

网络出版时间:2023-11-01 12:14 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.05.009
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20231031.1639.009

叶施外源钙对人参果植株生长及果实品质的影响

王健^{1,2}, 赵杏花^{1,2}, 左合君^{1,2}, 陈士超^{1,2}, 姚雨薇^{1,2}, 郭璐^{1,2}

(1 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 呼和浩特 010019;

2 荒漠生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 内蒙古 呼和浩特 010019)

【摘要】【目的】研究叶施外源钙对人参果植株生长及果实品质形成的影响, 探明人参果生长所需最佳外源钙浓度。【方法】以‘绿源 1 号’人参果为试材, 在伸蔓期、开花坐果期、第一穗果膨大期及果实成熟期分别使用 5、10、15 和 20 mmol/L 的 CaCl_2 水溶液进行叶面喷施, 并以喷施清水为对照(CK), 测定人参果植株生长指标及产量、叶片光合色素含量、果实品质指标和矿质元素含量, 研究喷施不同浓度 CaCl_2 对人参果植株生长及果实品质的影响。【结果】与 CK 相比, 在一定浓度范围(5~15 mmol/L)内随 CaCl_2 叶施浓度增加, 其对人参果株高、基径、叶厚、叶片数量的促进作用逐渐增强, 但超出适宜范围(>15 mmol/L)后, CaCl_2 对植株生长的促进作用减弱。叶施 15 mmol/L CaCl_2 对人参果果实的增产效应最显著, 单果质量、单株果数、单株产量较 CK 分别增加 23.02%, 157.14% 和 235.26%。人参果叶片光合色素含量随着 CaCl_2 施用浓度的增加而逐步提高, 在 20 mmol/L 时光合色素提升效果最佳。在 15 mmol/L CaCl_2 处理下, 果肉厚度(2.17 cm)和果实硬度(3.80 kg/cm²)达到最佳, 果实贮藏性能得到有效改善, 且此浓度下果实品质显著提升, 可溶性糖、Vc、可溶性蛋白和可溶性固形物含量较 CK 分别增加 22.96%, 24.64%, 38.71% 和 86.28%; 可滴定酸、脂肪含量随 CaCl_2 施用浓度的增加而降低, 在 20 mmol/L 时降幅最大。果实中硒、钙、钠、镁含量随 CaCl_2 施用浓度的增加均相应提升, 但当浓度超过 15 mmol/L 时促进作用减弱。【结论】合理施用 CaCl_2 对人参果植株生长及果实发育有积极作用, 可以提高叶片光合色素含量、促进植株生长、提高产量, 且果实硬度增加使其贮藏性能得到有效提升, 果实品质及矿质元素含量均有改善。综合考虑各方面因素, 生产中喷施 15 mmol/L CaCl_2 对人参果的生长发育最为有利。

【关键词】 人参果; 外源钙; 叶面施肥; 植株生长发育; 光合色素; 果实品质

【中图分类号】 S668.906.2

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)05-0093-09

Effect of spraying exogenous calcium on growth and fruit quality of *Solanum muricatum*

WANG Jian^{1,2}, ZHAO Xinghua^{1,2}, ZUO Hejun^{1,2}, CHEN Shichao^{1,2},
YAO Yuwei^{1,2}, GUO Lu^{1,2}

(1 College of Desertification Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China; 2 Key Laboratory of Desert Ecosystem Conservation and Restoration, State Forestry and Grassland Administration of China, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China)

Abstract:【Objective】This study investigated the effects of foliar application of exogenous calcium on growth of *Solanum muricatum* plants and fruit quality formation to obtain the optimal concentration of exogenous calcium for *S. muricatum*.【Method】*S. muricatum* variety ‘Green Source No. 1’ was selected for

【收稿日期】 2023-03-17

【基金项目】 内蒙古自治区科技重大专项(2019ZD007)

【作者简介】 王健(1998—), 男, 内蒙古乌兰察布人, 在读硕士, 主要从事干旱区植物资源利用与荒漠化防治研究。

E-mail: WangJ1998188@126.com

【通信作者】 左合君(1971—), 男, 甘肃渭源人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事水土保持与荒漠化防治、沙区植物保护与利用研究。E-mail: zuohj@126.com

foliar spray application of CaCl_2 aqueous solutions at concentrations of 5, 10, 15 and 20 mmol/L during the vine extension, flowering and fruit setting, first fruit expansion and fruit ripening stages, respectively. The clear water spraying treatment was used as the control (CK). The growth index and yield of *S. muricatum* plants, leaf photosynthetic pigment content, fruit quality index and mineral element contents were determined to study the effects of CaCl_2 at different concentrations. 【Result】 Compared with CK, the promotion effects of CaCl_2 on plant height, stem diameter, leaf thickness and leaf number of *S. muricatum* gradually increased with the increase of CaCl_2 concentration in the range of 5–15 mmol/L, while the effects were weakened beyond the appropriate range (>15 mmol/L). Compared to CK, foliar application of 15 mmol/L CaCl_2 had the most significant yield increasing effect on *S. muricatum*, with 23.02%, 157.14% and 235.26% increases in fruit quality, number of fruits per plant and yield per plant, respectively. The photosynthetic pigment content of *S. muricatum* leaves gradually increased with the increase of CaCl_2 concentration, with the largest enhancement at 20 mmol/L. At the concentration of 15 mmol/L, flesh thickness (2.17 cm) and fruit hardness (3.80 kg/cm²) reached the best, and fruit storage performance and fruit quality were effectively improved. The contents of soluble sugar, Vc, soluble protein and soluble solids were increased by 22.96%, 24.64%, 38.71% and 86.28%, respectively. The contents of titratable acid and fat decreased with the increase of CaCl_2 concentration, with the greatest decrease at 20 mmol/L. The contents of selenium, calcium, sodium and magnesium in fruits increased with the increase of CaCl_2 concentration, but the promotion effect was weakened when the concentration exceeded 15 mmol/L. 【Conclusion】 Proper application of CaCl_2 had positive effects on growth and fruit development of *S. muricatum* by increasing photosynthetic pigment content of leaves, plant growth and yield. The increase of fruit firmness also effectively improved the storage performance, and fruit quality and mineral element contents were improved. Considering all factors, 15 mmol/L CaCl_2 was the most beneficial to growth and development of *S. muricatum*.

