

王 刀,张少媛,杨 伟,等. 不同外源硒处理对番茄果实硒含量和营养品质的影响[J]. 江苏农业科学,2025,53(6):162–168.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.06.020

# 不同外源硒处理对番茄果实硒含量和营养品质的影响

王 刀<sup>1</sup>,张少媛<sup>1</sup>,杨 伟<sup>1,2</sup>,薛岩晟<sup>1</sup>,杜 豪<sup>1</sup>,薛 佳<sup>1</sup>,许 锋<sup>1</sup>,王启剑<sup>1</sup>

(1. 长江大学园艺园林学院,湖北荆州 434022; 2. 湖北国硒科技发展有限公司,湖北恩施 445000)

**摘要:**探究不同形态与浓度的外源硒对番茄生物量积累、果实硒含量及其营养品质指标的影响,以期优化番茄富硒栽培技术和提高果实品质提供科学依据。以千禧小番茄为研究对象,采用硒酸钠( $\text{NaSeO}_4$ )、亚硒酸钠( $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ )及生物纳米硒(Nano-Se)3种外源硒,分别设置3个浓度梯度:400、600及800  $\mu\text{mol/L}$ ,以叶面喷施的方式对番茄进行硒处理,并对成熟番茄果实的总硒、总黄酮、可溶性蛋白、过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性及营养品质(维生素C、可溶性糖、有机酸和糖酸比)等进行测定分析。结果表明,不同形态及浓度的外源硒喷施均显著提高了番茄果实内的硒含量,其中,600  $\mu\text{mol/L}$   $\text{Na}_2\text{SeO}_3$ 处理效果最为显著。在施用浓度相同的外源硒时,其硒积累效果呈现为:亚硒酸钠>纳米硒>硒酸钠。同时,喷施外源硒不会引起果实表型的变化,不影响其感观并能显著提高了番茄果实中的可溶性蛋白含量与GPX酶活性,其中,喷施亚硒酸钠和纳米硒能显著增加番茄果实中维生素C的含量。此外,喷施外源硒对番茄果实中可溶性糖的含量并无明显影响,但喷施纳米硒却能降低果实中的有机酸含量,进而提升了糖酸比,使果实口感更佳;喷施硒酸钠则会使番茄果实中的有机酸含量上升,相应降低糖酸比,且喷施400~600  $\mu\text{mol/L}$ 不同形态的外源硒不会对番茄果实的生长构成胁迫。本研究发现叶面喷施400~800  $\mu\text{mol/L}$ 外源硒有助于番茄果实中硒含量、可溶性蛋白和GPX活性的提升,选择适当浓度和形态的硒处理可改善番茄的品质。

**关键词:**番茄;营养品质;硒;抗氧化酶;可溶性蛋白

**中图分类号:**S641.206 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)06-0162-07

番茄(*Solanum lycopersicum*)作为全世界广为栽培的重要果菜之一,其胡萝卜素、维生素C及B族维生素的含量非常丰富。它较高的营养价值和方便易食的优点让它深受人们喜爱。番茄果实独特的风味、营养和外观品质成为人们挑选的关注点,直接影响番茄产品的商品性<sup>[1-2]</sup>。番茄的用途广泛,既可作为蔬菜,也可作为水果,既可生食也可熟食,它产生了众多衍生品,如番茄酱、番茄汁等,具有很强的经济价值<sup>[3]</sup>。目前,人们对于番茄的研究主要集中在不同栽培处理对于其营养品质的影响上,因此,如何提高番茄的营养品质成为育种工作者的重点研究方向。

硒是人类必需的微量矿质元素,它被证实有抗衰老、抗癌和保护心血管健康等作用,还能够增强人体免疫力,在生命功能中举足轻重<sup>[4]</sup>。作为与人

体息息相关的微量元素,以补充人体硒元素为目的的硒产业方兴未艾,在农业和生物医药领域被广泛开发与应用。习总书记2020年5月在十三届全国人大三次会议时强调:“要利用好富硒资源,转化为富硒产业”。富硒农产品的研究与开发在国内如火如荼开展,在我国部分富硒地区,通过利用富硒土壤或者其他生物技术手段生产出众多富硒农产品,但由于硒资源分布不均,大部分地区的土壤标准达不到富硒要求,施硒方式开始越来越受到广泛关注。植物作为人类和动物的主要硒源日益受到重视,富硒农产品开发成为研究的热点<sup>[5]</sup>。因此,提高番茄果实中的硒含量,有助于推动番茄种植业的发展,提高番茄种植业的品质和市场价值。

前人关于番茄对硒的响应已有众多研究,以亚硒酸钠和硒酸钠处理颇多,且主要集中在研究外源硒处理对于番茄的品质的影响,而对于喷施纳米硒的富硒效果和影响仍有待进一步探究<sup>[6-7]</sup>。对营养品质和生物强化效果的影响是评判果实好坏的重要标准,本研究旨在使用不同硒源(亚硒酸钠、硒酸钠和纳米硒)和不同硒源浓度(400、600、800  $\mu\text{mol/L}$ ),通过叶面喷施的方式对番茄进行外源硒处理。随后

