

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.002

王琪, 王雅琦, 万亚男, 等. 不同形态叶面硒肥对水稻吸收和转运硒的影响. 土壤, 2022, 54(6): 1101–1107.

## 不同形态叶面硒肥对水稻吸收和转运硒的影响<sup>①</sup>

王琪, 王雅琦, 万亚男, 李花粉\*

(中国农业大学资源与环境学院, 农田土壤污染防控与修复北京市重点实验室, 北京 100193)

**摘要:** 通过田间试验, 研究了不同形态叶面硒肥对水稻吸收和转运硒的影响。与空白对照相比, 亚硒酸钠、硒酸钠、硒代蛋氨酸和化学纳米硒在水稻扬花期一次施用(15 g/hm<sup>2</sup>)可使水稻籽粒、颖壳和秸秆的硒含量分别提高 0.06 ~ 0.64、0.36 ~ 0.83 和 0.32 ~ 0.75 mg/kg。籽粒硒的回收率大小顺序为: 硒代蛋氨酸(34.6%)>亚硒酸钠(15.7%)>硒酸钠(15.0%)>化学纳米硒(6.6%); 硒在水稻各部位中的分配比例的高低顺序为: 秸秆>籽粒>颖壳。此外, 硒用量与水稻籽粒的硒含量呈显著线性相关。按照黑龙江省富硒大米的地方标准(DB23T 790—2004), 达到一等大米的硒含量指标(0.20 ~ 0.30 mg/kg), 亚硒酸钠单施的施用量为 6.01 ~ 10.62 g/hm<sup>2</sup>, 腐植酸+亚硒酸钠复合肥的施用量为 4.26 ~ 8.63 g/hm<sup>2</sup>。硒代蛋氨酸的富硒效率高于其他 3 种硒形态, 腐植酸+亚硒酸钠复合肥的富硒效率高于亚硒酸钠单施。

**关键词:** 水稻; 叶面喷施; 生物强化; 硒回收率

**中图分类号:** S365 **文献标志码:** A

### Effects of Different Forms of Foliar Selenium Fertilizers on Se Accumulation and Distribution in Rice (*Oryza sativa* L.)

WANG Qi, WANG Yaqi, WAN Ya'nan, LI Huafen\*

(Beijing Key Laboratory of Farmland Soil Pollution Prevention and Remediation, College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Field experiments were carried out to study the effects of different forms of foliar selenium fertilizers on the absorption and transportation of Se by rice. Compared with the control treatment, sodium selenite, sodium selenate, selenomethionine (SeMet), chemical nano-Se foliar applied once (15 g/hm<sup>2</sup>) at the flowering stage of rice increase Se contents of grain, husk and straw by 0.06–0.64, 0.36–0.83 and 0.32–0.75 mg/kg respectively. Grain Se recovery is in the order of SeMet (34.6%) > sodium selenite (15.7%) > sodium selenate (15.0%) > chemical nano-Se (6.6%); while Se distribution in rice is in the order of straw>grain>husk. Furthermore, Se content in rice grains is increased significantly with the increase of Se application dosage. When applied selenite of 6.01–10.62 g/hm<sup>2</sup> or humic acid+selenite (HA+Se) of 4.26–8.63 g/hm<sup>2</sup>, Se content in rice grains meets the standard first grade for Se-enriched rice proposed by Heilongjiang Province (0.20–0.30 mg/kg, DB23T 790—2004). Se biofortification efficiency of SeMet is greater than other three Se forms, and HA+Se is greater than selenite.

**Key words:** Rice; Foliar application; Biofortification; Se recovery

硒(Se)是一种人体健康所必需微量元素, 缺硒会引发克山病、大骨节病、心肌变性、肌营养不良、白内障等多种疾病<sup>[1]</sup>。全球性的缺硒现象较为普遍, 据统计, 我国约 72% 的国土面积, 以及将近 2/3 的居民因膳食结构中硒含量不足, 处于缺硒或临界缺硒的边缘<sup>[2-3]</sup>, 究其根本原因可能是由土壤硒的有效性低从而引起的人体植食性硒摄入缺乏所导致<sup>[4]</sup>。因此,

可以通过粮食作物的农艺生物强化措施来提高人体的硒营养水平。而水稻是我国第一大粮食作物, 不仅能提供人体所需 80% 左右的能量<sup>[5]</sup>, 还能供给日常所需的大部分的蛋白质和微量元素<sup>[6]</sup>。因此, 富硒水稻生产是我国目前应用最广泛和最有效的补硒途径。

虽然水稻在人体摄取硒的方面具有重要作用, 但是全球范围内大米的硒含量普遍较低。调查表明我国

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41907146)和公益性行业(农业)科研专项(201303106)资助。

\* 通讯作者(lihuafen@cau.edu.cn)

