

赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后品质及抗氧化能力的影响

陈 岚^{1,2}, 谷 会^{1*}, 杨 月¹, 姚全胜¹, 杜丽清^{1*}

1. 中国热带农业科学院南亚热带作物研究所/农业农村部热带果树生物学重点实验室/海南省热带园艺产品采后生理与保鲜重点实验室, 广东湛江 524091; 2. 海南大学热带农林学院, 海南海口 570228

摘 要: 火龙果营养丰富, 深受消费者喜爱, 然而火龙果采后贮藏期间易出现鳞片黄化、失水皱缩、腐烂变质等品质劣变问题, 严重影响其商品价值。本研究为了探究赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后品质及抗氧化能力的影响, 以金都一号火龙果为试验材料, 随机挑选大小均匀、成熟度一致, 完好无损的火龙果分别设置 6 种处理: 清水处理 (对照)、5 g/L 壳聚糖处理、50 mg/L 赤霉素处理、25 mg/L 赤霉素+5 g/L 壳聚糖处理、50 mg/L 赤霉素+5 g/L 壳聚糖处理、100 mg/L 赤霉素+5 g/L 壳聚糖处理, 处理后在 25 °C 下恒温贮藏, 定期测定火龙果的采后品质指标、脂氧合酶 (LOX) 活性、丙二醛 (MDA) 含量、抗氧化物质含量、抗氧化酶活性。结果表明: 50 mg/L 赤霉素+5 g/L 壳聚糖处理的火龙果能较好维持火龙果的贮藏品质, 在贮藏 12 d 后, 鳞片黄化率和失水率分别比对照降低 15.91% 和 20.75%, 果实可溶性糖含量、颜色 a^* 值和 L^* 值均显著高于其余试验组, 可溶性果胶含量显著低于其余试验组; 50 mg/L 赤霉素+5 g/L 壳聚糖处理还能维持火龙果较强的抗氧化能力, 贮藏 12 d 后, 果实丙二醛含量和脂氧合酶活性分别比对照降低 16.04% 和 19.23%, 抗氧化物质类黄酮、总酚、还原型谷胱甘肽 (GSH) 和还原型抗坏血酸 (AsA) 含量分别比对照提高 10.07%、10.00%、31.43% 和 12.93%, 抗氧化酶超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 活性分别比对照提高 17.61%、79.22% 和 15.00%。可见, 适宜浓度的赤霉素复合壳聚糖处理可有效维持火龙果采后品质, 增强果实抗氧化能力, 减轻膜脂过氧化损伤, 延缓火龙果成熟衰老, 延长保鲜期, 复合处理可作为一种绿色环保、经济有效的保鲜手段, 为火龙果采后贮运保鲜提供参考。

关键词: 赤霉素; 壳聚糖; 火龙果; 采后品质; 抗氧化能力

中图分类号: S667.9; TS255.3 文献标志码: A

Effect of Gibberellin Composite Chitosan Treatment on the Postharvest Quality and Antioxidant Capacity of Pitaya

CHEN Lan^{1,2}, GU Hui^{1*}, YANG Yue¹, YAO Quansheng¹, DU Liqing^{1*}

1. Institute of South Asian Tropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Fruit Biology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Hainan Provincial Key Laboratory of Postharvest Physiology and Preservation of Tropical Horticultural Products, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 2. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: Pitaya contains abundant nutrients and is highly preferred by consumers. However, this fruit is prone to quality deterioration problems such as yellowing of fruit scales, fruit dehydration, peel shrinkage and decay during the postharvest storage period, which seriously affect its commercial value. Jindu No.1 variety was used to investigate the effect of gibberellin composite chitosan treatment on the postharvest quality and antioxidant capacity of pitaya. Pitayas of uniform size, consistent maturity and intact condition were randomly selected for six types of treatments: water (control group), 5 g/L chitosan, 50 mg/L gibberellin, 25 mg/L gibberellin + 5 g/L chitosan, 50 mg/L gibberellin + 5 g/L chi-

收稿日期 2024-03-01; 修回日期 2024-04-11

基金项目 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (No. 1630062022006); 以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目 (优稀水果) (No. 2023KJ116)。

作者简介 陈 岚 (1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 热带果蔬采后生理与贮运保鲜。*通信作者 (Corresponding author): 谷 会 (GU Hui), E-mail: guhui0309@163.com; 杜丽清 (DU Liqing), E-mail: duliqing927618@163.com。

tosan, and 100 mg/L gibberellin + 5 g/L chitosan treatments. The pitayas were stored at a constant temperature of 25 °C after treatment, and postharvest quality indicators including lipoxygenase activity (LOX), malondialdehyde (MDA) content, antioxidant substance content and antioxidant enzyme activity were measured regularly. The results showed the well-maintained storage quality of pitayas treated with 50 mg/L gibberellin + 5 g/L chitosan. After 12 days of storage, the rate of fruit scale yellowing and water loss was reduced by 15.91% and 20.75% respectively compared with those of the control. The soluble sugar content, color a^* value and L^* value of the fruit were substantially higher than those of the other groups and the soluble pectin content was considerably lower than those in the other groups. The 50 mg/L gibberellin + 5 g/L chitosan treatment could also maintain the improved antioxidant capacity of pitaya. After 12 days of storage, MDA content and LOX activity in the fruit decreased by 16.04% and 19.23% respectively compared with the control. The content of antioxidant substances such as flavonoids, total phenols, reduced glutathione (GSH) and reduced ascorbic acid (AsA) increased by 10.07%, 10.00%, 31.43% and 12.93%, respectively. The activity of antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) increased by 17.61%, 79.22% and 15.00% respectively compared with those of the control. The gibberellin composite chitosan treatment with appropriate concentrations could effectively maintain the postharvest quality of pitaya, increase the fruit's antioxidant capacity, reduce membrane damage caused by lipid peroxidation, delay the ripening and aging of pitaya, and extend the preservation period. In addition, composite treatments could be considered a green, environmentally friendly, economical and effective preservation method that can serve as an application reference for pitaya storage, transportation and preservation industry after harvest.

