

有机硒与纳米硒对生姜生长、品质及硒含量的影响

匡一迪^{1,2}, 唐 纯³, 张庆林³, 杨 红³, 周 洁²,
齐传东², 郭凤领², 朱 进¹, 吴金平²

(1. 长江大学园艺园林学院·香辛园艺植物种质创新与利用湖北省重点实验室 湖北荆州 434023;
2. 农业农村部高山蔬菜生态栽培重点实验室·湖北省蔬菜种质创新与遗传改良重点实验室·湖北省农业科学院经济作物
研究所 武汉 430064; 3. 恩施来凤县农业技术推广中心 湖北来凤 445700)

摘要: 硒作为人体必需的微量元素, 须通过膳食外源摄取, 开发富硒功能作物成为重要的补硒路径。本研究以凤头姜为试材, 进行叶面分别喷施 120、160、200 mg·L⁻¹ 有机硒与纳米硒的田间试验, 以喷施清水为对照(CK), 分析不同硒源对生姜生长、品质及硒积累的影响。结果表明, 喷施 120 mg·L⁻¹ 纳米硒生姜单株根茎质量达 1180 g, 较 CK 显著提高 76.12%, 而喷施 200 mg·L⁻¹ 有机硒生姜增产 28.36%。200 mg·L⁻¹ 纳米硒处理的可溶性糖含量较 CK 显著提高 0.16 百分点, 但可溶性蛋白含量降低 0.63%; 160 mg·L⁻¹ 有机硒处理虽抑制蛋白合成, 但其姜块有机硒含量(w, 后同)达 0.225 mg·kg⁻¹, 较 CK 显著提高 114.29%。纳米硒处理显著降低土壤 pH 至 5.09~5.32, 并活化氮磷钾(速效钾含量显著降低 47.69%), 而有机硒对土壤 pH 呈双向调控。综合产量、品质及土壤环境效应, 160 mg·L⁻¹ 有机硒为最优富硒浓度(有机硒含量峰值), 而 200 mg·L⁻¹ 纳米硒在增产 25.37% 的同时兼具硒强化与土壤养分活化能力, 更适用于功能性生姜生产。

关键词: 生姜; 品质; 产量; 有机硒; 纳米硒

中图分类号:S632.5

文献标志码:A

文章编号: 1673-2871(2025)11-167-06

Effects of exogenous organic selenium and nano-selenium on growth, quality, and Se content in ginger

KUANG Yidi^{1,2}, TANG Chun³, ZHANG Qinglin³, YANG Hong³, ZHOU Jie², QI Chuandong², GUO Fengling², ZHU Jin¹, WU Jinping²

(1. College of Horticulture and Gardening, Yangtze University/Hubei Key Laboratory of Spices & Horticultural Plant Germplasm Innovation & Utilization, Jingzhou 434023, Hubei, China; 2. Key Laboratory of Ecological Cultivation on Alpine Vegetables (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Hubei Key Laboratory of Vegetable Germplasm Enhancement and Genetic Improvement/Industrial Crops Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, Hubei, China; 3. Agricultural Technology Extension Center of Laifeng County in Enshi City, Laifeng 445700, Hubei, China)

Abstract: Selenium(Se) is an essential trace element for the human body and must be acquired externally through the diet. Thus, developing selenium-enriched functional crops has become a key strategy for selenium supplementation. In this study, Fengtou ginger was used as the test material. A field experiment was conducted involving foliar spraying of organic selenium and nano-selenium at concentrations ranging from 120 to 200 mg·L⁻¹, with spraying clear water as the control (CK). The effects of different selenium sources on ginger growth, quality, and selenium accumulation were analyzed. The results indicated that foliar application of 120 mg·L⁻¹ nano-selenium resulted in a rhizome fresh mass of 1180 g per ginger plant, which was significantly 76.12% higher than that of the CK. In contrast, spraying 200 mg·L⁻¹ organic selenium increased ginger yield by 28.36%. For the treatment with 200 mg·L⁻¹ nano-selenium, the soluble sugar content significantly increased 0.16 percent points than that of CK, whereas the soluble protein content decreased by 0.63%. Although the 160 mg·L⁻¹ organic selenium treatment inhibited protein synthesis, the organic selenium content in ginger rhizomes

