

复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸在采后荔枝贮藏保鲜中的应用

程风洁¹, 刘家慧¹, 周磊², 陈飞平³, 左继浩⁴, 王锋¹, 肖更生¹, 王琴^{1*}, 刘东杰^{1*}

(1. 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225) (2. 食品科学与资源国家重点实验室, 南昌大学, 江西南昌 330047) (3. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 广东广州 510610) (4. 仲恺农业工程学院化学化工学院, 广东广州 510225)

摘要: 为了减少合成化学保鲜剂(如咪唑胺和二氧化氯)对荔枝保鲜的潜在危害, 提升荔枝的安全性和品质, 分析复合植物源保鲜剂与保鲜纸的结合应用对荔枝保鲜效果。该研究分别以未处理为对照组(Control Check, CK), 采用复合保鲜剂(Compound Preservative, CPP)、茶树精油纸(Tea Tree Essential Oil Fresh Paper, TTP)和复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸(CTP)处理荔枝, 并于4℃贮藏21 d, 对腐烂率等外观品质、花色苷等营养品质、超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase, SOD)等活性氧代谢以及多酚氧化酶(Polyphenol Oxidase, PPO)等酶促相关酶进行检测。CPP和TTP处理与CK相比腐烂率差异明显, 但CTP对荔枝腐烂率的抑制效果最强; 在贮藏至12 d, CPP、TTP、CTP的花色苷含量相对CK均显著升高了34.67%、68%和90.67%; 贮藏至21 d, CPP、TTP和CTP的丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量分别相对CK组降低了47.22%、56.83%和68.18%。并且在贮藏期间, CTP的多酚氧化酶(PPO)一直低于CPP、TTP和CK组。综合表明, 复合保鲜剂结合茶树精油纸处理方法有效减缓了活性氧的代谢, 降低了相关酶的活性, 从而维持了细胞膜的完整性, 显著延缓了荔枝的褐变, 具有良好的荔枝保鲜应用价值。

关键词: 荔枝; 茶树精油; 保鲜效果

文章编号: 1673-9078(2026)02-150-159

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1602

Combined Application of Compound Preservative and Tea Tree Essential Oil Preservation Paper in Post-harvest Lychee Storage and Preservation

CHENG Fengjie¹, LIU Jiahui¹, ZHOU Lei², CHEN Feiping³, ZUO Jihao⁴, WANG Feng¹, XIAO Gengsheng¹,
WANG Qin^{1*}, LIU Dongjie^{1*}

(1.Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Science and Technology of Lingnan Specialty Food, College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)(2.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China)(3.Sericultural & Agri-Food

引文格式:

程风洁,刘家慧,周磊,等.复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸在采后荔枝贮藏保鲜中的应用[J].现代食品科技,2026,42(2): 150-159.

CHENG Fengjie, LIU Jiahui, ZHOU Lei, et al. Combined application of compound preservative and tea tree essential oil preservation paper in post-harvest lychee storage and preservation [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 150-159.

收稿日期: 2024-10-29

基金项目: 广东省省级科技计划项目(2024B0202010007; 2023B0202090005)

作者简介: 程风洁(2001-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: cfj587412369@163.com

通讯作者: 王琴(1973-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 453363736@qq.com; 共同通讯作者: 刘东杰(1987-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬贮藏与加工, E-mail: djliu412@163.com

Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)(4.School of Chemistry and Chemical Engineering, Zhongkai Agricultural Engineering College, Guangzhou 510225, China)

Abstract: To reduce the potential hazards of synthetic chemical preservatives (e.g., prochloraz and chlorine dioxide) on lychee (*Litchi chinensis* Sonn.) preservation and enhance its safety and quality, the preservation effects of the combined use of a compound plant-based preservative and preservation paper were analyzed. Lychees were treated with a compound preservative (CPP) alone, tea tree essential oil paper (TTP) alone, or a combination of CPP and TTP (CTP); untreated lychees served as the control (control check, CK) group. The treated lychees were stored at 4 °C for 21 days, during which appearance qualities, such as decay rate, nutritional qualities, such as anthocyanin content, metabolism of reactive oxygen species (ROS), such as superoxide dismutase (SOD), and activities of related enzymes, such as polyphenol oxidase (PPO), were assessed. The results showed significant differences in the decay rate between the CPP and TTP treatment groups and the CK group; CTP exerted the most potent inhibitory effect on lychee decay rate. After 12 days of storage, the anthocyanin content in the CPP, TTP, and CTP groups significantly increased by 34.67%, 68%, and 90.67%, respectively, compared with that in the CK group. After 21 days of storage, the malondialdehyde (MDA) content in the CPP, TTP, and CTP groups decreased by 47.22%, 56.83%, and 68.18%, respectively, compared with that in the CK group. During storage, the PPO activity in the CTP group was consistently lower than that in the CPP, TTP, and CK groups. In conclusion, combination treatment with CPP and TTP effectively mitigated the metabolism of ROS and reduced the activity of related enzymes, thereby maintaining the integrity of cell membranes and significantly delaying lychee browning. The combination treatment proposed in this study has thus demonstrated immense potential for application in lychee preservation.

Key words: *Litchi chinensis* Sonn.; tea tree essential oil; preservation effect

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 原产于中国岭南地区, 拥有“桂味”“糯米糍”“怀枝”等优良品种^[1]。其采后生理代谢活跃, 呼吸作用产生大量活性氧, 导致酚类化合物氧化、褐变、膜脂过氧化、花青素降解、氧化还原失衡及抗氧化能力下降^[2], 进而引起果皮失水、果肉腐烂等问题, 显著降低商品价值^[3]。荔枝的长效保鲜是产业中关键且长期存在的技术难题。

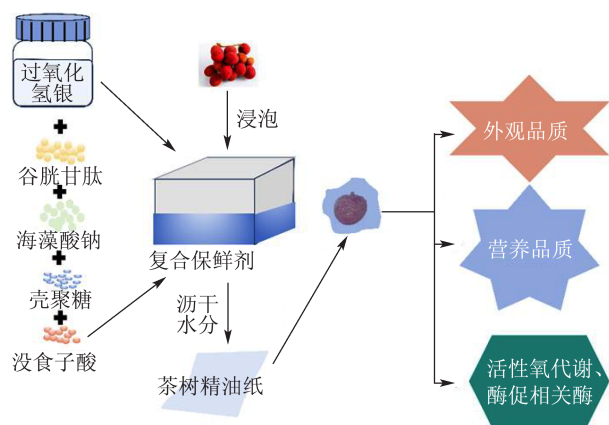


图 1 实验方案图

Fig.1 Experimental program diagram

化学保鲜技术在食品保存中广泛应用, 咪鲜胺 (Prochloraz)、二氧化氯和二氧化硫等是常用的化学保鲜剂^[4-6], 但可能导致化学残留, 增加食用风险, 并对感官品质产生负面影响。相比之下, 植物精油作为天然防腐剂, 因其低毒性、环境友好性及易获取性而

