

赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果贮藏品质及内源激素的变化

陈岚^{1,2}, 谷会^{2*}, 李娅², 周开兵¹, 杜丽清^{2*}

(1.海南大学园艺学院, 海南海口 570228)(2.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)

摘要: 该研究探讨了赤霉素复合壳聚糖处理对采后火龙果的保鲜效果及内源激素的变化, 以‘金都一号’火龙果为试材, 经复合处理后, 定期测定采后火龙果的贮藏品质及内源激素含量。结果表明: 50 mg/L 赤霉素 + 壳聚糖处理的保鲜效果最佳, 贮藏 12 d 后, 火龙果的腐烂指数、鳞片黄化率和失重率分别比对照降低了 55.56%、15.91%、20.75%, 而可溶性固形物 (TSS)、甜菜素、维生素 C (Vc) 分别比对照提高了 17.76%、24.70%、17.85%, 复合处理还提高了火龙果总抗氧化能力 (T-AOC) 和总酚的含量; 贮藏 9 d 时, 处理组的火龙果内源激素含量变化最大, 脱落酸 (ABA) 比对照降低了 1436.1 ng/g, 赤霉素 (GA₄) 和生长素 (IAA) 的含量分别提高了 0.29 ng/g 和 192.3 ng/g。可见, 50 mg/L 赤霉素 + 壳聚糖处理可维持火龙果内源激素代谢平衡, 提高火龙果的抗氧化性, 延缓火龙果贮藏品质的下降及成熟衰老, 该复合处理可作为一种绿色环保的方法应用于火龙果采后贮藏保鲜。

关键词: 火龙果; 赤霉素; 壳聚糖; 贮藏品质; 内源激素

文章编号: 1673-9078(2024)12-154-161

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.12.1451

Changes in Storage Quality and Endogenous Hormones of Pitaya after the Treatment with Gibberellin-chitosan Combination

CHEN Lan^{1,2}, GU Hui^{2*}, LI Ya², ZHOU Kaibing¹, DU Liqing^{2*}

(1.College of Horticulture, Hainan University, Haikou 570228, China)

(2.Institute of South Asian Tropical Crops, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences/Key Laboratory of Postharvest Physiology and Preservation of Tropical Horticultural Products in Hainan Province, Zhanjiang 524091, China)

Abstract: The preservation effect of the treatment with gibberellin-chitosan combination on postharvest pitaya and the changes in endogenous hormones were investigated in this study. 'Jindu No.1' pitaya was used as the test material, and the storage quality and endogenous hormone content of postharvest pitaya were regularly measured after the treatment with the

引文格式:

陈岚, 谷会, 李娅, 等. 赤霉素复合壳聚糖处理后火龙果贮藏品质及内源激素的变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(12): 154-161.

CHEN Lan, GU Hui, LI Ya, et al. Changes in storage quality and endogenous hormones of pitaya after the treatment with gibberellin-chitosan combination [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(12): 154-161.

收稿日期: 2023-12-07

基金项目: 广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目 (2023KJ116); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目 (1630062022006)

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, E-mail: 1016060391@qq.com

通讯作者: 谷会 (1980-), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 果蔬采后贮运保鲜技术, E-mail: guhui0309@163.com; 共同通讯作者: 杜丽清

(1975-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 热带农产品精深加工及副产物综合利用, E-mail: duliqing927618@163.com

combination. The results showed that the preservation effect of the treatment with 50 mg/L gibberellin+chitosan was the best. After 12 days of storage, compared with the control, the decay index, bract yellowing rate, and weight loss rate of the treated pitaya were reduced by 55.56%, 15.91%, and 20.75%, respectively, the contents of its total soluble solids (TSS), betaine and vitamin C (Vc) increased by 17.76%, 24.70%, and 17.85%, respectively, and its total antioxidant capacity (T-AOC) and total phenolic content also increased. After 9 days of storage, compared with the control, the endogenous hormone content of the treated pitaya changed the most, with its abscisic acid (ABA) content decreasing by 1 436.1 ng/g, and its contents of gibberellin (GA₄) and auxin (IAA) increasing by 0.29 ng/g and 192.3 ng/g, respectively. It can be seen that the treatment with 50 mg/L gibberellin+chitosan can maintain the metabolic balance of endogenous hormones in pitaya, improve the antioxidant capacity of pitaya and delay the decline of storage quality, ripening and senescence of pitaya. Thus, the treatment with the combination can be used as a green and environmentally friendly approach for postharvest storage and preservation of pitaya.

Key words: pitaya; gibberellin; chitosan; storage quality; endogenous hormones

火龙果 (*Hylocereus undatus*) 属于仙人掌科, 是一种典型热带水果^[1]。果实营养丰富, 富含甜菜素、不饱和脂肪酸、植物多糖、蛋白质及微量元素^[2], 具有抗氧化、降血脂的作用^[3], 深受消费者青睐。然而, 火龙果多成熟于夏秋季节, 火龙果采后极易出现鳞片干黄皱缩, 果面软化腐烂及病菌感染等现象, 影响了火龙果商品价值, 货架期缩短, 限制了火龙果产业的发展。目前火龙果保鲜技术主要有低温贮藏^[4]、气调包装^[5]、1-MCP 保鲜^[6]及涂膜保鲜。然而, 这些保鲜技术因操作繁琐, 投入过高或存在安全隐患等因素影响, 应用效果有限。因此, 探索安全、高效、便捷、经济的火龙果保鲜技术显得尤为重要。

