

硅钙肥对百香果品质及细胞壁代谢的影响

柏是林¹, 欧斯扬¹, 杨雪莲¹, 姜春芽², 陈孝玉龙³, 胡小京^{1*}

1. 贵州大学农学院, 贵州贵阳 550025; 2. 贵州大学教学实验场, 贵州贵阳 550025; 3. 贵州大学生命科学学院, 贵州贵阳 550025

摘要: 为探明适合贵州低热河谷地区栽培百香果的硅钙肥配比, 本研究以钦蜜 9 号百香果为试材, 试验设置为花前每株土施硅肥 50 g, 花后 10 d 左右喷施钙肥, 间隔 15 d 喷 1 次, 连续喷 3 次, 钙肥浓度为 500 倍、1000 倍、1500 倍, 以不施肥为对照。通过对百香果土施硅肥、花果期喷施钙肥, 探究不同中微肥及其用量对百香果品质及细胞壁代谢的影响, 并筛选最佳硅钙肥配方, 旨在为提高百香果果实品质提供一定的理论依据和实践指导。结果表明: 与对照相比, 土施硅肥 + 喷施钙肥 1000 倍配施能提高百香果的单果重、果实硬度、果实纵横径, 增加果实的可溶性固形物 (TSS) 及 Vc 含量, 减少可滴定酸 (TA) 含量; 提高可溶性糖 (SS)、可溶性蛋白质含量 (SP); 促进过氧化物酶 (POD)、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化氢酶 (CAT) 活性; 增加果皮中原果胶和纤维素含量, 使水溶性果胶 (WSP) 含量、纤维素酶 (CX)、多聚半乳糖醛酸酶 (PG) 及果胶甲酯酶 (PME) 活性下降, 且各指标与对照均存在显著差异。进而说明土施硅肥 + 喷施钙肥 1000 倍配施能显著提高百香果果实品质及果皮机械强度、韧性及稳定性, 与对照相比, 果实单果重、果实硬度、纵径、横径分别增长 11.15%、27.18%、6.23%、3.29%, TSS、Vc、SS、SP 含量分别提高 16.95%、16.12%、20.57%、24.55%, TA 含量降低 36.03%, POD、SOD、CAT 活性分别提升 13.16%、19.67%、21.65%, 果皮中原果胶和纤维素含量分别增加 19.29% 和 17.19%, WSP 含量降低 10.63%, CX、PG 及 PME 活性分别下降 8.58%、22.98%、7.52%。

关键词: 百香果; 中微量肥; 果实品质; 细胞壁代谢

中图分类号: S667.9 **文献标志码:** A

Effects of Silica-calcium Fertilizer on Quality and Cell Wall Metabolism of Passion Fruit

BAI Shilin¹, OU Siyang¹, YANG Xuelian¹, JIANG Chunya², CHEN Xiaoyulong³, HU Xiaojing^{1*}

1. College of Agriculture, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 2. Teaching Experiment Farm, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China; 3. College of Life Sciences, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China

Abstract: In order to find out the ratio of silicon and calcium fertilizer suitable for the cultivation of passion fruit in the low-heat valley area of Guizhou, this study took passion fruit Qinmi No. 9 as the test material. The experiment was conducted with 50 g of silicon fertilizer per plant before flowering, spraying calcium fertilizer about 10 days after flowering, spraying once every 15 days, spraying three times continuously, and the concentration of calcium fertilizer was 500 times, 1000 times and 1500 times. CK was used as the control group, which received no fertilizer application. The effects of different medium and micro fertilizers, as well as dosages, on the quality and related cell wall metabolism indexes of passion fruit were explored by applying silicon fertilizer to the soil and spraying calcium fertilizer during the flowering and fruiting periods. The aim was to screen for the best specialized silicon-calcium fertilizer formula. The aim is to provide a theoretical basis and practical guidance for improving the quality of passion fruit. The results showed that

收稿日期 2024-04-30; **修回日期** 2024-05-14

基金项目 贵州省科技计划项目 (黔科合支撑[2021]一般 229); 国家自然科学基金项目 (No. 32360705); 贵州省省级科技特派员创新创业服务·培训示范点建设项目 (百香果肥水一体化技术应用示范)。

作者简介 柏是林 (2003—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 园艺植物高效栽培利用。*通信作者 (Corresponding author): 胡小京 (HU Xiaojing), E-mail: gdhxjyy@163.com。

compared with the control, soil application of silicon fertilizer and spraying calcium fertilizer 1000 times combined application increased the single fruit weight, fruit hardness and fruit shape index of passion fruit. Additionally, they elevated the content of soluble solids (TSS) and vitamin C (Vc), while reducing the content of titratable acidity (TA). Furthermore, there was an increase in soluble sugar (SS) and soluble protein content (SP). Peroxidase (POD), superoxide dismutase (SOD), and catalase (CAT) activities were promoted. However, the activities of water-soluble pectin (WSP) content, cellulase (CX), polygalacturonase (PG), and pectin methylesterase (PME) decreased due to the increase in protopectin and cellulose in the peel, each index was significantly different from the control group. It shows that silicon-calcium fertilizer had the best effect on enhancing passion fruit quality and improving the mechanical strength, toughness and stability of peel. Compared to CK, the single fruit weight, fruit hardness, longitudinal diameter and transverse diameter increased by 11.15%, 27.18%, 6.23% and 3.29%, respectively. Moreover, the contents of TSS, Vc, SS and SP increased by 16.95%, 16.12%, 20.57% and 24.55%, respectively, while the content of TA decreased by 36.03%, and the activities of POD, SOD and CAT increased by 13.16%, 19.67% and 21.65%, respectively. The content of protopectin and cellulose in peel increased by 19.29% and 17.19%, respectively. Meanwhile, the content of WSP decreased by 10.63%, and the activities of CX, PG and PME decreased by 8.58%, 22.98% and 7.52%, respectively.