收稿日期: 2025-03-18; 修回日期: 2025-05-14

基金项目: 国家特色蔬菜产业技术体系武汉综合试验站(CARS-24-G-17); 湖北省农业科技创新中心蔬菜创新团队(2024-620-000-001-007)

作者简介: 匡一迪, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为植物栽培。E-mail: Yidi_Kuang@163.com

通信作者: 吴金平, 女, 研究员, 主要从事特色蔬菜资源挖掘与利用研究。E-mail: 274184394@qq.com

朱进, 男, 教授, 研究方向为香辛作物栽培、设施蔬菜栽培与逆境生理。E-mail: 278162100@qq.com

reached $0.225 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a significant increase of 114.29% compared with CK. Nano-selenium treatments significantly reduced soil pH to the range of 5.09–5.32 and activated soil nitrogen, phosphorus, and potassium (with available potassium content decreasing significantly by 47.69%). In contrast, organic selenium exhibited a bidirectional regulatory effect on soil pH. Considering yield, quality, and soil environmental impacts comprehensively, $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ organic selenium was identified as the optimal concentration for selenium enrichment (achieving the peak organic selenium content in ginger). However, $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ nano-selenium was more suitable for functional ginger production, as it not only increased yield by 25.37% but also enhanced selenium fortification and soil nutrient activation.

Key words: Ginger; Quality; Yield; Organic selenium; Nano-selenium

硒作为人体必需的微量元素,在抗氧化、免疫调节及解毒等方面发挥着不可替代的生物学功能,被广泛誉为“生命的保护剂”^[1]。然而,我国居民硒营养状况面临严峻挑战。2010—2013年全国营养调查数据显示,我国居民日均硒摄入量仅为 $44.4 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$,显著低于《中国居民膳食营养素参考摄入量》推荐的 $60 \mu\text{g} \cdot \text{d}^{-1}$ 标准^[2-3]。从地理分布看,东北至西南的“缺硒带”覆盖全国72%的国土面积,导致农村地区、老年人及心血管疾病、肝病等慢性病患者面临更高的缺硒风险^[1]。尽管富硒主食(如大米、小麦)是补硒的主要途径,但生姜(*Zingiber officinale Roscoe*)作为厨房必不可少的香辛调料,其独特的功能性价值仍值得深入挖掘。尽管生姜的单餐食用量有限(人均日摄入量5~10 g),但其药食同源属性、加工多样性及区域特色农业潜力,为缺硒地区提供了差异化的补硒路径。

生姜的富硒化研究已展现出多维度价值:其一,作为功能性食品原料的增效作用。生姜中姜辣素、姜黄素等活性成分与硒具有协同抗氧化效应,研究表明,富硒处理可使姜辣素含量提升15.86%~68.07%,抗氧化活性显著增强^[4-6]。这种“硒+生物活性物质”的复合效应,使其在功能性食品开发中独具优势,如富硒姜茶、硒强化调味品等,可通过日常调味场景实现“微量多次”补硒。其二,特色农业产业链的构建潜力。在湖北恩施、陕西紫阳等富硒产区,生姜富硒化可形成“高附加值品种+地理标志认证+深加工产品”的产业闭环。例如,硅酸钾型硒调理剂处理后,姜块硒含量提升366%,配合标准化种植技术,可打造区域特色品牌,推动“小作物、大产业”的乡村振兴模式。其三,生态种植的协同效益。硒肥施用不仅能提高生姜硒含量(达常规栽培的2.5~3.6倍),还可实现增产8.50%~66.59%,并降低姜瘟病发生率^[4-6]。