Key words: *Solanum muricatum*; exogenous calcium; foliage dressing; plant growth and development; photosynthetic pigment; fruit quality

人参果 (*Solanum muricatum*) 是茄科 (*Solanaceae*) 茄属 (*Solanum*) 多年生草本植物^[1], 其果实富含蛋白质、氨基酸、维生素以及硒、钙、钠等微量元素^[2-4], 具有较高的营养价值。人参果喜温、好光, 易于成活, 属半耐旱植物, 耐寒性强于同科植物。因人参果适应性较广、经济价值较高, 近年来已作为特色经济作物, 在日光资源较丰富的区域及甘肃河西走廊地区的日光温室内广泛种植。内蒙古西部沙区光热资源丰富, 为优化该地区农业产业结构、提增经济效益, 改善传统农业中存在的科技推广程度低、生产经营方式粗放等现状, 课题组前期在毛乌素沙地进行了人参果的引种栽培试验, 并对植物生长状况、光合特性以及产量性状进行了研究。前期研究表明, 人参果在毛乌素沙地引种较为成功, 但由于沙区土壤肥力条件较差, 加之气候干燥、降水量少、蒸发强烈导致的水资源供求矛盾, 使得人参果在引种栽培中植株生长、果实发育变缓; 另外, 高温还会使人参果嫩叶发生不同程度灼伤, 显著降低其同化作用, 使植株抗逆性减弱, 进而影响植物器官分化和生长

发育, 最终导致植株徒长、落花落果、果实内在品质以及产量受到严重影响, 经济收益大幅降低。

钙 (Calcium) 是植株生命活动所必需的营养元素, 具有调节叶片气孔闭合及与钙调蛋白结合后调节植物体生理代谢过程的作用^[5]。目前在植物学中有关钙的研究日渐增多, 合理施用钙肥对植物抗旱^[6]、耐低温^[7]、耐盐碱^[8]、耐涝渍^[9]等抗逆境能力有一定的正向调节作用, 并且能缓解植物在非生物胁迫中受到的光合障碍^[10]。施用钙肥还可以促进植物根系生长、提升叶片光合效率、提高果实品质和产量^[11]。此外, 果实中 Ca^{2+} 及其与其他离子的平衡关系与果实硬度等品质指标密切相关, Ca^{2+} 还可以提高位于细胞壁上的过氧化物酶 (POD) 活性, 而 POD 与果实衰老紧密关联^[12], 因此叶面合理喷施钙可以保持果实硬度、抑制果实质量损失、延迟果实软化进程, 对于防止果实褐变、改善果实采后贮藏性具有积极作用^[13]。

目前, 对于 Ca^{2+} 提高植物抗逆性、调节生理代谢过程的研究已逐步深入, 但关于钙调节人参果生

长发育的研究尚少。本研究在前人研究的基础上,针对人参果在西北地区引种栽培过程中出现的问题,以‘绿源 1 号’人参果为试验材料,围绕外源 Ca^{2+} 对人参果植株生长及产量、叶片光合色素含量、果实品质及矿质元素含量等方面的影响开展研究,确定人参果最适施钙量,以期为改善沙区人参果植株生长、提升果实产量与品质提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2022 年 5—9 月在内蒙古鄂托克前旗日光温室内进行,地理位置为北纬 $37^{\circ}44' - 38^{\circ}44'$,东经 $106^{\circ}26' - 108^{\circ}32'$ 。鄂托克前旗位于毛乌素沙地中部,属典型中温带大陆性季风气候,季节变化明显,气候干燥,无霜期 183 d,年降水量 263.5 mm,年潜在蒸散量 2 100 mm。试验期温室每天平均日照时数 9.8 h,空气平均相对湿度 75%,平均温度 20.5°C ,昼夜温差 16.2°C 。土壤为风沙土,土壤体质量 1.65 g/cm^3 ,含有机质 1.72 g/kg 、全氮 0.13 g/kg 、全磷 0.58 g/kg 、全钾 9.79 g/kg 、碱解氮 21.46 mg/kg 、速效磷 3.66 mg/kg 、速效钾 28.24 mg/kg ,pH 为 8.72,田间持水量 11.6%。

1.2 试验材料

供试植物材料选用抗病虫性较强、适应性较广且抗逆性良好的人参果品种‘绿源 1 号’,选取长势一致、无病虫害的人参果组培苗,于 2022 年 5 月初移入盆中。试验栽培盆上口直径 40 cm,高 26 cm,盆土表面积 0.13 m^2 ,每盆装土 10 kg。供试外源 CaCl_2 为无水氯化钙(分析纯, CaCl_2 质量分数 $\geq 96\%$)。

1.3 试验设计

试验设 5 个处理,分别为清水对照(CK)及 5 mmol/L(T1)、10 mmol/L(T2)、15 mmol/L(T3)、20 mmol/L(T4) CaCl_2 水溶液处理,每处理做 5 次生物重复,每重复包含 2 盆,每盆栽植人参果 1 株,共 50 株。分别在人参果伸蔓期、开花坐果期、第一穗果膨大期及果实成熟期选择晴天下午喷施不同浓度 CaCl_2 水溶液或清水,喷施量以人参果植株叶面布满大小均匀的液珠但不至滴落为准,喷施时尽量将肥液喷在叶背面,以利于肥料的吸收。

1.4 指标测定及方法

1.4.1 植株生长指标 按照 Herraiz 等^[14]的标准划分人参果生长时期,分别于人参果幼苗期末、伸蔓期末、开花坐果中期、果实膨大中期、第一穗果实成

熟期,分处理测量所有供试人参果植株的高度、基径,统计叶片数量,每株选取 2 片植株中部叶片测量厚度。其中株高采用测量尺测量;基径、叶厚采用数显游标卡尺测量,精度为 0.01 mm。植株生长指标增长速率 $= (A_2 - A_1) / (T_2 - T_1)$,植株生长指标相对增长率 $= (A_2 - A_1) / A_1 \times 100\%$,其中 T_2 、 T_1 为各项生长指标 2 次测量时间, A_2 、 A_1 为 T_2 、 T_1 时所测生长指标数值。

