

网络出版时间:2023-09-04 09:13 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.03.011
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20230831.1337.001

不同外源硒对番茄的硒生物强化效果

樊 尧¹,李渭军²,程 楠¹,陈 萍¹,周 菲¹,齐明星¹,
吴 昊¹,赵井波²,梁东丽¹

(1 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨凌 712100;2 汉阴七叶莲农业科技有限责任公司,陕西 安康 725000)

[摘 要] 【目的】比较土壤中施用不同量硒肥(亚硒酸盐和硒酸盐)对番茄生物量、不同部位硒含量及果实品质的影响,为生产优质的富硒番茄和开发其他富硒蔬菜品种提供参考。【方法】供试番茄品种为金美丽娜,采用盆栽试验,通过在土壤中拌施 0.5、1、2 和 5 mg/kg 亚硒酸钠和硒酸钠溶液对番茄进行硒生物强化,以不施用硒肥处理作为对照,测定不同处理成熟番茄的果实生物量、不同部位(果实、茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根)硒含量,以及果实品质参数(有机酸、可溶性糖组成及其含量,维生素 C 含量等),比较 2 种硒肥对番茄的硒生物强化效果。【结果】与对照相比,土壤中施用 2 种外源硒均增加了番茄果实生物量。与对照相比,0.5~5 mg/kg 外源硒均显著增加了番茄果实的硒含量($P<0.05$),且当土壤中施用硒肥量相同时,硒酸钠处理番茄果实的硒含量极显著高于亚硒酸钠处理($P<0.01$)。各施硒处理番茄茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根中硒含量均显著高于对照($P<0.05$),且这 5 个部位的硒含量均随外源施硒量的增加而显著增高($P<0.05$)。外源施用硒肥番茄果实中有机酸的组成(草酸、酒石酸、苹果酸、柠檬酸、琥珀酸)几乎没有变化,各处理番茄果实均以苹果酸和柠檬酸为主,但各有机酸组分含量变化较大。与对照相比,外源施 0.5~2 mg/kg 硒均可显著提高番茄果实中的果糖和葡萄糖含量。与对照相比,土壤中施用 0.5~2 mg/kg 亚硒酸钠和硒酸钠后,番茄果实总有机酸、总可溶性糖、维生素 C 含量及糖酸比均显著升高($P<0.05$)。【结论】土壤中施入 0.5~2 mg/kg 硒酸钠既可确保硒富集效果,又能提高果实品质。基于人体健康的考虑,推荐以在土壤中施用 0.5 mg/kg 硒酸钠的方式进行番茄的硒生物强化。

[关键词] 番茄;硒;生物强化;生物量;果实品质

[中图分类号] S641.203

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2024)03-0105-08

Selenium biofortification effect of different exogenous selenium on tomatoes

FAN Yao¹,LI Weijun²,CHENG Nan¹,CHEN Ping¹,ZHOU Fei¹,
QI Mingxing¹,WU Hao¹,ZHAO Jingbo²,LIANG Dongli¹

(1 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Hanyin Qiyelian Agricultural Technology Co., Ltd., Ankang, Shaanxi 725000, China)

Abstract: 【Objective】The effects of applying different selenium (Se) fertilizers (selenite and selenate) in soil on tomato biomass, Se content in different parts and fruit quality were compared to provide reference for producing high-quality Se-enriched tomatoes and developing other Se-enriched vegetable varieties. 【Method】The cultivar of Jinmeilina was selected for pot experiments with 0.5, 1, 2 and 5 mg/kg Se (sodium selenite and sodium selenate) in soil, using no fertilizer treatment as the control. The fruit biomass, Se contents in different parts (fruit, stem lower part, stem upper part, leaf lower part, leaf upper part and

[收稿日期] 2022-12-26

[基金项目] 国家自然科学基金项目(41571454);汉阴七叶莲农业科技有限责任公司合作项目(4030220413)

[作者简介] 樊 尧(1997—),男,山西运城人,在读硕士,主要从事环境土壤化学研究。E-mail:1535767096@qq.com

[通信作者] 梁东丽(1963—),女,陕西铜川人,教授,博士生导师,主要从事环境土壤化学研究。E-mail:dliliang@nwsuaf.edu.cn

root) and fruit quality (composition and contents of organic acids and soluble sugars and vitamin C content) of different treatments were measured and Se biofortification effects were compared. 【Result】 The application of two exogenous Se fertilizers in soil increased the biomass of tomatoes. Compared with the control, 0.5–5 mg/kg exogenous Se significantly increased Se content of tomatoes ($P < 0.05$), and selenate treatment was significantly better than selenite treatment ($P < 0.01$). Se contents in the stem lower part, stem upper part, leaf lower part, leaf upper part and root in each treatment were significantly higher than that of the control ($P < 0.05$), and they increased significantly with the increase of Se content ($P < 0.05$). Exogenous application of Se fertilizers had less effect on the composition of organic acids (oxalic acid, tartaric acid, malic acid, citric acid and succinic acid) in tomatoes, malic acid and citric acid were the main organic acids in tomatoes in each treatment, but it changed their contents. Compared with the control, exogenous 0.5–2 mg/kg Se significantly increased contents of fructose and glucose in tomatoes. After applying 0.5–2 mg/kg selenite and selenate in soil, total organic acid, total soluble sugar, vitamin C content and sugar-acid ratio of tomatoes were significantly increased ($P < 0.05$). 【Conclusion】 Soil application of 0.5–2 mg/kg selenate ensured the accumulation of Se and improved fruit quality of tomatoes. Considering human health, 0.5 mg/kg selenate was suggested for Se biofortification of tomatoes.