当前生产中常用的外源硒主要包括无机硒、有机硒和纳米硒三类。其中,无机硒(如亚硒酸钠)虽具有成本低廉的优势,然而其生物利用率较低,且

过量施用易对植物造成毒害作用^[7];有机硒(如硒代蛋氨酸)则以安全性高为显著特点,但其生产成本较高,在大规模应用中存在一定限制^[8];纳米硒作为近年来备受关注的新型硒源,其化学本质为单质硒的纳米级形态,虽归属于无机硒范畴,却因纳米特性(如高比表面积、强分散性)而显著区别于传统无机硒和有机硒,可视为独立的“纳米材料”类别。该类硒源兼具用量少、毒性低、分散性好、抗菌能力强等多重优势^[9],在降低传统无机硒环境风险的同时,更契合绿色农业的可持续发展趋势。鉴于生姜在调味、保健、加工等领域的多元价值,笔者在本研究聚焦不同浓度有机硒与纳米硒对生姜生长、品质及硒积累的影响,探索其作为特色功能作物的富硒阈值与技术路径,以期为缺硒地区农业结构优化、功能性食品开发提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地点位于湖北省恩施土家族苗族自治州来凤县绿水镇香沟村,属亚热带大陆性季风湿润型山地气候,年平均降水量1400 mm,日照1400 h,平均温度15.8 °C,无霜期256 d。选择土层深厚松软、土质肥沃、排灌方便、前茬为水稻的沙质壤土。耕层土壤有机质含量(w,后同) $1.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量 $119.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷含量 $118.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量 $304.63 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH为5.95。

1.2 材料

生姜品种为凤头姜,有机硒叶面肥的硒肽含量≥2%,由江西科农沃科技有限责任公司生产,农希科纳米富硒肥的硒含量≥40 g·kg⁻¹,由中农硒科富硒农业技术研究院研制。

1.3 试验设计

试验采用单因素随机区组设计,以有机硒溶液和纳米硒溶液为硒源,设3个梯度,分别为120、 160 、 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,记作T1~T6,其中T1~T3为有机硒处理,T4~T6为纳米硒处理,以喷施等量的清水为

对照(CK),共7个处理,每处理30 m²,3次重复。生姜于2024年4月6日种植,旺盛生长期(2024年7月22日)叶面喷施,以叶面均匀布满雾状水滴为宜。每隔10 d喷1次,连续喷3次。其余按照生姜种植进行常规管理^[10]。

1.4 植物学特性和品质指标测定

生姜的植物学指标参照农作物种质资源标准和规范(<http://115.28.90.227>)进行田间生物学性状的测定,10月底收获时每小区选取5株统计地上、地下的生物学性状,并将姜块洗净后用于品质检测。采用考马斯亮蓝G-250染色法测定可溶性蛋白含量^[11],采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量^[11],采用酸碱水解法测定粗纤维含量^[12],采用2,6-二氯靛酚滴定法测定维生素C含量^[13],采用直接干燥法测定干物质含量^[14]。总硒含量的测定,按照GB 5009.268—2016食品安全国家标准食品中多元素的测定方法^[15];无机硒含量的测定,采用氢化物-原子荧光光谱法^[16]。

1.5 土壤样品采集及理化性质测定

土壤样品在试验前和收获后,分别采用五点取样法,采集0~20 cm耕层土壤,每个处理3次重复,室温下自然风干,进行土壤理化性质分析。参照鲍士旦的方法测定^[17]:采用重铬酸钾容量法—外加热法测定土壤有机质含量;采用钼锑抗显色法测定速效磷含量,采用碱溶液扩散法测定水解氮含量;采用火焰原子吸收分光光度法测定速效钾含量。

1.6 数据分析

采用Microsoft Excel 2016处理数据;采用SPSS 19.0进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对生姜生物学特性的影响

