

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.02.008

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. 土壤, 2021, 53(2): 272–276.

## 不同供硒水平对水稻硒的吸收和累积特性研究<sup>①</sup>

晏娟<sup>1,2</sup>, 朱同贵<sup>1</sup>, 张忠平<sup>2</sup>, 樊剑波<sup>3\*</sup>

(1 安徽光明槐祥工贸集团有限公司, 合肥 238000; 2 巢湖学院化学与材料工程学院, 合肥 238000; 3 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:** 以“南粳 9108”为材料, 在巢湖流域研究田间条件下不同供硒水平(Se 0、20、40 和 60 g/hm<sup>2</sup>)以及等量硒肥二次施用对水稻产量和硒吸收、累积、转运及分配的影响。结果表明: 一次性施用不同浓度硒肥对水稻有增产作用, 但是增产效果甚微; 施用硒肥能够显著促进水稻茎、叶和穗的硒含量, 但随着时间的推移, 茎、叶和穗的含硒量均出现上升再下降趋势; 稻谷、糙米及精米中的硒含量与硒肥施用量呈显著正相关, 硒肥处理平均硒含量依次为 0.279、0.150、0.055 mg/kg, 分别较对照不施硒肥高 309%、142% 和 333%; 地上部硒累积量与施硒水平呈极显著的正相关, 随着施硒量的增加, 尽管硒的表观利用率是增加的, 但硒转运系数和硒的收获指数显著下降。等量硒肥二次分施较一次性施用对产量有较为显著的促进作用, 该处理下水稻产量较对照增加 15%; 等量硒肥二次施用增加了稻壳和米糠中的硒含量, 精米中的硒没有增加; 较一次施用, 等量硒肥二次施用肥料表观利用率较高, 硒肥的收获指数和转运系数显著下降, 地上部累积更多的硒在稻草中。综上所述, 外源硒的添加确实能增加大米硒含量, 使其达到国家富硒大米硒含量标准范围; 但结果同时显示水稻中的硒相当大的一部分累积在谷壳、谷糠及稻草中, 可考虑充分利用。

**关键词:** 供硒水平; 水稻; 吸收; 累积

**中图分类号:** S511; S147.22 **文献标志码:** A

### Effect of Se Supplying Levels on Se Absorption and Accumulation in Rice

YAN Juan<sup>1,2</sup>, ZHU Tonggui<sup>1</sup>, ZHANG Zhongping<sup>2</sup>, FAN Jianbo<sup>3\*</sup>

(1 Anhui Guangming Huaixiang Industry & Trade Group Co., Ltd, Hefei 238000, China; 2 School of Chemistry & Material Engineering, Chaohu University, Hefei 238000, China; 3 Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** In this study, a field experiment was conducted in Chaohu Lake Basin with rice variety “Nangjing 9108” as the test material to investigate rice yield and selenium (Se) uptake, accumulation, translocation and distribution in rice under different Se supplying levels (0, 20, 40 and 60 g/hm<sup>2</sup>) with single and two-time fertilization. The results showed that under single Se fertilization, there was no significant increase in rice yield between different Se supplying levels. Se supplying significantly increased Se contents in stems, leaves and panicles of rice, but they also showed the trend of increasing and decreasing with time. Se contents in rice, brown rice and milled rice were positively correlated with Se supplying levels, and the average Se contents in rice, brown rice and milled rice with Se supplying were 0.279, 0.150 and 0.055 mg/kg, respectively, which was 309%, 142% and 333% higher than that of CK (no Se fertilizer). Se accumulation in rice shoots was positively correlated with Se supplying level, and Se transport coefficient and harvest index significantly decreased, although Se apparent utilization rate was increased with the increase of Se supplying levels. Two-time fertilization increased significantly rice yield than single fertilization, and rice yield increased by 15% compared with CK. Compared with single fertilization, two-time fertilization increased Se contents in rice husk and rice bran while not in milled rice. The harvest index and transporting coefficient of Se fertilizer significantly decreased with higher apparent utilization rate of Se fertilizer, which indicated more Se accumulated in straws. In conclusion, exogenous Se can increase Se content in rice and makes it meet the national standard of selenium-rich rice, however, a significant amount of Se is accumulated in hull, chaff and straw, which is need to be used fully.

