

不同硒肥及施用方法对精米硒镉富集效率的影响

邓建红^{1*}, 龚建华^{2#}, 康敏², 郑威³, 黄石光⁴, 刘宏辉⁵, 向汉明⁶

¹株洲香之优农业科技发展有限公司, 湖南 株洲

²株洲市农业科学研究所, 湖南 株洲

³湖北省农科院农业经济技术研究所, 湖北 武汉

⁴佛山市铁人环保科技有限公司, 广东 佛山

⁵武汉华硒生物科技有限公司, 湖北 武汉

⁶湖南省桃源县富硒研究所, 湖南 常德

收稿日期: 2022年9月18日; 录用日期: 2022年10月17日; 发布日期: 2022年10月21日

摘要

为筛选富硒效率高且降镉效果好的含硒叶面肥(简称硒肥,下同),提高富硒稻米品质,本研究引进4种主推硒肥,采用3种施肥方法,进行两因素随机区组试验,并在3种镉污染农田验证富硒降镉效果。硒肥用量(以Se计)1.5 g/667m²,测定精米镉、总硒、有机硒含量。结果表明:1)不同硒肥的富硒效率有极显著差异($P \leq 0.01$,下同),精米硒含量排序为A3 > A1 > A4 > A2。其中:A3极显著高于A2、显著高于A4($P \leq 0.05$,下同),A1显著高于A2。说明不同硒肥因制作工艺及组分不同导致茎叶对硒的吸收、转化及转运存在明显差异。2)不同硒肥的硒生物转化率存在一定的差异,但无统计学意义。A1、A3、A4的有机硒占比均超99%,A2为98.31%,最低的处理组合是A2B1(97.75%),大田生产验证结果与小区试验基本一致。3)不同施肥方法的精米硒富集效果存在较大差异。与一次性施肥相比,A1、A3、A4分期施用(两次,下同)的精米硒富集效率均有不同程度的提高,其中:A1提高了43.5%,A3提高了20.03%,因此生产上A1、A3硒肥宜采用两次施肥方式;A4不同施肥方法的精米硒含量稳定,生产上可采用一次性施用。与不增施增效剂相比,A1施用增效剂的精米硒含量提高了22.87%,A3增幅较小(2.26%),A2和A4则出现不同程度的降低。4)不同施肥方法对硒生物转化率影响不大。与一次性施用相比,A1和A2分期施用的精米有机硒占比分别提高0.69%、1.33%,A3和A4则为负增长,增幅分别为-0.03%、-0.28%,说明A1、A2分期施用有利于提高精米硒品质。与不增施增效剂相比,A3配施增效剂的精米有机硒占比表现为正增长,其它3种硒肥则为负增长,说明硒增效剂对提高硒品质的作用因硒肥种类而异。5)水稻施用硒肥具有一定的降镉作用,但不同硒肥的降镉效果因土壤镉水平而异。当土壤镉含量0.28 mg/kg时,A1、A4的精米镉含量较低;在镉轻度污染时(0.45 mg/kg),A4的精米镉含量最低;在镉重度污染时(1.5 mg/kg),A1的降镉效果最好。不同施肥方法对精米镉含量有一定的影响,与一次性施肥相比,分期施肥的精米镉含量平均降低5.47%,其中:A4降低了33.22%,降镉效果显著高于其它硒肥。不同硒肥与施用方法间存在显著交互作用,精米镉含量最低的处理组合是A4B2。

*第一作者。

#通讯作者。

关键词

含硒叶面肥, 富硒效率, 有机硒占比, 降镉效果

Effects of Different Selenium Fertilizers and Application Methods on Enrichment Efficiency of Selenium and Cadmium in Refined Rice

Jianhong Deng^{1*}, Jianhua Gong^{2#}, Min Kang², Wei Zheng³, Shiguang Huang⁴, Honghui Liu⁵, Hanming Xiang⁶

¹Zhuzhou Xiangzhiyou Agricultural Technology Development Co., Ltd, Zhuzhou Hunan

²Zhuzhou Institute of Agricultural Sciences, Zhuzhou Hunan

³Institute of Agricultural Economy and Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan Hubei

