻的结实率,Se1、Se2、Se3 处理分别降低了 2.67%、2.4%和 7.75%。对产量影响方面,4 个处理之间的差异不显著,产量高低顺序为 Se0>Se1>Se2>Se3。在地上部生物量上,Se3 处理显著高于 Se1 处理,其他各处理之间差异不显著。根系生物量为 Se3>Se0>Se1>Se2,各处理间差异不显著。在添加外源硒的 3 个处理中,随着添加量的增加,籽粒产量逐渐降低,但生物量(地上部+地下部)却逐渐增大,这是否与水稻适应高水平硒环境相关,有待进一步研究。

2.2 硒在水稻植株内的分布与运输特征

2.2.1 水稻各主要部位硒含量特征

土壤外源硒的添加,显著增加水稻各部位硒含量,在小于 0.6 mg Se·kg⁻¹ 土外源硒添加量的条件下,



相同时期柱不同字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同
Different letters mean significant difference among different treatments in the same date (P<0.05). The same below
图 1 外源硒添加对水稻各处理株高(A)和分蘖数(B)的影响
Figure 1 The effects of Se amendment on rice height (A) and tiller number (B)

水稻各主要部位硒含量均随着硒添加量的增加而增大;无论添加外源硒与否,水稻各部位硒含量大小均为稻根>茎叶>糙米>精米>谷壳(图 2)。对水稻各主要部位硒含量进行相关性分析(表 2),结果表明,各部位硒含量之间均呈极显著的正相关性,说明硒在水稻植株内的运输和累积具有一定的遗传特性,各部位的累积量受到其他部位硒含量的显著影响,提高水稻植株硒的总吸收量,是生产富硒水稻的根本途径。

表 1 土壤添加外源硒对水稻产量性状的影响
Table 1 The effects of Se amendment on rice yield characteristics

处理 Treatments	千粒重 Thousand grain weight/g	结实率 Seed setting rate/%	产量 Yield/g·pot ⁻¹	生物量 Biomass/g·pot ⁻¹	
				地上部 Above ground part	根系 Root
Se0	14.65±0.21ab	62.33±8.18a	54.09±1.79a	52.17±6.54ab	5.52±0.73a
Se1	14.83±0.30ab	59.66±4.08a	52.87±5.52a	50.04±0.68b	5.44±1.11a
Se2	14.95±0.36a	59.93±10.40a	47.67±4.87a	53.52±3.99ab	5.40±0.67a
Se3	14.41±0.20b	54.58±2.56a	47.09±1.62a	57.57±1.68a	5.80±0.84a

注:同列中相同字母表示处理间差异不显著(P<0.05)。下同。
Note: Values followed by the same letter are not significantly different among different treatments (P<0.05). The same below.

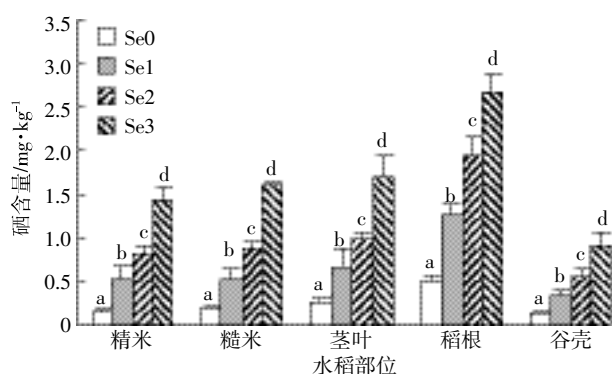


图 2 外源硒添加对水稻各部位硒含量的影响

Figure 2 The effects of Se amendment on Se contents in different parts of paddy rice

表 2 水稻各主要部位之间硒含量的线性相关性分析 ($n=12$)Table 2 The linear correlation coefficient between Se contents in different parts of rice ($n=12$)

项目 Item	精米 Polished rice	糙米 Unpolished rice	谷壳 Husk	茎叶 Stem and leaf	稻根 Root
精米 Polished rice	1	—	—	—	—
糙米 Unpolished rice	0.991**	1	—	—	—
谷壳 Husk	0.981**	0.966**	1	—	—
茎叶 Stem and leaf	0.983**	0.974**	0.939**	1	—
稻根 Root	0.954**	0.951**	0.934**	0.962**	1

