

不同种类叶面肥对设施番茄 营养品质及产量的影响

高程斐¹, 肖雪梅², 高志建¹

(1. 新疆农垦科学院 新疆石河子 832000; 2. 甘肃农业大学园艺学院 兰州 730070)

摘要:为研究喷施不同叶面肥对番茄品质及产量的影响,筛选出适宜设施番茄生长的叶面肥种类,以184品种番茄为试材,选用5种不同有效成分的叶面肥,设置6个处理,以喷施清水为对照(CK),对番茄产量及不同成熟阶段的果实品质指标进行测定,分析番茄成熟过程中果实营养品质的动态变化。结果表明,在番茄成熟过程中,果实可溶性蛋白和番茄红素含量呈逐渐上升趋势;可溶性固形物和维生素C含量整体上呈先升后降的变化趋势,且在成熟期达到最大值;硝酸盐含量则呈先降后升的趋势,在转色期含量最低。与CK相比,喷施硅元素液体肥(T2)显著提高了转色期、成熟期、完熟期的番茄果实可溶性固形物、可溶性蛋白和维生素C含量;海藻精水溶肥(T4)处理的成熟期和完熟期番茄果实的番茄红素含量较CK分别显著提高了45.39%和17.53%。采用高效液相色谱共检测出12种酚酸和4种类黄酮,其中绿原酸和苯甲酸含量较高。与CK相比,硅元素液体肥可使番茄果实总酚酸含量显著提高5.89%,芦丁含量显著提高51.11%;氨基酸液体肥(T5)可显著提高番茄果实对羟基苯甲酸含量20.62%;喷施硅元素液体肥和氨基酸液体肥可使产量分别显著提高18.76%和15.33%。综上,喷施硅元素液体肥对提高番茄果实营养品质和产量的效果最显著,建议在设施番茄生产中推广应用。研究结果可为高品质设施番茄栽培提供理论指导。

关键词:设施番茄;叶面肥;营养品质;产量;动态变化

中图分类号:S641.2

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)03-149-09

Effects of different foliar fertilizers on the nutrient quality and yield of greenhouse tomato

GAO Chengfei¹, XIAO Xuemei², GAO Zhijian¹

(1. Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, Xinjiang, China; 2. College of Horticulture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To study the effects of different foliar fertilizers on the quality and yield of tomato, and to select suitable foliar fertilizers for greenhouse tomato cultivation, this study used tomato variety 184 as the test material. Five different foliar fertilizers with different active ingredients were selected, and six treatments were set up, with the application of clear water as the control (CK). The yield of tomato and the quality indicators of fruits at different maturity stages were measured, and the dynamic changes in the nutritional quality of tomato fruits during ripening were analyzed. The results showed that during tomato ripening the content of soluble protein and lycopene in fruits exhibited a gradual increasing trend. The content of soluble solids and vitamin C generally increased first and then decreased, reaching the maximum value at the mature stage. The content of nitrate first decreased and then increased, reaching the lowest value at the turning stage. Compared with CK, the application of silicon liquid fertilizer significantly increased the content of soluble solids, soluble protein and vitamin C in tomato fruits at the turning stage, mature stage and overripe stage. The content of lycopene in tomato fruits at the mature stage and overripe stage treated with seaweed extract water-soluble fertilizer was significantly increased by 45.39% and 17.53% compared with CK, respectively. A total of 12 phenolic acids and 4 flavonoids were detected by high performance liquid chromatography, among which chlorogenic acid and benzoic acid had relatively high content. Compared with CK, silicon liquid fertilizer could significantly increase the total phenolic acid content of tomato fruits by 5.89%, and the content of rutin was significantly increased by 51.11%. Amino acid water-soluble fertilizer could

收稿日期:2025-07-15;修回日期:2025-09-18

基金项目:现代丝路旱农业科技支撑项目(GSLK-2021-6);十四师现代农业技术示范与推广(NCG202313)

作者简介:高程斐,男,助理研究员,研究方向为植物生理生态与土壤健康。E-mail:2689175597@qq.com

通信作者:高志建,男,副研究员,研究方向为土壤改良与植物营养。E-mail:gaozj830@163.com

significantly increase the content of p-hydroxybenzoic acid in tomato fruits by 20.62%. The application of silicon liquid fertilizer and amino acid liquid fertilizer could significantly increase the yield by 18.76% and 15.33%, respectively. In conclusion, the application of silicon liquid fertilizer had the most significant effect on improving the nutritional quality and yield of tomato fruits, and could be promoted and applied in greenhouse tomato production. The research results can provide theoretical guidance for the cultivation of high-quality greenhouse tomato.

Key words: Greenhouse tomato; Foliar fertilizer; Nutritional quality; Yield; Dynamic change

番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)属茄科番茄属,起源于南美洲秘鲁地区,别名洋柿子、西红柿等^[1-2]。因其美味可口,富含番茄红素、维生素和胡萝卜素等多种营养物质,且具有健胃消食、降脂降压等诸多功效^[3-4],深受消费者喜爱。随着人们对果蔬更高品质的追求及具有反季节、短周期、高效益等优势^[5],设施番茄的需求量持续增加。但在设施番茄生产过程中,因农户对施肥现状认识不足,存在过量施用氮磷肥、微量元素肥缺少的问题,造成番茄生长过程中养分供应不平衡,抑制植株生长,影响果实发育,致使番茄成熟进度不一致,采后耐贮性和果实品质明显下降。研究表明,采用叶面施肥可有效促进番茄生长发育并缓解果实品质下降等问题^[6]。

