

叶面硒强化对辣椒硒累积及其营养品质的影响

聂根新¹, 陈徐俊¹, 涂田华¹, 鄢磊¹, 黄启华³, 吴玲², 卢坚雯³, 周瑶敏¹

(1. 江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所 南昌 330200;

2. 江西省农业科学院畜牧兽医研究所 南昌 330200; 3. 宜春市硒资源开发利用中心 江西宜春 336000)

摘要:为研究叶面硒强化对辣椒硒含量和营养品质的影响,以丰田椒霸辣椒为试材,以亚硒酸钠为硒源,以去离子水为对照(CK),设置4个亚硒酸钠溶液质量浓度(以含硒量计)(2.0、4.0、6.0、8.0 mg·L⁻¹,分别为T1、T2、T3、T4处理)叶面喷施试验,共5个处理,以明确辣椒叶面喷施亚硒酸钠溶液的最佳浓度和富硒辣椒的最佳采收期。结果表明,叶面喷硒处理辣椒果实中总硒含量较CK显著提高,同时还能改善辣椒果实的营养品质。叶面喷硒处理辣椒有机硒占比均大于65%,与CK相比,总硒含量是CK的1.03~21.43倍,维生素C含量提升幅度最高达51.81%,辣椒素含量提升幅度最高为14.81%,蛋白质含量提升幅度最高达16.56%,还原糖含量提升幅度最高达8.69%。T2~T4处理第4次收获的辣椒果实中总硒含量高于其他时期收获的辣椒,而各处理第1次和第2次收获的辣椒果实中总硒含量均低于其他时期收获的辣椒。当硒喷施质量浓度为4.0 mg·L⁻¹时第3~6次收获的辣椒有机硒占比均较高,均高于80%。经过多次叶面喷硒后和提高硒喷施浓度,辣椒果实营养品质也出现一定程度的下降,表明辣椒对硒也有耐受性,当超过其耐受能力后,会降低其营养品质。灰色关联度分析结果表明,硒喷施质量浓度为4.0、8.0 mg·L⁻¹时第4次采摘的辣椒品质综合评价优于其他处理。因此,从富硒和营养品质综合考虑,辣椒叶面喷硒质量浓度选择4.0~8.0 mg·L⁻¹为宜,第4次采收的辣椒果实品质最佳。

关键词:辣椒;叶面喷硒;营养品质;连续采摘

中图分类号:S641.3

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)08-183-07

Effects of selenium enrichment on the selenium accumulation and quality of chili pepper

NIE Genxin¹, CHEN Xujun¹, TU Tianhua¹, WU Lei¹, HUANG Qihua³, WU Ling², LU Jianwen³, ZHOU Yaomin¹

(1. Institute of Quality Safety and Standards of Agricultural Products, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, Jiangxi, China; 2. Institute of Animal Husbandry and Veterinary Medicine, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, Jiangxi, China; 3. Yichun Selenium Resource Development and Utilization Center, Yichun 336000, Jiangxi, China)

Abstract: To investigate the effects of foliar selenium enhancement on the selenium content and nutritional quality of chili pepper, this study used Fengtian Jiaoba pepper as the test material, sodium selenite as the selenium source, and deionized water as the control (CK). Four mass concentrations of sodium selenite solution (based on selenium content) (2.0, 4.0, 6.0, 8.0 mg·L⁻¹, designated as T1, T2, T3, T4 treatments, respectively) were set up for foliar spraying experiments, with a total of five treatments, to determine the optimal concentration of sodium selenite solution for foliar spraying of chili pepper and the optimal harvesting period for selenium rich chili pepper. The results showed that foliar selenium spraying significantly increased the total selenium content in chili pepper fruits compared with CK, and also improved the nutritional quality of chili pepper fruits. The proportion of organic selenium in chili pepper treated with foliar selenium spraying was greater than 65%. Compared with CK, the total selenium content was 1.03-21.43 times that of CK, the highest increase in vitamin C content was 51.81%, the highest increase in capsaicin content was 14.81%, the highest increase in protein content was 16.56%, and the highest increase in reducing sugar content was 8.69%. In the T2-T4 treatments, the

收稿日期:2024-11-21;修回日期:2025-03-12

基金项目:江西省现代农业产业技术体系(JXARS-06)

作者简介:聂根新,男,副研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:niegenxin78@163.com

通信作者:吴玲,女,副研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:haowuling1982@126.com