⁴Foshan Tieren Environmental Protection Technology Co., Ltd., Foshan Guangdong

⁵Wuhan Huaxi Biotechnology Co., Ltd., Wuhan Hubei

⁶Taoyuan Institute of Selenium Enrichment, Changde Hunan

Received: Sep. 18th, 2022; accepted: Oct. 17th, 2022; published: Oct. 21st, 2022

Abstract

In order to screen selenium containing foliar fertilizer (hereinafter referred to as selenium fertilizer, the same below) with high selenium enrichment efficiency and good cadmium reduction effect, and improve the quality of selenium rich rice, this study introduced four main selenium fertilizers, adopted three fertilization methods, conducted two factor randomized block experiment, and verified the effect of selenium enrichment and cadmium reduction in three cadmium polluted farmland. The amount of selenium fertilizer (calculated by Se) is 1.5 g/667m², and the contents of cadmium, total selenium and organic selenium in milled rice are determined. The results showed that: 1) The selenium enrichment efficiency of different selenium fertilizers had a significant difference ($P \leq 0.01$, the same below). The selenium content of milled rice ranked A3 > A1 > A4 > A2. Among them, A3 is extremely significantly higher than A2, significantly higher than A4 ($P \leq 0.05$, the same below), and A1 is significantly higher than A2. The results showed that the absorption, transformation and transportation of selenium in the stems and leaves of different selenium fertilizers were significantly different due to different production processes and components. 2) There were some differences in selenium biotransformation rates among different selenium fertilizers, but there was no statistical significance. The proportion of organic selenium in A1, A3 and A4 exceeds 99%, while that in A2 is 98.31%. The lowest treatment combination is A2B1 (97.75%). The field production verification results are basically consistent with the plot test. 3) The effect of selenium enrichment in milled rice by different fertilization methods was quite different. Compared with one-time fertilization, the selenium enrichment efficiency of milled rice applied by A1, A3 and A4 in stages (twice, the same below) has been improved to varying degrees, in which A1 has

increased by 43.5% and A3 by 20.03%. Therefore, twice fertilization is recommended for A1 and A3 selenium fertilizers in production; A4 the selenium content of milled rice with different fertilization methods is stable, and one-time application can be used in production. Compared with no synergist, the selenium content of milled rice with synergist in A1 increased by 22.87%, the increase in A3 was small (2.26%), and A2 and A4 decreased in varying degrees. 4) Different fertilization methods had little effect on selenium biotransformation rate. Compared with one-time application, the proportion of organic selenium in milled rice applied by A1 and A2 in stages increased by 0.69% and 1.33% respectively, while that in A3 and A4 was negative, with an increase of -0.03% and -0.28% respectively, indicating that A1 and A2 in stages were beneficial to improving the quality of milled rice selenium. Compared with no synergist, the proportion of organic selenium in milled rice with A3 synergist showed a positive increase, while the other three selenium fertilizers showed a negative increase, indicating that the effect of selenium synergist on improving selenium quality varies with the type of selenium fertilizer. 5) The application of selenium fertilizer in rice has a certain cadmium reducing effect, but the cadmium reducing effect of different selenium fertilizers varies with the level of cadmium in soil. When the cadmium content in soil was 0.28 mg/kg, the cadmium content in milled rice of A1 and A4 was lower; When cadmium was slightly polluted (0.45 mg/kg), the cadmium content in milled rice of A4 was the lowest; When cadmium is heavily polluted (1.5 mg/kg), A1 has the best cadmium reduction effect. Different fertilization methods had a certain impact on the cadmium content of milled rice. Compared with one-time fertilization, the cadmium content of milled rice fertilized by stages decreased by 5.47% on average, of which: A4 decreased by 33.22%, and the cadmium reduction effect was significantly higher than that of other selenium fertilizers. There was significant interaction between different selenium fertilizers and application methods. The treatment combination with the lowest cadmium content in milled rice was A4B2.