Keywords: gibberellins; chitosan; pitaya; postharvest quality; antioxidant capacity

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.09.018

火龙果 (*Hylocereus undatus*) 属仙人掌科 (Cactaceae) 三角柱属 (*Hylorereus*), 为典型的热带、亚热带水果, 含有丰富的矿物质、碳水化合物、植物蛋白等营养成分, 还具有抗炎、抗氧化、保护微血管、预防贫血等功效, 深受消费者喜爱^[1]。然而, 火龙果多在高温多雨时节采收, 在采后贮运期间易出现鳞片黄化、失水皱缩、果实腐烂而丧失商品价值, 严重制约火龙果产业的发展^[2]。已有研究报道, 采用低温贮藏^[3]、1-MCP处理^[4]、气调处理^[5]等技术, 均可维持火龙果采后品质。然而, 这些采后处理方式存在成本高、药物残留、工艺复杂等问题。因此, 急需寻求一种绿色环保, 操作便捷, 成本低廉的火龙果采后保鲜技术, 延缓火龙果采后品质劣变, 延长保鲜期。

赤霉素 (gibberellin, GA) 是一种常见的植物激素, 在自然界广泛分布, 无毒害且易降解。赤霉素在参与植物生长和发育方面的研究较多, 在果蔬保鲜方面研究较少。已有研究表明, 采前施用赤霉素 GA₃ 可以延缓甜樱桃^[6]、番茄^[7]、李子^[8]等果实成熟; 在采后贮藏期间, 芒果^[9]、香蕉^[10]经 GA₃ 处理后, 能延缓营养物质降解, 保持果实贮藏品质。壳聚糖 (chitosan, CTS) 因其成膜性好、有较好的诱抗效果和抗菌性, 且绿色无毒, 已广泛应用于果蔬保鲜领域, 在采后番木瓜^[11]、甜瓜^[12]、黄皮^[13]等果实上均表现出较好的

保鲜效果。然而赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后品质及抗氧化能力的影响尚无报道。因此, 本研究以此为切入点, 阐明赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果贮藏品质、膜脂过氧化水平、抗氧化物质及抗氧化酶活性等的影响, 旨在为火龙果采后贮运保鲜提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试材料 本试验所用的火龙果品种为金都一号, 2023年9月4日采自广东湛江遂溪县火龙果基地, 采收成熟度为7成熟(花后30 d), 果肉可溶性糖含量为49.52 mg/g, 选取大小一致, 果面干净且无机械伤和病虫害的果实, 立即运回中国热带农业科学院南亚热带作物研究所采后保鲜实验室, 在空调房预冷至25 °C后待处理。

试剂: 壳聚糖购自上海阿拉丁生化科技有限公司, 低黏度<200 mpa.s, 分析纯; 赤霉素 GA₃ 购自上海恒斐生物科技有限公司, 分析纯。

1.1.2 仪器与设备 UV-2700 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; Thermo 900 超低温冰箱, 美国 Thermo Fisher 公司; IKA 磁力加热恒温搅拌器, 德国 IKA 公司; SOP 型电子天平, 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司; DS-700D 分光测色仪, 杭州彩谱科技有限公司。

1.2 方法

1.2.1 赤霉素-壳聚糖复合溶液配制 前期预试验观察了 3、5、7、10 g/L 壳聚糖处理后火龙果的表观变化,结果表明,与清水对照相比较,5 g/L 壳聚糖喷涂处理,果实腐烂程度最低,保鲜效果最好,确定 5 g/L 壳聚糖为后续的处理条件。将壳聚糖加入体积分数为 0.5%冰乙酸溶液后,在磁力搅拌器 1000 r/min 转速下搅拌,使壳聚糖完全溶解,达到 5 g/L 壳聚糖溶液的终浓度,将不同浓度的 GA₃ 先用少量无水乙醇溶解,之后加入壳聚糖溶液中,搅匀后静置,装入喷壶待用。

1.2.2 火龙果采后处理 将挑选出来的火龙果随机分成 6 组,并在 250 mg/L 咪鲜胺水溶液中浸泡 3 min,晾干后进行喷雾处理,6 组处理:第一组为对照组(CK),喷清水;第二组为壳聚糖组(CTS),喷 5 g/L 的 CTS 溶液;第三组为赤霉素组(GA50),喷 50 mg/L GA₃ 水溶液;第四组、第五组、第六组为复合处理组(CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100),分别喷 5 g/L CTS+25 mg/L GA₃、5 g/L CTS+50 mg/L GA₃、5 g/L CTS+100 mg/L GA₃ 的复合液,自然晾干后装入 30 μm 厚的 PE 保鲜袋内松口包扎,置于 25 °C 恒温箱贮藏。每隔 3 d 取样观察并测定相关指标。

1.2.3 指标测定 (1)失水率和鳞片黄化率的测定。失水率测定参考陈勇等^[14]的方法,采用称重法,采收当天每处理随机选取 10 个火龙果进行固定跟踪称重,每隔 3 d 称重 1 次,计算贮藏期间的水分损失。失水率=(贮藏 0 d 质量-贮藏 n d 质量)/贮藏 0 d 质量×100%。火龙果鳞片黄化率的计数方法为发生黄化的鳞片个数占总鳞片个数的百分比,单位为%。

(2)果皮颜色和可溶性糖的测定。用分光测色仪测定火龙果的果皮色度值, L^* 值表示亮度,值越大,表示果皮颜色越鲜艳; a^* 值表示红绿色度, a^* 值为正,表示颜色为红色, a^* 值为负,表示颜色为绿色。可溶性糖含量采用蒽酮比色法,每处理随机选取 3 个火龙果,取赤道附近果皮以下 1 cm 的果肉,称量 0.1 g,采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒进行测定,结果以 mg/g 表示。

(3)脂氧合酶活性、丙二醛和可溶性果胶含量的测定。火龙果处理方法同 1.2.2,各试验组每隔 3 d 选取 3 个火龙果进行取样,取样部位是果皮,将火龙果鳞片剪除,取赤道附近 2 cm 宽的一

圈果皮,液氮速冻,研磨成粉后待测。脂氧合酶(LOX)活性、丙二醛(MDA)和可溶性果胶含量均采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒进行测定。LOX 活性以 U/g 表示,MDA 含量以 nmol/g 表示,可溶性果胶含量以 mg/g 表示,所有测定均重复 3 次。

(4)火龙果抗氧化物质含量和抗氧化相关酶活性测定。火龙果处理和取样方法同 1.2.2 和 1.2.3-(3),抗氧化物质含量和抗氧化酶活性均采用苏州科铭生物技术有限公司生产的试剂盒进行测定。抗氧化物质总酚和类黄酮含量均以 mg/g 表示,还原型谷胱甘肽(GSH)含量以 μmol/g 表示,还原型抗坏血酸(AsA)含量以 μg/g 表示。超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性均以 U/g 表示,所有测定均重复 3 次。

