



灌浆期叶面喷施不同硒源对水稻主要性状、 硒含量和根际土壤理化性质的影响

余侃¹, 刘永贤², 汪盛明³, 宋邦辉¹, 郑倬⁴, 刘金龙⁴, 黄思思^{1*}, 郑威^{1*}

(¹湖北省农业科学院农业经济技术研究所, 湖北武汉 430064; ²广西农业科学院农业资源与环境研究所, 广西南宁 530007;
³英山县农业技术推广中心, 湖北黄冈 438700; ⁴湖北华龙西科生物科技有限公司, 湖北黄冈 438700)

摘要:【目的】探索灌浆期叶面喷施不同硒源对水稻生长、品质、硒含量和根际土壤理化性质的影响, 为外源硒肥的选择及富硒水稻安全生产提供参考依据。【方法】以水稻品种鄂中5号为试验材料, 设5个硒含量梯度(15.0、22.5、30.0、37.5和45.0 g/ha, 以硒计), 水稻灌浆期叶面喷施对应的生物纳米硒[3.0 L/ha(N1)、4.5 L/ha(N2)、6.0 L/ha(N3)、7.5 L/ha(N4)和9.0 L/ha(N5)]和亚硒酸钠[32.61 g/ha(Y1)、48.91 g/ha(Y2)、65.22 g/ha(Y3)、81.52 g/ha(Y4)和97.83 g/ha(Y5)], 以喷施等量清水为对照(CK)。成熟后分别调查各处理水稻的农艺性状、经济性状、品质性状、精米硒含量及根际土壤理化性质。【结果】与CK相比, 生物纳米硒处理的每穗总粒数、每穗实粒数、结实率和千粒重有不同程度提高, 亚硒酸钠处理则出现一定程度降低。外观品质方面, 2种硒源对稻米的粒长、粒宽、粒型和透明度影响不显著($P>0.05$, 下同), 但显著降低垩白度和垩白粒率($P<0.05$, 下同), 最大降幅分别为23.13%(N2处理)和39.60%(N5处理); N2处理显著提高稻米的碾磨品质, 精米率和整精米率分别提高3.07%和5.89%。在蒸煮品质方面, 除Y2处理外其余处理均降低稻米直链淀粉含量, 且Y5处理降幅最大(12.56%), 施硒对胶稠度和碱消值影响不显著。施硒能提高稻米的蛋白质含量(4.76%~30.98%), 且在Y3处理时增幅最大。硒对根际土壤有机质含量影响不显著, 但一定程度提高碱解氮、有效磷和速效钾含量, 最大增幅分别为3.86%(N1处理)、18.86%(Y5处理)和5.57%(N4处理), 且喷施亚硒酸钠后均显著降低根际土壤pH。施硒能提高稻米硒含量, 生物纳米硒处理的稻米机硒占比均大于95.00%, 而亚硒酸钠处理的大米有机硒占比均在85.00%以下。【结论】叶面喷施不同用量的生物纳米硒和亚硒酸钠均会影响水稻的千粒重、整精米率、垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量和硒含量。综合分析, 水稻灌浆初期叶面喷施22.5或30.0 g/ha的生物纳米硒可生产出同时符合国家标准和湖北省食品安全地方标准的富有机硒大米。

关键词:水稻; 生物纳米硒; 亚硒酸钠; 硒含量; 根际土壤理化性质

中图分类号:S511

文献标志码:A

文章编号:2095-1191(2023)04-1086-09

Effects of foliar spraying different selenium sources at filling stage on main traits, selenium content and rhizosphere soil physicochemical properties of rice

YU Kan¹, LIU Yong-xian², WANG Sheng-ming³, SONG Bang-hui¹, ZHENG Zhuo⁴,
LIU Jin-long⁴, HUANG Si-si^{1*}, ZHENG Wei^{1*}

(¹Institute of Agricultural Economics and Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan, Hubei 430064, China; ²Agricultural Resources and Environmental Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China; ³Yingshan County Agricultural Technology Extension Center, Huanggang, Hubei 438700, China; ⁴Hubei Hualongxike Biotechnology Co., Ltd., Huanggang, Hubei 438700, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effects of foliar spraying different selenium sources during filling period on

收稿日期: 2023-02-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(32160762); 广西科技重大专项(桂科AA17202026); 湖北省农业科技创新项目(2021-620-000-001-039)
通讯作者: 黄思思(1990-), <https://orcid.org/0000-0002-4490-5179>, 博士, 主要从事作物富硒种养殖研究工作, E-mail: 787441590@qq.com; 郑威(1964-), <https://orcid.org/0000-0003-2192-9540>, 研究员, 主要从事生物硒的研发及标准化应用研究工作, E-mail: nkyzhengwei@163.com
第一作者: 余侃(1987-), <https://orcid.org/0000-0002-4554-5114>, 博士, 主要从事水稻富硒机理研究及富硒营养液研发工作, E-mail: yukan91187@163.com

rice growth, quality, selenium content and physicochemical properties of rhizosphere soil, so as to provide reference for the selection of exogenous selenium fertilizer and the safe production of selenium-rich rice. 【Method】The rice variety Ezhong 5 was as the material, five selenium content gradients (15.0, 22.5, 30.0, 37.5 and 45.0 g/ha, calculated by selenium) were set, the corresponding biological nano selenium [3.0 L/ha (N1), 4.5 L/ha (N2), 6.0 L/ha (N3), 7.5 L/ha (N4) and 9.0 L/ha (N5)] and sodium selenite [32.61 g/ha (Y1), 48.91 g/ha (Y2), 65.22 g/ha (Y3), 81.52 g/ha (Y4) and 97.83 g/ha (Y5)] were sprayed on the leaf surface of rice during filling stage, and equal amount of water spraying as control (CK). In this research, the agronomic traits, economic traits, quality traits, selenium content of rice and physicochemical properties of rhizosphere soil were investigated respectively. 【Result】The results showed that the biological nano selenium spraying improved the grains per panicle, filled grains per panicle, seed setting rate and the 1000-grain weight compared with CK, while these indexes decreased in sodium selenite spraying treatment. In terms of appearance quality, grain length, grain width, grain shape and transparency were not significantly ($P>0.05$, the same below) different from CK by two different selenium sources, but they significantly ($P<0.05$, the same below) reduced the chalkiness and chalky grain rate, with the maximum decline of 23.13% (N2 treatment) and 39.6% (N5 treatment) respectively. N2 treatment significantly improved the milling quality of the rice, increasing the milled rice rate and head rice rate by 3.07% and 5.89% respectively. In terms of cooking quality, all treatments except Y2 treatment reduced the content of rice amylose content, with the largest decrease in Y5 treatment (12.56%), at the same time, selenium application had no significant effect on the glue consistency and alkali elimination value. Selenium application increased the protein content of rice (4.76%-30.98%), and the largest increase was observed in Y3 treatment. The organic matter content of rhizosphere soil was no significantly affected by the application of selenium, but the contents of alkali-hydrolyzed nitrogen, available phosphorus and available potassium were increased by 3.86% (N1 treatment), 18.86% (Y5 treatment) and 5.57% (N4 treatment) respectively. Meanwhile, the pH of rhizosphere soil was significantly decreased after spraying with sodium selenite. Selenium application could improve the selenium content of rice, but the organic selenium content of rice after biological nano selenium spraying was more than 95.00%, while organic selenium contents of rice in all treatments of sodium selenite were less than 85.00%. 【Conclusion】Different amounts of biological nano selenium and sodium selenite affect the 1000-grain weight, head rice rate, chalky grain rate, chalkiness, amylose content, protein content and selenium content of rice. According to comprehensive analysis, the application of 22.5 or 30.0 g/ha biological nano selenium in the stage of rice grain filling is suitable for the production of organic selenium-rich rice that meets the national standard and local food safety standard of Hubei Province.