Keywords

Foliar Fertilizer Containing Selenium, Selenium Enrichment Efficiency, Proportion of Organic Selenium, Cadmium Reduction Effect

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

硒是人体必需的微量营养元素，具有清除自由基、减轻重金属危害、延缓衰老等重要生理功能。硒与抗癌、防止心血管疾病等有重要关系[1] [2]。镉是人体非必需元素，对人体和动植物均有毒害作用，长期食用镉含量超标的食物，将面临慢性中毒的风险[3]。我国 72%县、市土壤存在不同程度的缺硒[4]，耕地土壤镉污染点位超标率为 7%，从硒资源与镉污染角度评价，土壤环境质量堪忧。水稻是我国的主粮，三分之二左右的人口以大米为主食，因此，开发富硒低镉大米成为水稻产业提质升级的主攻方向之一。

研究表明，水稻生长期施用硒肥，可显著提高大米中硒的含量[5] [6] [7]，可降低大米中 Cd 等重金属的含量[6] [7]，这为贫硒区开发富硒低镉功能大米提供了理论基础。但不同叶面硒肥种类其效果不同，且相同叶面肥在不同地点施用，其结果也存在差异[7]。为探索不同硒肥种类的富硒技术特点，提高株洲富硒水稻生产技术水平，本研究选用目前市场上 4 种主要的含硒叶面肥，采用 3 种施肥方法，进行两因素随机区组试验，并在 3 种镉污染农田验证富硒降镉效果，以期为高档富硒功能大米开发提供技术支撑，为富硒降镉型叶面肥的开发和利用提供参考。

2. 材料与方法

2.1. 试验材料

含硒叶面肥：“华龙西科”富硒(种植)专用营养液(生物有机硒肥)，由湖北华龙西科生物科技有限公司生产；“武汉华硒”生物纳米硒种植营养液(生物纳米硒肥)，由武汉华硒生物科技有限公司提供；“喷喷富”中量元素肥料，由佛山市铁人环保科技有限公司提供；“丰德多”生物硒复合肥，由湖南省常德市斯达尔生化有限公司生产。

水稻品种：改良型巴斯马蒂，由株洲香之优农业科技发展有限责任公司提供(1 等优质米)；拾两优 1817，由株洲市农业科学研究所选育(1 等优质米)；两优 121，由湖南鑫盛华丰种业科技有限公司、安徽省农业科学院水稻研究所、岳阳市金穗作物研究所、安徽超美农业投资有限公司选育(湘审稻 20170008)。

硒增效剂：包括I型、II型，由株洲香之优农业科技发展有限责任公司研发与提供。

2.2. 试验设计

小区试验：试验地点位于醴陵市孙家湾镇文家湾村保架楼组，土壤镉含量 0.28 mg/kg、硒含量低于检出限。试验设含硒叶面肥(A)、施用方法(B)两个因素。A1：生物有机硒肥，A2：生物纳米硒肥，A3：“喷喷富”中量元素肥料，A4：生物硒复合肥。B1：施用 1 次，施用时期为灌浆期；B2：施用 2 次，施用时期为抽穗期与灌浆期，量比 1:1.5；B3：施用 2 次，施用时期为抽穗期与灌浆初期，量比 1:1.5，抽穗期施肥时加入增效剂I型，灌浆初期施肥时加入增效剂II型。含硒叶面肥用量为 1.5 g/667m² (以 Se 计)。随机区组设计，三次重复，共 12 个小区。每小区面积 20 m²，株行距 20 cm × 26 cm，小区间距 50 cm。试验品种为改良型巴斯马蒂，于 6 月 20 号播种，7 月 6 号机插。肥水管理、病虫害防治等同大田生产。于 10 月 7 日田间取稻谷样，每小区取样 2 kg。样品晒干后送湖北省地矿局恩施实验室检测精米总硒、有机硒、镉含量，同时送广州广电计量检测股份有限公司检测精米总硒和镉含量。