1.3 数据处理

采用 Excel 2023 软件统计试验数据,计算出平均值和标准差并制图;采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析(ANOVA),Duncan's 多重比较分析显著性差异。

2 结果与分析

2.1 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后外观品质的影响

由图 1A 可知,在火龙果贮藏第 3 天,各试验组均开始出现鳞片黄化现象,随贮藏时间的延长,黄化率持续升高。在贮藏期 3~6 d,CK 和 CTS+GA25 黄化率显著高于其余处理组($P<0.05$),在贮藏后期,CTS+GA50 明显低于其他试验组,贮藏 12 d,CK、CTS、GA50、CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100 的鳞片黄化率分别为 100%、100%、93.01%、98.56%、84.09%、97.03%。可见,CTS+GA50 处理效果最优,可有效抑制鳞片黄化率的上升,延缓火龙果的衰老。

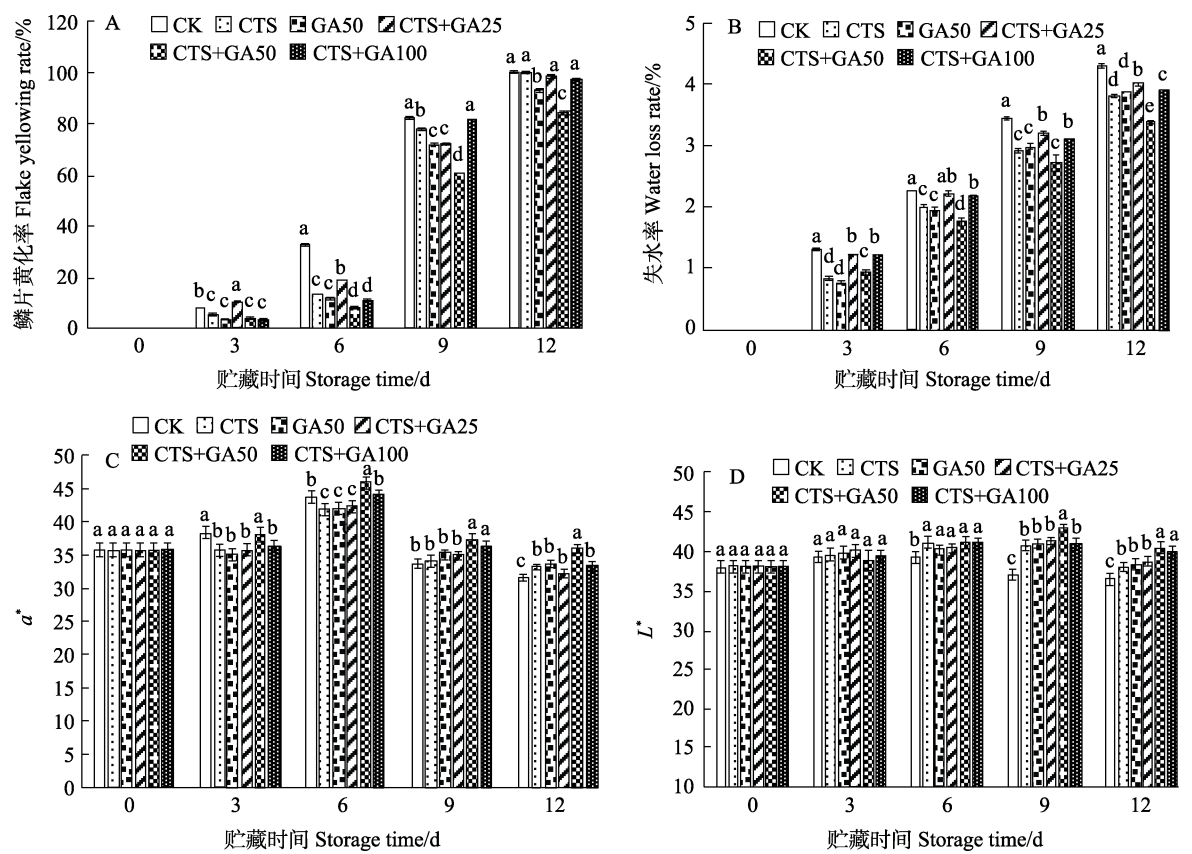
由图 1B 可知,随着火龙果贮藏时间的延长,果实失水率逐渐升高,且 CK 火龙果的失水率始终高于各处理组。各处理组在贮藏期间也存在差异,在贮藏 3~9 d,CTS+GA25 和 CTS+GA100 之间的失水率无明显差异,均低于 CK,而 CTS、GA50 和 CTS+GA50 之间的失水率差异不大,低于其他两组。在贮藏 6~12 d,CTS+GA50 处理的失水率均显著低于其他组($P<0.05$),在贮藏第 12 天,CTS+GA50 比 CK 降低 20.75%。可见,

CTS+GA50 保水效果最好,可显著降低火龙果贮藏期间的水分流失。

由图 1C 可知,在贮藏过程中火龙果果皮 a^* 值的变化整体呈先上升后下降趋势。在贮藏前期各试验组 a^* 值均上升,其中 CTS+GA50 的 a^* 值显著高于其他处理组,在第 6 天各组均出现峰值 43.82、41.83、42.01、42.22、45.96、43.87,随后降低,贮藏 9~12 d,CTS+GA50 显著延缓火龙果皮色度 a^* 值的下降 ($P<0.05$),第 12 天, a^* 值比 CK 提高了 13.29%。说明 CTS+GA50 处理能有效保持果实

红色,较好维持火龙果的表观品质。

由图 1D 可知,火龙果贮藏期间 CK 的果皮 L^* 值总体呈下降趋势,而处理组的 L^* 值呈先升后降的趋势。在贮藏 0~3 d,各试验组无显著差异;贮藏 6~9 d,各处理的 L^* 值显著高于 CK,而各处理间无明显差异;贮藏 9 d,各处理的 L^* 值达到峰值;贮藏 12 d 各试验组的 L^* 值分别为 36.34、37.87、38.27、38.68、40.4、39.81,其中 CTS+GA50 的 L^* 值最高。可见,CTS+GA50 可延缓 L^* 值降低,保持火龙果的鲜艳度。