Key words: rice; biological nano selenium; sodium selenite; selenium content; physicochemical properties of rhizosphere soil

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (32160762); Guangxi Science and Technology Major Special Project (Guike AA17202026); Hubei Agricultural Science and Technology Innovation Project (2021-620-000-001-039)

0 引言

【研究意义】硒是人体所必需的微量营养元素之一,在维持健康和调节疾病中发挥至关重要的作用(Yang et al., 2022)。世界卫生组织推荐的人均硒摄入量为60 μg/d,而我国的人均硒摄入量仅为43.3 μg/d,有近1/3的地区人口面临缺硒问题,改善我国人口缺硒现状将是一项重要的长期任务(段亮亮, 2018)。水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要粮食作物之一,在补充人体所需各种营养方面发挥重要作用。湖北省食品安全地方标准DBS42/002—2022《食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》是我国目前对富硒大米要求最严格的现行标准,其规定富有机硒大米总硒含量为0.2~0.5 mg/kg,且有机硒占比80%以上。但我国市场上稻米硒含量仅为0.025 mg/kg(何巧等, 2019),无法满足人们日常膳食补硒需求。我国72%以上的地区为低硒地区,即使天然富硒地区的农作物也很难达到富硒农产品标准规定的硒含量要求。因此,利用外源硒生物强化方法来增加农作物硒含量正逐渐成为生产富硒功能

农产品的重要手段。微生物转化的纳米硒与传统硒肥(无机硒、螯合硒等)相比,具有生物相容性更好、细胞毒性更低、无污染风险等优势,其应用前景受到广泛关注(Chellapa et al., 2020)。因此,对比研究生物纳米硒和亚硒酸钠对水稻生长发育、稻米硒含量和根际土壤理化性质的影响,对安全、简单、低成本的富硒水稻生产和保障居民健康均具有重要意义。【前人研究进展】缺硒地区通过农艺生物强化能保护作物免受各种非生物胁迫的影响,如寒冷、干旱和重金属胁迫等,进而提高作物的生长性能、抗氧化和光合作用(Feng et al., 2021)。适宜浓度的硒可提高水稻抗氧化酶活性和光合作用,促进水稻生长,而硒浓度过高时,则会降低酶活性和新陈代谢能力,抑制水稻生长发育(Dai et al., 2020; 马洁等, 2021)。Du等(2019)利用不同浓度的硒酸钠处理水稻幼苗,发现15~75 mg/kg硒浓度可提高水稻幼苗的发芽率,90~105 mg/kg硒浓度则抑制水稻幼苗生长。Liu等(2020)研究表明,1.0 mg/kg的亚硒酸钠能增加水稻籽粒中的氮和硒含量,降低籽粒空秕率,但10 mg/kg的亚硒酸会降低分蘖期谷胱甘肽过氧化物酶活

性,并引起千粒重下降。施硒同样可改善稻米的外观品质、蒸煮品质和营养品质,主要表现在提高整精米率、胶稠度和蛋白质含量,降低垩白度和垩白粒率(余侃等,2021)。叶面施用亚硒酸钠能增加再生稻每穗总粒数、实粒数和结实率,其中齐穗期施用11.25 g/ha亚硒酸钠的再生稻稻米整精米率最高(61.37%),同时垩白粒率最低(9.37%),与对照组均差异显著(段门俊等,2018)。徐琴等(2019)施以20 g/ha亚硒酸钠时,整精米率达65.67%,较对照提高20.83%。此外,施硒还能增加土壤有效硒含量,提高土壤有效磷和有效钾含量,改善土壤肥力,影响作物对养分的吸收利用,进而提升作物产量和品质(田秀英等,2009)。【本研究切入点】目前用于富硒水稻生产和研究的硒源多为亚硒酸钠,生物纳米硒因其自身优势,有逐渐替代传统无机硒肥的趋势。但关于生物纳米硒和亚硒酸钠对水稻生长及根际土壤理化性质影响的研究尚未见报道。【拟解决的关键问题】选择不同用量的2种硒源分别在水稻灌浆初期进行叶面喷施,探索其对水稻主要农艺性状、经济性状、品质性状、稻米硒含量及根际土壤理化性质的影响,以期为外源硒肥的选择及富硒水稻的安全生产提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点及试验材料

试验于2020年5—11月在湖北省英山县金盆村开展。试验田地形平整,地块常年耕作水稻,土壤肥力中等,不含硒,碱解氮含量196.3 mg/kg,有效磷含量14.6 mg/kg,速效钾含量140.6 mg/kg,有机质含量31.2 g/kg,土壤pH 5.9。

供试水稻材料为常规稻品种鄂中5号。供试硒源:亚硒酸钠为西格玛牌无水亚硒酸钠(Na_2SeO_3),纯度99%,分子量172.94,含硒约46%;生物纳米硒为湖北省农业科学院富硒研究团队自主研发的专利产品(专利号201610338121.6),由专用富硒微生物发酵制成,纯硒含量约5000 mg/L,折合每200 mL含纯硒1.0 g,纳米硒粒径为 126.3 ± 0.5 nm。

1.2 试验方法

根据前期试验结果,本研究设5个硒含量梯度,纯硒含量分别为15.0、22.5、30.0、37.5和45.0 g/ha,对应生物纳米硒用量分别为3.0 L/ha(N1)、4.5 L/ha(N2)、6.0 L/ha(N3)、7.5 L/ha(N4)和9.0 L/ha(N5),对应亚硒酸钠用量分别为32.61 g/ha(Y1)、48.91 g/ha(Y2)、65.22 g/ha(Y3)、81.52 g/ha(Y4)和97.83 g/ha(Y5),共10个施硒处理,另以施用等量清水为对照(CK),共11个小区,随机区组排列,3次重复。小区面