Key words: tomatoes; selenium; biofortification; biomass; fruit quality

硒是人体必需的微量营养元素,且不能由人体合成。缺硒或过量摄入硒均会影响人体健康^[1]。硒的推荐膳食摄入量(RDA)为 55 $\mu\text{g}/\text{d}$ ^[2],补硒和硒毒害剂量界限(40~400 $\mu\text{g}/\text{d}$)非常狭窄^[3],饮食补硒被认为是相对安全、有效的补硒途径^[4]。其中通过施用硒肥来生产富硒作物,进而提高目标人群的硒摄入量是有效的途径之一^[5],这种途径的效果在很大程度上依赖于植物可食用部分硒含量的增加^[6]。因此生产富硒作物对缺硒地区居民安全有效补硒,提高居民日摄入硒水平有重要意义。

硒是一种对植物有益的元素,虽然低剂量的硒能提高植物的生产力及其对氧化应激的抗性^[1],但是高剂量的硒却会导致植物细胞质膜破裂、叶片黄化,进而使植物出现衰老、产量降低等毒性症状^[7]。蔬菜具有快速生长和积累硒的能力,且消费量较高,作为膳食硒摄入的来源具有巨大潜力^[8],因此有必要搞清蔬菜的硒生物强化效果和机理^[9]。作为世界上种植、生产、加工、消费范围最广的果蔬之一,番茄具有极高的营养价值,其可鲜食,避免了硒在烹饪或加工后损失^[10],因此它是利用富硒果蔬进行膳食补充的理想载体之一。目前关于硒对番茄影响的研究大多聚焦于叶面喷硒对番茄品质的影响方面^[11–13],而关于土壤中施用硒肥对番茄硒生物强化及其品质影响的研究较少。此外,有研究表明,土壤中施用硒酸盐对马铃薯^[14]、豇豆^[15]、白萝卜^[16]等的富硒效果优于亚硒酸盐,但少有研究分析不同种类硒肥对番茄品质的影响。因此本研究通过在土壤中施用不同

硒肥(亚硒酸盐和硒酸盐),分析其对番茄生物量、不同部位硒含量及果实品质的影响,比较二者的硒生物强化效果,旨在为生产优质的富硒番茄提供技术依据,同时也为缺硒地区其他富硒蔬菜品种的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自陕西省安康市汉阴县七叶莲蔬菜基地,采集 0~20 cm 的耕层土壤,晾干后剔除杂质,过 5 mm 筛,储存储备用。土壤的基本理化性质为: pH 6.45,电导率 0.81 mS/cm,有机质 11.58 g/kg,土壤总硒 0.16 mg/kg。供试番茄品种为金美丽娜。供试试剂亚硒酸钠(Na_2SeO_3 , Se(IV))和硒酸钠(Na_2SeO_4 , Se(VI))均为分析纯试剂,购自美国 Sigma 公司。

1.2 试验设计

采用盆栽试验,土壤中施用硒酸钠和亚硒酸钠 2 种外源硒,每种硒肥设置 4 个施用水平(0.5, 1, 2, 5 mg/kg),共 8 个处理;另设不施用硒肥的对照(CK);每个处理重复 3 次,共 27 盆。试验盆的规格为内径 32 cm、深 20 cm,每盆装土 10 kg,施用的基肥为: N 0.15 g/kg(尿素,分析纯), P 0.08 g/kg(磷酸二氢钾,分析纯)。硒处理按照设定施用水平均匀喷入土壤,调节土壤含水量为 75% 田间最大持水量,平衡 21 d^[17],平衡期间保持土壤含水量不变。平衡结束后,每盆定植 1 株番茄幼苗。在番茄生长

过程中保证作物正常需求,并防治虫害。

于番茄成熟后,收获整个植株,依次用自来水和蒸馏水冲洗 3 遍,用吸水纸擦干,测定果实鲜质量,即为果实生物量;之后取部分果实用于测定有机酸、可溶性糖、维生素 C 含量。为了探究硒具体的转运机制,将番茄植株分为果实、茎下部、茎上部、叶下部、叶上部(以距根部 80 cm 处的茎部为界划分茎和叶的上下部)和根 6 个部分,分别装于纸袋中,于 90 ℃杀青 30 min,55 ℃烘干至质量恒定,将干样研磨成粉末,于 4 ℃储存用于硒含量测定。

1.3 测定指标与方法

采用 HNO₃-HClO₄(体积比 4 : 1)混酸消解样品,浓 HCl 还原,用双道原子荧光光度计(北京吉天 AFS-930)测定总硒含量^[18]。测定样品硒含量时,用圆白菜(GBW10014)作为质量控制样品,实测质量控制样品硒含量为(0.19±0.04) mg/kg(标准值为(0.20±0.03) mg/kg),样品的回收率为 95%。

维生素 C 含量采用钼蓝比色法^[19]测定。有机酸和可溶性糖组成及其含量采用高效液相色谱

法^[20-21]测定。其中以各组成有机酸含量之和作为总有机酸含量,以各组成可溶性糖含量之和作为总可溶性糖含量。用果实总可溶性糖与总有机酸含量之比计算糖酸比。

1.4 数据处理与分析

试验数据用“平均值±标准差”表示。采用 Microsoft Excel 2020 进行数据处理;SPSS 23.0 进行差异显著性检验(单因素方差分析);用 Origin 2016 绘制图表。

