

果实生长发育后期喷施蔗糖溶液对井岗红糯荔枝采后品质的影响

喻文涛, 曲姗姗, 李萌萌, 王 光, 朱世江*

华南农业大学园艺学院/广东省果蔬保鲜重点实验室/南方园艺产品保鲜教育部工程技术研究中心, 广东广州 510642

摘要: 对采后果实用化学药剂实施浸泡处理是水果保鲜的通用方法。但由于消费者对农残的担忧、荔枝产区采后处理条件缺乏等原因, 亟需研发绿色环保且简便易行的荔枝保鲜新技术。本研究在果实生长发育后期(采前 10 d)用 5 mmol/L 蔗糖溶液喷施井岗红糯荔枝, 采收后置于常温(20 °C)贮藏。结果表明: 与对照相比, 采前蔗糖处理降低了采后荔枝的褐变指数、病情指数和腐烂率, 降低了红绿色度(a^*)值, 提高了亮度(L^*)和黄蓝色度(b^*)值, 表明蔗糖处理改善了荔枝的外观品质。蔗糖处理的荔枝可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量与对照无明显差异, 但维生素 C(Vc)含量略低于对照, 表明其对营养品质无明显不利影响。采前蔗糖处理抑制荔枝果皮多酚氧化酶(PPO)、过氧化物酶(POD)活性, 降低果皮相对电导率(REC)、丙二醛(MDA)、过氧化氢(H_2O_2)和超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$)含量, 以及提高荔枝果皮苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性和总酚含量, 从而延缓荔枝的褐变和腐烂。研究结果表明采前蔗糖处理作为一项新型荔枝保鲜技术在我国荔枝产区具有一定的应用前景。

关键词: 荔枝; 蔗糖; 采前处理; 品质; 褐变; 腐烂

中图分类号: S667.1 文献标识码: A

Effect of Pre-harvest Sucrose Solution Spray at the Latter Stage of Fruit Development on Quality of Litchi Fruit During Storage

YU Wentao, QU Shanshan, LI Mengmeng, WANG Guang, ZHU Shijiang*

College of Horticulture, South China Agricultural University / Guangdong Provincial Key Laboratory of Postharvest Science of Fruits and Vegetables / Engineering Research Center for Postharvest Technology of Horticultural Crops in South China, Ministry of Education, Guangzhou, Guangdong 510642, China

Abstract: Soaking the harvested fruit with chemical fungicides is a general method for fruit preservation. However, due to the concerns of consumers about chemical residues and the lack of postharvest treatment conditions in litchi producing areas, there is an urgent need to develop green, environment-friendly preservation techniques for litchi, which is also easy to apply. In this study, 'Jingganghongnuo' litchi was sprayed with 5 mmol/L sucrose solution at the latter stage of fruit development (10 days before harvest), and stored at room temperature (20 °C) after harvest. The results showed that, compared with the control, pre-harvest sucrose treatment reduced the browning index, disease index and decay rate of harvested litchi, decreased the chromaticity a^* value and increased the L^* and b^* values, indicating that sucrose treatment improved the appearance quality of litchi. The sucrose-treated litchi was not significantly different from the control in the content of soluble solid (TSS) and titratable acid (TA), although they were slightly lower than that of the control in the content of Vc, suggesting that it had no significant adverse effect on nutritional quality. Sucrose treatment inhibited the activities of polyphenol oxidase (PPO) and peroxidase (POD) in litchi pericarp, reduced the contents of relative conductivity (REC), malondialdehyde (MDA), hydrogen peroxide (H_2O_2) and superoxide anion ($O_2^{\cdot-}$), and increased the activity of phenylalanine ammonia lyase (PAL) and total phenol content in litchi pericarp, so as to delay the

收稿日期 2022-05-10; 修回日期 2022-09-14

基金项目 国家荔枝龙眼产业体系采后贮藏与保鲜岗 (No. CARS-32-15)。

作者简介 喻文涛 (1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 园艺产品采后科学。*通信作者 (Corresponding author): 朱世江 (ZHU Shijiang), E-mail: sjzhu@scau.edu.cn。

browning and decay of litchi. This study shows that pre-harvest sucrose treatment, as a new litchi preservation technology, has a certain prospect for application in litchi producing areas in China.

Keywords: litchi; sucrose; pre-harvest treatment; quality; browning; rot

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.04.017

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 是一种独具特色的亚热带水果, 果皮红亮、口味鲜甜。我国年产荔枝超过世界总量的 70%, 具有很高的商业价值^[1]。然而, 荔枝一般在高温多湿的夏季上市, 采后呼吸代谢旺盛, 极易发生褐变和腐烂。荔枝采后的褐变和腐烂缩短了荔枝货架期, 也严重影响了荔枝长期贮运。据报道, 荔枝在流通过程中因变质而造成的损失约占荔枝总产量的 20% 以上^[2]。

目前荔枝保鲜主要采用低温冷藏结合化学杀菌剂处理、疏处理结合浸酸护色处理等技术, 虽然在一定程度上延长了荔枝的货架期, 但长期化学药剂处理存在环境污染和药剂残留等问题^[3]。另外, 有研究发现低温货架能延长荔枝货架期, 但低温贮藏后的荔枝在常温货架寿命比未经冷藏的鲜果更短, 进入常温环境后又极易褐变和腐烂^[4]; 裴炜等^[5]使用双向伸聚丙烯薄膜袋对荔枝进行包装处理, 发现薄膜袋袋壁易积水, 加重褐变和腐烂, 丧失保鲜效果。开发高效安全的荔枝保鲜技术对于促进荔枝产业的发展具有重要意义^[6-7]。

糖作为碳骨架的来源是保持能源供应和延长易腐植物产品采后生命所必需的能源物质, 研究表明, 外源蔗糖供应可以延缓西兰花采后衰老并延长其货架期^[8]。凌亚杰等^[9]于采前当天用 100 mmol/L 蔗糖喷施草莓果实, 明显提高了总酚含量和抗氧化能力, 改善了草莓品质。但尚未见在果实生长期用蔗糖处理控制果实采后腐烂的报道。