受到关注^[7,8]。茶树精油 (Essential Oil, EO) 因其丰富的萜烯成分, 展现出显著的抗菌潜力, 其抗菌和抗氧化能力超越百里香油、迷迭香油和柠檬油^[9,10]。单一保鲜剂因性能局限而效果不佳, 而复配保鲜剂则具有更全面的抑菌能力和更广泛的应用适应性, 通过优化配方可有效延长产品保质期。过氧化氢银作为强氧化剂, 展现出对多种致病菌和真菌的强效杀灭能力。例如, 李自芹等^[11]的研究表明, 1.5% H_2O_2 纳米雾化处理可有效抑制黄豆芽褐变相关酶活性, 提升其储存稳定性。谷胱甘肽 (Glutathione, GSH) 作为重要的天然抗氧化剂, 能有效保护细胞免受自由基损伤^[12]。研究显示, GSH 处理可降低荔枝果实的多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 活性, 提升超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活性, 降低过氧化氢 (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) 和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量^[13]。没食子酸 (Gallic Acid, GA) 是一种天然酚酸化合物, 具有抗氧化及清除自由基的作用, 广泛应用于壳聚糖嫁接研究^[14]。蒋跃明等^[15]提出的焦性没食子酸保鲜方法, 具有显著的实用性和有效降低荔枝腐烂、褐变的优点。传统化学保鲜技术, 如采前喷洒、精油熏蒸、复合涂膜和胶囊缓释法, 普遍存在成本高、难以有效实现长效保湿等局限性, 且消费者接受度低^[16]。相比之下, 保鲜纸因其优良的保湿性能, 能够有效减缓水分蒸发, 延长荔枝的贮藏寿命。因此, 开发经济且易于接受的保鲜方

法尤为重要。

本研究提出了一种简便、绿色且成本低廉的复合保鲜剂,成分包括海藻酸钠、谷胱甘肽、没食子酸和壳聚糖,并结合茶树精油纸,以增强抗氧化、抗菌活性和湿度保持能力,实现长效缓释杀菌效果。该研究旨在系统评估该复合保鲜剂与保鲜纸结合对荔枝保鲜效果的影响,为荔枝的贮藏保鲜技术提供新的理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

荔枝品种为怀枝,购于广东广州从化地区,采收于7月末,商业成熟期。

没食子酸(食品级),谷味知生物科技有限公司;海藻酸钠(食品级),青岛明月海藻集团有限公司;水溶壳聚糖(食品级),山东卫康生物医药科技有限公司;谷胱甘肽(食品级),浙江深友生物有限公司;过氧化氢银离子杀菌剂,比利时IC集团。

1.2 主要仪器设备

BSA323S型电子天平(精度0.0001g),德国Sartorius公司;L600型低速台式离心机,上海坤权生物科技有限公司;TGL16E型台式高速冷冻离心机,长沙英泰仪器有限公司;CS-220型色差仪,杭州彩谱科技有限公司。

1.3 荔枝保鲜实验

荔枝果实采后均剪去叶留枝2~3cm,当天运至实验室并随机取大小一致、无机械损伤的果实分为4组进行处理,茶树精油保鲜纸制备:将一般纸浸泡在含有0.1%的茶树精油液体的容器中,浸泡一段时间后,去除晾干至不滴水,放置备用。对照组(Control Check组,CK组):取500g果实装入塑料PV袋中;复合保鲜剂组(Compound Preservative组, CPP组):取500g果实并用复合保鲜剂(30%过氧化氢银、0.1%谷胱甘肽、5%贡柑提取物和1%海藻酸钠、1%没食子酸和1%壳聚糖,质量分数)浸泡后沥干水分自然干燥后装入塑料PV袋中;茶树精油保鲜纸组(Tea Tree Essential Oil Fresh Paper组, TTP组):取500g果实并用0.1%茶树精油纸包装后装入塑料PV袋中;复合保鲜剂结合茶树精油纸组(CTP组0:取500g果实并用复合保鲜剂浸泡后沥干水分自然干燥后用茶树精油纸包装装入塑料PV袋中。各组果实4℃分别贮藏21d,在贮藏第1、3、5、7、12、16、21天取样。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 褐变度

果皮褐变指数参照吴振先等^[17]的方法,根据外果皮褐变面积分6个等级:0级,果皮无明显褐斑;1级,龟裂片尖端有零星褐点,褐变面积<1/4;2级,褐斑<0.5cm²,褐变总面积<1/3;3级,0.5cm²<褐斑<1cm²,褐变总面积<1/2;4级,褐斑>1cm²,1/2<褐变总面积<3/4,局部有红色;5级,褐变总面积有大于3/4至全褐,长霉或外渗流汁,无商品价值。每个处理随机选取20个果实进行观察分级,重复3次,计算如公式(1)。

$$L = \frac{\sum(W_1 \times W_2)}{W_0} \quad (1)$$

式中:

L ——褐变指数;

W_1 ——褐变级数;

W_2 ——该级果数;

W_0 ——总果数。

1.4.2 果实色差值

样品的表面颜色(L^* 、 a^* 和 b^*)是色度计(CS-220)进行测量。 L^* 代表亮度, a^* 值代表红色或绿色的强度, b^* 代表黄色或蓝色的强度。每个荔枝样品进行3次独立重复。

1.4.3 腐烂率

观察每袋/盒果实中腐烂流汁的发生情况采用NY/T 515-2002《荔枝》中感官检测进行改进,根据出现腐烂果实的数量占总果数量来计算腐烂率,每个处理每次观察3次重复。

1.4.4 维生素C(Vitamin C, Vc)的含量

Vc测定使用2,4-二硝基苯肼比色法^[18],在储藏期间的第1、3、5、7、12、16和21天,对荔枝果肉进行取样和测试。准确称取10.0g新鲜样品,在研钵中研碎,加入10mL 1wt.%草酸溶液,匀浆,转移至50mL容量瓶中,用少量1wt.%草酸溶液洗涤研钵,一并转入容量瓶中,用1wt.%草酸溶液定容至刻度线。将容量瓶中的溶液过滤,取20mL滤液,向其中加入2.0g经处理的活性炭,用溶剂过滤器抽滤,用移液管准确吸取10mL滤液,加入10mL 10%硫脲溶液和0.5mL 2,4-二硝基苯肼溶液,加塞在37℃水浴锅中反3h,反应完成后向各比色管中缓慢滴加2.5mL 85wt.%硫酸溶液,滴加完全后置于冰水浴中继续反应30min,最后在520nm测定吸光度,结果以100mg·g⁻¹表示。

1.4.5 可溶性固形物 (Total Soluble Solid, TSS) 含量

可溶性固形物 (TSS) 含量采用 NY-T 2637-2014 《水果和蔬菜可溶性固形物含量的测定 折射仪法》测定。在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行取样和测试。取样后, 使用榨汁机对果肉进行捣碎处理, 利用纱布过滤出汁水, 滴 1~2 滴于手持折光仪上读数, 每组测试重复 3 次。

1.4.6 可滴定酸 (Titratable Acids, TA) 含量

可滴定酸 (TA) 含量采用 GB/T 12456-2008 《食品中总酸的测定》的酸碱滴定法。在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行定期取样和测试。

1.4.7 总酚含量 (Total Phenolic Content, TPC)

总酚 (TPC) 含量采用 T/ZCSIA7-2023 《大樱桃及其制品中总酚含量的测定分光光度法》。在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行定期取样和测试, 于 470 nm 处测定, 结果以 mg/mL 表示。

1.4.8 果皮花色苷的含量

花色苷含量测定参考 Siddiqui^[19] 方法并进行了改进, 在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行取样测试。称取约 0.1 g 样本, 在 530 nm 和 700 nm 处测定吸光值。最终换算以 $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ 表示花色苷含量。

1.4.9 多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO) 和过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性

