

纳米肉桂醛处理对不同预冷方式荔枝低温贮藏品质的改善作用

王美连^{1,2}, 戴凡炜², 罗政², 邝健飞^{1*}, 叶明强², 陈于陇², 陈飞平^{2*}

(1. 华南农业大学园艺学院, 广东广州 510642) (2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610)

摘要: 为探索一种适合荔枝的采后保鲜技术, 该文探究了不同预冷方式及联合纳米肉桂醛处理对桂味荔枝低温贮藏品质的影响。结果表明: 冰水预冷荔枝在冷藏过程中极易发生褐变和腐烂, 感病指数和褐变指数上升最快, 可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、可滴定酸 (Titratable Acid, TA)、维生素 C (Vitamin C, Vc) 含量降低较快, 8 d 时多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性达到峰值 5.98、91.33 U/g; 冷风预冷可更好地延缓荔枝果皮褐变和维持果实营养品质, 保鲜期相比冰水预冷延长了 6 d 以上。另外, 协同使用纳米肉桂醛可显著降低冰水预冷和冷风预冷荔枝的感病指数, 21 d 时果实感病指数分别降低了 62.29% 和 44.49%, 表明纳米肉桂醛抑菌剂可显著抑制荔枝采后病害发生, 而且纳米肉桂醛联合处理可显著降低冰水预冷荔枝的褐变指数, 15 d 时褐变指数为 2.76 vs 3.51。可见, 冷风预冷是桂味荔枝比较适宜的预冷方式, 纳米肉桂醛联合处理可显著降低荔枝采后病害发生, 并且提升冰水预冷荔枝的品质。

关键词: 桂味; 纳米肉桂醛; 冷风预冷; 褐变指数; 贮藏品质

文章编号: 1673-9078(2025)06-154-161

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.6.0542

Improvement Effects of Nano-cinnamaldehyde Treatment on the Quality of Litchi Stored at Low-temperature using Different Pre-cooling Methods

WANG Meilian^{1,2}, DAI Fanwei², LUO Zheng², KUANG Jianfei^{1*}, YE Mingqiang², CHEN Yulong², CHEN Feiping^{2*}

(1. College of Horticulture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

(2. Sericulture & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

引文格式:

王美连, 戴凡炜, 罗政, 等. 纳米肉桂醛处理对不同预冷方式荔枝低温贮藏品质的改善作用[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 154-161.

WANG Meilian, DAI Fanwei, LUO Zheng, et al. Improvement effects of nano-cinnamaldehyde treatment on the quality of litchi stored at low-temperature using different pre-cooling methods [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 154-161.

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 广东省区域创新能力与支撑保障体系建设项目 (2023B0202090004); 国家自然科学基金项目 (32202143); “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目 (2022SDZG04)

作者简介: 王美连 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 园艺植物采后处理与贮运技术, E-mail: 3173438761@qq.com; 共同第一作者: 戴凡炜 (1983-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜物流, E-mail: daifanwei@gdaas.cn

通讯作者: 陈飞平 (1985-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 生物材料与农产品保鲜, E-mail: feiping52@126.com; 共同通讯作者: 邝健飞 (1982-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 园艺产品贮藏与物流, E-mail: jfkuang@scau.edu.cn

Abstract: A post-harvest preservation technology suitable for litchi was investigated and the effects on the low-temperature storage quality of ‘Guiwei’ litchi were determined using individual pre-cooling methods and in combination with nano-cinnamaldehyde. The results indicated that litchi treated with iced water pre-cooling is prone to browning and rotting during cold storage, with a significantly higher susceptibility index and browning index than other treatments. The total soluble solids, titratable acid, and vitamin C contents of litchi treated with iced water pre-cooling decreased at a more rapid rate, and the activities of polyphenol oxidase and peroxidase peaked at 5.98 and 91.33 U/g, respectively, on the 8th day. Chilled air pre-cooling was more effective than other cooling methods in delaying pericarp browning and maintaining the nutritional value of litchi. The shelf life of litchi pre-cooled with cold air was extended by more than 6 days compared with iced water pre-cooled litchi. In addition, nano-cinnamaldehyde treatment significantly reduced the presence of diseased litchi pre-cooled with iced water and cold air, by 62.29% and 44.49%, respectively, on the 21st day, compared with iced-water pre-cooling and chilled air pre-cooling, individually. This results indicates that nano-cinnamaldehyde is effective in inhibiting the presence of post-harvest diseases in litchi. Moreover, the browning of iced water pre-cooled litchi was reduced by nano-cinnamaldehyde treatment, resulting in a remarkably lower browning index (2.76 vs. 3.51) on the 15th day. In conclusion, chilled air pre-cooling is more suitable than other cooling methods for ‘Guiwei’ litchi and nano-cinnamaldehyde treatment is effective in inhibiting the presence of post-harvest diseases and improving the post-harvest quality of litchi.