长期以来, 果蔬的保鲜处理通常在采后进行, 需要建设包装车间、药剂处理池等基础设施。我国不少荔枝产区以农户分散种植为主, 不具备采后处理条件。而且, 由于年轻人大多进城务工, 农村劳动力短缺现象严重, 采后处理又要支出额外成本, 很少有农户愿意实施采后处理。另外, 对于有条件实施的企业或大户, 用药剂对采后荔枝实施浸泡处理后, 需要晾干果面水分才能包装, 而晾干这个过程容易导致荔枝果皮褐变。因此, 很有必要研发一种操作简便、易于掌握、经济适用的荔枝保鲜方法。如能将保鲜剂处理时间前移, 在果实生长期以喷施的方式进行, 将方便农户独立实施荔枝保鲜处理, 也可以提高企业和种植大

户保鲜处理的效率。

本研究以井岗红糯荔枝为材料, 于采前 10 d 用蔗糖溶液在树上喷施荔枝果实, 初步探讨其保鲜效果及其机理, 旨在为改进荔枝保鲜技术提供新思路。本研究于荔枝生长发育后期用蔗糖溶液在树上喷施荔枝果实, 不依赖采后处理设施, 也避免了采后处理的荔枝晾干过程, 具有一定的实用性和创新性。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 植物材料与试剂 以广东省广州市从化荔博园的井岗红糯荔枝为研究材料, 于采前 10 d 进行处理, 采后挑选果实大小、颜色较为一致的荔枝果实用于保鲜效果观察。

试剂: 蔗糖, 为广东广试试剂科技有限公司产品; 吐温 20, 为健阳生物科技有限公司产品; 酚酞、硫酸、草酸、钼酸铵、聚乙烯吡咯烷酮、过氧化氢等均为国产分析纯, 为国药集团化学试剂有限公司产品。

1.1.2 仪器与设备 Millii-Q-B 超纯水系统购于美国 Millipore 公司, 702Rell 台式高速冷冻离心机、PMC-060 微型离心机、BS224S 电子分析天平均购于德国 Eppendorf 公司, UV-2600A 紫外可见分光光度计购于日本 Shim 公司, A11 basic Analytical mill 磨样机购于德国 IKA 公司, DK-8D 恒温水浴锅购于上海信森实验设备有限公司, MULTISKAN Sky 酶标仪购于广州联波生物科技有限公司, CR-300 色差计购于日本 Minolta 公司, PR-34 α 数显折射仪购于日本 ATAGO 公司, DDS-307 电导率仪购于上海精密科学仪器有限公司。

1.2 方法

1.2.1 蔗糖处理 用含 0.03% 吐温的 5 mmol/L 蔗糖溶液喷施处于着色期的荔枝果实, 对照用含 0.03% 吐温的纯净水喷施荔枝果实。处理后 10 d 采收, 然后立即用泡沫箱包装, 运回广东省果蔬保鲜重点实验室, 贮藏于 20 °C 冷库。贮藏期间用厚度为 0.03 mm 的塑料袋包装, 每个处理 60 个果,

重复3次,定期观察和取样。

1.2.2 贮藏品质观测 果皮褐变观测参照吴振先^[10]的方法,略有改动。按荔枝外果皮褐变面积把果皮褐变程度分6级:0级,果实全红,果皮无明显褐斑;1级,龟裂片尖端凸点褐变10%~50%,或连片褐变或褐变面积小于5%,或单个褐斑直径小于0.50 cm;2级,龟裂片尖端凸点褐变50%~100%,或连片褐变或褐变面积5%~15%,或单个褐斑直径0.50~1.00 cm;3级,连片褐变或褐变面积15%~25%,或单个褐斑直径1.00~1.50 cm;4级,连片褐变或褐变面积25%~50%,或单个褐斑直径1.50~2.00 cm;5级,连片褐变或褐变面积大于50%,或单个褐斑直径大于2.00 cm。荔枝果皮褐变指数= $\sum(\text{褐变级数} \times \text{对应级果数}) / \text{总果数}$ 。

病情指数观测参照吴光旭等^[11]的方法,略作改动。荔枝病情指数= $\sum(\text{病情级数} \times \text{对应级果数}) / \text{总果数}$ 。

腐烂率计算:腐烂率=(出现腐烂症状的果数/总果数) $\times 100\%$ 。

果皮颜色值的测定参照QU等^[12]的方法,每个处理随机取15个果实,每个处理重复3次。用全自动色差计测定果皮亮度(L^*)值、红绿色度(a^*)值、黄蓝色度(b^*)值。

可溶性固形物(total soluble solids, TSS)、可滴定酸(titratable acid, TA)、维生素C(vitamin C, Vc)含量测定参照王晶英^[13]的方法,分别采用数显折光仪、酸碱滴定法和酶标仪测定。

1.2.3 生理指标的测定 相对电导率(relative conductivity, REC)参照陈建勋等^[14]的方法用电导仪测定;丙二醛(malondialdehyde, MDA)测定参照赵世杰等^[15]的方法用酶标仪测定;总酚参考李静等^[16]的方法用酶标仪测定;苯丙氨酸解氨酶(phenylalanine ammonia-lyase, PAL)、多酚氧化酶(polyphenol oxidase, PPO)、过氧化物酶(peroxidase, POD)参照陈建勋等^[14]的方法用紫外分光光度计测定;过氧化氢(hydrogen peroxide, H_2O_2)参照李忠光等^[17]的方法用酶标仪测定;超氧阴离子($O_2\cdot^-$)参照王爱国等^[18]的方法用酶标仪测定。

1.3 数据处理

试验数据使用Excel 2010软件进行统计,计算平均值和标准误并制图。采用SPSS 23软件利用 t 检验法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 采前蔗糖处理对荔枝果实褐变指数和色度值的影响

由图1A可知,荔枝果实的褐变指数随贮藏天数增加而逐渐升高,而蔗糖处理显著延缓荔枝褐变,8 d的褐变指数与对照4 d的褐变指数相当。蔗糖处理的荔枝果皮褐变指数在整个贮藏期均低于对照,差异显著($P < 0.05$)。

由图1B和图1D可知,荔枝果皮的 L^* 和 b^* 值呈现出相似的变化趋势,随贮藏时间的延长在一定范围内波动,蔗糖处理荔枝的 L^* 和 b^* 值在贮藏期间显著高于对照($P < 0.05$)。如图1C所示,荔枝果皮的 a^* 值整体呈先下降后上升趋势,蔗糖处理荔枝的 a^* 值低于对照。蔗糖处理延缓了荔枝褐变指数的升高,维持了果皮亮度、红色和黄绿色。

