

董颐玮, 朱燕云, 靳红梅. 生物纳米硒对抗白菜品质与抗氧化性能的影响[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(2): 479-488.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2023.02.021

生物纳米硒对抗白菜品质与抗氧化性能的影响

董颐玮^{1,2}, 朱燕云^{2,3}, 靳红梅^{1,2,3}

(1. 江苏大学环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014; 3. 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 江苏 南京 210095)

摘要: 为探究叶面喷施不同水平生物纳米硒对抗白菜生长、品质、抗氧化性能及矿物质元素含量等的影响规律, 为生物纳米硒在富硒叶菜安全生产中的应用提供参考, 采用大田试验, 以杭白菜[*Beassica pekinensis* (Lour.) Rupr.]作为研究对象, 以牛粪和药渣 2 种有机肥作为基肥, 设置 4 个生物纳米硒喷施水平 (0 mg/L、1.0 mg/L、2.5 mg/L 和 5.0 mg/L), 分析对比不同水平生物纳米硒处理下杭白菜的生物量、品质、抗氧化性能以及矿质元素含量的差异。结果表明, 4 个水平的生物纳米硒均能显著提升杭白菜的生物量。施用中等水平生物纳米硒可显著 ($P < 0.05$) 提高杭白菜 V_c 含量、总酚含量、关键抗氧化酶活性, 降低硝酸盐含量, 对可溶性糖含量无显著影响。生物纳米硒可有效提升杭白菜的有机硒含量, 促进地上部对氮、钙、镁和铁元素的吸收。总之, 在 2 种基肥条件下, 叶面喷施 1.0~5.0 mg/L 生物纳米硒均可提高杭白菜生物量, 以及可食用部分的品质、抗氧化性能及钙、镁、氮含量, 其中 2.5 mg/L 生物纳米硒处理效果最佳。

关键词: 生物纳米硒; 杭白菜; 品质; 抗氧化性能; 元素

中图分类号: S634.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2023)02-0479-10

Effects of biological nano-selenium on the quality and antioxidant properties of Hang cabbage

DONG Yi-wei^{1,2}, ZHU Yan-yun^{2,3}, JIN Hong-mei^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 3. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Organic Solid Waste Recycling, Nanjing 210095, China)

Abstract: The effects of foliar spraying with different levels of biological nano-selenium on the growth, quality, antioxidant performance and mineral element content of Hang cabbage were investigated, in order to provide valuable information for the safe production and application of biological nano-selenium in selenium-enriched leafy vegetables. A field experiment was conducted, with Hang cabbage as the research object, two kinds of organic fertilizers, cow dung and medicinal residue as the base fertilizers, and four spraying levels (0 mg/L, 1.0 mg/L, 2.5 mg/L and 5.0 mg/L) of biological nano-selenium were set, to analyze and compare the differences in biomass, quality, antioxidant properties and mineral element content of Hang cabbage treated with different levels of biological nano-selenium. Biological nano-selenium could significantly increase the biomass of Hang cabbage. Application of medium level of biological nano-selenium could significantly ($P <$

0.05) increase the V_c content, total phenolic content, activities of key antioxidant enzymes, and reduce nitrate content in Hang cabbage, but had no significant effect on soluble sugar content. Biological nano-selenium could effectively increase the organic selenium content of Hang cabbage and promote the absorption of nitrogen, calcium,

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(20)1011]

作者简介: 董颐玮(1995-), 男, 江苏镇江人, 硕士, 主要从事绿色投入品污染防治。(E-mail) 853847582@qq.com

通讯作者: 靳红梅, (E-mail) hmjin@jaas.ac.cn

magnesium and iron in the aboveground part. Under the two basal fertilizers, foliar spraying of 1.0–5.0 mg/L biological nano-selenium can promote the biomass of Hang cabbage, as well as the quality, antioxidant properties and calcium, magnesium and nitrogen contents of edible parts, and 2.5 mg/L biological nano-selenium has the best effect.

Key words: biological nano-selenium; Hang cabbage; quality; antioxidant properties; elements

硒是人体必需的微量营养元素之一,具有抗氧化、抗癌和抗病毒等功效^[1]。据统计,全世界有超过 1.0×10^9 人因缺硒而罹患疾病,中国则有超过 7.000×10^7 人因缺硒而导致健康问题^[2]。通过生物强化来提高农作物可食用部分的硒含量,是增强膳食硒摄入量的一种可行方法^[3]。

目前,农业生产中的硒强化手段大部分都采用的是无机硒,主要为硒酸盐或亚硒酸盐,二者毒性较高,且易在环境中迁移,潜在危害大。而纳米硒凭借尺寸小和球状外形等优势更利于穿越细胞膜进入细胞,具有安全性高、生物活性好等优点,已被广泛应用于农业领域^[4-5]。目前,合成纳米硒的方法包括物理法、化学法和生物法。其中,通过生物方法合成纳米硒(以下称“生物纳米硒”)具有能耗低、生物安全性高、环境友好等特点^[6],已在多种农作物中应用并得到良好的效果^[7-11]。蔬菜富含多种矿物质和维生素等营养物质,是人类膳食中最为常见的食物。目前,叶面喷施生物纳米硒可以有效提升可食用部分的硒含量,食用富硒叶菜可作为人体补硒手段之一^[7-18]。然而,生物纳米硒的施用量不仅会对植物的生理生化特性产生不同影响,还会影响植物中硒形态的转化和含量,对人体摄入后的安全性十分关键。但目前相关的研究较少,制约了生物纳米硒肥的应用与推广。

本团队通过前期研究发现,利用菌株 XP 介导合成的生物纳米硒,含有—OH、C=O、N—H、C—H 等官能团,具有粒径均一、稳定性好、生物安全性高等优良特性^[6]。且已证明所得生物纳米硒对植物病原菌具有很好的抑制活性,在农业安全生产中具有潜在的应用价值。因此,本研究拟以杭白菜 [*Beassica pekinensis* (Lour.) Rupr.] 为研究对象,分析施用有机肥条件下喷施不同质量浓度的生物纳米硒对杭白菜生长、品质以及抗氧化性能的影响规律,初步明确生物纳米硒在大田叶菜上的最佳施用水平,探究生物纳米硒在提升叶菜品质及抗氧化性能方面的基本规律,以期生物纳米硒在蔬菜上的安全应用提供有价值的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验大田位于泰州市姜堰区某蔬菜种植基地,供试蔬菜为杭白菜,供试土壤的理化性质如表 1 所示。供试硒源为本团队前期研究中合成的生物纳米硒^[6]。