Key words: ‘Guiwei’ litchi; nano-cinnamaldehyde; chilled air pre-cooling; browning index; storage quality

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 营养丰富、风味特殊, 是岭南佳果之一, 荔枝产业是广东省乡村振兴的重要支柱之一。然而荔枝是一种高敏感水果, 常温下 2~3 d 即色香味渐失、新鲜度下降, 限制了荔枝的产业的发展^[1]。据统计, 荔枝每年因褐变、腐烂等造成的采后损耗高达 20% 以上^[2], 其中褐变主要与果皮的花色素苷降解以及多酚氧化酶、过氧化物酶、漆酶等引发的酶促反应等有关^[3-5]; 腐烂主要由荔枝霜疫霉菌和炭疽病等侵染导致。因此, 如何延缓果皮褐变和防控病害发生, 是荔枝产业高质量发展需要突破的瓶颈。

预冷可快速移除新鲜采收水果的田间热, 达到延长水果的保鲜期和货架期的效果^[6], 在产业中应用最广泛的预冷方式为冰水预冷。冰水预冷的降温速度快、产品失水少, 但存在交叉污染的风险。冯雅蓉等^[7]用冰水预冷、冷风风冷甜樱桃以及张怡等^[8]研究冰水预冷条件下蓝莓的货架情况, 发现冰水处理果实的耐贮性较差, 易滋生微生物。邓浩等^[9]研究发现, 冰水预冷红毛丹的保鲜效果不如压差预冷、冷风预冷。胡花丽等^[10]研究发现, 冷风预冷具有更佳的抑制李果果实贮藏后期的呼吸作用以及腐烂发生的作用。我们前期研究发现, 冰水预冷并不适合所有的荔枝品种, 比如桂味荔枝在预冷后冷藏过程中极易发生褐变和腐烂, 然而冰水预冷是目前荔枝产业中应用最广泛的预冷方式。抗氧化、抗菌活性物质处理提升荔枝在冰水预冷中的耐低温

性和耐贮性亟待开展深入研究。

肉桂醛是肉桂精油的主要活性成分, 占肉桂精油的 85%~90%^[11], 具有广谱抗菌活性和抗氧化活性^[12], 并且是国家食品添加剂法规允许作为防腐剂应用于生鲜水果中。然而肉桂醛具有强烈的气味和强氧化性, 直接使用对水果自身的风味和质构有副作用^[13], 限制了其产业化应用。因此, 探索更有效的肉桂醛包埋递送技术是其能够在食品和农产品保鲜中广泛应用的前提。本团队在前期研究中建立了基于大豆蛋白包埋的植物精油稳态化技术, 实现了百里香酚的水溶化和抑菌增效^[14], 并且该水溶化百里香酚处理可提升对百香果的采后包装贮藏品质^[15]。另外, 前期研究也发现肉桂醛对常见的致病微生物以及荔枝霜疫霉菌均具有优越的抑制作用, 并且与 ϵ -聚赖氨酸盐酸盐复配具有协同抑菌效应^[16]。基于这些前期基础, 本团队也进一步构建了一类平均粒径为 150 nm 左右的大豆蛋白 / 肉桂醛 / ϵ -聚赖氨酸盐酸盐纳米复合物 (纳米肉桂醛), 实现了肉桂醛的稳态化、缓释和 pH 值响应抑菌, 而且该纳米肉桂醛处理可显著抑制冬枣和橄榄在常温贮藏过程中腐烂的发生。那么, 采用该纳米肉桂醛对荔枝进行浸泡除菌处理, 是否可进一步延长其贮藏期? 基于此, 本研究拟以桂味荔枝为对象, 考察冰水预冷和冷风预冷对荔枝贮藏品质的影响以及纳米肉桂醛处理对桂味荔枝贮藏品质的提升作用, 以期为采后荔枝贮藏保鲜的实用技术研发提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

桂味荔枝购买于广州市从化区果园,保留新鲜完整枝叶放入周转筐中当天运回实验室冷操作间,剪枝脱粒,选择无病虫害的八成熟的大小一致、色泽统一、无褐变与损伤、无病斑的果实。

双层自发气调袋:内袋为调湿袋(聚乙烯醇材料,厚度 0.01 mm,大小为 62 cm×64 cm),外袋为自发气调包装袋(低密度聚乙烯材料,厚度 0.02 mm,大小为 62 cm×64 cm),广东省农业科学院蚕业与农产品加工所研制。

纳米肉桂醛(大豆蛋白/肉桂醛/ ϵ -聚赖氨酸盐复合物,平均粒径 154 nm,肉桂醛荷载量 0.39 mg/mg pro),实验室自制;液氮,购自佛山市普雷克斯公司;无水乙酸钠,天津市大茂化学试剂厂;磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、邻苯二酚、愈创木酚、无水碳酸钠,天津市福晨化学试剂厂。