不同小写字母表示相同贮藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same storage time ($P<0.05$).
图 1 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果外观品质的变化

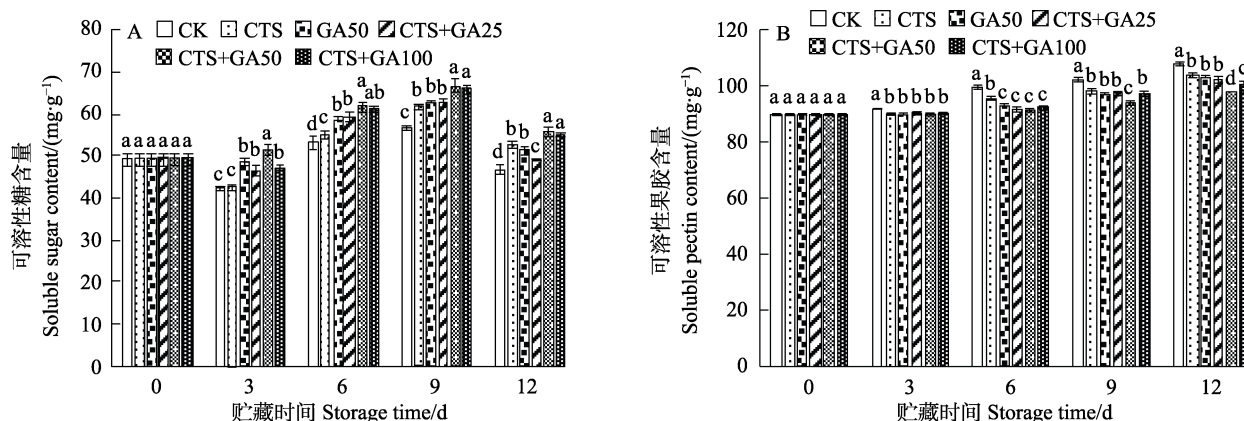
Fig. 1 Changes in exterior quality of pitaya after gibberellin composite chitosan treatments

2.2 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果可溶性糖和可溶性果胶含量的影响

如图 2A 所示,采后火龙果的可溶性糖含量整体呈先上升后下降的趋势,各试验组均在第 9 天到达峰值 56.76、61.87、62.45、62.74、66.95、66.18 mg/g,在贮藏 6~12 d,各处理组可溶性糖含量显著高于 CK ($P<0.05$),其中 CTS+GA50 和 CTS+GA100 可溶性糖含量最高,贮藏 12 d,可溶性糖含量分别为 55.87、55.10 mg/g,而 CK 只有 46.75 mg/g。可见,

CTS+GA50 可有效减缓火龙果可溶性糖含量下降。

可溶性果胶含量变化如图 2B,在整个贮藏期间均持续上升,CK 上升幅度最高且均显著高于各处理组 ($P<0.05$)。在贮藏前期,各处理组间无显著性差异。贮藏 6~12 d,各试验组可溶性果胶含量开始升高并呈现差异,其中 CTS+GA50 可溶性果胶含量最低,贮藏 12 d 比 CK 降低 9.26%。可见,CTS+GA50 能抑制火龙果可溶性果胶含量的上升,有效延迟火龙果采后软化,维持采后品质。



不同小写字母表示相同贮藏时间不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference between treatments at the same storage time ($P<0.05$).

图 2 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果可溶性糖 (A)、可溶性果胶 (B) 含量的变化

Fig. 2 Changes in soluble sugar (A) and soluble pectin (B) content of pitaya after gibberellin composite chitosan treatments

2.3 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后膜脂过氧化水平的影响

如图 3A 所示,火龙果贮藏期间 CK 和处理组的 LOX 活性均呈现相同变化趋势,先降低后升高。在贮藏期 0~6 d 组间差异显著 ($P<0.05$),但降幅均较为平缓。贮藏 6 d,CK 的 LOX 活性上升迅速,到贮藏 12 d,为 26.21 U/g,而 CTS+GA50 组在贮藏后期上升缓慢,显著低于 CK ($P<0.05$),到第 12 天仅为 CK 的 0.81 倍。可见,CTS+GA50 处理可有效抑制 LOX 活性升高。

火龙果 MDA 含量变化如图 3B 所示,在 0~3 d 呈现下降趋势,之后均呈现上升趋势,且 CTS+GA50 处理的 MDA 含量始终显著低于 CK ($P<0.05$),在第 9 天和第 12 天,处理组比 CK 分别降低 23.25% 和 16.04%。可见,CTS+GA50 处理能有效抑制 MDA 含量上升,减少膜脂过氧化程度,维持细胞完整性,延缓火龙果果实衰老。

2.4 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后抗氧化物质含量的影响

由图 4A 可知,在贮藏期间火龙果果皮的类黄酮含量呈现先升后降的趋势,在贮藏 3~9 d,CTS+GA50 处理的类黄酮含量均显著高于 CK ($P<0.05$),且在第 9 d 时达到峰值 4.99 mg/g,比 CK 高 6.40%,差异显著 ($P<0.05$),贮藏 12 d,处理组的类黄酮含量为 4.92 mg/g,比 CK 提高 10.07%。可见,CTS+GA50 处理可有效延缓火龙果类黄酮含量下降,有利于增强火龙果果皮抗氧化性。

如图 4B 所示,在整个贮藏期间,处理组果皮的总酚含量呈现缓慢下降趋势,贮藏 12 d,总酚含量为 7.15 mg/g,较 0 d 降幅 6.04%。而 CK 在 0~6 d 总酚含量下降迅速,显著低于处理组 ($P<0.05$),CK 在贮藏 6~12 d,总酚含量呈现先上升后下降趋势,均显著低于处理组 ($P<0.05$),贮藏 12 d,CK 较 0 d 降幅达 14.59%。可见,CTS+GA50