不同处理的株高为79.0~88.2 cm,株幅为53.0~60.4 cm,分枝数为18.0~25.8个,叶长为19.6~23.4 cm,叶宽为2.36~2.86 cm,主茎叶数为16.00~22.00片,地上茎高为58.2~65.60 cm,地上茎粗为1.08~1.24 cm,根状茎长为23.4~27.9 cm,子姜粗为2.34~3.12 cm,子姜节数为7.2~8.2节,子姜节间长为0.98~1.68 cm,以上各指标间差异不显著。不同处理显著影响的生物学指标如表1所示,有机硒处理呈现抑制效应,其中根状茎宽较CK显著减少23.08%~53.85%,分支级数显著降低10.00%~15.00%。纳米硒处理则表现促进效应,各浓度均维持根状茎宽16.60~17.80 cm,与CK无显著差异,其中120 mg·L⁻¹

处理的单株根状茎质量达1180 g,较CK显著提高76.12%;200 mg·L⁻¹纳米硒处理的子姜长为9.60 cm,较CK增加2.13%,但差异不显著,显示其对地下器官生长的综合促进作用。整体来看,纳米硒对生姜根茎发育的正向调控效果优于有机硒,尤以120 mg·L⁻¹的处理表现最佳。

表1 不同处理对生姜部分生物学特性的影响

Table 1 Effects of different treatments on some biological characteristics of ginger

处理 Treatment	根状茎宽 Rhizome broad/cm	根状茎分 支级数 Rhizome branch progression/ level	单株根 状茎质量 Rhizome mass per plant/g	子姜长 Ginger root length/cm
CK	15.60±1.67 a	4.0±0.0 a	670±82 bc	9.40±2.07 a
T1	7.20±1.92 c	3.6±0.5 b	480±86 c	8.32±1.01 ab
T2	7.20±1.92 c	3.6±0.5 b	650±61 bc	7.40±1.19 ab
T3	12.00±4.53 b	3.4±0.5 b	860±104 ab	8.40±1.52 ab
T4	16.60±1.52 a	4.0±0.0 a	1180±96 a	9.20±2.59 a
T5	17.20±1.79 a	4.0±0.0 a	780±20 bc	6.50±1.32 b
T6	17.80±1.92 a	4.0±0.0 a	840±95 b	9.60±2.30 a

注:同列不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 不同处理对生姜品质的影响

由表2可知,不同外源硒处理对生姜品质的影响存在差异。可溶性蛋白含量在有机硒处理下随浓度升高呈阶梯式下降,高浓度200 mg·L⁻¹时较CK显著降低56.96%;纳米硒处理则呈逐渐升高的趋势,200 mg·L⁻¹时与CK无显著差异。可溶性糖含量在所有外源硒处理中均显著高于CK,其中纳米硒200 mg·L⁻¹处理增幅最大,显著提高0.16个百分点,呈浓度依赖性升高趋势。维生素C含量在纳米硒160 mg·L⁻¹处理时较CK提高28.27%,但差异不显著;而有机硒处理则表现出抑制作用,最大降幅为19.76%。各外源硒处理的干物质含量均低于CK,但各处理间无显著差异,表明硒源对生姜干物质积累无显著影响。各外源硒处理的粗纤维含量与CK均无显著差异,表明硒源对生姜粗纤维积累影响较小。

2.3 不同处理对土壤理化性质的影响及与品质的关联性分析

试验数据表明(表3),外源硒处理显著改变了土壤养分动态及酸化状态。与初始土壤条件(pH 5.95)相比,有机硒处理的pH呈双向波动:低浓度(120 mg·L⁻¹)处理使pH上升至6.21,中浓