1.2 仪器与设备

UV-1900i 紫外分光光度计,日本 Shimadzu 公司;5810R 高速离心机,德国 Eppendorf 公司;JW-1042 低速离心机,安徽嘉文仪器装备有限公司;TH2-82A 数显恒温震荡仪,常州澳华仪器公司;Synergy LX 型多功能酶标仪,美国伯腾仪器有限公司;Varian Cary Eclipse 分子荧光分光光度计,美国 Varian 公司;PAL-BX/ACID F5 爱拓糖度计,Atago 中国分公司。

1.3 样品处理

荔枝挑选后分成 4 份,进行相应的处理:处理 1 为冰水浸泡 15 min 后于冷库(4±1)℃内自然风干后包装(记为冰水预冷);处理 2 为冰水浸泡 12 min,在含有有效成分质量浓度 0.25 mg/mL 的纳米肉桂醛溶液中浸泡 3 min(记为冰水预冷+抑菌)后于冷库(4±1)℃内自然风干后包装;处理 3 为冷风预冷 30 min 后直接包装(记为冷风预冷);处理 4 为在含有有效成分质量浓度 0.25 mg/mL 的纳米肉桂醛溶液中浸泡 3 min 后冷风预冷 30 min(记为冷风预冷+抑菌)。所有处理荔枝均预冷至果芯温度 10℃左右,荔枝预冷后采用双层袋包装,用调湿袋作为内包装,自发气调袋作为外包装并用封口机密封,每袋 1.25 kg,贮藏于(4±1)℃冷库内。在 0、8、15、21 d 时取样,每次取样时每个处理均取 3 个重复,观察果实的感病、褐变情况,测定 TSS、TA、Vc 含量;

每袋取 30 个果,将果皮和果肉分离迅速放入液氮,果柄丢弃,液氮快速冷冻后捣碎并用磨样机磨成新鲜粉末状,迅速装入低温冷却的离心管内,然后储存于 -80℃超低温冰箱,用于后期指标测定。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 纳米肉桂醛对荔枝霜疫霉菌的影响

取去皮胡萝卜 200 g,切片剁碎,沸水煮软后用纱布包裹挤出汁液,向汁液中加入 20 g 琼脂粉,用去离子水定容至 1 L,121℃灭菌 15 min。将复合精油与尚未凝固的胡萝卜培养基按比例混合成含肉桂醛质量浓度为 0、0.025、0.05、0.1 mg/L 的培养基,倒平板,待凝固后,用 7 mm 灭菌打孔器在内生霜疫霉菌培养皿中打出完整的菌块,并将菌块接种到直径 90 mm 的培养基平板中央,在(25±1)℃培养箱中黑暗培养。未添加纳米肉桂醛复合物悬液的培养基作为对照处理,每个处理 3 个重复,计算结果取平均值。7 d 后分别测量霜疫霉菌菌落直径,并按公式(1)计算抑制率:

$$I = \frac{R_0 - R_1}{R_0 - 7} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

I ——抑制率;

R_0 ——对照菌落直径;

R_1 ——处理菌落直径;

7——直径为 7 mm 的菌块直径。

1.4.2 感病指数

感病指数参照吴光旭等^[17]的方法进行测定,略作改动。从每袋中随机取出 30 个果实,将其按照病害程度划分为 4 个等级:0 级表示无病斑;1 级表示有可见的菌丝体;2 级表示病斑面积为 1%-5%;3 级表示病斑面积大于 5%。得分大于 1 的水果失去商品价值,40% 的果实失去商品价值即为货架期。计算方法如公式(2)所示:

$$A = \frac{\sum_0^4 a \times b}{C \times d} \quad (2)$$

式中:

A ——荔枝感病指数;

a ——感病指数;

b ——每级感病果数;

C ——总果数;

d ——发病最重级的代表数。

1.4.3 褐变指数

褐变指数参照 Scott 等^[18]的方法并进行轻微调整。从每袋中随机取 30 个果实, 根据内果皮褐变面积划分为 5 个等级。1 级: 无褐变或褐变面积小于 1/4; 2 级: 变褐总面积占果面的 1/4~1/2; 3 级: 变褐总面积为果面的 1/2~3/4; 4 级: 变褐面积大于果面的 3/4; 5 级: 果实腐烂。计算如公式 (3) 所示:

$$B = \frac{\sum_1^5 (e \times b)}{C} \quad (3)$$

式中:

B ——荔枝褐变指数;

e ——褐变级数;

b ——每级果数;

C ——总果数。

1.4.4 可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、可滴定酸 (Titratable Acid, TA) 含量测定

参照巫梅婷等^[19]的方法, 并稍作修改。每袋果随机取 10 个荔枝果实, 将荔枝剥皮后榨汁过滤, 取汁滴在糖度计上, 按下 start 读数即 TSS 值; 取糖度计检测镜面凹槽上果汁 200 μL 混入 9.8 mL 蒸馏水稀释后, 吸取 1~2 滴滴在干净的糖度计上, 按下 start 读数即 TA 值。测定十次, 记录结果, 取平均值。