Keywords: passion fruit; medium and micro fertilizer; fruit quality; cell wall metabolism

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.08.011

百香果 (*Passiflora edulis* Sims) 别名西番莲, 属于西番莲科多年生草质藤本植物^[1]。其营养价值极高, 富含人体所需的十余种氨基酸、多种维生素、类胡萝卜素及矿物质元素等, 有鲜食、油用、药用等用途, 同时也是一种极具观赏价值的园艺植物^[2]。百香果生长速度较快, 成熟后果实口感极佳。百香果易成活, 持续结果期长, 经济价值高, 见效快, 可在我国适宜种植地区大力发展和推广, 应用前景十分广阔^[3]。

百香果是贵州十二大特色产业之一, 近年来在黔东南、黔西南等地发展势头十分迅猛, 对当地乡村振兴具有重要意义^[4]。钦蜜 9 号是黄金百香果的新品种, 在贵州主栽区引种时间短。该品种花期长, 果实大, 果皮呈黄色, 有淡淡的蜂蜜味, 口感优, 深受消费者喜爱。由于百香果长势可观, 当年种植当年结果, 所以对肥料的需求量大, 特别是在开花、结果、转色等生长发育关键阶段^[5]。在其生长发育中除施以大量元素外, 对中微量元素的需求不可或缺, 若缺少中微量元素便会导致百香果质量变差, 出现果皮较软, 果实易衰老、抗性差, 易染病等问题, 这些都是生产中亟待解决的问题。

前人研究表明, 中微量元素作为植物生长必需的营养元素可以平衡植物无机营养, 提高果实品质和产量, 减轻作物病虫害^[6]。硅对于植物而言是有益元素, 它参与细胞壁构成, 可以增强其稳定性及机械强度, 硅肥作为一种新型肥料, 能使植物茎秆更加健壮, 植株更结实, 促进根系生

长^[7-9]。还具有提高果皮的厚度以及硬度, 增加果实韧性, 改善植株的机械性能, 提高抗性, 增大叶面积以及干物质质量等作用, 且硅肥配施其他肥料对植物生长的调控效果更佳, 能有效提高磷、钾、钙等养分利用率^[10-11]。

钙是一种重要的矿质营养元素, 补充外源钙对植株的生长发育, 果品采后贮藏等均有积极意义, 对果实品质的形成及其保持有重要作用。叶面施钙可以有效提高果实的含钙量、硬度、可溶性固形物、可溶性总糖以及 Vc 含量等^[12]。

目前, 硅钙肥等中微量元素肥已应用于白菜 (*Brassica rapa* var. *glabra*)、黄瓜 (*Cucumis sativus*)、苹果 (*Malus pumila*) 等作物上。修文广^[13]研究发现, 合理配比的硅、钙肥与常规施肥相比, 可以促进白菜生长发育, 增加产量, 使作物营养更加均衡全面。翟江等^[14]研究表明, 硅、钙肥均可促进日光温室中黄瓜的生长发育, 提高干物质、可溶性糖、可溶性蛋白质含量以及 Vc 含量, 并且硅钙配施效果更显著, 证明了硅、钙元素之间存在交互作用。徐谦等^[15]研究指出, 施硅钙肥能增加苹果树体的硅钙含量和果皮中钙的含量, 在晚秋或早春与果树基肥混施, 可增加叶片和果皮硅钙含量, 特别是增加钙的含量, 对复壮树势, 提高树体抗病能力, 增加果实硬度均有积极意义。

当前, 在我国部分地区土壤中有效硅含量低于临界值 (100 mg/kg), 已经限制了作物产量和品质。加之, 广大果农不重视钙肥等的补充, 导

致果园土壤和树体营养不均衡,影响了果树的生长,进而使得果实品质下降。因此,开展中微肥研究对提高作物的品质具有重要作用。目前,关于百香果中微肥的相关研究鲜见报道。本研究以钦蜜9号黄金百香果为试材,通过对百香果土施硅肥、花果期喷施钙肥,探究不同中微肥及用量对百香果品质和细胞壁代谢的影响,并筛选适合的中微量肥配方,以期与实践生产中科学合理施用硅、钙肥,提高百香果果实品质提供一定的科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验区概况 试验于2022年3月在贵州省榕江县古州百香果种植基地(108°04'E, 25°26'N)进行。试验地海拔240 m,属中亚热带湿润季风气候。试验地为平地,土层较厚,土质疏松,pH为5.6~5.8,灌溉条件良好。土壤有机质含量为43.84 g/kg,速效氮、速效磷、速效钾含量分别为72.90、82.23、255 mg/kg,全氮、全磷、全钾含量分别为0.74、0.65、15.53 g/kg。以上土壤理化指标参照《土壤农化分析》的相关方法进行测定^[16]。

1.1.2 试验材料 试材为钦蜜9号黄金百香果。硅肥来源于英皇全水溶性颗粒硅肥(SiO_2 含量 $\geq 27\%$,纯硅含量 $\geq 12\%$,英国植康肥业有限公司,山西),果蔬糖醇螯合钙肥来源于美国丰利惠公司(Ca 含量 ≥ 140 g/L,美国丰利惠公司,浙江)。

1.2 方法

1.2.1 试验设置 设置5个处理, P_1 :土施硅肥; P_2 :土施硅肥+喷施钙肥(500倍); P_3 :土施硅肥+喷施钙肥(1000倍); P_4 :土施硅肥+喷施钙肥(1500倍); P_5 :喷施钙肥(1000倍,参考前期预试验)。以不施肥为对照(CK)。

每个处理20株,重复3次。采用平棚垂帘式,株行距为1.5 m $\times$ 3.0 m,处理间设间隔行。于花前土施硅肥一次,每株50 g。于花后10 d左右,开始喷施钙肥,间隔15 d喷1次,连续喷3次,喷至叶片表面湿润为止。其他进行常规施肥处理:有机肥料($\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O}\geq 10\%$,有机质 $\geq 45\%$);磷钾肥($\text{P}_2\text{O}_5\geq 18.0\%$, $\text{K}_2\text{O}\geq 1.05\%$);大量元素水溶肥($\text{N}\geq 11\%$, $\text{P}_2\text{O}_5\geq 11\%$, $\text{K}_2\text{O}\geq 35\%$, $\text{MgO}\geq 2\%$)。试验中采用肥水一体化技术。当果实开始显色时采样,每个处理随机取样,选取50个果形

均匀、着色一致、无病虫、无损伤的果实样品,分别从树冠的上中下、前后左右不同部位采集。并将果实带回实验室检测相关指标,重复3次,每个指标取其平均值进行比较分析。

1.2.2 指标测定与方法 (1)品质指标。单果重使用CP213型电子天平测定,单位为g;果实硬度使用GY-4型数显果实硬度计测定,单位为Pa;果实纵横径使用游标卡尺测量,果形指数为果实纵径与横径之比;可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量采用PAL-BX/ACID12型数显糖酸度计测定,固酸比为可溶性固形物与可滴定酸之比;维生素C(Vc)、可溶性糖(SS)、可溶性蛋白质(SP)含量分别采用2,6-二氯酚酚滴定法、蒽酮比色法、考马斯亮蓝染色法^[17]测定。