2.2.2 土壤添加外源硒对水稻植株硒运输特征的影响

从土壤中吸收的硒需要在水稻植株内运输与转化,其转移的效率决定了硒在各个组织部位的含量,而从各组织中硒的含量变化也能了解硒在水稻植株内的转移特征。转移系数是描述其转移特征的方法之一。硒从根系到茎叶的过程用初级转移系数(PTI)表示,是水稻茎叶硒含量与根硒含量的比值;硒从水稻茎叶到籽粒的过程用次级转移系数(STI)表示,是籽粒硒含量与根系含量的比值^[15-16]。从表 3 可以看出,初级转移系数(PTI)在各硒水平之间的差异不显著,与不添加外源硒(Se0)相比,Se1、Se2 和 Se3 分别增加 19.77%, -0.77% 和 22.65%,说明 Se1 和 Se3 外源硒水平的添加有利于根部吸收的硒向茎叶转移。次级转移系数在不同的外源硒添加水平之间没有显著差异。向糙米中转移的次级转移系数(STI-np)和向精米中转移的次级转移系数(STI-p)均随着外源硒添加量的增大而增大。STI-np 相较于对照水平(Se0),添加 Se1、Se2 和 Se3 的转移系数分别增加 0.13%、13.75% 和 23.48%;而 STI-p 分别增加 29.61%、34.30% 和 38.19%。水稻吸收的硒向籽粒中稻壳转移的次级转移系数

(STI-h), Se1 添加水平比对照(Se0)降低 11.74%,而 Se2 和 Se3 添加水平则分别增加 4.36% 和 3.22%。表 3 结果说明,外源硒的添加更加有利于水稻从土壤中吸收的硒向茎叶和籽粒中转移,从转移系数的增加幅度中可以看出,在试验添加浓度范围内,外源硒添加浓度越大,硒更容易向籽粒、糙米和精米中转移和积累。

表 3 不同处理硒在水稻体内的转移系数

Table 3 Selenium transport index in rice plant under different treatments

处理 Treatments	转移系数 Transport indexes			
	PTI	STI-np	STI-p	STI-h
Se0	0.521a	0.771a	0.618a	0.528a
Se1	0.624a	0.772a	0.801a	0.466a
Se2	0.517a	0.877a	0.830a	0.551a
Se3	0.639a	0.952a	0.854a	0.545a

2.3 外源硒在水稻体内的累积

2.3.1 硒在水稻植株内累积特征

图 3 显示,随着土壤外源硒添加量的增加,水稻植株各主要部位硒的累积量也随之增加,大小关系为:茎叶>糙米>精米>稻根>谷壳。Se0、Se1、Se2 和 Se3 处理水稻植株总累积量(稻根累积量+茎叶累积量+糙米累积量+谷壳)分别为 30.74、88.60、122.66 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 和 210.74 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$,其与外源硒添加量成显著正相关($r=0.9843$, $n=4$)。其中 4 个处理精米的总累积含量分别为 6.18、23.48、26.01 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 和 46.69 $\mu\text{g}\cdot\text{盆}^{-1}$ 。

从硒在水稻植株主要部位累积比例(表 4)可以看出,各处理中硒的主要累积部位均为水稻的茎叶,累积占比为 53.40%~56.76%,其次为水稻颗粒(糙米+谷壳),占比为 33.54%~36.29%;稻根的硒含量较高,但总累积占比仅在 8.30%~10.56%之间,这主要是由于稻根的生物量较低决定的。在水稻根部总累积的比例以 Se0 处理的最高,往后依次为 Se2、Se1 和 Se3 处理,说明土壤中外源硒的添加,有利于水稻植株吸收的硒向地上部转移。茎叶、糙米和谷壳硒累积占比,在各处理间的差异不显著;精米的累积占比中 Se1 处理的显著高于 Se0,其他处理间的差异不显著,处理之间的大小关系为 Se1>Se3>Se2>Se0,可见土壤添加外源硒处理的硒累积量占比均高于未添加外源硒的处理,外源硒的添加,有利于水稻植株吸收的硒向精米中转移和累积,各处理中精米累积硒的占比为 20.09%~26.5%。在水稻糙米和谷壳硒累积占比差异均不显著的情况下,精米硒累积占比差异较大,这是

由于稻谷内保护皮层累积硒的差异造成的,Se0、Se1、Se2 和 Se3 处理稻谷内保护皮层累积硒占水稻植株总累积硒的比例分别为 8.74%、3.10%、5.75% 和 6.65%。