**Key words:** Selenium supplying levels; Rice; Absorption; Accumulation

<sup>①</sup>基金项目: 安徽省高等学校省级自然科学基金项目(KJ2017A448)和 2018 年度安徽省博士后研究人员科研活动经费资助。

\* 通讯作者(jbfan@issas.ac.cn)

作者简介: 晏娟(1980—), 女, 安徽宁国人, 博士, 副教授, 主要研究方向为植物营养学。E-mail: juanyan1980@sina.com

硒是人体中重要的微量元素，能提高人的免疫力，还能对一些癌症、心脑血管疾病等起到预防作用。世界卫生组织公布的数据表明，全球有 40 多个国家属于低硒或缺硒地区，中国是国际公认的“缺硒大国”之一，有 72% 的县(市)低硒或缺硒，其中 30% 为严重缺硒地区，7 亿多人口存在不同程度的硒摄入不足<sup>[1]</sup>。据中国营养学会报道，人均硒摄入量总量仅有 26 ~ 32  $\mu\text{g}/\text{d}$ ，远低于建议每日摄入量 55  $\mu\text{g}/\text{d}$ <sup>[2]</sup>。

水稻是中国的主要粮食作物之一，其硒含量高与全国大多数人口硒营养状况密切相关。对水稻施用硒肥生产富硒水稻已是最便捷、最大众化的补硒方式。目前关于水稻施用硒肥的研究较多，诸如 Wang 等<sup>[3]</sup>发现抽穗期后对水稻喷施硒叶面肥(40 mg/L, Se 10.5 g/hm<sup>2</sup>)，水稻籽粒硒含量从 0.03  $\mu\text{g}/\text{g}$  提高到 1.54  $\mu\text{g}/\text{g}$ ；Giacosa 等<sup>[4]</sup>发现叶面喷施 Na<sub>2</sub>SeO<sub>4</sub>(Se 10.5 g/hm<sup>2</sup>)，使糙米中硒含量从 0.36 mg/kg 提高到 1.64 mg/kg。但是，不同水稻对硒的吸收能力不同，不同土壤上水稻对肥料硒的吸收也不一样，不同供硒水平下，水稻对硒的吸收也有一定的差异。例如耿建梅等<sup>[5]</sup>研究表明，同种处理下水稻品种捷丰优 629 和谷丰优 8312 在成熟期不同器官硒含量差异显著；黄青青等<sup>[6]</sup>报道在水稻成熟期，施用硒肥(Se<sup>4+</sup>)后，红壤、黑土、灰钙土中水稻籽粒硒含量分别由对照中的 0.34、0.05 和 0.05 mg/kg 增加到 0.94、0.14 和 0.20 mg/kg；在吴永饶等<sup>[7]</sup>研究中，水稻供硒水平 0.5 ~ 30 mg/kg，籽粒含硒量 4.057 ~ 35.716 mg/kg。Williams 等<sup>[8]</sup>分析了来自中国、美国、埃及等 11 个国家的 1 092 份水稻材料粳米中硒的含量，结果发现，埃及的稻米中硒平均含量最低，只有 9 ng/g，83% 的稻米硒含量低于 10 ng/g；美国的水稻粳米中硒平均含量最高，为 180 ng/g；中国的水稻粳米硒含量变化最大，最高值与最低值间相差 1 368 ng/g。可见，我国稻米硒含量波动范围较大，硒肥供应水平控制不好可能会导致稻米硒含量超过国家允许的富硒稻米标准<sup>[9]</sup>，食用后对人体健康造成危害。

由此，本文主要研究不同供硒水平下，适合巢湖流域生长的水稻对硒的吸收、累积、转运和利用特性，为该地区生产安全可靠的富硒大米提供理论参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

巢湖位于长江水系的下游，流域面积为 12 938 km<sup>2</sup>，集水范围包括合肥、巢湖、肥东、肥西、庐江、舒城、无为等两市五县，灌溉面积达 400 多万亩(15 亩=

1 hm<sup>2</sup>)。巢湖年均气温 16.0  $^{\circ}\text{C}$ ，年均降雨量 1 046 mm。试验于 2017 年在安徽省巢湖市坝镇兆河农场进行。较以往相比，2017 年水稻灌浆期阴雨天稍多，9—10 月份雨天达到 25 d，对水稻产量有一定影响。