生产试验：在小区试验的同时，在三个不同镉污染水平且土壤贫硒(低于检出限)的土壤上进行了生产验证。含硒叶面肥用量(以 Se 计)为 1.5 g/667m²，施肥方法为灌浆期一次性施用。试点 1：湘潭县谭家山镇长岭铺村石灰组，土壤轻度镉污染(0.45 mg/kg)，品种为两优 121。试点 2：醴陵市孙家湾镇文家湾村，土壤镉含量达到国家土壤环境质量三级标准(0.28 mg/kg)，品种为改良型巴斯马蒂。试点 3：株洲市农业科学研究所芦淞科研基地，土壤重度镉污染(1.5 mg/kg)，品种为拾两优 1817。稻谷收割前进行田间 5 点取样，每试点取稻谷样 2 kg。样品晒干后送湖北省地矿局恩施实验室检测精米总硒、有机硒、镉含量。

2.3. 检测方法

湖北省地矿局恩施实验室检测方法：硒的检测采用生态地球化学评价动植物样品分析方法第 2 部分：硒量的测定原子荧光光谱法 DZ/T0253.2-2014，仪器名称型号及仪器编号：原子荧光/AFS-230/HX-HY-2017-003；镉的检测采用生态地球化学评价动植物样品分析方法第 1 部分：锂、硼、钒等 19 个元素量的测定电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法 DZ/T0253.1-2014，仪器名称型号及仪器编号：ICP-MS/ICAP Qa/HX-HY-2015-001。

广州广电计量检测股份有限公司检测方法：GB 5009.268-2016 第一法，检测仪器为电感耦合等离子体质谱仪。

2.4. 数据处理方法

试验数据采用 Excel 2003 进行数据整理和统计分析，采用 Excel 的 TDIST 函数进行随机区组试验的多重比较(LSD)。

3. 结果与分析

3.1. 不同硒肥及施用方法对精米硒含量的影响

采用两家检测机构的平均值进行统计分析。结果表明,在株洲缺硒区通过施用含硒叶面肥,硒肥用量(以 Se 计) 1.5 g/667m² 条件下,4 种硒肥 3 种施肥方式的平均精米硒含量达 0.616 mg/kg,实现了稻米富硒,每人日食用这种富硒大米 100 g,就可满足人体基本的硒营养需要(WS/T 578.3-2017)。

由表 1 可知,不同施肥方法的精米硒富集效果存在较大差异。与一次性施肥相比,A1、A3、A4 分期施用(两次)的精米硒富集效率均有不同程度的提高,其中:A1 提高了 43.5%,A3 提高了 20.03%,因此,生产上 A1、A3 硒肥采用两次施肥方式为好;A4 增幅较小,稻米硒含量较稳定,说明该硒肥适于一次性施用,以减少施肥成本;A2 两次施用的硒富集效果较一次性施用减少了 64.4%,原因有待进一步研究。

不同硒肥对增效剂的富硒效果明显不同,其中,A1 效果最好,与不增施增效剂相比,其精米硒含量提高了 22.87%;A3 增幅较小(2.26%);A2 和 A4 则出现不同程度的降低。根据我们前期试验与生产应用效果,该增效剂具有促进叶片对硒吸收、提高稻米硒含量的作用,本试验仅 A1 增效明显,这可能与不同硒肥的营养组分差异及施用硒肥后持续高温有关。

由表 2 可知,不同硒肥的硒富集效果存在极显著差异,精米硒含量排序为 A3 > A1 > A4 > A2。其中:A3 极显著高于 A2、显著高于 A4,A1 显著高于 A2。笔者于 2018~2019 年对 A3 硒肥进行了多项应用技术研究,采用两次施肥方式(量比 1:1)的精米富硒效率为 0.33 mg/g,且两年多点大面积生产应用表现稻米硒含量稳定。本试验中 A3 精米富硒效率高达 0.707 mg/g,可能与供试产品的硒含量较标识值偏高、以及施用硒肥后持续高温有关。与此相反,A2 较 A1 和 A4 的富硒效率低 1 倍左右,可能的原因是供试硒肥产品的实际硒含量低于标识值。大田生产验证表明,4 种硒肥的精米硒含量排序与小区试验完全一致,说明小区试验结果符合真实情况。