表 2 不同处理对生姜品质的影响
Table 2 Effects of different treatments on ginger quality

处理 Treatment	w(可溶性蛋白) Soluble protein content/ (mg·g ⁻¹)	w(可溶性糖) Soluble sugar content/ %	w(维生素 C) Vitamin C content/ (mg·100 g ⁻¹)	w(干物质) Dry matter content/ %	w(粗纤维) Crude fibre content/ %
CK	1.58±0.25 a	0.35±0.01 f	40.85±3.08 abc	16.10±2.95 a	0.29±0.001 a
T1	1.73±0.04 a	0.42±0.01 d	32.78±4.47 c	14.47±1.78 a	0.29±0.001 a
T2	1.24±0.07 b	0.40±0.01 e	39.75±5.87 bc	13.73±2.71 a	0.26±0.005 a
T3	0.68±0.04 d	0.45±0.01 c	39.55±2.40 bc	15.20±3.30 a	0.29±0.005 a
T4	1.01±0.09 c	0.46±0.01 c	41.29±1.09 abc	14.32±3.82 a	0.29±0.005 a
T5	1.12±0.05 bc	0.47±0.01 b	52.40±14.72 a	14.04±2.84 a	0.25±0.002 a
T6	1.57±0.02 a	0.51±0.01 a	46.00±2.85 ab	15.03±3.32 a	0.29±0.005 a

表 3 不同处理对土壤理化性质的影响
Table 3 Effects of different treatments on soil physical and chemical properties

处理 Treatment	w(水解氮) Hydrolyzed nitrogen content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效磷) Fast available phosphorus content/(mg·kg ⁻¹)	w(速效钾) Quick acting potassium content/(mg·kg ⁻¹)	w(有机质) Organic matter content/%	pH
CK	82.13±4.97 a	120.71±3.99 b	506.07±10.19 a	1.34±0.05 a	6.02±0.02 c
T1	67.08±1.76 c	113.14±5.31 bc	504.40±7.43 a	1.35±0.13 a	6.21±0.01 b
T2	57.87±3.64 d	178.28±4.71 a	395.13±7.83 c	1.26±0.13 a	5.66±0.03 d
T3	54.37±2.67 d	102.20±9.98 cd	439.89±7.42 b	1.32±0.07 a	6.37±0.02 a
T4	53.20±3.03 d	104.11±8.90 cd	305.44±3.29 d	1.23±0.06 a	5.32±0.02 e
T5	74.20±6.06 b	94.49±12.08 d	264.73±3.08 f	1.23±0.02 a	5.31±0.01 e
T6	59.62±3.64 d	106.98±6.94 bcd	284.18±4.46 e	1.21±0.04 a	5.09±0.04 f