(2)细胞壁代谢指标。过氧化物酶(POD)活性:愈创木酚显色法^[17];超氧化物歧化酶(SOD)活性:氮蓝四唑(NBT)光电还原法^[17];过氧化物氢酶(CAT)活性:紫外吸收法^[17];纤维素含量:蒽酮比色法^[18];纤维素酶(CX)活性:分光光度法^[17];原果胶、水溶性果胶(WSP)含量:咔唑比色法^[18];多聚半乳糖醛酸酶(PG)、果胶甲酯酶(PME):分光光度法^[18]。

1.3 数据处理

利用SPSS 26.0统计软件进行差异显著性分析和隶属函数分析,采用Microsoft Excel软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同硅钙肥处理对百香果果实外在品质的影响

由表1可知,不同硅钙肥处理对百香果果实的单果重、硬度以及纵横径均有促进作用。 P_3 的单果重较CK显著提高11.15%,5个处理之间的果实单果重差异不显著,但均显著高于CK; P_3 处理的硬度较CK显著提高27.18%,且 P_2 、 P_4 处理的果实硬度与CK存在显著差异, P_1 、 P_5 处理和CK之间的果实硬度差异不显著; P_3 处理的纵径较CK显著提高6.23%,除 P_5 处理与CK的纵径差异不显著以外,其余4个处理与CK均有显著差异; P_3 处理的横径较CK显著提高3.29%,其余处理与CK差异不显著;各处理的果形指数均在1左右,说明果实呈圆形。综上所述, P_3 (土施硅肥+喷施钙肥1000倍)处理在促进果实生长方面效果最显著。

表 1 不同硅钙肥处理的百香果果实外在品质

Tab. 1 External quality of passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers

处理 Treatment	单果重 Weight/g	果实硬度 Firmness/Pa	纵径 Vertical diameter/mm	横径 Transverse diameter/mm	果形指数 Fruit shape index
CK	102.11±2.51 ^b	22.22±2.26 ^c	66.94±2.38 ^c	66.25±1.08 ^b	1.04±0.03 ^a
P ₁	110.40±3.11 ^a	24.38±2.42 ^{bc}	70.27±3.00 ^{ab}	67.02±1.14 ^{ab}	1.06±0.02 ^a
P ₂	110.33±2.22 ^a	28.15±2.38 ^a	69.58±1.44 ^{abc}	65.71±1.62 ^b	1.07±0.02 ^a
P ₃	113.50±3.74 ^a	28.26±1.36 ^a	71.11±1.80 ^a	68.43±0.96 ^a	1.05±0.01 ^a
P ₄	112.34±3.08 ^a	26.88±1.65 ^{ab}	69.07±2.82 ^{abc}	66.52±1.08 ^b	1.03±0.02 ^a
P ₅	112.09±4.16 ^a	24.76±2.42 ^{bc}	67.52±1.94 ^{bc}	67.08±0.82 ^{ab}	1.02±0.02 ^a

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.2 不同硅钙肥处理对百香果果实 TSS、TA、Vc、SS、SP 的影响

可溶性固形物是反映果实风味及耐贮性的重要指标之一，可滴定酸及 Vc 含量等指标代表了果实的风味品质^[19]，可溶性糖含量是构成果实口感、风味及耐贮性的一个重要指标^[20]。可溶性蛋白质参与合成部分酶的基础物质，参与果实采后生理生化反应的调控^[21]。由表 2 可知，P₃ 处理的 TSS 含量为 19.70%，较 CK 提高 5.35%，其余处理均与 CK 差异不显著。施肥处理的 TA 含量均低于 CK，其中，P₄ 处理的 TA 含量为 0.87%，较 CK 显著降低 36.03%；P₃ 处理的 TA 含量为 0.98%，

较 CK 降低 27.94%，P₃ 与 P₄ 处理的 TA 含量差异不显著。P₃ 处理的固酸比达到 20.40，与 P₄ 处理差异不显著，但比 CK 显著高 46.13%。对 Vc 含量而言，P₃ 处理达到 21.97 mg/100 g，分别较 CK 和 P₁ 处理显著提高 4.87%和 6.81%。随着硅钙肥的增施，P₃ 处理的 SS 含量为 15.41%，较 CK 显著提高 13.23%，较 P₁ 和 P₅ 处理分别提高 8.29%和 6.50%，均达显著差异。P₃ 处理的 SP 含量为 2.08 mg/g，较 CK 增加 24.55%，P₃ 处理与 P₄ 处理之间差异不显著，但与其他处理均有显著差异。综上说明，P₃ 处理在增加果实的口感和风味方面效果最佳。

表 2 不同硅钙肥处理的百香果果实内在品质

Tab. 2 Internal quality of passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers

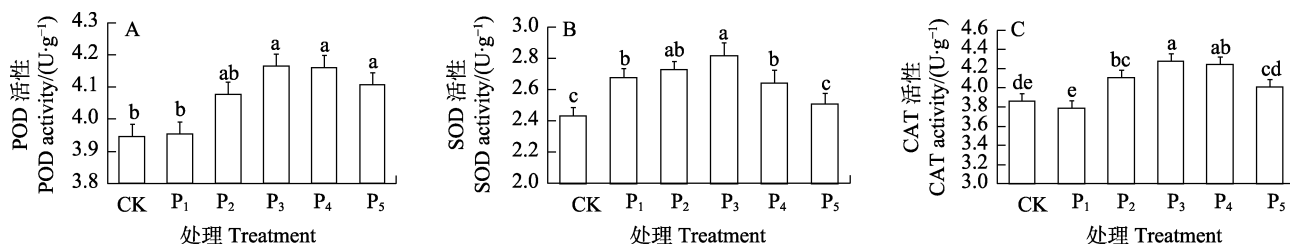
处理 Treatment	可溶性固形物含量 TSS content/%	可滴定酸含量 TA content/%	固酸比 Solid acid ratio	维生素 C 含量 Vc content/[mg·(100 g) ⁻¹]	可溶性糖含量 SS content/%	可溶性蛋白质含量 SP content/(mg·g ⁻¹)
CK	18.70±0.09 ^{bc}	1.36±0.18 ^a	13.96±1.94 ^c	20.95±0.53 ^{bc}	13.61±0.58 ^d	1.67±0.10 ^d
P ₁	19.07±0.12 ^b	1.29±0.13 ^{ab}	14.93±1.38 ^c	20.57±0.57 ^c	14.23±0.55 ^{cd}	1.79±0.06 ^{cd}
P ₂	18.38±0.60 ^c	1.17±0.02 ^{bc}	15.76±0.56 ^{bc}	21.46±0.55 ^{abc}	14.70±0.63 ^{abc}	1.93±0.06 ^b
P ₃	19.70±0.09 ^a	0.98±0.11 ^{de}	20.40±2.31 ^a	21.97±0.20 ^a	15.41±0.66 ^a	2.08±0.09 ^a
P ₄	18.52±0.71 ^{bc}	0.87±0.12 ^e	21.71±3.13 ^a	21.53±0.55 ^{ab}	15.20±0.60 ^{ab}	1.99±0.06 ^{ab}
P ₅	18.45±0.71 ^{bc}	1.05±0.09 ^{cd}	17.73±1.13 ^b	21.39±0.88 ^{abc}	14.47±0.48 ^{bcd}	1.92±0.03 ^{bc}