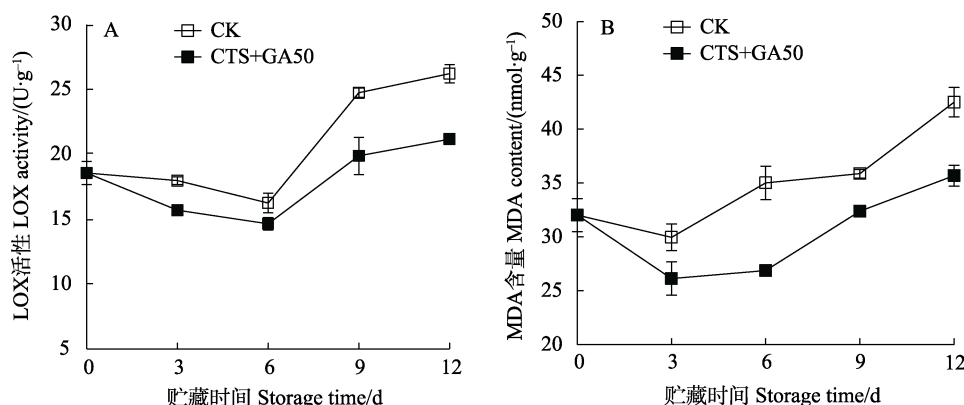


图 3 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果 LOX 活性 (A) 和 MDA 含量 (B) 的变化

Fig. 3 Changes in LOX activity (A) and MDA content (B) of pitaya after gibberellin composite chitosan treatment

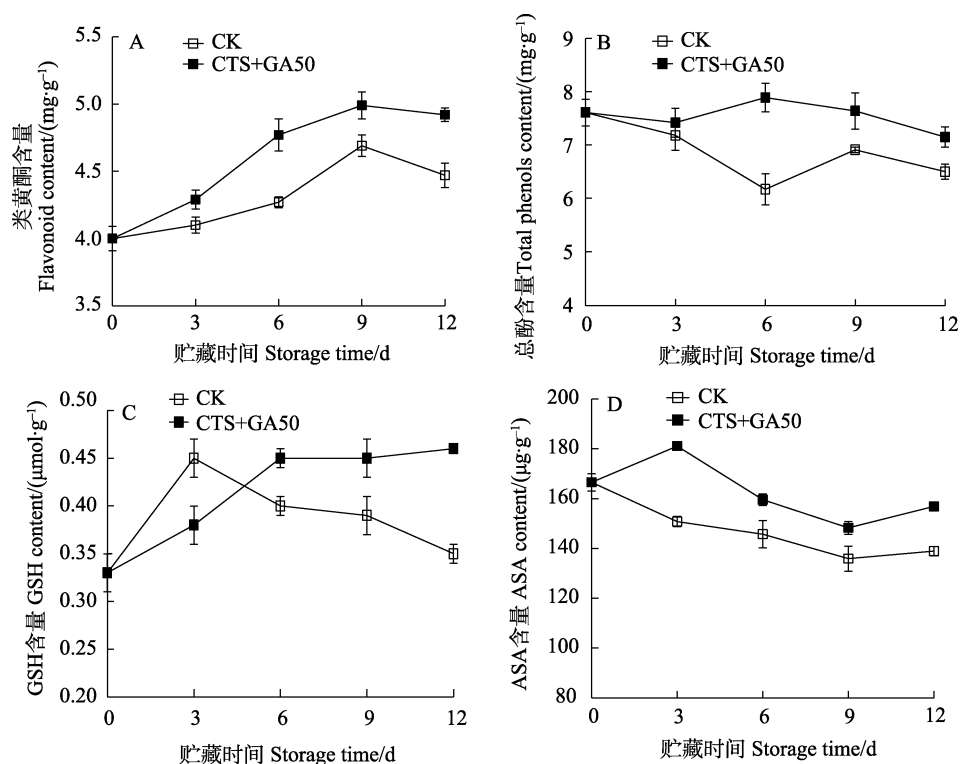


图4 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果类黄酮(A)、总酚(B)、GSH(C)、AsA(D)含量的变化
Fig. 4 Changes in flavonoid (A), total phenols (B), GSH (C) and AsA (D) content of pitaya after gibberellin composite chitosan treatment

处理能保持采后火龙果较高的总酚含量。

由图4C可以看出,在火龙果果实贮藏期间,果皮GSH含量呈现先升后降趋势。在贮藏前期CK的GSH快速积累,第3天到达峰值,组间差异显著($P<0.05$),随着贮藏时间的延长,GSH含量又迅速下降,到贮藏12d,CK的GSH含量仅 $0.35\mu\text{mol/g}$ 。而CTS+GA50在贮藏0~6d平缓上升,第6天达峰值,之后平稳下降,贮藏12d,GSH含量比CK提高31.43%。可见,CTS+GA50处理在贮藏后期可延缓GSH含量下降。

图4D可知,采后火龙果在贮藏期间AsA含量呈缓慢下降趋势,在贮藏3、6、9、12d,处理组的AsA含量分别是CK的1.20、1.10、1.09、1.13倍,且存在显著差异($P<0.05$)。可见,CTS+GA50处理有利于提高火龙果AsA含量,进而提高火龙果的抗氧化性。

2.5 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后抗氧化酶活性的影响

由图5A可知,火龙果CK和处理组的SOD活性均呈现先升后降的趋势,在贮藏0~3d组间差异不大,随着贮藏时间的延长,SOD活性迅速上升,贮藏9d时达峰值,贮藏6~12d,CTS+GA50处理

的SOD活性均显著高于CK($P<0.05$),贮藏12d,比CK提高17.61%。可见,CTS+GA50处理可提高SOD活性,清除过多自由基,延缓火龙果衰老。

由图5B所示,在火龙果贮藏期间CK和处理组的POD活性呈先升后降的趋势,到贮藏6d达峰值。整个贮藏期间,CTS+GA50处理的POD活性均显著高于CK($P<0.05$),在贮藏12d,CTS+GA50处理组POD活性为 190.90 U/g ,比CK提高79.22%。说明CTS+GA50处理可保持火龙果较高的POD活性。

如图5C所示,在贮藏期间,火龙果CAT活性呈先上升后下降趋势,在贮藏9d达峰值,处理组CAT活性在整个贮藏期均显著高于CK($P<0.05$),处理组12d的CAT活性比CK提高15.01%。可见,CTS+GA50处理能提高火龙果的CAT活性进而提高其抗氧化性。

3 讨论

赤霉素是一种常见的植物激素,安全、易降解、无毒害。赤霉素参与诸多生理过程:种子萌发、茎干生长、花的形成、花药发育,赤霉素还有促进果实生长、延缓衰老的作用^[15]。本研究用