作者简介: 王琪(1988—), 女, 河北黄骅人, 博士, 实验师, 主要研究方向为功能农业。E-mail: wangqi88@cau.edu.cn

市售的 160 种大米中硒含量的变化范围约为 0.003 ~ 0.049 mg/kg, 均值为 0.026 mg/kg<sup>[7-8]</sup>, 并且富硒品种和非富硒品种之间的差异显著<sup>[9]</sup>, 即使是在富硒品种的种植过程中也需要额外再施用富硒肥料来维持籽粒高硒含量的性状表达<sup>[10]</sup>。通常情况下, 叶面喷施的富硒效果优于土壤基施<sup>[11]</sup>。叶面喷施硒肥的主要形态为硒酸钠或亚硒酸钠, 且两者富硒效果的高低规律尚未达成统一定论, 还需更深入的研究来证实。除了硒酸钠和亚硒酸钠外, 硒代蛋氨酸或化学纳米硒等其他形态硒肥的效果还鲜有报道。前期的研究结果表明小麦和玉米喷施硒代蛋氨酸时, 其生物有效性低于亚硒酸钠和硒酸钠<sup>[12]</sup>。由于水稻和小麦、玉米的生长环境和作物品种差异较大, 所以在之前研究的基础上, 通过大田试验研究了水稻喷施不同形态的硒肥对水稻籽粒富集硒的特征, 并且根据不同的施肥用量与籽粒硒含量的相关性来估算最佳施肥用量, 旨在为富硒大米的开发提供科学的理论依据和技术支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

水稻田间试验位于黑龙江省农科院田间试验基地(哈尔滨市方正县德善镇, 128°83'E、45°83'N), 属于寒温带大陆性季风气候, 年均降水量 579.7 mm, 年均日照时数 4 446 h。试验点的表层土壤(0~20 cm)基本理化性质如表 1 所示。表层土壤的硒含量为 0.20 mg/kg, 根据硒元素生态景观的界限值划分<sup>[13]</sup>, 试验点土壤属于足硒土壤(0.175~0.450 mg/kg)。本试验供试水稻品种为稻花香 2 号, 为北方种植的粳稻品种之一。水稻种子由黑龙江省农科院土壤肥料与环境资源研究所提供。

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Properties of tested soil

类型	pH	有机质 (g/kg)	全氮 (g/kg)	有效磷 (mg/kg)	速效钾 (mg/kg)	总硒 (mg/kg)
黑土	5.96	34.00	2.30	69.80	169.00	0.20

### 1.2 试验设置

**1.2.1 不同形态叶面硒肥对水稻硒含量的影响** 试验一于 5 月播种水稻, 同年 9 月收获。在水稻种植过程中, 通过叶面喷施不同形态的硒肥来增加水稻籽粒的硒含量。富硒叶面肥在水稻扬花期(7 月)一次喷施, 喷施量分别为 15 g/hm<sup>2</sup>(以 Se 计)。试验共包括 5 个处理: 空白(水, CK)、亚硒酸钠(Se(IV))、硒酸钠(Se(VI))、硒代蛋氨酸(SeMet)和化学纳米硒(nano-Se), 每个处

理 3 个重复, 共 15 个试验小区。小区随机排列, 面积为 5 m × 5 m, 各小区之间设有 1 m 的缓冲带。试验中所使用的硒试剂均为分析纯试剂, 先溶解于去离子水中配成硒肥母液, 再加自来水稀释(400 L/hm<sup>2</sup>), 用电动喷雾器进行叶面喷施。硒酸钠和亚硒酸钠购于 Sigma 公司(St Louis, MO, USA), 硒代蛋氨酸由山西大学提供, 化学纳米硒参照 Lin 和 Wang<sup>[14]</sup>的方法制备。化学纳米硒的粒径由透射电子显微镜(TEM-EDAX, Hitachi HT7700, Japan)测定, 其颗粒大小为 (142.8 ± 9.1) nm。

**1.2.2 叶面硒肥的施用量对水稻硒含量的影响及其相关性** 试验二设置 3 个硒施用量(0、15 和 30 g/hm<sup>2</sup>, 以 Se 计)和 2 个施用方式(亚硒酸钠单施、腐殖酸+亚硒酸钠复合施用, 记作 Se(IV)和 HA+Se(IV)), 共 5 个处理, 每个处理 3 个重复, 共 15 个小区。每个小区随机排列, 面积为 5 m × 5 m, 小区之间设有 1 m 的缓冲带。试验中亚硒酸钠购于 Sigma 公司(St Louis, MO, USA), 腐殖酸由中项国际有限公司提供, 腐殖酸用量为 1.5 L/hm<sup>2</sup>。田间作物的管理和硒肥施用方法与试验一相同。

### 1.3 样品制备与测定

水稻成熟后每个小区分别收取 1 m<sup>2</sup> 水稻稻谷样品, 晒干后用脱粒机去除颖壳, 称重计算每平方米籽粒和颖壳的产量并换算为 t/hm<sup>2</sup>。采取 S 型五点采样法采集各个小区的籽粒、秸秆和颖壳样品, 充分混匀备用。植物样品用自来水清洗 3 遍, 去离子水清洗 3 次, 在 105 °C 杀青 30 min, 75 °C 烘干, 粉碎并过 0.5 mm 尼龙网筛。土壤样品风干, 剔除样品中植物根系, 研钵研磨过 0.15 mm 尼龙网筛, 样品存放于自封袋中待测。