赤霉素 (Gibberellic Acid, GA) 作为一类广泛存在的植物激素, 安全性高, 有调节生长, 保持采后品质和延缓贮藏期衰老等作用。前人研究表明, 赤霉素具有延缓猕猴桃^[7]、梨^[8]、芒果^[9]等果实后熟衰老的保鲜效果。壳聚糖 (Chitosan, CTS) 由于其绿色环保, 成膜性好, 广谱抗菌性等优点, 已被广泛应用于蜂糖李^[10]、番木瓜^[11]、芒果^[12]等多种水果保鲜, 可在水果表面提供良好的微气调环境、隔绝病菌侵染、延缓衰老等。目前, 壳聚糖复合涂膜应用于火龙果贮藏保鲜方面的研究较少, 赤霉素复合壳聚糖涂膜保鲜的研究更少。本文为了提升采后火龙果的贮藏品质, 延长货架期, 研究了不同浓度赤霉素复合壳聚糖涂膜对采后火龙果外观品质和营养品质的影响, 并进一步探索复合处理对火龙果抗氧化性及内源激素变化的影响, 以期对火龙果采后保鲜提供新途径, 并丰富火龙果采后品质保持及延缓

衰老的理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

火龙果, 购于广东湛江遂溪县某火龙果基地, 品种为‘金都一号’红心火龙果。试验所选取的火龙果均大小、成熟度一致, 果面干净且无机械、病害损伤, 采摘后立即运回湛江南亚所采后保鲜实验室冷库待处理。

1.2 仪器与试剂

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; PAL-BXIACID5 便携式数显糖酸一体折光, 日本爱拓有限公司; FHM-5 硬度计, 北京亿事达科技有限公司; 试剂有赤霉素, 无水乙醇, 吐温 80, 上海麦克林生化科技有限公司; 冰乙酸, 壳聚糖 (低粘度 < 200 mPa·s) (分析纯), 上海阿拉丁生化科技有限公司; 抗坏血酸 (分析纯), 上海蓝季科技发展有限公司; 三氯乙酸 (分析纯)、磷酸、红菲咯啉、FeCl₃、甲醇, 天津福晨化学试剂有限公司; 赤霉素 1 (Gibberellic Acid1, GA₁) 试剂盒、赤霉素 4 (Gibberellic Acid4, GA₄) 试剂盒、生长素 (Indole Acetic Acid, IAA) 试剂盒、脱落酸 (Abscisic Acid, ABA) 试剂盒, 上海恒远生物科技有限公司; 总抗氧化能力 (Total Antioxidant Capacity, T-AOC) 试剂盒, 苏州科铭生物技术有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 赤霉素壳聚糖复合溶液的制备

本文预实验筛选了 3、5、7 和 10 g/L 的壳聚糖对火龙果的采后保鲜效果, 结果发现, 5 g/L 壳聚糖喷涂处理, 果实腐烂率最低, 保鲜效果最好, 确定 5 g/L 壳聚糖为最佳质量浓度。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 1 000 r/min 转速下搅拌, 使壳聚糖完全溶解, 达到 5 g/L 壳聚糖溶液的终质量浓度, 之后将用无水乙醇溶解好的相应浓度的 GA₃ 加入壳聚糖溶液搅匀后静置, 装入喷壶待使用。

1.3.2 火龙果采后处理方法

先将火龙果置 25 °C 下预冷, 之后将火龙果随机分成 5 组, 用 250 mg/L 施保克浸泡果柄 3 min, 晾干后用复合溶液进行喷雾处理, 5 组处理分别为: A 组, 对照组 (CK), 不做其它处理; B 组, 喷涂 5 g/L 壳聚糖 (CTS); C 组, 喷涂 5 g/L 壳聚糖 + 25 mg/L GA₃ (CTS+GA25); D 组, 喷涂 5 g/L 壳聚糖 + 50 mg/L GA₃ (CTS+GA50); E 组, 喷涂 5 g/L 壳聚糖 + 100 mg/L GA₃ (CTS+GA100) 喷涂后晾干, 装入 30 μm 厚的 PE 保鲜袋内活口包扎, 置于 25 °C 下恒温贮藏。每 3 d 各处理选 3 个火龙果进行取样, 果肉取样: 赤道果皮以下 1 cm; 果皮取样: 将火龙果鳞片剪除, 赤道一圈果皮, 并测定相关指标, 实验 3 次重复。

1.4 指标测定

1.4.1 腐烂指数的测定

参照鲍远放等^[13]的分级标准, 果实腐烂面积占整果面积的百分比来划分级别: 0 级, 0 腐烂; 1 级, 0~5% (含 5%); 2 级, 5%~15% (含 15%); 3 级, 15%~30% (含 30%); 4 级, 30%~50% (含 50%); 5 级, >50%。

$$DI = \frac{\sum(N_x \cdot X)}{5\sum N_x} \times 100 \quad (1)$$

式中:

DI—腐烂指数;

X—腐烂级数;

N_x—各级别腐烂果的个数。

1.4.2 失重率和鳞片黄化率的测定

失重率测定参照陈勇等^[14]的方法, 采用称重法, 采收当天随机每组选取 10 个火龙果固定进行跟踪称重, 每次每组称重 10 个火龙果。

$$W = \frac{W_0 - W_n}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

W—失重率, %;

W₀—初始质量, g;