2.2 采前蔗糖处理对荔枝果实病情指数和腐烂率的影响

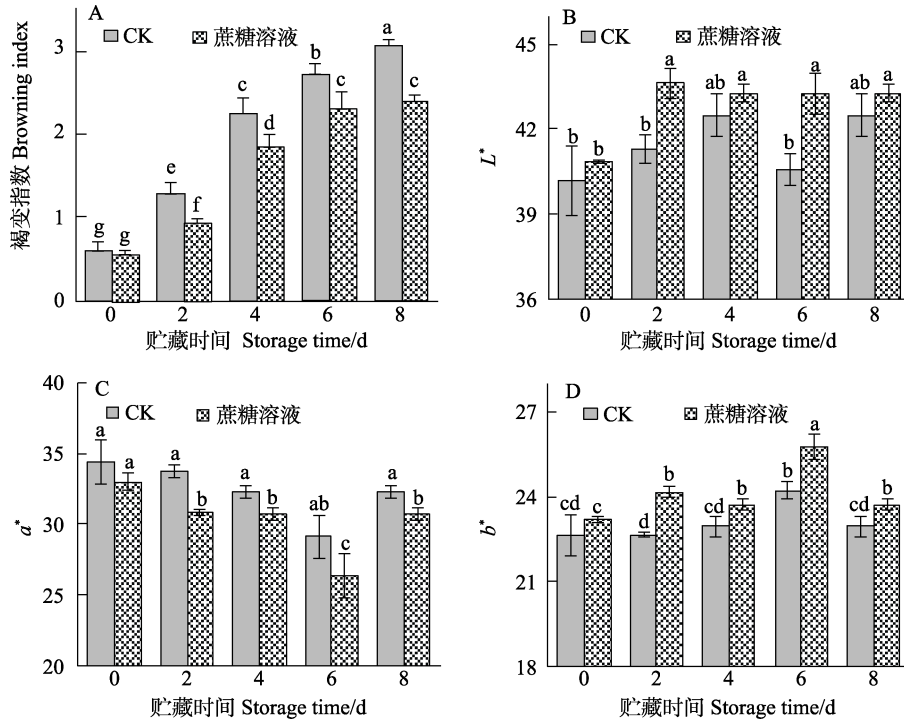
由图2A~图2B可知,随贮藏时间的增加,荔枝的病情指数和腐烂率呈不断上升的趋势。与对照相比,蔗糖处理降低了荔枝果实病情指数和腐烂率。蔗糖处理的荔枝在贮藏4 d后才开始出现病情和腐烂,8 d的病情指数与腐烂率分别是同时期对照的0.43倍和0.47倍,差异显著($P < 0.05$)。图2C~图2D为蔗糖处理组 and 对照组荔枝贮藏8 d后的外观,可见蔗糖处理很好地延缓了荔枝果实贮藏期病害的发生和腐烂。

2.3 采前蔗糖处理对荔枝果实营养品质的影响

由图3A~图3B可知,随贮藏时间的增加,荔枝果肉中TSS含量和TA含量整体都维持一个较小水平的波动,贮藏8 d时,蔗糖处理的荔枝TSS、TA含量与对照无显著性差异。从图3C可见,在整个贮藏期间,荔枝的Vc含量整体呈先下降后上升趋势。贮藏前期,对照荔枝的Vc含量高于处理荔枝;贮藏后期,对照荔枝与处理荔枝Vc含量在较小范围内波动,贮藏6 d和8 d时,对照荔枝的Vc含量分别是处理荔枝的0.93倍和1.08倍,差异显著,但差异幅度较小。蔗糖处理的荔枝TSS和TA含量与对照无明显差异,但Vc含量略低于对照,表明其对营养品质无明显不利影响。

2.4 采前蔗糖处理对采后荔枝果皮PAL活性和总酚含量的影响

由图4A可知,对照果实果皮中PAL活性在较小范围内波动,蔗糖处理显著提高了荔枝果皮

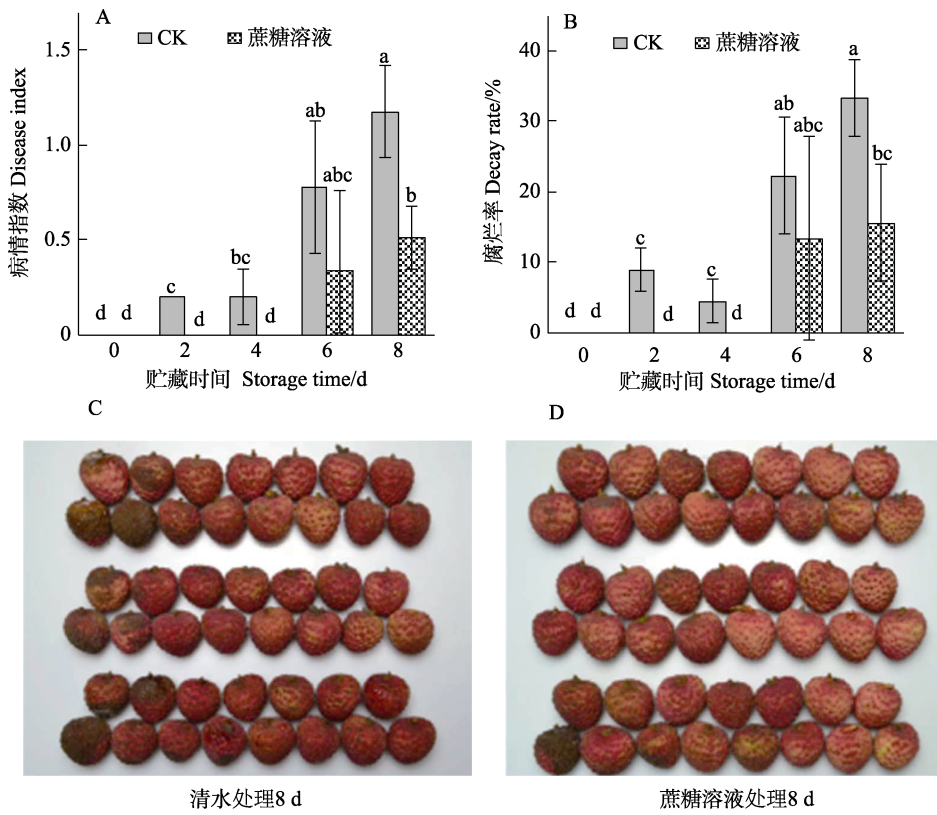


不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 1 采前蔗糖处理对荔枝果皮褐变指数和色度值的影响

Fig. 1 Effects of pre-harvest sucrose treatment on pericarp browning indexes and chromaticity of litchi pericarp