叶面施肥是将多种营养元素和生长调节剂按照比例进行配制而成的液体肥料或水溶性肥料,以细雾喷洒在叶片表面,通过叶片的纤维组织直接吸收,避免了与土壤接触造成的损失^[7],提高了养分吸收利用率^[8]。叶面肥中不仅含有 N、P、K 等大量元素,还含有 Cu、Fe、Mn、Zn、Ca 等微量元素,可以针对植株在某一时期的需肥特点,喷施相应叶面肥,应对不同微肥的缺失状态^[9]。喷施硼元素能够提高功能叶片中铵态氮含量,增加叶面积和根系生物量^[10];铜基叶面肥与控释氮肥同时施用后可明显提高番茄株高和叶绿素含量,且增产 27.07%^[11];喷施硒酸钠可促进番茄植株各器官硒的积累和转运,提高地上部干质量和维生素 C 含量^[12]。喷施含钙氨基酸螯合肥可增加果实质量,使果实外观品质更好^[13]。此外,喷施叶面肥对提升番茄抗逆性也具有显著效果,喷施适量浓度的高钾肥对提高番茄叶片的保护酶活性具有明显的促进作用,可激活番茄植株在逆境条件下的防御机制^[14]。喷施腐殖酸类叶面肥能够促进植株气孔关闭,降低水分消耗,增强作物的抗旱能力^[15]。叶面肥营养全面且见效快,在提升番茄品质、提高产量等方面具有显著效果^[16]。然而,前人的相关研究多集中于单一种类或不同叶面肥施用量对番茄生长及品质的影响等方面,而关于

不同种类叶面肥对设施番茄生长发育过程中果实品质的动态变化鲜有报道。

鉴于此,笔者选取 5 种有效成分不同的叶面肥,在设施番茄果实发育期予以喷施,通过分析番茄成熟过程中果实营养品质的动态变化,研究不同叶面肥处理对设施番茄营养品质和产量的影响,以期筛选出对设施番茄栽培应用效果最佳的叶面肥种类,为建立设施番茄优质高效栽培管理体系提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2020 年 8 月至 2021 年 3 月在甘肃省兰州市榆中县李家庄日光温室中进行。试验点位于东经 103°49'15",北纬 35°34'20",平均海拔 1700 m,年平均降水量 372.1 mm,年平均蒸发量 1 343.1 mm。日光温室中白天平均地温、气温、湿度分别为 18.90 °C、23.82 °C、62.12%;夜晚平均地温、气温、湿度分别为 18.62 °C、13.91 °C、88.31%。

1.2 材料

供试作物为 184 品种番茄,来源于日本,属于无限生长类型,成熟果实为红色中型果,高球扁圆形。

供试叶面肥如表 1 所示。

1.3 方法

于 2020 年 8 月 10 日在榆中县李家庄 3 号日光温室中育苗,2020 年 9 月 21 日定植。栽培方式为槽式基质栽培,槽长 9 m、宽 0.4 m、深 0.25 m,每槽填充基质 1 m³,共 18 槽。采用随机区组试验设计,共设 6 个处理,分别为 CK(清水对照)、T1(硒元素液体肥)、T2(硅元素液体肥)、T3(鱼蛋白水溶肥)、T4(海藻精水溶肥)、T5(氨基酸液体肥),每个处理重复 3 槽,每槽栽植 38 株(19 株×2 行),行距 0.2 m,株距 0.4 m,槽距 1.0 m。在番茄第一穗坐果后开始喷施叶面肥,喷施量如表 2 所示。每隔 15 d 喷施 1 次,喷施到第 6 穗坐果打顶截止,共喷施 7 次,每次均在 10:00 之前喷施,喷施到植株叶片上有水珠自然落下为止。

表1 不同叶面肥主要成分含量

Table 1 Main component content of different foliar fertilizers

叶面肥 Foliar-fertilizer	来源 Source	主要成分含量 Main component content
硒元素液体肥 Selenium liquid fertilizer	桂林集琦生化有限公司 Guilin Jiqi Biochemical Co., Ltd.	ρ (生物活性硒) $\geq 1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Bioactive selenium content $\geq 1500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 有效活菌数 $\geq 2.0 \text{ 亿} \cdot \text{mL}^{-1}$ Effective viable number $\geq 2.0 \text{ hundred million} \cdot \text{mL}^{-1}$
硅元素液体肥 Silicon liquid fertilizer	开封汇禾生物有限公司 Kaifeng Huihe Biotechnology Co., Ltd.	ρ (有效硅) $\geq 105 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Effective silicon content $\geq 105 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ρ (纳米抗病增效剂) $\geq 60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Nano anti disease enhancer content $\geq 60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$
鱼蛋白水溶肥 Fish protein water-soluble fertilizer	温喜生物科技有限公司 Wenxi Biotechnology Co., Ltd.	w (有机质) $\geq 20\%$ Organic matter content $\geq 20\%$ $w(\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O})\geq 20\%$
海藻精水溶肥 Seaweed extract water-soluble fertilizer	中科化工产品有限公司 China Science Chemical Products Co., Ltd.	w (海藻酸) $\geq 25\%$ Alginate content $\geq 25\%$ w (有机质) $\geq 40\%$ Organic matter content $\geq 40\%$ $w(\text{K}_2\text{O})\geq 19\%$
氨基酸液体肥 Amino acid liquid fertilizer	中化作物营养有限公司 Sinochem Crop Nutrition Co., Ltd.	ρ (氨基酸) $\geq 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ Amino acid content $\geq 100 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ $\rho(\text{Mn})\geq 17 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}, \rho(\text{Cu})\geq 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$

表2 不同叶面肥施用量

Table 2 Application amount of different foliar fertilizers

处理 Treatment	叶面肥 Foliar-fertilizer	稀释倍数 Dilution ratio	每个处理施肥量 Fertilization amount of each treatment	喷施液体量 Spray liquid volume/L	总施肥量 Total fertilizer application amount
CK	清水 Purified water	0	0	10	0
T1	硒元素液体肥 Selenium liquid fertilizer	500	20 mL	10	140 mL
T2	硅元素液体肥 Silicon liquid fertilizer	500	20 mL	10	140 mL
T3	鱼蛋白水溶肥 Fish protein water-soluble fertilizer	400	25 g	10	175 g
T4	海藻精水溶肥 Seaweed extract water-soluble fertilizer	400	25 g	10	175 g
T5	氨基酸液体肥 Amino acid liquid fertilizer	500	20 mL	10	140 mL

为保证番茄生长期对 N、P、K 元素的需求,每隔 2 周随水追肥 1 次,每次追肥施入硝酸钾 1.02 kg、磷酸二氢铵 0.64 kg、尿素 0.20 kg。浇水方式为膜下滴灌。