2 结果与分析

2.1 土壤中施用不同硒肥对番茄果实生物量的影响

不同硒肥对番茄果实生物量的影响见表 1。由表 1 可知,与对照相比,施用 0.5~5 mg/kg 硒肥均明显提高了番茄果实生物量,其中 0.5~5 mg/kg Se(Ⅳ)处理的果实生物量与对照之间无显著差异,而 0.5~5 mg/kg Se(Ⅵ)处理较对照显著增加了 18.66%~23.62%($P<0.05$)。

表 1 土壤中施用不同硒肥对番茄果实生物量的影响

Table 1 Effects of different Se fertilizers application in soil on tomatoes fruit biomass					g/株
硒肥处理/(mg · kg ⁻¹) Treatment		生物量 Biomass	硒肥处理/(mg · kg ⁻¹) Treatment		生物量 Biomass
对照 CK	0	77.49±2.32 b	Se(Ⅵ)		
	0.5	88.13±7.10 ab		0.5	95.79±8.25 a
Se(Ⅳ)	1	90.67±8.90 ab		1	95.29±5.02 a
	2	85.47±9.14 ab		2	93.08±5.61 a
	5	89.52±7.53 ab		5	91.95±7.03 a

注:数据后标不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。
Note:Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($P<0.05$).

2.2 土壤中施用不同硒肥对番茄各部位硒含量的影响

由表 2 可见,0.5~5 mg/kg Se(Ⅳ)和 Se(Ⅵ)处理的番茄果实硒含量分别为 0.02~0.44 和 6.02~57.77 mg/kg。与对照相比,外源施用硒肥均显著提高了番茄果实的硒含量($P<0.05$),且番茄果实的硒含量随着硒肥含量的增大而显著增加,5 mg/kg Se(Ⅳ)处理的番茄果实硒含量是 0.5 mg/kg Se(Ⅳ)处理的 22.00 倍,而 5 mg/kg Se(Ⅵ)处理的番茄果实硒含量是 0.5 mg/kg Se(Ⅵ)处理的 9.60 倍($P<0.05$)。同等硒施入量条件下,Se(Ⅵ)处理番茄果实硒含量是 Se(Ⅳ)处理的 131.30~301.00 倍,2 种硒肥间差异极显著($P<0.01$)。可见,施用 Se(Ⅵ)在提高番茄果实硒含量方面的效果显著优于对应的 Se(Ⅳ)处理。

表 2 显示,各施硒处理番茄茎下部、茎上部、叶

下部、叶上部和根中的硒含量均显著高于对照($P<0.05$),且各部位的硒含量均随外源施硒量的增加而显著增大($P<0.05$)。5 mg/kg Se(Ⅳ)处理番茄的茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根硒含量分别是 0.5 mg/kg Se(Ⅳ)处理的 9.14,19.00,11.92,12.75 和 8.44 倍;而 5 mg/kg Se(Ⅵ)处理番茄的茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根硒含量分别是 0.5 mg/kg Se(Ⅵ)处理的 9.29,10.31,21.38,16.42 和 9.33 倍。当施硒量相同时,Se(Ⅵ)处理番茄茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根硒含量均极显著高于对应的 Se(Ⅳ)处理($P<0.01$)。Se(Ⅳ)处理番茄各部位硒含量分布规律为根>茎下部>叶下部>叶上部>茎上部>果实;而 Se(Ⅵ)处理番茄各部位硒含量分布规律为叶下部>叶上部>根>茎下部、茎上部>果实。

表 2 土壤中施用不同硒肥对番茄各部位硒含量的影响

Table 2 Effects of different Se fertilizers application in soil on Se contents in various parts of tomatoes mg/kg

硒肥处理/ (mg·kg ⁻¹) Treatment		果实 Fruits	茎下部 Lower part of stem	茎上部 Upper part of stem	叶下部 Lower part of leaf	叶上部 Upper part of leaf	根 Root
对照 CK	0	0.00±0.00 De	0.03±0.01 Be	0.02±0.00 Ce	0.04±0.00 Be	0.04±0.00 Be	0.19±0.02 Ae
Se(Ⅳ)	0.5	0.02±0.01 Ed	0.22±0.02 Bd	0.05±0.01 Dd	0.13±0.02 Cd	0.12±0.01 Cd	0.62±0.00 Ad
	1	0.05±0.01 Ec	0.36±0.02 Bc	0.13±0.01 Dc	0.35±0.02 Bc	0.30±0.01 Cc	1.01±0.02 Ac
	2	0.13±0.02 Eb	0.70±0.05 Bb	0.29±0.03 Db	0.64±0.04 Bb	0.54±0.04 Cb	2.20±0.05 Ab
	5	0.44±0.01 Ea	2.01±0.20 Ba	0.95±0.10 Da	1.55±0.08 Ca	1.53±0.06 Ca	5.23±0.14 Aa
Se(Ⅵ)	0.5	6.02±0.14 Ed**	12.41±0.43 Dd**	11.50±0.80 Dd**	48.00±0.41 Ad**	40.00±1.47 Bd**	20.51±1.33 Cd**
	1	13.17±0.02 Ec**	19.52±1.75 Dc**	22.33±2.38 Dc**	120.62±7.16 Ac**	93.01±4.42 Bc**	45.27±1.09 Cc**
	2	31.90±0.05 Eb**	65.48±4.97 Db**	62.88±4.32 Db**	403.53±15.38 Ab**	303.92±29.68 Bb**	97.93±4.15 Cb**
	5	57.77±0.02 Ea**	115.30±4.20 Da**	118.53±10.43 Da**	1 026.44±54.81 Aa**	656.77±13.52 Ba**	191.37±5.25 Ca**