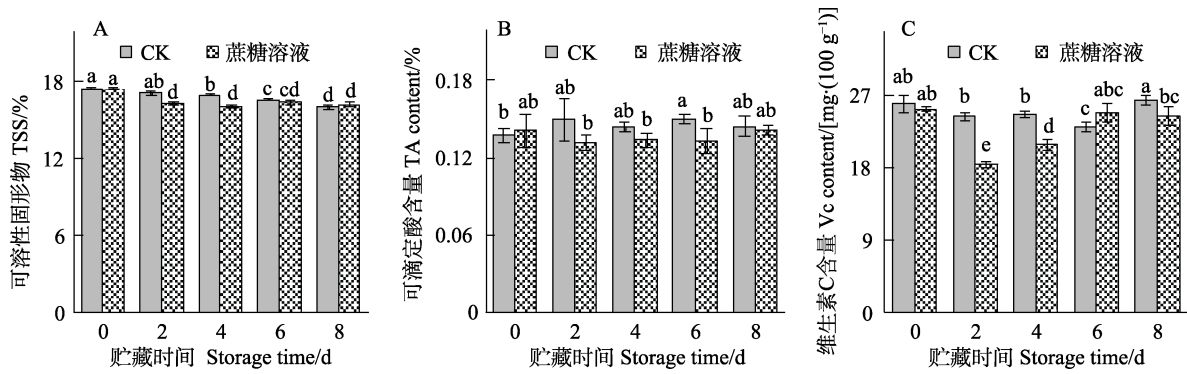


不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 2 采前蔗糖处理对荔枝果皮病情指数和腐烂率的影响

Fig. 2 Effects of pre-harvest sucrose treatment on pericarp disease index and decay rate of litchi pericarp

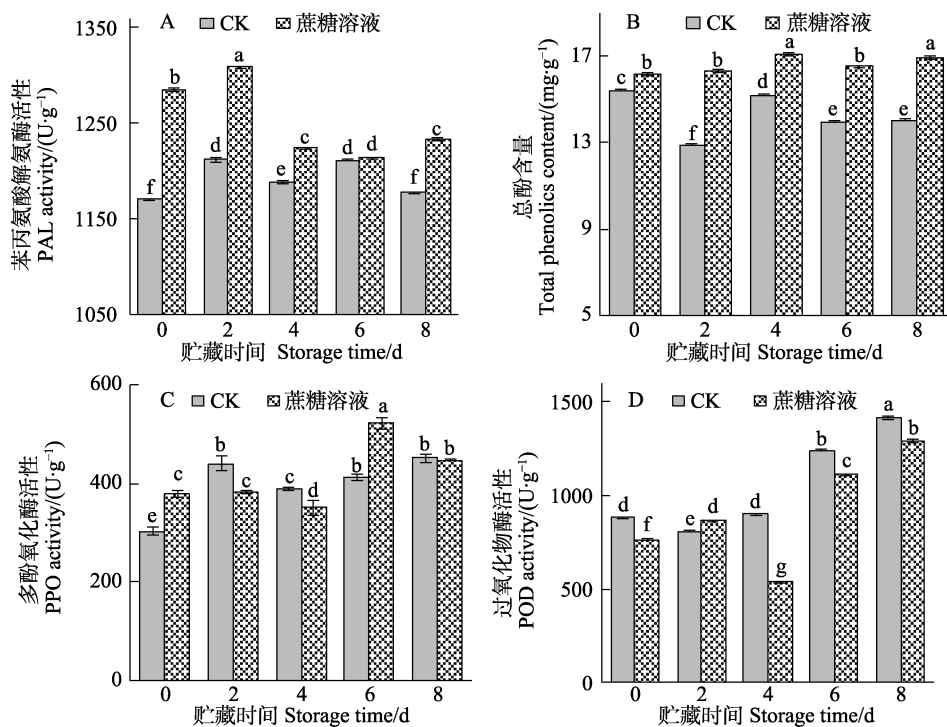


不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 3 采前蔗糖处理对荔枝果肉中 TSS、TA、Vc 含量的影响

Fig. 3 Effects of pre-harvest sucrose treatment on TSS, TA and Vc contents in litchi pulp



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 4 采前蔗糖处理对荔枝果皮 PAL、PPO、POD 活性和总酚含量的影响

Fig. 4 Effects of pre-harvest sucrose treatment on PAL, PPO, POD activity and total phenol content of litchi pericarp

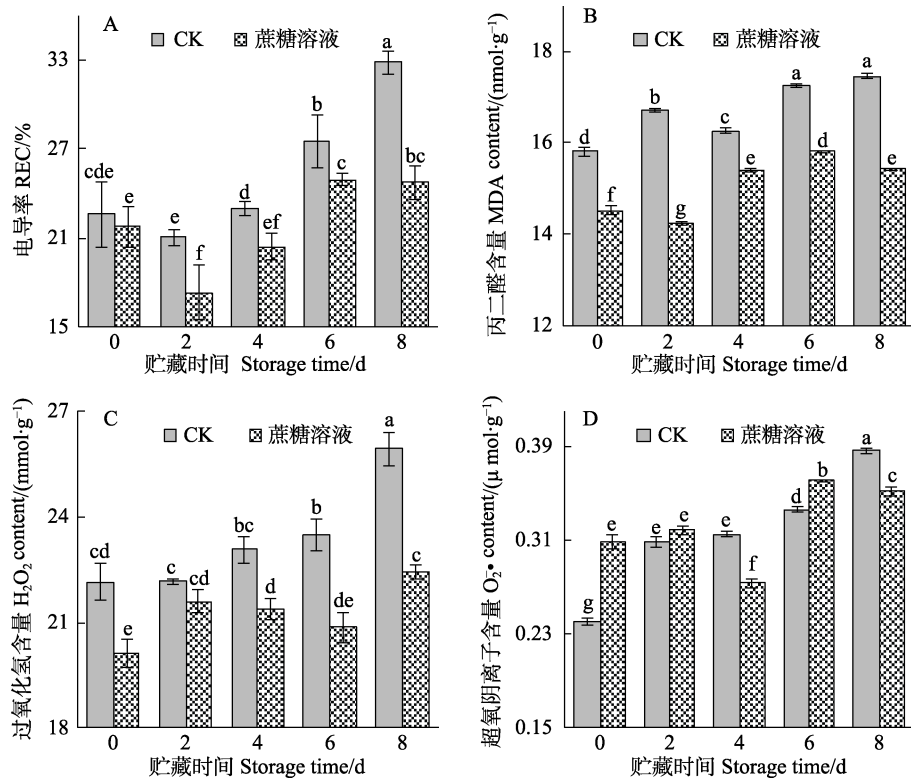
PAL 活性 ($P < 0.05$), 与对照的差异在贮藏前期大于贮藏中后期。由图 4B 可知, 蔗糖处理果实的总酚含量显著高于对照 ($P < 0.05$), 在贮藏 0、2、4、6、8 d, 分别比对照果实高 4.53%、26.67%、12.24%、18.17%、20.28%。说明蔗糖处理增强了采后荔枝果皮中 PAL 活性和总酚含量。