表 1 蔬菜基地大棚土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of greenhouse soil

指标	牛粪基肥土壤	药渣基肥土壤
pH	7.16±0.10	7.03±0.10
电导率(μS/cm)	321.25±2.24	338.12±1.73
有机质含量(%)	44.83±0.53	43.62±0.45
总氮含量(g/kg)	1.28±0.03	1.17±0.01
总磷含量(g/kg)	0.97±0.02	0.89±0.03
总钾含量(g/kg)	3.45±0.64	3.58±0.64
总铜含量(mg/kg)	16.05±0.28	15.69±0.28
总锌含量(mg/kg)	76.15±2.21	70.28±2.08
总砷含量(mg/kg)	8.95±0.37	9.51±0.36
总镉含量(mg/kg)	0.17±0.01	0.17±0.01
总铅含量(mg/kg)	22.04±0.22	21.73±0.29
总铬含量(mg/kg)	62.31±0.46	59.68±0.46
总硒含量(mg/kg)	0.12±0.06	0.07±0.04

平均值±标准差(n=3)。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 分别选取 2 种基肥施用的大田土壤用于杭白菜的种植。设置 4 个生物纳米硒喷施水平(0 mg/L、1.0 mg/L、2.5 mg/L 和 5.0 mg/L),试验处理共 8 个:牛粪基肥对照(CMCK)、药渣基肥对照组(DRCK)、牛粪基肥结合生物纳米硒喷施处理组(CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0)、药渣基肥结合生物纳米硒喷施处理组(DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0),每个处理 3 次重复,排列方式为完全随机设计,共 24 个小区,每个小区面积为 8.1 m^2 ($2.7 \text{ m} \times 3.0 \text{ m}$)。每个小区喷施 2 L 硒溶液,其中对照组喷施等量的去离子水。在杭白菜收获前 14 d 进行生物纳米硒叶面喷施,14 d 后收集植株样品和土壤样品。

1.2.2 植株样品采集 收获当天先测定叶绿素含

量,之后每个处理组多点采集 10 颗完整植株,现场测定根长、株高和鲜质量。利用液氮对植株叶片和根茎进行处理,一部分-80 ℃保存,一部分用研钵磨细并分装至自封袋中,-20 ℃储存备用。其余植株 55 ℃烘至恒质量备用。

1.2.3 土壤样品采集 五点法采集 0~20 cm 的新鲜土壤,混合作为一个试验处理小区的土样,自然阴干后测定土壤的 pH 以及有机质、总氮、总磷、总钾含量等,方法依照《土壤农化分析》^[19]。

1.2.4 指标测定 株高和鲜质量用常规方法测量,叶绿素含量采用叶绿素仪 SPAD502 测定,采用 2,6-二氯酚酚滴定法^[20]测定 V_c 含量,蒽酮法^[21]测定可溶性糖含量,紫外分光光度法^[22]测定硝酸盐含量,福林酚法^[23]测定总酚含量。植株经盐酸消化后采用氢化物原子荧光光谱法测定总硒含量^[24],同步采用固相萃取原子荧光光谱法测定植株中的有机硒含量^[25]。过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活性以及还原型谷胱甘肽(GSH)含量,利用南京建成生物研究所试剂盒测定。通过 H_2SO_4 -混合加速剂-蒸馏法对植株进行前处理后利用凯式定氮仪测定总氮(TN)含量,植株经 H_2SO_4 - H_2O_2 消化后采用钼锑抗比色法测定总磷(TP)含量,同步采用火焰原子光度法测定总钾(TK)含量。

1.3 数据分析

利用 Microsoft Office Excel 2019 软件进行数据统

计。利用 IBM SPSS 26 v.软件对同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理组的指标差异进行单因素方差分析(One-way ANOVA),均值比较采用 Duncan's 新复极差法, $\alpha=0.05$ 。同一质量浓度生物纳米硒处理下 2 种基肥土壤间杭白菜的指标差异性分析采用独立样本 t 检验法,* 代表显著性水平 $P<0.05$,** 代表显著性水平 $P<0.01$ 。采用 Origin 2022PRO 软件进行绘图及主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 生物纳米硒喷施对抗白菜生物量的影响

对不同处理组的杭白菜鲜质量进行测定,结果(表 2)表明,叶面喷施生物纳米硒能够显著($P<0.05$)增加杭白菜的生物量,且随着生物纳米硒质量浓度的增加,杭白菜的生物量随之而增加。CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0 处理较对照 CMCK 杭白菜生物量分别增加 2.2%、5.6% 和 17.9%,DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 处理较对照 DRCK 杭白菜生物量分别增加 4.3%、5.4% 和 17.4%。此外,喷施生物纳米硒对抗白菜根长并未产生显著影响,中等质量浓度生物纳米硒处理可显著($P<0.05$)促进杭白菜的株高增加。其中,喷施 2.5 mg/L 质量浓度生物纳米硒显著增加了杭白菜株高,喷施 5.0 mg/L 质量浓度生物纳米硒对株高无显著影响。对比不同基质下杭白菜生物量和株高,牛粪基肥优于药渣基肥。

表 2 生物纳米硒喷施对抗白菜生物指标的影响

Table 2 Effects of biological nano-selenium spraying on biological indicators of Hang cabbage

基质	处理组	鲜质量 (g, 1 株)	根长 (cm)	株高 (cm)
牛粪基肥土壤	CMCK	305.67±17.32c	11.33±2.16a	45.83±3.26b
	CMSe1.0	312.51±15.95b	11.63±2.03a	47.79±3.12a
	CMSe2.5	322.93±16.37b	11.04±1.90a	47.67±3.73a
	CMSe5.0	360.26±16.67a	10.75±1.46a	45.38±1.73b
药渣基肥土壤	DRCK	236.15±14.98c	8.75±1.46a	30.92±2.76b
	DRSe1.0	246.39±18.19b	8.67±1.18a	34.33±3.73ab
	DRSe2.5	248.95±19.00b	8.33±1.91a	35.50±2.22a
	DRSe5.0	277.25±10.26a	8.33±1.62a	31.75±1.87b

CMCK 为牛粪基肥对照,CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0 分别为牛粪基肥结合 1.0 mg/L、2.5 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施处理;DRCK 为药渣基肥对照,DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 分别为药渣基肥结合 1.0 mg/L、2.5 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施处理。同列数值后不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2 生物纳米硒喷施对抗白菜品质的影响