Table 1. Total selenium content and analysis of refined rice

表 1. 精米总硒含量与分析表

处理	B1	B2	B3	平均	B2 较 B1 ± %	B3 较 B2 ± %	富硒效率(mg/g)
A1	0.434	0.623	0.766	0.608	43.50	22.87	0.405
A2	0.512	0.182	0.149	0.281	-64.4	-18.6	0.187
A3	0.929	1.115	1.140	1.061	20.03	2.26	0.707
A4	0.527	0.536	0.477	0.513	1.68	-11.0	0.342
平均	0.601	0.614	0.633	0.616	2.24	3.05	0.411

注:富硒效率是指 667 m² 稻田施 1 克 Se 时精米的硒含量(mg)。

Table 2. Variance analysis of total selenium content in refined rice

表 2. 精米总硒含量方差分析

变异来源	Df	SS	MS	F
区组	2	0.129	0.065	0.857
A	3	2.406	0.802	10.655**
B	2	0.058	0.029	0.385
A × B	6	0.568	0.095	1.258
误差	22	1.656	0.075	
总变异	35	4.817		

3.2. 不同硒肥及施用方法对精米硒品质的影响

大量研究表明,无机硒具有一定的毒副作用,因此,提高富硒大米的有机硒占比(%)至关重要。由表 3 可知,4 种硒肥的硒生物转化率都较高,有机硒占比平均达到 99.13%,其中:A1、A3、A4 均在 99% 以上,A2 最低为 98.31%。有机硒占比最低的处理组合是 A2B1 (97.75%)。大田生产验证结果与小区试验基本一致,4 种硒肥的精米有机硒占比平均 97.74%,其中:A1、A3、A4 均在 99% 以上,A2 最低为 93.24%,较小区试验 A2B1 低 4.51 个百分点。说明 A2 的硒生物转化率低于其它 3 种硒肥。分期施肥(B2)较一次性施用(B1)相比,A1 和 A2 精米有机硒占比的增幅分别为 0.69%、1.33%;而 A3 和 A4 则为负增长,增幅分别为-0.03%、-0.28%,说明 A1、A2 分期施肥有利于提高稻米的硒品质。分期施肥(配用增效剂(B3)与不施用增效剂(B2)相比,A3 硒肥表现为正增长,其它 3 种硒肥则为负增长,说明硒增效剂对提高硒品质的作用因硒肥种类而异。根据我们前期试验与生产应用效果,该增效剂对提高精米有机硒占比具有明显的作用,本试验效果不明显,可能与硒肥施用时期及后期的持续高温有关,因为后期高温可提高硒的生物转化率,从而在一定程度上掩盖了增效剂的作用。

Table 3. Analysis of the percentage (%) of organic selenium in milled rice

表 3. 精米有机硒占比(%)分析表

处理	B1	B2	B3	平均	B2 较 B1 ± %	B3 较 B2 ± %
A1	98.92	99.60	99.59	99.37	0.69	-0.01
A2	97.75	99.05	98.15	98.31	1.33	-0.91
A3	99.62	99.59	99.60	99.60	-0.03	0.01
A4	99.44	99.16	99.03	99.21	-0.28	-0.13
平均	98.93	99.35	99.09	99.13	0.42	-0.26

3.3. 不同硒肥及施用方法对精米镉含量的影响

研究表明,硒与镉具有拒抗作用。因此,水稻施用硒肥能够一定程度的降低大米的镉含量。由表 4 可知,不同施用方法的稻米镉含量存在较大差异,在同等硒用量条件下,4 种硒肥分期施用较一次性施用的精米镉含量平均降低了 5.47%,其中:A4 两次施用的精米镉含量较一次性施用降低了 33.22%,A2 降低了 6.5%,A1 降低了 3.99%,而 A3 则提高了 17.86%。与不施用增效剂相比,施用硒增效剂总体上促进了精米镉的积累,其中:A2 降低 8.5%,其它硒肥均有不同程度的提高。