卢坚雯,女,高级农艺师,主要从事硒资源利用研究。E-mail:1139817128@qq.com

周瑶敏,女,研究员,主要从事农产品质量安全研究。E-mail:zhouyaomin666@163.com

total selenium content in chili pepper fruits harvested at the 4th time was higher than that in chili pepper harvested at other periods, while the total selenium content in chili pepper fruits harvested at the 1st and 2nd times in each treatment was lower than that in chili pepper harvested at other periods. When the selenium spraying mass concentration was $4.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, the proportion of organic selenium in the 3rd to 6th harvested of chili pepper was relatively high, all exceeding 80%. After multiple foliar selenium sprayings and with the increase of selenium spraying concentration, the nutritional quality of chili pepper fruits also decreased to a certain extent, indicating that chili pepper also has tolerance to selenium. When the tolerance capacity is exceeded, its nutritional quality will be reduced. The results of the grey correlation analysis indicate that the comprehensive evaluation of the quality of chili pepper harvested with a selenium spraying mass concentration of 4.0 and $8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for the 4th harvest is superior to other chili pepper. Therefore, considering both selenium enrichment and nutritional quality, it is advisable to choose a selenium concentration of $4.0\text{--}8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ for foliar spraying of chili pepper, with the best fruit quality observed in the 4th harvest.

Key words: Chili pepper; Foliar selenium spraying; Nutritional quality; Continuous harvesting

硒是人体必需的微量元素之一,是维持人体正常生理功能不可或缺的重要物质,但人体自身不能合成,通过食物摄入成为人体补充硒的主要途径。人类长期硒摄入不足会导致克山病、大骨节病、癌症、心血管疾病、肝脏疾病和白内障等疾病的发生^[1]。全世界有许多国家和地区缺硒,而我国有72%的地区缺硒或处于低硒状态^[2-3]。硒在植物中也具有重要作用,可以促进种子萌发,调节土壤的酸度,促进土壤微生物群落的多样性,促进光合色素合成,提高光合效率以及植物对营养的吸收能力,促进植物生长^[4-5]。硒还能提高植物抗氧化酶活性,修复因有毒、有害物质或不良环境因素影响而受损的关键生理和代谢过程^[6-8],并可提高植物拮抗重金属的能力,减轻重金属胁迫的危害^[7]。适宜浓度的硒可促进蔬菜生长,蔬菜还能将土壤中的无机硒转化为可供人体直接吸收的氨基酸态硒,是一条对人体相对安全有效的补硒途径^[9]。目前,硒的功效越来越受到关注,富硒功能性农产品也日趋成为研究热点,《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)还明确规定富硒蔬菜类产品(以干质量计算)中总硒含量(w ,后同)应在 $0.10\text{--}1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有机硒含量应在 65%以上^[10],因此通过硒强化提高农作物硒含量具有十分重要的意义。研究表明,施硒能提高蔬菜的硒含量,提高品质,且能维持后期品质不变,效果显著且稳定^[11]。研究表明,洋葱适量根施硒肥,不仅可以促进增产,还能提高黄酮含量^[4]。小米葱施用硒肥不仅可以提高产量和品质,还能改善土壤肥力^[12]。施硒既有益于番茄生长,又可以增加叶片和果实中的硒含量和单果质量,增大果实硬度,促进可溶性固形物积累,增加可溶性糖、可溶性蛋白、苹果酸、类黄酮、花青素、维生素 C 等的含量,增强番茄的抗氧化能力,从而提高番茄果实品质^[13-14]。施硒也能显

著提高韭菜、黄瓜、菜薹和辣椒等多种蔬菜硒含量,并显著提高品质^[15-19]。譙祖勤等^[20]研究表明,不同蔬菜品种对硒肥的吸收具有选择性,如香菜虽然具有较强的富硒能力,但硒肥对香菜吸收硒元素具有抑制作用;上海青和菠菜对硒肥均有较好的吸收作用,施硒可促进其对硒元素的吸收。根施硒肥虽然能提高蔬菜硒含量,但是利用率相对较低,过量施用,会对土壤造成污染。而叶面喷施硒肥具有用量低、利用率高、对土壤污染轻的优点。袁伟玲等^[21-22]研究表明,叶面施硒是蔬菜最佳的施硒方式,可增加生菜可溶性总糖和总酚含量,使用低浓度硒能增加生菜维生素 C 和粗纤维含量,而高浓度硒则会降低其含量。对萝卜、包菜和辣椒叶面喷施无机硒,其可食用部位的硒含量、有机硒占比均能达到《富硒农产品》(GH/T 1135—2017)的要求^[23]。小白菜可食部分硒含量随着叶面施硒浓度的升高逐渐增加^[24]。叶面施用适宜浓度的无机硒可以增加白菜的硒含量与产量,同时能改善白菜品质^[25]。叶面喷施 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚硒酸钠溶液可提高萝卜产量,但是 $40.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 亚硒酸钠溶液对萝卜生长具有抑制作用^[26]。叶面喷施适宜浓度硒,可以显著提高蔬菜产量和品质,过高浓度的硒会抑制蔬菜生长^[15, 22, 27-28]。李冠男等^[29]研究也表明,当施硒浓度较低时,对蔬菜产量有一定的促进作用,但当施硒浓度过高时,对蔬菜生长有抑制作用。由此可见,适宜浓度的外源硒有利于蔬菜的生长,但浓度过高则会抑制生长。富硒辣椒具有营养丰富、经济价值高等优点,但是目前针对富硒辣椒多次采摘后一些指标变化的研究还比较少,赵世军^[30]研究表明, $0.09 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硒酵母处理可促进低温胁迫下辣椒种子萌发和幼苗生长,提高辣椒抗冷性。土壤中施入硒含量(w ,后同)为 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硒肥是最适合辣椒进行富硒栽培的