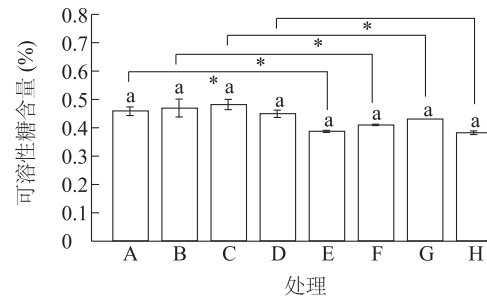
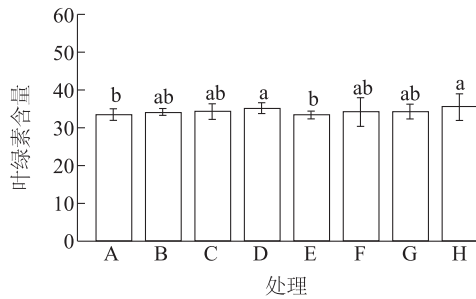
2.2.1 叶绿素含量和可溶性糖含量 图 1 显示,喷

施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜叶绿素含量。同各自对照组相比,5.0

mg/L 喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜植株叶绿素含量, CMSe5.0、DRSe5.0 处理下分别提升了 5.0% 和 6.2%。1.0 mg/L 和 2.5 mg/L 生物纳米硒喷施水平下 2 种有机肥土壤中杭白菜叶绿素含量虽有提升, 但较对照组无显著性差异 ($P > 0.05$), CMSe1.0、CMSe2.5、DRSe1.0、DRSe2.5 处理下分别提升了 3.4%、3.7%、3.6%、

3.2%。

对不同处理组的杭白菜可溶性糖含量进行测定, 结果(图 1)表明, 与对照相比, 中、低质量浓度的生物纳米硒处理下可溶性糖积累有增加趋势, 表明叶面喷施生物纳米硒对于杭白菜可溶性糖的积累影响较小。



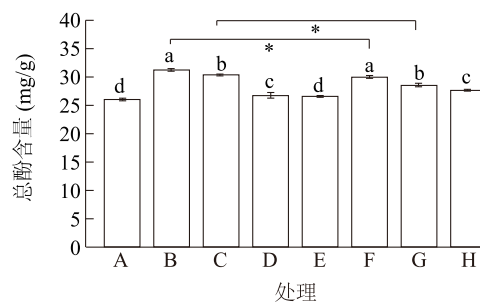
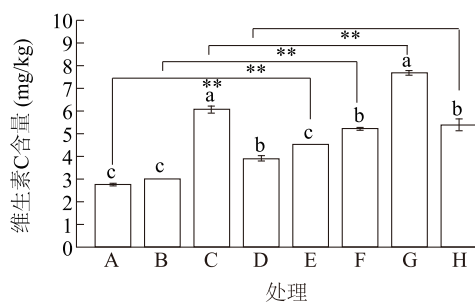
A~H 依次为 CMCK、CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0、DRCK、DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 处理, 各处理见表 2 注。不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。* 表示同一质量浓度生物纳米硒处理下 2 种基肥土壤间存在显著差异 ($P < 0.05$)。

图 1 生物纳米硒喷施对抗白菜叶绿素、可溶性糖含量的影响

Fig.1 Effects of biological nano-selenium spraying on chlorophyll content and soluble sugar content in Hang cabbage

2.2.2 维生素 C 含量和总酚含量 测定结果(图 2)表明, 喷施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜维生素 C 含量。同各自对照组相比, 2.5 mg/L 喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜维生素 C 的含量, CMSe2.5、DRSe2.5 处理下分别提升了 52.7% 和 69.4%。5.0

mg/L 生物纳米硒喷施水平对 2 种有机肥土壤中杭白菜维生素 C 含量的提升较小, 但较对照组仍有显著差异 ($P < 0.05$), CMSe1.0、CMSe5.0、DRSe1.0、DRSe5.0 处理下分别提升了 15.2%、34.7%、13.0%、18.9%。



A~H 依次为 CMCK、CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0、DRCK、DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 处理, 各处理见表 2 注。不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。* 和 ** 分别表示同一质量浓度生物纳米硒处理下 2 种基肥土壤间存在显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$) 差异。

图 2 生物纳米硒喷施对抗白菜维生素 C、总酚含量的影响

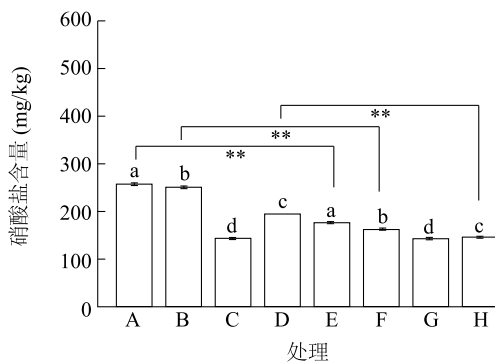
Fig.2 Effects of biological nano-selenium spraying on vitamin C content and total phenols content in Hang cabbage

叶面喷施生物纳米硒能显著增加植物体内的总酚含量(图 2)。喷施不同水平生物纳米硒可以有效促进 2 种有机肥土壤中杭白菜总酚的积累。同各自对照组相比, 1.0 mg/L 喷施水平均能够显著 ($P <$

0.05) 增加 2 种土壤中杭白菜总酚的含量, CMSe1.0、DRSe1.0 处理分别增加了 19.8% 和 12.7%。2.5 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施水平对 2 种有机肥土壤中杭白菜总酚含量的提升较小,

但较对照组仍呈显著差异 ($P < 0.05$), CMS_{2.5}、CMS_{5.0}、DRSe_{2.5}、DRSe_{5.0} 处理下分别提升了 16.4%、2.9%、7.3%、3.9%。

2.2.3 硝酸盐含量 喷施不同水平生物纳米硒可以有效降低 2 种有机肥土壤中杭白菜硝酸盐含量 (图 3)。同各自对照组相比, 2.5 mg/L 喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 降低 2 种土壤中杭白菜的硝酸盐含量, CMS_{2.5}、DRSe_{2.5} 处理分别降低了 44.9% 和 19.1%。1.0 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施水平对 2 种有机肥土壤中杭白菜硝酸盐含量的影响较小, 但较对照组仍呈显著差异 ($P < 0.05$), CMS_{1.0}、CMS_{5.0} 处理分别降低了 2.6%、23.6%, DRSe_{1.0}、DRSe_{5.0} 处理分别降低了 9.3%、16.9%。