W_n—第 n 次取样的质量, g。

火龙果鳞片黄化率的计数方法: 发生黄化的鳞片个数占总鳞片个数的百分比, 单位: %。

1.4.3 维生素 C 的测定

参考曹健康等^[15]的分光光度计法并稍作修改。称取 2.0 g 冰浴条件研磨的火龙果鲜样, 加入 10 mL 质量浓度为 50 g/L 的三氯乙酸溶液, 超声波提取 3 min 后, 滤纸过滤, 取 1 mL 滤液, 稀释 10 倍, 混匀备用。抗坏血酸测定: 取 1 mL 稀释液, 依次加入反应试剂, 混匀后, 30 °C 水浴锅反应 1 h, 记录反应体系在波长 534 nm 吸光度值, 维生素 C 含量用 mg/100 g 表示, 重复 3 次。

1.4.4 甜菜素的测定

参考玉新爱^[16]测果皮甜菜素的方法并稍做修改。称取果肉 1 g, 加入 pH 值 5.0 体积分数为 40% 的乙醇, 冰浴研磨提取甜菜红色素, 4 °C 提取 1 h 后在 538 nm 测吸光值。

$$B = \frac{A_\lambda \times V \times n \times M \times m \times 100}{\epsilon} \quad (3)$$

式中:

B—甜菜素含量, mg/100 g

A_λ—吸光值;

V—提取液体积, mL;

N—稀释倍数;

M—标准甜菜苷摩尔分子质量 550.46;

m—火龙果质量, g;

ε—标准甜菜苷摩尔消光系数 61 600。

1.4.5 可溶性固形物、可滴定酸和硬度的测定

可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS) 和可滴定酸 (Titratable Acidity, TA) 含量测定: 将每组处理的果肉混匀打碎, 用双层纱布过滤, 取汁液用糖酸一体机测定 TSS, 将原汁液稀释 50 倍后测定 TA, 单位: %。测硬度时, 在火龙果赤道位置选取正反面 2 个点, 每处理选取 3 个果, 用硬度计进行测定, 单位: kg/cm²。

1.4.6 总酚的测定

参考曹健康等^[15]的方法, 用盐酸-甲醇溶液提

取, 以每 1 g 火龙果果肉在 10 mL 反应液中提取, 在波长 280 nm 下 OD 值变化 0.1 为 1 个活力单位 U, 结果以 U/g 表示。

1.4.7 内源激素和总抗氧化能力的测定

内源激素 GA_1 、 GA_4 、IAA 和 ABA 的含量均用酶联免疫试剂盒进行测定, 每 1 g 果皮在 10 mL 提取液中提取, 激素含量的单位均为 ng/g; 总抗氧化能力用试剂盒测定, 结果以 $\mu\text{mol/g}$ 计算, 3 次重复。

1.5 数据处理与分析

采用 Excel 2023 统计试验数据, 计算出平均值和标准差并制图; SPSS 22.0 软件来进行方差分析 (ANOVA), Duncan's 多重比较分析显著性差异 ($P < 0.05$)。

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

腐烂指数能全面且客观评价防腐效果, 是果蔬贮藏品质的衡量标准之一。由图 1a 可知, 在贮藏初期, 火龙果没有出现腐烂情况, 腐烂指数均为 0; 随着贮藏时间延长, 在贮藏 9 d 时, 尽管各处理的腐烂指数差异不大, 但对照组腐烂指数显著高于其它处理 ($P < 0.05$); 在贮藏 12 d 后, 对照组腐烂指数高达 45, 而处理组 (CTS、CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100) 比对照组降低 30.87%、33.33%、55.56%、11.11%, 可见 CTS+GA50 处理对火龙果抑制腐烂效果最佳。董真真等^[17]研究也表明, 施用 1 g/L 的 GA_3 可以有效抑制芒果果实腐烂, 腐烂指数比对照降低 35.7%; 任邦来等^[18]研究发现 200 mg/L 的赤霉素溶液涂膜处理对油桃果实腐烂具有较好的抑制作用。本研究 50 mg/L 赤霉素复合壳聚糖处理降低火龙果采后腐烂指数, 这可能是赤霉素延缓了果实衰老, 提升火龙果抗病性, 从而延缓腐烂指数的上升; 另一方面, 壳聚糖本身也有抑菌性, 壳聚糖涂膜处理还可有效隔绝病原菌侵入, 降低腐烂指数, 提升果实商品价值。

如图 1b 所示, 在整个贮藏期间, 不同处理的失重率均几乎呈直线上升, 其中对照火龙果的失重率上升最为明显, 在贮藏 12 d 时, 对照失重率达 4.29%, 显著高于处理组 ($P < 0.05$)。其中, 处理组 CTS+GA50 的失重率最小, 比对照降低了 20.75%, 而其余处理组间均无显著性差异。前人研究也发现,

用 50 mg/L 赤霉素处理的火龙果, 在低温贮藏 32 d 后, 质量损失率比对照降低 28.37%^[19]; 张秀兰等^[20]研究表明, 赤霉素和壳聚糖单独处理分别可降低在低温贮藏条件下竹笋 24.9% 和 15.2% 的失重率。可见, CTS+GA50 复合处理对火龙果的保水效果最优, 这可能与赤霉素本身维持果实细胞活性, 降低细胞失水有关, 也与壳聚糖涂膜降低果实呼吸代谢, 抑制水分的散失有关。