1.4.2 果实形态与产量 于果实成熟期采收时测定单株结果数,并对各株果实逐果称取质量,各处理采收时分别计产;每个处理随机采收 10 个成熟果实,用数显游标卡尺测量果实横径、纵径和果肉厚度,测量精度为 0.01 mm。

1.4.3 叶片光合色素含量 采用二甲基亚砷(DMSO)高温提取、体积分数 80%丙酮稀释两步快速浸提法^[15]测定叶片光合色素含量。每处理选取 5 株,取样时选择人参果植株中部坐果节位完全展开的功能叶,每株取样 2 片,装入液氮罐迅速带回实验室并置于超低温冰箱,用于光合色素含量的测定,每片叶做 3 次技术重复。测定时将人参果叶片切为宽度 1 mm 的细条,取 100 mg 放入 10 mL 具塞试管中,加入 2 mL DMSO,使叶片样品浸没其中,于 65°C 避光条件下静置提取叶片样品至变白或透明,待冷却后于具塞试管中加入 8 mL 体积分数 80%丙酮,混匀后用分光光度计测定待测样品在波长 470、663 和 646 nm 处的吸光度(A_{470} 、 A_{663} 、 A_{646})。光合色素含量计算公式如下:叶绿素 a 含量 $C_a = (12.27A_{663} - 2.52A_{646}) \times 0.01 / 0.1$,叶绿素 b 含量 $C_b = (20.10A_{646} - 4.92A_{663}) \times 0.01 / 0.1$,总叶绿素含量 $C_T = C_a + C_b$,类胡萝卜素含量 $C_{x.c} = ((1\ 000A_{470} - 3.27C_a - 104C_b) / 229) \times 0.01 / 0.1$ 。

1.4.4 果实品质指标 每处理选取 5 株人参果,每株选取 2 枚大小一致、无病虫害的成熟果实,用 PE 保鲜袋装取,分别标号后液氮冷藏,用于果实品质指标鲜样测定,各项指标均做 3 次技术重复。测定时将果实去表皮后使用 GY-2 型硬度计测定果实硬度,使用手持折光仪对果实阴阳两面的果肉进行可溶性固形物含量测定,可溶性糖含量采用蒽酮比色法^[16]测定, Vc 含量采用 2,6-二氯酚滴定法^[16]测定,还原性糖含量采用 3,5-二硝基水杨酸比色法^[16]测定,可滴定酸含量采用酸碱滴定法^[16]测定,可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝染色法^[16]测定。

1.4.5 果实矿质元素含量 每处理选取 5 株人参果,每株选 1 枚大小一致、无病虫害的成熟果实,用

PE 保鲜袋装取,分别标号后液氮冷藏。果实带回实验室后用去离子水洗净,吸水纸擦干果实表面水分,将果实切成小块,于 105 ℃烘箱中杀青 30 min,然后在 80 ℃下烘干至恒质量,将烘干样品研磨后过 0.25 mm 筛,用于脂肪含量及硒、钙、钠、镁元素含量的测定,每个指标做 3 次技术重复。脂肪含量测定采用索氏提取法^[17],硒(Se)元素含量测定采用氢化物发生-原子荧光光谱法,钙(Ca)、钠(Na)、镁(Mg)元素含量测定采用原子吸收分光光度法^[18]。

1.5 数据处理

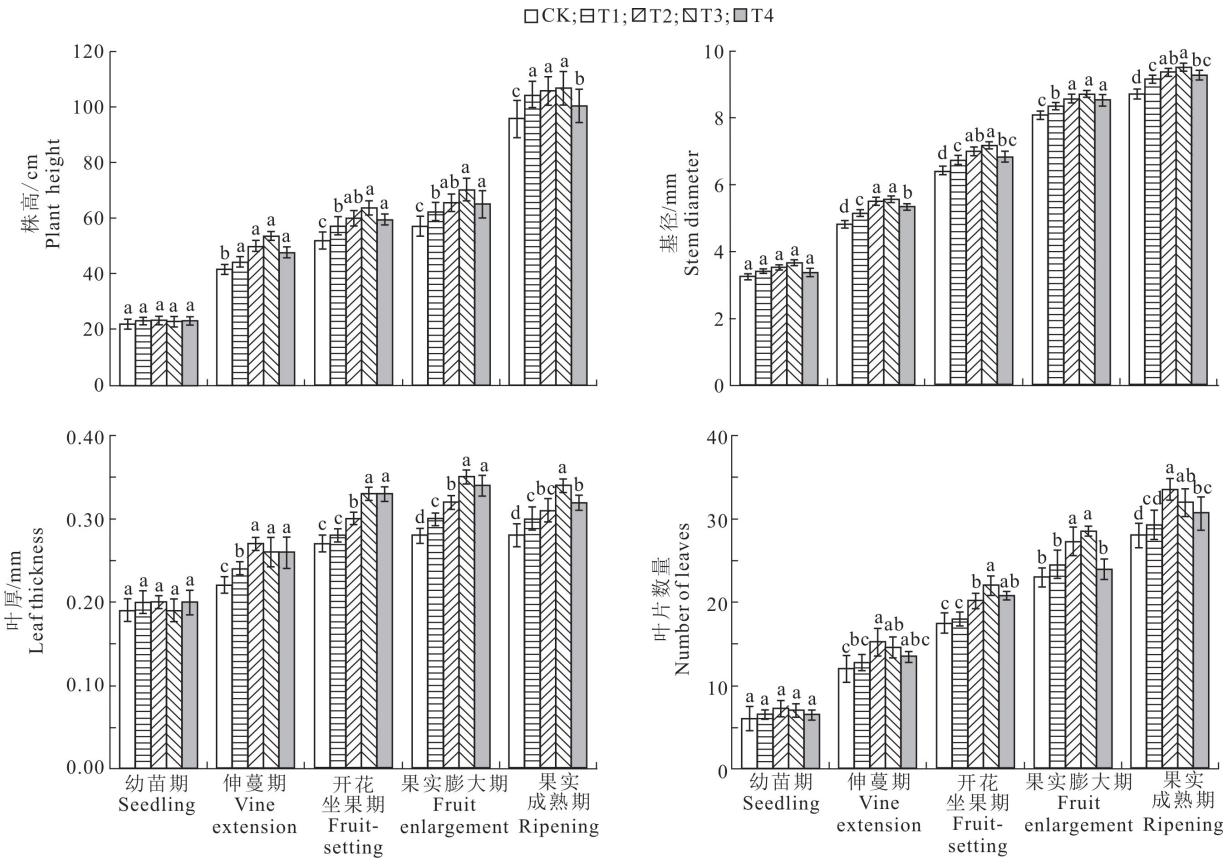
数据处理采用 Excel 2021 软件,用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA),Duncan 法进行多重比较($P<0.05$),图表制作采用