称取 0.250 0~0.251 0 g 植物或土壤样品, 分别通过硝酸或王水(HCl:HNO<sub>3</sub>=3:1)浸泡过夜, 微波消解(美国 CEM 公司, MARS5)。消解液加 6 mol/L 盐酸后, 经 100 °C 水浴 2 h 将六价硒还原为四价硒<sup>[15]</sup>, 使用双道原子荧光光度计(北京吉天, AFS-920)测定溶液中的硒含量。样品消解及水浴过程中使用的各种酸均为优级纯, 分析过程加入空白及国家标准物质(GBW10014 和 GBW07410)进行分析质量控制, 分析过程中硒的回收率达到 85%~110%。测定过程中使用的硒标准贮备液(100 mg/L)购于国家环保总局标准样品研究所。

### 1.4 数据处理

相关指标计算公式如下(均以干物质质量(DW)计):  
籽粒中硒的总量(g/hm<sup>2</sup>)=籽粒硒含量(mg/kg)×籽

$$\text{粒产量}(\text{kg}/\text{hm}^2)/1\ 000 \quad (1)$$

$$\text{颖壳中硒的总量}(\text{g}/\text{hm}^2)=\text{颖壳硒含量}(\text{mg}/\text{kg})\times\text{颖壳产量}(\text{kg}/\text{hm}^2)/1\ 000 \quad (2)$$

$$\text{籽粒硒的回收率}(\%)=\text{籽粒中硒的总量}/15(\text{g}/\text{hm}^2)\times 100 \quad (3)$$

$$\text{颖壳硒的回收率}(\%)=\text{颖壳中硒的总量}/15(\text{g}/\text{hm}^2)\times 100 \quad (4)$$

$$\text{转移系数}(\text{TF})=\text{籽粒中硒含量}(\text{mg}/\text{kg})/\text{秸秆中硒含量}(\text{mg}/\text{kg}) \quad (5)$$

试验数据表示为 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), 图采用 Sigmaplot 12.5 软件绘制。

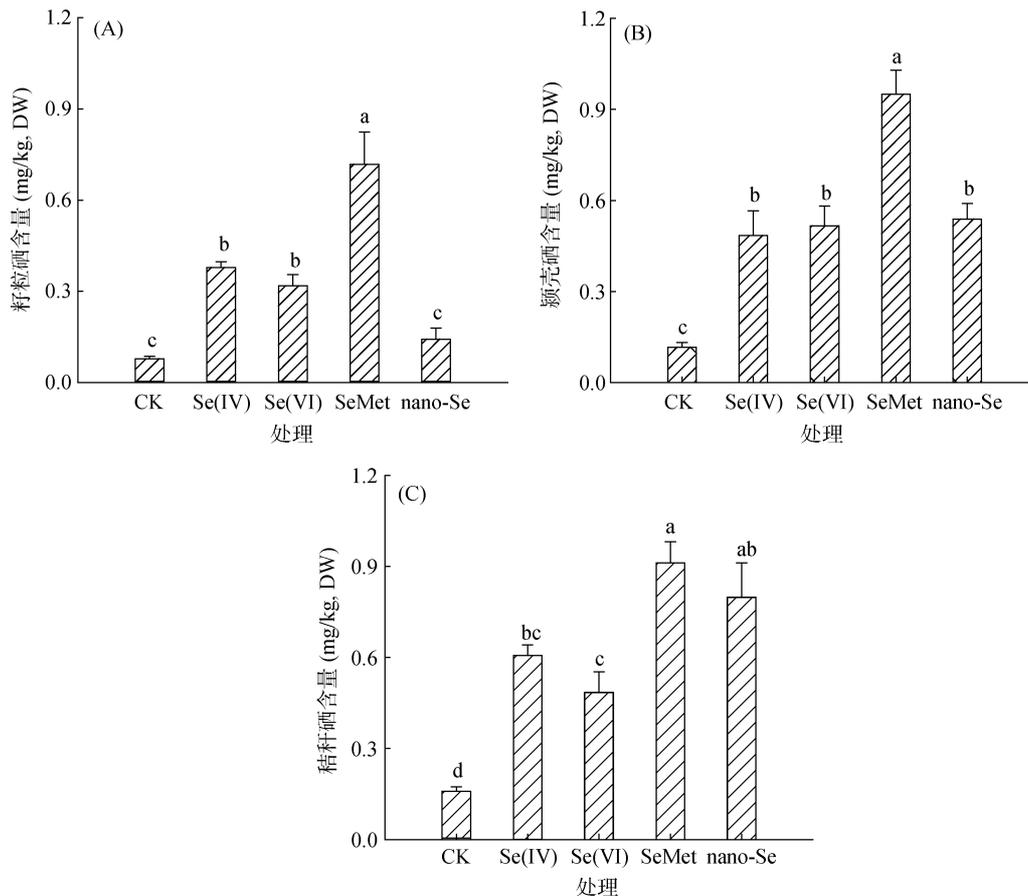
## 2 结果与分析

### 2.1 不同形态叶面硒肥对水稻硒含量的影响

图 1 是试验一中不同形态硒处理对水稻地上部硒含量的影响。根据黑龙江省富硒大米的现行地方标准(DB23T 790—2004)中规定, 富硒稻谷中硒含量范围为 0.10 ~ 0.30 mg/kg<sup>[16]</sup>。但是, CK 处理中的籽粒硒含量较低, 仅为 0.08 mg/kg, 尚未达到富硒大米的