1.4 测定项目及方法

分别于番茄的绿熟期、白熟期、转色期、成熟期、完熟期,每处理随机选取第 2 穗番茄果实 9 个,用于测定营养品质。采用手持式折光仪(ATAGO CO, LTD, Japan)测定可溶性固形物含量;参照王学奎^[7]的方法,测定硝酸盐含量(水杨酸法)、维生素 C 含量(2,6-二氯酚法)、可溶性蛋白含量(考马斯亮蓝比色法)。参考柳帆红^[8]的方法,使用高效液相色谱

仪(Alliance Waters e2695, USA)安装 C18 的色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm , Waters Symmetry)测定番茄果实中的酚酸和类黄酮含量。使用高效液相色谱仪(ACQUITY Arc Waters, USA)安装 C18 的色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm , Waters Symmetry)测定番茄果实的番茄红素含量。

在番茄成熟期每个处理随机选取第 2 穗番茄果实 18 个,用天平称量单果质量。从第 1 穗番茄果实成熟采收开始,每次采收分别记录每槽番茄果实的采收数量和质量,直到所有的番茄采收结束,根据每槽番茄的总产量计算不同叶面肥处理的番茄产量。

1.5 数据处理

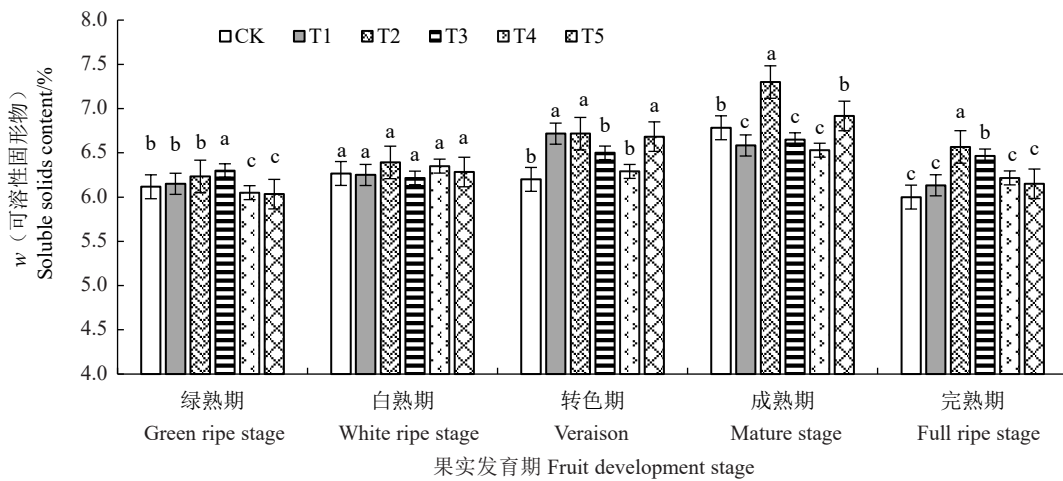
采用 Microsoft Excel 2010 软件分析数据,采用 Origin 8.5 作图;利用 SPSS 20.0 软件 Duncan 新复极差法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 叶面肥对番茄果实可溶性固形物含量的影响

如图 1 所示,在番茄绿熟期至完熟期,果实可溶性固形物含量呈先增后减的变化趋势。在成熟期,除 T1 处理外,其他处理的可溶性固形物含量均达到最高,在完熟期时略有下降。在绿熟期时,T3

处理的可溶性固形物含量(w,后同)最高,为 6.30%,与 CK 相比显著提高 0.18 百分点。在白熟期,各处理之间无显著差异。在转色期,CK 的可溶性固形物含量最低,为 6.20%,T2 和 T1 处理的可溶性固形物含量最高,较 CK 均显著提高了 0.52 百分点。在成熟期,T2 处理的可溶性固形物含量最高,显著高于其他处理,较 CK 显著提高了 0.52 百分点。在完熟期时,各处理的果实可溶性固形物含量表现为 T2>T3>T4 >T5>T1>CK,其中 T2 和 T3 处理与 CK 相比差异显著。以上数据表明,喷施叶面肥可以提高番茄果实可溶性固形物含量。



注:不同小写字母表示同一时期的不同处理在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different small letters indicate significant difference among different treatments of the same stage at 0.05 level. The same below.

图 1 不同种类叶面肥对番茄果实可溶性固形物含量的影响

Fig. 1 Effects of different foliar fertilizers on soluble solids content of tomato fruit

2.2 叶面肥对番茄果实可溶性蛋白含量的影响

如图 2 所示,在番茄果实发育过程中,果实可溶性蛋白含量呈上升趋势,绿熟期果实的可溶性蛋白含量最低,在转色期明显上升,从成熟期到完熟

期可溶性蛋白含量上升较为缓慢。在不同的发育时期(白熟期除外),T2 处理的可溶性蛋白含量均高于其他处理。在绿熟期,T2 处理的可溶性蛋白含量最高,为 1.59 mg·g⁻¹,其次是 T3 处理,为 1.45 mg·g⁻¹,

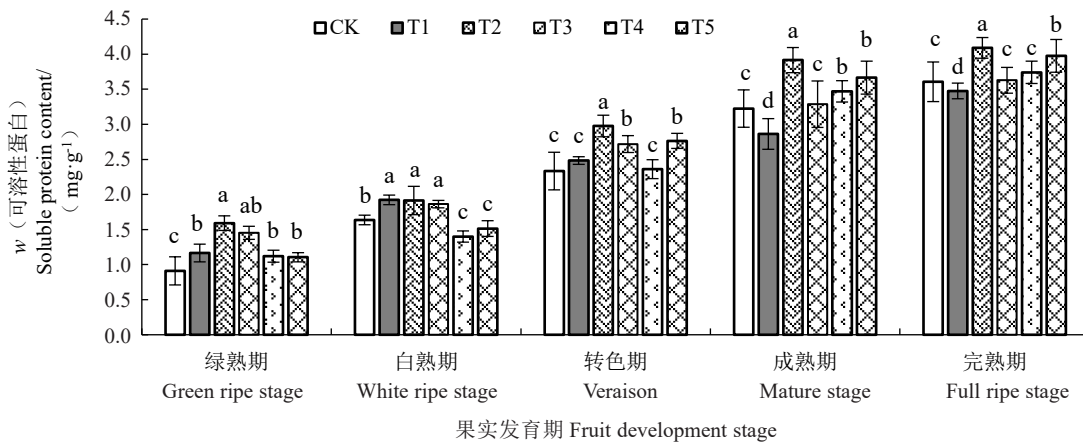


图 2 不同种类叶面肥对番茄果实可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effects of different foliar fertilizers on soluble protein content of tomato fruit