多酚氧化酶 (PPO) 和过氧化物酶 (POD) 含量测定采用分光光度测定法, 参考 Siddiqui 等^[19] 方法并进行了改进。在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行取样测试。取 1.0 g 样本, 在 10 mL 磷酸钾缓冲液 ($0.05\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH 值 6.2)、 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氯化钾和 2 wt.% 聚乙烯吡咯烷酮 (PVPP) 混合液中提取。然后将均质液在 4 °C 下以 $17\,000\times g$ 离心 20 min。所得到的酶提取液用于进一步测定 PPO 和 POD 活性。以 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的儿茶酚作为底物, 底物在磷酸钠缓冲液 ($0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH 值 6.8) 中制备, 并与酶提取液混合, PPO 活性在 410 nm 处测量。使用 4 wt.% 的愈创木酚 (0.1 mL) 作为底物, 底物在 2.75 mL 磷酸缓冲液 ($50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH 值 7.0) 中制备, 并添加 0.1 mL 1% (φ) 的 H_2O_2 和酶提取液, POD 活性在 470 nm 处测量。在标准测定条件下, 导致每分钟吸光度变化 0.1 的酶量定义为一个酶活性单位。

1.4.10 超氧化物歧化酶 (Superoxide Dismutase, SOD) 活性和过氧化氢 (Hydrogen Peroxide, H_2O_2) 含量

超氧化物歧化酶 (SOD) 活性以每克荔枝果肉鲜重的酶活力为单位。在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行取样测试 SOD 活性与 H_2O_2 含量, 参考 Zhang 等^[20] 方法并进行了改进。取 1 g 组织样本加入 9 mL 生理盐水, 冰水浴制备匀浆, 在 $2\,500\sim 3\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min, 取上清在 450 nm 波长处测定 SOD 活性。在冰浴中加入 10 mL 三氯乙酸 (0.1% , m/V) 制备匀浆, 然后在 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 15 min。在 1 mL 上清液中加入 1 mL 磷酸二氢钾缓冲液 ($10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH 值 7.0) 和 2 mL 碘化钾溶液 ($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 在 390 nm 波长处记录 H_2O_2 OD 值。

1.4.11 苯丙氨酸解氨酶 (L-phenylalanine Ammonialyase, PAL) 活性和丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量

苯丙氨酸解氨酶活性 (PAL) 和丙二醛 (MDA) 含量采用分光光度法进行测定, 在储藏期间的第 1、3、5、7、12、16 和 21 天, 对荔枝果肉进行取样测试, 参考 Siddiqui 等^[19] 方法并进行了改进。称 1 g 样品放入 2.6 mL 硼酸钠缓冲液 ($100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$; pH 值 8.0) 中。在预冷的钵中浸渍制成匀浆, 然后在 4 °C 下以 $15\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 20 min。在 290 nm 波长下测定 PAL 活力大小, 每小时 0.01 吸光度的变化被定义为一个单位的酶活性。将 1.0 g 荔枝样品中加入 5 mL $\varphi=10\%$ 三氯乙酸 (TCA) 制成匀浆, 然后在 $10\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 条件下离心 20 min。再将 2 mL 上清液与 2 mL $\varphi=0.6\%$ TBA (硫代巴比妥酸) 充分混合。在 532 nm 处记录上清液的 OD。

1.5 统计分析

使用 Excel 365 程序计算处理的平均值和标准差。采用 SPSS 27.0.1 软件进行统计分析, 采用 Duncan's 新复极差法进行单因素方差分析 (Analysis of Variance, ANOVA), 不同字母标记表示差异显著 ($P<0.05$), 所有实验均重复 3 次。

2 结果与分析

2.1 不同保鲜处理对荔枝外观品质的影响

2.1.1 腐烂率变化

由图 2 可知, 在贮藏期间, 各组的腐烂率均呈上升趋势, 其中对照组 (CK 组) 的腐烂率最高, 贮藏至 21 d 时达到 40.54%。与 CK 组相比, CPP、TTP 和

CTP 组在抑制腐烂方面表现出明显的效果,尤其是在贮藏 12 d 后, CPP、TTP 和 CTP 组的腐烂率分别比 CK 组低 11.39%、26.57% 和 30.28%。值得注意的是, TTP 和 CTP 组的腐烂率抑制效果相似,均优于 CPP 组。贮藏至 21 d 时, TTP 和 CTP 组的腐烂率分别低于 CPP 组 14.71% 和 17.01%。这一结果与岑湘涛等^[21]对桂七芒的研究结果相似,表明茶树精油处理具有显著的抑菌效果,并能够有效抑制荔枝贮藏期间腐烂率的上升,尤其在贮藏后期对降低荔枝失重率的作用更为显著。由于 CTP 组的腐烂率最低,因此复合保鲜剂结合茶树精油纸的处理对荔枝腐烂率的下降具有显著的改善作用。

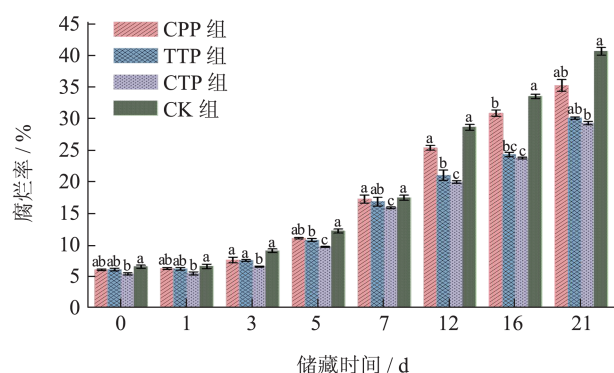


图 2 不同处理荔枝在储藏期间的腐烂率

Fig.2 Decay rate of lychee during storage in different treatments

注: 不同字母标记表示差异显著 ($P < 0.05$)。图 3、5~9 同。

2.1.2 色差测定和褐变指数

褐变指数和色差是评价水果的新鲜度的重要指标之一。一般情况下, L^* 下降、 a^* 或 b^* 上升时果蔬会被认为发生褐变^[22]。一般情况下, 当 L^* 值下降而 a^* 或 b^* 值上升时, 果蔬被认为发生了褐变^[22]。荔枝在储藏期间的外观、褐变以及色差如图 3、4 和表 1 所示。对照组 (CK 组) 的荔枝颜色变化速率最快, 而 CPP 组、TTP 组和 CTP 组的荔枝在储藏 5 d 时观察到轻微的褐变, 12 d 时出现严重褐变, 至 21 d 时完全褐变。贮藏至第 5 d 时, CPP 组、TTP 组和 CTP 组的褐变指数分别较 CK 组降低了 15.38%、23.08% 和 30.77%, 其中 CTP 组的果皮褐变指数始终最低。通过分析颜色参数 (L^* 、 a^* 、 b^*) 及褐变指数, 结果发现, 各组的 L^* 值在贮藏期间呈下降趋势, 但在贮藏至第 12 天时, CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 L^* 值相较于 CK 组分别显著提高了 29.80%、46.70% 和 25.48%。这一结果表明, 复合保鲜剂结合茶树精油纸的处理有助于减缓荔枝的褐变过程。贮藏 12 d 时 b^* 值变化趋势与 L^* 值类

似, 而 CTP 组 a^* 值高于 CPP 组和 TTP 组, 并分别高 33.20% 和 9.31%。在贮藏至 12 d 时, TTP 组的 L^* 值和 b^* 值高于 CTP 组, 这一现象可能归因于过氧化氢银的作用增强了细菌的活性, 从而导致 CTP 组的 L^* 值和 b^* 值低于 TTP 组。综合分析显示, 荔枝褐变指数的变化与荔枝在贮藏期间的外观特征相一致, 复合保鲜剂结合茶树精油纸处理对荔枝的防褐变效果表现出显著优势。