含量要求(图 1A)。当对水稻叶面喷施 15 g/hm<sup>2</sup>的硒肥后, 籽粒的硒含量增加了 0.06 ~ 0.64 mg/kg, 相当于每克硒施用到每公顷农田中将增加 0.004 ~ 0.043 mg/kg 的籽粒硒含量。不同形态的硒肥处理水稻籽粒的硒含量差异显著( $P<0.05$ ), SeMet 处理水稻籽粒的硒含量最高, nano-Se 处理的籽粒硒含量最低, 前者的硒含量比后者高出 4.03 倍。而 Se(IV) 和 Se(VI) 两个处理下的水稻籽粒的硒含量无显著性差异。

叶面喷施不同形态硒肥显著提高水稻颖壳和秸秆的硒含量(图 1B、1C)。与 CK 相比, 喷施硒肥处理颖壳和秸秆中的硒含量分别显著提高 3.04 倍 ~ 6.92 倍和 2.03 倍 ~ 4.70 倍( $P<0.05$ )。SeMet 处理的颖壳和秸秆硒含量最高, 分别比其他喷硒处理高 76.4% ~ 96.1% 和 14.1% ~ 87.9%。同时, 不同形态的硒肥处理, 水稻籽粒、颖壳和秸秆硒含量的高低顺序也不同。在 SeMet 和 Se(VI)处理下, 水稻各部位硒含量的先后顺序为: 颖壳>秸秆>籽粒; 然而, 在 Se(IV) 和 nano-Se 处理下, 水稻各部位硒含量的先后顺序为: 秸秆>颖壳>籽粒。



(A. 籽粒, B. 颖壳, C. 秸秆; 数据表示为均值±标准误差(n=3); 图中小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ ), 下同)

图 1 不同形态叶面硒肥处理下水稻各部位的硒含量

Fig. 1 Se contents in different rice parts treated with different forms of foliar Se fertilizers

## 2.2 不同形态叶面硒肥对水稻产量、硒回收率和转移系数的影响

表 2 为不同形态叶面硒肥对水稻产量、硒回收率和转移系数的影响。总体上,水稻籽粒和颖壳产量均值分别为 6.54 t/hm<sup>2</sup> 和 1.44 t/hm<sup>2</sup>;叶面硒肥的施用均能增加籽粒和颖壳的产量,但增产不显著。施用不同形态的叶面硒肥,水稻籽粒和颖壳的产量分别比 CK 高出 17.1%~36.5% 和 3.4%~29.3%。其中,SeMet 处理的籽粒产量最高,而 Se(VI) 处理的颖壳产量最

高。水稻籽粒和颖壳中硒的回收率是用来评价不同形态的叶面硒肥的富硒效果。结果表明,不同形态的硒肥能显著影响水稻籽粒和颖壳中硒的回收率( $P<0.05$ )。SeMet 处理籽粒的硒回收率最高;而 Se(VI) 和 Se(IV) 处理的硒回收率次之,且两处理间差异不显著;nano-Se 处理籽粒的硒回收率最低,且比其他处理低 56.1%~80.9%。同样,SeMet 处理颖壳硒回收率最高且各处理的先后顺序为:SeMet>Se(VI)>nano-Se>Se(IV)。

表 2 不同形态叶面硒肥对水稻产量、硒回收率和转移系数的影响  
Table 2 Rice yields, Se recoveries and transfer factors under different forms of foliar Se fertilizers

处理	籽粒产量(t/hm <sup>2</sup> )	颖壳产量(t/hm <sup>2</sup> )	籽粒硒回收率(%)	颖壳硒回收率(%)	转移系数
CK	5.35 ± 0.26 a	1.25 ± 0.04 a	—	—	0.50 ± 0.04 c
Se(IV)	6.27 ± 0.27 a	1.29 ± 0.08 a	15.7 ± 0.2 b	4.1 ± 0.6 b	0.62 ± 0.03 b
Se(VI)	7.07 ± 0.44 a	1.61 ± 0.14 a	15.0 ± 2.1 b	5.5 ± 0.7 b	0.66 ± 0.03 ab
SeMet	7.31 ± 0.41 a	1.55 ± 0.07 a	34.6 ± 4.2 a	9.8 ± 0.9 a	0.78 ± 0.09 a
nano-Se	6.72 ± 0.64 a	1.49 ± 0.15 a	6.6 ± 2.2 c	5.3 ± 0.5 b	0.19 ± 0.06 d
<i>P</i>	0.059 0	0.133 2	0.000 4	0.001 8	0.000 2

注:表中数据表示为均值±标准误差( $n=3$ );同列数据小写字母不同表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