注:同行数据后标不同大写字母表示同一施硒处理下不同部位之间差异显著($P<0.05$);同列数据后标不同小写字母表示同一外源硒种类和同一部位下不同处理间差异显著($P<0.05$);“*”表示同一部位和同一施硒水平下不同硒肥种类间差异极显著($P<0.01$)。

Note:Different uppercase letters indicate significant differences among different parts in same treatments ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments in same exogenous Se treatments and parts ($P<0.05$). “*” means extremely significant differences among different fertilizers for same parts and levels ($P<0.01$).

2.3 土壤中施用不同硒肥对番茄果实品质的影响

2.3.1 有机酸组成及其含量 由表 3 可知,施用外源硒肥番茄果实中有机酸的组成几乎没有变化,但各有机酸组分含量变化较大。各处理番茄果实中 5 种有机酸以苹果酸和柠檬酸为主,二者之和占总有机酸含量的 97.80%~98.43%,且施用外源硒处理苹果酸和柠檬酸含量均显著高于对照。相关性分析结果显示,苹果酸和柠檬酸含量均与总有机酸含量

呈极显著正相关($P<0.01$),表明施用外源硒影响了番茄果实中的苹果酸和柠檬酸含量,进而影响了果实中的总有机酸含量。此外,苹果酸含量占比(26.41%~34.62%)或柠檬酸含量占比(63.51%~71.85%)有一定变异,这表明硒能促使番茄中的苹果酸和柠檬酸相互转化。施 5 mg/kg Se(Ⅳ)能促进番茄果实中柠檬酸向苹果酸转化,而施 5 mg/kg Se(Ⅵ)能促进番茄中苹果酸向柠檬酸转化。

表 3 土壤中施用不同硒肥对番茄果实有机酸组成及其含量的影响

Table 3 Effects of different Se fertilizers application in soil on composition and contents of organic acids in fruits of tomatoes

硒肥处理/(mg·kg ⁻¹) Treatment		草酸 Oxalic acid	酒石酸 Tartaric acid	苹果酸 Malic acid	柠檬酸 Citric acid	琥珀酸 Succinic acid
对照 CK	0	0.32±0.01 c	—	6.65±0.06 e	16.48±0.05 d	0.15±0.00 c
Se(Ⅳ)	0.5	0.23±0.00 Bd	0.09±0.01 B	7.26±0.01 Bd	17.63±0.20 Bc	0.09±0.00 Be
	1	0.32±0.00 Ac	—	7.61±0.06 Bc	19.40±0.39 Ab	0.23±0.00 Ab
	2	0.35±0.01 Ab	—	9.05±0.03 Ab	19.84±0.44 Ab	0.30±0.00 Aa
	5	0.54±0.01 Aa	—	12.02±0.02 Aa	22.05±0.48 Aa	0.11±0.00 Ad
Se(Ⅵ)	0.5	0.29±0.01 Aa	0.14±0.00 Aa	9.09±0.01 Aa	21.15±0.40 Aa	0.25±0.00 Aa
	1	0.31±0.01 Aa	0.08±0.00 b	7.90±0.01 Ab	18.69±0.15 Bb	0.12±0.00 Bb
	2	0.28±0.01 Ba	0.02±0.00 d	7.11±0.02 Bc	18.66±0.22 Bb	0.11±0.00 Bd
	5	0.18±0.00 Bb	0.07±0.00 c	5.47±0.08 Bd	14.88±0.17 Bc	0.11±0.00 Ad

注:同列数据后标不同大写字母表示同一硒肥水平下不同硒肥种类间差异显著($P<0.05$),标不同小写字母表示同一硒肥种类不同水平硒肥处理间差异显著($P<0.05$)。下表同。

Note:Different uppercase letters indicate significant differences among different fertilizer types at same levels ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences among treatments with different fertilizer levels in same fertilizer types ($P<0.05$). The same below.

2.3.2 可溶性糖组成及其含量 由表 4 可知,番茄果实中可溶性糖主要包括果糖和葡萄糖 2 种,且 2 种糖含量接近,占比均在 44.21%~55.79%。在番茄果实中未检出蔗糖,这可能与番茄在果实生长发育的早期阶段积累蔗糖并将其转化成葡萄糖和果糖

有关^[11]。此外,与对照相比,外源施硒 0.5~2 mg/kg 均可显著提高番茄果实中果糖和葡萄糖的含量,这与 Zhu 等^[11]的研究结果相似。当施用硒肥量为 0.5~5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理番茄果实果糖和葡萄糖含量随着施硒量的增大而显著增加,而