1.4.5 维生素 C (Vitamin C, Vc) 含量测定

参照黄方志等^[20]的方法, 并稍作修改。随机取 5 个果实, 挤出汁液混合均匀后, 取 0.5 mL 果汁加入 8 mL 质量分数为 2% 草酸作为样品液保存, 保存在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱, 采用荧光法测定法 Vc 含量。测定时, 在棕色样品管中加入 0.2 g 活性炭和果汁样品, 涡旋振荡均匀, 于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、8 000 r/min 条件下离心 10 min, 分别移取已氧化处理的样品上清液 1 mL 至 a 管 (样品管) 和 b 管 (样品空白管)。向 a 管中加入质量浓度为 250 g/L 的乙酸钠溶液 1 mL; 向 b 管中加入质量浓度为 30 g/L 硼酸-250 g/L 乙酸钠溶液 1 mL, 充分混匀, 避光反应 20 min。随后迅速向各试管加入 1 mL 质量浓度为 0.2 g/L 的邻苯二胺溶液, 充分混匀, 避光反应 40 min。在分子荧光分光光度计系统里将激发波长、发射波长、两端狭缝分别设置为 355、425、5 nm, 测定各样品及空白的荧光强度, 样品管荧光强度值记为 A , 空白管的荧光强度值记为 A_0 , $A-A_0$ 即相对荧光强度。将相对荧光强度值带入标准曲线公式 $y=2.109\ 6x+0.988$ ($R^2=9\ 989$) 算出果汁中 Vc 含量。每个处理 3 个平行。

1.4.6 荔枝果皮多酚氧化酶 (Polyphenol Oxidase, PPO)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性测定

粗酶提取液制备: 参考王欲翠^[21]方法进行改正, 称取 0.25 g 果皮粉末冻存样, 置于 5 mL 离心管中, 迅速加入 3 mL 浓度 0.05 mol/L、pH 值 7.8 的磷酸缓冲液和 0.2 g PVPP, 冰浴充分研磨, $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、10 000 r/min 条件下离心 10 min, 上清液即酶粗提取液, 低温保存, 用于 PPO、POD 活性的测定。

PPO 测定参照杨兰等^[22]的方法并做修改, 总反应体系为 3 mL, 依次加入浓度 0.05 mol/L、pH 值 7.0 的磷酸缓冲液、浓度 0.1 mol/L 的邻苯二酚、粗酶提取液 2.3、0.5、0.2 mL, 混匀, 测定 470 nm 波长下的吸光值, 并记录 15、75 s 的读数, 重复 6 次。以每克样品每分钟吸光度变化表示为 1 个酶活性单位 (U), 结果用 (U/g) 表示。

POD 测定参照倪伟等^[23]的方法并做修改, 总反应体系为 3 mL, 依次加入浓度 0.05 mol/L、pH 值 7.0 的磷酸缓冲液、浓度 0.05 mol/L 愈创木酚、体积分数 2% 的 H_2O_2 、粗酶提取液 1.8、0.5、0.5、0.2 mL, 混匀, 而后 15 s 开始测定 470 nm 吸光度, 每隔 1 min 记录一次吸光值, 测至 5 min, 重复 6 次。以每克样品每分钟吸光度变化表示为 1 个酶活性单位 (U), 结果用 (U/g) 表示。

1.5 数据处理

使用 SPSS Statistics 22 软件进行数据分析, 采用 ANOVA 分析各组在相同时间点的显著差异 ($P<0.05$), 并用 Origin 2022 绘图。

2 结果与分析

2.1 纳米肉桂醛对荔枝霜疫霉菌落生长及形态的影响

如图 1 所示, 荔枝霜疫霉菌在不同浓度纳米肉桂醛的胡萝卜培养基中生长均受到抑制, 含有效成分质量浓度 0.025 mg/L 的纳米肉桂醛的胡萝卜培养基中荔枝霜疫霉菌菌落的影响最小, 随着有效成分浓度增加, 荔枝霜疫霉菌的生长抑制越来越明显, 在有效成分质量浓度为 0.1 mg/L 时荔枝霜疫霉菌的生长完全被抑制。培养 7 d 后含肉桂醛质量浓度为 0、0.025、0.05、0.1 mg/L 培养基中荔枝霜疫霉菌菌落直径平均值分别为 54.44、46.97、36.67、0 mm, 抑菌率分别为 0%、13.72%、32.64%、100%, 抑制效果与游离肉桂醛浓度相当^[16], 并且优于丙酸钙、山

梨酸钾、苯甲酸钠、尼泊金甲酯、尼泊金乙酯、尼泊金丙酯等食品防腐剂^[24]，表明纳米包埋并不会掩盖肉桂醛对荔枝霜疫霉菌的抑制作用，其在荔枝采后保鲜中具有广泛的应用前景。