较 CK 分别显著提高 12.47%和 10.79%; T1、T4、T5 处理与 CK 相比也均有显著提升。白熟期时, T1、T2 和 T3 处理的可溶性蛋白含量较 CK 分别显著提高 17.97%、17.17%和 14.11%。在转色期, T2 处理的可溶性蛋白含量较 CK 显著提高 25.31%, T1 和 T4 处理与 CK 相比无显著差异。在成熟期, 各处理的可溶性蛋白含量表现为 T2>T5>T4>T3>CK>T1, 其中 T2 处理较 CK 显著提高了 21.43%。在完熟期, T2 处理的可溶性蛋白含量最高, 其次是 T5 处理, 二者较 CK 分别显著提高 13.30%和 10.25%。

2.3 叶面肥对番茄果实维生素 C 含量的影响

如图 3 所示, 在番茄果实发育过程中, 维生素 C

含量整体上呈先升高后降低的变化趋势, 绿熟期果实的维生素 C 含量最低, 白熟期迅速上升, 在转色期, 维生素 C 含量达到最高, 成熟期和完熟期略微下降。在绿熟期, T2 处理的维生素 C 含量最高, 为 57.60 mg·100 g⁻¹, 与 CK 相比显著提高了 12.47%, T1、T3、T4、T5 处理之间无显著差异, 但与 CK 相比均有显著提升。在白熟期, T2 和 T4 处理的果实维生素 C 含量较 CK 分别显著提高了 8.03%和 7.06%, 其余处理与 CK 相比均无显著差异。在转色期, T2 和 T1 处理的果实维生素 C 含量显著高于其他处理。在成熟期, CK 的果实维生素 C 含量最低, 为 65.53 mg·100 g⁻¹, 与喷施叶面肥的处理相比

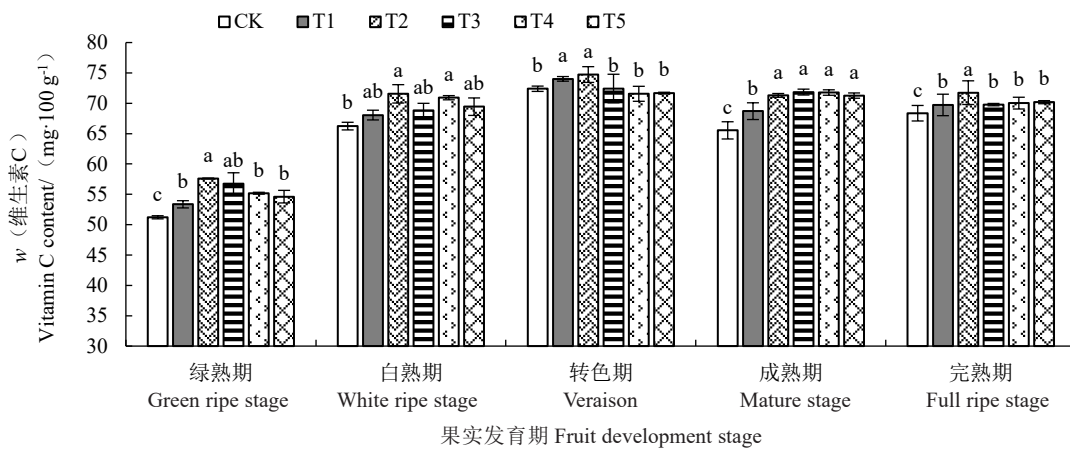


图 3 不同种类叶面肥对番茄果实维生素 C 含量的影响

Fig. 3 Effects of different foliar fertilizers on vitamin C content of tomato fruit

差异显著。在完熟期, 各处理的果实维生素 C 含量表现为 T2>T5>T4>T3>T1>CK, 其中 T2 处理最高, 显著高于其他处理, 较 CK 显著提高 4.96%。

2.4 叶面肥对番茄果实硝酸盐含量的影响

如图 4 所示, 在番茄果实发育过程中, 果实中的硝酸盐含量整体上呈先下降后上升的变化趋势,

在绿熟期硝酸盐含量最高, 到转色期迅速下降, 达到最低水平, 成熟期和完熟期的硝酸盐含量略微上升。在绿熟期, CK 和 T5 处理的番茄果实中硝酸盐含量最高, T3 处理最低, 为 0.63 mg·g⁻¹, 较 CK 显著降低 9.86%。在白熟期, 虽然 CK 的硝酸盐含量最高, 但与喷施叶面肥的各处理差异不显著。在转色

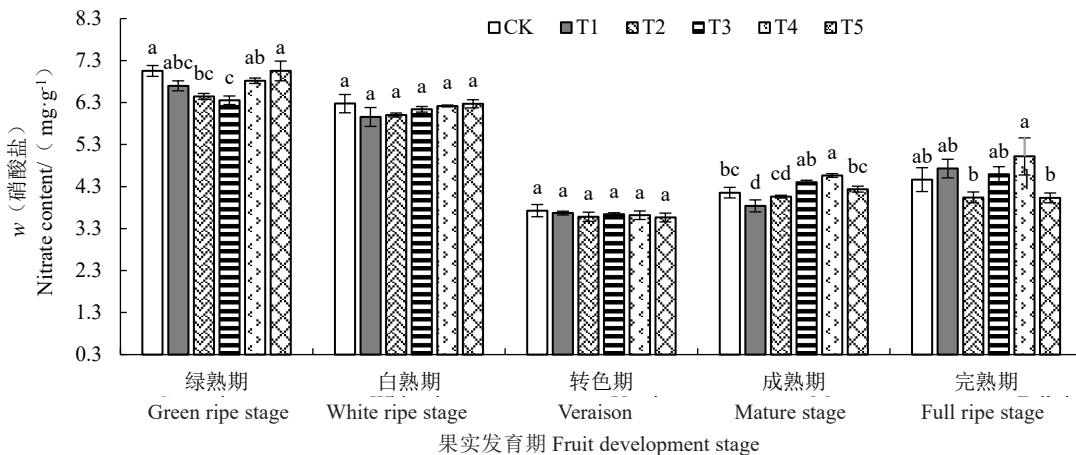


图 4 不同种类叶面肥对番茄果实硝酸盐含量的影响

Fig. 4 Effects of different foliar fertilizers on nitrate content of tomato fruit