方差分析表明(表 5),施用不同硒肥的精米镉含量有极显著差异。精米镉含量排序为 A4 < A2≈A1 < A3,其中:A4 极显著低于 A1、A2、A3,A2、A1 极显著低于 A3,A1 与 A2 之间无显著差异。不同硒肥与施用方法间存在显著交互作用,精米镉含量最低的处理组合是 A4B2,但与 A4B3、A2B2、A2B3、A1B2、A1B1、A4B1 无显著差异。

大田生产验证表明(图 1),4 种硒肥的精米镉含量与土壤镉含量均呈显著正相关, $R_1 = 0.9693$ ($P \leq 0.01$)、 $R_2 = 0.8723$ ($P \leq 0.05$)、 $R_3 = 0.9681$ ($P \leq 0.01$)、 $R_4 = 0.9815$ ($P \leq 0.01$)。当土壤镉含量在临界值附近时(醴陵孙家湾镇),A1、A4 的精米镉含量较低;在镉轻度污染时(湘潭县长岭乡),A4 的精米镉含量最低;在镉重度污染时(株洲市农科所科研基地),A1 硒肥的降镉幅度最大,较空白对照降低了 49.8%,其次是 A2,较空白对照降低了 27.9%。

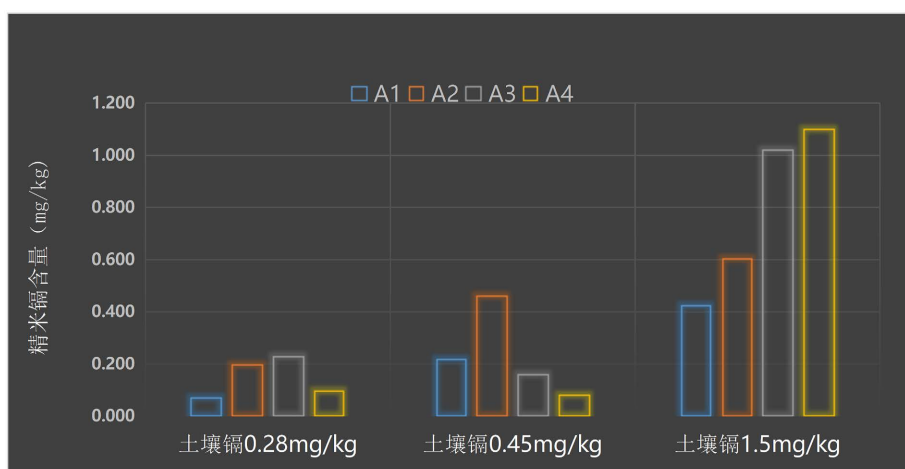
由此可见,硒肥的降镉效果主要与硒肥种类有关,而与施肥方式关系较小。在镉轻度污染农田以 A4 的降镉效果最好,而在重度污染农田以 A1 的降镉效果最佳。

Table 4. Cd content and analysis of milled rice**表 4.** 精米镉含量与分析表

处理	B1	B2	B3	平均	B2 较 B1 ± %	B3 较 B2 ± %
A1	0.234	0.225	0.260	0.240	-3.99	15.64
A2	0.247	0.231	0.211	0.230	-6.5	-8.5
A3	0.281	0.331	0.395	0.336	17.86	19.34
A4	0.240	0.160	0.196	0.199	-33.22	22.6
平均	0.250	0.237	0.266	0.251	-5.47	12.22

Table 5. Variance analysis of cadmium content in refined rice**表 5.** 精米镉含量方差分析表

变异来源	Df	SS	MS	F
区组	2	0.006	0.003	2.538
A	3	0.111	0.037	31.308**
B	2	0.001	0.001	0.423
A×B	6	0.029	0.005	4.090**
误差	22	0.026	0.001	
总变异	35	0.173		

**Figure 1.** Relationship between Cd content in milled rice and soil in four selenium fertilizer production tests**图 1.** 四种硒肥生产试验的精米镉含量与土壤镉含量关系图