积为 6.67 m^2 ($2.10 \text{ m} \times 3.18 \text{ m}$),株行距为 $13.2 \text{ cm} \times 23.1 \text{ cm}$,东西行向,每小区土埂隔开,单排单灌。5月26日播种,播种后25 d在秧田按150 kg/ha施尿素折算试验小区用量提苗;6月16日移栽,双本插,东西走向,大田底施复合肥(氮:磷:钾=16:10:10)750 kg/ha,移栽后7 d再施复合肥75 kg/ha,其他管理条件同一般大田。9月10日灌浆初期对水稻植株叶片喷雾处理1次,保证水珠均匀吸附在水稻叶片上,喷施浓度每小区统一设为50 mg/L。11月5日成熟期取样,每小区5点取样,每点取1莖,共计5莖,并进行后期考种。稻谷晒干后存放3个月以上,待理化性状稳定后,测定稻米硒含量和稻米品质。采用抖根法收集水稻根际土壤,置于通风阴凉处风干,研磨后过2 mm筛贮存备用。

1.3 测定项目及方法

考种测定水稻株高、有效穗数、穗长、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率和千粒重。

品质指标检测:稻米粒长利用游标卡尺测定任意选取的10颗整精米的粒长,取平均值;粒型利用游标卡尺测定任意选取的10颗整精米的粒长和粒宽,计算二者比值,取平均值;任意选取100颗整精米,采用稻米垩白观测仪(上海赛霸精密仪器有限公司)对垩白的存在情况、垩白所占面积与籽粒整体面积比例进行观测,计算垩白粒率和垩白度;每份样品取样50 g,利用JLG-2018型小型糙米机(广州航信科学仪器有限公司)和TP-JBL小型稻米精白机(广州瑞丰实验设备有限公司)测量糙米率、精米率和整精米率;透明度、碱消值和胶稠度参照NY/T 83—2017《米质测定方法》进行测定;直链淀粉和蛋白质含量采用近红外谷物分析仪(福斯Infrared 1241,瑞典Foss Tecator公司)进行测定。精米的总硒和有机硒含量送至湖北省地矿局恩施实验室进行检测。

土壤理化指标测定(鲍士旦,2000):pH采用酸度计法测定,土壤有机质含量采用浓硫酸—重铬酸钾外加热法测定,碱解氮含量采用NaOH碱解扩散法测定,有效磷含量采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾含量采用乙酸铵浸提—火焰光度法测定。

1.4 统计分析

利用Excel 2013进行数据整理和制图,采用SPSS 23.0单因素方差分析对数据进行显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同硒处理对水稻农艺性状和经济性状的影响

由表1可知,喷施生物纳米硒和亚硒酸钠后,水

稻的株高、有效穗数和穗长与CK相比增减不一,其中Y4和Y5处理的株高、有效穗数和穗长均较CK有所降低,其他处理多数指标较CK有不同程度提高,但不同施硒处理与CK均无显著差异($P>0.05$,下同)。硒用量相同时,生物纳米硒处理后的株高均高于亚硒酸钠处理,而在有效穗数和穗长上2种硒处理间无明显规律。不同用量生物纳米硒处理的每穗总粒数、每穗实粒数和结实率均较CK有所提升,且随硒用量增加表现出先增后减的变化趋势,其中N2和N3处理与CK差异显著($P<0.05$,下同),N2处理的每穗总粒数、每穗实粒数和结实率最高,分别较CK提高3.53%、8.83%和5.11%。不同用量亚硒酸钠处理的每穗总粒数、每穗实粒数和结实率与CK相比均出现大幅度降低,除Y1处理每穗总粒数外,其他均与CK差异显著。N1~N5处理的千粒重较CK增加0.49%~2.62%,整体规律为先增后减,但差异不显著,其中N3处理千粒重最重。Y1~Y5处理的千粒重较CK有所降低,但5个处理与CK相比差异均不显著。水稻千粒重和结实情况是反映水稻产量的重要参考依据,整体来看,喷施生物纳米硒后可在一定程度上提高水稻的结实率和千粒重,而喷施亚硒酸钠后一定程度上抑制了水稻灌浆,进而降低水稻结实率。

2.2 不同硒处理对水稻品质性状的影响

2.2.1 外观品质 由表2可知,叶面喷施不同用量的生物纳米硒和亚硒酸钠后,粒长、粒宽和粒型与CK相比均无显著差异,透明度均为1。但不同硒处理的垩白粒率均低于CK,除Y5处理外其他处理与CK差异显著,其中N2处理垩白粒率最低,较CK降低23.13%。不同硒处理的垩白度均显著低于CK,降幅为12.38%~39.60%,改善效果明显。不同硒浓度对

稻米垩白度和垩白粒率的影响无明显规律,整体上生物纳米硒喷施后对垩白粒率和垩白度的降低效果优于亚硒酸钠。

2.2.2 碾磨品质 由表2可知,喷施不同用量的生物纳米硒后,N1~N5处理的稻米出糙率均较CK有所提升,但差异未达显著水平;除N5处理外,其余4个处理的精米率高于CK,N1和N2处理与CK差异显著,N2处理精米率最高,较CK增加3.07%;N1~N5处理的整精米率均高于CK,同样是N2处理增幅最大,达5.89%。喷施不同用量的亚硒酸钠后,仅Y1处理的稻米出糙率、精米率和整精米率高于CK,但提升不显著,其余4个处理的出糙率、精米率和整精米率均低于CK,且整体随着用量的增大而逐渐降低。

2.2.3 蒸煮品质 直链淀粉含量、碱消值和胶稠度是衡量大米蒸煮品质的重要指标。硒主要是通过改变稻米的直链淀粉含量来影响稻米的蒸煮品质。从表2可看出,除Y2处理外,其余处理的直链淀粉含量较CK均有一定程度降低,且Y5降幅最大,较CK显著降低12.56%;但所有处理的胶稠度与CK均无显著差异,碱消值也均为7。

2.2.4 营养品质 蛋白质含量是反映稻米营养品质的重要参数。如图1所示,不同硒处理的蛋白质含量较CK均有提升,增幅为4.76%~30.98%。随着生物纳米硒用量增加,各处理的蛋白质含量也逐渐增加。但随着亚硒酸钠用量增加,稻米蛋白质含量呈先增后减的变化趋势,且在Y3处理时蛋白质含量达最高(9.09%)。2种硒源同等用量相比,亚硒酸钠处理的蛋白质含量均高于生物纳米硒处理。

2.3 不同硒处理对水稻根际土壤理化性质的影响

从表3可知,生物纳米硒处理的水稻根际土壤pH与CK无显著差异,而亚硒酸钠处理的水稻根际土

表 1 不同硒处理对水稻农艺性状和经济性状的影响

Table 1 Effects of different selenium treatments on agronomic traits and economic traits in rice