### 1.2 供试材料

供试水稻品种为南粳 9108，由安徽光明槐祥工贸集团有限公司提供。田间小区试验供试土壤为水稻土，理化性质：pH 5.5，有机质 18.4 g/kg，全氮 1.02 g/kg，碱解氮 107.30 mg/kg，有效磷 7.64 mg/kg，速效钾 69.10 mg/kg，全硒 0.21 mg/kg。试验用硒肥为叶面肥，主要成分为纳米单质硒和复合稳定剂，由巢湖学院研制，含硒量 10 g/kg。

### 1.3 试验设计

根据硒肥施用量及施用次数不同，共设置 5 个处理：L0(Se 0 g/hm<sup>2</sup>)、L1(Se 20 g/hm<sup>2</sup>)、L2(Se 40 g/hm<sup>2</sup>)、L3(Se 60 g/hm<sup>2</sup>)和 L2t(Se 40 g/hm<sup>2</sup>，两次施用)。前 4 个处理中硒肥作一次于齐穗期(9 月 20 日)喷施；选取 L2 水平对照，L2t 处理中硒肥于齐穗期和齐穗期后 7 d 二次喷施(60%+40%)，每处理重复 3 次，随机区组排列，共 15 个小区，每小区面积为 42 m<sup>2</sup>。硒肥根据处理用量稀释于 2.5 L 水中喷施于叶面之上。

根据当地习惯，水稻采取撒播方式种植。水稻生长中于 9 月 20 日(施肥前)、10 月 6 日和 10 月 18 日随机取样一把(约 20 根)，洗净分茎、叶和穗 70  $^{\circ}\text{C}$  烘干至恒重后粉碎制样。水稻成熟后在每个小区中间收获 3 m<sup>2</sup> 以测稻谷、稻草产量，并取稻谷、稻草各 2 kg，风干后测干重以测定含水量，并留样测含硒量。

### 1.4 分析方法

植物样品中硒含量测定依据 GB 5009.93—2010 测定，即用 9 + 1 (V + V) 的 HNO<sub>3</sub> + HClO<sub>4</sub> 混酸于 170  $^{\circ}\text{C}$  下，采用电热板进行消解。溶液中硒含量均采用氢化物发生-原子荧光光度法测定<sup>[10]</sup>。

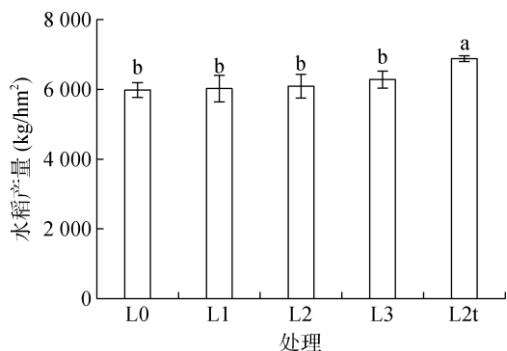
### 1.5 数据处理

所有数据采用 Excel 和 spss16.0 软件进行统计分析。

## 2 结果

### 2.1 施硒量对水稻产量的影响

由于 2017 年天气原因，水稻产量总体不是很高，各处理水稻产量为 5 606 ~ 6 980 kg/hm<sup>2</sup>，多数为 6 000 kg/hm<sup>2</sup> 左右(图 1)。硒肥施用对水稻增产作用甚微，L3 处理，即施硒量为 60 g/hm<sup>2</sup> 时，产量略高一点。二次喷施硒肥可使水稻产量较对照增加 899 kg/hm<sup>2</sup>。



(图中小写字母不同表示处理间差异达 P<0.05 显著水平, 下同)