注：同列不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments ($P<0.05$).

2.3 不同硅钙肥处理对百香果果实 POD、SOD、CAT 活性的影响

由图 1A 可知，各处理的 POD 活性均存在不同程度的差异。P₃ 处理的 POD 活性为 4.16 U/g，较 CK 高 5.49%，P₁ 处理和 CK 之间差异不显著，但显著低于其他处理。SOD 能够清除植物体内的超氧自由基。由图 1B 可见，各处理的 SOD 活性同样存在不同程度的差异。CK 与 P₅ 处理之间差异不显著，但显著低于其他处理。其中，硅钙配

施的 P₂、P₃ 和 P₄ 处理较 CK 分别提高 12.04%、15.73%、8.62%。CAT 可以使 H₂O₂ 分解为水和分子氧，进而减少该过程中植物组织可能受到的氧化伤害。从图 1C 可知，P₃ 处理的 CAT 活性最高，达到 4.27 U/g，较 CK 显著提高 10.72%，其次是同样为配施的 P₄ 处理（4.24 U/g）和 P₂ 处理（4.11 U/g），P₂、P₃ 和 P₄ 处理均显著高于 CK。结果表明，不同硅钙肥处理均能显著提高百香果 POD、SOD、CAT 等抗氧化酶活性，以 P₃ 处理效果最佳。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 1 不同硅钙肥处理的百香果 POD、SOD、CAT 活性

Fig. 1 Activities of POD, SOD and CAT activity in passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers

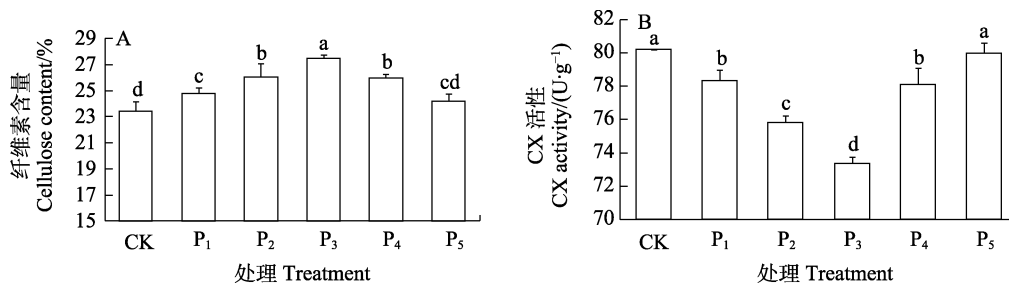
2.4 不同硅钙肥处理对百香果果实纤维素含量和 CX 活性的影响

由图 2 可知, 不同硅钙肥配施处理后, 各处理的百香果纤维素含量和 CX 活性均存在不同程度的差异。由图 2A 可知, 纤维素含量随着钙肥浓度的增加呈先上升后下降的趋势。P₃ 处理的纤维素含量为 27.50%, 比 CK 显著高 17.19%, 且分别高于单施的 P₁ 和 P₅ 处理 10.89% 和 13.79%, 分别高于配施的 P₂ 和 P₄ 处理 5.50% 和 5.77%; P₃ 处理与 CK 及其他处理间存在显著差异。由图 2B 可知, CX 活性的变化随着钙肥浓度的增加呈先下降后上升的趋势。P₃ 处理的 CX 活性最低, 为 73.34 U/g, 较 CK 显著降低 8.57%, 其次是配

施的 P₂ 和 P₄ 处理, 分别是 75.80 U/g 和 78.09 U/g, 均显著低于 CK; 单施的 P₁ 和 P₅ 处理均显著高于 P₃ 处理。结果表明, 不同硅钙肥处理可以提高百香果纤维素含量和降低 CX 活性, 增加果皮机械强度, 硅钙配施效果优于单施, 以 P₃ 处理的效果最显著。

2.5 不同硅钙肥处理对百香果果实原果胶、WSP 含量的影响

由图 3A 可知, 施肥对百香果果皮的原果胶含量有一定的促进作用。其中, P₃ 处理的原果胶含量最高, 达到 10.70%, 比 CK 显著高 19.29%。P₂、P₃ 和 P₄ 处理显著高于 CK、P₁ 和 P₅ 处理, P₁ 和 P₅ 处理与 CK 无显著差异。由图 3B 可知, P₃

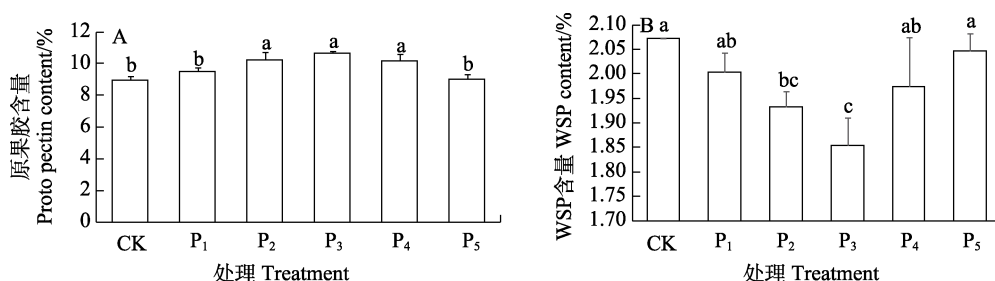


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同硅钙肥处理的百香果纤维素含量和 CX 活性

Fig. 2 Cellulose content and CX activity of passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同硅钙肥处理的百香果原果胶和 WSP 含量