由图 4C 可知, 荔枝对照组 PPO 活性随贮藏时间的延长整体呈上升的趋势, 对照组在贮藏第 8 天时达到最大值, 处理组在贮藏第 6 天时达到最大值。在贮藏前期 (4 d 前), 蔗糖处理组的 PPO

含量低于对照组, 而贮藏末期对照组的 PPO 活性与处理组无明显差异。如图 4D 所示, 荔枝 POD 活性随贮藏时间的延长整体呈上升的趋势, 在贮藏期间 (除 2 d 外), 对照组与蔗糖处理组的酶活性呈现显著差异 ($P < 0.05$), 蔗糖有效降低了 POD 活性。蔗糖处理在荔枝贮藏前期抑制了 PPO 活性升高, 在贮藏中后期显著抑制 POD 活性升高。

2.5 采前蔗糖处理对采后荔枝果皮 REC、MDA、H₂O₂、O₂^{·-}含量的影响

由图 5A 可知, 荔枝果皮中 REC 随贮藏天数



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 5 采前蔗糖处理对荔枝果皮中 REC、MDA、H₂O₂、O₂^{·-}含量的影响

Fig. 5 Effects of pre-harvest sucrose treatment on REC, MDA, H₂O₂, O₂^{·-} content of litchi pericarp

的增加逐渐升高,蔗糖处理组 REC 显著低于相应对照 ($P < 0.05$)。由图 5B 可知,与对照相比,蔗糖处理在整个贮藏期间显著降低了荔枝果皮中 MDA 含量 ($P < 0.05$)。说明蔗糖处理延缓了荔枝果皮膜脂氧化和破损程度。

由图 5C 可知,荔枝果皮中 H₂O₂ 含量随贮藏天数增加整体呈上升趋势,蔗糖处理显著低于对照 ($P < 0.05$)。由图 5D 可知,对照荔枝果皮中 O₂^{·-} 含量随贮藏天数增加呈持续上升趋势,蔗糖处理荔枝 O₂^{·-} 含量与对照高低互现,于 4 d 和 8 d 显著低于对照 ($P < 0.05$)。说明蔗糖处理抑制了荔枝果皮中 H₂O₂ 和 O₂^{·-} 含量的升高。

3 讨论

荔枝采后褐变和腐烂是影响荔枝贮运的主要问题。褐变是果蔬衰老的重要标志,严重影响荔枝商品的品质和货架期^[19];病情指数和腐烂率是荔枝采后保鲜的重要指标,直观反映了荔枝果皮受病原菌侵染及损伤程度^[20]。本研究中采前蔗糖处理可以有效控制采后荔枝褐变和腐烂的发生,延长荔枝保鲜期,这与外源蔗糖在西兰花^[8]、切

花康乃馨^[21]、草莓^[22]、青花菜^[23]上的研究结果一致。

采后果实色泽的变化是荔枝果实商品价值的重要参数^[24]。色度值可以很好反映荔枝褐变和采后贮藏期间荔枝的颜色变化。已有研究发现荔枝果皮褐变程度与 L^* 值呈反比^[25]。本研究中,与对照果实相比,采前蔗糖处理提高了荔枝果皮中 L^* 值、 b^* 值,略降低 a^* 值,维持了荔枝果皮亮度与黄色。表明采前蔗糖处理可以有效维持果实采后的外观品质。

TSS、TA 和 V_c 是荔枝重要的品质指标,也是荔枝保鲜效果的重要评判标准。在本研究中,采前蔗糖处理的荔枝果实中在贮藏期间的 TSS、TA 含量与对照相比无明显差异,这与外源蔗糖处理桃果实的结果一致^[26]。而采前蔗糖处理降低了贮藏期间荔枝的 V_c 含量,这与外源蔗糖处理青花菜的结果一致^[27]。 V_c 是一种重要的抗氧化剂,在保护植物免受氧化应激侵害方面发挥着关键作用,可以保护膜免受脂质过氧化侵害^[28]。研究发现,外源 V_c 应用提高了酵母细胞抗氧化应激能力,与非 V_c 处理的细胞相比, V_c 处理的细胞表现出较低的 ROS 积累^[29]。本研究中蔗糖处理表现出更低