A ~ H 依次为 CMCK、CMS_{1.0}、CMS_{2.5}、CMS_{5.0}、DRCK、DRSe_{1.0}、DRSe_{2.5}、DRSe_{5.0} 处理, 各处理见表 2 注。不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理之间差异显著 ($P < 0.05$)。** 表示同一质量浓度生物纳米硒处理下 2 种基肥土壤间存在极显著差异 ($P < 0.01$)。

图 3 生物纳米硒喷施对抗白菜硝酸盐含量的影响

Fig.3 Effects of biological nano-selenium spraying on nitrate content of Hang cabbage

2.3 生物纳米硒喷施对抗白菜抗氧化性的影响

对不同处理组的杭白菜抗氧化性进行测定, 结果 (图 4) 表明, 叶面施用生物纳米硒可以调节蔬菜中的 *POD* 活性、*SOD* 活性、*GSH* 含量和 *GSH-Px* 活性。

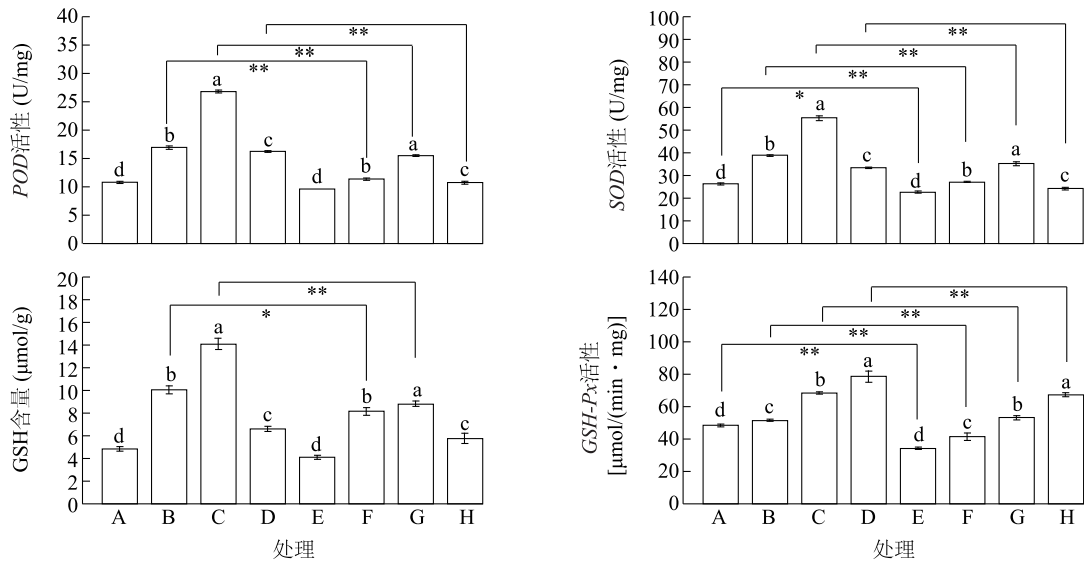
图 4 显示, 喷施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜 *POD* 性。同各自对照组相比, 2.5 mg/L 喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜 *POD* 活性, CMS_{2.5} 处理和 DRSe_{2.5} 处理分别提升了 143.5% 和 62.3%。1.0 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施水平对 2 种有机肥土壤中杭白菜的 *POD* 活性提升幅度较小, 但较对照组仍有显著差异 ($P < 0.05$), CMS_{1.0}、CMS_{5.0} 0 处理和 DRSe_{1.0}、DRSe_{5.0} 处理分别提升了 57.7%、

51.3% 和 18.6%、12.6%。喷施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜 *SOD* 活性。同各自对照组相比, 2.5 mg/L 喷施水平能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜 *SOD* 活性, CMS_{2.5} 处理和 DRSe_{2.5} 处理分别提升了 110.8% 和 55.8%。1.0 mg/L 和 5.0 mg/L 生物纳米硒喷施水平对 2 种有机肥土壤中杭白菜的 *SOD* 提升幅度较小, 但较对照组有显著差异 ($P < 0.05$), CMS_{1.0}、CMS_{5.0} 0 处理和 DRSe_{1.0}、DRSe_{5.0} 处理分别提升了 49.7%、25.1% 和 19.4%、7.4%。

喷施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜 *GSH* 含量。同各自对照组相比, 2.5 mg/L 喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜 *GSH* 含量, CMS_{2.5} 处理和 DRSe_{2.5} 处理分别提升了 190.5% 和 115.7%。CMS_{1.0}、CMS_{5.0} 0 处理和 DRSe_{1.0}、DRSe_{5.0} 处理分别提升了 107.1%、36.2% 和 99.2%、40.8%。喷施不同水平生物纳米硒可以有效提升 2 种有机肥土壤中杭白菜 *GSH-Px* 活性。同各自对照组相比, 5.0 mg/L 喷施水平能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜 *GSH-Px* 活性, CMS_{5.0} 0 处理和 DRSe_{5.0} 0 处理分别提升了 165.4% 和 115.7%。CMS_{1.0}、CMS_{2.5} 0 处理和 DRSe_{1.0}、DRSe_{2.5} 0 处理分别提升了 6.3%、41.3% 和 40.8%、99.2%。