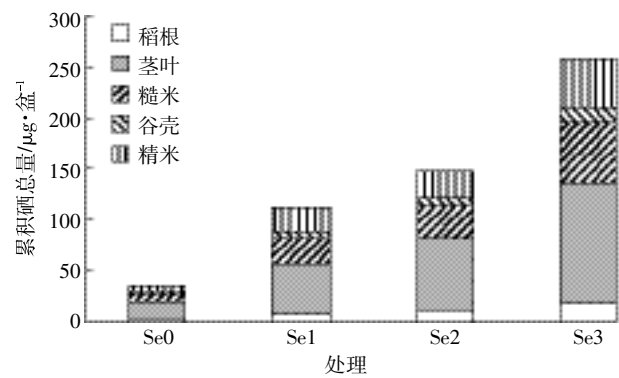


图 3 硒在水稻植株内累积状况
Figure 3 Se accumulation in paddy rice

2.3.2 水稻对外源硒的当季利用率

土壤添加外源硒是生产富硒水稻的有效途径之一,同时也给土壤生态环境带来一定的风险,本研究从水稻对硒的吸收利用率方面,了解外源添加的硒进入土壤后的效益问题。水稻植株内硒的代谢与土壤中硒含量有密切关系,从图 4 可以看出,水稻植株对外源硒的当季利用率仅为 2.87%~3.75%,而试验中 3 个添加水平对其吸收利用率没有显著影响。水稻地上部包括了水稻茎叶和籽粒,籽粒是要从稻田带走部分,而茎叶的还田与否直接影响硒的去向,图 4 显示 Se1、Se2 和 Se3 处理水稻地上部对外源硒的利用率没有显著差异,其当季利用率为 2.60%~3.45%。水稻籽粒中累积的硒对外源硒的当季利用率为 0.94%~1.32%,Se2 处理的显著低于 Se1 和 Se3 处理的利用率。以上结果说明,水稻种植过程中对土壤外源硒的当季利用率较低,绝大部分将残留于土壤或流失于环境当中。

3 讨论

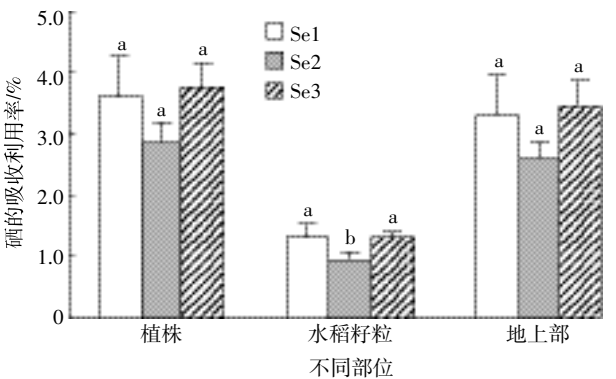


图 4 水稻不同部位对外源硒的吸收利用率
Figure 4 Exogenous Se use efficiency by different parts of paddy rice

目前,还没有证据证明硒是植物所必需的营养元素,但研究认为,硒肥施用条件、施用方式、施用时期及施用量均对水稻产量和品质有明显影响^[17]。硒在水稻体内主要影响抗氧化体系的代谢功能,并保护细胞免受氧化而遭到的损伤,对水稻光合作用和呼吸作用等能量代谢过程也有影响^[18]。董广辉等^[19]认为,硒对植物的产量和品质的影响可能是通过间接作用实现的。在镉污染的稻田,硒可减轻镉胁迫对水稻株高的抑制,提高叶绿素含量,增加叶片干物质累积,提高叶片还原糖含量,降低 MDA 含量与 POD 活性,提高 SOD 和 CAT 活性^[20]。Broyer 等^[21]认为硒对紫云英属植物生长刺激作用归因于营养液中硒抵消 P 毒害,当 P 浓度低时,施硒处理不能使植物增产。普遍的观点认为,外源硒在适量的添加范围对作物生长有正效应,而高剂量的添加对作物的生长有毒害作用^[22-23]。本研究中,土壤全硒含量的背景值较高,外源硒添加的最大剂量为 0.6 mg Se·kg⁻¹ 土,远未达到报道的硒产生毒害的水平^[24],因此本研究对所观测指标既没有表现出显著正效应,又未表现显著负效应。

四价硒是作物可利用的硒形态之一,添加外源亚硒酸钠,提高了土壤有效硒含量,因此,水稻各部位硒含量显著增加。亚硒酸盐以被动吸收形式进入水稻体内^[25],在水稻根部,亚硒酸盐被转化为硒酸盐和其他硒