图 1 不同供硒水平下水稻产量

Fig. 1 Rice yields under different Se supplying levels

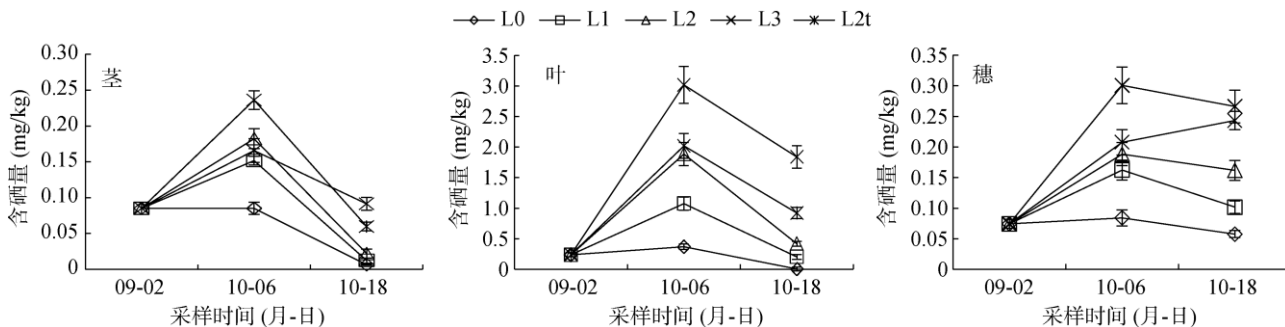


图 2 不同供硒水平下水稻茎、叶、穗硒含量动态变化

Fig. 2 Se contents in stems, leaves and ears of rice under different Se supplying levels

2.3 施硒量对水稻籽粒硒富集的影响

图 3 为各施硒量处理下水稻稻谷、糙米和精米的硒含量。由图可见, 稻谷含硒量明显高于糙米, 而糙米含硒量又明显高于精米。硒肥施用下, 稻谷、糙米和精米的平均硒含量为 0.279、0.150、0.055 mg/kg, 分别较对照不施硒肥高 0.211、0.088 和 0.042 mg/kg。稻谷和糙米的平均硒含量分别是精米的 5.07 倍和 2.73 倍。可见在水稻籽粒中, 硒主要富集在稻壳中, 其次是米糠, 而供人食用的精米中硒富集量很低。

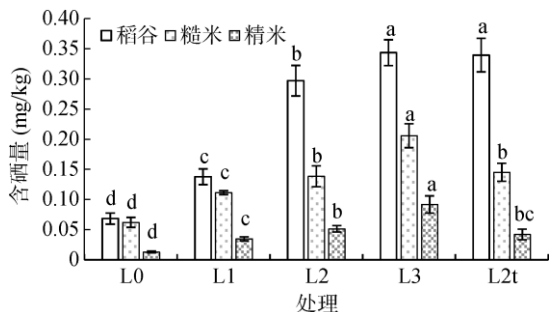


图 3 不同供硒水平下水稻稻谷、糙米和精米的含硒量

Fig. 3 Se contents in rice, brown rice and milled rice under different Se supplying levels

不施硒肥对照处理, 稻谷、糙米和精米硒含量分别仅有 0.068、0.062 和 0.013 mg/kg。稻谷、糙米和精米硒含量均随着硒肥用量的增加而显著提高, 至 L3

2.2 不同施硒量下水稻茎、叶、穗硒含量动态变化

图 2 反映施肥后两次取样中穗、茎和叶的硒含量动态变化。硒在叶片中含量最大, 其次是穗, 茎中含量最低。施用硒肥可以极显著地增加穗、茎和叶中的硒含量, 且施肥量和硒含量呈正比。施用硒肥 20~60 g/hm² (Se), 第一次取样中叶、穗和茎中硒含量分别较不施硒肥增加 0.71~2.65、0.12~0.26、0.07~0.10 mg/kg; 随着时间的推移, 第二次取样可见茎和叶的硒含量大量下降, 可能是硒向穗转运导致; 除了二次施肥和对照处理, 穗的硒含量也略微下降, 可能是籽粒灌浆稀释了硒的浓度。硒肥二次施用可有效提高茎、叶和穗中的硒含量。

处理最高。L2 和 L3 处理精米硒含量达到国家富硒水稻标准含量的下限, 分别是 0.05 g/kg 和 0.09 g/kg, 效果不是很显著。图中还显示, 硒肥分二次施用更有利于籽粒中的硒富集在稻壳中。