4. 结论与讨论

4.1. 结论

1) 不同硒肥的精米硒富集效果具有极显著差异,说明不同硒肥因制作工艺及组分不同导致茎叶对硒的吸收、转化及转运存在明显差异。本试验中,“喷喷富”中量元素肥料(A3)的精米硒含量最高,极显著高于“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)、显著高于“丰德多”生物硒复合肥(A4);“华龙西科”有机硒肥(A1)的精米硒含量显著高于“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)。

2) 不同施用方法对精米硒富集效果具有一定的影响。本试验中,“华龙西科”有机硒肥(A1)分期施

用(两次)的精米硒含量较一次性施用提高了 43.5%，“喷喷富”中量元素肥料(A3)提高了 20.03%，因此，建议生产中“华龙西科”有机硒肥(A1)、“喷喷富”中量元素肥料(A3)采用两次施肥方式，以提高富硒效率。“丰德多”生物硒复合肥(A4)增幅较小，且不同施肥方式的稻米硒含量稳定，建议该硒肥采用一次性施用，以减少用工成本。

3) 硒肥增效剂是株洲香之优有限责任公司研发的富硒技术产品，具有提高富硒效率的作用。本试验表明，不同硒肥对增效剂的富硒效率明显不同，与不增施增效剂相比，“华龙西科”有机硒肥(A1)的精米硒含量提高了 22.87%，“喷喷富”中量元素肥料(A3)提高了 2.26%，“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)和“丰德多”生物硒复合肥(A4)则出现不同程度的降低。

4) 本试验中 4 种硒肥的硒生物转化率都较高，精米有机硒占比平均达到 99.13%，可能与参试品种的硒生物转化率较高及灌浆期连续高温的影响有关。两次分期施肥较一次性施用相比，“华龙西科”有机硒肥(A1)和“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)精米有机硒占比分别提高 0.69%、1.33%，说明“华龙西科”有机硒肥(A1)和“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)两次分期施肥有利于提高稻米的硒品质。

5) 水稻施用含硒叶面肥具有一定的降镉作用，但不同硒肥的降镉效果因土壤镉背景而异。当土壤镉含量在临界值附近时(0.28 mg/kg)，“华龙西科”有机硒肥(A1)、“丰德多”生物硒复合肥(A4)的精米镉含量较低；在镉轻度污染时(0.45 mg/kg)，“丰德多”生物硒复合肥(A4)的精米镉含量最低；在镉重度污染时(1.5 mg/kg)，“华龙西科”有机硒肥(A1)硒肥的降镉效果最好。含硒叶面肥不同的施用方法对精米镉含量有一定的影响，分期施肥(两次)与一次性施肥相比，稻米镉含量平均降了 5.47%，其中：“丰德多”生物硒复合肥(A4)分期施用的稻米镉含量较一次性施用降低了 33.22%，降镉效果显著高于其它硒肥。说明在高镉背景条件下，“华龙西科”有机硒肥的降镉优势明显。不同硒肥与施用方法间存在显著交互作用，精米镉含量最低的处理组合是 A4B2，即“丰德多”生物硒复合肥(A4)分期施用(两次)。

4.2. 讨论

目前，富硒水稻高质量发展面临两个关键技术瓶颈，一是硒含量不稳定，二是有机硒占比不高。而影响精米硒含量稳定性的首要因素是以 Se 计的硒肥用量，其次与施用方法(施用时期、量比、次数)和环境温度有关。本试验中，对“丰德多”生物硒复合肥(A4)的硒含量进行了抽样检测(其它 3 种硒肥未作检测)，厂家提供值为 10 g/L，而实际检测值为 17.6 g/L，两者相差很大，因此试验中按 17.6 g/L 调整技术方案。从本试验数据分析，“喷喷富”中量元素肥料(A3)精米的富硒效率达 0.707 mg/g，较 2018~2019 年的精米富硒效率(0.33 mg/g)高 1 倍多；而“武汉华硒”生物纳米硒肥(A2)较“华龙西科”有机硒肥(A1)和“丰德多”生物硒复合肥(A4)的精米硒含量低 1 倍左右。其原因很可能是供试硒肥的实际硒含量与标识值不一致。据了解，目前国家尚未开放对硒肥进行审查登记，市场不规范，有相当一部分硒肥产品甚至没有标识硒含量值。由此可见，加强对含硒肥料的监管，确保硒肥的硒含量稳定，对非富硒区的富硒水稻高质量发展具有重要意义。在硒肥生产中，既要严格管理生产工艺流程，也要对每批次产品严格检测，并在产品包装上准确标识硒含量。