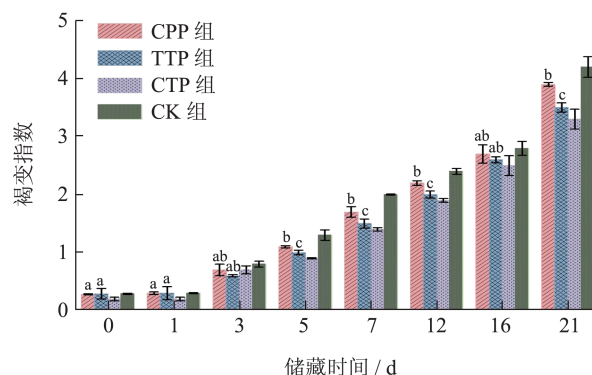


图 3 不同处理荔枝在储藏期间的褐变度

Fig.3 Degree of browning of litchi during storage in different treatments



图 4 荔枝在储藏期间的外观图

Fig.4 Appearance of lychee during storage

2.2 不同保鲜处理对荔枝营养物质的影响

2.2.1 总酚含量的变化

总酚是判断水果营养价值和抗氧化能力的重要指标之一^[23]。结果发现, 各组的总酚含量 (TPC) 在储藏过程中均上升 (表 2)。在贮藏至 3 d, CPP 组、TTP 组、CTP 组相对 CK 组具有显著性差异, 总酚含量分别是 CK 组的 1.08 倍、1.17 倍和 1.46 倍, 并且 CTP 组的总酚含量一直高于其他组。陈岑等^[24]研究发现茶树精油处理具有抑菌性, 抑制氧化酶活性, 从而减少了酚类物质的氧化, 使总酚下降趋势减缓。因此, 复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸处理能显著提高荔枝在贮藏过程的总酚含量。

表 1 不同处理不同贮藏时期荔枝色泽变化

Table 1 Changes in sensory quality of <i>Litchi chinensis</i> Sonn in different treatments at different storage periods									
指标	处理	贮藏时间/d							
		0	1	3	5	7	12	16	21
色差 L	CPP 组	36.00 ± 0.80 ^a	36.70 ± 0.90 ^a	36.84 ± 0.79 ^a	34.79 ± 0.30 ^{ab}	32.85 ± 0.88 ^b	32.85 ± 0.99 ^b	31.97 ± 0.72 ^b	29.62 ± 0.23 ^c
	TTP 组	37.00 ± 0.31 ^a	37.13 ± 0.71 ^a	36.58 ± 0.29 ^a	34.96 ± 0.98 ^a	34.37 ± 0.41 ^a	37.13 ± 0.21 ^a	33.34 ± 0.95 ^a	32.74 ± 0.99 ^a
	CTP 组	34.01 ± 0.50 ^b	34.33 ± 0.58 ^b	34.84 ± 0.85 ^b	34.98 ± 0.69 ^a	33.17 ± 0.52 ^{ab}	31.76 ± 0.31 ^b	31.76 ± 0.59 ^b	31.27 ± 0.31 ^b
	CK 组	37.00 ± 0.56 ^a	37.82 ± 0.86 ^a	36.66 ± 0.62 ^a	33.67 ± 0.08 ^b	32.61 ± 0.57 ^b	25.31 ± 0.9 ^c	29.28 ± 0.46 ^c	25.31 ± 0.33 ^d
色差 a	CPP 组	27.41 ± 0.35 ^b	28.41 ± 0.29 ^b	24.14 ± 0.85 ^c	24.47 ± 0.45 ^b	23.3 ± 0.90 ^b	17.87 ± 0.26 ^c	23.01 ± 0.39 ^b	17.87 ± 0.22 ^b
	TTP 组	28.22 ± 0.24 ^b	28.34 ± 0.51 ^b	25.45 ± 0.28 ^b	24.26 ± 0.69 ^b	23.20 ± 0.01 ^b	24.26 ± 0.82 ^b	22.08 ± 0.25 ^c	21.43 ± 0.69 ^a
	CTP 组	30.20 ± 0.11 ^a	30.24 ± 0.71 ^a	27.57 ± 0.90 ^a	27.00 ± 0.36 ^a	26.76 ± 0.77 ^a	26.75 ± 0.27 ^a	26.42 ± 0.32 ^a	17.79 ± 0.22 ^b
	CK 组	26.07 ± 0.14 ^c	26.16 ± 0.13 ^c	23.18 ± 0.35 ^c	21.47 ± 0.58 ^c	18.13 ± 0.54 ^c	17.31 ± 0.96 ^c	16.63 ± 0.22 ^d	10.91 ± 0.36 ^c
色差 b	CPP 组	22.11 ± 0.45 ^b	22.90 ± 0.48 ^b	21.26 ± 0.24 ^a	20.96 ± 0.71 ^d	20.92 ± 0.49 ^{bc}	21.26 ± 0.46 ^c	19.73 ± 0.60 ^b	19.09 ± 0.46 ^b
	TTP 组	24.21 ± 0.40 ^c	24.92 ± 0.47 ^c	24.49 ± 0.94 ^b	24.05 ± 0.56 ^b	24.02 ± 0.48 ^a	24.05 ± 0.09 ^a	21.54 ± 0.55 ^a	19.86 ± 0.49 ^b
	CTP 组	20.65 ± 0.87 ^a	22.65 ± 0.96 ^a	23.27 ± 0.53 ^b	26.81 ± 0.76 ^a	21.15 ± 0.46 ^b	22.05 ± 0.41 ^b	22.05 ± 0.73 ^a	22.78 ± 0.80 ^a
	CK 组	27.21 ± 0.80 ^a	27.42 ± 0.90 ^a	23.15 ± 0.55 ^a	22.11 ± 0.10 ^c	20.20 ± 0.26 ^c	14.80 ± 0.5 ^d	18.43 ± 0.79 ^c	14.79 ± 0.83 ^c

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异（ $P<0.05$ ）；CK 组：对照组；CPP 组：复合保鲜剂组；TTP 组：茶树精油保鲜纸组；CTP 组：复合保鲜剂结合保鲜纸组。表 2 同。