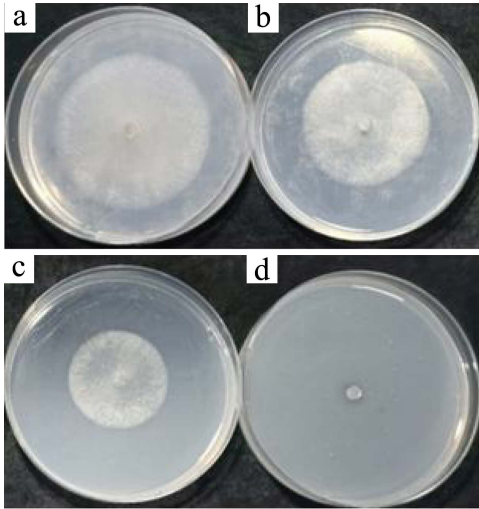


图 1 不同浓度纳米肉桂醛对荔枝霜疫霉菌落生长及形态的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of nanocinnamaldehyde on the growth and morphology of litchi frost fungus colonies

注：a 为空白，b 为 0.025 mg/mL，c 为 0.05 mg/mL，d 为 0.1 mg/mL。

2.2 不同处理对荔枝贮藏过程中外观品质的影响

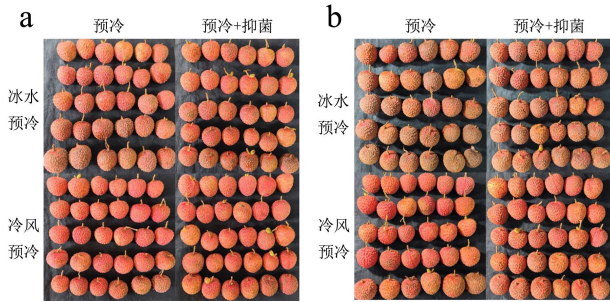


图 2 不同处理对荔枝贮藏过程中外观品质的影响

Fig.2 The effect of different treatments on the appearance and quality of litchi during storage

注：a 为贮藏 15 d，b 为贮藏 21 d。

桂味荔枝贮藏过程中极易发生褐变，外果皮由鲜红变成棕褐色^[3]。由图 2 可见，冰水预冷荔枝 15 d 时即发生比较严重的褐变，但此时冷风预冷荔枝仍能保持较好的色泽，同时纳米肉桂醛处理可显著减轻冰水预冷荔枝的褐变程度。贮藏至第 21 天，冰水预冷荔枝褐变、腐烂严重，完全失去商品价值，纳米肉桂醛处理可显著抑制冰水预冷荔枝的劣变

进程，保持荔枝较好的外观品质。而冷风预冷荔枝均能保持较好的外观品质，保鲜期可由冰水预冷的 15 d 延长至 21 d 左右。

2.3 不同处理对荔枝低温贮藏感病指数的影响

感病指数直观反映了荔枝果皮受病原菌侵染及损伤程度^[25]。由图 3 可知，随贮藏时间的增加，各组荔枝的感病指数均呈不断上升的趋势，其中冰水预冷组果实在整个贮藏期的发病率最高，在第 15 天感病指数即达到 0.08，显著高于其他处理。纳米肉桂醛协同处理，可显著降低冰水预冷荔枝的感病情况，在第 15、21 天时，感病指数比冰水预冷组分别降低了 37.25% 和 59.12%。冷风预冷荔枝的感病指数显著低于冰水预冷荔枝，而且纳米肉桂醛协同处理可进一步降低冷风荔枝腐烂的发生。这可能是由于冰水预冷残留水分加速微生物生长繁殖或存在交叉感染，造成荔枝腐烂感病^[7-10]。冰水预冷结合纳米肉桂醛处理可抑制微生物生长，延长保鲜期，与肉桂醛杀菌作用有关。

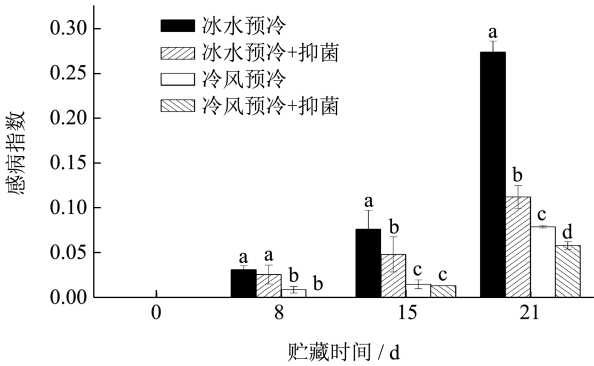


图 3 不同处理对荔枝低温贮藏感病指数的影响

Fig.3 Effects of different treatments on disease susceptibility index of litchi stored at low temperature

注：柱上小写字母表示 $P < 0.05$ 时同一贮藏时间下不同处理间的显著性差异。下同。

2.4 不同处理对桂味低温贮藏褐变指数的影响

褐变是荔枝衰老的标志，荔枝的外观直接影响消费者的选择^[26]。由图 4 可知，褐变指数随贮藏时间的增加而逐渐升高，冰水预冷组荔枝的褐变指数上升最快，褐变最严重，而纳米肉桂醛协同处理可显著降低冰水预冷荔枝褐变的发生。冷风预冷荔枝在贮藏过程中褐变指数显著低于冰水预冷组，表明冷风预冷是桂味荔枝比较适合预冷方式，而“冷风预冷 + 抑菌”荔枝的褐变指数与冷风预冷组无显著性差异，说明纳米肉桂醛可发挥较好的抑菌保鲜