处理 Treatment	株高(cm) Plant height	有效穗数(穗/兜) Effective panicle number (panicle/bundle)	穗长(cm) Panicle length	每穗总粒数 Total grain number per panicle	每穗实粒数 Filled grains per panicle	结实率(%) Seed setting rate	千粒重(g) 1000-grain weight
CK	113.42±1.25ab	14.16±3.17ab	22.37±0.50	127.21±3.51b	98.33±3.22b	77.30±0.68b	22.55±0.38ab
N1	114.68±1.71a	14.67±1.78a	23.35±0.50	130.55±2.33a	103.37±2.28ab	79.18±0.39a	22.66±0.41ab
N2	113.99±1.38a	14.37±2.44ab	22.77±0.61	131.70±3.74a	107.01a±3.12a	81.25±0.56a	22.93±0.35a
N3	113.89±1.41a	15.33±1.78a	23.15±0.60	131.04±2.16a	105.24±2.10a	80.31±0.35a	23.14±0.28a
N4	114.93±2.10a	15.00±1.33a	23.36±0.82	128.68±4.97b	103.37±3.51ab	80.33±0.40a	23.08±0.31a
N5	113.02±1.85ab	15.50±2.33a	23.95±1.37	127.72±3.47b	99.90±3.38b	78.22±0.53b	22.83±0.34a
Y1	114.22±1.89a	14.63±2.00a	23.35±0.85	125.62±3.11b	82.74±2.84c	64.33±0.41c	22.26±0.36b
Y2	112.55±2.22ab	14.83±2.50a	23.73±0.74	125.23±2.96c	75.45±2.37d	60.25±0.37d	21.88±0.33b
Y3	113.08±2.11ab	14.17±2.78ab	23.05±0.58	125.01±3.07c	68.94±2.63e	54.71±0.31e	21.80±0.27b
Y4	112.96±3.08ab	13.17±0.89b	22.22±0.46	124.66±5.01c	67.84±4.24e	53.56±0.42e	21.75±0.30b
Y5	111.48±2.83b	13.71±2.04b	22.17±1.19	124.91±3.89c	62.85±3.80f	49.92±0.44f	21.68±0.29b

同列数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。表2和表3同

Different lowercase letters in the same column indicated significant difference($P<0.05$). The same was applied in Table 2 and Table 3

壤pH均显著低于CK,且pH随着亚硒酸钠用量增加而逐渐降低。所有硒处理对水稻根际土壤有机质含量无显著影响。不同硒处理对水稻根际土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量的影响存在差异,多数处理的碱解氮、有效磷和速效钾含量较CK有所提高,其中Y4处理相比CK的碱解氮含量提升幅度最大(5.37%),Y5处理有效磷含量增幅最大(18.86%),N4处理速效钾含量增幅最大(5.57%)。

2. 4 不同硒处理对稻米硒含量的影响

GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》规定大米的总硒含量≥0.15 mg/kg即可称为富硒大米。同时,湖北省食品安全地方标准DBS42/002—2022《食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》对大米总硒和有机硒的含量规定更严格,其要求总硒含量为0.2~0.5 mg/kg,且有机硒占比≥80%才能认定为富有机硒大米。从图2可知,

表 2 不同硒处理对水稻外观品质、碾磨品质和蒸煮品质的影响
Table 2 Effects of different selenium treatments on appearance quality, milling quality and cooking quality of rice

处理 Treatment	外观品质 Appearance quality					
	粒长(mm) Grain length	粒宽(mm) Grain width	粒型(%) Grain shape	垩白粒率(%) Chalky grain rate	垩白度(%) Chalkiness	透明度 Transparency
CK	7.01±0.07	2.05±0.01	3.42±0.03	8.43±0.08a	2.02±0.02a	1
N1	6.98±0.06	2.09±0.02	3.34±0.02	7.81±0.10b	1.77±0.03b	1
N2	7.02±0.08	2.06±0.02	3.41±0.02	6.48±0.11e	1.55±0.03cd	1
N3	6.97±0.10	2.08±0.03	3.35±0.02	7.21±0.07c	1.57±0.04cd	1
N4	6.97±0.05	2.05±0.02	3.40±0.02	7.07±0.11cd	1.38±0.05e	1
N5	6.94±0.05	2.04±0.03	3.40±0.03	6.94±0.09cd	1.22±0.02f	1
Y1	6.94±0.06	2.06±0.01	3.37±0.04	7.22±0.05c	1.60±0.02c	1
Y2	6.92±0.07	2.05±0.02	3.38±0.03	6.98±0.07cd	1.48±0.04d	1
Y3	6.98±0.03	2.08±0.02	3.36±0.04	6.71±0.08d	1.62±0.03c	1
Y4	6.97±0.04	2.05±0.01	3.40±0.03	7.50±0.13bc	1.51±0.02d	1
Y5	6.87±0.08	2.06±0.01	3.33±0.02	8.20±0.12a	1.41±0.01e	1

处理 Treatment	碾磨品质 Milling quality			蒸煮品质 Cooking quality		
	出糙率(%) Brown rice rate	精米率(%) Milled rice rate	整精米率(%) Head rice rate	直链淀粉含量(%) Amylose content	胶稠度(mm) Gel consistency	碱消值 Alkali spreading value
CK	78.00±0.36ab	66.46±0.33b	62.50±0.28c	15.29±0.07a	81.33±0.11	7
N1	78.72±0.28a	68.01±0.22a	64.22±0.19b	14.73±0.08a	80.33±0.12	7
N2	78.64±0.25a	68.50±0.21a	66.18±0.18a	14.66±0.05a	80.67±0.10	7
N3	78.28±0.30a	67.64±0.23ab	64.25±0.16b	14.08±0.03ab	80.67±0.12	7
N4	78.20±0.22ab	66.83±0.19b	64.11±0.15b	14.16±0.05ab	81.67±0.09	7
N5	78.16±0.21ab	65.76±0.17bc	62.94±0.17c	14.10±0.06ab	81.33±0.12	7
Y1	78.32±0.19ab	66.96±0.20b	63.66±0.15bc	15.20±0.04a	81.33±0.08	7
Y2	77.81±0.28ab	65.93±0.24bc	61.92±0.21cd	15.51±0.06a	80.67±0.09	7
Y3	77.56±0.24b	65.29±0.16c	61.21±0.13cd	14.60±0.04a	81.33±0.14	7
Y4	77.28±0.18b	65.31±0.18c	61.50±0.15cd	14.12±0.05ab	80.67±0.06	7
Y5	75.8±0.23c	64.34±0.24d	59.63±0.18d	13.37±0.06b	80.67±0.08	7

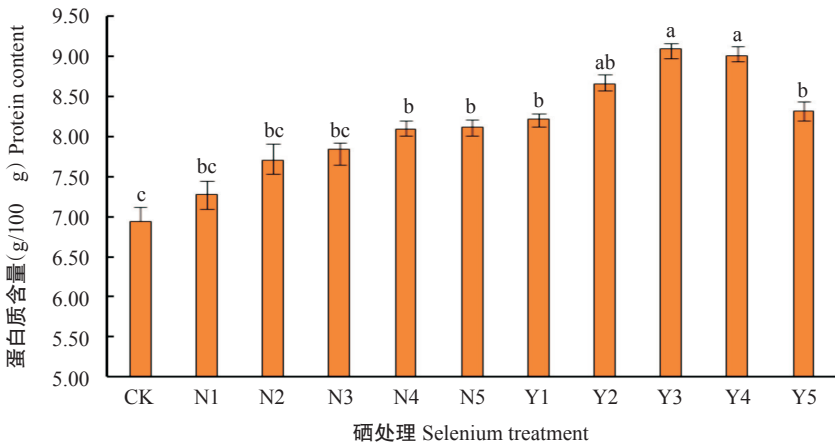


图 1 不同硒处理对稻米蛋白质含量的影响
Fig.1 Effects of different selenium treatments on protein content of rice
不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)
Different lowercase letters indicated significant difference (P<0.05)