表 2 不同处理不同贮藏时期营养物质变化情况

Table 2 Nutritional changes in different treatments during different storage periods									
指标	处理	贮藏时间/d							
		0	1	3	5	7	12	16	21
总酚含量/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	CPP 组	3.34 ± 0.30 ^b	3.65 ± 0.31 ^b	5.28 ± 0.20 ^{bc}	6.00 ± 0.04 ^c	6.75 ± 0.35 ^b	7.10 ± 0.11 ^c	8.11 ± 0.54 ^b	9.10 ± 0.22 ^c
	TTP 组	4.00 ± 0.87 ^b	4.04 ± 0.90 ^b	5.79 ± 0.30 ^b	6.48 ± 0.48 ^b	7.52 ± 0.31 ^a	7.98 ± 0.21 ^b	9.27 ± 0.60 ^a	10.59 ± 0.37 ^b
	CTP 组	6.17 ± 0.81 ^a	6.26 ± 0.88 ^a	7.13 ± 0.28 ^a	7.57 ± 0.04 ^a	7.93 ± 0.24 ^a	8.90 ± 0.27 ^a	9.50 ± 0.43 ^a	12.42 ± 0.31 ^a
	CK 组	3.10 ± 0.08 ^b	3.10 ± 0.08 ^b	4.87 ± 0.53 ^c	6.01 ± 0.09 ^c	6.73 ± 0.12 ^b	7.01 ± 0.34 ^c	7.93 ± 0.59 ^b	8.72 ± 0.34 ^c
可溶性固 形物/%	CPP 组	14.24 ± 0.03 ^c	14.53 ± 0.05 ^c	14.12 ± 0.10 ^b	14.10 ± 0.10 ^b	13.43 ± 0.04 ^b	13.30 ± 0.01 ^c	13.23 ± 0.02 ^b	12.63 ± 0.04 ^b
	TTP 组	15.00 ± 0.01 ^b	15.03 ± 0.02 ^b	14.71 ± 0.19 ^a	14.35 ± 0.03 ^a	13.96 ± 0.07 ^a	13.67 ± 0.05 ^b	13.37 ± 0.02 ^a	13.14 ± 0.06 ^a
	CTP 组	15.09 ± 0.04 ^a	15.17 ± 0.04 ^a	14.76 ± 0.06 ^a	14.43 ± 0.19 ^a	13.99 ± 0.02 ^a	13.83 ± 0.03 ^a	13.39 ± 0.01 ^a	13.21 ± 0.05 ^a
	CK 组	14.03 ± 0.03 ^d	14.23 ± 0.05 ^d	14.40 ± 0.36 ^{ab}	13.79 ± 0.04 ^c	13.4 ± 0.01 ^b	13.30 ± 0.06 ^c	13.20 ± 0.09 ^b	12.01 ± 0.02 ^c
可滴定酸/ ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	CPP 组	9.96 ± 0.17 ^b	9.98 ± 0.44 ^b	9.22 ± 0.14 ^{bc}	6.78 ± 0.19 ^b	6.95 ± 0.13 ^a	6.88 ± 0.10 ^a	6.36 ± 0.21 ^b	5.50 ± 0.26 ^b
	TTP 组	10.08 ± 0.10 ^{ab}	10.15 ± 0.11 ^{ab}	9.77 ± 0.48 ^{ab}	8.28 ± 0.18 ^a	7.17 ± 0.14 ^a	6.98 ± 0.23 ^a	6.53 ± 0.13 ^b	6.14 ± 0.22 ^a
	CTP 组	10.25 ± 0.09 ^a	10.54 ± 0.10 ^a	10.42 ± 0.34 ^a	8.53 ± 0.17 ^a	7.38 ± 0.11 ^a	7.21 ± 0.20 ^a	7.00 ± 0.29 ^a	6.53 ± 0.34 ^a
	CK 组	9.16 ± 0.28 ^c	9.17 ± 0.27 ^c	8.66 ± 0.75 ^c	5.42 ± 0.11 ^c	5.78 ± 0.60 ^b	5.80 ± 0.24 ^b	5.89 ± 0.17 ^c	5.21 ± 0.15 ^b
Vc/ ($100\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	CPP 组	89.33 ± 0.20 ^b	89.52 ± 0.23 ^b	66.99 ± 0.38 ^c	64.40 ± 0.43 ^c	62.07 ± 0.22 ^c	64.77 ± 0.34 ^b	65.88 ± 0.55 ^b	61.48 ± 0.36 ^b
	TTP 组	93.00 ± 0.27 ^a	93.47 ± 0.37 ^a	73.49 ± 0.57 ^b	65.41 ± 0.60 ^b	64.36 ± 0.54 ^b	65.01 ± 0.20 ^b	65.99 ± 0.20 ^b	61.94 ± 0.17 ^b
	CTP 组	96.00 ± 0.19 ^d	96.07 ± 0.24 ^d	78.56 ± 0.25 ^a	67.79 ± 0.36 ^a	69.40 ± 0.36 ^a	70.98 ± 0.24 ^a	71.75 ± 0.08 ^a	63.77 ± 0.29 ^a
	CK 组	71.09 ± 0.17 ^c	71.27 ± 0.37 ^c	65.65 ± 0.01 ^d	61.54 ± 0.21 ^d	58.63 ± 0.40 ^d	58.25 ± 0.35 ^c	57.10 ± 0.21 ^c	40.74 ± 0.10 ^c
花色苷/ ($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$)	CPP 组	2.10 ± 0.03 ^b	2.11 ± 0.04 ^b	0.97 ± 0.01 ^b	0.56 ± 0.04 ^b	0.86 ± 0.08 ^b	1.01 ± 0.04 ^c	1.17 ± 0.07 ^b	0.62 ± 0.07 ^b
	TTP 组	2.11 ± 0.02 ^a	2.21 ± 0.05 ^a	1.58 ± 0.10 ^a	1.56 ± 0.09 ^a	1.19 ± 0.16 ^c	1.26 ± 0.03 ^b	1.23 ± 0.02 ^a	1.07 ± 0.06 ^a
	CTP 组	2.18 ± 0.01 ^a	2.28 ± 0.03 ^a	1.71 ± 0.31 ^a	1.57 ± 0.07 ^a	1.61 ± 0.03 ^b	1.43 ± 0.01 ^a	1.24 ± 0.07 ^c	1.13 ± 0.16 ^a
	CK 组	1.71 ± 0.02 ^c	1.89 ± 0.06 ^c	0.56 ± 0.05 ^c	0.52 ± 0.08 ^b	0.84 ± 0.11 ^a	0.75 ± 0.01 ^d	0.61 ± 0.03 ^c	0.53 ± 0.06 ^b

2.2.2 可溶性固形物和可滴定酸含量变化

水果中营养成分含量的降低主要是由新陈代谢反应引起的。如表 2 所示,贮藏期间可溶性固形物含量呈现下降趋势。在贮藏 1 d 时,CK 组与 CPP 组、TTP 组和 CTP 组之间的差异显著,并且 CPP 组、TTP 组和 CTP 组的可溶性固形物含量分别为 CK 组的 1.02 倍、1.06 倍和 1.07 倍。在贮藏期间的 1 至 21 d 内,复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸处理组的可溶性固形物含量最高,且下降幅度相对较小。

可滴定酸度(TA)是影响水果风味和贮藏质量的指标之一。所有组的可滴定酸度(TA)含量呈下降趋势,这是由于荔枝的呼吸作用导致酸在组织细胞中分解,作为中间代谢产物,有机酸参与细胞中的生理反应的结果^[17]。在储藏 1~21 d 时,CTP 组的可滴定酸度始终高于其他组;而在储藏 3 d 时,CK 组的可滴定酸度低于 CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 6.47%、12.82% 和 20.32%。这些结果综合表明,复合保鲜剂结合茶树精油纸处理可抑制呼吸作用和新陈代谢,减少养分消耗,从而改善荔枝的贮藏质量。

2.2.3 Vc含量的变化

Vc 是水果的主要营养成分之一,具有抗氧化还原性。各组的维生素 C(Vc)含量在贮藏期间整体呈下降趋势。贮藏至第 7 天时,CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 Vc 含量与对照组(CK 组)之间存在显著差异,分别高出 5.87%、9.77% 和 18.37%。此外,陈岑等^[24]的研究证实,茶树精油纸能够有效减缓 Vc 含量的下降速率。因此,采用复合保鲜剂结合茶树精油纸的处理方法,能够在一定程度上减缓鲜荔枝 Vc 的减少速率,从而降低 Vc 营养品质的损失。