期,各处理的硝酸盐含量无显著差异。在成熟期, T1 处理的硝酸盐含量最低,较 CK 显著降低 9.52%,其次是 T2 处理,与 CK 相比降低了 2.16%,但差异不显著。在完熟期,各处理的果实硝酸盐含量表现为 T2<T5<CK<T3<T1<T4,各处理与 CK 相比差异均不显著。

2.5 叶面肥对番茄果实番茄红素含量的影响

如图 5 所示,在番茄绿熟期至完熟期,果实的

番茄红素含量呈上升趋势,在绿熟期和白熟期较低,到转色期,番茄红素含量上升较为缓慢,到成熟期迅速上升,至完熟期番茄红素含量达到最高。在绿熟期, T2 处理的番茄红素含量最高,为 9.03 mg·kg⁻¹,较 CK 显著提高 132.73%,T1、T3、T4、T5 处理之间无显著差异,但与 CK 相比均有显著提升。在白熟期,T1、T2、T3、T5 处理的番茄红素含量与 CK 相比均有显著提升,其中 T2 处理最高。在

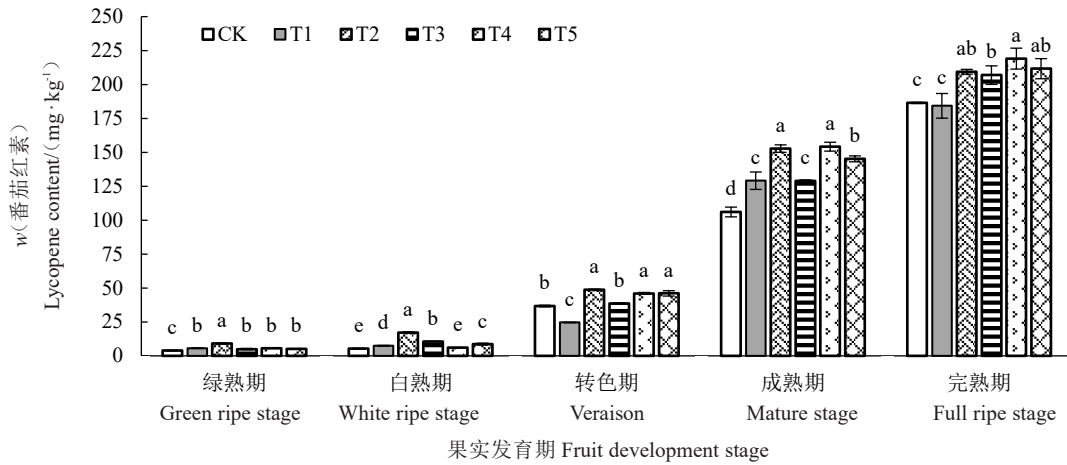


图 5 不同种类叶面肥对番茄红素含量的影响

Fig. 5 Effects of different foliar fertilizers on lycopene content of tomato fruit

转色期,T1 处理的番茄红素含量最低,为 24.61 mg·kg⁻¹, T2、T4、T5 处理之间无显著差异,但与 CK 相比有显著提高。在成熟期,T2 和 T4 处理的番茄红素含量最高,较 CK 分别显著提高 44.06%和 45.39%。在完熟期,各处理的果实番茄红素含量表现为 T4>

T5>T2>T3>CK>T1,除 T1 处理与 CK 差异不显著外,其他处理均显著高于 CK。

2.6 叶面肥对番茄果实酚酸含量的影响

由表 3 所示,成熟期番茄果实中共测出 12 种酚酸,其中含量最高的是苯甲酸,为 230.45~342.80 μg·g⁻¹,

表 3 叶面肥对番茄果实酚酸含量的影响

Table 3 Effects of leaf fertilizer on phenolic acid content in tomato fruit

(μg·g⁻¹)

处理	w(原儿茶酸)	w(对羟基苯甲酸)	w(绿原酸)	w(没食子酸)	w(4-香豆酸)	w(阿魏酸)	w(肉桂酸)	w(龙胆酸)	w(咖啡酸)	w(洋茴素)	w(苯甲酸)	w(芥子酸)	w(总酚酸)
Treatment	Protocatechuic acid content	Phydroxybenzoic acid content	Chlorogenic acid content	Gallic acid content	4-Coumaric acid content	Ferulic acid content	Cinnamic acid content	Gentianic acid content	Caffeic acid content	Cynarin content	Benzoic acid content	Erucic acid content	Total phenolic acid content
CK	14.74±0.95 a	19.16±0.62 b	303.84±8.07 a	77.95±3.11 d	13.76±0.46 c	2.80±0.42 bc	1.82±0.18 bc	14.30±0.57 a	56.95±1.72 a	9.14±0.58 b	317.19±1.76 b	11.24±0.21 d	842.88±9.06 b
T1	9.00±0.07 b	12.16±0.25 c	304.34±5.70 a	112.02±0.89 b	15.50±0.20 b	3.94±0.06 a	2.06±0.20 b	10.77±0.27 b	50.28±0.18 bc	5.72±0.11 c	342.80±1.19 a	19.54±0.30 b	888.13±6.46 a
T2	10.28±0.79 b	14.03±0.60 c	282.11±6.68 b	128.37±4.22 a	20.09±0.53 a	3.42±0.59 ab	1.48±0.18 c	12.76±0.66 ab	58.24±1.48 a	13.82±0.15 a	305.85±30.17 b	32.07±0.59 a	892.52±33.48 a
T3	7.08±0.18 c	14.38±0.92 c	210.87±5.05 d	83.46±4.35 cd	20.04±0.37 a	2.27±0.02 c	0.78±0.05 d	7.66±0.73 c	47.41±0.75 c	3.53±0.21 d	339.22±8.54 a	18.18±0.25 c	754.88±9.81 c
T4	9.89±0.51 b	6.93±0.44 d	245.73±3.77 c	103.07±4.40 b	14.28±0.08 c	2.61±0.06 bc	3.16±0.17 a	12.61±0.61 ab	51.82±0.81 b	3.58±0.08 d	341.63±6.63 a	6.16±0.27 f	808.47±12.05 b
T5	10.17±0.47 b	23.11±2.29 a	270.46±7.42 b	90.80±1.90 c	13.48±0.47 c	2.52±0.15 bc	1.74±0.04 bc	11.13±1.09 b	48.37±0.60 c	2.44±0.08 e	230.45±9.42 c	9.71±0.51 e	634.39±15.32 d

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.