作用,并且可避免游离肉桂醛自身强氧化性而加速果蔬表面褐变^[27]。

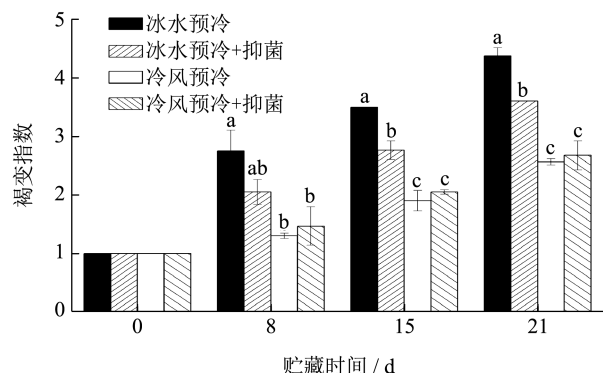


图4 不同处理对荔枝低温贮藏褐变指数的影响

Fig.4 Effects of different treatments on browning index of litchi stored at low temperature

2.5 不同处理对荔枝低温贮藏TSS的影响

果肉 TSS 含量变化可反映含糖量变化,是贮藏品质和成熟度的重要标志,而 TSS 作为能量物质会参与到荔枝采后生理代谢中,因此也会随着储藏时间的增加而逐渐减少^[28,29]。由图 5 可知,在贮藏期间荔枝果肉中 TSS 含量在小范围内呈现一定的下降趋势。这可能是因为荔枝脱粒离体后不再获得由叶柄转运供给的蔗糖,呼吸作用需要消耗自身营养物质的原因^[30]。贮藏第 21 天,冷风预冷和“冷风预冷+抑菌”(两组无明显差异)相对冰水预冷和“冰水预冷+抑菌”(两组无明显差异)处理组的 TSS 含量较高。总的而言,冷风预冷荔枝的 TSS 在整个贮藏过程中的波动小于冰水预冷荔枝,说明冷风预冷更加适合桂味荔枝采后保鲜。

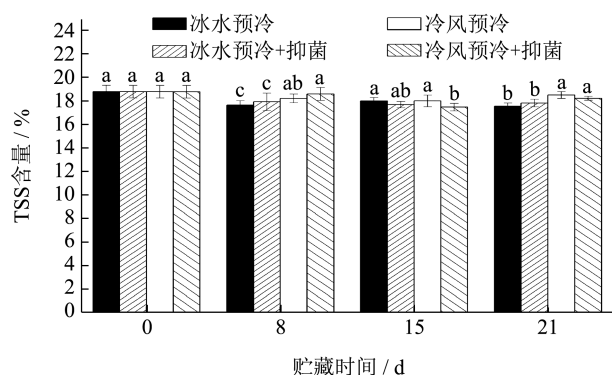


图5 不同处理对荔枝低温贮藏 TSS 的影响

Fig.5 Effects of different treatments on TSS of litchi stored at low temperature

2.6 不同处理对荔枝低温贮藏TA的影响

可滴定酸 (TA) 是评价果实风味的重要因素

素^[31]。由图 6 可知,贮藏前期 TA 含量呈下降趋势,各处理组在第 15 天时含量最低,第 21 天时各处理组的 TA 含量均增加。TA 含量下降原因可能是有机酸作为呼吸基质在能量合成代谢中不断被消耗,导致呈现下降趋势;冰水预冷 TA 增加值略高于冷风预冷,这可能是贮藏后期果实腐烂较严重,大量微生物滋生,产生酸类物质^[11],而纳米肉桂醛处理可延缓 TA 的消耗或增加,说明纳米肉桂醛能抑制荔枝采后病害发生以及延缓荔枝品质劣变。