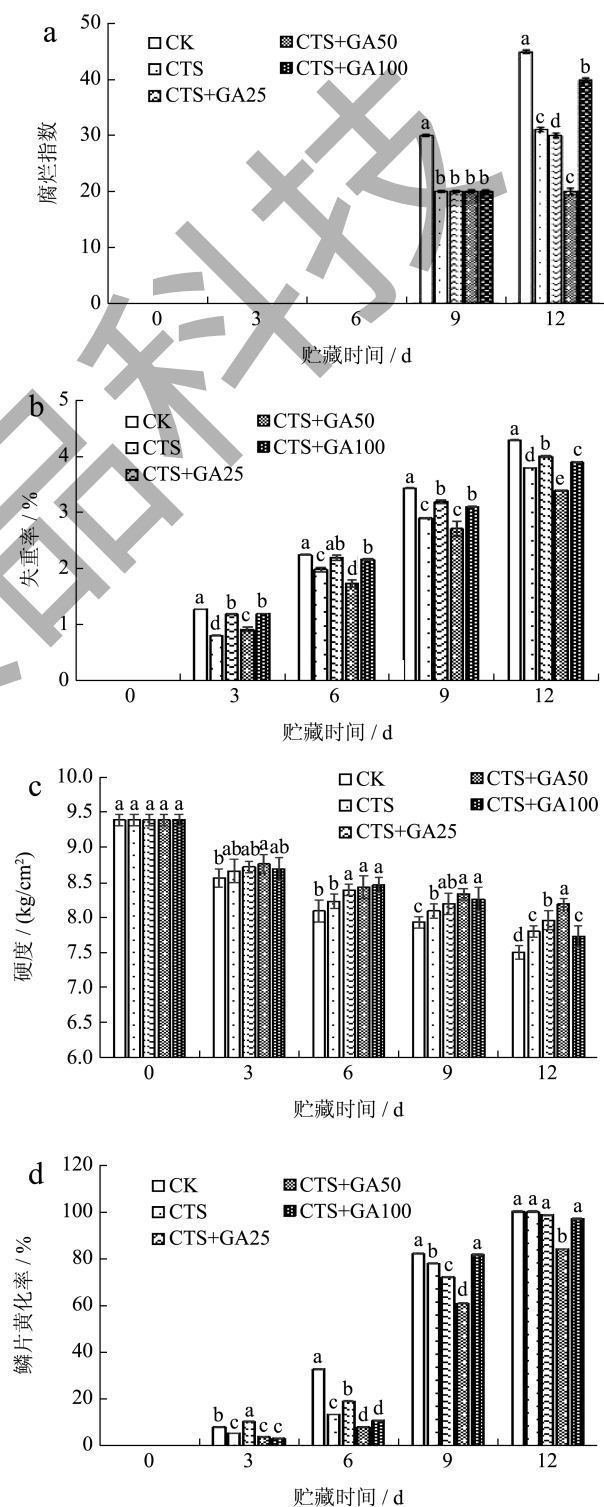




图1 火龙果在贮藏期间腐烂指数(a)、失重率(b)、硬度(c)、鳞片黄化率(d)的变化

Fig.1 Changes in decay index (a), weight loss rate (b), hardness (c), and squama yellowing rate (d) of pitaya during storage

注: e 为 CK(25 °C +12 d), f 为 CTS+GA50(25 °C +12 d)。不同小写字母表示不同处理组在同一贮藏时间点的显著性差异 ($P < 0.05$)。下同。

硬度是判断果实成熟度和贮藏品质的重要指标。由图 1c 可知, 火龙果硬度在贮藏期间整体呈现下降趋势, 但处理组硬度高于对照组。到贮藏第 12 天时, 各处理 (CK、CTS、CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100) 硬度分别是 7.5、7.8、7.96、8.19、7.73 kg/cm², 其中 CTS+GA50 的硬度最高, 且显著高于对照 ($P < 0.05$), 较好维持了果实贮藏品质。前人在猕猴桃上研究也发现, 采后施用 300 mg/L 的 GA₃ 可有效抑制不同品种猕猴桃果实的软化^[21]。本文 CTS+GA50 处理可有效抑制采后火龙果的软化, 一方面是由于复合处理组有壳聚糖膜的保护, 水分损失减少, 果肉细胞壁水解减缓, 硬度下降幅度变小; 另一方面, 赤霉素在延缓果实成熟衰老过程中较好维持了果实的硬度。

如图 1d 所示, 在火龙果果实贮藏第 3 天时, 开始出现鳞片黄化现象, 随着贮藏期的延长, 火龙果鳞片黄化率持续增加。在贮藏期 3~6 d 时, 对照和 CTS+GA25 的鳞片黄化率显著高于其余处理组 ($P < 0.05$)。在贮藏后期, CTS+GA50 复合处理显著低于各试验组 ($P < 0.05$)。贮藏第 12 天时对照组、CTS 组、CTS+GA25 组、CTS+GA50 组、CTS+GA100 组鳞片黄化率分别为 100%、100%、98.56%、84.09%、97.03%, 可见 CTS+GA50 处理组效果最优。在整个贮藏过程中, CTS+GA50 复合处理可有效抑制火龙果黄化率的增加, 延缓果实衰老, 维持较好的果实贮藏品质。贮藏后期, CTS+GA50 复合处理的效果明显优于 CTS 单独处理, 说明在此过程中赤霉素起了重要作用, 这与 Fan 等^[22]单独用 100 μmol/L 的 GA₃ 处理采后菜心得出同样结论, 处理后的菜心在 25 °C 下贮藏 7 d 后, 叶片黄化率降低 56.86%。