2.4 生物纳米硒喷施对抗白菜矿质元素含量的影响

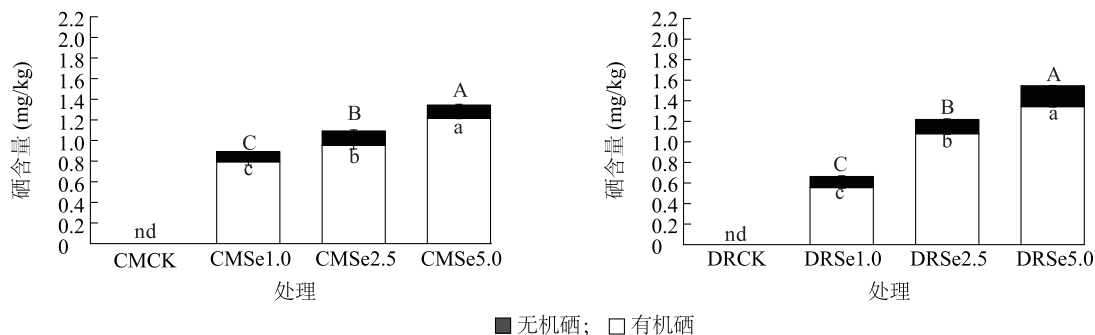
2.4.1 有机硒、总硒含量 与其他微量营养元素类似, 硒的生物利用度很大程度上取决于其化学形式。叶面喷施生物纳米硒后, 植株地上部分的硒含量与生物纳米硒喷施质量浓度呈正相关关系, 且植物中硒的种类多以有机硒为主。图 5 显示, 同各自对照组相比, 不同喷施水平均能够显著 ($P < 0.05$) 提升 2 种土壤中杭白菜有机硒、无机硒、总硒的含量。其中, CMS_{1.0}、CMS_{2.5}、CMS_{5.0} 0 处理和 DRSe_{1.0}、DRSe_{2.5}、DRSe_{5.0} 0 处理下杭白菜无机硒含量分别为 0.10 mg/kg、0.13 mg/kg、0.14 mg/kg 和 0.11 mg/kg、0.14 mg/kg、0.20 mg/kg, 有机硒含量分别为 0.79 mg/kg、0.95 mg/kg、1.22 mg/kg 和 0.55 mg/kg、1.08 mg/kg、1.34 mg/kg, 总硒含量分别为 0.89 mg/kg、1.08 mg/kg、1.36 mg/kg 和 0.66 mg/kg、1.22 mg/kg、1.54 mg/kg。杭白菜体内有机硒的转化率为 82%~89%。说明叶面喷施硒后, 生物纳米硒在杭白菜体内转运, 大部分无机硒转化为有机硒。



A~H 依次为 CMCK、CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0、DRCK、DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 处理,各处理见表 2 注。不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理之间差异显著 ($P<0.05$)。* 和 ** 分别表示同一质量浓度生物纳米硒处理下 2 种基肥土壤间存在显著 ($P<0.05$) 和极显著 ($P<0.01$) 差异。

图 4 生物纳米硒喷施对抗白菜过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD)、还原型谷胱甘肽 (GSH) 和谷胱甘肽过氧化物酶 (GSH-Px) 的影响

Fig.4 Effects of biological nano-selenium spraying on peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), reduced glutathione (GSH) and glutathione peroxidase (GSH-Px) of Hang cabbage



各处理见表 2 注。不同大、小写字母分别表示各处理之间总硒含量和有机硒含量差异显著 ($P<0.05$)。nd 表示未检出。

图 5 生物纳米硒喷施对抗白菜有机硒、无机硒、总硒含量的影响

Fig.5 Effects of biological nano-selenium spraying on the contents of organic selenium, inorganic selenium and total selenium in Hang cabbage

2.4.2 矿质元素及微量元素的含量 从表 3 可知,随着叶面喷施生物纳米硒质量浓度的增加,杭白菜地上部分氮含量呈现先增加后减少的趋势,在硒喷施质量浓度为 2.5 mg/L 时,植物对氮的吸收效果最佳。而磷含量随生物纳米硒质量浓度的增加而降低。

叶面喷施适量生物纳米硒增加了植物地上部分对镁、钙、铁的吸收,降低了对锌的吸收。当施硒质量浓度为中、高水平 (2.5 mg/L 和 5.0 mg/L) 时,植物显著增强了对镁和钙的吸收。而当硒质量浓度为中、低水平 (1.0 mg/L 和 2.5 mg/L) 时,植物体内铁元素显

著增加,但是当施硒质量浓度逐步增大 (5.0 mg/L) 时,则抑制了植物对铁的吸收。与对照相比,施硒降低了杭白菜对锌的吸收,不同硒质量浓度处理组间无显著差异。

2.4.3 生物纳米硒喷施对抗白菜矿质营养及微量元素影响的主成分分析 图 6a 和 6b 分别体现了在牛粪和药渣基肥条件下生物纳米硒对抗白菜体内矿质营养及微量元素的影响。在图 6a 中,第 1 排序轴解释了变量的 66.0%,第 2 排序轴解释了变量的 26.0%。在图 6b 中,第 1 排序轴解释了变量的

63.7%,第2排序轴解释了变量的25.2%。图6中主成分分析图反映了2种基肥土壤中杭白菜地上部分氮、磷、有机硒、总硒以及微量元素钙、镁、铁、锌之间的关系,从而反映不同质量浓度的硒处理组与它们各自对照组之间的差异。负荷解释变量的行为和它们的相关性,而数字显示样本分布。从图6a可以看出,总硒和有机硒的加载方向大致相同,两者之间夹角最小,说明有机硒和总硒的关系十分密切。根

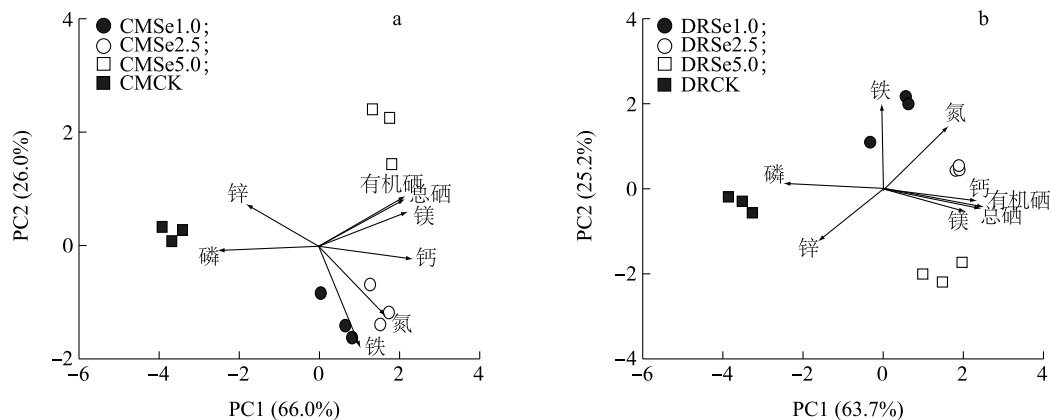
据总硒和有机硒与其余元素之间的夹角大小进行排序:镁<钙<氮<铁<锌<磷。而图6b与图6a的表征较为一致。说明杭白菜中有机硒与总硒之间呈现强烈的正相关性($P<0.01$)。总硒和有机硒与镁、钙、氮之间存在密切的正相关关系,与锌和磷为负相关关系。这一规律表明,喷施生物纳米硒能提高杭白菜体内的总硒、有机硒、镁、钙、氮含量,但降低了锌、磷含量。