所有硒处理稻米样品的总硒和有机硒含量均较CK有明显提升。其中,生物纳米硒处理的稻米总硒和有机硒含量随着硒用量的增加而增加;而亚硒酸钠处理中,稻米总硒和有机硒含量随着硒用量的增加呈先增后减的变化趋势,在Y3处理达最大值。整体来看,亚硒酸钠处理稻米总硒和有机硒均高于生物纳米硒处理,但生物纳米硒处理稻米的有机硒占比均在95.00%以上(95.24%~96.88%),亚硒酸钠处理稻米的有机硒含量占比均未超过85.00%(80.56%~84.04%)。表明水稻对亚硒酸钠的吸收能力强于生物纳米硒,但吸收后转化为有机硒的比例较低。10组硒处理的稻米样品均满足GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》规定的富硒大米硒含量要求,但仅N1、N2、N3和N4处理的稻米样品同时符合DBS42/002—2022《食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》规定的富有机硒大米要求。

3 讨论

水稻是世界上主要的谷类作物之一,也是我国约65%以上人口的主粮,如何提高水稻产量、品质和营养是稻米生产的主要考虑因素。我国市场上稻米硒含量平均值仅为0.025 mg/kg,远低于相关国家标准

准,稻米硒含量低已成为影响我国居民硒摄入量的重要因素(何巧等,2019)。目前,很难依赖富硒土壤大规模、标准化、高质量生产富硒水稻,富硒水稻的生产仍要利用外源硒增施技术。本研究分析生物纳米硒和亚硒酸钠在水稻灌浆初期对水稻农艺性状、经济性状、品质性状、硒吸收规律及根际土壤理化性质的影响,以期为富硒水稻安全生产提供理论依据。

3.1 不同硒处理与水稻农艺性状和经济性状的关系

本研究结果表明,生物纳米硒和亚硒酸钠对水稻株高、有效穗数和穗长有一定的提升作用,但与CK差异不显著。与郑威等(2018)研究指出硒对水稻株高和有效穗等农艺性状无显著影响的结果一致。造成这一现象的原因可能是由于灌浆初期叶面喷施硒时水稻的株高、穗部等性状生长阶段已基本完成,施硒造成的影响较小。每穗总粒数、每穗实粒数、结实率和千粒重是反映水稻产量的主要性状。张有利等(2021)研究指出,硒的添加在一定程度上能提升水稻产量,喷施1500 g/ha的破壁型富硒酵母可显著提升水稻的穗粒数、结实率和千粒重。本研究中,2种不同硒源对这些性状的影响结果存在差异,生物纳米硒处理对这4个指标均有一定程度提

表 3 不同硒处理对水稻根际土壤理化性质的影响

Table 3 Effects of different selenium treatments on physical and chemical properties of rice rhizosphere soil

处理 Treatment	pH	有机质含量(g/kg) Organic matter content	碱解氮含量(mg/kg) Available nitrogen content	有效磷含量(mg/kg) Available phosphorus content	速效钾含量(mg/kg) Available potassium content
CK	5.89±0.05a	30.1±0.02	199.30±1.23b	14.58±0.21c	143.29±1.12b
N1	5.91±0.07a	30.5±0.02	207.00±1.51ab	14.44±0.18c	150.74±1.18a
N2	5.88±0.06a	29.8±0.02	206.50±1.38ab	15.67±0.19b	145.54±1.15ab
N3	5.88±0.09a	29.9±0.01	196.00±1.36b	15.85±0.15b	146.21±1.20ab
N4	5.91±0.06a	30.2±0.03	204.00±1.72ab	16.31±0.16ab	151.27±1.22a
N5	5.89±0.05a	29.4±0.01	206.50±1.85ab	16.98±0.15a	147.09±1.28ab
Y1	5.64±0.06b	29.5±0.01	196.00±1.52b	16.40±0.17ab	141.17±1.19b
Y2	5.42±0.08c	29.6±0.02	204.50±2.11ab	17.12±0.20a	149.97±1.25a
Y3	5.33±0.09cd	29.7±0.02	199.50±0.98b	17.20±0.18a	142.97±1.19b
Y4	5.21±0.07d	29.6±0.01	210.00±1.25a	17.17±0.15a	133.11±1.17c
Y5	5.19±0.07d	29.9±0.02	206.50±1.44ab	17.33±0.22a	131.09±1.11c

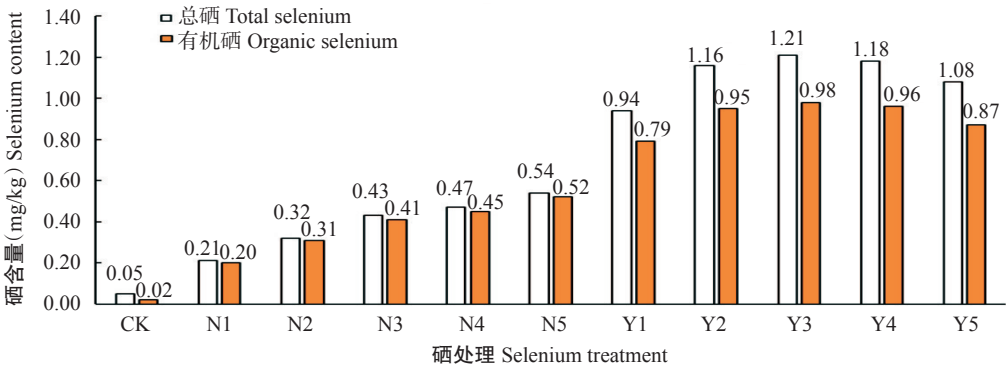


图 2 不同硒处理对稻米总硒和有机硒含量的影响

Fig.2 Effects of different selenium treatments on total selenium and organic selenium contents of rice