土壤硒浓度^[31]。土壤适量施用硒肥可显著提高辣椒产量、硒含量、硒累积量及硒肥利用率,以施用 $20\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 时效果最好^[18]。叶面喷施适宜浓度的亚硒酸钠能显著提高辣椒产量和果实中的硒、钙和铁的含量,有效改善辣椒品质,叶面喷施亚硒酸钠的适宜质量浓度为 $50\sim 100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[32]。同时施用 $0.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 亚硒酸钠和 $150\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 褪黑素能明显降低辣椒细胞质膜透性,提高花粉萌发率、抗氧化酶活性和叶绿素含量,增加果实产量及干物质积累量,提高辣椒对高温胁迫的抵抗力^[33]。由于辣椒可多次采摘,收获期较长,仅仅采摘期前施硒难以保证全周期辣椒能达到富硒蔬菜标准的要求,而过量施硒又易造成植物生长障碍和土壤污染,因此研究不同施硒浓度下连续采摘时辣椒硒含量和营养品质的变化对富硒辣椒生产具有重要意义。本研究拟通过多次叶面喷硒、多次采摘,研究辣椒硒含量和营养品质指标的变化,并引入灰色关联度分析法评价不同试验方案的结果,为富硒辣椒生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料

辣椒品种为丰田椒霸,由山东省潍坊市寿光市华泽种业有限公司提供。硒强化剂为亚硒酸钠(化学纯,含量 $\geq 97\%$),由国药集团化学试剂有限公司生产。使用时以去离子水稀释定容至所需浓度。

1.2 方法

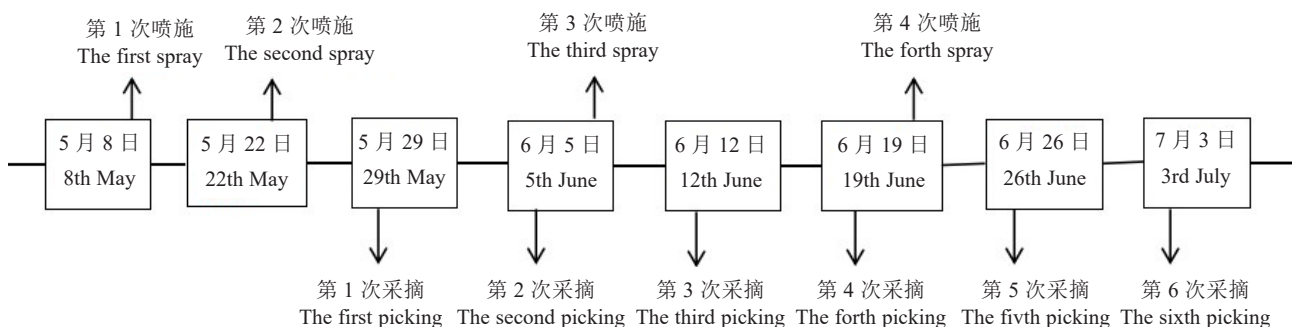


图1 叶面喷硒和辣椒采摘时间安排流程

Fig. 1 Process of leaf spraying selenium and chili peper picking time arrangement

1.3 测定方法

参照 GB 5009.93—2017^[34]测定总硒含量,参照 NY/T4353—2023^[35]测定有机硒含量,结果均以干基计,有机硒占比/ $\%$ =有机硒含量/总硒含量 $\times 100$ 。

参照 GB 5009.86—2016^[36]测定维生素 C 含量,参照 NY/T 2637—2014^[37]测定可溶性固形物含量,参照 NY/T 1381—2007^[38]测定辣椒素含量,参

照 GB 5009.5—2016^[39]测定蛋白质含量,参照 GB 5009.7—2016^[40]测定还原糖含量,结果以鲜质量计。

试验于 2024 年 5—7 月在江西省南昌市莲塘镇省农科院蔬菜大棚中进行。试验共设 5 个处理,以喷施去离子水作为对照(CK),叶面分别喷施亚硒酸钠溶液质量浓度(以含硒量计) 2.0 、 4.0 、 6.0 、 $8.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 为 T1、T2、T3、T4 处理。按照完全随机方法,每个处理设 3 次重复,每个处理定植辣椒 20 株,高垄栽培,垄高 15 cm,垄宽 80 cm,株距、行距均为 40 cm,每垄定植 2 行。管理按当地正常生产方式进行。