收稿日期:2024-03-22

基金项目:湖北省乡村振兴科技支撑项目(编号:2022BBA114)。

作者简介:王 刀(2000—),女,湖南湘潭人,硕士研究生,研究方向为园艺植物遗传育种。E-mail:2986109536@qq.com。

通信作者:王启剑,博士,硕士生导师,研究方向为园艺植物遗传育种。E-mail:wqjjeans@163.com。

探究外源硒对成熟番茄果实中总硒、总黄酮、可溶性蛋白含量,以及过氧化物酶(POD)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性及营养品质(维生素C、可溶性糖、有机酸含量及糖酸比)的影响,旨在为施硒应用在富硒番茄生产中提供理论基础和新的视角。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

本试验番茄品种为千禧樱桃番茄(无限生长型),种植于湖北省荆州市荆州区长江大学西校区(30.35°N,112.15°E)蔬菜实验基地。植株生长于室温 25℃、相对湿度 65%,光—暗周期为 12 h—12 h 的蔬菜大棚。

### 1.2 试验材料

试材于 2023 年 8 月 31 日种植,将番茄种子用 50~55℃ 恒温水浸种 15~20 min,后常温放置催芽,2~3 d 种子即可发芽,待萌发育苗后种植。土壤基质与有机肥按照种植比 9:1 的比例混合均匀。种植密度均为垄距 65 cm、株距 35 cm。常规田间管理,及时整枝打杈、疏叶疏果,保证果实生长所需养分。本研究所用试剂均为分析纯,其中硒酸钠和亚硒酸钠均购自山东西亚化学股份有限公司;纳米硒来源于国家富硒农产品加工技术研发专业中心。

### 1.3 试验设计

待番茄苗生长发出叶片以后开始进行外源硒处理:将苗期 2 个月且生长一致的番茄幼苗采用随机分组方式分为 10 组,分别是(1)CK:清水;(2)400 μmol/L 亚硒酸钠;(3)600 μmol/L 亚硒酸钠;(4)800 μmol/L 亚硒酸钠;(5)400 μmol/L 硒酸钠;(6)600 μmol/L 硒酸钠;(7)800 μmol/L 硒酸钠;(8)400 μmol/L 生物纳米硒;(9)600 μmol/L 生物纳米硒;(10)800 μmol/L 生物纳米硒;将外源硒均匀喷施在番茄叶片的正反面,每株喷施 100 mL,每 7 d 处理 1 次,共处理 4 次,生物学重复 3 次。

待番茄果实进入成熟期以后,在同一天(12 月 18 日)进行采收,采摘前 20 d 停止喷施,并在采收前,使用去离子水冲洗所有处理组的番茄果实,以去除表面残留的无机硒和生物硒。采收当天将番茄果实迅速放入液氮中速冻,随后放入 -80℃ 冰箱用于生理数据的测定。部分样品使用液氮研磨成粉末状,随后在 LGJ-12A 冷冻干燥机(北京四环科技开发有限公司)中干燥 24 h,制成干样,用于后续硒含量的检测。

### 1.4 番茄果实生物量测定

生物量测定:及时采摘成熟期番茄果实,每组随机选取 15 个番茄果实测量并记录其鲜重、果实长度和果实宽度。

### 1.5 番茄果实生理指标测定

可溶性糖含量采用蒽酮比色法<sup>[8]</sup>测定;可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 方法<sup>[9]</sup>进行测定;总黄酮的提取和含量测定采用分光光度计法<sup>[10]</sup>在波长 510 nm 处测定;维生素 C 含量采用钼蓝比色法<sup>[11]</sup>测定;可滴定酸含量采用酸碱滴定法<sup>[12]</sup>测定,番茄可滴定酸取苹果酸, K 为 0.067 g/mol;糖酸比 = 可溶性糖含量/有机酸含量。

番茄果实丙二醛(MDA)含量及 POD、GPX 活性测定:取番茄果实鲜样 0.3 g,液氮下研磨为匀浆并用 5 mL 磷酸缓冲液(0.05 mol/L, pH 值为 7.4)稀释。5 980 r/min 离心力下离心 10 min,取 2 mL 上清液作粗酶提取液。过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法<sup>[9]</sup>测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[9]</sup>测定;谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定。

### 1.6 番茄果实总硒测定

总硒含量采用氢化物发生-原子荧光光谱法(HG-AFS)测定;称取 0.2 g 干燥的番茄果实粉末,添加入消解管,随后依次添加 10 mL 硝酸和 2 mL 过氧化氢并密封,于微波消解仪中梯度消解 55 min,等消解结束冷却后,继续添加 5 mL 6 mol/L HCl 并加热至溶液变为清亮无色并伴有白烟出现,随后等其冷却,加入 2.5 mL 100 g/L 铁氰化钾溶液,用反渗透(RO)技术处理后的水补足至 10 mL,待测。在氢化物发生原子荧光光谱仪(HG-AFS 8510,北京海光仪器有限公司)完成样品与标曲的测定,采用 5% 盐酸作为载流液,2% 硼氢化钾和 5 g/L 氢氧化钾混合液作为还原剂,硒灯总电流为 60 mA,负高压为 280 V,通过荧光强度得出番茄果实的总硒含量<sup>[13]</sup>。