升,其中N2处理每穗总粒数、每穗实粒数和结实率的增幅最大,分别为3.53%、8.83%和5.11%,N3处理千粒重增幅最大,为2.62%。该结果与王雅琦等(2019)的研究结果一致,表明纳米硒可有效提高水稻产量相关性状。亚硒酸钠处理后这4个指标出现显著降低,且用量越多降幅越大。推测这种现象应该与硒的毒性有关,研究表明,亚硒酸盐具有较高的毒性,其急性毒性(通常用半致死率 LD_{50} 表示)是生物纳米硒的20倍以上(Shakibaie et al., 2013)。适宜用量的外源硒可提高水稻的抗逆性,对其生长和产量有促进作用。灌浆期是水稻将通过光合作用产生的淀粉、蛋白质和积累的有机物质,进一步通过同化作用将其储存在籽粒里的一个阶段。水稻植株中至少有90%的有机物是通过二氧化碳同化来转运和积累的,生物纳米硒处理提高了灌浆阶段的光合作用,进而提高水稻产量(Huang et al., 2015)。而亚硒酸钠因为其剧毒特性,低剂量施用硒后可降低活性氧水平和提高抗氧化活性,对植物光合作用起积极作用,高剂量时硒又会作为促氧化剂,产生活性氧,引起植物的氧化应激反应,降低光合作用,影响灌浆效果,导致产量下降(Wang et al., 2012)。

3.2 不同硒处理与水稻品质性状的关系

外观品质、碾磨品质、蒸煮品质和营养品质是水稻品质性状的主要参考依据。外观品质和碾磨品质直接影响稻米的商品价值。硒被植物吸收后转化为含硒氨基酸和硒蛋白参与植物代谢,主要以硒代蛋氨酸和硒代半胱氨酸形式存在,这些蛋白的形成改变了稻米中蛋白的组成,进而影响稻米垩白、蛋白质含量、直链淀粉含量和整精米率等品质性状。徐琴等(2019)研究表明,水稻孕穗期喷施23 g/ha复合硒叶面肥+20 g/ha亚硒酸钠可显著降低稻米垩白度。本研究结果表明,生物纳米硒和亚硒酸钠对水稻的粒长、粒宽、粒型和透明度影响较小,但能显著降低垩白度和垩白粒率。硒能显著改善水稻垩白的原因可能是影响胚乳中淀粉颗粒和蛋白体的排列,进而影响垩白的形成(郑小龙等, 2022)。稻米的碾磨品质主要由糙米率、精米率和整精米率决定。本研究结果表明,适量的生物纳米硒和亚硒酸钠均可提高糙米率、精米率和整精米率,当生物纳米硒用量为9.0 L/ha(N5处理)和亚硒酸钠用量大于48.91 g/ha(Y2处理)时,稻米的碾磨品质呈下降趋势。与赵滢等(2016)研究得出硒能提高大部分水稻品种精米率的结果相似。直链淀粉含量会对回复值、热浆黏度及最终黏度产生一定影响,是导致米饭变黏和变软的原因之一。一般优质稻米的直链淀粉含量在20%

以下,但过低的直链淀粉含量又会导致米饭过软,适口性变差(余侃等, 2019)。本研究中,喷施生物纳米硒后稻米直链淀粉含量均出现一定程度的降低,而喷施亚硒酸钠后稻米直链淀粉含量较CK增减不一;生物纳米硒和亚硒酸钠处理后均提高了稻米蛋白质含量。蛋白质含量会影响大米的吸水性,一般以8%~10%较合适,过高或过低的稻米蛋白质含量均会降低蒸煮和食味品质(石吕等, 2019)。有研究表明,直链淀粉含量高的稻米一般蛋白质含量低(Gealy and Bryant, 2009)。本研究结果与上述研究结果存在差异,可能是稻米的蛋白质和直链淀粉含量受土壤类型、土壤肥力、水分和气温等诸多因素影响,涉及碳、氮等多种代谢和调控途径。因此,硒对稻米蛋白质和直链淀粉含量的影响规律还有待进一步研究。

3.3 不同硒处理与水稻根系土壤理化性质的关系

根际土壤指受植物根系及其分泌物直接影响的微域土壤,其理化指标含量变化直接影响作物生长(Wu et al., 2020)。本研究中,施硒对有机质影响不显著,但一定程度上能提高碱解氮、有效磷和速效钾含量。同时,生物纳米硒处理与CK的pH差异不显著,而亚硒酸钠处理的pH较CK显著降低,与张木等(2018)、黄思勇等(2020)的研究结果一致。可能是亚硒酸盐能促进水稻根际分泌的草酸、苹果酸、丙二酸等有机酸含量增加,从而增加土壤中氢离子浓度,酸化根际土壤,导致土壤pH降低(李勇等, 2008)。喷施硒后改变了水稻根际土壤的理化性质,活化土壤养分,增加了碱解氮、有效磷和速效钾含量,从而促进水稻生长;喷施亚硒酸钠虽也提高了土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量,但对水稻的生理生长和籽粒灌浆总体表现为抑制作用,可能是由于其剧毒特性使水稻抗氧化系统遭到破坏而导致生长发育受到抑制;而生物纳米硒则因为其低毒特性,提高土壤养分的同时也促进水稻的生长发育。

3.4 不同硒处理与稻米硒含量的关系

研究表明,通过农艺生物强化,利用无机硒、有机硒和纳米硒作为叶面肥料施用时可显著提高稻米硒含量(Lidon et al., 2018)。叶面施硒是最有效和最安全的方法之一,硒可在较短时间内通过角质层或气孔进入叶片并转运至籽粒,提高硒在植物中的利用效率。本研究中,喷施生物纳米硒和亚硒酸钠均显著提高了稻米硒含量,且同等硒用量下,亚硒酸钠处理的稻米硒含量高于生物纳米硒处理,但亚硒酸钠处理的稻米有机硒含量占比较低。造成这一现象的原因可能是水稻虽对亚硒酸钠吸收率较高,但

过高用量的亚硒酸钠无法高效转化为有机硒形态并进入到精米层。据报道,食品中有机硒的生物利用度和营养价值均高于无机硒,且无机硒具有毒性大、不易被降解和被吸收等劣势(Bañuelos et al., 2010)。因此,食品中的硒含量不应只强调总硒含量,其有机硒形态和含量更适合用于评估硒生物强化食品。本研究中,生物纳米硒处理的稻米硒含量均达富硒大米标准,且有机硒占比达95.00%以上。而亚硒酸钠处理的稻米硒含量虽较高,但其有机硒占比均在85.00%以下。稻米硒含量并不是越高越好,结合GB 28050—2011《食品安全国家标准 预包装食品营养标签通则》和湖北省食品安全地方的标准DBS 42/002—2022《食品安全地方标准 富有机硒食品硒含量要求》,总硒含量在0.15~0.50 mg/kg,且有机硒占比80%以上的大米适宜作为富有机硒大米食用。施硒可显著提高稻米籽粒硒含量,也对水稻的农艺、经济和品质等性状有一定提升作用,但也不能盲目夸大其增产提质效果,生产有机硒含量达标的大米才是最终目的。生物纳米硒与亚硒酸钠相比,具有生物有效性高、低毒、对稻田无二次污染风险等优点,应大力推广作为外源生物强化硒源,以生产更多达标的富硒农产品。

4 结论

水稻灌浆初期叶面喷施不同用量的生物纳米硒和亚硒酸钠均会影响水稻的千粒重、整精米率、垩白粒率、垩白度、直链淀粉含量、蛋白质含量和硒含量。生物纳米硒整体可提升稻米的产量和品质,而亚硒酸钠因其高毒性特点,则对水稻的产量和品质起到一定的负作用。2种硒源均可提高稻米硒含量,但过高用量的亚硒酸钠被水稻吸收后转化为有机硒形态的比例较低,生物纳米硒更适合作为优质硒源。综合生物纳米硒对水稻产量、品质和硒含量的影响,水稻灌浆初期叶面喷施22.5或30.0 g/ha的生物纳米硒可生产出同时符合国家标准和湖北省食品安全地方标准的富有机硒大米。

参考文献:

鲍士旦. 2000. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社. [Bao S D. 2000. Agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agriculture Press.]