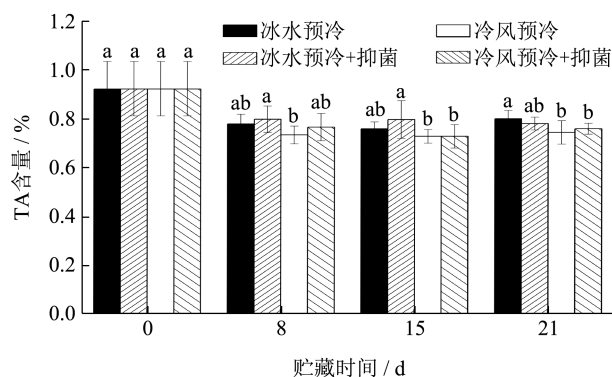


图6 不同处理对荔枝低温贮藏 TA 的影响

Fig.6 Effects of different treatments on TA of litchi stored at low temperature

2.7 不同处理对荔枝低温贮藏Vc含量的影响

抗坏血酸 (Vc) 是衡量荔枝果实风味品质的重要指标,且具有抗氧化、抗衰老的作用。它能清除荔枝新陈代谢所产生的自由基,从而达到延缓荔枝果实成熟衰老的效果^[32]。由图 7 可见,除了冰水预冷组外,其它处理组荔枝的 Vc 值整体呈先升高后下降的趋势,在第 8 天达到最大值。第 8 天,“冷风预冷+抑菌”、冷风预冷和“冰水预冷+抑菌”的 Vc 含量分别为 159.83、154.27 和 141.30 mg/100 g,而冰水预冷的 Vc 含量为 111.81 mg/100 g。Vc 含量上升的原因在于荔枝被采摘后生存环境发生改变,为适应新环境抑制了抗坏血酸酶 (APX) 活性,因此呈现上升趋势^[33]。冰水预冷组荔枝 Vc 含量一直下降的原因可能是其在物质代谢过程中逐渐被消耗,也可能是桂味荔枝受冰水预冷后组织结构被破坏,在 APX 作用下被酶解消耗^[34]。“冷风预冷+抑菌”、冷风预冷和“冰水预冷+抑菌”均能延缓 Vc 含量的降低。其中,冷风预冷对荔枝组织结构破坏较小,在一定范围内清除了细胞内活性氧,保持了结构完整。纳米肉桂醛的使用可降低冰水预冷荔枝的过氧化水平。

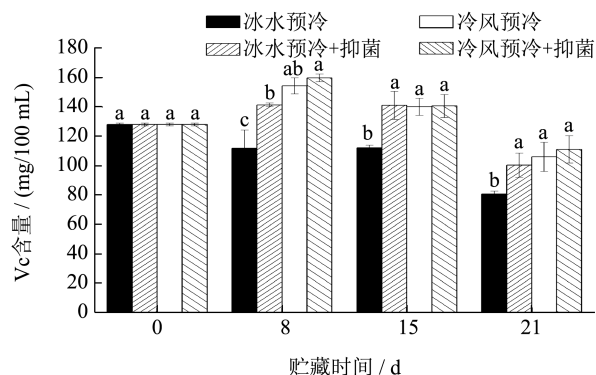


图7 不同处理对荔枝低温贮藏 Vc 含量的影响

Fig.7 Effects of different treatments on Vc content in litchi stored at low temperature

2.8 不同处理对荔枝低温贮藏PPO活性的影响

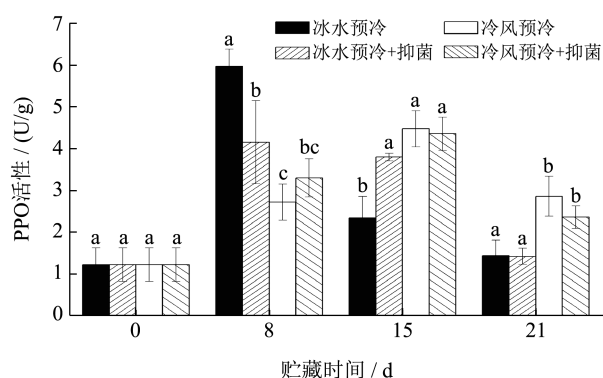


图8 不同处理对荔枝低温贮藏 PPO 活性的影响

Fig.8 Effects of different treatments on PPO activity in litchi stored at low temperature

PPO 在有氧条件下可催化酚单体为醌类物质, 这类物质聚合产生黑色素, 从而造成荔枝果皮褐变^[35]。PPO 引起的是酶促褐变, 活性越高说明褐变得越快^[36]。如图8所示, 各处理组酶活性变化均呈先上升后下降的趋势, 且冰水预冷组荔枝在第8天达到峰值, 其它处理在第15天达到峰值, 并且纳米肉桂醛协同处理可降低贮藏荔枝的PPO峰值。说明冰水预冷、冷风预冷协同纳米肉桂醛处理均可抑制荔枝果实PPO活性, 减缓果实褐变速率, 有效保持桂味荔枝果实生理状态和较高的新鲜度。贮藏后期, 各处理组PPO活性均下降, 这可能是荔枝衰老使各种代谢减缓所致。

2.9 不同处理对荔枝低温贮藏POD活性的影响

和PPO类似, 植物细胞膜系统受损伤后生理代谢紊乱, 酚类物质与POD接触引起酶促褐变^[37]。如图9所示, 冰水预冷组荔枝的POD变化呈先升

高后降低的趋势, 于第8天达到峰值91.33 U/g, 冷风预冷组在贮藏期间呈现上升趋势并于21 d达到峰值85.45 U/g, 冷风预冷荔枝POD酶活峰值显著低于冰水预冷荔枝, 同时纳米肉桂醛协同处理可降低预冷荔枝的POD峰值, 这可能是因为肉桂醛的杀菌作用降低了病原菌的侵染能力, 间接减少超氧自由基(O_2^-)、过氧化氢(H_2O_2)含量, 从而POD值较低, 延缓果实采后衰老^[38]。