### 1.7 数据分析

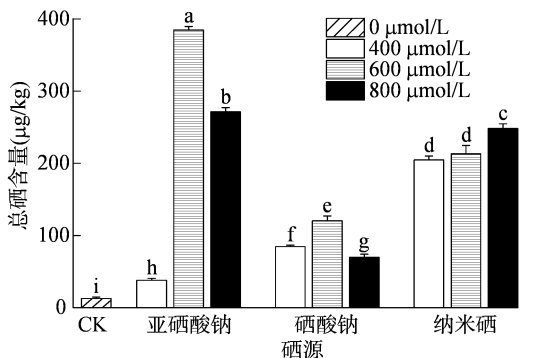
采用 Excel 2019 进行数据整理,采用 SPSS 26.0 软件对试验数据采用单因素方差分析进行差异显著性检验( $\alpha=0.05$ ),采用 Origin 2022 进行图形绘制。试验结果采用平均值±标准差表示。

## 2 结果和分析

### 2.1 外源硒施用对番茄硒含量的影响

由图 1 可知,外源硒处理能显著提高番茄果实

中总硒含量( $P < 0.05$ ),并随着施硒浓度的提高其硒含量呈现一定的增长趋势,且在喷施亚硒酸钠 600  $\mu\text{mol/L}$  时达到最高值为 384.72  $\mu\text{g/kg}$ 。与对照组相比,硒酸钠处理组番茄果实总硒含量分别提高 5.72 倍、8.55 倍、4.55 倍,亚硒酸钠处理组番茄果实总硒含量分别提高 2.01 倍、29.53 倍和 20.53 倍,纳米硒处理组分别提高 15.24 倍、15.92 倍和 18.69 倍。在 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度下,亚硒酸钠和硒酸钠处理组呈现先升后降趋势,在 600  $\mu\text{mol/L}$  浓度达到最高;纳米硒组呈现上升趋势。在相同处理浓度下比较不同硒形态对番茄的富硒能力,发现在低浓度(400  $\mu\text{mol/L}$ )处理中,纳米硒处理的硒富集效果最为显著,处理浓度在 600  $\mu\text{mol/L}$  以上时,硒积累效果呈现为亚硒酸钠 > 纳米硒 > 硒酸钠处理。总体而言,喷施 600  $\mu\text{mol/L}$  的亚硒酸钠对番茄果实硒含量吸收最好。



柱上不同小写字母表示不同硒源和浓度处理之间指标差异显著( $P < 0.05$ )。图 2 至图 4 同  
图1 不同硒源和浓度处理的番茄果实总硒含量

2.2 外源硒处理对番茄果实生长的影响

由表 1 可知,经过硒处理后的番茄果实与对照组相比,在果实的鲜重、长度和宽度上差异并不显著,且不同外源硒处理下及在同种处理下不同浓度之间的变化同样并不明显。具体而言,在果实鲜重上,硒处理组与对照组平均变化较小,差异不显著。同时,在果实大小上,外源硒处理组的番茄果实平均长度无显著性差异。从宽度上来观察,外源硒处理组与对照组相比差异同样不显著。总而言之,外源硒处理对总体番茄果实的表型影响差异不显著。

2.3 外源硒处理对番茄果实 MDA、POD 活性的影响

由图 2 - A 可知,通过对番茄果实 MDA 含量进行测定,发现 600  $\mu\text{mol/L}$  亚硒酸钠处理组和 400  $\mu\text{mol/L}$  硒酸钠处理组及 600  $\mu\text{mol/L}$  硒酸钠处理组的 MDA 含量相较于与 CK 有明显下降,分别降

表 1 不同硒源和浓度对番茄果实生物量的影响

| 硒源   | 浓度<br>( $\mu\text{mol/L}$ ) | 鲜重<br>(g)         | 长度<br>(mm)        | 宽度<br>(mm)        |
|------|-----------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| CK   | 0                           | 19.25 $\pm$ 3.73a | 27.12 $\pm$ 3.36a | 23.57 $\pm$ 3.05a |
| 亚硒酸钠 | 400                         | 19.23 $\pm$ 2.89a | 27.93 $\pm$ 2.56a | 23.91 $\pm$ 1.74a |
|      | 600                         | 19.48 $\pm$ 2.79a | 27.47 $\pm$ 2.74a | 23.70 $\pm$ 2.25a |
|      | 800                         | 19.09 $\pm$ 3.59a | 27.77 $\pm$ 3.06a | 23.83 $\pm$ 2.08a |
| 硒酸钠  | 400                         | 19.31 $\pm$ 2.90a | 27.22 $\pm$ 6.23a | 23.09 $\pm$ 4.37a |
|      | 600                         | 19.24 $\pm$ 2.84a | 27.70 $\pm$ 6.33a | 23.53 $\pm$ 4.85a |
|      | 800                         | 19.45 $\pm$ 2.50a | 27.23 $\pm$ 4.32a | 23.41 $\pm$ 2.52a |
| 纳米硒  | 400                         | 19.16 $\pm$ 3.05a | 27.48 $\pm$ 2.17a | 23.61 $\pm$ 2.14a |
|      | 600                         | 19.06 $\pm$ 3.08a | 27.31 $\pm$ 2.06a | 23.45 $\pm$ 1.93a |
|      | 800                         | 19.03 $\pm$ 1.77a | 27.23 $\pm$ 3.01a | 23.72 $\pm$ 4.05a |