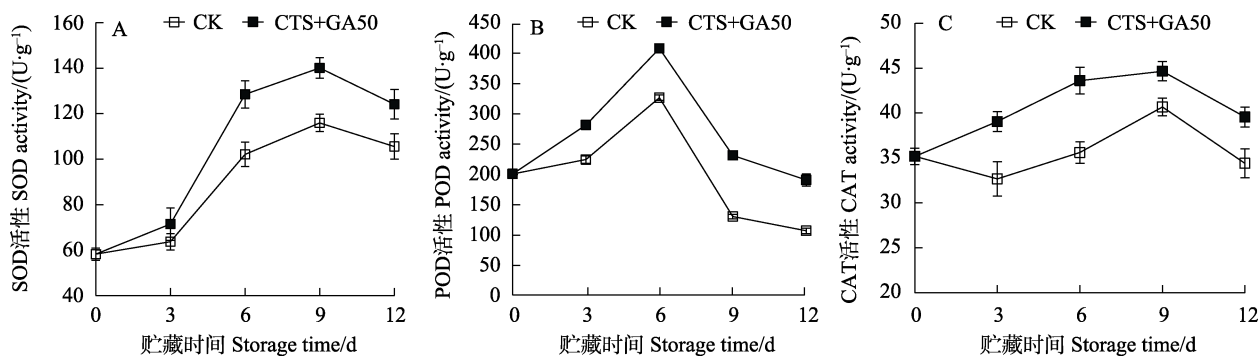


图 5 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果 SOD (A)、POD (B)、CAT (C) 活性的变化

Fig. 5 Changes in SOD (A), POD (B) and CAT (C) activity in pitaya after gibberellin composite chitosan treatment

GA50 和 CTS+GA50 处理火龙果, 贮藏 12 d, GA50 和 CTS+GA50 的贮藏品质明显优于 CK, 而赤霉素复合壳聚糖处理组的保鲜效果又明显优于单独赤霉素处理组。目前已有许多关于赤霉素调控果蔬品质方面的报道, 李佳桐等^[16]研究发现, 赤霉素处理可提高西瓜果实中心糖含量, 本研究用 CTS+GA50 处理的火龙果贮藏 12 d, 可溶性糖含量比 CK 提高 19.5%。蔡仲慧^[17]研究发现, 赤霉素处理葡萄果实的鲜艳度和红色饱和度均高于对照, 与本研究结果一致。周传悦等^[10]研究发现, GA₃ 处理后香蕉的抗坏血酸含量被氧化的速率显著降低, 本研究也发现, 在整个贮藏期间, 赤霉素处理的火龙果 AsA 含量均明显高于 CK。赤霉素可降低采后火龙果的失重率, 巴良杰等^[18]用 50 mg/L GA₃ 处理紫红火龙果, 明显降低了果实质量损失率。本研究用 CTS+GA50 处理的火龙果在贮藏 12 d, 失水率比 CK 降低 20.75%。赤霉素还可降低采后果蔬的叶片黄化率, FAN 等^[19]研究发现, 用 100 μmol/L GA₃ 处理菜心, 叶片黄化率降低 56.86%。本研究用 50 mg/L GA₃ 复合壳聚糖处理有效抑制了火龙果鳞片黄化率的上升。火龙果采后随着贮藏时间的延长, 果皮细胞壁成分会发生水解, 导致果实软化, 硬度降低。赵茹等^[20]研究发现, 赤霉素能有效减缓青皮核桃硬度的下降, 延缓组织结构衰老; 也有研究报道, 赤霉素可抑制水蜜桃细胞水解酶和果胶酶的活性, 从而延缓硬度下降^[21]。本研究赤霉素处理降低了火龙果可溶性果胶含量, 说明赤霉素处理可延缓火龙果硬度下降。壳聚糖可改善果蔬采后品质, 被广泛应用于果蔬保鲜, 本研究用赤霉素复合壳聚糖处理, 可更好维持火龙果采后品质, 一方面是由于赤霉素本身对火龙果品质的调控作用, 另一方面在于壳聚糖良好的成膜性和保水性, 壳聚糖除了对火

龙果有直接的保鲜作用外, 还可作为赤霉素的载体, 延长赤霉素在果面上的作用时间, 二者复合处理起到协同增效作用。

LOX 和 MDA 都与膜脂过氧化有关, LOX 能催化不饱和脂肪酸氧化反应, 导致膜脂过氧化, 加速果蔬衰老, MDA 作为膜脂过氧化的终产物, 积累过多会对果蔬细胞质膜和细胞器造成损害^[22]。研究发现, 采前喷洒 GA₃ 可延缓李子果肉褐变和膜脂过氧化程度, 降低 MDA 在果实内的积累^[23]。有研究报道, 适宜浓度的赤霉素处理能显著降低盐胁迫下万寿菊幼苗 MDA 含量^[24]。也有研究发现, 壳聚糖处理能抑制采后纽荷尔脐橙果实 MDA 的积累^[25]。本研究 CTS+GA50 可有效抑制采后火龙果 LOX 活性和 MDA 含量的升高, 延缓果实衰老, 其原因可能是壳聚糖膜有微气调作用, 形成低氧环境降低了果实呼吸作用; 另一方面也可能是复合处理提升了果实内源赤霉素含量, 维持了果实细胞旺盛的生理代谢, 进而减轻了果实膜脂过氧化损伤。

类黄酮和 GSH 有清除植物体内自由基和活性氧的作用, 以保护细胞膜结构和功能的完整性。本研究 CTS+GA50 处理均提高了火龙果类黄酮和 GSH 含量。有研究发现, 50 mg/L 外源 GA₃ 可以显著提高银杏叶中总黄酮含量^[26], 这与本研究结果一致, 也有报道嘎啦苹果果皮类黄酮含量随外源 GA₃ 浓度的增大而增大^[27]。在长期的系统进化过程中, 植物细胞形成了一套防御活性氧、自由基毒害的保护机制, 其中, 活性氧清除酶系统起着主要作用, SOD、CAT、POD 等是活性氧清除酶系统中的重要保护酶, 可有效清除活性氧自由基, 维持活性氧的平衡, 防止细胞膜脂过氧化。巴良杰等^[18]研究发现, 采后紫红火龙果经赤霉素处理后, SOD、CAT、POD 活性均呈上升趋势,