2.2 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果采后营养品质的影响

TSS 含量是表征果蔬采收时间和耐贮性的重要指标。如图 2a 所示, 火龙果的 TSS 含量总体呈现先升后降的趋势, 可能是贮藏前期采后火龙果后熟, TSS 含量逐渐增加, 在第 9 天达到高值但到了贮藏后期, 随着果实衰老加速, 呼吸代谢消耗又使得 TSS 含量缓慢下降。整个贮藏期内, 对照组 TSS 含量最低。贮藏 9 d 时, 各试验组 (CK、CTS、CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100) TSS 含量分别为 11.17%、11.33%、11.50%、12.1%、11.70%; 贮藏 12 d 时, 复合处理相比对照分别提高了 11.08%、17.76%、20.48%。可见, 复合处理均可以延缓贮藏后期 TSS 的下降速率, 以 CTS+GA50 与 CTS+GA100 处理的效果最佳。而吕静祎等^[8]研究表明, 采后用 50 mg/L 的 GA₃ 处理南果梨, 可减缓 TSS 含量的上升, 使果实维持较低的 TSS 含量, 贮藏 24 d 后, 处理的 TSS 含量比对照低 6.4%, 与本文研究结果相反, 这可能是由于果实种类、呼吸类型及处理方式不同引起的差异。

图 2b 可见, 不同试验处理对火龙果的可滴定酸含量均呈现随贮藏时间延长而下降的趋势。在贮藏 6~9 d, CTS+GA50、CTS+GA100 处理组显著高于其它试验组 ($P < 0.05$), 且下降幅度较小。贮藏 12 d 后, 各处理间可滴定酸含量无显著性差异, 可能是由于贮藏后期果实成熟衰老, 果实可滴定酸含量趋于一致。可见, 复合处理组可延缓火龙果贮藏前期可滴定酸含量的下降。

火龙果 Vc 在贮藏过程中易氧化损失, 整体呈下降趋势, 而对照组 Vc 的下降速度更快 (图 2c), 贮藏 12 d 后, 对照组 Vc 含量仅为 7.34 mg/100 g, CTS+GA50 处理的 Vc 含量最高, 为 8.65 mg/100 g, 比对照提高 17.85%, 且差异显著 ($P < 0.05$), 说明 50 mg/L 赤霉素复合壳聚糖处理可减缓采后火龙果 Vc 的氧化, 这与周传悦等^[23]用 50 mg/L 的 GA₃ 处理可延缓采后香蕉抗坏血酸含量下降速率的研究结果类似。

火龙果含有大量的甜菜素物质, 甜菜素不仅是天然的着色剂, 也有较强的抗氧化活性^[24]。由图 2d 可知, 在贮藏期间, 各处理组甜菜素含量均高于对照组, 其中, CTS+GA50 和 CTS+GA100 处理组含量最多, 且不同浓度赤霉素对火龙果甜菜素含量影响存在明显差异。在整个贮藏期间, 火龙果甜菜素

含量变化整体趋势呈现先升后降，在贮藏 9 d 时达到最高，此时果实达到最佳成熟度。在贮藏后期，甜菜素含量呈下降趋势，到贮藏 12 d，处理组（CTS、CTS+GA25、CTS+GA50、CTS+GA100）甜菜素含量分别较对照提高了 15.85%、17.42%、24.70%、36.32%，可见，赤霉素复合壳聚糖处理可以较好维持火龙果采后甜菜素营养品质。