表 4 水稻各主要部位硒累积量占植株总累积量的比例(%)

Table 4 The proportion of total accumulation of selenium in the different parts of paddy rice(%)

处理 Treatments	稻根 Root	茎叶 Stem and leaf	糙米 Unpolished rice	谷壳 Husk	精米 Polished rice
Se0	10.56±0.84a	53.40±6.05a	28.88±4.88a	7.16±1.38a	20.09±5.55b
Se1	9.20±1.37ab	54.50±1.60a	29.53±0.61a	6.76±0.38a	26.50±0.33a
Se2	9.70±0.32ab	56.76±3.12a	27.06±2.27a	6.48±0.59a	21.21±2.21ab
Se3	8.30±0.65b	56.32±4.18a	28.64±2.74a	6.74±1.15a	22.15±1.43ab

化物后再向地上部运输,根系吸收亚硒酸盐的速率快于其转化为可向地上部运输的形态,导致水稻根部累积大量的硒^[18]。本研究结果表明,外源硒的添加,有利于硒向地上部和水稻籽粒的转移和累积。Asher 等^[26]的研究表明,当植物供给亚硒酸钠时,亚硒酸盐在根部被植物吸收后,转化为硒酸盐和其他硒化物向地上部运输,再由无机硒转化为有机硒,参与植物代谢。当叶面喷施亚硒酸钠的时候,有机硒转化率随施硒浓度的增加而增加^[27]。此外,这可能还与水稻适应高硒浓度的环境有关,尽管随着外源硒添加量的增加,根中累积硒的量占比下降,但是根部硒浓度也显著增加,高浓度硒对作物有毒害作用,为了降低根部硒浓度,吸收的硒就相对更多地转移至地上部分。目前对于硒在水稻体内的运转机制还不是很清楚,有研究认为,硒在水稻体内有再运转过程,在水稻灌浆期之后,剑叶内的硒会向水稻籽粒转移,不同水稻品种对硒的再转运存在差异,籽粒硒积累能力差的水稻品种硒从颖壳到稻胚和胚乳之间的运转存在障碍,而籽粒硒积累能力强的品种,根系以及叶片具有较强的再运转硒的能力^[28]。

施入土壤的硒会发生形态转化,在淹水条件下更容易转化为不溶水形态,不能被植物吸收利用,研究认为在 pH 为 6.5~7.5 的条件下 Se(0,-II)与 Se(IV)之间、Se(IV)与 Se(VI)之间相互转化的 Eh 分别为 0~100 mV 和 200~450 mV^[29]。吸附和固定也是硒有效性降低的重要原因,土壤铁铝氧化物、黏粒含量和黏粒矿物组成对亚硒酸钠的吸附和解吸有重要影响,硒的有效性随着土壤黏粒含量升高而降低,土壤氧化铁的含量与硒的吸附量呈正相关关系^[30];土壤有机质对硒的有效性有双重影响,一方面有机质矿化增加有效硒含量,另一方面有机质具有较强的固定土壤中硒的能力,降低硒的有效性,但一般认为有机质对硒的影响主要表现为固定作用^[18]。因此,外源硒在水稻当季的利用率不高,这提高了硒肥施用给环境带来的风险隐患。减少外源硒的吸附、固定,提高外源硒的利用率,是今后研究中需要解决的重要问题。

4 结论

外源硒施入土壤对水稻的株高、分蘖、结实率、产量、根系生物量等均没有显著影响,但能显著增加水稻植株各部位的全硒含量。硒在水稻体内各部位的含量大小关系为:稻根>茎叶>糙米>精米>谷壳,但在各主要部位的总累积大小为:茎叶>糙米>精米>稻根>谷壳。

在自然土壤上种植水稻吸收的硒相对更多地富集于水稻根系,而外源添加四价硒的土壤,水稻吸收的硒相对更多地转移至地上部位,甚至更容易在糙米和精米中富集。水稻对外源硒的当季利用率较低,不到 5%。外源硒的后续效应及对于如何提高水稻对外源硒的利用还需更多的研究。

参考文献:

- [1] Combs G F Jr. Selenium in global food systems[J]. *British Journal Nutrition*, 2001, 85(5):517-547.
- [2] Cao Z H, Wang X C, Yao D H, et al. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta[J]. *Environment International*, 2001, 26(5):335-339.
- [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, 148:324-329.
- [4] 张现伟,郑家奎,张涛,等.富硒水稻的研究意义与进展[J].杂交水稻, 2009, 24(2):5-9.
ZHANG Xian-wei, ZHENG Jia-kui, ZHANG Tao, et al. Research progress of selenium-enrich rice[J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(2):5-9. (in Chinese)
- [5] 朱薇,刘庆,杨守祥.不同花生品种富硒能力[J].中国油料作物学报, 2016, 38(2):260-266.
ZHU Wei, LIU Qing, YANG Shou-xiang. Selenium accumulation ability of different peanut varieties[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, 2016, 38(2):260-266. (in Chinese)
- [6] 朱文东.不同水稻品种的硒富集能力及品质分析[J].河南农业科学, 2014, 43(10):11-14.
ZHU Wen-dong. Enrichment ability of selenium and quality of different rice varieties[J]. *Journal of Henan Agricultural Science*, 2014, 43(10):11-14. (in Chinese)
- [7] 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, 258:1-11.
- [8] 周鑫斌,于淑惠,赖凡.水稻品种间吸收和转运硒特性差异机制研究[J].土壤学报, 2014, 51(3):594-599.
ZHOU Xin-bin, YU Shu-hui, LAI Fan. Mechanisms of differences in selenium absorption and transport between rice plants different in cultivar[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3):594-599. (in Chinese)
- [9] 李圣男,岳士忠,李花粉,等.基施富硒有机肥料对玉米和土壤硒含量的影响[J].农业资源与环境学报, 2015, 32(6):571-576.
LI Sheng-nan, YUE Shi-zhong, LI Hua-fen, et al. Effect of Se-enriched organic fertilizers on selenium accumulation in corn and soil[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(6):571-576. (in Chinese)
- [10] 郑甲成,刘婷.不同浓度硒肥对籼稻硒含量和产量的影响[J].土壤, 2014, 46(1):88-93.
ZHENG Jia-cheng, LIU Ting. Selenium content and yield of indica rice under different selenium concentration[J]. *Soils*, 2014, 46(1):88-93. (in Chinese)