转移系数是指籽粒中某元素的含量与秸秆中含量的比值,用来评价植物从秸秆向籽粒运输和富集该元素的能力。转移系数越大,则从秸秆向籽粒的转运能力越强。不同形态的硒肥处理能显著影响硒元素在水稻体内的转移系数(表 2,  $P<0.05$ )。在 SeMet 处理下,硒在水稻体内的转移系数最高;而在 nano-Se 处理下,硒在水稻中的转移系数最低;前者的转移系数比后者高 3.11 倍。此外,秸秆的产量是通过水稻的秸秆籽粒比即草谷比换算得出,根据苑亚茹<sup>[17]</sup>对 57 个样本分析得到水稻的草谷比均值为 1.01。所以,在此基础上估算得出水稻秸秆的产量均值为 6.71 t/hm<sup>2</sup>(数据未列出)。根据水稻地上各部位的产量和硒含量可以计算得出, nano-Se 处理下的水稻籽粒、颖壳、秸秆中的硒总量分别占地上部硒总量的 13.7%、11.2% 和 75.1%;而在其他处理下水稻籽粒、颖壳、秸秆中的硒总量分别占地上部硒总量的 29.5%~38.6%、9.0%~12.7% 和 50.3%~60.3%(图 1, 表 2)。

## 2.3 硒肥施用量对水稻硒含量的影响及其相关性

图 2 结果表明不同硒肥施用量显著影响水稻籽粒、颖壳和秸秆中的硒含量( $P<0.05$ ),亚硒酸钠肥料的施用方式(单施或复合施用)对籽粒、颖壳和秸秆中硒含量无显著性影响,且两个因素之间无交互作用。随着施肥量的增加,水稻籽粒、颖壳和秸秆的硒含量随之增加。除施肥量 30 g/hm<sup>2</sup> 下 HA+Se(IV) 处理颖壳硒含量低于 Se(IV) 处理外,其他施肥量下

HA+Se(IV)处理的籽粒、颖壳和秸秆硒含量均高于 Se(IV) 处理。根据黑龙江省富硒大米的地方标准(DB23T 790—2004)规定的一等大米的硒含量范围为 0.20~0.30 mg/kg,进行水稻籽粒硒含量和硒肥施用量之间的相关性分析(图 3)。结果表明,硒肥用量和 水稻籽粒硒含量符合一元线性相关关系。若叶面单施 Se(IV) 使水稻籽粒的硒含量介于 0.20~0.30 mg/kg,则需要 Se(IV)的施用量为 6.01~10.62 g/hm<sup>2</sup>;而喷施 HA+Se(IV)复合肥料时,需要的 HA+Se(IV)复合肥的施用量为 4.26~8.63 g/hm<sup>2</sup>;后者比前者的施用量约少 2 g/hm<sup>2</sup> 左右。此外,施用 15 g/hm<sup>2</sup> 和 30 g/hm<sup>2</sup> HA+Se(IV)复合肥料时,水稻籽粒产量比相同施用量的 Se(IV)单施的产量高出 13.7%(数据未列出)。因此,上述结果表明富硒大米的生物强化过程中,与 Se(IV) 单施相比较,HA+Se(IV) 复合施用能增加籽粒产量并且减少硒肥的施用量。

## 3 讨论

不同形态的叶面硒肥能显著影响水稻籽粒中硒含量和回收率(图 1A, 表 2)。本研究中,在 SeMet 处理下,水稻籽粒的硒含量和回收率显著高于其他处理,表明 SeMet 的生物有效性较强。但是 Wang 等<sup>[12]</sup>对小麦和玉米叶面喷施 SeMet 时,其籽粒的硒含量和回收率与 Se(IV) 处理的结果相近。上述结果不一致的原因可能是由于作物叶片的延展面积不同,对叶