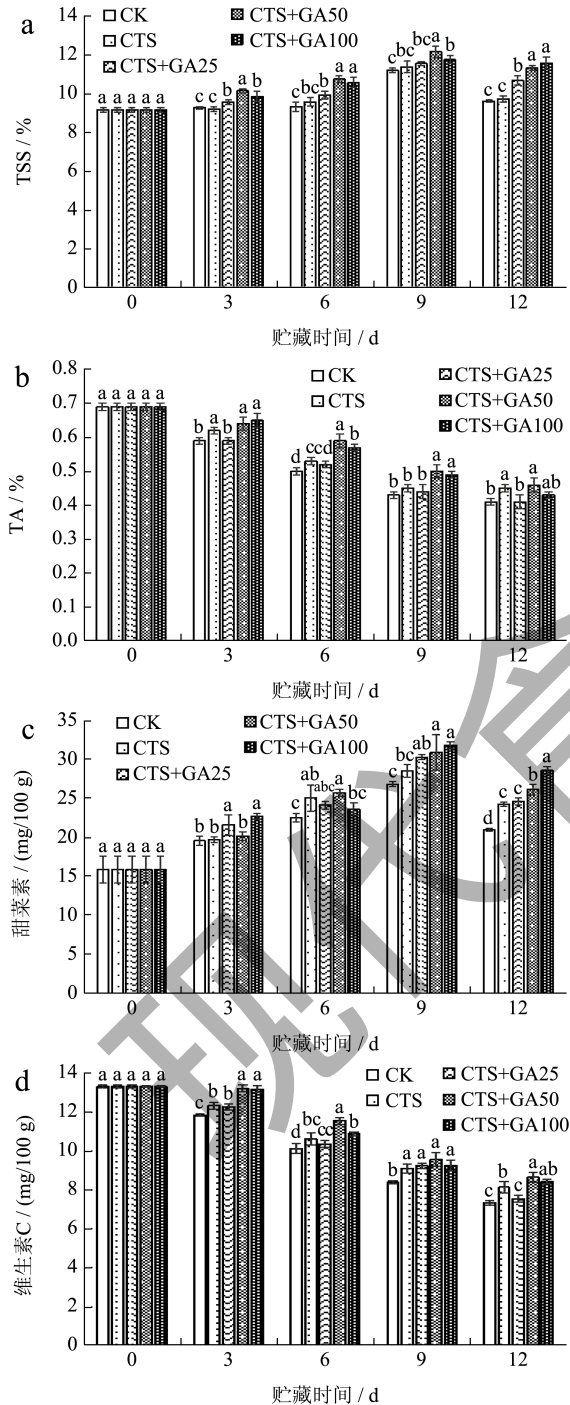


图 2 火龙果在贮藏期间 TSS (a)、TA (b)、甜菜素 (c)、Vc (d) 含量的变化

Fig.2 Changes in TSS (a), TA (b), betaine (c), and Vc (d) content of pitaya during storage

2.3 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果总酚含量和总抗氧化能力的影响

通过对不同浓度赤霉素复合壳聚糖处理后的火龙果表观指标和营养指标筛选发现，CTS+GA50 处理的保鲜效果最好，后续试验包括总酚、总抗氧化能力及内源激素的变化均以最佳处理浓度进行测定。酚类作为重要的抗氧化物质之一，能抑制过氧化反应和清除果实活性氧自由基。由图 3a 可知，在贮藏过程中 CTS+GA50 处理组总酚含量呈现先上升后下降的趋势，在贮藏 0~9 d 持续上升，第 9 天含量达到峰值 5.4 U/g。在贮藏 6~12 d，对照总酚含量变化平稳，且均显著低于处理组 ($P < 0.05$)。这与吕静涛等^[8]GA₃ 处理可提升采后南果梨总酚含量的研究结果类似，而王颖等^[25]研究发现赤霉素处理可降低早黑宝葡萄果实总酚含量，这可能与试验材料种类及采前与采后处理方式不同有关，且本研究的赤霉素复合了壳聚糖，壳聚糖良好的表面成膜性可更好提升果实的抗氧化性。

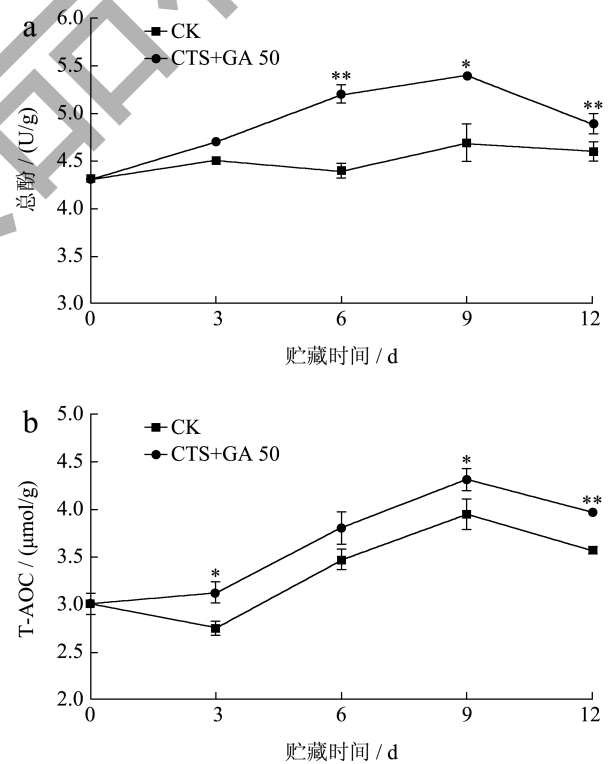


图 3 火龙果在贮藏期间的总酚含量 (a) 和 T-AOC (b) 的变化

Fig.3 Changes in total phenolic content(a) and T-AOC (b) of pitaya during storage

注：* 和 ** 分别表示显著相关 ($P < 0.05$) 和极显著相关 ($P < 0.01$)。下同。

果实 T-AOC 的提升可抑制果实活性氧的过度

积累, 延缓果实衰老。由图 3b 可以看出, 火龙果在贮藏期间, 对照组和处理组的总抗氧化能力均呈现相同的先升后降趋势, 且处理组的总抗氧化能力在 3、9、12 d 时显著高于对照组 ($P < 0.05$), 处理组总抗氧含量分别是对照组的 1.13 倍、1.09 倍、1.11 倍, 而在贮藏 9 d 后, 各处理果实的总抗氧化能力下降, 说明果实进入衰老进程, 抗氧化能力减弱。

2.4 赤霉素复合壳聚糖处理对火龙果内源激素含量的影响

图 4a 表明, 对照组和处理组 GA_1 含量在整个贮藏过程中呈先升后降的变化趋势, 在贮藏 6 d 时到达峰值, 分别为 1.06 ng/g 和 1.07 ng/g。处理组在贮藏初期 GA_1 含量极显著高于对照组 ($P < 0.01$), 但在贮藏 6 d 以后, 处理组和对照组 GA_1 含量均无显著性差异。说明复合处理对 GA_1 含量在整个贮藏过程中影响不大。

图 4b 结果显示, 在火龙果果实贮藏过程中, GA_4 含量呈先升高后下降的变化趋势, 处理组 GA_4 含量显著高于对照组 ($P < 0.05$), 处理组火龙果果皮组织中 GA_4 含量在 3.47~3.80 ng/g 之间, 贮藏 9 d 和 12 d 时, 处理后的火龙果 GA_4 含量增加较大, 分别为 0.29 ng/g 和 0.32 ng/g, 相比对照分别提高了 8.51% 和 9.44%, 温玥^[26] 研究也发现, 外施 100 mg/L 赤霉素可提高油茶果实内源赤霉素含量最高可达 55.44%。