2.2.4 花色苷含量变化

荔枝果果实皮红色与花青素含量有关,而褐变程度与花青素有关,并且花青素也是果皮中的主要酚类物质^[25]。如表 2 所示,花色苷含量在贮藏期间持续下降,其中 CTP 组的花色苷含量始终维持最高水平。在贮藏至第 7 天时,各组的花色苷含量与对照组(CK 组)之间存在显著差异,具体表现为 CPP 组、TTP 组和 CTP 组的花色苷含量相较于 CK 组分别增加了 2.38%、41.67% 和 91.17%。此外,CPP 组和 TTP 组的花色苷含量相较于 CTP 组则分别降低了 46.58% 和 26.09%。由此可见,对于荔枝花色苷的保护,CTP 组处理明显优于 CPP 组和 TTP 组。这一结果表明,复合保鲜剂结合茶树精油纸的处理方式能有效延缓花色苷的分解,从而更好地维持荔枝的品质。

2.3 茶树精油纸结合复合保鲜剂对荔枝活性氧代谢和酶促相关酶的影响

2.3.1 SOD活性与H₂O₂含量变化

如图 5 所示, H₂O₂ 含量和 SOD 活性反应细胞氧化程度^[26]。各组 SOD 活性先快速降低再缓慢降低, SOD 活性越高表明细胞抗氧化程度越高。在贮藏期间从第 1 天至第 21 天, CK 组的超氧化物歧化酶(SOD)活性降低了 70%。相比之下, CPP 组和 TPP 组的 SOD 活性分别降低了 66.84% 和 66.33%, 而 CTP 组的活性下降最为显著, 仅降低了 60.08%。当贮藏至 21 d 时, CPP 组、TPP 组和 CTP 组的 SOD 活性相对 CK 组均显著提高, 具体提高幅度分别为 13.92%、25.45% 和 36.50%。在贮藏前 7 d 内, CTP 组的活性高于 CPP 组, 但低于 TPP 组; 而在贮藏第 5 至第 7 天期间, CTP 组的活性下降速率有所加快, 但在第 7 天时 CTP 组活性高于所有其他组, 这表明, 茶树精油纸处理可以在贮藏初期显著提高 SOD 活性。值得注意的是, 在贮藏 7 d 后, 复合保鲜剂结合茶树精油纸的处理显著延缓了 SOD 活性的减少速率, 进一步表明该处理方法能够有效提高采后荔枝的 SOD 活性。

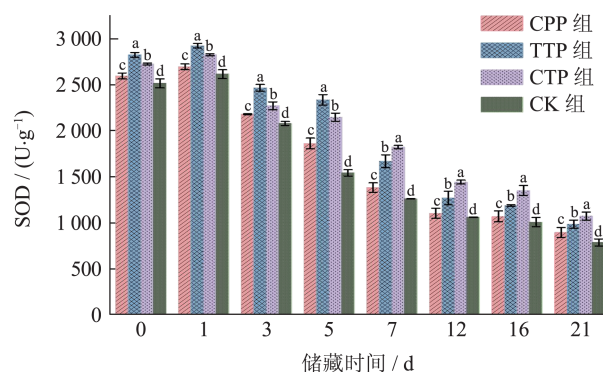


图 5 不同处理荔枝在储藏期间的 SOD 活性

Fig.5 SOD activities of lychee during storage in different treatments

如图 6 所示, 各处理组的 H₂O₂ 含量呈增加的趋势, 并且增加速率先增加后减少。CK 组和 CPP 组分别在贮藏至 3、12 d 后, H₂O₂ 显著升高, 分别升高了 100%、395% 和 50.21%、129%。上述结果与茶树精油处理草莓趋势类似, 说明茶树精油纸处理能减缓 H₂O₂ 含量上升速度^[27]。相比较之下, CTP 组和 TTP 组的 H₂O₂ 始终保持较低水平, 贮藏 21 d 时, 分别为 CK 组的 20.6% 和 25.3%, 说明 CTP 组和 TTP 组能有效防止细胞过氧化, 保持细胞完整性和活性。

上述结果综合表明, 复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸处理可以通过提高相关抗氧化酶(SOD)的活性

和降低 H_2O_2 含量的升高来维持活性氧代谢的平衡,从而改善荔枝品质变化。

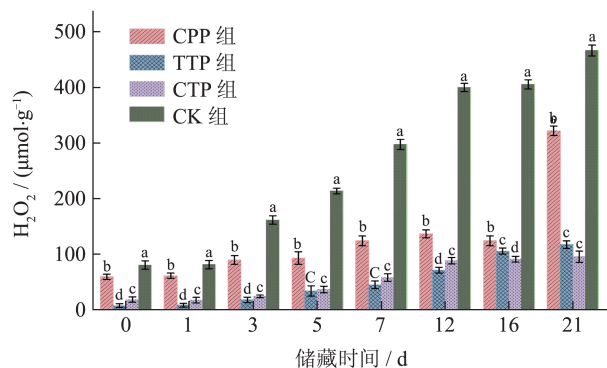


图6 不同处理荔枝在储藏期间的 H_2O_2 含量

Fig.6 H_2O_2 content of lychee during storage in different treatments

2.3.2 MDA含量变化

丙二醛 (MDA) 作为膜脂过氧化程度的主要产物之一,其反应过程有 H_2O_2 等活性物质参与并且能够反映植物细胞膜的氧化损伤程度,通常被视为衡量膜脂过氧化的重要指标之一^[28]。荔枝不同储藏期间 MDA 含量变化如图 7 所示。MDA 含量越高,表明细胞膜的氧化程度越高。在对 CK 组和 CPP 组进行研究时,结果显示其在贮藏至第 3 天和第 7 天后,MDA 含量出现显著变化。具体而言,CK 组的 MDA 含量分别下降了 4.51% 和 16.87%,而 CPP 组的 MDA 含量则显著提高,增加幅度为 84.38% 和 23.56%。上述结果与 H_2O_2 含量呈相反趋势,在贮藏 21 d 时, CPP 组、CTP 组和 TTP 组的 MDA 含量分别相对 CK 组降低了 47.22%、56.83% 和 68.18%,说明 CTP 组和 TTP 组能有效防止细胞膜过氧化。综合证明,复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸处理一定程度减少 MDA 的积累,降低膜质中多不饱和脂肪酸的代谢,从而改善果实品质,延缓衰老。

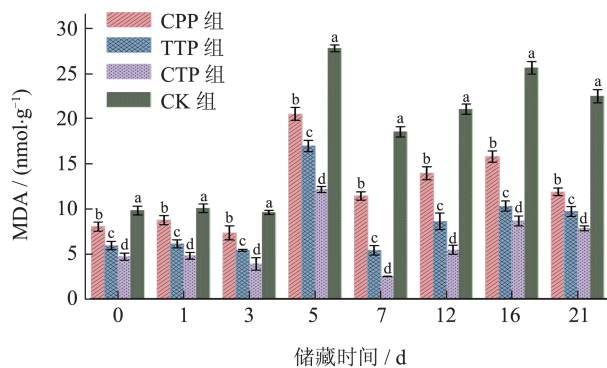
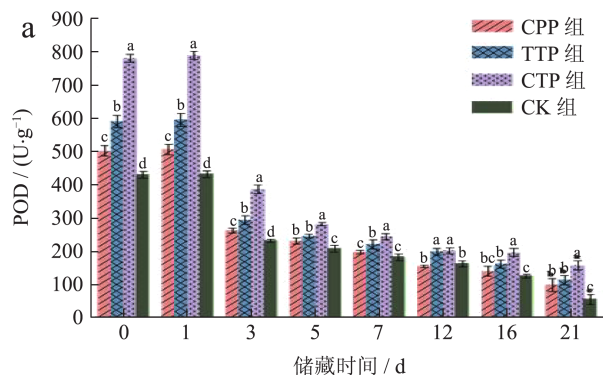