精米有机硒占比是富硒大米硒品质评价的关键指标，有机硒占比越大，硒品质越高。影响硒生物转化率的主要因素是水稻品种和环境温度，其次是硒肥种类与施用方法，但在灌浆期持续高温情况下硒肥种类与施用方法的影响较小。康敏等研究表明[8]，不同优质稻品种的硒富集能力和有机硒占比均存在极显著差异，施用含硒叶面肥的 15 个优质稻品种平均有机硒占比为 92% (变幅为 84.67%~99.33%)，达到 99% 以上的品种 3 个，低于 90% 的品种 6 个，说明精米有机硒占比性状受基因型控制，因此富硒品种筛选具有可行性。另一方面，精米有机硒占比性状也受稻谷成熟期间环境温度的影响，据株洲香之优农业科技发展有限责任公司提供的证据显示，2020 年在富硒优质稻生产中遇到低温冷害(寒露风)，其精米有

机硒占比仅为 94% (武汉琪谱检测报告编号 22020L5266R1); 而 2021 年生产的富硒优质稻精米有机硒占比达 99.31% (恩施实验室检测报告唯一性受控编号 HDESSKY0203-01), 因低温冷害的影响, 2020 年精米有机硒占比较 2021 年降低 5.31 个百分点, 导致硒品质降低。因此, 在富硒水稻生产实践中, 一方面要选择有机硒占比高的优良品种, 另一方面在栽培季节安排上要尽量避免寒露风的影响。

基金项目

湖南省科技特派员服务乡村振兴专项(2021NK4137)。

参考文献

- [1] Tapiero, H., Townsend, D.M. and Tew, K.D. (2003) The Antioxidant Role of Selenium and Seleno-Compounds. *Bio-medicine & Pharmacother*, **57**, 134-144. [https://doi.org/10.1016/S0753-3322\(03\)00035-0](https://doi.org/10.1016/S0753-3322(03)00035-0)
- [2] Reid, M.E., Duffield-Lillico, A.J., et al. (2008) The Nutritional Prevention of Cancer: 400 mcg per Day Selenium Treatment. *Nutrition Cancer*, **60**, 155-163. <https://doi.org/10.1080/01635580701684856>
- [3] 黄太庆, 江泽普, 黄雁飞, 廖青, 邢颖, 梁潘霞. 不同配方含硒叶面肥对水稻富硒降镉的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(7): 1185-1189.
- [4] Cao, Z.H., Wang, X.C., Yao, D.H., Zhang, L.H. and Wong, M.H. (2001) Selenium Geochemistry of Paddy Soils in Yangtze River Delta. *Environment International*, **26**, 335-339. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00009-5)
- [5] 池忠志, 杨洋, 杨福明, 姜心禄, 郑家国. 生产富硒稻谷的硒肥施用技术研究[J]. 2011, 24(6): 2289-2292.
- [6] Hu, Q.H., Yang, F.M., Pan, G.X., et al. (2001) Effect of Selenium on the Quality and Selenium Levels in Soybean. *Chinese Journal of Oil Crop Science*, **23**, 42-44.
- [7] 贺前锋, 易凤姣, 李鹏祥, 黄放, 王帅, 朱晓龙, 刘代欢. 不同富硒叶面肥对轻度镉污染稻田稻米降镉富硒效果的研究[J]. 湖南农业科学, 2015(12): 38-41.
- [8] 康敏, 邓建红, 龚建华, 黄涛, 毛莎莎, 赵正洪, 邓雅文. 优质稻品种硒镉富集特性研究初报[J]. 农业科学, 2022, 12(7): 551-561.