2.4 施硒量对水稻硒分配的影响

各施硒量处理中, 水稻的收获指数介于 0.41~0.46, 即稻草占据了较大部分重量。不论是稻谷还是稻草, 硒累积量均随施硒量的增加而增加(图 4)。值得注意的是, 硒肥分二次施用可显著增加水稻地上部硒累积量, 特别是稻草的硒累积量, L2t 处理中稻草的硒累积量是 L2 的 2.2 倍, 而稻谷硒累积量略高。

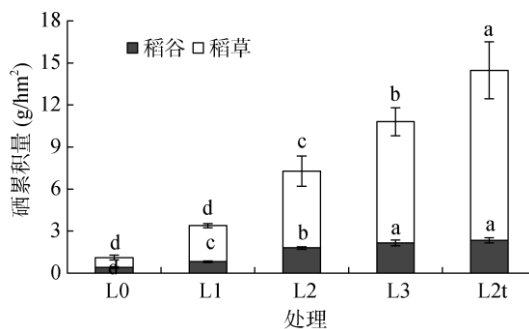


图 4 不同供硒水平下水稻稻谷和稻草的硒累积量

Fig. 4 Se accumulation in rice and rice straws under different Se supplying levels

除对照外,施肥处理中稻草的硒含量显著高于稻谷。硒收获指数是水稻稻谷硒累积量与地上部硒累积量的比值,表示硒在稻谷和稻草之间的分配比例。由图 4 和表 1 可见,水稻地上部的硒 60% 以上分布在稻草中。L2t 与 L2 处理相比,硒肥分两次施用较一次施用富集在稻草中的比例更大,达到 83.9%。

表 1 不同供硒水平下水稻硒收获指数、转运系数和表观利用率

Table 1 Se harvest indexes, transport coefficients and apparent utilization rates of rice under different Se supplying levels

处理	硒水平 (g/hm <sup>2</sup> )	硒收获 指数	硒转运 系数	硒表观利 用率(%)
L0	0	0.366 a	0.733 a	-
L1	20	0.244 b	0.414 b	11.4 b
L2	40	0.248 b	0.386 c	15.4 b
L3	60	0.200 c	0.365 c	16.1 b
L2t	40	0.161 d	0.243 d	33.4 a

注:表中同列数据小写字母不同表示处理间差异达  $P < 0.05$  显著水平。

## 2.5 施硒量对水稻硒转运及表观利用率的影响

硒转运系数为籽粒中硒浓度与茎叶中硒浓度之比,反映作物由营养器官向生殖器官运转硒的能力<sup>[11]</sup>。表 1 可见,不施硒肥时,茎叶中的硒向籽粒中转运能力最强;随着施硒量的增加,茎叶中硒向籽粒中转运能力下降,硒肥二次施用时代转运最低,更多地保留在稻草中。硒肥表观利用率是施硒肥区与不施硒肥区硒素累积量之差占施硒量的百分比。由表 1 可见,硒肥表观利用率整体不高,随着施硒量的增加,硒肥表观利用率呈略增加的趋势,但是,硒肥二次施用的表观利用率较一次施用增加一倍。

## 3 讨论

很多研究<sup>[7,12-16]</sup>表明施用硒肥可以显著增加水稻产量,但是施用量过高又会对产量产生抑制作用。本研究结果表明一次性施用不同浓度硒肥对水稻有增产作用,但是增产效果甚微,抑制作用未有体现,同周鑫斌<sup>[17]</sup>和韦叶娜等<sup>[14]</sup>的田间试验结果相似。周鑫斌<sup>[17]</sup>研究表明江苏省苏南地区水稻“龙晴 4 号”、“86 优 8”和“丙 9 652”叶面喷施亚硒酸钠后,水稻籽粒硒含量显著增加,但是产量没有显著差异变化。韦叶娜等<sup>[14]</sup>的研究中水稻品种“泰选 1 号”在不同硒浓度处理下产量均有提高,但差异均不显著;“粳选 1 号”在不同硒浓度处理下产量却呈增加趋势。施用硒肥促进水稻增产作用可能与水稻品种有一定关系。