表3 生物纳米硒喷施对抗白菜矿质元素含量的影响

Table 3 Effects of biological nano-selenium spraying on mineral elements in Hang cabbage

处理组	氮含量 (%)	磷含量 (%)	镁含量 (%)	钙含量 (%)	铁含量 (%)	锌含量 (mg/kg)
CMCK	3.40±0.01d	4.83±0.06a	0.288±0.01c	1.764±0.09b	0.120±0.01b	62.634±1.55a
CMSe1.0	3.65±0.02b	3.24±0.04b	0.312±0.01b	2.123±0.02a	0.186±0.01a	52.819±6.50b
CMSe2.5	3.71±0.06a	2.83±0.02c	0.333±0.01a	2.155±0.08a	0.176±0.01a	50.171±6.80b
CMSe5.0	3.49±0.04c	2.75±0.01d	0.345±0.01a	2.139±0.08a	0.111±0.01b	55.023±4.75b
DRCK	3.07±0.01d	4.45±0.06a	0.277±0.01c	1.899±0.06b	0.153±0.01c	60.285±0.89a
DRSe1.0	3.46±0.03b	3.08±0.04b	0.287±0.01b	2.010±0.02a	0.196±0.01a	50.330±6.48b
DRSe2.5	3.53±0.03a	2.63±0.03c	0.347±0.01a	2.081±0.02a	0.170±0.01b	52.761±1.01b
DRSe5.0	3.15±0.02c	2.58±0.02c	0.325±0.01a	2.082±0.08a	0.119±0.01d	55.639±2.56b

各处理见表2注。同列数值后不同小写字母表示同一基肥条件下不同质量浓度生物纳米硒处理间差异显著($P<0.05$)。



CMCK、CMSe1.0、CMSe2.5、CMSe5.0、DRCK、DRSe1.0、DRSe2.5、DRSe5.0 见表2注。

图6 生物纳米硒喷施对抗白菜矿质元素含量影响的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis of the effects of biological nano-selenium spraying on mineral element content in Hang cabbage

3 讨论

硒是植物的一种抗氧化生长促进剂。施用适当质量浓度的硒对植物生长有积极的影响^[26-27],且能够增强植物光合能力并改善作物品质^[28-29]。目前,硒的生物强化多采用有机硒或者无机硒,然而这2类硒的生物有效范围较为狭窄,过高过低都会对作物产生毒害。随着纳米技术的发展,更加安全的纳

米硒成为人们关注的焦点^[30]。纳米硒作为一种新形态的硒,凭借尺寸小和球状外形等优势更利于穿越细胞膜进入细胞,同时具有安全性高、生物活性好等优点。为了降低土壤对硒吸附和固定的负面影响,本研究采用叶面喷施纳米硒,以提高外源硒的生物利用度。

3.1 生物纳米硒喷施对抗白菜生长和品质的影响

产量和生物量是表征作物生长发育情况的重要

指标^[1,31-36]。本研究发现,中、低质量浓度的生物纳米硒喷施能促进细胞代谢,进而促进生物量的增加。此外,土壤基肥条件不同也会对植株的生长发育产生一定影响。杭白菜生物量与硒质量浓度呈正相关关系。牛粪基肥土壤更能提高纳米硒对杭白菜的喷施效果,这可能与有机质、氮、磷含量高于药渣基肥土壤有关。Motesharezadeh 等^[37]研究结果表明,基于钙质土壤叶面施硒的菠菜鲜质量比非钙质土壤中增加 56%。Quang 等^[38]研究结果也表明富硒植物的生物有效性受到多种土壤参数的影响。说明富硒植物的生物量不单纯与硒质量浓度有关,还可能与土壤类型等多种因素有关。同时,本研究发现纳米硒能够提高杭白菜叶绿素、总酚的含量,降低硝酸盐含量,对可溶性糖的影响不显著。这与 Golubkina 等^[39]和 Liu 等^[13]的研究结果类似。在植物体内,硒可以通过调控 5-氨基乙酰丙酸脱水酶(*ALAD*)和胆色素原脱氨酶(*PB-GD*) 2 种酶的合成来影响植株叶绿素的合成^[40]。纳米硒也可能通过增强这 2 种酶活性促进叶绿体的合成,从而增强杭白菜的光合能力。

本研究还发现纳米硒可激活植物抗氧化系统,促进植物总酚的积累。这与 Abdalla 等^[41]和 Pan-nico 等^[42]的研究结果一致。施加硒对杭白菜体内可溶性糖含量无显著影响,这与黄雪梅等^[43]研究结果基本一致。此外,Ruiz 等^[44]的研究结果表明,硒的施用激发了硝酸还原酶(*NR*)、谷氨酰胺合成酶(*GS*)和谷氨酸合成酶(*GOGAT*)的活性,并导致植株中总还原氮含量增加,同时外源硒通过提高硝酸还原酶和谷氨酸合成酶的活性,可以有效降低植物中硝酸盐的过度积累。由此推测,纳米硒可能参与了这种动态平衡过程,从而维持了杭白菜氮的正常代谢,同时也降低了硝酸盐的过度积累。

3.2 生物纳米硒喷施对杭白菜抗氧化性的影响

纳米硒的喷施可以提升杭白菜抗氧化性能,同时,抑制过氧化物的产生。本研究发现施加适当质量浓度的生物纳米硒显著提高了杭白菜维生素 C 含量、*POD* 活性、*SOD* 活性、*GSH* 含量、*GSH-Px* 活性。已有研究结果表明,硒可以促进植物 AsA-*GSH* 抗氧化系统的运转^[45-46]。喷施相同质量浓度的生物纳米硒,药渣基肥处理组植株 V_c 含量要高于牛粪基肥处理组,这说明硒能够提高植物体内抗氧化系统活性可能与土壤因素有关。郝松澜等^[47]发现,钼

可以激发植物细胞内抗坏血酸过氧化物酶(*APX*)、单脱氢抗坏血酸还原酶(*MDHAR*)和脱氢抗坏血酸还原酶(*DHAR*)的活性,进而促进维生素 C 的氧化还原。药渣基肥中或许存在着类似钼的物质协同纳米硒一起促进杭白菜植株维生素 C 的合成。此外,植物体内 *GSH-Px* 的合成与硒元素密不可分,*GSH-Px* 作为保护细胞免受过氧化损伤的功能酶之一,同样具有去除 O_2^- 和 H_2O_2 的作用,从而抑制脂质过氧化物的产生^[48]。施用中、低质量浓度的纳米硒能有效提升 *GSH-Px* 活性,促进植物抗氧化能力的提升,这与 Dai 等^[49]的研究结果一致。