占酚酸总量的 25%~38%,其次是绿原酸,为 210.87~304.34 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,占酚酸总量的 25%~33%,含量最低的是阿魏酸和肉桂酸,各占酚酸总量的 0.5%左右。原儿茶酸、对羟基苯甲酸、没食子酸、4-香豆酸、龙胆酸、咖啡酸、洋茴素、芥子酸等 8 种酸分别占总酚酸含量的 1.1%、1.7%、12.0%、2.2%、1.0%、5.5%、0.7%、1.5%。不同处理的酚酸含量存在差异,其中 T1 处理的绿原酸、阿魏酸和苯甲酸含量最高,阿魏酸、苯甲酸含量较 CK 分别显著提高 40.71%和 8.07%,绿原酸含量与 CK 相比无显著差异。T2 处理的没食子酸、4-香豆酸、咖啡酸、洋茴素、芥子酸含量最高,其中除咖啡酸外,其余 4 种酚酸含量均显著高于 CK。T4 处理的肉桂酸含量最高,T5 处理的对羟基苯甲酸含量最高,二者均显著高于 CK。

2.7 叶面肥对番茄果实黄酮类物质含量的影响

由表 4 所示,成熟期番茄果实中共检测出 4 种黄酮类成分,分别为芦丁、槲皮素、柚皮素、山柰酚。不同类黄酮组分中,芦丁和槲皮素均占总类黄酮含量的 35%以上,柚皮素含量占总类黄酮含量的 5%以上,山柰酚含量占总类黄酮含量的 10%以上。不同处理的类黄酮成分含量存在差异,其中 T4 处理的总类黄酮含量最高,为 74.97 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,其次是 T2 处理,为 74.47 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,二者较 CK 分别显著提高 14.46%和 13.69%。T2 处理的芦丁、山柰酚含量最高,分别为 34.83、8.83 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,较 CK 分别显著提高 51.11%、25.78%;T3 处理的柚皮素含量最高,为 4.99 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,与 T1、T2、T4 处理差异不显著,较 CK 显著提高 13.67%;CK 的槲皮素含量最高,为 31.04 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,与 T4 处理差异不显著,但显著高于其他处理。

表 4 叶面肥对番茄果实黄酮类物质含量的影响

Table 4 Effects of leaf fertilizer on flavonoid content in tomato fruit

($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

处理 Treatment	w(芦丁) Rutin content	w(槲皮素) Quercetin content	w(柚皮素) Naringenin content	w(山柰酚) Kaempferol content	w(总类黄酮) Total flavonoids content
CK	23.05±5.19 c	31.04±1.67 a	4.39±0.26 b	7.02±0.19 d	65.50±4.70 c
T1	31.45±3.75 b	24.80±1.50 c	4.74±0.14 a	8.12±0.16 c	69.11±4.03 b
T2	34.83±3.91 a	25.96±1.91 b	4.85±0.05 a	8.83±0.16 a	74.47±2.06 a
T3	24.62±0.30 c	28.21±0.58 b	4.99±0.10 a	8.11±0.01 c	65.93±0.79 c
T4	30.66±1.23 b	30.07±0.86 a	4.78±0.21 ab	8.46±0.05 b	74.97±2.20 a
T5	26.17±0.75 c	26.23±2.01 c	4.35±0.12 b	8.21±0.11 c	63.96±1.63 d

2.8 不同种类叶面肥对番茄产量的影响

由图 6-A 可知,各处理番茄的单果质量由大到小依次为 T2>T5>T1>T4>T3>CK,其中 T2、T5、T1 处理较 CK 分别显著提高 18.67%、14.78%、12.44%,T3、T4 处理和 CK 之间无显著差异。各处理的番茄产量表现和单果质量的趋势一致,T2 处理产量最高,较 CK 显著提高 18.76%;T5 处理较 CK 显著提高 15.33%;T1、T3、T4 处理与 CK 相比产量也有所提升,但差异不显著(图 6-B)。所有叶面肥处理的番茄坐果数均显著高于 CK,其中 T5 处理的坐果数最多,为 679 个,其次是 T2 处理,为 677 个,二者较 CK 分别显著提高 27.39%、27.01%(图 6-C)。

3 讨论与结论

可溶性固形物、可溶性蛋白、维生素 C、硝酸盐、番茄红素、酚酸和黄酮类等物质的含量是决定番茄营养价值的主要指标。依据番茄果实不同发育期营养品质指标的动态变化规律,可以为生产实践中的水肥管理和环境调控提供理论依据^[19]。本研究

发现,在番茄成熟过程中,果实可溶性蛋白和番茄红素含量呈逐渐上升趋势,硝酸盐含量呈先降后升的趋势,在转色期含量最低。可溶性固形物含量从果实绿熟期到成熟期逐渐积累,在完熟期时呈下降趋势,此变化规律与前人的研究结果一致,缘于番茄属于呼吸跃变型果实^[20]。

叶面施肥是番茄等设施作物的新型施肥方式,通过在番茄叶片上喷施叶面肥,由叶片直接吸收营养成分进入蜡质层,然后渗透进入角质层,再由亲水小孔渗透进表皮细胞,最终到达叶脉的韧皮部,进而调节番茄的新陈代谢和生长发育^[21]。研究发现,喷施叶面肥可以通过影响植株光合作用,进而改变番茄果实中可溶性固形物、可溶性蛋白和维生素 C 的积累。叶面喷施外源 Si、Zn、Fe 可显著提高番茄叶片光合色素含量和净光合速率,从而促进番茄可溶性固形物、可溶性蛋白等营养物质的积累,铁元素是叶绿素合成的必需元素,锌元素是叶绿素合成中酶的辅助因子^[22],硅元素是细胞硅化的主要因素,植物叶片细胞硅化可增强对光照的吸收能