注:不同小写字母表示不同硒源和浓度处理之间指标差异显著( $P < 0.05$ )。表 2 同。

低了 23.04%、11.96% 和 5.94%,800  $\mu\text{mol/L}$  浓度的亚硒酸钠和硒酸钠处理组及 400  $\mu\text{mol/L}$  浓度的硒酸钠处理组升高,分别升高了 27.23%、35.55% 和 32.88%。外源硒处理组相对于 CK 而言,存在显著性差异。在 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度下,亚硒酸钠和纳米硒处理组 MDA 含量呈现先降后升趋势,在 600  $\mu\text{mol/L}$  浓度时 MDA 含量减少随后上升;硒酸钠组随浓度增加呈现上升趋势。

由图 2 - B 可知,通过对番茄果实 POD 活性进行测定,施硒浓度为 600  $\mu\text{mol/L}$  时,过氧化物酶活性提高,与对照相比,硒酸钠组、亚硒酸钠组及纳米硒组分别提高了 27.34%、30.98% 及 28.96%;在硒浓度为 400  $\mu\text{mol/L}$  时,硒酸钠组和纳米硒组的过氧化物酶活性降低,亚硒酸钠组的过氧化物酶活性提高;在硒浓度为 800  $\mu\text{mol/L}$  时,纳米硒组显著提高了 60.08%;亚硒酸钠组和硒酸钠组都是呈现先增后减的趋势,在 600  $\mu\text{mol/L}$  时过氧化物酶活性达到最高,而纳米硒处理组一直是递增的趋势。其中,800  $\mu\text{mol/L}$  的纳米硒处理 POD 酶活性显著提高。

2.4 外源硒处理对番茄果实 GPX 和总黄酮的影响

由图 3 - A 可知,3 种外源硒处理均能提高 GPX 活性,随着浓度的增加,亚硒酸钠组呈先升后降的趋势,在 600  $\mu\text{mol/L}$  时最高;硒酸钠和纳米硒处理组呈现先降后升趋势,在 600  $\mu\text{mol/L}$  浓度时达到最低。其中 800  $\mu\text{mol/L}$  硒酸钠处理的番茄果实 GPX 活性显著提高,达到了 9.20 U/mg,与对照相比提高了 0.75 倍。其他硒处理组均提升了 0.15 ~ 0.57 倍,这表明喷施外源硒处理大大提升了番茄果实中 GPX 的活性,暗示硒在被吸收转化过程中 GPX 起了重要作用。

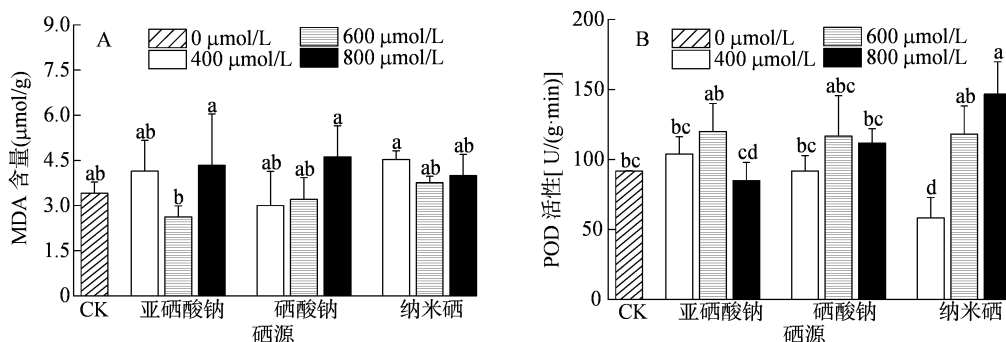


图2 不同硒源和浓度处理的番茄果实(A)MDA 含量和(B)POD 活性

由图 3 - B 可知,番茄果实中总黄酮含量,外源硒处理的番茄果实内部的总黄酮含量有所下降,表明硒的吸收可能对番茄果实中黄酮类化合物的合成产生抑制作用。与对照组相比,在施用亚硒酸钠进行处理时,随着施用浓度的递增,番茄果实内的总黄酮含量呈现出同步下降的趋势,并在达到 800 μmol/L 浓度时降至最低点。而在硒酸钠和纳

米硒处理组中,总黄酮含量都呈现出先降低后上升的趋势。硒酸钠在 400 μmol/L 浓度下导致黄酮含量达到最低值,随后在 600、800 μmol/L 处理浓度下,其含量又有所回升;而对于纳米硒处理组而言,当处理浓度为 400、600 μmol/L 时,总黄酮含量同样出现减少的现象,但在最高浓度 800 μmol/L 处理时,黄酮含量反弹回升,接近了对照组的水平。