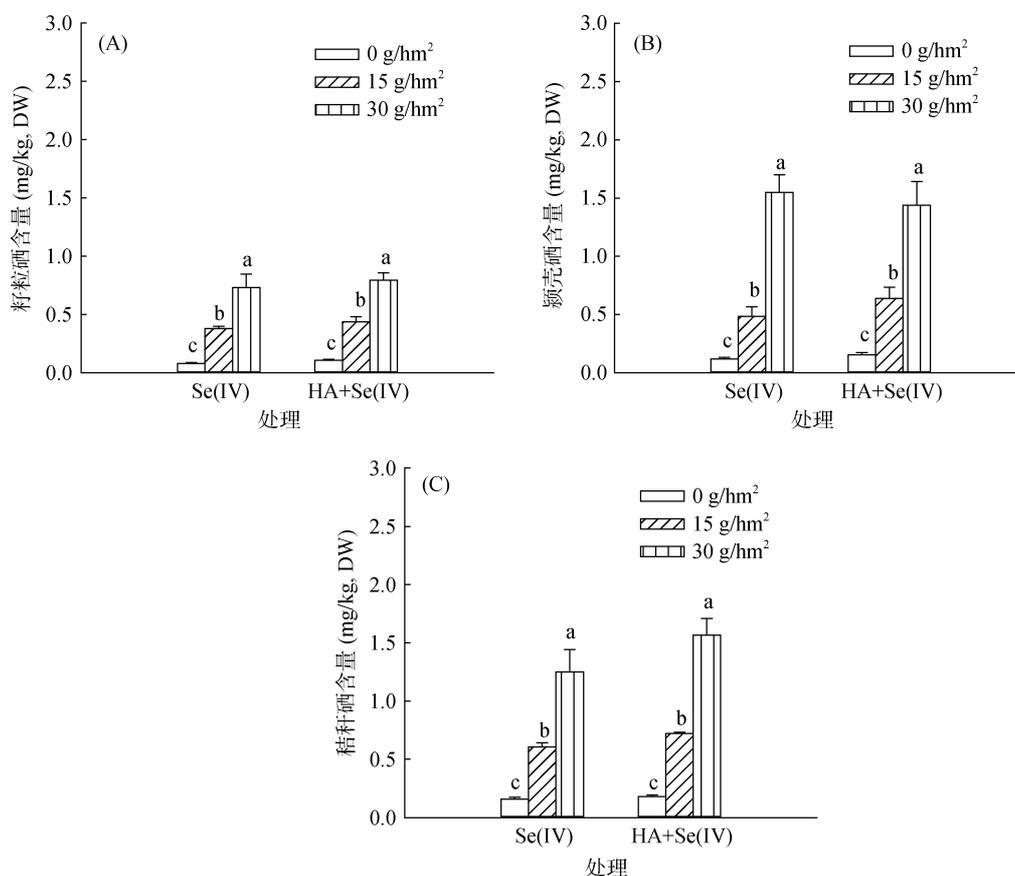
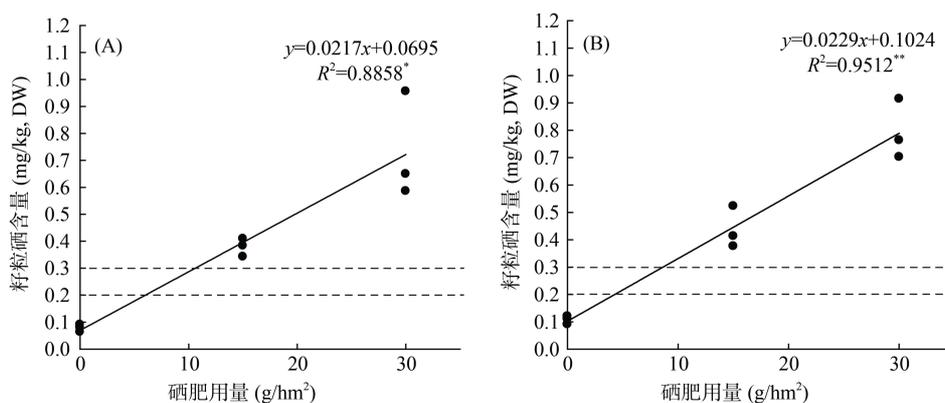


图 2 亚硒酸钠和腐植酸+亚硒酸钠处理下水稻各部位的硒含量  
Fig. 2 Se contents in different rice parts treated with Se (IV) and HA+Se (IV)



(A. 亚硒酸钠; B. 腐植酸+亚硒酸钠; \*, \*\*分别表示相关性达  $P<0.05$  和  $P<0.01$  显著水平; 图中两条虚线表示黑龙江省富硒大米地方标准 (DB23T790—2004) 规定的一等大米的硒含量范围)

图 3 水稻籽粒硒含量和硒肥施用量之间的相关性

Fig. 3 Correlations between Se content in rice grains and application dosage of Se fertilizers

面肥料的吸收承载力也不同,小部分的硒肥可能会残留在土壤表层而被土壤所固定。水稻生长在淹水条件下,喷施硒肥而残留在土壤中的 SeMet 可能会溶解在水田中而再次被根系吸收利用,所以生物有效性较高。相反, nano-Se 处理下水稻籽粒的硒含量和回收率均最低(图 1A, 表 2), 表明 nano-Se 的富硒效果和

转移效率低于其他处理。这一结果可能是由秸秆对 nano-Se 的吸附、固定作用所导致。前人研究报道指出纳米颗粒只有穿过植物细胞壁后才能转移到细胞的原生质体中<sup>[18]</sup>, 而且细胞壁的最大孔隙直径约为 5 nm<sup>[19]</sup>, 由此推断出小于 5 nm 的纳米直径颗粒才能穿过细胞壁被植物吸收利用。由于本研究所用化学纳

米硒的粒径远大于细胞壁孔,所以推测其为导致较少量的硒被转移至籽粒中的主要原因。此外,即使在同样的硒肥形态处理条件下,不同水稻品种之间的富硒效率存在显著差异。例如,本研究表明 Se(IV) 和 Se(VI) 处理的籽粒硒含量和回收率的结果相近,而 Deng 等<sup>[20]</sup>的研究结果表明 Se(VI)处理(叶面喷施)的水稻籽粒硒含量比 Se(IV)处理的硒含量高 35.9%。同样,本研究中,对稻花香 2 号水稻喷施 15 g/hm<sup>2</sup> 的 Se(VI) 后,每克硒施用到每公顷农田中将增加 0.016 mg/kg 的籽粒硒含量(图 1A);而前人的研究在对特优 59 水稻品种喷施 20 g/hm<sup>2</sup> 的 Se(VI)时,每克硒施用到每公顷农田中将增加 0.028 mg/kg 的籽粒硒含量<sup>[21]</sup>,前者比后者的富硒效率低 35.7%。