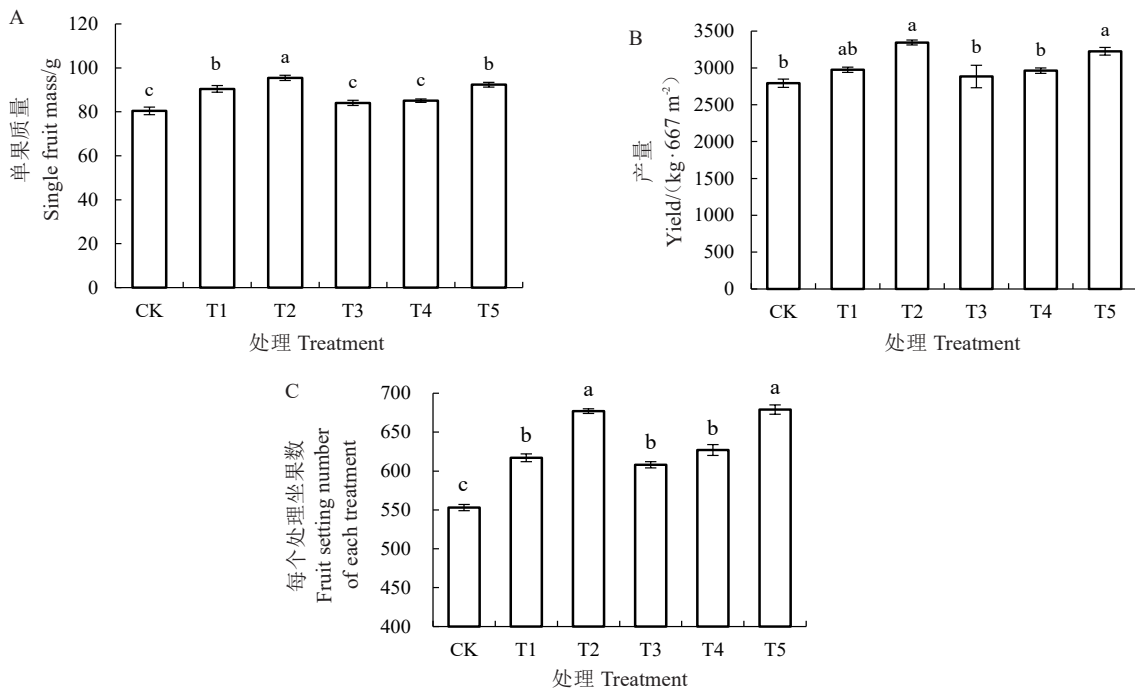


图6 不同种类叶面肥对番茄单果质量(A)、产量(B)和坐果数(C)的影响

Fig. 6 Effects of different foliar fertilizers on single fruit mass(A), yield(B) and fruit setting number(C) of tomato

力^[23],三者均与植物光合作用和物质能量间的转换有重要关系。本研究发现,喷施硅肥可显著提高番茄中可溶性固形物、可溶性蛋白和维生素C含量,且对番茄产量增加具有显著效果,与刘缓等^[24]研究发现的喷施硅肥可显著促进黄瓜中可溶性蛋白积累的结果一致。一方面可能是因为硅元素被植物叶片吸收后,使植物叶片细胞硅化^[25],对光照的吸收能力增强,提高作物净光合速率,促进作物内营养物质的积累;另一方面,硅肥被证实对许多作物的生长具有生物激活效应,能够提高如谷胱甘肽过氧化物酶等与作物产量相关的酶活性^[26],增强作物根系活力和抗逆性,从而提高作物品质和产量。研究表明,喷施绿芬威、诺翠丰等叶面肥及植物生长调节剂可使番茄果实中的番茄红素含量提高^[27],本研究发现,喷施硅肥和海藻精肥也可有效促进番茄红素的积累,可能是叶面肥中的有效成分刺激了番茄红素脱氢酶和番茄红素合成酶活性,或者是抑制了番茄红素环化酶合成,最终促进了番茄红素的积累^[28]。鱼蛋白水溶肥和氨基酸水溶肥对番茄营养品质及产量的影响也有相关报道。李云飞等^[29]通过叶面喷施高钾水溶肥和鱼蛋白有机液肥,发现番茄果实可溶性固形物含量增加;胡晨曦等^[30]研究发现,喷施氨基酸水溶肥可提高樱桃番茄产量,与本研究的

结果一致。本研究结果表明,喷施叶面肥可降低番茄果实硝酸盐含量,张明中^[31]在番茄上喷施硒肥,发现硒肥的浓度和番茄中硝酸盐含量成反比,在最适硒肥浓度下,番茄中硝酸盐含量显著下降,与本试验的研究结果基本一致。硝酸还原酶是植物体内硝态氮同化的调节和限速酶,在氮代谢过程中,植物的硝态氮同化水平受到硝酸还原酶的影响,硅和硒可以提高硝酸还原酶活性,把硝酸盐作为电子受体,通过硝酸还原酶和亚硝酸还原酶的作用,促进硝酸盐在植物体内还原,从而降低硝酸盐含量^[31]。

酚酸类物质和黄酮类物质是果实的主要次级代谢产物,苏丹等^[32]研究表明,复合型肥料有利于辣椒素与木质素、总酚、类黄酮合成途径中共同前体的生成,进而促进辣椒素及其相关次生代谢物的合成。多数酚酸衍生物源于莽草酸代谢途径^[33],本研究在番茄果实中共检测出12种酚酸类物质,发现喷施硒肥可提高绿原酸、阿魏酸和苯甲酸含量,喷施硅肥则有利于提高没食子酸、4-香豆酸、咖啡酸、洋茴素和芥子酸含量,可能是硅元素和硒元素刺激了如莽草酸脱氢酶等代谢途径中相关酶的活性,促进酶催化反应,使酚酸类物质含量增加。本研究中共检测出4种黄酮类化合物,分别是芦丁,槲皮素、柚皮素、山柰酚,这些物质通过苯丙烷代谢