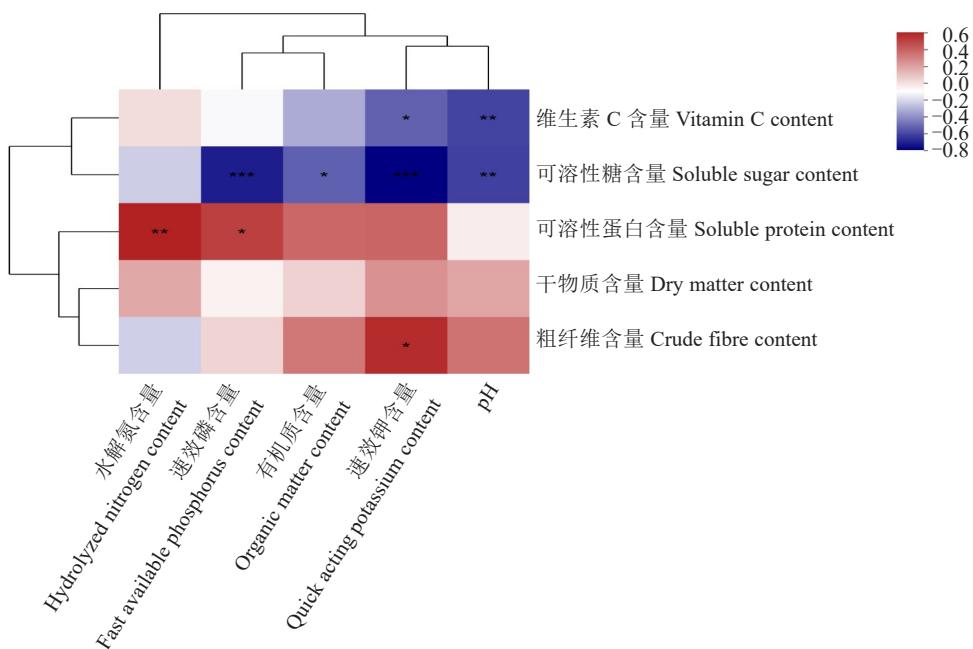
度($160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理和 pH 下降至 5.66, 而高浓度($200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)处理则显著提升至 6.37。值得注意的是, 纳米硒处理表现出强烈的酸化效应, 所有浓度梯度处理的 pH 均显著降低, 其中 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理较初始值降低 14.45%。在养分转化方面, 纳米硒处理显示出显著的“养分活化效应”。 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米硒处理使速效钾含量显著降低 47.69%, 而速效磷含量同步显著降低 21.72%。有机硒处理则呈现差异化响应: 其中 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理显著提升速效磷含量 47.69%, 而 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理显著降低速效磷含量 15.33%。水解氮含量在各外源硒处理中均显著降低, 其中纳米硒 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理降幅最大, 达 35.22%, 暗示硒处理可能通过抑制亚硝酸还原酶活性影响氮素同化。除 $120 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有机硒处理的有机质含量稍高于 CK 外, 其他处理均低于 CK, 但各处理与 CK 均无显著差异。

通过 Mantel 检验发现(图 1), 土壤理化指标与生姜品质形成存在显著网络互作(Mantel's $r=0.63, P=0.002$)。生姜中维生素 C 含量、可溶性糖含量与土壤理化因子呈负相关, 可溶性蛋白质含量、

干物质含量、粗纤维含量与土壤理化因子呈正相关。其中生姜中可溶性糖含量与土壤中速效磷含量、速效钾含量和 pH 均呈极显著负相关, 与有机质含量呈显著负相关; 维生素 C 含量与速效钾含量呈显著负相关, 与 pH 呈极显著负相关; 可溶性蛋白含量与土壤水解氮含量呈极显著正相关, 与土壤速效磷含量呈显著正相关; 粗纤维含量与土壤速效钾含量呈显著正相关。

2.4 不同处理对生姜硒含量的影响

从表 4 可以看出, 生姜中有机硒含量为生姜中总硒含量减去无机硒含量。除 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 纳米硒处理的总硒含量显著低于 CK 外, 其他外源硒处理均显著高于 CK。外源硒处理可以有效提高生姜有机硒含量, 生姜内有机硒含量随着外源有机硒浓度的增加呈先增后减的变化趋势, 最佳的处理浓度为 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 此时生姜内有机硒含量较 CK 显著提高 114.28%; 而生姜内有机硒含量随着外源纳米硒浓度的增加呈先减后增的趋势, 处理浓度为 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生姜内有机硒含量与 CK 无显著差异; 处理为 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 生姜内有机硒含量较 CK 显著提高 65.71%。



注: *表示在 0.05 水平显著相关; **表示在 0.01 水平极显著相关; ***表示在 0.001 水平极显著相关。

Note: * represents significant correlation at 0.05 level; ** represents extremely significant correlation at 0.01 level; *** represents extremely significant correlation at 0.001 level.