3.3 生物纳米硒喷施对杭白菜营养元素含量的影响

在适当的硒质量浓度范围内,施硒可以促进植物对 Ca、Mg、Mn 等元素的吸收^[50]。李登超等^[51]发现,添加硒增加了小白菜地上部分 N、Ca、Mg、Mn 元素的含量,降低了 P、K、S 元素的含量。在本研究中,叶面喷施适量生物纳米硒显著增加了植物地上部分对氮、镁、钙、铁的吸收,降低了对磷、锌的吸收,这与前人试验结果基本一致。2014 年,国务院办公厅发布《中国食物与营养发展纲要(2014-2020 年)》,提出建立健全居民食物与营养监测管理制度,重视解决微量营养素缺乏等问题。目前,富硒产业的标准化缺乏全面、系统的规划,农产品富硒标准也经过了多次修改^[52]。根据新发表的富硒标准《DBS64/007-2021》、《GH/T 1135-2017》、《DB/T 566-2017》,富硒蔬菜中的总硒含量范围为 0.1~1.0 mg/kg (DW),且有机硒含量要求占总硒的 80% 以上,便是合格的富硒农产品。本研究中除对照外,CMSel.0 和 DRSe1.0 处理组下的杭白菜均达到了富硒蔬菜的标准要求。叶面喷施 1.0 mg/kg 的纳米硒溶液能有效将杭白菜植株体内的无机硒转化为有机硒,满足了富硒标准的要求,同时还可提升可食用部分中 Mg、Ca、Fe 等有益元素含量。

4 结 论

1) 叶面喷施 2.5 mg/L 的生物纳米硒可显著提高杭白菜地上部分的生物量和株高。

2) 正常基肥施用条件下,叶面喷施 2.5 mg/L 的生物纳米硒有利于促进杭白菜品质、抗氧化性的提升。

3) 杭白菜地上部分有机硒、无机硒、总硒含量

与喷施的生物纳米硒质量浓度呈正相关关系,叶面喷施适量生物纳米硒能有效促进杭白菜地上部分有机硒、无机硒、总硒及氮、钙、镁、铁的吸收。

参考文献:

- [1] DINH Q T, WANG M K, TRAN T A T, et al. Bioavailability of selenium in soil-plant system and a regulatory approach[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2019, 49(6): 443-517.
- [2] LI S, BANUELOS G S, WU L, et al. The changing selenium nutritional status of Chinese residents[J]. Nutrients, 2014, 6(3): 1103-1114.
- [3] SAFFARYAZDI A, LAHOUTI M, GANJEALI A, et al. Impact of selenium supplementation on growth and selenium accumulation on spinach (*Spinacia oleracea* L.) plants[J]. Notulae Scientia Biologicae, 2012, 4(4): 95-100.
- [4] ASLANI F, BAGHERI S, JULKAPLI N M, et al. Effects of engineered nanomaterials on plants growth: an overview[J]. Scientific World Journal, 2014, 4: 1-28.
- [5] MORALES-ESPINOZA M C, CADENAS-PLIEGO G, PEREZ-ALVAREZ M, et al. Se nanoparticles induce changes in the growth, antioxidant responses, and fruit quality of tomato developed under NaCl stress[J]. Molecules, 2019, 24(17): 3030.
- [6] 朱燕云,孔祥平,吴娥娇,等. 耐高盐枯草芽孢杆菌 XP 合成球形纳米硒及其抑制草莓病原真菌生物活性[J]. 生物工程学报, 2021, 37(8): 2825-2835.
- [7] EL-SAADONY M T, SAAD A M, NAJJAR A A, et al. The use of biological selenium nanoparticles to suppress *Triticum aestivum* L. crown and root rot diseases induced by *Fusarium* species and improve yield under drought and heat stress[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2021, 28(8): 4461-4471.
- [8] BANO I, SKALICKOVA S, SAJJAD H, et al. Uses of selenium nanoparticles in the plant production[J]. Agronomy-Basel, 2021, 11(11): 2229.
- [9] DOMOKOS-SZABOLCSY E, MARTON L, SZTRIK A, et al. Accumulation of red elemental selenium nanoparticles and their biological effects in *Nicotinia tabacum*[J]. Plant Growth Regulation, 2012, 68(3): 525-531.
- [10] DJANAGUIRAMAN M, BELLIRAJ N, BOSSMANN S H, et al. High-temperature stress alleviation by selenium nanoparticle treatment in grain sorghum[J]. Acs Omega, 2018, 3(3): 2479-2491.
- [11] LIU J W, ZHU X F, CHEN X, et al. Defense and inhibition integrated mesoporous nanoselenium delivery system against tomato gray mold[J]. Environmental Science-Nano, 2020, 7(1): 210-227.
- [12] WU M R, CONG X, LI M, et al. Effects of different exogenous selenium on Se accumulation, nutrition quality, elements uptake, and antioxidant response in the hyperaccumulation plant *Cardamine violifolia* [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 204: 111045.
- [13] LIU L, WANG L X, LYU L H, et al. Improvement of growth and quality and regulation of the antioxidant system and lipid peroxidation in chinese cabbage (*Brassica pekinensis* (Lour.) Rupr.) by exogenous sodium selenite[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2020, 18(6): 7473-7481.
- [14] WU Z C, XU S J, SHI H Z, et al. Comparison of foliar silicon and selenium on cadmium absorption, compartmentation, translocation and the antioxidant system in Chinese flowering cabbage[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 166: 157-164.
- [15] QING X J, ZHAO X H, HU C X, et al. Selenium alleviates chromium toxicity by preventing oxidative stress in cabbage (*Brassica campestris* L. ssp *Pekinensis*) leaves[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2015, 114: 179-189.
- [16] SANTIAGO F E M, SILVA M L S, CARDOSO A A S, et al. Biochemical basis of differential selenium tolerance in arugula (*Eruca sativa* Mill.) and lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2020, 157: 328-338.
- [17] ULHASSAN Z, ALI S, GILL R A, et al. Comparative orchestrating response of four oilseed rape (*Brassica napus*) cultivars against the selenium stress as revealed by physio-chemical, ultrastructural and molecular profiling[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 634-647.
- [18] HAJIBOLAND R, SADEGHZADEH N, BOSNIC D, et al. Selenium activates components of iron acquisition machinery in oilseed rape roots[J]. Plant and Soil, 2020, 452(1/2): 569-586.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品中抗坏血酸的测定: GB 5009.86-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 1-9.
- [21] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [22] 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB 5009.33-2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017: 409-423.
- [23] 李文仙, 俞丹, 林玲, 等. Folin-Ciocalteu 比色法应用于蔬菜和水果总多酚含量测定的研究[J]. 营养学报, 2011, 33(3): 302-307.
- [24] 国家食品药品监督管理局, 国家卫生和计划生育委员会. 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, 2017: 1-8.
- [25] 湖北省卫生健康委员会. 食品安全地方标准富硒食品中无机硒的测定方法: DBS 42/010-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 2-18.
- [26] HOSSAIN A, SKALICKY M, BRESTIC M, et al. Selenium biofortification: roles, mechanisms, responses and prospects [J]. Molecules, 2021, 26(4): 881.
- [27] WEN D. Selenium in horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 2021, 289: 110411.
- [28] GARZA-GARCIA J J O, HERNANDEZ-DIAZ J A, ZAMUDIO-