的 V_c 含量可能是通过消耗 V_c 含量而尽可能降低活性氧自由基的危害。

荔枝采后贮藏期间容易褐变、衰老和受到病原菌的侵染, 维持细胞膜完整性有利于增强植物的抵抗能力。相对电导率反映了植物膜系统完整性与植物组织受损伤程度^[30]。MDA 是生物细胞膜脂质过氧化的产物, 是衡量植物细胞衰老和膜脂质受损伤程度的重要指标^[31]。 H_2O_2 和 $O_2\cdot$ 过量累积会破坏核酸、氧化蛋白质, 促进衰老, 导致细胞损伤死亡, 引起膜脂质过氧化^[32]。细胞膜完整性与果皮褐变密切相关, 细胞膜完整性丧失会引起细胞区域化破坏, 从而导致酶与酚类底物直接接触产生黑色或褐色物质, 最终导致果皮褐变^[33]。CHEN 等^[34]发现茶多酚处理可降低荔枝果皮相对电导率, 延缓脂质过氧化物含量的增加, 显著延缓荔枝果皮褐变。谢晶等^[35]研究发现, 外源 NO 处理荔枝抑制 H_2O_2 和 $O_2\cdot$ 等活性氧的产生和积累, 减少 MDA 的产生和减轻膜透性, 延缓荔枝的衰老和褐变。本研究中, 蔗糖处理显著降低了荔枝果皮中相对电导率、MDA 含量、 H_2O_2 和 $O_2\cdot$ 含量, 说明蔗糖处理较好地维持了荔枝果皮膜系统的完整性, 延缓了荔枝的衰老。由于膜的完整性丧失既可导致组织褐变^[33, 36]、果实衰老^[37-38]、又可降低抗病性^[39-40], 本研究表明, 蔗糖处理维持细胞膜完整性与减轻荔枝果皮褐变和腐烂、延缓荔枝衰老均有关系。

PAL 是植物的防御系统中苯丙烷类代谢途径的第一个酶, 当遭受逆境胁迫时, 植物防御系统中苯丙烷类代谢途径被激活, PAL 活性迅速升高^[41]。甜樱桃果实抗病性增强与 PAL 活性提高有关^[42-43]。XU 等^[44]研究发现, 苯并噻二唑 (BTH) 处理提高了荔枝果实 PAL 活性, 延缓了荔枝腐烂。苯丙烷代谢是酚类物质产生的重要途径之一, 酚类物质的积累可以帮助植物在面临胁迫时有效清除活性氧自由基, 降低植物体内的氧化损伤^[45]。酚是苯丙烷代谢途径的最终产物, 不仅是植物防卫反应和抗病性密切相关的次生抗菌物质, 而且还可以作为植物组织合成木质素的底物^[46]。在猕猴桃^[47]、芒果^[48]和甜瓜^[49]水果中, 总酚含量与果实的抗病性呈正相关。本研究中蔗糖处理提高采后荔枝 PAL 活性和总酚含量, 表明其可能增强了果实的抗病性。

PPO 已被证明其活性增强能促进荔枝褐变进程, 其活性增强可能是褐变的早期标志^[50], 此外,

PPO 活性的增强可以促进酚类物质的氧化和木质素合成, 形成超氧离子活性氧自由基, 进而激发果实的活性氧自由基清除抗逆防御反应^[51]。本研究中蔗糖处理在贮藏前期抑制了 PPO 活性升高, 可能与贮藏前期延缓了处理组褐变指数升高相关, 后期 PPO 活性升高导致大量多酚氧化, 进一步产生大量活性氧自由基, 但通过消耗 V_c 而尽可能清除这些活性氧自由基, 因此, 处理的果实病情指数和腐烂率仍较低。POD 是果蔬氧化褐变的重要参与酶, 能利用活性氧自由基加速果蔬内酚类物质的氧化, 促使果皮变色^[41]。本研究中蔗糖处理在贮藏期抑制了 POD 活性升高, 可能与蔗糖处理延缓荔枝褐变程度有关。POD 清除过氧离子活性氧自由基具有重要的作用^[52], 本研究处理的 POD 活性减弱, 说明处理清除活性氧自由基的主要机制不是 POD 等保护酶清除机制, 而是通过还原性化合物如 V_c 等抗氧化保护机制。

综上所述, 采前蔗糖处理通过抑制荔枝果皮 PPO、POD 活性来减轻荔枝褐变, 通过提高荔枝果皮 PAL 活性和总酚含量来增强果实抗病性, 通过降低果皮相对 REC、MDA、 H_2O_2 和 $O_2\cdot$ 含量来延缓果实衰老, 保持细胞膜的稳定性, 进而延缓荔枝的褐变和腐烂。

参考文献

- [1] LIANG D W, LIN F Y, YANG G M, YUE X J, ZHANG Q K, ZHANG Z Q, CHEN H B. Advantages of immersion freezing for quality preservation of litchi fruit during frozen storage[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 60(2): 948-956.
- [2] ZHENG X L, TIAN S P. Effect of oxalic acid on control of postharvest browning of litchi fruit[J]. *Food Chemistry*, 2006, 96(4): 519-523.
- [3] 闫岩, 王明力, 陆雅丽. 壳聚糖膜在食品保鲜中的研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2012, 40(9): 209-212.
YAN Y, WANG M L, LU Y L. Research progress of chitosan film in food preservation[J]. *Journal of Guizhou Agricultural Science*, 2012, 40(9): 209-212. (in Chinese)
- [4] GUO R F, YUAN G F, WANG Q M. Effect of sucrose and mannitol on the accumulation of health-promoting compounds and the activity of metabolic enzymes in broccoli sprouts[J]. *Scientia Horticulturae*, 2011, 128(3): 159-165.
- [5] 裴炜, 尹京苑, 李标, 周灵灵, 梁声记, 高海燕. 生物保鲜剂 R-多糖低温保鲜荔枝的研究[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(5): 121-129.
PEI W, YIN J Y, LI B, ZHOU L L, LIANG S J, GAO H Y.