Origin 2017 软件。

2 结果与分析

2.1 叶施不同浓度 CaCl_2 对人参果植株生长的影响

人参果各生长期不同浓度 CaCl_2 处理下植株株高、基径、叶厚和叶片数量变化见图 1。由图 1 可以看出,伸蔓期及其后各 CaCl_2 处理株高均显著高于 CK,且以 T3 处理最高,并于果实成熟期达到最大株高 106.70 cm,其中在果实膨大期至成熟期株高增幅最大,增长量为 42.05 cm,增长速率为 0.70 cm/d。



图柱上标不同小写字母表示同一时期不同处理间差异达到显著水平($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences between treatments for same periods ($P<0.05$).

图 1 叶施不同浓度 CaCl_2 对人参果植株生长的影响

Fig. 1 Effect of leaf application of CaCl_2 at different concentrations on growth of *Solanum muricatum*

人参果基径的增长趋势与株高基本相同。随着叶面喷施 CaCl_2 浓度的增大,人参果基径逐渐增加。在伸蔓期及其后,不同浓度 CaCl_2 处理植株基径均显著大于 CK,其中以 T3 处理的基径增幅显著大于其他处理,于成熟期达到最大值 9.51 mm,且随着生育期的推进,各处理间的差异不断增大。人参果在伸蔓期基径增长最快,各处理基径相对增长率接

近或超过 50%;伸蔓期以后基径增长放缓,相对增长率在 30%左右;膨大期至成熟期基径增长率最低,为 10%左右。

人参果植株叶厚在前 3 个生育期显著增加,于果实膨大期基本达到稳定,后 2 个时期无显著变化。叶厚在伸蔓期增长最快,各处理相对增长率接近或超过 30%,伸蔓期以后叶厚增长放缓,膨大期至成

熟期叶厚增长率几近无变化。T3 处理叶厚于果实膨大期达到最大 0.35 mm。随着叶面喷施 CaCl₂ 浓度增大,叶厚先增加后略降,各 CaCl₂ 处理的植株叶厚最终均显著大于 CK,且 T3 处理叶厚增幅显著大于其他处理。

各 CaCl₂ 处理人参果叶片数较 CK 有不同程度增加。叶片数在伸蔓期增长最快,各处理相对增长率均接近或超过 100%,伸蔓期以后叶片数增长率放缓至 40%左右。T2 处理叶片数于果实膨大期达

到最大值 33.5 片,显著大于除 T3 处理外的其他处理。伸蔓期 T2 处理叶片数增长量最大,为 8.0 片;T3 处理叶片数平均增长速率在开花坐果期最大,为 0.5 片/d。

2.2 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果果实形态和产量的影响

各处理下人参果单株果数、单果质量、单株产量及果实横径、纵径见表 1。

表 1 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果果实形态和产量的影响

Table 1 Effect of foliar application of CaCl₂ at different concentrations on fruit morphology and yield of *Solanum muricatum*

处理 Treatment	单株果数 Fruits number per plant	单果质量/g Single fruit weight	单株产量/g Yield per plant	横径/mm Transverse diameter	纵径/mm Vertical diameter
CK	3.50±1.25 c	117.24±2.82 c	388.07±146.44 d	54.88±2.44 b	61.23±2.33 c
T1	4.75±0.96 bc	124.05±4.31 bc	593.93±119.72 c	62.56±3.02 a	68.68±1.66 b
T2	5.75±0.96 b	132.51±16.41 ab	773.12±128.73 bc	64.28±5.44 a	71.74±8.43 b
T3	9.00±0.82 a	144.23±27.63 a	1 301.06±118.03 a	67.19±8.15 a	81.38±10.18 a
T4	6.00±1.15 b	137.30±7.77 ab	826.10±158.98 b	65.95±5.19 a	71.21±3.19 b

注:同列数据后标不同小写字母表示处理间存在显著差异($P<0.05$)。下表同。
Note: Different letters indicate significant differences between treatments ($P<0.05$). The same below.

由表 1 可以看出,CK 处理单株果数最少(3.50 个),T3 处理最多(9.00 个),T3 处理下单株果数与其他处理间具有显著差异,而 T1、T2、T4 处理间单株果数无显著差异,但较 CK 显著增加(T1 除外)。单果质量在 T3 处理下最大(144.23 g),显著高于 CK 和 T1,CK 单果质量最小,为 117.24 g。T3 处理单株产量最大(1 301.06 g),且与其余处理差异显著,CK 单株产量最小(388.07 g)。果实横径和纵径均以 T3 处理最大,分别为 67.19 和 81.38 mm,各叶施 CaCl₂ 处理间果实横径和纵径(T3 除外)无

显著差异,但均显著高于 CK。

2.3 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果叶片光合色素含量的影响

由表 2 可知,随着 CaCl₂ 施用浓度的提高,人参果植株叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均逐渐增加,其中均以 CK 处理最低、T4 处理最高,施用 CaCl₂ 处理人参果光合色素含量均显著高于 CK,表明 CaCl₂ 的施用可以促进叶片光合色素的合成。

表 2 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果叶片光合色素含量的影响

Table 2 Effect of leaf application of CaCl₂ at different concentrations on photosynthetic pigment content of