- OJEDA A, et al. The role of selenium nanoparticles in agriculture and food technology [J]. *Biological Trace Element Research*, 2021, 200(5): 2528-2548.
- [29] WANG Z, HUANG W, PANG F. Selenium in soil-plant-microbe: A review [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021, 108(2): 167-181.
- [30] 雷红量, 丛文字, 黎照磊, 等. 植物根系与叶片吸收硒的关键过程及影响因素 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(8): 1456-1467.
- [31] 李莉婕, 赵泽英, 黎瑞君, 等. 水氮钾耦合对火龙果产量和品质的调控效应 [J]. *南方农业学报*, 2022, 53(3): 859-868.
- [32] 王贝贝, 徐旭, 赵艳, 等. 植物生长调节剂对花后渍水遮阴小麦籽粒淀粉合成和干物质积累的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2022, 38(1): 9-19.
- [33] 蒋明金, 徐文波, 王荣基, 等. 减氮对机插杂交水稻产量和稻米品质的影响 [J]. *南方农业学报*, 2022, 53(1): 104-114.
- [34] 谢昶琰, 王迪, 安祥瑞, 等. 滴灌减量施肥对梨树体养分及果实产量、品质的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(6): 1526-1533.
- [35] 姚童言, 黄绵松, 宋亚康, 等. 长期施用菇渣与化肥对潮土地玉米和小麦产量及稳定性的影响 [J]. *生物加工过程*, 2021, 19(1): 79-84.
- [36] 吴金芝, 黄明, 王志敏, 等. 干旱对冬小麦旗叶光合参数、产量和水分利用效率的影响 [J]. *江苏农业学报*, 2021, 37(5): 1108-1118.
- [37] MOTESHAREZADEH B, ALIKHANI H A, MA Q, et al. Investigation of different selenium sources and supplying methods for selenium enrichment of basil vegetable (a case study under calcareous and non-calcareous soil systems) [J]. *Recent Patents on Food, Nutrition & Agriculture*, 2021, 12(1): 73-82.
- [38] QUANG T D, ZHOU F, WANG M, et al. Assessing the potential availability of selenium in the soil-plant system with manure application using diffusive gradients in thin-films technique (DGT) and DOM-Se fractions extracted by selective extractions [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143047.
- [39] GOLUBKINA N A, KOSHELEVA O V, KRIVENKOV L V, et al. Intersexual differences in plant growth, yield, mineral composition and antioxidants of spinach (*Spinacia oleracea* L.) as affected by selenium form [J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 225: 350-358.
- [40] 孔凡丽, 张恩萍, 曹庆军, 等. 硒的生理功能及在主要作物中的吸收富集 [J]. *东北农业科学*, 2020, 45(6): 115-118.
- [41] ABDALLA M A, WICK J E, FAMUYIDE I M, et al. Selenium enrichment of green and red lettuce and the induction of radical scavenging potential [J]. *Horticulturae*, 2021, 7(11): 488.
- [42] PANNICO A, EL-NAKHEL C, KYRIACOU M C, et al. Combating micronutrient deficiency and enhancing food functional quality through selenium fortification of select lettuce genotypes grown in a closed soilless system [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 20(10): 1495.
- [43] 黄雪梅, 岳顺念, 王琦瑞. 不同浓度亚硒酸钠对水培生菜富硒品质的影响 [J]. *广东农业科学*, 2018, 45(1): 29-33.
- [44] RUIZ J M, ROMERO L. Nitrogen efficiency and metabolism in grafted melon plants [J]. *Scientia Horticulturae*, 1999, 81(2): 113-123.
- [45] 张妍妍, 晋莹莹, 高尚, 等. 草莓果实抗坏血酸含量及相关代谢酶活性对外源硒代蛋氨酸的响应 [J]. *河南科技学院学报 (自然科学版)*, 2021, 49(1): 6-13.
- [46] ULHASSAN Z, GILL R A, ALI S, et al. Dual behavior of selenium: insights into physio-biochemical, anatomical and molecular analyses of four Brassica napus cultivars [J]. *Chemosphere*, 2019, 225: 329-341.
- [47] 郝松澜, 刘培杰, 谭启玲, 等. 锌钼硒施用对小白菜的作用效果及锌钼硒含量的影响 [J]. *肥料与健康*, 2020, 47(6): 26-30, 34.
- [48] LI D, ZHOU C, ZOU N, et al. Nanoselenium foliar application enhances biosynthesis of tea leaves in metabolic cycles and associated responsive pathways [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 273: 116503.
- [49] DAI H, WEI S, SKUZA L, et al. Selenium spiked in soil promoted zinc accumulation of Chinese cabbage and improved its antioxidant system and lipid peroxidation [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 179-184.
- [50] 陈铭, 刘更另. 高等植物的硒营养及在食物链中的作用 (二) [J]. *土壤通报*, 1996(4): 185-188.
- [51] 李登超, 朱祝军, 徐志豪, 等. 硒对小白菜生长和养分吸收的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(3): 353-358.
- [52] 陈永波, 刘淑琴, 刘瑶, 等. 富硒产品中硒的形态分析及化学评分模式的建立 [J]. *生物资源*, 2021, 43(1): 79-85.

(责任编辑: 张震林)