也有研究报道,赤霉素处理后蜘蛛兰切花可保持较高的CAT、POD活性^[28];壳聚糖处理也可提高采后果实的抗氧化酶活性,研究发现,1%壳聚糖处理能提高番木瓜果实SOD活性,增强清除自由基的能力^[29],2%壳聚糖溶液浸泡兰考蜜瓜后,SOD和POD保持较高活性^[30],不同浓度的壳聚糖处理均可提升采后桃果实的POD活性^[31]。本研究用0.5%壳聚糖和50 mg/L的赤霉素复合处理,明显提高了火龙果SOD、CAT、POD活性,这可能是赤霉素和壳聚糖共同作用进而提高了果实的活性氧清除能力。

综上所述,不同浓度的赤霉素复合壳聚糖处理均能提升采后火龙果的贮藏品质,其中以50 mg/L赤霉素复合壳聚糖处理的效果最优,处理后的火龙果可维持较高的外观新鲜度,较低的黄化率和失水率,且果实可溶性糖含量明显提高。复合处理提高了火龙果抗氧化物质含量和抗氧化酶活性,增强了火龙果采后抗氧化能力,清除过多的活性氧自由基,降低了果实膜脂过氧化程度,维持了果实质膜的完整性,延缓火龙果衰老进而延长保鲜期。

参考文献

- [1] IBRAHIM S R M, MOHAMED G A, KHEDR A I M, ZAYED M F, EL-KHOLY A A S. Genus *Hylocereus*: beneficial phytochemicals, nutritional importance, and biological relevance-a review[J]. Journal of Food Biochemistry, 2018, 42(2): e12491.
- [2] 陈勇, 刘和平, 唐海尧, 张俊丽, 林剑波. 火龙果保鲜技术研究进展[J]. 现代园艺, 2021, 44(1): 9-10.
CHEN Y, LIU H P, TANG H Y, ZHANG J L, LIN J B. Research progress on preservation technology of pitaya[J]. Contemporary Horticulture, 2021, 44(1): 9-10. (in Chinese)
- [3] FREITAS S T, MITCHAM E J. Quality of pitaya fruit (*Hylocereus undatus*) as influenced by storage temperature and pack aging[J]. Scientia Agricola, 2013, 70: 257-262.
- [4] 方垚, 陈于陇, 徐玉娟, 吴继军, 肖更生, 傅曼琴, 邹波. 1-MCP 抑制纸片对火龙果贮藏品质的影响[J]. 广东农业科学, 2016, 43(1): 105-110.
FANG Y, CHEN Y L, XU Y J, WU J J, XIAO G S, FU M Q, ZOU B. Effects of 1-MCP inhibition slip on storage quality of pitaya[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2016, 43(1): 105-110. (in Chinese)
- [5] 巴良杰, 曹森, 马超, 吉宁, 王瑞, 罗冬兰. 自发气调包装对火龙果采后贮藏品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 32-37.
- [6] BA L J, CAO S, MA C, JI N, WANG R, LUO D L. Effect of modified atmosphere packaging on the storage quality of pitaya fruit[J]. Food Research and Development, 2019, 40(23): 32-37. (in Chinese)
- [7] KUHA N, MALDONADO J, PONCE C, ARELLANO M, TIME A, MULTARI S, MARTENS S, CARREERA E, DONOSO J M, MEISEL B S L. RNAseq reveals different transcriptomic responses to GA₃ in early and midseason varieties before ripening initiation in sweet cherry fruits[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 13075.
- [8] LI H, WU H, QI Q, LI H H, LI Z F, CHEN S, DING Q Q, WANG Q Z, YAN Z M, GAI Y, JIANG X N, DING J, GU T T, HOU X L, RICHARD M, ZHAO Y D, LI Y. Gibberellins play a role in regulating tomato fruit ripening[J]. Plant and Cell Physiology, 2019, 60(7): 1619-1629.
- [9] EROGUL D, SEN F. The effect of preharvest gibberellic acid applications on fruit quality of 'Angelino' plums during storage[J]. Scientia Horticulturae, 2016, 202: 111-116.
- [10] 黄铭慧. 外源赤霉素处理对'贵妃'芒果贮藏品质、采后生理及催熟品质的影响[D]. 海口: 海南大学, 2015.
HUANG M H. Effects of exogenous GA₃ treatment on the storage quality, post-harvest physiology and ripening quality of 'Guifei' mango[D]. Haikou: Hainan University, 2015. (in Chinese)
- [11] 周传悦, 程谦伟, 张定宇, 孟陆丽, 石玉秋, 陈通, 胡波, 杨菊, 莫斯敏. 外源赤霉素处理对采后香蕉生理生化的影响[J]. 中国南方果树, 2023, 52(2): 78-83.
ZHOU C Y, CHENG Q W, ZHANG D Y, MENG L L, SHI Y Q, CHEN T, HU B, YANG J, MO S M. Effects of exogenous gibberellin treatment on the physiological and biochemical characteristics of postharvest bananas[J]. South China Fruits, 2023, 52(2): 78-83. (in Chinese)
- [12] 陈晓晶, 帅希祥, 杜丽清, 谷会. 热处理复合香茅精油处理对番木瓜保鲜效果及软化相关酶活性的影响[J]. 热带作物学报, 2021, 42(10): 3017-3024.
CHEN X J, SHUAI X X, DU L Q, GU H. Effects of heat combined citronella essential oil treatment on the preservation and softening related enzymes of papaya[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(10): 3017-3024. (in Chinese)
- [13] 孙浩轩, 王佳江, 李岩, 张冲. 壳聚糖和乙醇复合处理对薄皮甜瓜采后贮藏品质的影响[J]. 北方园艺, 2023(14): 105-111.
SUN H X, WANG J J, LI Y, ZHANG C. The effect of chitosan and ethanol composite treatment on the post harvest storage quality of thin skinned sweet melons[J]. North Hor-