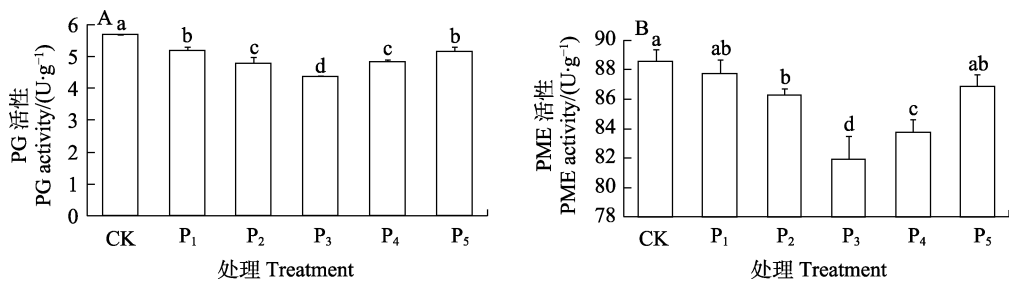
Fig. 3 Content of protopectin and WSP in passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers

处理的 WSP 含量最低, 为 1.85%, 较 CK 显著降低 10.63%, 其次是 P₂ 处理, 为 1.93%, 比 CK 低 6.76%。单施的 P₁ 和 P₅ 处理与 CK 间差异不显著。综上所述, 不同硅钙肥处理可以提高百香果果皮原果胶含量, 降低 WSP 含量, 以 P₃ 处理的效果最佳。

2.6 不同处理对百香果 PG 及 PME 活性的影响

果胶酶属于复合酶, 也是分解果实果胶物质多种酶的总称, 包含多聚半乳糖醛酸酶和果胶甲酯酶等。由图 4A 可知, 不同硅钙肥处理的 PG 活性均显著低于 CK。P₃ 处理的 PG 活性最低, 为

4.38 U/g, 较 CK 降低 22.98%, 且均显著低于其他处理。P₂ 和 P₄ 处理之间差异不显著, 但显著低于 P₁ 和 P₅ 处理。由图 4B 可知, 不同硅钙配施处理后, 各处理百香果的 PME 活性存在不同程度的差异, P₃ 处理的 PME 活性最低, 为 81.90 U/g, 较 CK 显著下降 7.52%, 且 P₃ 处理与其他处理均存在显著差异, 而 P₁ 和 P₅ 处理较 CK 虽有差异但未达显著。结果表明, 不同硅钙肥处理可以降低百香果果皮的 PME 和 PG 活性, 从而降低了果胶物质的分解率, 防止果皮皱裂及损伤, 有利于贮运, 配施效果好于单施, 以 P₃ 处理的效果最为显著。



不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments (P<0.05).

图 4 不同硅钙肥处理的百香果 PG 和 PME 活性

Fig. 4 Activities of PG and PME in passion fruit treated with different silicon and calcium fertilizers

2.7 隶属函数综合评价

单项数据并不能科学、完整、准确地反映不同处理对百香果影响的效果差异, 故选择关键性的指标采用隶属函数进行综合评价。如表 3 所示, 所有处理的排序结果为: P₃>P₄>P₂>P₅>P₁>CK。其中, P₃ 处理的隶属函数值为 0.99, 排序第一, 其次为 P₄ 处理, 其隶属函数值为 0.69, 第三为 P₂ 处理, 其隶属函数值为 0.56, P₅ 和 P₁ 分别位列第四、第五, CK 排在第六, 其隶属函数值为 0.06。由此得知 P₃ 处理下百香果的各指标综合表现最好, 且硅钙配施比单施效果好。

3 讨论

3.1 不同硅钙肥处理对百香果品质性状的影响

单果重、果形指数、硬度等果实外在品质性状可以反映果树肥水供应状况及环境等外界因素对果实造成的影响。本研究得出硅钙肥单施及配施均对百香果的单果重、果实纵横径、硬度有积极影响, 与叶素银等^[22]研究证明硅钙处理后对梨 (Pyrus spp) 果实外在品质有显著提高的结果相似。

表 3 不同处理的隶属函数分析
Tab. 3 Membership function analysis of different treatments

指标 Index	CK	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅
单果重	0.00	0.73	0.72	1.00	0.88	0.90
果实硬度	0.00	0.36	0.98	1.00	0.77	0.42
纵径	0.00	0.80	0.63	1.00	0.51	0.14
横径	0.20	0.48	0.00	1.00	0.30	0.50
可溶性固形物	0.24	0.52	0.00	1.00	0.10	0.05
固酸比	0.00	0.13	0.23	0.83	1.00	0.49
抗坏血酸	0.27	0.00	0.64	1.00	0.68	0.58
可溶性糖	0.00	0.35	0.61	1.00	0.89	0.47
可溶性蛋白	0.00	0.30	0.64	1.00	0.78	0.60
过氧化物酶	0.00	0.03	0.60	1.00	0.98	0.74
超氧化物歧化酶	0.00	0.63	0.77	1.00	0.55	0.19
过氧化氢酶	0.15	0.00	0.66	1.00	0.93	0.46
纤维素	0.00	0.33	0.64	1.00	0.63	0.17
原果胶	0.00	0.31	0.72	1.00	0.70	0.04
总分	0.86	4.96	7.84	13.83	9.71	5.75
平均值	0.06	0.35	0.56	0.99	0.69	0.41
排序	6	5	3	1	2	4

TTS、TA、Vc 3 个指标是衡量果实风味及口感的重要指标。SS、SP 作为植物中重要的渗透调

节物质,在维持细胞渗透压和降低细胞渗透势方面有着重要意义,可溶性蛋白质含量说明了植物生命活动的代谢水平^[23]。已有研究表明,钙、硅肥施用可显著提高果实可溶性固形物、可滴定酸、Vc 含量及可溶性糖、可溶性蛋白质等内在品质性状^[24-26]。车红伟等^[27]指出硅钙肥混施对水稻 (*Oryza sativa* L.) 营养生长、提高其产量及品质具有一定促进作用。