亚硒酸钠溶液喷施时间:在辣椒开花坐果时(2024 年 5 月 8 日)进行第 1 次喷施,之后每间隔 14 d 喷施 1 次,共喷施 4 次。具体时间如图 1 所示。每次每株辣椒喷施亚硒酸钠溶液 50 mL。

样品采集:第 2 次叶面喷施亚硒酸钠溶液后 7 d 进行第 1 次样品采集,隔 7 d 进行第 2 次样品采集。第 2 次样品采集完成后当日进行第 3 次叶面喷施,间隔 7 d 进行第 3 次样品采集,再隔 7 d 进行第 4 次样品采集。第 4 次样品采集完成后当日进行第 4 次叶面喷施,间隔 7 d 进行第 5 次样品采集,再隔 7 d 进行第 6 次样品采集。具体时间如图 1 所示。样品选择处于绿熟期的辣椒果实,每个处理的每个重复采集 1 份样品,每份样品 1 kg,装入塑料自封袋。将采集好的样品避光保存并立即带回实验室进行处理,先将样品表面泥土、灰尘和异物清洗干净,再用去离子水冲洗,晾干。按照相关测试方法要求用匀浆机充分打碎、混匀后装袋备用。

照 GB 5009.5—2016^[39]测定蛋白质含量,参照 GB 5009.7—2016^[40]测定还原糖含量,结果以鲜质量计。

1.4 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析。用灰色关联度分析作为评价辣椒综合品质的统计方法。

2 结果与分析

2.1 叶面喷施不同浓度硒对辣椒硒累积能力的影响

由表 1 可知,各喷硒处理的辣椒果实中总硒含量是CK 的 1.03~21.43 倍,均较 CK 显著提高。T1 处理每次收获辣椒果实中总硒含量均低于 0.1 mg·kg⁻¹。

T2 处理前 3 次收获的辣椒果实中的总硒含量均低于 0.1 mg·kg⁻¹,后 3 次收获辣椒果实总硒含量均高于 0.1 mg·kg⁻¹。T3、T4 处理各次收获的辣椒果实总硒含量均高于 0.1 mg·kg⁻¹。T2~T4 处理第 4 次收获的辣椒果实中总硒含量均高于其他时期收获的辣椒,而各处理第 1 次和第 2 次收获的辣椒中总硒含量均低于其他时期。

表 1 不同硒浓度叶面喷施下不同采摘次数辣椒果实中硒累积情况

Table 1 Selenium accumulation in chili pepper fruits with different picking times under foliar spraying of different selenium concentrations

硒类别	处理	第 1 次采收	第 2 次采收	第 3 次采收	第 4 次采收	第 5 次采收	第 6 次采收
Selenium class	Treatment	The 1st harvest	The 2nd harvest	The 3rd harvest	The 4th harvest	The 5th harvest	The 6th harvest
w(总硒) Total selenium content/(mg·kg ⁻¹)	CK	0.030±0.002 d	0.023±0.003 e	0.032±0.002 d	0.021±0.001 e	0.027±0.001 d	0.028±0.001 d
	T1	0.031±0.005 c	0.058±0.004 d	0.094±0.001 c	0.073±0.002 d	0.063±0.002 c	0.063±0.002 c
	T2	0.091±0.009 b	0.089±0.004 c	0.095±0.001 c	0.144±0.003 c	0.136±0.001 b	0.143±0.003 b
	T3	0.113±0.011 b	0.104±0.005 b	0.178±0.006 b	0.203±0.006 b	0.139±0.004 b	0.140±0.002 b
	T4	0.169±0.006 a	0.170±0.003 a	0.297±0.013 a	0.450±0.009 a	0.239±0.007 a	0.234±0.009 a
w(有机硒) Organic selenium content/(mg·kg ⁻¹)	CK	0.022±0.001 d	0.017±0.001 e	0.021±0.001 d	0.015±0.001 e	0.019±0.001 e	0.021±0.001 e
	T1	0.023±0.001 d	0.043±0.001 d	0.068±0.001 c	0.055±0.001 d	0.048±0.002 d	0.047±0.002 d
	T2	0.067±0.002 c	0.068±0.001 c	0.076±0.001 c	0.119±0.004 c	0.116±0.006 b	0.117±0.002 b
	T3	0.082±0.001 b	0.081±0.001 b	0.143±0.006 b	0.159±0.002 b	0.105±0.005 c	0.110±0.003 c
	T4	0.124±0.001 a	0.131±0.001 a	0.228±0.010 a	0.347±0.006 a	0.180±0.001 a	0.181±0.001 a
有机硒占比 Proportion of organic selenium/%	CK	73.33	73.91	65.63	71.43	70.37	75.00
	T1	74.19	74.14	72.34	75.34	76.19	74.60
	T2	73.63	76.40	80.00	82.64	85.29	81.82
	T3	72.57	77.88	80.34	78.33	75.54	78.57
	T4	73.37	77.06	76.77	77.11	75.31	77.35

注:表中同列不同小写字母表示同一硒类别的不同处理间差异显著($p<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($p<0.05$) between different treatments of the same selenium class.