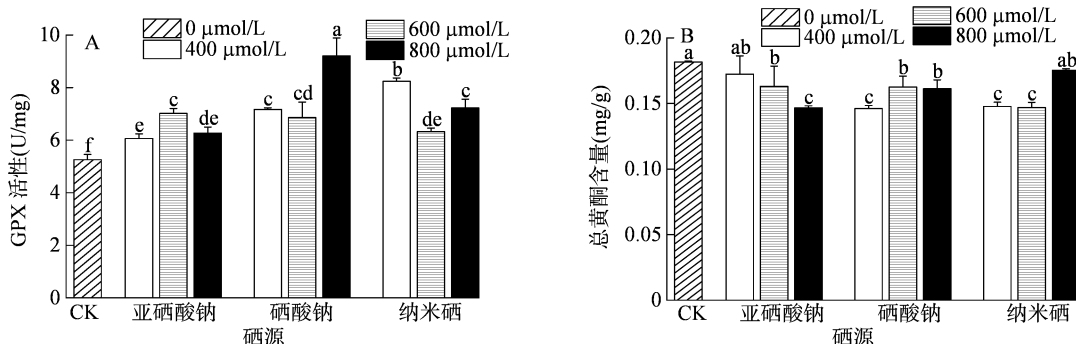


图3 不同硒源和浓度处理的番茄果实(A)GPX 活性和(B)总黄酮含量

#### 2.4 外源硒处理对番茄果实维生素 C 和可溶性蛋白的影响

由图 4 - A 可知,与对照组相比,亚硒酸钠和纳米硒处理对维生素 C 的含量有促进作用,亚硒酸钠组显著提高了 9.40%、17.53% 和 37.60%;纳米硒组显著提高了 23.50%、12.40% 和 42.73%。硒酸钠处理组差异不显著,且均稍高于对照组维生素 C 的含量,表明喷施硒酸钠对番茄维生素 C 含量的促进作用不明显。喷硒浓度为 400 ~ 800 μmol/L 时,亚硒酸钠组呈现上升趋势,纳米硒处理组呈现先降后升的趋势,在 600 μmol/L 时出现低峰随后回升。同浓度下亚硒酸钠组和纳米硒处理组显著高于硒酸钠处理组。

由图 4 - B 可知,可溶性蛋白测定,在一定的硒浓度下,3 种硒源均能显著提高番茄果实中的可溶性蛋白含量。外源硒处理组中番茄果实中可溶性

蛋白与对照组相比均显著提高,硒酸钠处理组番茄果实可溶性蛋白含量分别提高 0.67 倍、0.95 倍、0.74 倍,亚硒酸钠处理组番茄果实可溶性蛋白含量分别提高 0.23 倍、0.51 倍和 0.25 倍,纳米硒处理组分别提高 0.55 倍、0.29 倍和 0.58 倍。亚硒酸钠和硒酸钠处理组在 400 ~ 800 μmol/L 浓度时呈现先升后降的趋势,纳米硒处理组在 400 ~ 800 μmol/L 浓度时呈现先降后升的趋势,其中,600 μmol/L 硒酸钠处理可溶性蛋白含量达到最高。

#### 2.5 外源硒处理对番茄果实可溶性糖和有机酸的影响

由表 2 可知,与对照相比,硒酸钠处理组的有机酸含量随着施硒浓度的上升而增加,浓度为 600 μmol/L 和 800 μmol/L 显著提高 13.4%、13.4%;纳米硒处理组显著低于对照组,且随着施硒浓度的增加而有机酸含量下降,分别降低了 6.8%、17.9%

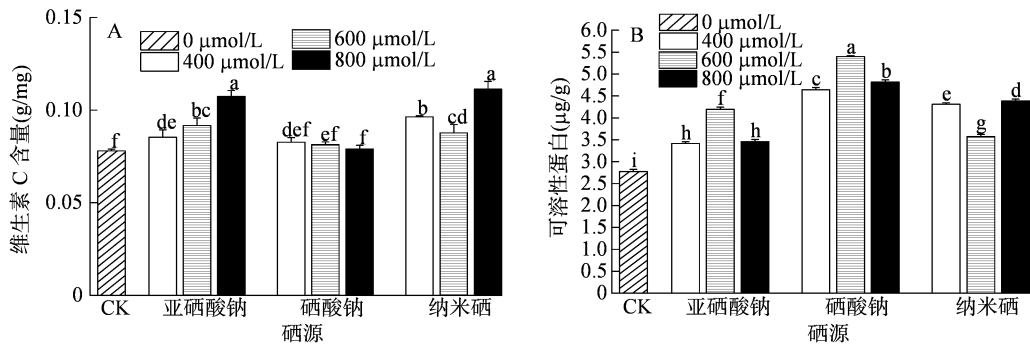


图4 不同硒源和浓度处理的番茄果实(A)维生素 C 含量和(B)可溶性蛋白含量

表 2 不同硒源和浓度对番茄果实有机酸、可溶性糖及糖酸比的影响

| 硒源   | 浓度<br>( $\mu\text{mol/L}$ ) | 总有机酸含量<br>( $\text{mg/g}$ ) | 可溶性总糖含量<br>( $\text{mg/g}$ ) | 糖酸比<br>(%)               |
|------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------------------|
| CK   | 0                           | $5.30 \pm 0.35\text{bc}$    | $19.39 \pm 0.09\text{a}$     | $3.67 \pm 0.23\text{de}$ |
| 亚硒酸钠 | 400                         | $4.66 \pm 0.37\text{de}$    | $19.39 \pm 0.56\text{a}$     | $4.19 \pm 0.40\text{bc}$ |
|      | 600                         | $5.58 \pm 0.28\text{ab}$    | $19.39 \pm 0.23\text{a}$     | $3.49 \pm 0.21\text{de}$ |
|      | 800                         | $5.24 \pm 0.24\text{bcd}$   | $19.28 \pm 0.16\text{a}$     | $3.69 \pm 0.20\text{de}$ |
| 硒酸钠  | 400                         | $5.21 \pm 0.53\text{bcd}$   | $19.13 \pm 0.40\text{a}$     | $3.69 \pm 0.32\text{de}$ |
|      | 600                         | $6.01 \pm 0.46\text{a}$     | $19.34 \pm 0.09\text{a}$     | $3.23 \pm 0.26\text{e}$  |
|      | 800                         | $6.01 \pm 0.14\text{a}$     | $19.39 \pm 0.05\text{a}$     | $3.23 \pm 0.08\text{e}$  |
| 纳米硒  | 400                         | $4.94 \pm 0.30\text{cd}$    | $19.34 \pm 0.09\text{a}$     | $3.93 \pm 0.25\text{cd}$ |
|      | 600                         | $4.35 \pm 0.19\text{ef}$    | $19.32 \pm 0.12\text{a}$     | $4.45 \pm 0.21\text{ab}$ |
|      | 800                         | $4.05 \pm 0.16\text{f}$     | $19.23 \pm 0.28\text{a}$     | $4.76 \pm 0.23\text{a}$  |