同多数研究<sup>[1,15,18]</sup>结果一样,施用硒肥能够显著促进水稻茎、叶和穗的硒含量,但随着时间的推移,茎和叶的硒因向穗转移而迅速下降,稻穗因籽粒的充实,含硒量可能因被稀释而略降。稻谷、糙米及精米中的硒含量与硒肥施用量呈显著的正相关性。且硒含量高低为:稻谷>糙米>精米,显然,稻壳中含有大量的硒,这与李玉梅等<sup>[15]</sup>的报道一致。其次,米糠中存有的硒也较精米高,姜超强等<sup>[19]</sup>的研究表明硒含量在米糠中最高,但稻壳和精米没有差异,究其原因,可能是因水稻品种不同,这在周鑫斌等<sup>[1]</sup>的研究中也有所反映。

地上部硒累积量与施硒水平呈极显著的正相关,随着施硒量的增加,硒转运系数显著下降,这与姜超强等<sup>[19]</sup>的研究报道相反,可能是硒肥叶面喷施和土壤供硒的差异。尽管硒的表观利用率是增加的,但是,硒的收获指数在下降,显然,与稻谷相比,增加的硒肥更多累积在稻草中。

本研究发现增加等量硒肥二次分施较一次性施用对水稻产量有较为显著的促进作用。由于是硒肥二次施用,灌浆期中水稻茎、叶含硒量下降略慢,穗中硒含量未有下降。但是硒肥二次施用只是增加了稻壳和米糠中的硒含量,精米中的硒并没有增加。尽管硒肥二次施用肥料表观利用率较高,但是较一次施用,硒肥的收获指数和转运系数显著下降;因产水稻量增加的原因,稻谷的硒累积量较一次施用高,但地上部累积更多的硒在稻草中。

研究表明外源硒的添加确实能增加大米硒含量,使其达到国家富硒大米硒含量标准范围,但结果同时显示水稻中的硒相当大的一部分集中在稻草中,谷壳、谷糠及稻草含有大量的硒元素,可考虑充分利用。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 金国强,王治学,吴殿星. 富硒水稻研究进展[J]. 中国稻米, 2015, 21(5): 24-28.
- [3] Wang Y D, Wang X, Wong Y S. Generation of selenium-enriched rice with enhanced grain yield, selenium content and bioavailability through fertilisation with selenite[J]. Food Chemistry, 2013, 141(3): 2385-2393.
- [4] Giacosa A, Faliva M A, Perna S, et al. Selenium fortification of an Italian rice cultivar via foliar fertilization with sodium selenate and its effects on human serum selenium levels and on erythrocyte glutathione peroxidase activity[J]. Nutrients, 2014, 6(3): 1251-1261.
- [5] 耿建梅,王文斌,吴露露,等. 两个水稻品种富硒特性比较研究[J]. 土壤, 2014, 46(1): 66-69.

- [6] 黄青青, 杜威, 王琪, 等. 水稻对不同土壤中硒酸盐/亚硒酸盐的吸收和富集[J]. 环境科学学报, 2013, 33(5): 1423–1429.
- [7] 吴永尧, 彭振坤. 不同供硒水平对水稻生长的影响及水稻对硒的富集作用[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 1998, 24(3): 176–179.
- [8] Williams P N, Lombi E, Sun G X, et al. Selenium characterization in the global rice supply chain[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(15): 6024–6030.
- [9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化委员会. 富硒稻谷: GB/T 22499—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [10] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准 食品中硒的测定: GB 5009.93—2010[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.
- [11] Carbonell-Barrachina A A, Burló-Carbonell F, Mataix-Beneyto 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.
- [12] 段门俊, 田玉聪, 吴芸紫, 等. 叶面喷施亚硒酸钠对再生稻产量及品质的影响[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32(1): 96–102.
- [13] 穆婷婷, 杜慧玲, 景小兰, 等. 外源硒对谷子产量因子及硒含量的影响[J]. *作物杂志*, 2017(1): 73–78.
- [14] 韦叶娜, 杨国涛, 范永义, 等. 外源硒处理对优质地方水稻品种产量及稻米硒氮磷钾含量的影响[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(36): 14–19.
- [15] 李玉梅, 王根林, 李艳, 等. 水稻对有机态硒的吸收与积累[J]. *中国农学通报*, 2017, 33(10): 7–11.
- [16] 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.
- [17] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 叶面喷硒对水稻籽粒硒富集及分布的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(1): 73–78.
- [18] 张城铭, 周鑫斌. 不同施硒方式对水稻硒利用效率的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(1): 186–194.
- [19] 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.