叶面喷施硒后,第 1~4 次采收辣椒果实中有机硒含量随着硒喷施浓度提高而增加。各喷硒处理第 2~5 次采收的果实中有机硒含量占比均高于 CK,各喷硒处理有机硒占比为 72.34%~85.29%,均大于 65%。辣椒中有机硒占比较高的是 T2 处理第 3~6 次收获的辣椒,有机硒占比均高于 80%。

2.2 叶面喷施不同浓度硒对辣椒营养品质的影响

由表 2 可知,叶面喷硒处理辣椒果实中维生素 C、可溶性固形物含量均高于 CK,喷硒处理后辣椒果实中维生素 C、可溶性固形物、辣椒素、蛋白质、还原糖含量最高提升幅度分别达 51.81%、14.81%、13.58%、16.56%、8.69%。辣椒果实中维生素 C、可溶性固形物、辣椒素含量以 T2 处理最高,蛋白质含量以 T2 处理第 4 次收获的辣椒最高。T2 处理第 1 次收获的辣椒果实中维生素 C 含量最高,T2 处理

第 1 次收获的辣椒果实可溶性固形物含量最高,T2 处理第 3 次收获的辣椒果实中辣椒素含量最高,T2、T4 处理第 4 次收获的辣椒果实中还原糖含量均最高。

2.3 辣椒综合品质评价分析

采用灰色关联度分析对辣椒品质进行综合评价分析^[41],不同硒喷施浓度、采摘次数辣椒品质综合评价结果排序见表 3。排名第 1 的是 T2 处理第 4 次采摘的辣椒,排名第 2 的 T4 处理第 4 次采摘的辣椒,排名第 3 的是 T3 处理第 3 次采摘的辣椒。排名居后的是 T1 处理和未喷施硒的辣椒。

3 讨论与结论

施用一定浓度的硒肥可有效促进蔬菜的生长发育,提高蔬菜可食部位的硒含量^[42]。叶面施硒是

表 2 不同硒浓度叶面喷施下不同采摘次数辣椒果实中不同营养品质指标的含量

Table 2 Different nutrient quality content of chili pepper fruits harvested with different picking times under different selenium concentrations and foliar spraying

品质指标	处理	第 1 次采收	第 2 次采收	第 3 次采收	第 4 次采收	第 5 次采收	第 6 次采收
Quality indicators	Treatment	The 1st harvest	The 2nd harvest	The 3rd harvest	The 4th harvest	The 5th harvest	The 6th harvest
w (维生素 C) Vitamin C content/ ($\text{mg}\cdot 100\text{g}^{-1}$)	CK	17.91±0.08 d	17.84±0.03 d	17.90±0.02 e	17.96±0.03 e	17.84±0.03 e	17.69±0.06 e
	T1	23.55±0.19 c	22.91±0.05 c	23.62±0.16 d	23.44±0.10 d	23.19±0.05 d	23.15±0.07 d
	T2	27.19±0.10 a	26.63±0.17 a	26.87±0.06 a	26.54±0.06 a	26.71±0.11 a	26.61±0.05 a
	T3	26.90±0.07 ab	26.36±0.04 b	26.61±0.07 b	26.10±0.11 b	26.32±0.11 b	26.09±0.06 b
	T4	26.68±0.13 b	26.25±0.03 b	26.31±0.09 c	25.79±0.11 c	25.90±0.10 c	25.85±0.09 c
w (可溶性固形物) Soluble solids content/%	CK	6.13±0.03 c	6.10±0.06 c	6.15±0.04 c	6.14±0.04 c	6.08±0.06 c	6.10±0.06 c
	T1	6.48±0.06 b	6.44±0.08 b	6.50±0.05 b	6.40±0.06 b	6.34±0.06 b	6.28±0.11 b
	T2	6.88±0.06 a	6.77±0.06 a	6.85±0.07 a	6.85±0.10 a	6.67±0.13 a	6.69±0.12 a
	T3	6.78±0.09 a	6.72±0.08 a	6.78±0.08 a	6.79±0.13 a	6.63±0.06 a	6.60±0.08 a
	T4	6.76±0.07 a	6.69±0.05 a	6.73±0.04 a	6.74±0.06 a	6.58±0.11 a	6.58±0.08 a
w (辣椒素) Capsaicin content/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CK	1.62±0.01 d	1.62±0.01 d	1.72±0.01 d	1.76±0.01 b	1.69±0.01 c	1.64±0.01 b
	T1	1.68±0.01 c	1.64±0.01 c	1.74±0.01 cd	1.74±0.02 b	1.66±0.02 c	1.70±0.02 b
	T2	1.84±0.02 a	1.86±0.02 a	1.91±0.02 a	1.90±0.04 a	1.86±0.04 a	1.78±0.02 a
	T3	1.74±0.02 b	1.72±0.01 b	1.76±0.01 c	1.80±0.02 b	1.78±0.02 b	1.74±0.01 a
	T4	1.82±0.01 a	1.84±0.02 a	1.87±0.02 b	1.88±0.02 a	1.80±0.01 ab	1.78±0.02 a
w (蛋白质) Protein content/%	CK	1.57±0.01 d	1.57±0.01 d	1.63±0.01 d	1.67±0.01 c	1.67±0.01 d	1.64±0.01 b
	T1	1.61±0.01 c	1.64±0.01 c	1.67±0.02 c	1.72±0.02 b	1.70±0.01 c	1.62±0.03 b
	T2	1.74±0.02 b	1.72±0.02 b	1.84±0.02 a	1.90±0.02 a	1.84±0.02 a	1.78±0.01 a
	T3	1.77±0.01 b	1.73±0.02 b	1.79±0.01 b	1.89±0.02 a	1.84±0.01 a	1.80±0.02 a
	T4	1.83±0.01 a	1.76±0.01 a	1.83±0.02 a	1.88±0.03 a	1.82±0.01 a	1.78±0.03 a
w (还原糖) Reducing sugar content/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	CK	16.69±0.06 d	16.51±0.11 d	17.08±0.08 d	17.36±0.06 d	17.19±0.09 b	17.04±0.04 b
	T1	17.19±0.04 c	16.90±0.01 c	17.52±0.06 c	17.91±0.12 c	17.17±0.09 b	17.19±0.12 b
	T2	17.42±0.12 b	17.18±0.12 b	17.84±0.16 b	18.46±0.18 a	17.78±0.09 a	17.57±0.06 a
	T3	17.95±0.13 a	17.40±0.11 ab	18.27±0.11 a	18.38±0.16 a	17.80±0.12 a	17.47±0.13 a
	T4	18.14±0.04 a	17.54±0.06 a	18.32±0.08 a	18.46±0.15 a	17.66±0.13 a	17.49±0.06 a