- Study on the storage of litchi with biological preservative R-polysaccharide at low temperature[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(5): 121-129. (in Chinese)
- [6] LI L, YAN X, LI J. The prolonging effect of natural plant extracts on the storage period of postharvest litchi[J]. Horticultural Science and Technology, 2021, 39(2): 254-262.
- [7] ZHIMO V Y, SAHA J, SINGH B, CHAKRABORTY I. Role of antagonistic yeast *Candida tropicalis* YZ27 on postharvest life and quality of *Litchi* cv. Bombai[J]. Current Science, 2018, 114(5): 1100.
- [8] XU F, TANG Y C, DONG S Q, SHAO X F, WANG H F, ZHENG Y H, YANG Z F. Reducing yellowing and enhancing antioxidant capacity of broccoli in storage by sucrose treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 112: 39-45.
- [9] 凌亚杰, 莫琴, 莫凡, 葛聪, 罗澍, 罗娅. 外源糖处理对草莓果实品质和主要生物活性物质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(1): 67-71.
- LING Y J, MO Q, MO F, GE C, LUO S, LUO Y. Effects of exogenous sugar treatment on fruit quality and main bioactive substances of strawberry[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2018, 36(1): 67-71. (in Chinese)
- [10] 吴振先. 荔枝采后贮藏褐变过程中的一些生理生化变化[D]. 广州: 华南农业大学, 1995.
- WU Z X. Some physiological and biochemical changes in postharvest storage browning of litchi[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 1995. (in Chinese)
- [11] 吴光旭, 刘爱媛, 陈维信. 开口箭提取物对荔枝霜疫霉菌的抑制作用及其对荔枝果实的贮藏效果[J]. 中国农业科学, 2006, 39(8): 1703-1708.
- WU G X, LIU A Y, CHEN W X. Effects of extracts of *Turpistra chinensis* on mycelia growth of *Peronophythora litchii* and storage life of litchi fruit[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, 39(8): 1703-1708. (in Chinese)
- [12] QU S S, LI M M, WANG G, YU W T, ZHU S J. Application of ABA and GA₃ alleviated browning of litchi (*Litchi chinensis* Sonn) via different strategies[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 181: 111672.
- [13] 王晶英. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 2003.
- WANG J Y. Experimental technology and principle of plant physiology and biochemistry[M]. Harbin: Northeast Forestry University Press, 2003. (in Chinese)
- [14] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- CHEN J X, WANG X F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2006. (in Chinese)
- [15] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 孟庆伟. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
- ZHAO S J, XU C C, ZOU Q, MENG Q W. Improvement of determination method of malondialdehyde in plant tissues[J]. Plant Physiology Communications, 1994, 30(3): 207-210. (in Chinese)
- [16] 李静, 聂继云, 李海飞, 徐国峰, 王孝娣, 毋永龙. Folin-酚法测定水果及其制品中总多酚含量的条件[J]. 果树学报, 2008, 25(1): 126-131.
- LI J, NIE J Y, LI H F, XU G F, WANG X D, WU Y L. On determination conditions for total polyphenols in fruits and its derived products by Folin-phenol methods[J]. Journal of Fruit Science, 2008, 25(1): 126-131. (in Chinese)
- [17] 李忠光, 宋玉泉, 龚明. 二甲酚橙法用于测定植物组织中的过氧化氢[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2007, 27(3): 50-54.
- LI Z G, SONG Y Q, GONG M. Xylenol orange method used for the measurement of hydrogen peroxide in plant tissues[J]. Journal of Yunnan Normal University (Natural Sciences Edition), 2007, 27(3): 50-54. (in Chinese)
- [18] 王爱国, 邵从本, 罗广华, 郭俊彦. 活性氧对大豆下胚轴线粒体结构与功能的损伤[J]. 植物生理学报, 1990, 16(1): 13-18.
- WANG A G, SHAO C B, LUO G H, GUO J Y. Studies on the damage of structure and function of soybean hypocotyl mitochondria by activated oxygen[J]. Plant Physiology Journal, 1990, 16(1): 13-18. (in Chinese)
- [19] WANG T, HU M J, YUAN D B, YUN Z, GAO Z Y, SU Z H, ZHANG Z K. Melatonin alleviates pericarp browning in litchi fruit by regulating membrane lipid and energy metabolisms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 111066.
- [20] BOLANOS E N A, VELAZQUEZ R C, CARDENAZ A V, SANTAMARIA I R, SILVA E M. Effect of storage temperature and time on quality in minimally processed litchi fruit (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. Journal of Food Quality, 2010, 33(3): 299-311.
- [21] PUN U K, YAMADA T, AZUMA M, LCHIMURA K. Effect of sucrose on sensitivity to ethylene and enzyme activities and gene expression involved in ethylene biosynthesis in cut carnations[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 121: 151-158.
- [22] LI D, ZHANG X C, XU Y Q, LI L, AGHDAM M S, LUO Z S. Effect of exogenous sucrose on anthocyanin synthesis in postharvest strawberry fruit[J]. Food Chemistry, 2019, 289: 112-120.
- [23] 姚迪. 光照和可溶性糖处理对青花菜保鲜效果及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- YAO D. Effects of light and soluble sugar treatments on