图7 不同处理荔枝在储藏期间的 MDA 含量

Fig.7 MDA content of lychee during storage in different treatments

2.3.3 PPO和POD活性变化

有研究表明,关键抗氧化酶 POD (过氧化物酶) 是植物活性氧清除系统的重要组成部分之一,是植物生物防御系统中功能相似的关键酶之一,在防止或减轻活性氧造成的伤害中起着重要的作用^[29]。荔枝不同储藏期间 PPO 和 POD 含量变化如图 8 所示。PPO、POD 活性越高分别表明抗氧化能力越强,果实自然成熟衰老的过程中,组织细胞中的质膜受到损伤,多酚物质从液泡中大量释放,同时 PPO 被释放至细胞质中,催化活性增强。多酚氧化酶 (PPO) 能催化酚类物质最终形成聚合色素化合物,最终造成酶促褐变。多酚氧化酶 (PPO) 能催化酚类物质最终形成聚合色素化合物,最终造成酶促褐变。PPO、POD 活性越高分别表明抗氧化能力越强。在贮藏 5 d 内,CK 组和 CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 POD 活性均迅速下降,并且 CTP 组的 POD 活性始终高于 CPP 组和 TTP 组。其中贮藏至 5 d 时, CPP 组、TTP 组、CTP 组的 POD 活性相对 CK 组增加了 11.36%、18.02% 和 35.60%。在贮藏末期, CPP 组和 TTP 组的 POD 活性是 CTP 组的 62.64% 和 72.12%,说明复合保鲜剂结合茶树精油纸处理能明显抑制荔枝果实的 POD 活性降低,从而降低荔枝的褐变。在贮藏 0~5 d 内,各组的 PPO 活性在贮藏初期均迅速升高,并且在第 3 d 达到最大峰值,但 CTP 组的 PPO 活性升高始终低于 CK 组、CPP 组和 TTP 组。其中贮藏至 3 d 和 5 d, CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 PPO 活性比 CK 组分别低 41.44%、31.11%、54.62% 和 36.72%、20.85%、57.75%,其原因可能是造成果实衰老的酶失活。而在 21 d 时, CPP 组、TTP 组和 CTP 组的 PPO 活性均明显低于 CK 组,说明复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸处理能显著抑制荔枝果实的 PPO 活性,从而降低荔枝的褐变。这些结果表明,在一定程度下复合保鲜剂结合茶树精油纸可以通过提高抗氧化酶 (POD) 和降低相关的氧化酶 (PPO) 的活性来维持活性氧代谢的平衡,从而降低采后荔枝的氧化损伤和品质的下降。



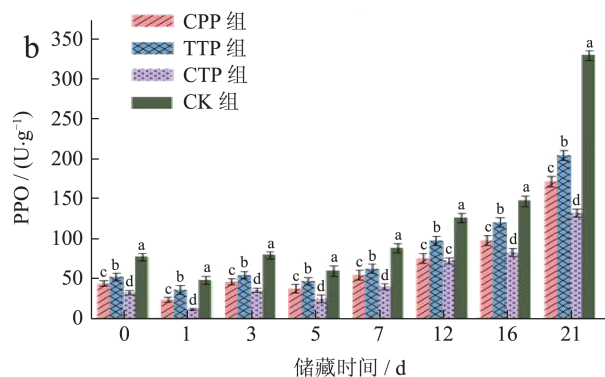


图8 不同处理荔枝在储藏期间的 POD 活性和 PPO 活性图

Fig.8 Plot of POD activity and PPO activity of different treatments of lychee during the storage period

2.3.4 PAL活性变化

苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 是荔枝中苯丙氨酸代谢的限制性酶, 其也参与非酶活性氧清除系统, 影响荔枝中抗氧化成分的合成^[30]。在贮藏过程中, 所有组别的苯丙氨酸氨裂解酶 (PAL) 活性均表现出下降的趋势, 表明荔枝正处于持续衰老的过程中 (见图9)。在贮藏中期 (3 至 16 d), CPP 组、TPP 组和 CTP 组的 PAL 活性与对照组 (CK 组) 之间存在显著差异, 具体表现为 CK 组的 PAL 活性分别为 1.05 倍、1.10 倍、1.19 倍, 以及 1.18 倍、1.31 倍、1.51 倍。进一步分析贮藏末期数据, CPP 组和 TPP 组的 PAL 活性相较于 CTP 组分别降低了 22.28% 和 19.44%。这些结果表明, 茶树精油纸和复合保鲜剂均能够有效减少 PAL 活性的降低, 而复合保鲜剂结合茶树精油纸的效果更为显著。

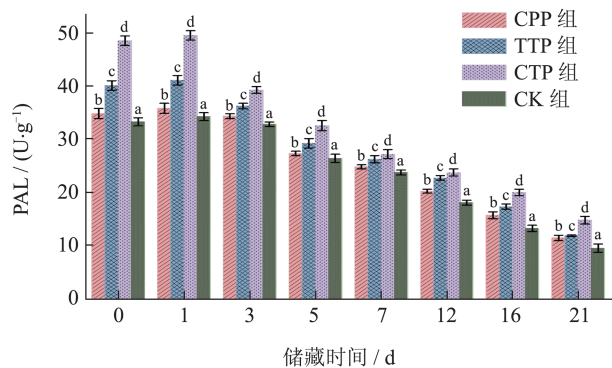


图9 不同处理荔枝在储藏期间的 PAL 活性

Fig.9 PAL activity of lychee during storage in different treatments

茶树精油复合保鲜剂纸处理降低采后荔枝果皮采后的生理代谢图如图10所示, 在复合保鲜剂、茶树精油纸的影响下, 细胞内部活性引发了一系列连锁反应。首先, 由 SOD 和 POD 等酶催化的超氧阴离子经历歧化反应, 生成过氧化氢和氧气, 最终代谢为水^[26]。这

一过程有助于维持细胞内的还原环境。同时, 总酚类物质在 POD 和 PPO 等相关酶的作用下被氧化成醌类物质, 最终转变为黑褐色物质, 这种变化可能影响荔枝的颜色等外观品质^[30]。此外, 苯丙氨酸通过苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的代谢, 进一步在相关酶的作用下最终合成花色苷, 但花色苷的降解同样依赖于 POD 酶与 H_2O_2 的协同作用, 生成如儿茶素等化合物, 而花色苷与荔枝外观中颜色变化紧密相关^[30]。此外, 膜质中的多不饱和脂肪酸代谢也可能对细胞造成损伤, 因其在 O_2^- 、 H_2O_2 和 O_2 的影响下生成脂质氢过氧化物, 随后通过自发分解和非酶反应转化为丙二醛等有害物质, 而影响荔枝细胞膜的完整性^[28]。这些相互关联的反应在保鲜过程中, 对荔枝细胞的活性、健康状态和储运品质等产生了重要的影响。综合上述反应展现了荔枝代谢活性氧代谢和膜脂损伤机制, 对比前人研究, 本研究通过探究复合保鲜剂结合茶树精油纸对代谢机制系统中的各酶以及物质含量变化情况, 展现其抗氧化防褐变的能力, 提高了荔枝外观和贮藏期。