Se(VI)处理却呈降低的趋势。

表 4 土壤中施用不同硒肥对番茄果实可溶性糖组成及其含量的影响

Table 4 Effects of different Se fertilizers application in soil on the composition and content of soluble sugar in

		fruits of tomatoes		mg/g
硒肥处理/(mg·kg ⁻¹) Treatment		果糖 Fructose	葡萄糖 Glucose	
对照 CK	0	19.03±0.81 e	21.66±1.49 e	
Se(Ⅳ)	0.5	22.84±0.94 Bd	27.67±0.65 Bd	
	1	26.03±0.48 Ac	32.40±1.21 Ac	
	2	33.68±0.51 Ab	42.51±1.26 Ab	
	5	37.45±1.34 Aa	46.43±1.43 Aa	
Se(VI)	0.5	32.16±0.87 Aa	39.35±0.21 Aa	
	1	26.64±1.42 Ab	28.15±0.63 Bb	
	2	27.09±0.59 Bb	25.16±1.04 Bc	
	5	23.11±0.55 Bc	22.87±0.75 Be	

表 5 土壤中施用不同硒肥对番茄果实品质的影响

Table 5 Effects of different Se fertilizers application in soil on fruit quality parameters of tomatoes

硒肥处理/ (mg·kg ⁻¹) Treatment		总有机酸含量/ (mg·g ⁻¹) Organic acid content	总可溶性糖含量/ (mg·g ⁻¹) Soluble sugar content	糖酸比 Sugar acid ratio	维生素 C 含量/ (mg·g ⁻¹) Vitamin C content
对照 CK	0	23.60±0.10 e	40.69±2.29 e	1.72±0.10 e	0.25±0.01 d
Se(Ⅳ)	0.5	25.30±0.19 Bd	50.51±1.59 Bd	2.00±0.07 Bd	0.38±0.03 Aa
	1	27.56±0.36 Ac	58.43±1.69 Ac	2.12±0.08 Ac	0.33±0.03 Bb
	2	29.54±0.47 Ab	76.19±1.77 Ab	2.58±0.04 Aa	0.29±0.02 Bc
	5	34.72±0.49 Aa	83.88±2.77 Aa	2.42±0.06 Ab	0.25±0.00 Bcd
Se(VI)	0.5	30.92±0.42 Aa	71.51±1.09 Aa	2.31±0.00 Aa	0.27±0.01 Bc
	1	27.10±0.16 Ab	54.79±2.04 Bb	2.02±0.07 Ac	0.40±0.02 Aa
	2	26.18±0.25 Bc	52.25±1.63 Bb	2.00±0.05 Bc	0.41±0.00 Aa
	5	20.71±0.21 Bf	45.98±1.30 Bc	2.22±0.05 Bb	0.35±0.01 Ab

由表 5 可见,与对照相比,外源硒处理番茄果实糖酸比均显著提高。施用硒肥 0.5 mg/kg 时,Se(VI)处理番茄果实糖酸比较对应的 Se(Ⅳ)处理显著提高 15.50%;而施用硒肥 2~5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理的糖酸比较 Se(VI)处理显著提高了 9.01%~29.00%。施用硒肥 0.5~5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理的糖酸比随着外源硒用量的增加呈先上升后下降趋势,在硒施用量为 2 mg/kg 时达到最大值;而 Se(VI)处理的糖酸比随施硒量的增加呈先降低后增加的趋势,其中硒施用量为 2 mg/kg 时最小。

表 5 显示,与对照相比,除了 5 mg/kg Se(Ⅳ)处理外,其他外源硒处理番茄果实中维生素 C 含量均显著提高($P<0.05$)。施用硒肥 0.5~5 mg/kg 时,随着硒肥用量的增加,Se(Ⅳ)处理番茄果实维生素 C 含量呈降低趋势,而 Se(VI)处理呈先升高后降低的趋势。施用硒肥 0.5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理番茄维生素 C 含量显著高于 Se(VI)处理($P<$

2.3.3 总有机酸、总可溶性糖和维生素 C 含量及糖酸比 由表 5 可知,与对照相比,施用 0.5~2 mg/kg Se(Ⅳ)或 Se(VI)番茄果实中总有机酸含量均显著提高;当施用硒肥 0.5~5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理番茄果实总有机酸含量随着硒肥用量的增加而显著升高;而 Se(VI)处理随着硒肥用量的增加显著降低,其中施入 0.5~2 mg/kg Se(VI)对有机酸合成表现为促进作用,5 mg/kg Se(VI)则表现为抑制作用。

表 5 表明,与对照相比,外源施硒后番茄果实中总可溶性糖含量均显著升高($P<0.05$)。施用硒肥 0.5 mg/kg 时,Se(VI)处理番茄果实总可溶性糖含量较 Se(Ⅳ)处理显著提高 41.58%;而施用硒肥 1~5 mg/kg 时,Se(Ⅳ)处理番茄果实总可溶性糖含量较 Se(VI)处理显著提高 6.64%~82.43%。

0.05);施用硒肥 1~5 mg/kg 时,Se(VI)处理显著高于 Se(Ⅳ)处理($P<0.05$)。

3 讨 论

3.1 外源施硒对番茄生物量的影响

许多研究表明,施入低量硒会促进植物生长,从而提高作物产量,而高用量硒会抑制植物生长^[22]。本研究中,与对照相比,0.5~5 mg/kg 硒处理番茄生物量均提高,并未造成果实生物量下降,这可能是因为番茄的富硒能力相对较弱,因此 0.5~5 mg/kg 硒处理未能抑制其生物量的增加。此外,当土壤中施用硒肥量相同时,Se(Ⅳ)处理番茄生物量均低于 Se(VI)处理,说明 Se(Ⅳ)的生物有效性较低,其对果实生物量的影响不显著。