<i>Solanum muricatum</i> leaves				mg/g
处理 Treatment	叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	总叶绿素 Chlorophyll (a+b)	类胡萝卜素 Carotenoid
CK	0.573±0.013 d	0.242±0.014 d	0.815±0.021 d	0.049±0.002 d
T1	0.662±0.013 c	0.320±0.012 c	0.982±0.023 c	0.062±0.003 c
T2	0.755±0.014 b	0.346±0.017 b	1.101±0.023 b	0.070±0.002 b
T3	0.772±0.017 b	0.387±0.011 a	1.159±0.023 b	0.074±0.002 b
T4	0.830±0.016 a	0.403±0.010 a	1.232±0.008 a	0.086±0.002 a

2.4 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果果实品质及矿质元素含量的影响

表 3 显示,随着 CaCl₂ 施用浓度的增加,果实硬度、果肉厚度均先升后降,果实硬度以 T3 处理最大(3.80 kg/cm²),CK 处理最小(2.66 kg/cm²),各处理间果实硬度差异显著;果肉厚度以 T3 处理最大(2.17 cm),T1 处理最小(1.58 cm),各处理间果肉厚度差异显著。随着 CaCl₂ 施用浓度的增加,人参

果果实可溶性固形物、可溶性糖、Vc、可溶性蛋白含量均先升后降,且均以 T3 处理最大,分别为 8.01%,3.91%,384.75 mg/hg 和 1.29 mg/g,CK 处理最小,分别为 4.30%,3.18%,308.70 mg/hg 和 0.93 mg/g,且各处理间差异显著。叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果果实还原性糖含量无显著影响。随着 CaCl₂ 施用浓度的增加,人参果果实可滴定酸、脂肪含量均呈减少趋势,可滴定酸含量以 CK 处理

最大(0.40%),T4 处理最小(0.25%);脂肪含量以 T1 处理最大(0.33 g/hg),T4 处理最小(0.18 g/hg);各处理间可滴定酸和脂肪含量差异显著。

随着 CaCl₂ 施用浓度的增加,人参果果实中 Se、Ca、Na 元素含量均先升后降,且各处理间差异显著,其中 Se 元素含量以 T3 处理最大(0.365

mg/kg),T1 处理最小(0.231 mg/kg);Ca 和 Na 元素含量均以 T3 处理最大,分别为 113.61 和 27.84 mg/kg,CK 处理最小,分别为 64.30 和 18.13 mg/kg。Mg 元素含量随叶施 CaCl₂ 浓度增大呈增加趋势,且各处理间差异显著,其中以 T4 处理最大(140.30 mg/kg),T1 处理最小(83.92 mg/kg)。

表 3 叶施不同浓度 CaCl₂ 对人参果果实品质及矿质元素含量的影响

Table 3 Effect of foliar application of CaCl₂ at different concentrations on fruit quality and mineral element content of *Solanum muricatum*

处理 Treatment	果实硬度/ (kg·cm ⁻²) Fruit firmness	果肉厚度/cm Flesh thickness	可溶性固形物/% Soluble solids	可溶性糖/% Soluble sugar	还原性糖/ (g·hg ⁻¹) Reducing sugar	可滴定酸/% Total acidity	Vc/(mg·hg ⁻¹)
CK	2.66±0.06 e	1.65±0.06 d	4.30±0.13 e	3.18±0.12 d	2.31±0.15 a	0.40±0.012 a	308.70±12.51 c
T1	3.24±0.11 d	1.58±0.08 d	5.21±0.18 d	3.53±0.08 b	2.37±0.11 a	0.33±0.012 b	349.25±15.33 b
T2	3.44±0.08 c	1.76±0.08 c	6.34±0.15 c	3.68±0.08 b	2.40±0.18 a	0.28±0.012 c	372.44±18.86 a
T3	3.80±0.06 a	2.17±0.08 a	8.01±0.14 a	3.91±0.14 a	2.41±0.08 a	0.28±0.012 c	384.75±20.46 a
T4	3.62±0.11 b	2.06±0.11 b	7.76±0.16 b	3.36±0.12 c	2.38±0.18 a	0.25±0.012 c	352.65±17.62 b

处理 Treatment	可溶性蛋白/ (mg·g ⁻¹) Soluble protein	脂肪/ (g·hg ⁻¹) Fat	Se/(mg·kg ⁻¹)	Ca/(mg·kg ⁻¹)	Na/(mg·kg ⁻¹)	Mg/(mg·kg ⁻¹)
CK	0.93±0.21 d	0.26±0.013 b	0.258±0.010 c	64.30±1.53 e	18.13±1.35 d	87.79±1.78 d
T1	1.05±0.14 c	0.33±0.013 a	0.231±0.005 d	66.04±1.32 d	18.60±1.52 d	83.92±1.39 e
T2	1.18±0.16 b	0.24±0.011 b	0.264±0.015 c	93.80±1.39 c	23.25±1.32 c	121.98±1.96 c
T3	1.29±0.24 a	0.21±0.015 bc	0.365±0.010 a	113.61±1.35 a	27.84±1.57 a	136.98±1.09 b
T4	1.15±0.10 b	0.18±0.012 c	0.318±0.007 b	109.55±0.98 b	26.05±0.67 b	140.30±1.50 a

3 讨 论

3.1 CaCl₂ 对人参果植株生长及产量的影响

本试验结果表明,人参果株高、基径、叶厚、叶片数量随着外源钙浓度的增加显著提升。伸蔓期内株高、基径、叶厚、叶片数量增速最快,开花坐果期、第一穗果膨大期增速放缓,在成熟期时 15 mmol/L CaCl₂ 处理与 CK 相比起到了显著提高植株生长状况的效果。此结果说明外源钙对促进人参果植株生长有一定的积极作用,但只在一定的浓度范围内才会有此效果,超出适宜浓度(>15 mmol/L)后,外源钙对植株生长的促进作用减弱。这与巩磊等^[19]对黄瓜、李贺等^[20]对大蒜施用钙肥的研究结果基本相符。此外,施用外源钙还会调控人参果植株体内部分生理代谢进程,进而影响果实横径、纵径以及产量。本试验结果表明,人参果生长期内叶面喷施外源钙可促进果实的生长发育,增产效应明显,相较于 CK,单株产量在 15 mmol/L CaCl₂ 处理下最高,增幅达到 235%;并且施用外源钙还会不同程度改善果实形态、增加果肉厚度,但对果实横径无显著影响,果实纵径及果肉厚度均在 15 mmol/L CaCl₂ 处理下达到最大,相较于 CK 增幅分别达到 32.91%和 31.52%,而随着浓度的进一步增加(>15