不同形态的叶面硒肥显著影响了水稻颖壳和秸秆的硒含量和分配比例(图 1B、1C)。SeMet 处理下颖壳和秸秆的硒含量最高,nano-Se 处理次之,Se(IV) 和 Se(VI)最低且两处理间无显著差异。各处理下硒在水稻中的分配比例的高低顺序为:秸秆>籽粒>颖壳(图 1 和表 2)。同样在晏娟等<sup>[22]</sup>研究中也发现水稻叶面喷施硒肥后,硒的分配比例高低为:稻草>稻谷。此外,不同叶面硒肥形态还能显著影响硒的转移系数(表 2,  $P<0.05$ )。在 SeMet 处理下,硒在水稻体内的转移系数比纳米硒高出 3.11 倍(表 2),表明纳米硒在水稻秸秆向籽粒转移的能力较弱,生物有效性较低,推测可能是由于纳米硒进入水稻体内后大部分与体内的酶或蛋白发生反应形成含硒多糖和硒蛋白等有机硒,被镶嵌在秸秆内参与水稻的生理作用,但还需要硒的形态分析和同位素标记联用技术进行深入探究。

大量研究表明,在适宜的时间施用适量的硒肥能显著增加水稻籽粒的产量。池忠志等<sup>[23]</sup>的研究结果表明,在水稻齐穗之后 6~12 d 时叶面喷施硒肥,水稻的增产效果最佳,随着喷施时期的延后,增产幅度会逐渐降低。田间叶面喷施 15 g/hm<sup>2</sup> 硒肥的水稻产量最高,而较高的硒肥用量可能会影响水稻的生长<sup>[24]</sup>。本研究表明,虽然在水稻扬花期硒肥的施用不能显著增加籽粒和颖壳的产量,但是硒肥处理下籽粒和颖壳的产量分别比空白对照处理高出 17.1%~36.5% 和 3.4%~29.3%(表 2),表明在水稻扬花期施用硒肥有一定的增产效果。迟凤琴等<sup>[25]</sup>通过比较不同时期喷施硒肥对水稻产量的影响,也发现在扬花期喷施硒肥的增产效果明显。此外,在同等的施肥量下,HA+Se(IV) 处理的籽粒产量比 Se(IV) 处理高出 13.7%,表明腐殖酸与亚硒酸盐复合施用能增加水稻

籽粒的产量。这一结果产生可能是因为腐殖酸参与植物体内的氧化还原过程,促进植物的呼吸作用,进而促进植物的生长<sup>[26]</sup>。

本研究表明水稻籽粒的硒含量与硒肥用量呈线性正相关关系(图 3)。在一定施肥量范围内,稻谷的硒含量随着亚硒酸盐施用量的增大而增加,但施肥量增加到一定程度后,如果继续增加施用量,稻谷的硒含量将不再增加<sup>[27]</sup>。在本研究中最大施肥量(30 g/hm<sup>2</sup>) 时,水稻籽粒的硒含量尚未达到最高值(图 3A)。同样,在玉米上喷施亚硒酸盐时,玉米籽粒的硒含量也与硒肥用量呈一元线性相关关系,当每克硒施用到每公顷农田中将增加 0.008 mg/kg 的籽粒硒含量<sup>[28]</sup>,其籽粒硒含量的增长速度仅为水稻的一半左右(图 1A),表明水稻对叶面硒肥的响应要优于玉米。另外,HA+Se(IV)处理的籽粒硒含量高于 Se(IV) 处理(图 2A),表明腐殖酸与 Se(IV)复合施用的富硒效果高于 Se(IV) 单施。不施肥时水稻籽粒的硒含量为 0.08 mg/kg,尚未达到黑龙江省富硒大米的硒含量要求(0.10~0.30 mg/kg),加之叶面硒肥施用后的残留效应较低<sup>[12]</sup>,因此,需要每年施用硒肥来维持富硒大米的硒含量水平。如果叶面喷施 Se(IV)使水稻籽粒达到黑龙江省一等富硒大米的硒含量范围(0.20~0.30 mg/kg),那么需要 Se(IV)的施用量比喷施 HA+Se(IV)复合肥多出 2 g/hm<sup>2</sup>左右。由于腐殖酸中含有多种活性的官能团,如羧基、醇羟、基酚羟基等,能与人体所需的元素络合形成稳定的络合物<sup>[29]</sup>,叶面喷施之后可能不易被微生物分解或挥发损失至大气中,所以 HA+Se(IV)复合施用能增加籽粒产量、减少硒肥的施用量,更环保、经济、高效。

## 4 结论

1)叶面喷施硒肥能提高水稻籽粒和颖壳的产量,但是增产效果不显著。除了 nano-Se 处理的籽粒硒含量外,叶面喷施硒肥能显著提高水稻地上各部位的硒含量水平。

2)不同硒形态能显著影响水稻地上各部位的硒含量、硒回收率和转移系数。综合对比得出,不同形态叶面硒肥的富硒效果和转移系数的先后顺序为 SeMet>Se(VI)、Se(IV)>nano-Se。