和 23.6%；硒酸钠处理对有机酸合成表现为促进作用,纳米硒处理则表现为抑制作用。亚硒酸钠处理组呈现先增后减的变化,在浓度为 600  $\mu\text{mol/L}$  时最高。

外源硒处理番茄对可溶性糖的含量无影响。与对照组相比,喷施 400、600、800  $\mu\text{mol/L}$  的硒酸钠、亚硒酸钠和纳米硒对番茄果实中可溶性糖的含量变化无影响,均稳定在约 19.30  $\text{mg/g}$ ,说明喷施硒酸钠、亚硒酸钠和纳米硒对可溶性糖总体的含量影响不大,促进和抑制作用均不明显。

与对照组相比,纳米硒处理组的糖酸比显著提高,并随施硒浓度增加而提高;硒酸钠处理组呈现下降趋势,且无显著性差异,亚硒酸钠处理组在浓度 400  $\mu\text{mol/L}$  时糖酸比达到最高,为 4.19%,其后呈现先降后升的趋势,无显著性差异。

### 3 讨论与结论

#### 3.1 通过外源硒处理能够提高番茄果实硒含量

硒对人体的生命活动非常重要,它参与合成人体内多种含硒酶和含硒蛋白,具有多种生物功能。

人体自身并不能合成硒,植物可以吸收环境中的硒将其转化为有机态硒,通过食物链最终被人体吸收利用。在适当的浓度下,硒元素可显著提高农产品的营养品质、生物抗性和硒含量等,有研究表明,外源硒可提高稻米、葡萄和南瓜的硒含量<sup>[14-16]</sup>。前人发现,叶面喷硒可有助于番茄果实对硒的吸收转化<sup>[17]</sup>。在本研究中,硒处理组的总硒含量相较于对照组而言,硒含量浓度变化明显,差异显著,在亚硒酸钠和硒酸钠处理组中,硒浓度呈现先增后减的变化趋势,在亚硒酸钠浓度 600  $\mu\text{mol/L}$  时吸收最好,在纳米硒处理组中,硒浓度与喷施量呈正相关关系。外源硒的喷施均能提高番茄硒的含量,这与薛磊等对番茄喷施亚硒酸钠和生物硒的结果<sup>[18]</sup>一致。Pezzarossa 等在土栽番茄上的研究发现,植物对硒酸钠的吸收远大于亚硒酸钠<sup>[19]</sup>,本研究中亚硒酸钠处理番茄果实中积累的硒极显著高于硒酸钠处理与之结果相似。这是由于植物体内亚硒酸钠和硒酸钠的转化机制不同,亚硒酸钠是以亚硒酸盐的形式被吸收,这一过程与磷酸盐的转运密切相关,表现为一个活跃的生化过程,可在植物体内转化为有机硒后转运到植物的不同器官中;而硒酸钠是以无机硒酸盐的形式运输,再转化为有机态硒,其运输过程中需要能量,可能会受到呼吸抑制剂或因低温条件的影响而受到抑制,仅有一小部分会转运到植物的其他组织器官中<sup>[20]</sup>。

#### 3.2 番茄在硒环境中的适应性调节机制

GPX 作为一种含巯基的过氧化物酶,可阻断 ROS 自由基对机体的损伤,能够清除机体内的  $\text{H}_2\text{O}_2$ 、有机氢过氧化物及脂质过氧化物<sup>[21]</sup>。相关研究表明,GPX 在高等植物中是 Se 依赖性酶,硒是 GPX 活动的必需部分,植物体中硒浓度的增加会影响谷胱甘肽过氧化物酶的活性,测定 GPX 的活性可间接衡量机体硒水平<sup>[22-23]</sup>。前人研究发现,硒处理

会提高水稻中 GPX 的活性<sup>[24]</sup>,在本研究中不同外源硒处理组 GPX 活性均显著高于对照。表明在 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度处理的 3 种外源硒在转化进番茄果实以后,均提高了 GPX 活性,形成谷胱甘肽过氧化物酶分解脂质过氧化物,从而清除体内代谢所产生的自由基,达到保护细胞膜,防止细胞膜过氧化破坏的目的<sup>[22]</sup>,有效增加了番茄果实中的硒水平,起到保护番茄果实细胞膜结构和发挥功能完整的作用。