途径,由苯丙氨酸经过多次酶促反应合成,因此影响这条合成通路关键酶活性和基因表达的因素可能是黄酮类物质含量变化的原因^[34]。本研究中不同类型叶面肥均检测到这4种物质,说明喷施叶面肥并不能直接改变番茄果实的黄酮类物质成分,但硅元素液体肥和海藻精水溶肥处理提升了番茄果实的芦丁、柚皮素和山柰酚含量,其中涉及具体元素的调控机制还有待进一步研究。

综上所述,5种不同有效成分的叶面肥均能不同程度地提高番茄果实的营养品质和产量,喷施硅元素液体肥对番茄果实可溶性固形物、可溶性蛋白、维生素C、总酚酸等营养物质含量提升的效果最好,同时还可显著提高单果质量和产量,并降低番茄果实完熟期的硝酸盐含量。综合来看,硅元素液体肥的效果最佳,可在设施番茄生产中推广应用。

参考文献

- [1] 田永强,高丽红.设施番茄高品质栽培理论与技术[J].中国蔬菜,2021(2):30-40.
- [2] 程远,万红建,刘超超,等.十六个樱桃番茄品种果实风味品质相关指标比较分析[J].浙江农业学报,2018,30(11):1859-1869.
- [3] ILAHY R, TLILI I, SIDDIQUI M W, et al. Inside and beyond color: Comparative overview of functional quality of tomato and watermelon fruits[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 769
- [4] 王俊文,袁鸿,张洋,等.外源5-氨基乙酰丙酸对番茄成熟过程中果实品质和矿质元素含量的影响[J].核农学报,2023,37(1):169-179.
- [5] 范拴喜,崔佳茜,李丹,等.不同改良措施对设施蔬菜土壤肥力和番茄品质的影响[J].农业工程学报,2021,37(16):58-64.
- [6] 王超,张宗翊,赵宝龙.不同叶面肥对温室番茄生长和果实品质的影响[J].中国瓜菜,2024,37(12):126-132.
- [7] 闫凤丹.增施有机肥和叶面肥对葡萄生长和果实品质的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- [8] 李小明,龙惊惊,周悦,等.叶面肥的应用及研究进展[J].安徽农业科学,2017,45(3):127-130.
- [9] 李翔,刘忠珍,魏岚,等.氨基酸微肥、钙镁肥和锌硼钼叶面肥对番石榴产量与品质的影响[J].热带农业科学,2021,41(11):7-12.
- [10] 常健玮,刘国群,刘洋,等.叶面硼肥喷施对柑橘品质及土壤细菌群落的影响[J].中国土壤与肥料,2023(8):97-103.
- [11] ZHU Q, ZHANG M, MA Q. Copper-based foliar fertilizer and controlled release urea improved soil chemical properties, plant growth and yield of tomato[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 143: 109-114.
- [12] 李乐,田敏娇,高艳明,等.硼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.
- [13] NASERI B, ABOUTALEBI A, KHADEMI R. Effects of calcium and micronutrients amino chelate on quantity and quality of Kabkab date fruit[J]. *International Journal of Farming & Allied Sciences*, 2013, 2: 1302-1306.
- [14] 王戡戡.喷施复合叶面肥对大棚番茄生长发育和品质的影响[D].长春:吉林农业大学,2019.
- [15] 刘增照,郝明德,牛育华,等.施用腐殖酸肥料对猕猴桃果实品质和产量的影响[J].西北农业学报,2019,28(2):219-224.
- [16] 梁春玲,刘永,曹逸凡,等.中微量元素与减氮配施对设施草莓产量及品质的影响[J].中国农技推广,2022,38(8):72-76.
- [17] 王学奎.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2005,186-207.
- [18] 柳帆红.番茄果实多酚类物质检测方法的优化与品质综合评价[D].兰州:甘肃农业大学,2021.
- [19] 杨心彪,李兴需,刘睿,等.鲜食番茄成熟过程中果实营养成分的动态变化[J].华中农业大学学报(自然科学版),2022,41(3):191-199.
- [20] 薛坤,陈海荣,陈火英,等.樱桃番茄成熟期品质指标动态变化的研究[J].上海农业学报,2021,37(3):52-57.
- [21] 李春霞.锰、铁和钼肥处理种子与叶面喷施对小麦生长与吸收的影响及其机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [22] 张玉静,张铨锋,栗国栋,等.铁锌硒配施对番茄生长、果实抗氧化能力和糖代谢的影响[J].中国土壤与肥料,2024(8):154-162.
- [23] 秦岭韵,翟玉莹.硅肥对干旱胁迫下曲麻菜生长及生理特性的影响[J].现代园艺,2024,47(5):62-63.
- [24] 刘缓,李建明,郑刚,等.不同浓度硅对温室水培黄瓜生长发育和营养品质的影响[J].西北农业学报,2014,23(8):117-121.
- [25] CURRIE H A, PERRY C C. Silica in plants: Biological, biochemical and chemical studies[J]. *Annals of Botany*, 2007, 100(7):1383-1389.
- [26] ARTYSZAK A. Effect of silicon fertilization on crop yield quantity and quality-A literature review in Europe[J]. *Plants*, 2018, 7(3):54.
- [27] 彭亮,孙智明,黄芝淇,等.改良型植物营养剂对番茄果实中番茄红素含量的影响[J].湖北农业科学,2018,57(9):86-87.
- [28] 陈苗.基于番茄红素合成代谢途径对番茄果实颜色变化原因的研究[D].长沙:湖南农业大学,2020.
- [29] 李云飞,王冰华,王铁臣.化肥减量配施鱼蛋白有机液肥对番茄产量和品质的影响[J].蔬菜,2024(1):35-39.
- [30] 胡晨曦,张永吉,李子恒,等.不同叶面肥喷施时期对樱桃番茄生长和产量的影响[J].长江蔬菜,2020(10):66-69.
- [31] 张明中.番茄施硼的生理和品质效应及分子调控研究[D].重庆:西南大学,2014.
- [32] 苏丹,蓬桂华,韩世玉,等.复合型肥料对辣椒素及其相关次生代谢物质积累的影响与相关分析[J].中国瓜菜,2016,29(11):19-22.
- [33] 蔡净蓉.橄榄果实发育过程中莽草酸代谢相关基因克隆与表达分析[D].福州:福建农林大学,2022.
- [34] 苏静,祝令成,刘茜,等.果实糖代谢与含量调控的研究进展[J].果树学报,2022,39(2):266-279.