段亮亮. 2018. 硒的生理功能和富硒保健食品开发[J]. 现代食品, (1): 42-45. [Duan L L. 2018. The physiological function of selenium and the development of selenium-rich health food[J]. Modern Food, (1): 42-45.] doi: 10.16736/j.cnki.cn41-1434/ts.2018.01.014.

段门俊, 田玉聪, 吴芸紫, 金涛, 陈阜, 刘章勇. 2018. 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, 32(1): 96-102. [Duan M J, Tian Y C, Wu Y Z, Jin T, Chen F, Liu Z Y. 2018. Effect of foliar application of Na_2SeO_3 on the yield and quality of ratooning rice[J]. Chinese Journal of Rice Science, 32(1): 96-102.] doi: 10.16819/j.1001-7216.2018.7077.

何巧, 曹赵云, 张涵彤, 倪妍霞, 黄思琦, 许萍, 朱智伟, 陈铭学, 牟仁祥. 2019. 我国部分市售富硒大米中硒含量与膳食暴露评估[J]. 农产品质量与安全, (3): 14-19. [He Q, Cao Z Y, Zhang H T, Ni Y X, Huang S Q, Xu P, Zhu Z W, Chen M X, Mu R X. 2019. Selenium content in some selenium-enriched rice from Chinese market and its dietary exposure assessment[J]. Quality and Safety of Agro-Products, (3): 14-19.] doi: 10.3969/j.issn.1674-8255.2019.03.003.

黄思勇, 周光龙, 康振兴, 周武先, 艾伦强, 张美德. 2020. 外源硒对威丰白术生长及其根际土壤理化性质的影响[J]. 中药材, 43(9): 2085-2090. [Huang S Y, Zhou G L, Kang Z X, Zhou W X, Ai L Q, Zhang M D. 2020. Effects of exogenous selenium on the growth and physical and chemical properties of rhizosphere soil of *Atractylodes macrocephala* in Xianfeng[J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 43(9): 2085-2090.] doi: 10.13863/j.issn 1001-4454.2020.09.001.

李勇, 黄小芳, 丁万隆. 2008. 根系分泌物及其对植物根际土壤微生态环境的影响[J]. 华北农学报, (S): 182-186. [Li Y, Huang X F, Ding W L. 2008. Root exudates and their effects on plant rhizosphere soil micro-ecology environment[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, (S): 182-186.]

马洁, 王翰霖, 侯晓宁, 金瑞, 杨涓, 党文瑞, 王明国, 郑国琦. 2021. 外源硒对水稻抗氧化酶活性、产量及其体内硒含量影响的研究[J]. 中国农学通报, 37(6): 9-15. [Ma J, Wang H L, Hou X N, Jin R, Yang J, Dang W R, Wang M G, Zheng G Q. 2021. Exogenous selenium: Effects on antioxidant enzyme activity, yield and selenium content in rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 37(6): 9-15.]

石吕, 张新月, 孙惠艳, 曹先梅, 刘建, 张祖建. 2019. 不同类型水稻品种稻米蛋白质含量与蒸煮食味品质的关系及后期氮肥的效应[J]. 中国水稻科学, 33(6): 541-552. [Shi L, Zhang X Y, Sun H Y, Cao X M, Liu J, Zhang Z J. 2019. Relationship of grain protein content with cooking and eating quality as affected by nitrogen fertilizer at late growth stage for different types of rice varieties[J]. Chinese Journal of Rice Science, 33(6): 541-552.] doi: 10.16819/j.1001-7216.2019.9022.

田秀英, 李会合, 王正银. 2009. 施硒对苦荞N、P、K营养元素和土壤有效养分含量的影响[J]. 水土保持学报, 23(3): 112-115. [Tian X Y, Li H H, Wang Z Y. 2009. Effect of Se application on contents of nitrogen phosphorus and potassium in tartary buckwheat and content of available nutrients in soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 23(3): 112-115.] doi: 10.13870/j.cnki.stbxb.2009.03.024.

王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 王琪, 王康, 郭岩彬, 李花粉. 2019. 小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运[J]. 环境科学, 40(10): 4654-4660. [Wang Y Q, Zhu L N, Li K, Wang Q, Wang K, Guo Y B, Li H F. 2019. Absorption and transportation of selenium nanoparticles in wheat and rice[J]. Environmental Science, 40(10): 4654-4660.] doi: 10.13227/j.hj.201904048.

徐琴, 王孟, 谢义梅, 陈甜甜, 周灵, 谭亚华, 石垒, 邢丹英. 2019. 施硒对水稻外观品质及籽粒硒、镉和砷含量的影响[J]. 中国农业科技导报, 21(5): 135-140. [Xu Q, Wang M, Xie Y M, Chen T T, Zhou L, Tan Y H, Shi L, Xing D Y. 2019. Effect of selenium application on ap-