黄酮是植物与其生存环境在长期进化过程中相互作用的产物,广泛存在于自然界的某些植物和浆果中,并参与植物次生代谢过程,其含量与环境因子密切相关,当植物受到环境胁迫时,为了适应并应对这些变化,会在结构和生理代谢上做出调整,其中就包括黄酮类物质的积累<sup>[25-26]</sup>。本研究发现,喷施 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度的外源硒会抑制番茄果实中总黄酮含量,说明番茄果实对硒的吸收对番茄的次生代谢物产生有小幅度的抑制作用。田秀英等研究发现,苦荞各器官总黄酮含量受到施硒处理影响并随苦荞生长而降低<sup>[27]</sup>。在本研究中番茄果实进入成熟期以后,外源硒处理组的总黄酮含量都是围绕对照组上下小幅度变化,并表现出下降的趋势,表明叶施 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度的外源硒,对番茄果实的生长不构成胁迫作用。

POD 活性在一定程度上反映了植物对于所处生物环境的适应程度,在植物体内,POD 可以调节植物的生长发育,清除自由基增强对环境胁迫应答能力<sup>[28]</sup>。在本研究中,与对照组相比,600 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  浓度的外源硒处理组提高了番茄果实中抗氧化酶活性,400  $\mu\text{mol/L}$  浓度的亚硒酸钠和硒酸钠处理组在 POD 活性上并未表现出显著变化,而纳米硒处理组则显著降低,表明低浓度的硒处理对番茄生长具有促进作用。这结果与在藻类中的研究相似,即亚硒酸钠在 POD 酶活性上表现为高浓度降低活性、低浓度提高活性的趋势<sup>[29]</sup>。结合番茄果实中的硒含量来看,番茄果实对于硒的吸收与过氧化物酶活性的变化趋势一致,笔者推测在喷施的不同浓度外源硒转化到番茄果实的过程中,过氧化物酶开始调节番茄果实的生长,适当浓度的外源硒处理能够提升番茄果实的抗氧化酶活性,从而促进其生长发育。

### 3.3 通过外源硒处理能够影响番茄果实品质

在营养品质上来说,外源硒处理的番茄果实可

溶性蛋白含量均显著增加,可溶性蛋白是植物体内合成的重要蛋白质,它们在植物的生长和发育过程中发挥着重要的作用,番茄果实中的可溶性蛋白主要来源于果肉组织,在番茄果实中可溶性蛋白含量的高低直接影响着果实的品质和营养价值<sup>[30]</sup>。在本研究中,外源硒处理组均显著高于对照,这表明叶面喷施 400 ~ 800  $\mu\text{mol/L}$  的外源硒有助于番茄果实中可溶性蛋白含量的增加,这与孙小川等对萝卜芽苗菜施用亚硒酸钠的研究结果<sup>[31]</sup>和杨海涛的对小白菜施用亚硒酸钠的研究结果<sup>[32]</sup>相似。其中,硒酸钠组效果最好。在亚硒酸钠和硒酸钠处理组,可溶性蛋白含量随着浓度的提升而呈现先升后降的趋势,纳米硒处理组可溶性蛋白的含量随着浓度的增加而呈现先降后升的趋势,表明不同种外源硒效果不一,其中喷施 600  $\mu\text{mol/L}$  的硒酸钠可溶性蛋白含量增加最高。

维生素 C 含量经常是评判番茄的营养价值和品质的标准之一,有研究表明,番茄果实中维生素 C 含量会随着硒含量的增加而变化,与生物硒含量呈正相关关系<sup>[33]</sup>。而在本研究中硒处理果实维生素 C 含量与对照相比,亚硒酸钠和纳米硒组的维生素 C 含量显著高于对照组。硒酸钠处理组差异不显著,这可能是因为硒酸钠处理组的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,从而维生素 C 含量降低,正向作用不显著<sup>[34]</sup>。

可溶性糖是碳水化合物代谢和短暂贮藏的主要形式,是植物的光合产物,番茄是糖分含量丰富的果蔬之一<sup>[35-37]</sup>。相关研究表明,外源施用硒肥可以提高番茄果实中总可溶性糖的含量<sup>[38]</sup>,而本研究中,硒浓度 400、600、800  $\mu\text{mol/L}$  没有影响番茄果实可溶性糖含量变化,对番茄果实中可溶性糖含量没有明显改善作用。笔者推测可能是在采摘时间段内,番茄果实中的可溶性糖已经开始消耗代谢,没有得到保存,亦或是叶片光合作用产生的可溶性糖还没有及时转移到果实中。

本研究在番茄生长期,于叶片喷施 3 种外源硒(硒酸钠、亚硒酸钠和纳米硒),每种外源硒使用 3 种不同浓度(400、600、800  $\mu\text{mol/L}$ )。研究结果表明,外源硒处理可显著提高番茄果实中硒含量,对番茄果实的 GPX 活性有促进作用,同时还提高可溶性蛋白含量,进而提高番茄果实营养品质。本研究能为更好完善番茄富硒栽培技术以及丰富番茄富