mmol/L),CaCl₂ 对果实生长发育的促进作用减弱。本研究结果与前人关于钙对小白菜、花生生长状况及产量有积极作用的研究结果基本相符^[21-22]。

植物的生长发育与包含光合作用、营养物质转运和酶活性等在内的多种植物生理活动有关。光合色素是植物在光合作用过程中十分重要的物质载体,光合色素含量能直接体现出光合作用的强弱以及有机物的合成情况^[23]。本试验结果表明,相较于 CK,随着 CaCl₂ 施用浓度的增加,人参果叶片叶绿素 a、叶绿素 b、总叶绿素和类胡萝卜素含量均有显著提高,最大增幅分别达到 44.85%,66.53%,51.17%和 75.51%,表明对人参果施用钙肥可以增加其在更高光照强度下的耐受性,保证叶片光合作用的顺利进行,有利于人参果的生长发育,其中 20 mmol/L CaCl₂ 处理的光合色素含量增幅最大,此结果与前人对半夏施用钙肥能使其叶片光合色素含量显著提高^[11]的结果较为一致。综合本研究中植株生长状况与叶片光合色素含量变化趋势来看,当 CaCl₂ 浓度在 5~15 mmol/L 时,外源钙对植株生长状况的促进与光合色素含量的提高现象较为一致;随着 CaCl₂ 浓度超过 15 mmol/L 后,外源钙对植株生长的促进作用减弱,但植株叶片光合色素含量仍在增加,即植株生长状况与光合色素含量变化趋势

出现不一致现象,推测其原因为人参果植株的生长和光合作用受多种生理代谢过程共同调控,而光合色素含量的变化仅为众多调控因素之一。

3.2 CaCl_2 对人参果果实品质及矿质元素含量的影响

果实品质能够通过其内在营养物质成分及含量来体现。翟江等^[24]研究发现,在黄瓜生长期施用外源钙肥可以使其果实中可溶性糖、可溶性蛋白等含量显著增加。李子双等^[25]研究发现,对辣椒施用钙肥可使其单果质量及可溶性固形物、还原性糖和可溶性蛋白含量增加。出现此结果的主要原因是施用钙肥可以使植株光合色素含量显著增加,从而促进光合产物合成,进而可以提供足够的碳水化合物来供给果实膨大和干物质积累所需,这与本试验中施用钙肥后人参果叶片中光合色素含量增加的现象相互印证。本试验结果表明,人参果生长期叶面喷施外源钙会有效改善果实品质,促进可溶性糖、Vc、可溶性蛋白、可溶性固形物含量增加,其中 15 mmol/L CaCl_2 处理提升效果最佳,相较于 CK,增长幅度分别达到 22.96%,24.64%,38.71% 和 86.28%,但高浓度 CaCl_2 会影响果实品质进一步提升;随着 CaCl_2 施用浓度的增加,可滴定酸、脂肪含量均呈减少趋势,在 20 mmol/L CaCl_2 处理下降幅最大,相较于 CK 分别减少 37.5% 和 30.77%。此结果与徐梦珠等^[26]关于 CaCl_2 对番茄品质影响等的研究报道基本一致,说明施用外源钙能在一定程度内改善果实品质。

果实果肉部分的软化与组成细胞壁的主要成分、相关酶活性的强弱紧密相关。在果实衰败过程中,由于果实缺钙,会使其细胞壁发生坍塌;此外,果实内部发生的诸如糖分转化为醌、酚类物质等生理过程,同样会使果实发生塌陷^[27]。钙在植物体内起到使植物细胞质膜结构、功能保持稳定的作用^[28],与果实贮藏性能密切相关。研究发现,果实发育期内采用适度外源钙处理后,可以通过调控果肉代谢相关酶活性来减缓原果胶和纤维素分解,从而减慢果实硬度降低速度、延缓果实衰老进程,使果实贮藏期得以延长^[29]。本研究表明,在人参果生长期施用外源钙不同程度地改善了果实硬度,15 mmol/L CaCl_2 处理下人参果硬度最高,与 CK 相比增幅达到 42.86%,有效提高了人参果的贮藏性能,该试验结果与关志华等^[12]关于适度施用 CaCl_2 可增加番茄果实硬度和耐压力的研究结果相符。

果实矿质元素含量与品质存在密切关系,能反

映植株对矿质元素的吸收状况^[30]。外源钙可调节果实中矿质元素的积累和分配,有效提高细胞膜对 K^+ 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 等离子吸收的选择性,可在一定程度上增强植物对其他矿质元素的吸收^[31]。李华东等^[32]研究表明,施用钙肥能够显著提高芒果果实中钙元素含量;巩磊等^[19]研究表明,施用钙肥能显著提高黄瓜中 Ca、Mg 和 Fe 含量。本研究结果表明,施用外源钙能有效提升人参果果实中 Se、Ca、Na、Mg 等元素含量,这与前人研究结果基本一致。Na 作为植物有益元素之一,对果实生长发育发挥着重要作用,可作为渗透调节物质调节细胞渗透压,改善原生质水合程度,提高细胞保水能力,增强植物抗旱性,促进碳水化合物的代谢与合成^[33]。Mg 是构成叶绿素的重要元素之一,能促进植物光合作用及碳水化合物的积累^[34-35]。研究表明,Mg 对提高果实中 Vc 和可溶性糖含量具有积极作用^[36],这与本试验中施用钙肥后人参果果实中 Vc、可溶性糖含量增加的现象相互印证。人参果果实中含有丰富的 Se 元素,Se 是一种对植物生长、果实发育有益的矿质元素^[37],参与植物许多重要的生理代谢过程,研究表明,硒能够促进果实糖分的累积,有效提高可溶性固形物含量,增加单果质量^[38-39],与本研究结果基本一致。