注:同列不同小写字母表示同一品质指标的不同处理间差异显著($p<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($p<0.05$) between different treatments of the same quality indicator.

表 3 辣椒综合品质灰色关联度评价结果排序

Table 3 Ranking of the results of grey relational degree analysis

处理	采摘次数	排名	处理	采摘次数	排名	处理	采摘次数	排名
Treatment	Picking time	Ranking	Treatment	Picking time	Ranking	Treatment	Picking time	Ranking
T2	4	1	T4	1	11	T1	1	21
T4	4	2	T3	1	12	T1	5	22
T3	3	3	T3	5	13	T1	6	23
T3	5	4	T4	5	14	T1	2	24
T3	4	5	T4	2	15	CK	4	25
T4	3	6	T3	6	16	CK	5	26
T2	1	7	T3	2	17	CK	6	27
T3	3	8	T4	6	18	CK	3	28
T2	2	9	T1	4	19	CK	1	29
T2	6	10	T1	3	20	CK	2	30

一种快速而有效的提高作物含硒量的方法^[22,27]。本试验研究表明,叶面喷施不同浓度硒处理的辣椒果实中总硒含量均显著高于 CK,前 5 次采收喷施硒的浓度越高,辣椒果实中总硒含量也越高,这与李

克强等^[43]的研究结果一致,这也说明在缺硒地区,为获得富硒产品,施用硒肥是有必要的。与余小兰等^[18]研究结果相比,本试验辣椒果实总硒含量偏低,这可能与种植的辣椒品种以及气候、土壤类型有关^[44]。喷施在蔬菜上的无机硒均大量代谢为氨基酸态硒,而氨基酸态硒是作物中总硒的主要形式^[45],本研究中总硒含量 $T4 > T2$,而有机硒占比 $T2 > T4$ (第2次采收除外),表明高浓度的硒喷施虽然能够明显提升辣椒果实中总硒含量,却降低了硒的转化率,而适宜浓度的硒喷施却可以提高硒的转化率。 $T1$ 处理辣椒果实总硒含量均低于 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $T2$ 处理第1~3次收获的辣椒果实总硒含量也均低于 $0.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,未能达到富硒农产品标准要求, $T3$ 、 $T4$ 处理的辣椒总硒含量均高于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,均能达到富硒农产品标准要求。从不同采摘次数看,各喷硒处理第3次之后采摘的辣椒中的总硒含量和有机硒占比要高于第1、2次采收的辣椒($T1$ 除外),说明硒肥叶面喷施后,并不能立即被蔬菜充分利用,而是需要经过较长一段时间的吸收、运输才能被果实充分利用^[15],因此在实际生产过程中,为确保在辣椒收获初期获得富硒产品,可以考虑提前在苗期施用硒肥,今后还应该深入研究施硒的时期对硒累积的影响。