本研究表明,对百香果树体进行不同硅钙配施处理,对其品质性状指标具有显著影响。硅钙肥对百香果的单果重、果实纵横径、TSS、Vc、SS、SP、固酸比等指标均有不同程度的促进作用。且硅钙配施的效果大于单施。这与翟江等^[14]在黄瓜上的研究结果相似,即硅钙单施和二者配施均可促进黄瓜植株生长,本研究中 P₃ 处理(土施硅肥+叶面钙肥 1000 倍)的促进效果最好。

3.2 不同硅钙肥处理对百香果细胞壁代谢的影响

抗氧化酶类包含 POD、SOD、CAT,是植物抗氧化过程中重要的 3 种参与酶类,通过协同作用来防御活性氧或其他过氧化物自由基对细胞膜系统的伤害,从而减少有机体遭受自由基的毒害,对维持自由基产生与清除之间的平衡至关重要,可以保护果实免受生物或非生物胁迫而引起的氧化损伤,植物体内抗氧化酶的活性高低可以说明植物对环境的适应和抗衰老能力的强弱^[28-29]。熊博等^[30]研究证明柑橘 (*Citrus reticulata*) 叶面、果面喷钙肥能有效提高 CAT、POD 和 SOD 活性,说明柑橘果实活性氧代谢与钙素营养密切相关。夏杏洲等^[31]指出,橙 (*C. sinensis*) 经钙处理后保护了细胞组织结构,脂质过氧化程度得到减轻,延缓了果实的衰老。耿若飞等^[32]指出,叶面喷施硅肥可以上调抗氧化系统相关酶的表达量,增加抗氧化酶活性及抗氧化物质含量。王壮伟等^[29]指出,加施硅钙肥可减缓葡萄果实成熟后果实品质的变化,降低葡萄果实中的丙二醛含量和多酚氧化酶活性。本研究也表明硅钙肥对百香果的抗氧化酶活性有促进作用,与前人研究结果一致。

纤维素有支撑骨架的作用,并参与植物细胞壁组成。在 CX 作用下,纤维素逐步被水解并最终生成 β -葡萄糖^[33]。纤维素含量对果蔬品质和贮藏性影响较大,在抗机械损伤、抗病虫害方面具有重要作用。果胶物质属于植物胶,主要成分为多聚半乳糖醛酸,果实细胞含有大量果胶物质(中胶层和初生壁),能黏结细胞个体^[34]。果胶是维

持植物结构和硬度的关键,有调节细胞的渗透性及 pH 的作用。当果实尚未成熟时,纤维素和果胶物质呈结合状,以原果胶形式存在。原果胶可使果实变得坚实脆硬且不可溶于水,果实成熟时,果胶物质与纤维素逐渐分离,转变为易溶于水的水溶性果胶,果肉组织细胞间隙变大、软化,硬度下降^[33]。王玲利等^[35]研究指出,叶面施钙在一定浓度范围内与果实中纤维素、原果胶等含量呈极显著正相关。本研究结果与前人相似,进一步证明硅钙肥可以提高细胞壁机械强度以及稳定性,增强耐贮性。

百香果在栽培中存在果皮较软、贮藏难、抗逆差等问题^[36]。而过氧化物酶、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、纤维素含量、纤维素酶活性、原果胶含量等都是解决上述问题的重要指标。本研究表明,硅钙肥对百香果果实抗氧化酶活性、纤维素含量、原果胶含量均有明显的促进作用,其中硅钙配施的效果大于单施。本研究结果与叶素银等^[22]的结论相似,进而证明钙硅配施可以提高果肉中 SOD 和 POD 活性,有增强活性氧清除能力的作用,有利于提高果实抗性及细胞膜完整性。同时,还能防止膜脂过氧化。随着果实的生长发育,钙硅配施处理的细胞壁中的水解酶活性,如多聚半乳糖醛酸酶活性和纤维素酶活性显著低于 CK。在果实成熟时,果实中的原果胶含量均高于 CK,而水溶性果胶含量低于 CK。这些都印证了硅钙肥对提高果实糖代谢,抗氧化及增强细胞壁机械强度有促进作用,且硅钙配施效果比硅钙单施效果好。

4 结论

本研究以钦蜜 9 号黄金百香果为试材,通过对百香果土施硅肥、花果期喷施钙肥,探究不同中微肥及用量对百香果果实品质及果皮相关酶活性指标的影响。结果表明,与 CK 相比,P₃ (土施硅肥+喷施钙肥 1000 倍)处理能提高百香果的单果重、果实纵横径、硬度,增加果实的 TSS、Vc、SS、SP 含量,降低果实 TA 含量;促进 POD、SOD、CAT 活性;增加果皮中原果胶和纤维素含量,并降低 WSP 含量,使 CX、PG 及 PME 活性下降,各指标达显著差异。综上,土施硅肥+喷施钙肥 1000 倍配施为百香果花果期施硅钙肥的最适配方,该处理能促进果实内营养物质的积累,改善果品品质,提高细胞壁物质代谢,增强果实