硒产品的开发提供一定的理论基础。

#### 参考文献:

- [1] 马丽丽,白春美,周新原,等. 低温贮藏对高品质番茄果实采后生理的影响[J]. 北方园艺,2023(14):97-104.
- [2] 李正青,张颖,孙冰,等. 外源蔗糖对冷胁迫下番茄生长、产量、品质及抗氧化代谢的影响[J]. 北方园艺,2024(9):11-17.
- [3] 尚乐乐,宋建文,王嘉颖,等. 番茄果实品质形成及其分子机理研究进展[J]. 中国蔬菜,2019(4):21-28.
- [4] 吕燕妮. 人体必需元素——硒的生理功能及研究进展. 中国营养保健食品协会[R/OL]. (2020-04-08)[2024-05-30]. <http://www.cnha.org.cn/news/show.php?itemid=3999>.
- [5] 刘家军,王冠智,汪啸,等. 物以“硒”为贵,人倚“硒”为福[J]. 矿物岩石地球化学通报,2024,43:1-8.
- [6] 李乐,田敏娇,高艳明,等. 硒肥对基质培番茄生长和矿质元素积累的影响[J]. 浙江农业学报,2020,32(2):253-261.
- [7] 樊尧,李渭军,程楠,等. 不同外源硒对番茄的硒生物强化效果[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2024,52(3):105-112.
- [8] 张述伟,宗营杰,方春燕,等. 萘酚比色法快速测定大麦叶片中可溶性糖含量的优化[J]. 食品研究与开发,2020,41(7):196-200.
- [9] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [10] 吴强盛. 植物生理学实验指导[M]. 北京:中国农业出版社,2018.
- [11] 柳青,刘继伟,黄广学,等. 钼蓝比色法测定特菜中还原型维C含量的研究[J]. 农产品加工,2019(4):56-59.
- [12] 冯璞玉,陈思,周振江,等. 基于旋转设计的番茄果实可滴定酸含量对土壤水分的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(11):67-75,84.
- [13] 吕莉,李源,井美娇,等. 氢化物发生-原子荧光光谱法测定三种鸡蛋中硒含量的研究[J]. 光谱学与光谱分析,2019,39(2):607-611.
- [14] 闫锋,董扬,赵富阳,等. 叶面喷施外源硒对谷子产量及品质的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(23):35-40.
- [15] 张柯,吴文莹,娄玉穗,等. 外源硒肥对3个葡萄品种果实品质的影响[J]. 中国南方果树,2023,52(5):152-156.
- [16] 肖兴中,闫姐,马朝喜,等. 叶面喷施硒肥对南瓜果实硒含量、产量及营养品质的影响[J]. 中国瓜菜,2024,37(9):81-89.
- [17] 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, 2021, 10(6):1050.
- [18] 薛磊,王兴华. 不同种类和不同浓度硒源对番茄果实中硒含量的影响[J]. 农业技术与装备, 2023(12):18-20.
- [19] Pezzarossa B, Petruzzelli G, Petacco F, et al. Absorption of selenium by *Lactuca sativa* as affected by carboxymethylcellulose[J]. Chemosphere, 2007, 67(2):322-329.
- [20] 程兆东,王喜东. 硒的自然分布及植物对硒的吸收转运转化机制研究进展[J]. 江西农业, 2017, (13):71-73.
- [21] Popović A V, Đamagajevac I Š, Vuković R, et al. Biochemical and molecular responses of the ascorbate-glutathione cycle in wheat seedlings exposed to different forms of selenium[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2024, 208:108460.
- [22] 张萌,姜文婷,王雪纯,等. 日本落叶松谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)酶学特性与抗逆性研究[J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(2):78-86.
- [23] 乔新荣,张继英. 植物谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(9):7-13.
- [24] Mostofa M G, Hossain M A, Siddiqui M N, et al. Phenotypical, physiological and biochemical analyses provide insight into selenium-induced phytotoxicity in rice plants[J]. Chemosphere, 2017, 178:212-223.
- [25] 张宏涛. 肋果沙棘叶片黄酮类化合物含量与环境因子关系的研究[D]. 兰州:西北师范大学, 2015, 1-9.
- [26] Yuce M, Ekinici M, Turan M, et al. Chrysin mitigates copper stress by regulating antioxidant enzymes activity, plant nutrient and phytohormones content in pepper[J]. Scientia Horticulturae, 2024, 328:112887.
- [27] 田秀英,王正银. 硒对苦荞硒、总黄酮和芦丁含量、分布与累积的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4):721-727.
- [28] 高媛,薛艳红,刘士平. 植物抗氧化动态平衡研究进展[J]. 生物资源, 2019, 41(1):14-21.
- [29] 覃宝利,王宣朋,单金峰,等. 亚硒酸钠对蛋白核小球藻生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(6):838-846.
- [30] Sivakumar R, Nandhitha G, Nithila S. Impact of drought on chlorophyll, soluble protein, abscisic acid, yield and quality characters of contrasting genotypes of tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. British Journal of Applied Science & Technology, 2017, 21(5):1-10.
- [31] 孙小川,丁竞,王纪忠,等. 外源硒对萝卜芽苗菜生长特性及营养品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(8):66-71.
- [32] 杨海涛,张婧,马红艳,等. 不同外源硒对小白菜品质及营养元素含量的影响[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(10):2199-2208.
- [33] 张一雯,迟凤琴,张久明,等. 喷施外源硒对番茄和西瓜果实硒含量及品质的影响[J]. 北方园艺, 2021(2):47-52.
- [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] 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.
- [36] 王同林,叶红霞,郑积荣,等. 番茄果实中主要风味物质研究进展[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(8):1513-1522.
- [37] 祝海燕,田素波,李春雷,等. 化肥减量配施生物有机肥对口感型番茄生长及品质的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(19):125-130.
- [38] Shiriaev A, Pezzarossa B, Rosellini I, et al. Efficacy and comparison of different strategies for selenium biofortification of tomatoes[J]. Horticulturae, 2022, 8(9):800.