维生素C、可溶性固形物、辣椒素、蛋白质和还原糖含量是辣椒果实营养品质的主要评价指标,在评价辣椒品质方面具有重要作用。有研究表明,叶面喷施硒可提高土壤的pH以及有机质、碱解氮和速效钾含量^[5],从而改善土壤养分结构,更有利于蔬菜生长过程中的营养吸收。适宜浓度的硒能增加蔬菜叶片的光合色素,增大气孔导度,提高光合速率和叶绿体电子传递速率以及组织中钾、钠等离子含量,保持细胞膜及细胞器的完整性,增强植物对不同非生物胁迫的耐受性^[8],进而有效改善蔬菜品质如色泽、风味、口感、营养等。然而,施硒量一旦超过了蔬菜对硒的耐受范围,则呈现毒性,使植物出现生长障碍甚至早衰死亡^[46]。本研究结果也表明,叶面喷硒能有效促进辣椒果实中维生素C、可溶性固形物、辣椒素、蛋白质和还原糖含量的提高,辣椒果实中维生素C、可溶性固形物含量随着硒浓度的提高呈先增高后略微下降的趋势。多次叶面喷硒和提高硒喷施浓度,辣椒果实营养品质也出现一定程度的下降,原因可能是适宜浓度的硒能提高植物抗氧化酶活性与抗氧化能力,降低丙二醛含量,减少氧化损伤,促进植物细胞活性,从而增强植物

对营养物质的吸收累积能力,改善果实的营养品质,而当浓度过高时,硒表现出对植物生长胁迫和毒性,植物细胞抗氧化能力降低,丙二醛含量增加,植物细胞活性降低,对营养物质的吸收累积能力开始下降,但具体机制有待进一步研究。

从灰色关联度评价结果来看, $T2$ 处理的第4次采摘的辣椒排名第1的原因是其在硒累积和营养品质改善方面综合表现较优。 $T4$ 处理第4次采摘的辣椒因总硒含量最高,所以综合评价排名靠前。 $T1$ 处理对辣椒果实中硒累积和营养品质改善效果均不佳,导致灰色关联度评价排名靠后。

综上所述,与CK相比,叶面喷施硒可提高辣椒果实中的总硒含量,改善辣椒果实的营养品质。连续叶面硒强化能促进辣椒果实中总硒含量和营养品质指标提升。因此,从富硒和营养品质综合考虑,辣椒叶面喷硒质量浓度选择 $4.0 \sim 8.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 为宜,且以第4次采收的辣椒果实品质最佳。

参考文献

- [1] 郝丽萍,谷海军,赵志坚,等.2018—2020年张家口市克山病病区人群发硒水平与居民膳食关联分析[J].公共卫生与预防医学,2023,34(4):81-84.
- [2] WHITE P J. Selenium accumulation by plants[J]. Annals Botany, 2016, 117(2):217-235..
- [3] ZHU Y G, PILON-SMITS E A H, ZHAO F J, et al. Selenium in higher plants: Understanding mechanism for biofortification and phytoremediation[J]. Trends in Plant Science, 2009, 19:436-442.
- [4] 秦蕾,尹庆喆,马慧丽等.硫、硒处理对洋葱产量及主要功能成分的影响[J].东北农业大学学报,2023,54(3):17-25.
- [5] 程芮琪.施硒方式对蔬菜生长及元素含量的影响[D].武汉:湖北大学,2013.
- [6] TONG M T, ZHAI K Z, DUAN Y S, et al. Selenium alleviates the adverse effects of microplastics on kale by regulating photosynthesis, redox homeostasis, secondary metabolism and hormones[J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139349.
- [7] LI X Z, YU Y C, ZHANG Y R, et al. Synergistic effects of modified biochar and selenium on reducing heavy metal uptake and improving pakchoi growth in Cd, Pb, Cu, and Zn - contaminated soil[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2024, 12(4):113170.
- [8] RAMEZEN D, ZAGAR M, NAKHAEV M R, et al. Selenium alleviates growth characteristics, plant pigments, photosynthetic and antioxidant capacity of basil (*Ocimum basilicum* L.) under low temperature[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 58: 103198.
- [9] 廖继超.相互混种对三种基因型樱桃番茄生长及硒富集的影响[D].成都:四川农业大学,2020.
- [10] 中华全国供销合作总社.富硒农产品:GH/T 1135—2017[S].