图 1 土壤理化性质与生姜中营养成分的相关性热图

Fig. 1 Heat map of the correlation between soil physical and chemical properties and the nutrient components in ginger

表 4 不同处理对生姜硒含量的影响

Table 4 Effects of different treatments on selenium content in ginger (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	w(总硒) Total selenium content	w(无机硒) Inorganic selenium content	w(有机硒) Organic selenium content
CK	0.146±0.010 e	0.041±0.003 d	0.105±0.010 d
T1	0.266±0.020 b	0.080±0.004 b	0.186±0.020 bc
T2	0.317±0.010 a	0.092±0.010 a	0.225±0.010 a
T3	0.253±0.020 bc	0.064±0.010 c	0.189±0.020 b
T4	0.206±0.010 d	0.041±0.010 d	0.165±0.010 c
T5	0.129±0.010 f	0.023±0.002 e	0.107±0.010 d
T6	0.237±0.010 c	0.063±0.010 c	0.174±0.010 bc

3 讨论与结论

本研究结果表明,外源硒对生姜地上部生物学特性影响不显著,但显著改变了地下茎宽、分支级数及子姜长,最终影响产量。纳米硒对产量提升作用显著,这与前人关于不同硒肥对作物产量影响差异较大的报道一致^[18-19]。这一现象可能源于硒对植物生长的双重作用:适量硒通过调控代谢途径促进生长,而高浓度硒可能引发氧化胁迫抑制生物量积累^[20]。

从品质指标看,有机硒处理显著降低了可溶性

蛋白含量,推测与硒积累干扰氮代谢相关;而纳米硒通过其纳米级尺寸优势,可能更易被细胞吸收并参与蛋白质合成,表现为可溶性蛋白含量随外源硒浓度增大呈递增趋势。这与硒作为植物 tRNA 组分的功能特性相符^[20]。此外,所有外源硒处理均显著提高可溶性糖含量,可能与硒诱导的逆境代谢响应相关。值得注意的是,纳米硒处理能提升维生素 C 含量,与鱼肽硒素对西兰花维生素 C 的强化效应一致^[21],而有机硒处理则抑制维生素 C 积累,类似灵武长枣中维生素 C 对有机硒的负响应^[22],表明硒形态对植物次生代谢的影响存在显著差异。

相关性分析显示,速效钾、速效磷含量及 pH 与可溶性糖含量呈显著负相关,而水解氮含量与可溶性蛋白含量呈极显著正相关,提示通过调控土壤养分可优化生姜品质^[23]。窦昂洋等^[6]研究发现,含硒调理剂(如硒硅酸钾)施用量与姜块硒含量呈正相关,与本研究中外源硒浓度与有机硒积累的规律相似。但本研究发现,有机硒含量在 160 mg·L⁻¹时达峰值(0.225 mg·kg⁻¹),而纳米硒在 200 mg·L⁻¹时仍呈上升趋势,表明不同硒源在植物体内的代谢路径存在差异。叶面喷施富硒溶液对土壤理化性质的影响机制源于多途径协同作用:首先,硒的化学形态直接作用于土壤环境,如亚硒酸钠水解释放 H⁺导

致酸化(纳米硒处理使 pH 降低 14.45%)^[4,6],而有机硒通过有机酸基团或微生物代谢产物引起 pH 波动^[8];其次,硒通过竞争吸附位点抑制速效磷、速效钾活化^[6,9],纳米硒处理的速效钾含量显著降低 47.69%,并干扰氮代谢^[5],水解氮含量降低 35.22%,同时腐殖酸结合态硒与铁铝氧化物相互作用间接调控养分释放^[5,17]。最后,硒通过抑制微生物活性(如磷酸酶、脲酶)和改变群落结构影响有机质矿化^[6,19],而未被吸收的硒经淋溶进入土壤后通过氧化还原反应(如纳米硒转化为硒酸盐)^[9]及根系分泌物介导的有机酸释放(加剧酸化)进一步改变养分有效性^[10,23]。