果皮机械强度、硬度等,有利于提升百香果的采后耐贮性。

参考文献

- [1] 郑开斌. 西番莲的栽培技术[J]. 农村百事通, 2016, 2(11): 30-31.
ZHENG K B. Cultivation techniques of passionflower[J]. Nongcun Baishitong, 2016, 2(11): 30-31. (in Chinese)
- [2] 樊鸿艳, 栗君, 陈宇豪, 付敏, 顾佳怡, 贾硕, 李雪梅, 骆宝仪, 吴子玉, 袁海青, 郑丽丽. 百香果化学成分及生物活性研究进展[J]. 农产品加工, 2022, 23(12): 95-100.
FAN H Y, SU J, CHEN Y H, FU M, GU J Y, JIA S, LI X M, LUO B Y, WU Z Y, YUAN H Q, ZHENG L L. Research progress on chemical constituents and biological activities of passion fruit[J]. Farm Products Processing, 2022, 23(12): 95-100. (in Chinese)
- [3] 张建梅, 刘娟, 高鹏, 孙太元. 西番莲的利用价值及市场前景的探讨[J]. 河北果树, 2019, 158(2): 41-43.
ZHANG J M, LIU J, GAO P, SUN T Y. Discussion on the utilization value and market prospect of *Passiflora edulis*[J]. Hebei Fruits, 2019, 158(2): 41-43. (in Chinese)
- [4] 唐语琪, 杨其军, 洗淑颜, 刘萌, 吴斌. 百香果产业支撑乡村振兴的现状与对策建议[J]. 中国农业文摘: 农业工程, 2021, 33(3): 31-32.
TANG Y Q, YANG Q J, XIAN S Y, LIU M, WU B. Current situation and countermeasures of passion fruit industry supporting rural revitalization[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2021, 33(3): 31-32. (in Chinese)
- [5] 邓福斌. ‘钦蜜 9 号’黄金百香果种植技术[J]. 农村新技术, 2021, 25(9): 12-14.
DENG F B. ‘Qinmi No.9’ golden passion fruit planting technology[J]. New Rural Technology, 2021, 25(9): 12-14. (in Chinese)
- [6] 宋梦圆, 李佳璠, 许盟盟, 高丽红, 谢越. 中微量元素叶面肥处理对樱桃番茄生长、产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2022, 52(6): 24-31.
SONG M Y, LI J F, XU M M, GAO L H, XIE Y. Effects of medium and trace element foliar fertilizer treatment on growth, yield and quality of cherry tomato[J]. Northern Horticulture, 2022, 52(6): 24-31. (in Chinese)
- [7] CHEN W, YAO X Q, CAI K Z, CHEN J N. Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption[J]. Biological Trace Element Research, 2011, 142(1): 27-30.
- [8] LUCAS R J, BRUNO L B, ALLAN K S L. Silicon reduces aluminum accumulation and mitigates toxic effects in cowpea plants[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2017, 39(6): 37-41.
- [9] 周峰, 曾智, 刘春成. 正常环境条件下硅肥对作物生长影响研究进展[J]. 江西水利科技, 2023, 49(2): 102-107.
ZHOU F, ZENG Z, LIU C C. Research progress on the effect of silicon fertilizer on crop growth under normal environmental conditions[J]. Jiangxi Hydraulic Science & Technology, 2023, 49(2): 102-107. (in Chinese)
- [10] 张峰, 李养义, 张晓东, 李世强. 硅钙肥对库尔勒香梨果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 21(4): 56-60.
ZHANG F, LI Y Y, ZHANG X D, LI S Q. Effects of silicon-calcium fertilizer on fruit quality of Korla fragrant pear[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2020, 21(4): 56-60. (in Chinese)
- [11] 马肖, 刘木兰, 王峰, 张秋平. 缓释肥与硅肥配施对油菜产量及菌核病抗性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 144-150.
MA X, LIU M L, WANG F, ZHANG Q P. Effects of combined application of slow-release fertilizer and silicon fertilizer on rapeseed yield and resistance to *Sclerotinia sclerotiorum*[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2022, 48(2): 144-150. (in Chinese)
- [12] 莫飞旭, 田茂科, 龙友华, 吴小毛, 尹显慧, 赵志博, 黎晓茜, 黄文源. 叶面施钙对猕猴桃钙含量、品质及贮藏性的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(2): 116-120.
MO F X, TIAN M K, LONG Y H, WU X M, YIN X H, ZHAO Z B, LI X X, HUANG W Y. Effects of foliar application of calcium on calcium content, quality and storage of kiwifruit [J]. South China Fruits, 2019, 48(2): 116-120. (in Chinese)
- [13] 修文广. 硅钙肥不同施用量对秋白菜产量及效益的影响[J]. 现代农业科技, 2012, 25(9): 117-120.
XIU W G. Effects of different application rates of silicon-calcium fertilizer on yield and benefit of autumn cabbage [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2012, 25(9): 117-120. (in Chinese)
- [14] 翟江, 高原, 张晓伟, 韩鲁杰, 毕焕改, 李清明, 艾希珍. 硅钙对日光温室黄瓜光合作用及产量和品质的影响[J]. 园艺学报, 2019, 46(4): 701-713.
ZHAI J, GAO Y, ZHANG X W, HAN L J, BI H G, LI Q M, AI X Z. Effects of calcium silicate on photosynthesis, yield and quality of cucumber in solar greenhouse[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2019, 46(4): 701-713. (in Chinese)
- [15] 徐谦, 李登云, 李配, 修明霞, 姜兴盛. 果树巧施钙肥提质增效[J]. 果树资源学报, 2021, 2(3): 81-83.
XU Q, LI D Y, LI P, XIU M X, JIANG X S. Skillful application of calcium fertilizer to fruit trees to improve quality and efficiency[J]. Journal of Fruit Resources, 2021, 2(3): 81-83. (in Chinese)

- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000. (in Chinese)
- [17] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
LI L. Experimental instruction of plant physiology module[M]. Beijing: Science Press, 2008. (in Chinese)
- [18] 李合生. 植物生理生化试验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI H S. Plant physiological and biochemical test principle and technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)
- [19] 吴永飞, 胡小京, 杨雪莲. 不同叶面钙肥处理对“黑珍珠”樱桃货架期保鲜的影响研究[J]. 绿色科技, 2021, 23(15): 5-7, 11.
WU Y F, HU X J, YANG X L. Effects of different foliar calcium fertilizer treatments on shelf-life preservation of ‘Black Pearl’ cherries[J]. Journal of Green Science and Technology, 2021, 23(15): 5-7, 11. (in Chinese)
- [20] 王步天, 施学东, 杜华波, 张凤英, 吴斌, 葛宇. 三个主栽百香果品种果实和种子性状差异分析[J]. 热带农业科学, 2023, 43(1): 21-24.
WANG B T, SHI X D, DU H B, ZHANG F Y, WU B, GE Y. Difference analysis of fruit and seed traits among three main cultivars of passion fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Agriculture, 2023, 43(1): 21-24. (in Chinese)
- [21] 杨雪莲, 胡小京, 王霞, 李文文, 吴永飞, 颜丽, 彭强, 龙秀琴. 茶多酚与壳聚糖复合保鲜剂对黄金百香果和紫香百香果保鲜效果的影响[J]. 热带作物学报, 2022, 43(10): 139-148.
YANG X L, HU X J, WANG X, LI W W, WU Y F, YAN L, PENG Q, LONG X Q. Effects of tea polyphenols and chitosan compound preservatives on the preservation of golden passion fruit and purple passion fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(10): 139-148. (in Chinese)
- [22] 叶素银, 徐阳春, 董彩霞. 钙和硅叶面肥对‘黄冠’梨果实发育期间生理生化变化的影响[J]. 南京农业大学学报, 2015, 38(5): 824-829.
YE S Y, XU Y C, DONG C X. Effects of calcium and silicon foliar fertilizers on physiological and biochemical changes during fruit development of ‘Huangguan’ pear[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2015, 38(5): 824-829. (in Chinese)
- [23] 齐晓媛, 王文莉, 胡少卿, 刘梦雨, 郑成淑, 孙宪芝. 外源褪黑素对高温胁迫下菊花光合和生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 496-504.
QI X Y, WANG W L, HU S Q, LIU M Y, ZHENG C S, SUN X Z. Effects of exogenous melatonin on photosynthetic and physiological characteristics of chrysanthemum under high temperature stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(7): 496-504. (in Chinese)
- [24] 魏成熙, 欧阳昌亭, 朱正国. 水稻施用硅钙肥的效果研究[J]. 耕作与栽培, 1993, 2(3): 49-51.
WEI C X, OUYANG C T, ZHU Z G. Study on the effect of silicon-calcium fertilizer on rice[J]. Tillage and Cultivation, 1993, 2(3): 49-51. (in Chinese)
- [25] 张丽阳, 史振声, 王志斌, 李凤海, 王莹, 胡海军. 硅钙肥对爆裂玉米品质和生理指标的影响分析[J]. 种子, 2009, 4(4): 21-23.
ZHANG L Y, SHI Z S, WANG Z B, LI F H, WANG Y, HU H J. Analysis of the effect of silicon-calcium fertilizer on the quality and physiological indexes of popcorn[J]. Seed, 2009, 4(4): 21-23. (in Chinese)
- [26] 任旭喜, 肖千明, 姜春荣, 孙文涛, 高秀兰. 硅钙肥对玉米抗旱生理指标及产量的影响[J]. 国外农学—杂粮作物, 1998, 18(3): 1-4.
REN X X, XIAO Q M, LOU C R, SUN W T, GAO X L. Effects of silicon-calcium fertilizer on drought resistance physiological indexes and yield of maize[J]. Rain Fed Crops, 1998, 18(3): 1-4. (in Chinese)
- [27] 车红伟, 高伟江. 硅钙肥在水稻上的应用效果[J]. 现代化农业, 2019, 6(3): 16-17.
CHE H W, GAO W J. Application effect of silicon calcium fertilizer on rice[J]. Modernizing Agriculture, 2019, 6(3): 16-17. (in Chinese)
- [28] 文良娟, 毛慧君, 张元春, 李英军. 西番莲果皮成分分析及其抗氧化活性的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 54-58.
WEN L J, MAO H J, ZHANG Y C, LI Y J. Study on the composition analysis and antioxidant activity of passion fruit peel[J]. Food Science, 2008, 29(11): 54-58. (in Chinese)
- [29] 王壮伟, 黄学熹, 王博, 吴伟民, 王西成, 钱亚明. 钙肥和硅肥对葡萄留树保鲜效果的影响[J]. 中国野生植物资源, 2020, 39(1): 9-13.
WANG Z W, HUANG X X, WANG B, WU W M, WANG X C, QIAN Y M. Effects of calcium fertilizer and silicon fertilizer on the preservation of grape trees [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2020, 39(1): 9-13. (in Chinese)
- [30] 熊博, 汪志辉, 廖凤玲, 范茜茜, 李立佼, 王晓晓. 钙对黄果柑果实 3 种抗氧化酶活性的影响[J]. 植物科学学报, 2014, 32(2): 168-173.
XIONG B, WANG Z H, LIAO F L, FAN Q Q, LI L J, WANG X X. Effects of calcium on the activities of three antioxidant enzymes in Huangguogan fruits[J]. Plant Science Journal, 2014, 32(2): 168-173. (in Chinese)
- [31] 夏杏洲, 吴雪彪, 张增奇, 董庆兵, 梁振全. 钙处理对红江橙采后贮藏品质影响的研究[J]. 保鲜与加工, 2009, 9(5):

- 9-14.
- XIA X Z, WU X B, ZHANG Z Q, DONG Q B, LIANG Z Q. Effects of calcium treatment on postharvest storage quality of Hongjiang orange[J]. *Storage and Process*, 2009, 9(5): 9-14. (in Chinese)
- [32] 耿若飞, 程志杰, 王二伟, 张惠敏, 常鸿杰, 樊振杰, 贾真真. 叶面喷施硅肥对干旱胁迫下冬小麦生理特性和产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(1): 112-116.
- GENG R F, CHENG Z J, WANG E W, ZHANG H M, CHANG H J, FAN Z J, JIA Z Z. Effects of foliar application of silicon fertilizer on physiological characteristics and yield of winter wheat under drought stress[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2024, 52(1): 112-116. (in Chinese)
- [33] 曹建康. 果蔬采后生理生化实验技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2007.
- CAO J K. Physiology and biochemistry experiment technology of fruits and vegetables after harvest[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [34] 刘运花, 黄苇, 郭美媛, 黄妙云. 西番莲果皮中果胶的复合酶法提取工艺研究[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 117-122, 128.
- LIU Y H, HUANG W, GUO M Y, HUANG M Y. Study on the extraction process of pectin from passion fruit peel by compound enzymatic method[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 117-122, 128. (in Chinese)
- [35] 王玲利, 刘超, 黄艳花, 李兴发, 曾明. ‘黄冠’梨采后热处理和钙处理对其钙形态及细胞壁物质代谢的影响[J]. *园艺学报*, 2014, 41(2): 249-258.
- WANG L L, LIU C, HUANG Y H, LI X F, ZENG M. Effects of post-harvest heat treatment and calcium treatment on calcium morphology and cell wall metabolism of ‘Huang-guan’ pear[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2014, 41(2): 249-258. (in Chinese)
- [36] 莫庚生, 于琴芝, 吴永琼, 龙代英, 欧阳旭, 唐学军. 黄金百香果高密垂帘式优质丰产栽培技术[J]. *南方园艺*, 2021, 32(3): 25-27.
- MO G S, YU Q Z, WU Y Q, LONG D Y, OUYANG X, TANG X J. Golden passion fruit high-density vertical curtain high-quality and high-yield cultivation technology[J]. *Southern Horticulture*, 2021, 32(3): 25-27. (in Chinese)