- pearance quality, grain selenium, cadmium and arsenic content in rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 21(5):135-140. doi:10.13304/j.nykjdb.2019.0168.
- 余侃, 黄思思, 龙小玲, 蔡端午, 刘金龙, 郑威, 程水源. 2019. 生物有机硒对稻米品质性状及硒吸收分配的影响[J]. 食品科技, 44(11):168-174. [Yu K, Huang S S, Long X L, Cai D W, Liu J L, Zheng W, Cheng S Y. 2019. Effects of bioorganic selenium on rice quality characters and selenium absorption and distribution[J]. Food Science and Technology, 44(11):168-174. doi:10.13684/j.cnki.spkj.2019.11.031.
- 余侃, 肖秋水, 黄思思, 龙小玲, 蔡端午, 刘金龙, 郑威. 2021. 生物有机硒对不同水稻品种主要性状、重金属含量及硒吸收的影响[J]. 南方农业学报, 52(5):1206-1214. [Yu K, Xiao Q S, Huang S S, Long X L, Cai D W, Liu J L, Zheng W. 2021. Effects of bioorganic selenium on main characters, heavy metal content and selenium absorption of different rice varieties[J]. Journal of Southern Agriculture, 52(5):1206-1214. doi:10.3969/j.issn.2095-1191.2021.05.009.
- 张木, 唐拴虎, 钟松臻, 李苹, 付弘婷. 2018. 施硒对水稻土壤硒有效性的影响[J]. 应用生态学报, 29(9):2979-2987. [Zhang M, Tang S H, Zhong S Z, Li P, Fu H T. 2018. Effect of selenium application on selenium availability in rice soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 29(9):2979-2987. doi:10.13287/j.1001-9332.201809.022.
- 张有利, 徐常健, 蒋志慧, 郭永霞. 2021. 不同富硒酵母对水稻硒吸收分配和品质的影响[J]. 中国土壤与肥料, (3):214-219. [Zhang Y L, Xu C J, Jiang Z H, Guo Y X. 2021. Effects of different selenium-rich yeasts on selenium absorption, distribution and quality of rice[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, (3):214-219. doi:10.11838/sfsc.1673-6257.20177.
- 赵滢, 张凯, 欧小雪, 吕文恺, 杜文远, 邢丹英, 杨隆维, 徐建龙, 邱先进. 2016. 富硒对籼稻加工品质的影响[J]. 湖北农业科学, 55(12):3006-3008. [Zhao Y, Zhang K, Ou X X, Lü W K, Du W Y, Xing D Y, Yang L W, Xu J L, Qiu X J. 2016. The effect of selenium-rich on indica milling quality[J]. Hubei Agricultural Sciences, 55(12):3006-3008. doi:10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2016.12.005.
- 郑威, 万晟杰, 龙小玲, 蔡端午, 刘金龙. 2018. 生物有机硒对水稻农艺经济性状及硒吸收分配的影响[J]. 农村经济与科技, 29(23):54-56. [Zheng W, Wan S J, Long X L, Cai D W, Liu J L. 2018. Effects of bio-organic selenium on agronomic economic traits and selenium absorption and distribution of rice[J]. Rural Economy and Science-Technology, 29(23):54-56. doi:10.3969/j.issn.1007-7103.2018.23.022.
- 郑小龙, 周菁清, 白杨, 邵雅芳, 章林平, 胡培松, 魏祥进. 2022. 梗稻不同穗部籽粒的淀粉与蛋白品质差异及分子机制[J]. 作物学报, 48(6):1425-1436. [Zheng X L, Zhou J Q, Bai Y, Shao Y F, Zhang L P, Hu P S, Wei X J. 2022. Difference and molecular mechanism of soluble sugar metabolism and quality of different rice panicle in japonica rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 48(6):1425-1436. doi:10.3724/SP.J.1006.2022.12029.
- Bañuelos G S, Roche J D, Robinson J. 2010. Developing selenium-enriched animal feed and biofuel from canola planted for managing Se-laden drainage waters in the westside of central California[J]. International Journal of Phytoremediation, 12(3):243-254. doi:10.1080/15226510903563850.
- Chellapa L R, Shanmugam R, Indiran M A, Samuel S R. 2020. Biogenic nanoselenium synthesis, its antimicrobial, antioxidant activity and toxicity[J]. Bioinspired, Biomimetic and Nanobiomaterials, 9(3):184-189. doi:10.1680/jbim.19.00054.
- Dai Z H, Rizwan M, Gao F, Yuan Y, Huang H L, Hossain M M, Xiong S L, Cao M H, Liu Y X, Tu S X. 2020. Nitric oxide alleviates selenium toxicity in rice by regulating antioxidant, selenium uptake, speciation and gene expression[J]. Environmental Pollution, 257:113540. doi:10.1016/j.envpol.2019.113540.
- Du B, Luo H W, He L X, Zhang L H, Liu Y F, Mo Z W, Pan S G, Tian H, Duan M Y, Tang X R. 2019. Rice seed priming with sodium selenate: Effects on germination, seedling growth, and biochemical attributes[J]. Scientific Reports, 9(1):4311. doi:10.1038/s41598-019-40849-3.
- Feng R W, Wang L Z, Yang J G, Zhao P P, Zhu Y M, Li Y P, Yu Y S, Liu H, Rensing C, Wu Z Y, Ni R X, Zheng S A. 2021. Underlying mechanisms responsible for restriction of uptake and translocation of heavy metals (metalloids) by selenium via root application in plants[J]. Journal of Hazardous Materials, 402:123570. doi:10.1016/j.jhazmat.2020.123570.
- Gealy D R, Bryant R J. 2009. Seed physicochemical characteristics of field-grown US weedy red rice (*Oryza sativa*) biotypes: Contrasts with commercial cultivars[J]. Journal of Cereal Science, 49(2):239-245. doi:10.1016/j.jcs.2008.1.
- Huang L C, Dai L P, Wang L, Leng Y J, Yang Y L, Xu J, Hu J, Rao Y C, Zhang G H, Zhu L, Dong G J, Guo L B, Qian Q, Zeng D L. 2015. Genetic dissection for chlorophyll content of the top three leaves during grain filling in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 34:381-391. doi:10.1007/s00344-014-9474-5.
- Lidon F C, Oliveira K, Galhano C, Guerra M, Ribeiro M M, Pelica J, Pataco I, Ramalho J C, Leitao A E, Almeida A S, Campos P S, Ribeiro-Barros A I, Pais I P, Silva M M, Carvalho M L, Santos J P, Pessoa M F, Reboredo F H. 2018. Selenium biofortification of rice through foliar application with selenite and selenate[J]. Experimental Agriculture, 55(4):528-542. doi:10.1017/S0014479718000157.
- Liu X W, Huang Z L, Li Y Z, Xie W J, Li W, Tang X R, Ashraf U, Kong L L, Wu L M, Wang S L, Mo Z W. 2020. Selenium-silicon (Se-Si) induced modulations in physio-biochemical responses, grain yield, quality, aroma formation and lodging in fragrant rice[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 196:110525. doi:10.1016/j.ecoenv.2020.110525.
- Shakibaie M, Shahverdi A R, Faramarzi M A, Hassanzadeh G R, Rahimi H R, Sabzevariet O. 2013. Acute and subacute toxicity of novel biogenic selenium nanoparticles in mice [J]. Pharmaceutical Biology, 51:58-63. doi:10.3109/13880209.2012.710241.
- Wang Y D, Wang X, Wong Y S. 2012. Proteomics analysis reveals multiple regulatory mechanisms in response to selenium in rice[J]. Journal of Proteomics, 75:1849-1866. doi:10.1016/j.jprot.2011.12.030.
- Wu L N, Jiang Y, Zhao F Y, He X F, Liu H F, Yu K. 2020. Increased organic fertilizer application and reduced chemical fertilizer application affect the soil properties and bacterial communities of grape rhizosphere soil[J]. Scientific Reports, 10(1):9568. doi:10.1038/s41598-020-66648-9.
- Yang H, Yang X F, Ning Z P, Kwon S Y, Li M L, Tack F M G, Kwon E E, Rinklebe J, Yin R S. 2022. The beneficial and hazardous effects of selenium on the health of the soil-plant-human system: An overview[J]. Journal of Hazardous Materials, 422:126876. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126876.