4 结 论

1)在人参果栽培中,合理施用外源钙对人参果植株株高、基径、叶厚和叶片数量等有促进作用,且增产效应明显,但超出适宜浓度(>15 mmol/L)后,高浓度外源钙对人参果植株生长的促进作用减弱;此外,随着外源钙施用浓度的增加,人参果叶片光合色素含量逐步提高,20 mmol/L CaCl_2 提高人参果叶片光合色素含量的效果最佳。

2)施用外源钙能在一定程度内改善人参果果实品质、提高贮藏性能、增加矿质元素含量。综合考虑各方面因素,在生产中喷施 15 mmol/L CaCl_2 对人参果生长发育最为有利。

[参考文献]

- [1] Martinez-Romero D. Physiological changes in pepino (*Solanum muricatum* Ait.) fruit stored at chilling and non-chilling temperatures [J]. Postharvest Biology and Technology, 2003, 30 (2): 177-186.
- [2] Kola O, Simsek M, Duran H, et al. HPLC determination of carotenoid, organic acid, and sugar content in pepino (*Solanum muricatum*) fruit during the ripening period [J]. Chemistry of

- Natural Compounds, 2015, 51(1): 132-136.
- [3] Redgwell R J, Turner N A. Pepino (*Solanum muricatum*): chemical composition of ripe fruit [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1986, 37(12): 1217-1222.
- [4] 杨世鹏, 蒋晓婷, 许盼盼, 等. 人参果营养成分、采后生理及贮藏保鲜方式研究进展 [J]. 西北农业学报, 2020, 29(10): 1447-1456.
- Yang S P, Jiang X T, Xu P P, et al. Advance of nutrient composition, postharvest physiology and storage methods of pepino (*Solanum muricatum*) [J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2020, 29(10): 1447-1456.
- [5] 张燕, 胡学伟, 江孟, 等. Ca^{2+} 对生物膜形态结构及其组分的影响 [J]. 环境工程学报, 2015, 9(4): 1547-1552.
- Zhang Y, Hu X W, Jiang M, et al. Effect of Ca^{2+} on morphological structure and component of biofilm [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(4): 1547-1552.
- [6] 刘小龙, 李霞, 钱宝云, 等. 植物体内钙信号及其在调节干旱胁迫中的作用 [J]. 西北植物学报, 2014, 34(9): 1927-1936.
- Liu X L, Li X, Qian B Y, et al. Ca^{2+} signal transduction and its regulation role under drought stress in plant [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2014, 34(9): 1927-1936.
- [7] 苗永美, 王万洋, 杨海林, 等. 外源 Ca^{2+} 、SA 和 ABA 缓解甜瓜低温胁迫伤害的生理作用 [J]. 南京农业大学学报, 2013, 36(4): 25-29.
- Miao Y M, Wang W Y, Yang H L, et al. Physiological effects of exogenous Ca^{2+} , SA and ABA in alleviating low temperature stress of melon seedlings [J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2013, 36(4): 25-29.
- [8] 周贺芳, 邹志荣, 孟长军, 等. 外源 ALA、 CaCl_2 和水杨酸对盐胁迫下甜瓜幼苗生理特性的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2007(4): 212-215.
- Zhou H F, Zou Z R, Meng C J, et al. The effect of exogenous ALA, CaCl_2 and SA on physiological characteristics of muskmelon seedling under salt stress [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2007(4): 212-215.
- [9] 欧立军, 刘周斌, 杨博智, 等. 外源 Ca^{2+} 连续喷施时间对辣椒淹水胁迫的缓解效应研究 [J]. 西北植物学报, 2016, 36(10): 2015-2021.
- Ou L J, Liu Z B, Yang B Z, et al. Alleviative effects of different spraying days of Ca^{2+} on pepper injury under waterlogging stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2016, 36(10): 2015-2021.
- [10] Fan Y, Chen J, Wang Z, et al. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: leaf structure, photosynthesis and proteomic analysis [J]. BMC Plant Biology, 2019, 19(1): 1-12.
- [11] 汪雷, 马琛, 高海立, 等. 钙对半夏生理特性及光合生理的影响 [J]. 浙江理工大学学报(自然科学版), 2018, 39(4): 461-467.
- Wang L, Ma C, Gao H L, et al. Effects of calcium on physiological characteristics and photosynthetic physiology of *Pinelia ternata* [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University (Natural Sciences), 2018, 39(4): 461-467.
- [12] 关志华, 程智慧. 外源施钙对加工番茄果实硬度及品质相关指标的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(10): 145-150.
- Guan Z H, Cheng Z H. Effects of foliage application of calcium on fruit firmness and quality related indexes in processing tomato [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2009, 37(10): 145-150.
- [13] 赵晓梅, 叶凯, 李文慧, 等. 采前喷钙对库尔勒香梨贮藏效果的影响 [J]. 新疆农业科学, 2011, 48(6): 1021-1027.
- Zhao X M, Ye K, Li W H, et al. Preliminary report of the effect of preharvest calcium spray on *Pyrus bretschneideri* Rehd (Korla fragrant pear) in storage [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2011, 48(6): 1021-1027.
- [14] Herraiz F J, Vilanova S, Plazas M, et al. Phenological growth stages of pepino (*Solanum muricatum*) according to the BBCH scale [J]. Scientia Horticulturae, 2015, 183: 1-7.
- [15] 邱念伟, 王修顺, 杨发斌, 等. 叶绿素的快速提取与精密测定 [J]. 植物学报, 2016, 51(5): 667-678.
- Qiu N W, Wang X S, Yang F B, et al. Fast extraction and precise determination of chlorophyll [J]. Chinese Bulletin of Botany, 2016, 51(5): 667-678.
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- Li H S. Experimental principles and techniques for plant physiology and biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [17] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- Gao J F. Experimental technique of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Chemistry analysis of soil [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [19] 巩磊, 夏杜菲, 王文娇, 等. 光钙耦合对黄瓜植株生长、叶片叶绿素荧光特性和果实品质的影响 [J]. 北方园艺, 2022(5): 1-7.
- Gong L, Xia D F, Wang W J, et al. Effects of combined light and Ca on growth, leaf chlorophyll fluorescence characteristics and fruit quality in cucumber plant [J]. Northern Horticulture, 2022(5): 1-7.
- [20] 李贺, 刘世琦, 刘中良, 等. 钙对大蒜生理特性及主要矿质元素吸收的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(17): 3626-3634.
- Li H, Liu S Q, Liu Z L, et al. Effects of calcium on physiological characteristics and main mineral elements absorption of garlic [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(17): 3626-3634.
- [21] 顾学花, 孙莲强, 张佳蕾, 等. 施钙对干旱胁迫下花生生理特性及产量的影响 [J]. 花生学报, 2013, 42(2): 1-8.
- Gu X H, Sun L Q, Zhang J L, et al. Effects of calcium fertilizer application on peanut physiological characteristics and yield under drought stress [J]. Journal of Peanut Science, 2013, 42