3.2 外源施硒对番茄硒含量及分布的影响

本研究分析了番茄果实、茎下部、茎上部、叶下部、叶上部和根 6 个部位硒的分布规律,结果发现,与对照相比,外源施硒番茄 6 个部位的硒含量均显

著提高($P<0.05$),且硒含量呈剂量依赖性增加,这与前人对花生^[23]、小麦^[24]等的研究结果一致。

本研究中,当土壤中施用硒肥量相同时,Se(VI)处理番茄各部位硒含量均极显著高于Se(IV)处理($P<0.01$)。这是因为Se(IV)与土壤组分间形成内层络合物,而Se(VI)则被外层络合,且与外层络合相比,内层络合结合强度更高、更难被解吸释放,使得Se(VI)的解吸速率高于Se(IV)^[25],因此Se(IV)在土壤中的生物有效性低于Se(VI)。此外,被根部吸收的Se(IV)会迅速转化为有机硒,且大部分留在根中,只有极少数转运到地上部^[26];而Se(VI)被植物根系吸收后多以Se(VI)的形式向地上部转运^[27],且Se(VI)在植物木质部高速移动且不容易转化为有机形态^[26],从根部吸收的Se(VI)首先转运到叶片,再转运到其他部位。故Se(IV)处理的番茄根部硒含量最高,Se(VI)处理的番茄叶片硒含量最高。此外,Se(VI)处理番茄叶下部硒含量显著高于叶上部,这可能是下部叶片比上部叶片富集时间更长所致。

3.3 外源施硒对番茄果实品质的影响

顺乌头酸酶是碳素三羧酸循环中的关键酶,其活性增强能够促进柠檬酸转化为琥珀酸,琥珀酸进一步反应合成苹果酸^[28]。本研究发现,施5 mg/kg Se(IV)能促进柠檬酸向苹果酸转化,而施5 mg/kg Se(VI)能促进苹果酸向柠檬酸转化。可见施入不同种类硒肥后有机酸组分转化机制可能不同,推测5 mg/kg Se(IV)增强了顺乌头酸酶的活性,而5 mg/kg Se(VI)引起氧化胁迫,苹果酸充当还原剂,被氧化成草酸,草酸进一步合成柠檬酸^[29]。

本研究还发现,与对照相比,外源施用硒肥显著提高了番茄果实中总可溶性糖的含量($P<0.05$),这可能是因为硒促进了植物叶片的光合作用^[30],提高了光合产物如蔗糖、葡萄糖和果糖的含量,从而导致番茄果实总可溶性糖含量增加。而可溶性糖会通过糖酵解途径合成苹果酸和柠檬酸,这2种有机酸含量的提高有助于促进“汇”器官(如果实)中的糖酵解和三羧酸循环(TCA)^[31],进而提高果实中的有机酸含量。而土壤中施用高含量Se(VI)后,番茄果实将无机硒转化为有机硒的能力减弱^[32],果实中大量积累的Se(VI)可充当促氧化剂导致有机酸代谢紊乱^[33],从而抑制有机酸的合成,因此5 mg/kg Se(VI)的总有机酸含量最低。此外,Gui等^[34]发现,施用富硒酵母后,西兰花中的可溶性糖含量随施硒浓度的增加而显著降低,但亚硒酸盐处理却与此相

反。而Gao等^[35]研究表明,叶面喷施有机硒(Se-Met)对草莓果实中有机酸的影响大于糖,而本研究中外源施加无机硒对番茄果实中糖的影响大于有机酸。这可能是由于无机硒和有机硒对可溶性糖和有机酸的影响机制不同所致。此外,本研究中,施用5 mg/kg Se(VI)处理番茄果实的总可溶性糖含量较0.5~2 mg/kg Se(VI)处理显著下降,原因可能是果实中积累了大量Se(VI),引起氧化应激,影响了与糖代谢相关酶(包括磷酸果糖激酶、丙酮酸激酶和己糖激酶等)的活性^[35],从而减弱了显著的正向作用。

本研究中,外源硒处理显著提高了番茄果实的糖酸比($P<0.05$),这已经在草莓^[35]、番茄^[11]、葡萄^[36]和枣^[32]中得到验证。果实中糖酸比增加的原因有二,一是番茄果实中总有机酸和总可溶性糖含量均增加,但总可溶性糖增加的幅度大于总有机酸,这与Gao等^[35]的结果一致;二是番茄果实中总可溶性糖含量增加,总有机酸含量下降,导致糖酸比增加,这种情况主要出现在果实中硒含量高的处理。

本研究发现,施用外源硒总体可显著提高番茄果实中的维生素C含量,这与Antoshkina等^[37]和Liu等^[38]的研究结果一致。这与外源硒增强了作物对S的吸收,使得S更易合成谷胱甘肽^[11],而谷胱甘肽又可参与维生素C的循环,因此提高了果实中维生素C含量有关^[39]。Gui等^[34]报道,施用高浓度Se(IV)抑制了西兰花中的维生素C含量。本研究中5 mg/kg Se(IV)处理果实维生素C含量仅与对照相当,这可能是因为番茄植株为了应对氧化应激,调整机体抗氧化系统和包括维生素C在内的活性物质的代谢^[34],从而降低了对维生素C含量的显著正向作用。