综上所述,纳米硒对生姜产量提升效果显著,120 mg·L⁻¹ 处理单株根茎质量较 CK 显著提高 76.12%,而有机硒浓度需达到 200 mg·L⁻¹ 方可增产 28.36%。160 mg·L⁻¹ 有机硒处理为最佳富硒方案,姜块有机硒含量较 CK 显著提升 114.29%,但高浓度(200 mg·L⁻¹)可能导致硒形态转化效率下降。200 mg·L⁻¹ 纳米硒综合表现较优,在增产 25.37% 的同时,可溶性糖和有机硒含量分别显著提高 0.16 百分点和 65.71%,且显著促进土壤氮磷钾活化。生姜硒富集与品质调控受“作物-土壤-肥料”多因素互作影响,未来需结合硒代谢分子机制与田间长期定位试验进一步验证。

参考文献

- [1] 吴永尧,彭振坤,陈建英,等.水稻对环境硒的富集和耐受能力研究[J].微量元素与健康研究,1999,16(4):42-44.
- [2] 常继乐,王宁.中国居民营养与健康状况监测 2010—2013 年综合报告[M].北京:北京大学医学出版社,2016.
- [3] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会.中国居民膳食营养素参考摄入量 第 3 部分:微量元素:WS/T 578.3—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [4] 吕臣浩,邓小芳,陈友恩,等.生姜硒营养特性研究[J].中国土壤与肥料,2019(1):117-121.
- [5] 徐安鹏,翁贵英,林艳,等.贵州水城小黄姜硒含量及对硒的富集能力[J].六盘水师范学院学报,2017,29(3):29-31.
- [6] 窦昂洋,涂书新,熊双莲,等.两种含硒调理剂对生姜硒含量及营养品质的影响研究[J].核农学报,2023,37(6):1235-1243.
- [7] 杨薇,张承旭,袁勤翰,等.硒与老鹰茶黄酮复配对山茶油的抗氧化效果[J].中国油脂,2023,48(8):30-33.
- [8] 余侃,黄思恩,龙小玲,等.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,2019,44(11):168-174.
- [9] EL-RAMADY H R, DOMOKOS-SZABOLCSY E, ABDALLA N A, et al. Selenium and nano-selenium in agroecosystems[J]. Environmental Chemistry Letters, 2014, 12(4):495-510.
- [10] 吴金平,周洁,符家平,等.湖北省生姜绿色高产栽培技术[J].长江蔬菜,2020(16):63-65.
- [11] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].3 版.北京:高等教育出版社,2015.
- [12] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会.植物类食品中粗纤维的测定:GB/T5009.10—2003[S].北京:中国标准出版社,2003.
- [13] 张丙春,聂燕,孟立红,等.水果、蔬菜有色浸提液中维生素 C 的测定:反滴定法[J].食品研究与开发,2001,22(3):54-55.
- [14] 国家药典委员会.中华人民共和国药典[M].北京:中国医药科技出版社,2015.
- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理局.食品安全国家标准 食品中多元素的测定:GB 5009.268—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [16] 谢逸欣,黄仕稳,鞠鹤鹏,等.氢化物发生-原子荧光光谱法测定食品中有机硒和无机硒[J].食品科技,2016,41(11):262-265.
- [17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000.
- [18] 邓小芳,刘新伟,叶志娟,等.不同时期喷施不同硒源对葡萄硒吸收分配的影响[J].中国南方果树,2018,47(5):82-86.
- [19] 晏娟,张忠平,朱同贵.不同硒肥对水稻产量及硒累积效应的影响[J].安徽农业科学,2021,49(19):142-143.
- [20] 覃爱苗,唐平,余卫平.硒在植物中的生物学效应[J].东北农业大学学报,2011,42(10):6-11.
- [21] 曹莉,杨建辉,张丽,等.不同纳米硒肥叶面喷施对西蓝花产量、品质及硒含量的影响[J].作物杂志,2024(4):152-157.
- [22] 韩昌烨,赵丽,曹兵,等.喷施硒肥对灵武长枣营养生长和果实品质的影响[J].西北林学院学报,2018,33(6):106-112.
- [23] 马英,刘晓彤,罗健航,等.不同施肥处理对退砂田西瓜产量、品质及养分吸收的影响[J].中国瓜菜,2024,37(7):149-155.