- [11] 唐玉霞,王慧敏,吕英华,等. 硒肥浸种对小麦生长发育及产量和籽粒含硒量的影响[J]. 麦类作物学报, 2010, 30(4): 731-734.
TANG Yu-xia, WANG Hui-min, LV Ying-hua, et al. Effects of selenium seed soaking on growth, yield and seeds selenium content of wheat [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2010, 30(4): 731-734. (in Chinese)
- [12] 郭美俊,郭平毅,原向阳,等. 叶面喷施亚硒酸钠对谷子光合特性及产量构成的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(6): 1099-1107.
GUO Mei-jun, GUO Ping-yi, YUAN Xiang-yang, et al. Effects of foliar application of Na_2SeO_3 on photosynthetic characteristics and yield of foxtail millet[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Science*, 2014, 28(6): 1099-1107. (in Chinese)
- [13] 李登超,朱祝军,韩秋敏,等. 硒对菠菜、小白菜生长及抗氧化活性的研究[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2003, 21(1): 5-8.
LI Deng-chao, ZHU Zhu-jun, HAN Qiu-min, et al. Effects of selenium on the growth and antioxidative activity in spinach and pakchoi [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Agricultural Science)*, 2003, 21(1): 5-8. (in Chinese)
- [14] 张 驰,周大寨,吴永尧,等. 硒对油菜苗期生长和生理生化指标的影响[J]. 湖北农业科学, 2007, 46(3): 63-65.
ZHANG Chi, ZHOU Da-zhai, WU Yong-yao, et al. Effect of selenium on growth and some physiological and biochemical characteristics in rape seed seedling[J]. *Hubei Agricultural Science*, 2007, 46(3): 63-65. (in Chinese)
- [15] 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.
JIANG Chao-qiang, SHEN Jia, ZU Chao-long. Selenium uptake and transport of rice under different Se-enriched natural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 809-816. (in Chinese)
- [16] Carbonell B A, Burlo C F, Mataix B J. Arsenic uptake, distribution, and accumulation in bean plants: Effect of arsenite and salinity on plant growth and yield[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, 20(10): 1419-1430.
- [17] 岳士忠,李圣男,乔玉辉,等. 中国富硒大米的生产与富硒效应[J]. 中国农学通报, 2015, 31(30): 10-15.
YUE Shi-zhong, LI Sheng-nan, QIAO Yu-hui, et al. Studies on Se-enriched rice production and the effect of Se-enrichment[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2015, 31(30): 10-15. (in Chinese)
- [18] 张均华,朱练峰,禹盛苗,等. 稻田硒循环转化与水稻硒营养研究进展[J]. 应用生态学报, 2012, 23(10): 2900-2906.
ZHANG Jun-hua, ZHU Lian-feng, YU Sheng-miao, et al. Selenium cycling and transformation in paddy field and selenium nutrition of rice: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(10): 2900-2906. (in Chinese)
- [19] 董广辉,陈利军,武志杰. 植物硒素营养及其机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2002, 13(11): 1487-1490.
DONG Guang-hui, CHEN Li-jun, WU Zhi-jie. Research advances in plant selenium nutrition and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(11): 1487-1490. (in Chinese)
- [20] 陈 平,余土元,陈惠阳,等. 硒对镉胁迫下水稻幼苗生长及生理特性的影响[J]. 广西植物, 2002, 22(3): 277-282.
CHEN Ping, YU Tu-yuan, CHEN Hui-yang, et al. Effects of Se on growth and some physiological characteristics of rice seedling under Cd stress[J]. *Guilaia*, 2002, 22(3): 277-282. (in Chinese)
- [21] Broyer T C, Johnson C M, Huston R P. Selenium and nutrition of Astragalus: I. Effects of selenite or selenate supply on growth and selenium content[J]. *Plant & Soil*, 1972, 36(3): 635-649.
- [22] 徐 云,王子健,王文华,等. Se 和环境中富里酸对小麦种子发芽的影响及其生理特性[J]. 应用生态学报, 1997, 8(4): 439-444.
XU Yun, WANG Zi-jian, WANG Wen-hua, et al. Effect of selenium and fulvic acid on seed germination of wheat and its physiological properties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(4): 439-444. (in Chinese)
- [23] 段曼莉,付冬冬,王松山,等. 亚硒酸盐对四种蔬菜生长、吸收及转运硒的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(3): 658-665.
DUAN Man-li, FU Dong-dong, WANG Song-shan, et al. Effects of different selenite concentrations on plant growth, absorption and transport of selenium in four different vegetables[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(3): 658-665. (in Chinese)
- [24] 贾宏昉,宋家永,王海红,等. 硒对作物生理、生长发育及产量、品质的影响研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2006, 40(4): 449-454.
JIA Hong-fang, SONG Jia-yong, WANG Hai-hong, et al. Research progress on the effect of selenium on physiological functions, growth, yield and quality of crops [J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2006, 40(4): 449-454. (in Chinese)
- [25] Abrams M M, Shennan C, Zazoski J, et al. Selenomethionine uptake by wheat seedling[J]. *Agronomy Journal*, 1990, 82: 1127-1130.
- [26] Asher C J, Butler G W, Peterson P J. Selenium transport in root systems of tomato[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1977, 28: 279-291.
- [27] 王晋民,赵之重,段 冰. 叶面施硒对不同蔬菜硒富集和产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007(7): 103-106.
WANG Jin-min, ZHAO Zhi-zhong, DUAN Bing. Effect of selenium applications on the selenium accumulation and yield on several kinds of vegetables[J]. *Journal of Northwest A&F University*, 2007(7): 103-106. (in Chinese)
- [28] 周鑫斌,施卫明,杨林章. 水稻子粒硒累积机制研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(3): 503-507.
ZHOU Xin-bin, SHI Wei-ming, YANG Lin-zhang. Study on mechanisms of selenium accumulation on rice grains[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(3): 503-507. (in Chinese)
- [29] 熊远福,李辉勇,刘军鸽,等. 水稻土壤中硒的价态转化及溶解性研究[J]. 环境化学, 1999, 18(4): 338-343.
XIONG Yuan-fu, LI Hui-yong, LIU Jun-ge, et al. Study on valence state transformation and solubility of selenium in paddy soils[J]. *Environmental Chemistry*, 1999, 18(4): 338-343. (in Chinese)
- [30] 沈燕春,周 俊. 土壤硒的赋存状态与迁移转化[J]. 安徽地质, 2011, 21(3): 186-191.
SHEN Yan-chun, ZHOU Jun. Occurrence, migration and transformation of selenium in soil[J]. *Geology of Anhui*, 2011, 21(3): 186-191. (in Chinese)