- ticulture, 2023(14): 105-111. (in Chinese)
- [13] 苏秀芳, 吴霞明, 农华, 陈永. 壳聚糖复合涂膜法在细叶黄皮果保鲜中的应用研究[J]. 中国果菜, 2023, 43(8): 4-11. SU X F, WU X M, NONG H, CHEN Y. Research on the application of chitosan coating package in the preservation of *Clausenaanissum-olens*[J]. China Fruit & Vegetable, 2023, 43(8): 4-11. (in Chinese)
- [14] 陈勇, 刘和平, 唐海尧, 张俊丽, 林剑波. 硝酸钙浸泡处理对鲜切火龙果贮藏效果的影响[J]. 现代园艺, 2021, 44(19): 10-11, 13. CHEN Y, LIU H P, TANG H Y, ZHANG J L, LIN J B. The effect of calcium nitrate soaking treatment on the storage effect of fresh cut dragon fruit[J]. Contemporary Horticulture, 2021, 44(19): 10-11, 13. (in Chinese)
- [15] YAMAGUCHI S. Gibberellin metabolism and its regulation[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 225-251.
- [16] 李佳桐, 李慧普, 张鹏辉, 董连新. 不同植物生长调节剂处理对西瓜产量和品质的影响[J]. 现代园艺, 2023, 46(13): 40-42. LI J T, LI H P, ZHANG P H, DONG L X. The effects of different plant growth regulators on watermelon yield and quality[J]. Contemporary Horticulture, 2023, 46(13): 40-42. (in Chinese)
- [17] 蔡仲慧. 不同赤霉素处理方式下葡萄果实品质与维管组织结构及功能机理关系探究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023. CAI Z H. Study on the relationship between grape berry quality and vascular structure and function mechanism under different gibberellin treatments[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023. (in Chinese)
- [18] 巴良杰, 罗冬兰. 赤霉素处理对火龙果贮藏品质的影响[J]. 包装工程, 2019, 40(13): 12-17. BA L J, LUO D L. Effect of gibberellic acid treatment on storage quality of pitaya[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(13): 12-17. (in Chinese)
- [19] FAN Z, WEI W, TAN X, SHAN W, KUANG J, LU W, SU X, LAKSHMANAN P, LIN H. A NAC transcription factor *BrNAC087* is involved in gibberellin-delayed leaf senescence in Chinese flowering cabbage[J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 181: 111673.
- [20] 赵茹, 康明丽, 张琴, 朱志强, 何爱民, 吉洋洋. 不同保鲜处理对青皮核桃贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 1-9. ZHAO R, KANG M L, ZHANG Q, ZHU Z Q, HE A M, JI Y Y. Effects of different preservation treatments on storage effect of green walnut[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 1-9. (in Chinese)
- [21] 崔志宽. 不同物理化学处理对凤凰水蜜桃保鲜效果研究[D]. 南京: 南京大学, 2014. CUI Z K. Study on the fresh-keeping effect of different physical and chemical treatments on Fenghuang honey peach[D]. Nanjing: Nanjing University, 2014. (in Chinese)
- [22] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老[J]. 西北植物学报, 2001, 21(2): 215-220. YANG S S, GAO J F. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(2): 215-220. (in Chinese)
- [23] 司敏, 伍利芬, 薛华丽, 毕阳, 李永才, 王毅. 采前赤霉素处理对李果实采后冷害的抑制及部分机理研究[J]. 中国果树, 2018(4): 4-9. SI M, WU L F, XUE H L, BI Y, LI Y C, WANG Y. Controlling chilling injury of plum with preharvest GA₃ in postharvest and its partial mechanism[J]. China Fruits, 2018(4): 4-9. (in Chinese)
- [24] 韦朝妹, 胡小京, 莫幻. 外源赤霉素对盐胁迫下万寿菊种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2022(16): 69-75. WEI C M, HU X J, MO H. Effects of exogenous gibberellins on seed germination and seedling growth of marigold under salt stress[J]. Northern Horticulture, 2022(16): 69-75. (in Chinese)
- [25] 曾玲珍, 邓礼艳, 林育钊, 林河通, 林艺芬. 壳聚糖处理对采后脐橙活性氧代谢和细胞膜透性的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5): 291-300. ZENG L Z, DENG L Y, LIN Y Z, LIN H T, LIN Y F. The effect of chitosan treatment on reactive oxygen species metabolism and cell membrane permeability in postharvest navel oranges[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 291-300. (in Chinese)
- [26] 于江珊, 张苗苗, 施江, 杨雨, 孟雪, 薛建平, 孙伟, 万会花, 盛玮. 植物激素对类黄酮代谢调控机制研究进展[J]. 中国中药杂志, 2021, 46(15): 3806-3813. YU J S, ZHANG M M, SHI J, YANG Y, MENG X, XUE J P, SUN W, WAN H H, SHENG W. Research progress on mechanism of phytohormones in regulating flavonoid metabolism[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2021, 46(15): 3806-3813. (in Chinese)
- [27] 路侠. 不同浓度赤霉素(GA₃)对‘嘎拉’苹果果形的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023. LU X. Effect of different concentration of gibberellin (GA₃) on fruit shape of ‘Gala’ apple[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [28] 杨运英, 唐希荣, 王廷芹. 不同浓度赤霉素对蜘蛛兰切花的保鲜效应[J]. 江西农业学报, 2021, 33(6): 29-33. YANG Y Y, TANG X R, WANG T Q. Effects of different concentrations of gibberellin on preservation of cut flowers of *Hymenocallis littoralis*[J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2021, 33(6): 29-33. (in Chinese)

- [29] 钟曼茜, 从心黎, 张史青, 黄绵佳. 外源壳聚糖涂膜处理番木瓜的常温保鲜效果[J]. 热带生物学报, 2016, 7(2): 220-223.
- ZHONG M X, CONG X L, ZHANG S Q, HUANG M J. The preservation effect of exogenous chitosan coating on papaya at room temperature[J]. Journal of Tropical Biology, 2016, 7(2): 220-223. (in Chinese)
- [30] 万冰, 王江洁, 庞阿倩, 姚冬, 曾毅. 壳聚糖-植酸复合涂膜对兰考蜜瓜保鲜效果的影响[J]. 现代食品, 2023, 29(11): 209-213.
- WAN B, WANG J J, PANG A Q, YAO D, ZENG Y. Effects of chitosan and phytic acid composite film on preservation of Lankao melon[J]. Modern Food, 2023, 29(11): 209-213. (in Chinese)
- [31] 范中菡, 彭雪梅, 李睿, 陈庆华, 陈松, 林立金, 胡容平. 壳聚糖对桃果实品质的影响[J]. 湖南农业科学, 2023(11): 19-24.
- FAN Z H, PENG X M, LI R, CHEN Q H, CHEN S, LIN L J, HU R P. Effect of chitosan on peach fruit quality[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2023(11): 19-24. (in Chinese)