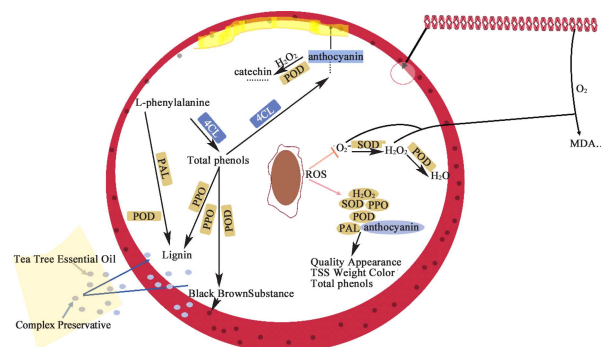


图10 荔枝采后生理代谢图

Fig.10 Post-harvest physiological metabolism of lychee

3 结论

本研究探讨了复合保鲜剂、茶树精油保鲜纸及其组合在荔枝保鲜中的应用效果。与对照组相比, 仅使用保鲜剂或保鲜纸均能有效延缓荔枝的褐变和衰老。然而, 复合保鲜剂结合茶树精油保鲜纸的保鲜效果最为显著。这一优越性可能源于其通过维持较高的氧化应激反应, 抑制活性氧产物 (如 H_2O_2) 的生成, 并增强相关抗氧化酶的活性 (如超氧化物歧化酶, SOD), 从而提高了荔枝的酶促和非酶促抗氧化能力。此外, 在非酶活性氧反应中, 苯丙氨酸代谢酶 (PAL) 的活性、褐变过程中花色苷的降解以及膜质代谢中丙二醛 (MDA) 的产生均受到影响。本研究为复合保鲜剂与茶树精油保鲜纸结合应用于减缓荔枝果皮褐变和延长货架期提供了理论依据。

参考文献

- [1] 凌金锋.荔枝病果相关的四属菌物鉴定及分子系统发育分析[D].广州:华南农业大学,2019.
- [2] LI T, SHI D, WU Q, et al. Sodium para-aminosalicylate delays pericarp browning of litchi fruit by inhibiting ros-mediated senescence during postharvest storage [J]. Food Chemistry, 2019, 278: 552-559.
- [3] DESHI V, HOMA F, TOKALA V Y, et al. Regulation of pericarp browning in cold-stored litchi fruit using methyl jasmonate [J]. J King Saud Univ Sci, 2021, 33(5): 101445.
- [4] 吴静娜,韦璐阳,邓有展,等.抑霉唑、咪鲜胺及其代谢物在荔枝贮藏保鲜中的残留动态及安全评价[J].食品工业科技,2024, 45(10):234-241.
- [5] MINGYANG H, LIHONG X, YANFEI W, et al. Fluopyram inhibits tricarboxylic acid cycle but induces γ -aminobutyric acid-shunt pathway to prolong postharvest shelf life of litchi fruit [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 192: 112036.
- [6] SU X J, LIN H T, FU B F U, et al. Egg-yolk-derived carbon dots@ albumin bio-nanocomposite as multifunctional coating and its application in quality maintenance of fresh litchi fruit during storage [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134813.
- [7] 菅田田.二氧化氯缓释剂缓释特性的研究及其在荔枝保鲜中的应用[D].广州:华南农业大学,2020.
- [8] MARAK K A, MIR H, SINGH P, et al. Exogenous melatonin delays oxidative browning and improves postharvest quality of litchi fruits [J]. Scientia Horticulturae, 2023, 322: 112408.
- [9] KIRANDEEP K, ATAMJIT S, ADITI M, et al. Antimicrobial and antibiofilm effects of shikonin with tea tree oil nanoemulsion against *Candida albicans* and *Staphylococcus aureus* [J]. Biofouling, 2023, 39(9-10): 11-18.
- [10] YUQING T, LEI Z, JUNPING L, et al. Effect of sustained-release tea tree essential oil solid preservative on fresh-cut pineapple storage quality in modified atmospheres packaging [J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135898.
- [11] 李自芹,李文绮,陈雅,等.过氧化氢纳米雾化熏蒸对黄豆芽贮藏品质及生理特性的影响[J].食品安全质量检测学报,2023, 14(19):107-114.
- [12] PRATIKSHA S, GOPIKA M, SUSHMEE B. ZnS/MnO₂ metal organic framework based conductive hydrogel for highly selective and sensitive detection of glutathione in serum samples [J]. Microchem Journal, 2024, 197: 109727.
- [13] 李凯.基于壳聚糖/ γ -PGA基可降解复合保鲜膜的制备及保鲜效果的研究[D].成都:成都大学,2023.
- [14] 莫亿伟,郑吉祥,李伟才,等.外源抗坏血酸和谷胱甘肽对荔枝保鲜效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(3):363-368.
- [15] 蒋跃明,敬国兴,张丹丹,等.广东省:CN201210517762.X,一种用焦性没食子酸保鲜荔枝的方法[P].2014-04-23.
- [16] 张金磊,陈兴煌.柑橘精油成分分析及对灰葡萄孢菌的抑制作用[J].现代食品科技,2022,38(1):315-323.
- [17] 吴振先,季作梁,韩冬梅,等.荔枝果皮褐变程度的数学模型研究(英文)[J].果树学报,2006,5:695-698.
- [18] 齐芳芳.蔬菜中维生素C含量测定方法的研究[J].现代食品, 2023,29(16):206-208.
- [19] SIDDIQUI W M, DESHI V, HOMA F, et al. Inhibitory effects of hydrogen sulfide on oxidative damage and pericarp browning in harvested litchi [J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021, 40(6): 1-10.
- [20] ZHANG J, CHEN X, LIU Q, et al. Slightly acidic electrolyzed water treatment enhances the quality attributes and the storability of postharvest litchis through regulating the metabolism of reactive oxygen species [J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101644.
- [21] 岑湘涛,沈伟,郭炳豪,等.茶树油熏蒸处理对桂七芒保鲜效果研究[J].中国食品添加剂,2022,33(5):106-111.
- [22] KLIMCZAK I, GLISZCZYŃSKA Ś A. Green tea extract as an anti-browning agent for cloudy apple juice [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2017, 97(5): 1420-1426.
- [23] YU K B, XU J, ZHOU L, et al. Effect of chitosan coatings with cinnamon essential oil on postharvest quality of mangoes [J]. Foods, 2021, 10(12): 3003.
- [24] 陈岑,王荣荣,杨洁,等.茶树精油-海藻酸钠复合涂膜对鲜切苹果品质的影响[J].保鲜与加工,2021,21(11):16-21.
- [25] FANG F, QI Z Z, LIAN X Z, et al. Reduction in activity/gene expression of anthocyanin degradation enzymes in *Lychee pericarp* is responsible for the color protection of the fruit by heat and acid treatment [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(9): 1694-1702.
- [26] ZHI W Z, LEI Z, KAIBO Y, et al. Effects of microporous packaging combined with chitosan coating on the quality and physiological metabolism of passion fruit after harvest [J]. Food and Bioprocess Technology, 2022, 15(8): 1836-1850.
- [27] 王楠.茶树精油及其主要组分松油烯-4-醇对采后草莓品质和抗病性的影响研究[D].宁波:宁波大学,2020.
- [28] 曹锡清.脂质过氧化对细胞与机体的作用[J].生物化学与生物物理进展,1986,2:17-23.
- [29] ZHANG Y, HUBE D J, et al. Delay of postharvest browning in Litchi fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair. [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2018, 66.28: 7475-7484.
- [30] YUQING T, LEI Z, JUNPING L, et al. Effect of sustained-release tea tree essential oil solid preservative on fresh-cut pineapple storage quality in modified atmospheres packaging [J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135898.