3)水稻地上部的硒含量与硒肥用量呈线性相关关系,HA+Se(IV)复合肥施用量为 4.26~8.63 g/hm<sup>2</sup> 时,可以使水稻籽粒的硒含量达到 0.20~0.30 mg/kg,比 Se(IV)单施更环保、经济、高效。

## 参考文献:

- [1] Rayman M P. Selenium and human health[J]. *The Lancet*, 2012, 379(9822): 1256–1268.
- [2] 黄开勋, 徐辉碧. 硒的化学、生物化学及其在生命科学中的应用[M]. 2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009.
- [3] 王莹. 硒的土壤地球化学特征[J]. *现代农业科技*, 2008(17): 233, 236.
- [4] Winkel L H E, Johnson C A, Lenz M, et al. Environmental selenium research: From microscopic processes to global understanding[J]. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(2): 571–579.
- [5] Tetens I, Hels O, Khan N I, et al. Rice-based diets in rural Bangladesh: How do different age and sex groups adapt to seasonal changes in energy intake? [J]. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 78(3): 406–413.
- [6] Hels O, Hassan N, Tetens I, et al. Food consumption, energy and nutrient intake and nutritional status in rural Bangladesh: Changes from 1981–1982 to 1995–1996[J]. *European Journal of Clinical Nutrition*, 2003, 57(4): 586–594.
- [7] 方勇. 外源硒在水稻籽粒中的生物强化和化学形态研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2010.
- [8] 甄燕红, 成颜君, 潘根兴, 等. 中国部分市售大米中 Cd、Zn、Se 的含量及其食品安全评价[J]. *安全与环境学报*, 2008, 8(1): 119–122.
- [9] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. *土壤*, 2007, 39(5): 731–736.
- [10] Lidon F C, Oliveira K, Ribeiro M M, et al. Selenium biofortification of rice grains and implications on macronutrients quality[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 22–29.
- [11] Ros G H, Rotterdam A M D, Bussink D W, et al. Selenium fertilization strategies for bio-fortification of food: An agro-ecosystem approach[J]. *Plant and Soil*, 2016, 404(1/2): 99–112.
- [12] Wang Q, Yu Y, Li J X, et al. Effects of different forms of selenium fertilizers on Se accumulation, distribution, and residual effect in winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(6): 1116–1123.
- [13] 谭见安. 环境生命元素与克山病: 生态化学地理研究[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 1996.
- [14] Lin Z H, Wang C R C. Evidence on the size-dependent absorption spectral evolution of selenium nanoparticles[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2005, 92(2/3): 591–594.
- [15] Fujii R, Deverel S J, Hatfield D B. Distribution of selenium in soils of agricultural fields, western San Joaquin valley, California[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(5): 1274–1283.
- [16] 黑龙江省农业委员会. 富硒大米: DB23T 790—2004[S]. 哈尔滨: 黑龙江省质量技术监督局, 2004.
- [17] 苑亚茹. 我国有机废物的时空分布及农用现状[D]. 北京: 中国农业大学, 2008.
- [18] Dietz K J, Herth S. Plant nanotoxicology[J]. *Trends in Plant Science*, 2011, 16(11): 582–589.
- [19] Carpita N, Sabularse D, Montezinos D, et al. Determination of the pore size of cell walls of living plant cells[J]. *Science*, 1979, 205(4411): 1144–1147.
- [20] Deng X F, Liu K Z, Li M F, et al. Difference of selenium uptake and distribution in the plant and selenium form in the grains of rice with foliar spray of selenite or selenate at different stages[J]. *Field Crops Research*, 2017, 211: 165–171.
- [21] Chen L C, Yang F M, Xu J, et al. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(18): 5128–5130.
- [22] 晏娟, 朱同贵, 张忠平, 等. 不同供硒水平对水稻硒的吸收和累积特性研究[J]. *土壤*, 2021, 53(2): 272–276.
- [23] 池忠志, 郑家国, 姜心禄, 等. 硒肥喷施时期对水稻产量和籽粒中硒含量的影响[J]. *耕作与栽培*, 2010(4): 13–14.
- [24] 方勇, 陈曦, 陈悦, 等. 外源硒对水稻籽粒营养品质和重金属含量的影响[J]. *江苏农业学报*, 2013, 29(4): 760–765.
- [25] 迟凤琴, 匡恩俊, 张久明, 等. Se 肥施用方式和施用时期对水稻含 Se 量及产量的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(6): 560–564.
- [26] 陈新, 顾和平, 朱成松. 腐殖酸对大豆幼苗生长的影响[J]. *大豆通报*, 1998(6): 17.
- [27] 杨益花, 袁卫明, 单建明, 等. 叶面硒肥施用量对稻谷总硒含量及产量的影响[J]. *河北农业科学*, 2013, 17(3): 51–54.
- [28] Wang J W, Wang Z H, Mao H, et al. Increasing Se concentration in maize grain with soil- or foliar-applied selenite on the Loess Plateau in China[J]. *Field Crops Research*, 2013, 150: 83–90.
- [29] 李光林. 腐殖酸与几种重金属离子的相互作用及影响因素研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2002.