4 结 论

与对照相比,土壤中施用0.5~5 mg/kg 2种硒肥均增加了番茄果实的生物量和果实硒含量,其中硒酸钠处理番茄果实中积累的硒极显著高于亚硒酸钠处理($P<0.01$)。施用0.5~2 mg/kg Se(IV)或Se(VI)处理的果实品质参数值(柠檬酸、苹果酸、果糖、葡萄糖和维生素C含量及糖酸比)均显著升高($P<0.05$)。施用0.5~2 mg/kg 硒酸钠既可确保硒富集效果,又能改善果实品质。当施用0.5 mg/kg 硒酸钠时,番茄果实干样富集的硒含量为6.02 mg/kg,相当于鲜样中硒含量为0.66 mg/kg,《中国居民膳食指南 2022》推荐的人均鲜果摄入量为200~350 g/d,据此可知,当施用0.5 mg/kg 硒

酸钠时,生产的富硒番茄可为人体提供的硒为 $132.00\sim 231.00\mu\text{g/d}$,能够满足人体补硒需求($40\sim 400\mu\text{g/d}$)。因此推荐以在土壤中施用 0.5 mg/kg 硒酸钠的方式进行番茄的硒生物强化。

[参考文献]

- [1] Abdalla M A, Lentz C, Mühling K H. Crosstalk between selenium and sulfur is associated with changes in primary metabolism in lettuce plants grown under Se and S enrichment [J]. *Plants* (Basel, Switzerland), 2022, 11(7): 927.
- [2] Institute of Medicine (US). Panel on dietary antioxidants and related compounds. Dietary reference intakes for vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids [M]. Washington, DC, USA: National Academies Press, 2000.
- [3] Schiavon M, Pilon-Smits E A H. The fascinating facets of plant selenium accumulation-biochemistry, physiology, evolution and ecology [J]. *The New Phytologist*, 2017, 213(4): 1582-1596.
- [4] Navarro-Alarcon M, Cabrera-Vique C. Selenium in food and the human body: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 400(1/2/3): 115-141.
- [5] Izydorczyk G, Ligas B, Mikula K, et al. Biofortification of edible plants with selenium and iodine: a systematic literature review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 754: 141983.
- [6] 陈松灿, 孙国新, 陈正, 等. 植物硒生理及与重金属交互的研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2014, 50(5): 612-624.
- Chen S C, Sun G X, Chen Z, et al. Progresses on selenium metabolism and interaction with heavy metals in higher plants [J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5): 612-624.
- [7] Hasanuzzaman M, Nahar K, Garcia-Caparrós P, et al. Selenium supplementation and crop plant tolerance to metal/metalloid toxicity [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 12: 792770.
- [8] Hu H F, Hu J K, Wang Q D, et al. Transcriptome analysis revealed accumulation-assimilation of selenium and physio-biochemical changes in alfalfa (*Medicago sativa* L.) leaves [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, 102(11): 4577-4588.
- [9] Lanza M G D B, dos Reis A R. Roles of selenium in mineral plant nutrition: ROS scavenging responses against abiotic stresses [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2021, 164: 27-43.
- [10] Lu X Q, He Z S, Lin Z Q, et al. Effects of Chinese cooking methods on the content and speciation of selenium in selenium bio-fortified cereals and soybeans [J]. *Nutrients*, 2018, 10(3): 317.
- [11] Zhu Z, Zhang Y B, Liu J, et al. Exploring the effects of selenium treatment on the nutritional quality of tomato fruit [J]. *Food Chemistry*, 2018, 252: 9-15.
- [12] Zhu Z, Chen Y L, Zhang X J, et al. Effect of foliar treatment of sodium selenate on postharvest decay and quality of tomato fruits [J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198: 304-310.
- [13] Meucci A, Shiriaev A, Rosellini I, et al. Se-enrichment pattern, composition, and aroma profile of ripe tomatoes after sodium selenate foliar spraying performed at different plant developmental stages [J]. *Plants* (Basel, Switzerland), 2021, 10(6): 1050.
- [14] De Oliveira V C, Faquin V, Andrade F R, et al. Physiological and physicochemical responses of potato to selenium biofortification in tropical soil [J]. *Potato Research*, 2019, 62(3): 315-331.
- [15] Silva V M, Boleta E H, Martins J T, et al. Agronomic biofortification of cowpea with selenium: effects of selenate and selenite applications on selenium and phytate concentrations in seeds [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2019, 99(13): 5969-5983.
- [16] Li X, Wu Y S, Li B Q, et al. Selenium accumulation characteristics and biofortification potentiality in turnip (*Brassica rapa* var. *rapa*) supplied with selenite or selenate [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 8: 2207.
- [17] Li J, Peng Q, Liang D L, et al. Effects of aging on the fraction distribution and bioavailability of selenium in three different soils [J]. *Chemosphere*, 2016, 144: 2351-2359.
- [18] Wang S S, Liang D L, Wang D, et al. Selenium fractionation and speciation in agriculture soils and accumulation in corn (*Zea mays* L.) under field conditions in Shaanxi Province, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428: 159-164.
- [19] 刘绍俊, 牛英, 刘冰浩, 等. 钼蓝比色法测定沙田柚果肉中还原型维生素C含量的研究 [J]. *北方园艺*, 2011(1): 8-12.
- Liu S J, Niu Y, Liu B H, et al. Study on determination of the content of reduction-type VC in Chinese grapefruit's sarcocarp with phosphomolybdate-blue spectrophotometry [J]. *Northern Horticulture*, 2011(1): 8-12.
- [20] 李彩林, 杨志国, 王华瑞, 等. 高效液相色谱法测定红香酥梨中6种有机酸含量 [J]. *山西农业科学*, 2019, 47(12): 2103-2106, 2138.
- Li C L, Yang Z G, Wang H R, et al. Determination of six organic acids contents in red fragrant pear by high performance liquid chromatography [J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(12): 2103-2106, 2138.
- [21] 王文辉, 杨俊, 刘川. 高效液相色谱法测定雪莲果等昆明市售18种水果中果糖、葡萄糖、蔗糖的含量 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2008, 30(S1): 348-350, 355.
- Wang W H, Yang J, Liu C. A study on the determination of glucose, fructose and sucrose in fruit by HPLC [J]. *Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition)*, 2008, 30(S1): 348-350, 355.
- [22] 吴洁. 硒调控果蔬衰老与抗病性的作用机制研究 [D]. 合肥: 安徽农业大学, 2016.
- Wu J. Effects and the mechanism of selenium on senescence and disease resistance of fruits and vegetables [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.
- [23] Luo L P, Zhang J P, Zhang K Y, et al. Peanut selenium distribution, concentration, speciation, and effects on proteins after exogenous selenium biofortification [J]. *Food Chemistry*,