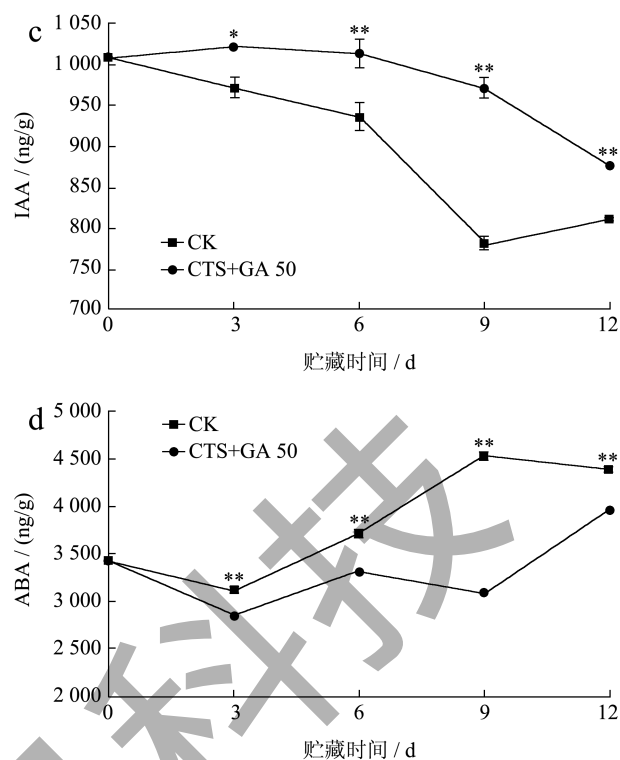
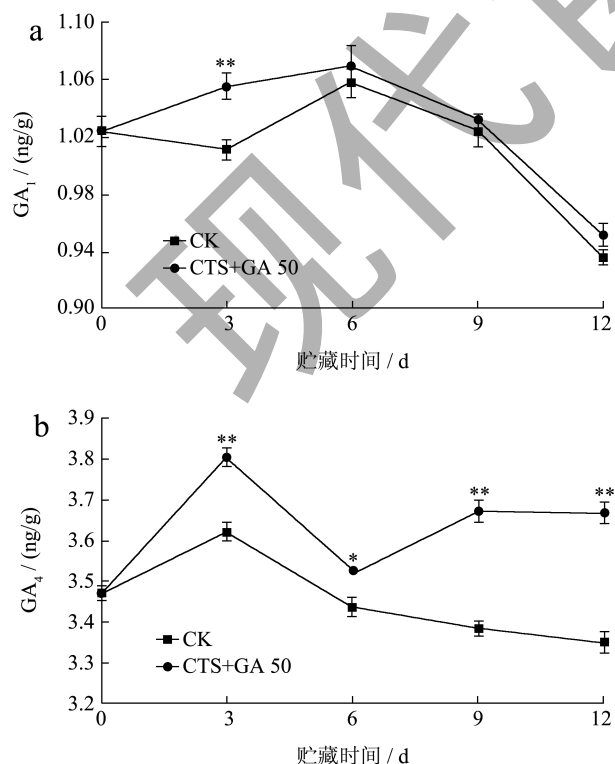


图 4 火龙果在贮藏期间 GA_1 (a)、 GA_4 (b)、IAA (c) 和 ABA (d) 含量的变化

Fig.4 Changes in GA_1 (a), GA_4 (b), IAA (c) and ABA (d) content of pitaya during storage

生长素可以促进果实细胞生长, 延迟果实成熟及衰老。在整个贮藏期间, 火龙果果皮 IAA 含量呈下降趋势 (图 4c), 且对照组 IAA 含量始终低于处理组 ($P < 0.05$)。对照组在贮藏前期下降迅速, 贮藏 9 d 时达到最低值 779.3 ng/g, 比处理组低 192.3 ng/g, 可见, 复合处理可明显延缓火龙果内源激素 IAA 含量的下降。曹柳青^[27] 研究也发现, 40 mg/L 赤霉素处理可明显延缓冬枣内源 IAA 含量的下降, 处理 7 d 后内源 IAA 比对照高 175.05 ng/g, 这可能是由于赤霉素抑制了吲哚乙酸氧化酶的产生, 从而减少了 IAA 的氧化损失。

图 4d 表明, 处理组果实 ABA 含量呈缓慢上升趋势, 而对照组呈先上升后下降趋势, 在整个贮藏过程中, 处理组果实 ABA 含量极显著低于对照组 ($P < 0.01$)。贮藏 3~9 d, 对照组 ABA 含量迅速上升, 第 9 天达到峰值 4 516.9 ng/g, 而处理组在第 9 天只有 3 080.8 ng/g, 比对照组降低了 1 436.1 ng/g; 但处理组 ABA 含量在 9 d 后迅速上升, 可能是贮藏后期果实成熟加速导致 ABA 含量上升。彭宏燕^[28] 研究也发现, 用 50 mg/L 赤霉素处理可明显延缓枇杷生长期果实内源 ABA 含量的上升, 处理 21 d 后效