- quality maintenance and mechanism in postharvest broccoli florets[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] ZHANG Z K, HU M J, YUN Z, WANG J B, FENG G, SHI X Q. Effect of tea seed oil treatment on browning of litchi fruit in relation to energy status and metabolism[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 132: 97-104.
- [25] HOLCROFT D M, MITCHAM E J. Postharvest physiology and handling of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.)[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 1996, 9(3): 265-281.
- [26] 田梦瑶, 周宏胜, 唐婷婷, 张映瞳, 凌军, 罗淑芬, 李鹏霞. 外源蔗糖处理对采后桃果皮色泽形成的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(1): 177-183.
- TIAN M Y, ZHOU H S, TANG T T, ZHANG Y T, LING J, LUO S F, LI P X. Effect of exogenous sucrose treatment on color formation of postharvest peach peel[J]. *Food Science*, 2022, 43(1): 177-183. (in Chinese)
- [27] 董栓泉, 熊茜, 王春幸, 王鸿飞, 邵兴锋, 李和生, 许凤. 蔗糖在延缓青花菜黄化过程中维持其能量和抗氧化力[J]. *园艺学报*, 2016, 43(9): 1825-1833.
- DONG S Q, XIONG X, WANG C X, WANG H F, SHAO X F, LI H S, XU F. Sucrose maintains its energy and antioxidant capacity in delaying the yellowing of broccoli[J]. *Journal of Horticulture*, 2016, 43(9): 1825-1833. (in Chinese)
- [28] GALVIS SÁNCHEZ A C, GIL-IZQUIERDO A, GIL M I. Comparative study of six pear cultivars in terms of their phenolic and vitamin C contents and antioxidant capacity[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2003, 83(10): 995-1003.
- [29] LI C, ZHANG H, YANG Q. Ascorbic acid enhances oxidative stress tolerance and biological control efficacy of *Pichia caribbica* against postharvest blue mold decay of apples[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(30): 7612-7621.
- [30] 孙业民, 马兰, 李朝周. 不同类型酸胁迫对云杉叶细胞膜及其保护系统损伤机制的比较[J]. *林业科学*, 2012, 48(6): 56-62.
- SUN Y M, MA L, LI C Z. Comparison on the damage mechanism of cell membrane and its protective systems in *Picea asperata* leaves under different acid stress types[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, 48(6): 56-62. (in Chinese)
- [31] 赵天宏, 孙加伟, 付宇. 逆境胁迫下植物活性氧代谢及外源调控机理的研究进展[J]. *作物杂志*, 2008(3): 10-13.
- ZHAO T H, SUN J W, FU Y. Advances of research on metabolism of plant reactive oxygen species and exogenous regulation under abiotic stresses[J]. *Crops*, 2008(3): 10-13. (in Chinese)
- [32] FOYER C H, NOCTOR G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses[J]. *Plant Cell*, 2005, 17(7): 1866-1875.
- [33] CARO Y, JOAS J. Postharvest control of litchi pericarp browning (cv. Kwai Mi) by combined treatments of chitosan and organic acids: II. Effect of the initial water content of pericarp[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2005, 38(2): 137-144.
- [34] CHEN W R, ZHANG Z Z, SHEN Y W, DUAN X W, JIANG Y M. Effect of tea polyphenols on lipid peroxidation and antioxidant activity of litchi (*Litchi chinensis* Sonn) fruit during cold storage[J]. *Molecules*, 2014, 19(10): 16837-16850.
- [35] 谢晶, 覃子倚, 潘家丽, 李静, 董新红. 基于主成分分析的硝普钠处理对采后荔枝活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 192-198.
- XIE J, QIN Z Y, PAN J L, LI J, DONG X H. Effect of sodium nitroprusside treatment on reactive oxygen species metabolism of postharvest litchi as investigated by principal component analysis[J]. *Food Science*, 2022, 43(9): 192-198. (in Chinese)
- [36] ZHANG Z K, HUBER D J, QU H G, YUN Z, JIANG Y M. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols[J]. *Food Chemistry*, 2015, 171(15): 191-199.
- [37] 苏子寒. 外源苹果多酚对荔枝采后品质及病害的影响研究[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- SU Z H. Effect of exogenous apple polyphenols on quality and disease in harvested litchi fruit[D]. Haikou: Hainan University, 2019. (in Chinese)
- [38] 李美玲, 林育钊, 王慧, 林毅雄, 林河通. 能量状态在果蔬采后衰老中的作用及其调控研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(9): 290-295.
- LI M L, LIN Y Z, WANG H, LIN Y X, LIN H T. Recent advances in the role and regulation of energy status in senescence of harvested fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2019, 40(9): 290-295. (in Chinese)
- [39] JIANG X J, LIN H T, LIN M S, CHEN Y H, WANG H, LIN Y F. A novel chitosan formulation treatment induces disease resistance of harvested litchi fruit to *Peronophythora litchii* in association with ROS metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2018, 266(15): 299-308.
- [40] HAN A R, CAO S F, LI Y X, WANG H F, WEI Y Y, SHAO X F, XU F. Sucrose treatment suppresses programmed cell death in broccoli florets by improving mitochondrial physiological properties[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 156: 110932.
- [41] 高雪. 植物苯丙氨酸解氨酶研究进展[J]. *现代农业科技*, 2009(1): 30-33.
- GAO X. Research progress of plant phenylalanine am-

- nia-lyase[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(1): 30-33. (in Chinese)
- [42] ZHU X, CAO J, WANG Q, JIANG W. Postharvest infiltration of BTH reduces infection of mango fruits (*Mangifera indica* L. cv. Tainong) by *Colletotrichum gloeosporioides* and enhances resistance inducing compounds[J]. Journal of Phytopathology, 2008, 156(2): 68-74.
- [43] RYALS J A, NEUENSCHWANDER U H, WILLITS M G. Systemic acquired resistance[J]. The Plant Cell, 1996, 8(10): 1809.
- [44] XU D, XI P G, LIN Z, LU S H, JIANG Z B, QIAO F. Efficacy and potential mechanisms of benzothiadiazole inhibition on postharvest litchi downy blight[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 181: 111660.
- [45] PRASAD K N, YANG E, YI C, ZHAO M M, JIANG Y M. Effects of high pressure extraction on the extraction yield, total phenolic content and antioxidant activity of longan fruit pericarp[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(2): 155-159.
- [46] YIN J Y, BAI S X, WU F H, LU G Q, YANG H Q. Effect of nitric oxide on the activity of phenylalanine ammonia-lyase and antioxidative response in sweetpotato root in relation to wound-healing[J]. Postharvest Biology and Technology, 2012, 74: 125-131.
- [47] 余文琴, 赵晓玲, 林河通. 安喜布处理对冷藏猕猴桃果实衰老生理的影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(9): 333-338. SHE W Q, ZHAO X L, LIN H T. Effects of AnsiP-S (1-MCP) treatment on physiology of postharvest senescence in kiwifruit during cold storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(9): 333-338. (in Chinese)
- [48] 王彦景, 王光, 曲姗姗, 彭苗苗, 何柔静, 朱世江. 果实生长期茉莉酸甲酯处理对“红贵妃”芒果贮藏品质的影响[J]. 中国南方果树, 2020, 49(4): 67-73. WANG Y J, WANG G, QU S S, PENG M M, HE R J, ZHU S J. Effects of methyl jasmonate treatment on storage quality of ‘red imperial concubine’ mango during fruit growth[J]. South China Fruits, 2020, 49(4): 67-73. (in Chinese)
- [49] ZHANG Z K, BI Y, GE Y H, WANG J J, DENG J J, XIE D F, WANG Y. Multiple pre-harvest treatments with acibenzolar-S-methyl reduce latent infection and induce resistance in muskmelon fruit[J]. Scientia Horticulturae, 2011, 130(1): 126-132.
- [50] AVDIUSHKO S A, YE X S, KUC J. Detection of several enzymatic activities in leaf prints of cucumber plants[J]. Physiological and Molecular Plant Pathology, 1993, 42(6): 441-454.
- [51] 王彬, 陈敏氨, 朱海生, 刘建汀, 温庆放. 果蔬酶促褐变研究进展[J]. 中国农学通报, 2016, 32(28): 189-194. WANG B, CHEN M D, ZHU H S, LIU J T, WEN Q F. Research advances in enzymatic browning of fruits and vegetables[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(28): 189-194. (in Chinese)
- [52] CHAN Z, TIAN S. Induction of H₂O₂-metabolizing enzymes and total protein synthesis by antagonistic yeast and salicylic acid in harvested sweet cherry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2006, 39(3): 314-320.