2021,354;129515.

[24] 王 敏.施硒方式对小麦硒吸收、转运和形态分布的影响及机制 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.

Wang M. Effect of selenium application methods on selenium uptake,transport and speciation in wheat (*Triticum aestivum* L.) and its mechanism [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2021.

[25] Dhillon K S,Dhillon S K. Adsorption-desorption reactions of selenium in some soils of India [J]. Geoderma, 1999, 93 (1/2):19-31.

[26] Do Nascimento da Silva E,Cadore S. Bioavailability assessment of copper,iron,manganese,molybdenum,selenium,and zinc from selenium-enriched lettuce [J]. Journal of Food Science,2019,84(10):2840-2846.

[27] Natasha,Shahid M,Niazi N K,et al. A critical review of selenium biogeochemical behavior in soil-plant system with an inference to human health [J]. Environmental Pollution,2018, 234:915-934.

[28] 王金玲,晏雨辰,李巧月,等. 生物降解柠檬酸及其影响因素的研究进展 [J]. 现代食品科技,2022,38(2):347-357,312.

Wang J L,Yan Y C,Li Q Y,et al. Research progress of biodegradable citric acid and its influencing factors [J]. Modern Food Science and Technology,2022,38(2):347-357,312.

[29] 刘洪升,宋秋华,李凤民. 根分泌物对根际矿物营养及根际微生物的效应 [J]. 西北植物学报,2002,22(3):693-702.

Liu H S,Song Q H,Li F M. The roles of root exudation on rhizosphere nutrient and rhizosphere microorganisms [J]. Acta Botanica Boreali-occidentalia Sinica,2002,22(3):693-702.

[30] Wang C X,Yue L,Cheng B X,et al. Mechanisms of growth-promotion and Se-enrichment in *Brassica chinensis* L. by selenium nanomaterials;beneficial rhizosphere microorganisms,nutrient availability, and photosynthesis [J]. Environmental Science,2022,9(1):302-312.

[31] Etienne A,Génard M,Lobit P,et al. What controls fleshy fruit acidity? A review of malate and citrate accumulation in fruit cells [J]. Journal of Experimental Botany,2013,64(6):1451-1469.

[32] Jing D W,Du Z Y,Ma H L,et al. Selenium enrichment,fruit quality and yield of winter jujube as affected by addition of sodium selenite [J]. Scientia Horticulturae,2017,225:1-5.

[33] El-Badri A M,Hashem A M,Batool M,et al. Comparative efficacy of bio-selenium nanoparticles and sodium selenite on morpho-physiochemical attributes under normal and salt stress conditions, besides selenium detoxification pathways in *Brassica napus* L. [J]. Journal of Nanobiotechnology, 2022, 20 (1): 163.

[34] Gui J Y,Rao S,Gou Y Y,et al. Comparative study of the effects of selenium yeast and sodium selenite on selenium content and nutrient quality in broccoli florets (*Brassica oleracea* L. var. *italica*) [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2022,102(4):1707-1718.

[35] Gao S,Zhang Y Y,Jin Y Y,et al. Selenomethionine regulates the sugar-acid ratio of strawberry fruit by modulating the activities of related enzymes [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology,2022,97(2):224-235.

[36] Zhu S M,Liang Y L,An X J,et al. Changes in sugar content and related enzyme activities in table grape (*Vitis vinifera* L.) in response to foliar selenium fertilizer [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2017,97(12):4094-4102.

[37] Antoshkina M,Golubkina N,Sekara A,et al. Effects of selenium application on biochemical characteristics and biofortification level of kohlrabi (*Brassica oleracea* L. var. *gongylodes*) produce [J]. Frontiers in Bioscience-Landmark,2021, 26(9):533-542.

[38] Liu L,Wang L X,Lü L H,et al. Improvment of growth and quality and regulation of the antioxidant system and lipid peroxidation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* (lour.) ru-pr.) by exogenous sodium selenite [J]. Applied Ecology and Environmental Research,2020,18(6):7473-7481.

[39] Chen Z,Young T E,Ling J,et al. Increasing vitamin C content of plants through enhanced ascorbate recycling [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2003,100(6):3525-3530.