- (2):1-8.
- [22] 袁伟玲,陈磊夫,刘志雄,等. 外源钙对小白菜酶活性、钙含量及其产量和品质的影响 [J]. 中国土壤与肥料,2020(6):254-261.
- Yuan W L, Chen L F, Liu Z X, et al. Effects of exogenous CaCl_2 on the enzyme activity, leaf calcium concentrations, yield and quality of cabbage [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(6):254-261.
- [23] 王广华,李春荣,邓红章,等. 地质储存 CO_2 泄漏对黑麦草生理生化性质的影响 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(12):140-144.
- Wang G H, Li C R, Deng H Z, et al. Changes in physiological and biochemical traits in ryegrass after CO_2 stored underground leaking to the plow layer [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(12):140-144.
- [24] 翟江,张宁,李福德,等. 日光温室嫁接黄瓜硅钙优化施肥方案 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2):393-400.
- Zhai J, Zhang N, Li F D, et al. Optimization of silicon and calcium fertilization in grafted cucumber in solar-greenhouse [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(2):393-400.
- [25] 李子双,王薇,张世文,等. 氮磷与硅钙肥配施对辣椒产量和品质的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):458-466.
- Li Z S, Wang W, Zhang S W, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and silicon calcium fertilizer on yield and quality of pepper [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(2):458-466.
- [26] 徐梦珠,王芽芽,张铨锋,等. 红蓝光和外源钙对番茄果实生长及品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(3):101-110.
- Xu M Z, Wang Y Y, Zhang C F, et al. Effect of exogenous calcium on growth and fruit quality of tomato under red and blue light [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2023, 51(3):101-110.
- [27] 贾晓辉,王文辉,李世强,等. 库尔勒香梨萼端黑斑病发生的原因 [J]. 果树学报, 2010, 27(4):556-560, 665.
- Jia X H, Wang W H, Li S Q, et al. Causes of occurrence of the calyx-end black spot on 'Korla' fragrant pear [J]. Journal of Fruit Science, 2010, 27(4):556-560, 665.
- [28] Neta-Sharir I, Shoseyov O, Weiss D. Sugars enhance the expression of gibberellin-induced genes in developing petunia flowers [J]. Physiologia Plantarum, 2000, 109(2):196-202.
- [29] 裴健翔,李燕青,程存刚,等. 不同钙制剂对'寒富'苹果果实硬度及相关细胞壁代谢物质的影响 [J]. 果树学报, 2018, 35(9):1059-1066.
- Pei J X, Li Y Q, Cheng C G, et al. Effects of different calcium agents on fruit firmness and related cell wall metabolites in 'Hanfu' apple [J]. Journal of Fruit Science, 2018, 35(9):1059-1066.
- [30] 王国义. 主产区苹果园矿质营养及其与果实品质关系的研究 [D]. 北京:中国农业大学, 2014.
- Wang G Y. The status of the mineral nutrition in orchards and its relation with fruit quality in main apple production regions in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.
- [31] 介晓磊,刘世亮,李有田,等. 不同浓度钙营养液对烟草矿质营养吸收与积累的影响 [J]. 土壤通报, 2005(4):560-563.
- Jie X L, Liu S L, Li Y T, et al. Effect of Ca^{2+} concentrations on absorption and accumulation of mineral nutrients in tobacco [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005(4):560-563.
- [32] 李华东,白亭玉,郑妍,等. 叶施硝酸钙对芒果钾、钙、镁含量及品质的影响 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2016, 44(3):63-68.
- Li H D, Bai T Y, Zheng Y, et al. Effects of spraying calcium nitrate on potassium, calcium and magnesium contents and quality of mango [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed), 2016, 44(3):63-68.
- [33] Lu J, Magnani E. Seed tissue and nutrient partitioning, a case for the nucellus [J]. Plant Reproduction, 2018, 31(3):309-317.
- [34] Maathuis F J M. Physiological functions of mineral macronutrients [J]. Current Opinion in Plant Biology, 2009, 12(3):250-258.
- [35] 马存金,陈剑秋,李曰鹏,等. 水溶肥中镁不同含量对辣椒产量、品质和根系发育的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(13):179-182.
- Ma C J, Chen J Q, Li Y P, et al. Contents of magnesium in water-soluble fertilizer on yield, quality and root development of pepper [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(13):179-182.
- [36] 王磊彬,陈兴望,李天宇,等. 江苏丰县地区富士苹果果实矿质元素与品质的相关性 & 通径分析 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(7):146-151.
- Wang L B, Chen X W, Li T Y, et al. Correlation and path analysis between mineral elements and fruit quality of 'Fuji' apple in Fengxian County of Jiangsu Province [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(7):146-151.
- [37] Broadley M R, White P J, Bryson R J, et al. Biofortification of UK food crops with selenium [J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2006, 65(2):169-181.
- [38] 李俊东,李彦林,李雪芬. 富硒营养液在柑橘上的应用效果研究 [J]. 现代农业科技, 2019(3):34, 37.
- Li J D, Li Y L, Li X F. Study on application effect of selenium-enriched nutritional solution on citrus [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2019(3):34, 37.
- [39] 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 mechanisms of selenium on senescence and disease resistance of fruits and vegetables [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2016.