果最显著, 对照组 ABA 含量是处理组的 3.2 倍, 效果明显优于本研究, 这可能是赤霉素在火龙果上的处理时期不同引起。可见, 赤霉素复合壳聚糖处理在火龙果整个贮藏期明显抑制了果实 ABA 含量的增加, 有效延缓了火龙果成熟与衰老。

3 结论

本研究探讨了赤霉素复合壳聚糖处理在采后火龙果上的保鲜效果及内源激素的变化。研究结果表明, 50 mg/L 的赤霉素复合 5 g/L 壳聚糖处理能够有效抑制采后火龙果腐烂指数和鳞片黄化率的上升、延缓果实营养品质可溶性固形物、甜菜素和维生素 C 含量的下降, 减少了果实贮藏期间的营养损失。复合处理可提高火龙果的总酚含量和总抗氧化能力, 对火龙果的保鲜效果显著。复合处理可显著提高火龙果内源激素 GA₄、IAA 的含量, 降低 ABA 的含量, 从而延缓了果实成熟与衰老。本研究的赤霉素复合壳聚糖处理为火龙果采后贮运保鲜提供了新思路。

参考文献

- [1] ZHANG X, CHEN X, DAI J, et al. Edible films of pectin extracted from dragon fruit peel: Effects of boiling water treatment on pectin and film properties [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109324.
- [2] ARIALAGAN M, KARUNAKARAN G, ROY T K, et al. Biochemical and nutritional characterization of dragon fruit (*Hylocereus* species) [J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129426.
- [3] 孙卉, 金含, 杨容容, 等. 红心火龙果功能特性及其产品开发研究进展[J]. 中国酿造, 2019, 38(7): 16-19.
- [4] FREITAS S T, MITCHAM E J. Quality of pitaya fruit (*Hylocereus undatus*) as influenced by storage temperature and packaging [J]. Scientia Agricola, 2013, 70: 257-262.
- [5] HUANG M, ZHAO J. Recent advances in postharvest storage and preservation technology of pitaya (dragon fruit) [J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 2024, 99(2): 115-129.
- [6] LIU R, GAO H, CHEN H, et al. Synergistic effect of 1-methylcyclopropene and carvacrol on preservation of red pitaya (*Hylocereus polyrhizus*) [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 588-595.
- [7] YANG H, LI J, LI X, et al. The mechanism of gibberellins treatment suppressing kiwifruit postharvest ripening processes by transcriptome analysis [J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 198: 112223.
- [8] 吕静祎, 商馥兰, 张梦媛, 等. 赤霉素处理对南果梨贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 282-286.
- [9] 李斯宇. 外源赤霉素处理对采后芒果果皮色泽形成的影响[D]. 海口: 海南大学, 2019.
- [10] 汪凯莎, 何映霞, 陶冶. 复合涂膜处理对蜂糖李采后低温贮藏品质的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(7): 29-36.
- [11] 陈晓晶, 帅希祥, 杜丽清, 等. 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.
- [12] 方静, 谷会, 姚全胜, 等. 肉桂精油复合壳聚糖乳液对采后芒果炭疽病的防治效果及作用机制[J]. 热带作物学报, 2023, 44(7): 1460-1467.
- [13] 鲍远放, 张绿萍, 郑伟, 等. BTH处理对火龙果采后抗病性及贮藏品质的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(10): 134-140.
- [14] 陈勇, 刘和平, 唐海尧, 等. 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.
- [15] 曹健康, 姜微波, 赵玉梅. 果蔬采后生理生化实验指导[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2013.
- [16] 玉新爱. 涂膜保鲜剂对火龙果贮藏品质及生理生化变化的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2015.
- [17] 董真真, 曾凤, 徐孝兰, 等. 采前喷洒赤霉素对‘红贵妃’芒果色泽及相关酶活性的影响[J]. 热带生物学报, 2017, 8(2): 178-184.
- [18] 任邦来, 张灵. 不同浓度赤霉素处理对油桃保鲜效果的影响[J]. 中国食物与营养, 2013, 19(4): 29-32.
- [19] 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.
- [20] 张秀兰, 陈伏生, 方向民, 等. 赤霉素和壳聚糖处理对冷藏毛竹笋保鲜效果的影响[J]. 江西农业大学学报, 2017, 39(4): 678-685.
- [21] 杨海英. 赤霉素对猕猴桃果实采后成熟的调控及其分子机制研究[D]. 烟台: 鲁东大学, 2023.
- [22] FAN Z, WEI W, TAN X, et al. A NAC transcription factor BrNAC087 is involved in gibberellin-delayed leaf senescence in Chinese flowering cabbage [J]. Postharvest Biology and Technology, 2021, 181: 111673.
- [23] 周传悦, 程谦伟, 张定宇, 等. 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.
- [24] HUA Q, CHEN C, ZUR N T, et al. Metabolomic characterization of pitaya fruit from three red-skinned cultivars with different pulp colors [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2018, 126: 117-125.
- [25] 王颖, 荀志丽, 黄丽萍, 等. 赤霉素处理对葡萄果实发育及品质的影响[J]. 中国果树, 2023, 5: 43-49, 55.
- [26] 温玥. 外施赤霉素和多效唑对油茶花芽形成和果实品质的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [27] 曹柳青. 赤霉素对冬枣光合作用和内源激素的影响[D]. 保定: 河北农业大学, 2006.
- [28] 彭宏燕. 赤霉素处理条件下枇杷内源激素含量测定和 Aux/IAA 基因表达初步分析[D]. 重庆: 西南大学, 2019.