- 北京:中华全国供销合作总社,2017.
- [11] 张一雯.不同年限设施土壤硒含量特征及喷硒对番茄品质影响[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.
- [12] 陈琴,张力,宋焕忠,等.不同施肥处理对香葱生长、品质和土壤肥力的影响[J].中国瓜菜,2021,34(10):92-97.
- [13] 韩亚萍.硒与酵素混施对番茄与菠菜生长及品质的影响研究[D].山东泰安:山东农业大学,2020.
- [14] 韩旭,李树和,李慧鑫,等.根施硒肥对番茄硒富集和产量的影响[J].天津农林科技,2019,04:6-8.
- [15] 张研.北京地区安全营养韭菜品质调控与生产对策研究[D].邯郸:河北工程大学,2021.
- [16] 杨娇.光硒耦合对温室黄瓜生长、品质及产量的影响研究[D].银川:宁夏大学,2022.
- [17] 郭巨先,罗文龙,符梅,等.基施富硒肥对菜薹生长和营养元素的影响[J].中国农学通报,2020,36(28):52-56.
- [18] 余小兰,张静,李光义,等.辣椒在不同施硒水平下硒累积规律[J].热带作物学报,2021,42(7):1988-1994.
- [19] 杨会芳,梁新安,常介田,等.叶面喷施硒肥对不同蔬菜硒富集及产量的影响[J].北方园艺,2014(11):158-161.
- [20] 谯祖勤,周昌平,陈文兴,等.根施有机无机复混腐殖酸硒肥对蔬菜及其土壤硒含量的影响[J].贵州农业科学,2020,48(6):23-25.
- [21] 袁伟玲,刘志雄,吴金平,等.不同施硒方式对叶用莴苣产量、含硒量和硒转化率的影响[J].中国蔬菜,2021(2):80-84.
- [22] 袁伟玲,刘志雄,吴金平,等.硒对生菜生长、品质、养分吸收和硒转化率的影响[J].华北农学报,2020,35(增刊):189-194.
- [23] 邓小芳.湖北省几种作物对硒肥的利用及其富硒特征的研究[D].武汉:华中农业大学,2020.
- [24] 杨海涛.不同外源硒对小白菜产量、品质、养分吸收及抗氧化能力的影响[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [25] 刘磊,吕令华,尉菊萍,等.不同浓度外源硒对白菜品质及生理特性的调控[J].农业科技通讯,2021(3):207-211.
- [26] 朱磊,胡婷,刘德明,等.叶面喷施硒对萝卜硒吸收及抗氧化能力的影响[J].江苏农业科学,2019,47(3):127-131.
- [27] 张青,王煌平,孔庆波,等.天然富硒土壤上三种蔬菜对硒的吸收与转化差异[J].植物营养与肥料学报,2019,25(10):1727-1736.
- [28] 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.
- [29] 李冠男,张庆霞,高峰,等.叶面喷施硒肥对不同蔬菜硒富集及产量的影响[J].农业与技术,2021,41(19):86-88.
- [30] 赵世军.硒酵母浸种对低温胁迫下辣椒种子萌发、幼苗生理特征的影响[J].西北园艺,2024(3):37-41.
- [31] 李瑜,张军,张百忍,等.不同土壤硒浓度对辣椒产量及硒含量的影响研究[J].陕西农业科学,2024,70(1):76-80.
- [32] 赵丹丹,周沪生,陈鹏,等.叶面喷施亚硒酸钠对基质栽培辣椒产量和品质的影响[J].安徽科技学院学报,2024,38(1):58-64.
- [33] 张雪莲,罗德旭,杨红,等.外源褪黑素和硒对高温胁迫下辣椒生理特性和抗氧化系统的影响[J].江苏农业学报,2023,39(8):1729-1738.
- [34] 国家卫生与计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中硒的测定:GB 5009.93—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [35] 中华人民共和国农业农村部.蔬菜中甲基硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸和硒代半胱氨酸的测定 液相色谱-串联质谱法:NY/T 4353—2023[S].北京:中国农业出版社,2023.
- [36] 国家卫生与计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中抗坏血酸的测定:GB 5009.86—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [37] 中华人民共和国农业部.水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法:NY/T 2637—2014 [S].北京:中国农业出版社,2014.
- [38] 中华人民共和国农业部.辣椒素的测定高效液相色谱法:NY/T 1381—2007[S].北京:中国农业出版社,2007.
- [39] 国家卫生与计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [40] 国家卫生与计划生育委员会.食品安全国家标准 食品中还原糖的测定:GB 5009.7—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [41] 聂根新,赖艳,胡丽芳,等.特征指标评价江西不同区域油茶籽油品质灰色关联度分析[J].中国粮油学报,2020,35(3):171-175.
- [42] 常昊.水稻和蔬菜对硒和镉的吸收转化及生物可给性研究[D].武汉:华中农业大学,2023.
- [43] 李克强,陈发波,林立金,等.不同浓度硒处理对豆瓣菜生长及硒富集的影响[J].四川农业大学学报,2018,36(4):488-493.
- [44] SUN X P, WANG Y H, HAN G Q, et al. Effects of different selenium forms on selenium accumulation, plant growth, and physiological parameters of wild peach[J]. South African Journal of Botany, 2020, 131:437-442.
- [45] SEPPANEN M M, KONTTURI J, HERAS I L, et al. Agronomic biofortification of brassica with selenium-enrichment of SeMet and its identification in brassica seeds and meal[J]. Plant Soil, 2010, 337:273-283.
- [46] 史雅静,史雅娟,王玉荣,等.无机硒肥对土壤有效氮含量及菠菜品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2019,25(2):274-283.