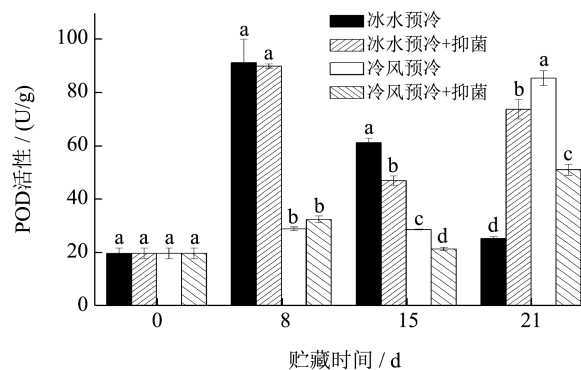


图9 不同处理对荔枝低温贮藏 POD 活性的影响

Fig.9 Effects of different treatments on POD activity in litchi stored at low temperature

3 结论

荔枝采后感病腐烂和褐变情况是影响荔枝贮运的主要问题。本研究发现, 冰水预冷桂味荔枝的耐贮性不高, 容易发生褐变, 这可能与PPO和POD引起的酶促褐变有关。冷风预冷在一定程度上能够抑制PPO和POD酶活, 延长荔枝保鲜期。协同纳米肉桂醛处理能明显降低果实的感病指数和褐变指数, 并对Vc等营养物质有更好的保留, 表明纳米肉桂醛具有在荔枝采后抑菌保鲜的应用前景。可见, 冷风预冷是比较适合桂味荔枝的预冷方式, 联合纳米肉桂醛处理能够进一步提升桂味荔枝的贮藏品质, 可为荔枝采后保鲜提供一种绿色安全的解决方案。

参考文献

- [1] 李慧. 基于保鲜微环境温湿度变化的荔枝褐变等级预测研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2020.
- [2] 伍志权, 李唯正, 何鑫平, 等. 荔枝速冻保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(9): 206-212.
- [3] ZHANG Z K, HUBER D J, QU H X, et al. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols [J]. Food Chemistry, 2015, 171: 191-199.

- [4] 彭勃,冯孔龙,苗建银,等.副干酪乳杆菌FX-6产抗菌肽粗提物对荔枝贮藏品质的影响[J].食品科学,2018,39(7):249-255.
- [5] CHEN X, WU Q X, CHEN Z S Z, et al. Changes in pericarp metabolite profiling of four litchi cultivars during browning [J]. Food Research International, 2019, 120: 339-351.
- [6] ZHANG C, ZHOU P C, MEI J, et al. Effects of different pre-cooling methods on the shelf life and quality of sweet corn (*Zea mays* L.) [J]. Plants, 2023, 12(12): 2370.
- [7] 冯雅蓉,杜俊杰.预冷方式对甜樱桃采后耐贮性及新橙皮苷代谢的影响[J].食品科学,2023,44(15):239-250.
- [8] 张怡,乔勇进,姚连谋,等.不同预冷方式对采后蓝莓贮藏品质的影响[J].农产品加工,2020,5:31-35.
- [9] 邓浩,尹青春,林玉钦,等.不同预冷方式对红毛丹贮藏品质的影响[J].食品工业,2021,42(1):1-4.
- [10] 胡花丽,李鹏霞,王伟.预冷方式对李果实呼吸强度、乙烯生成量及贮藏品质的影响[J].西北林学院学报,2009,24(2):80-83.
- [11] HUANG Z, JIA S L, ZHANG L T, et al. Inhibitory effects and membrane damage caused to fish spoilage bacteria by cinnamon bark (*Cinnamomum tamala*) oil [J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 112: 108195.
- [12] LI S J, CHEN J J, LIU Y T, et al. Application of cinnamaldehyde solid lipid nanoparticles in strawberry preservation [J]. Horticulturae, 2023, 9(5): 607.
- [13] ALBERTINI S, LAI REYES A E, TRIGO J M, et al. Effects of chemical treatments on fresh-cut papaya [J]. Food Chemistry, 2016, 190: 1182-1189.
- [14] CHEN F P, KONG N Q, WANG L, et al. Nanocomplexation between thymol and soy protein isolate and its improvements on stability and antibacterial properties of thymol [J]. Food Chemistry, 2021, 334: 127594.
- [15] 孔念晴,陈于陇,叶明强,等.大豆蛋白-百里香酚纳米复合物处理对百香果采后包装贮藏品质的提升作用[J].现代食品科技,2020,36(10):182-189.
- [16] 许超群,陈飞平,梁旭茹,等.肉桂醛与 ϵ -聚赖氨酸盐酸盐的抑菌活性及其协同抑制机制初探[J].现代食品科技,2023,39(7):24-31.
- [17] 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.
- [18] SCOTT K J, BROWN B I, CHAPLIN G R, et al. The control of rotting and browning of litchi fruit by hot benomyl and plastic film [J]. Sci Hort, 1982, 16(3): 255-262.
- [19] 巫梅婷,陈于陇,戚英伟,等.室温下不同电商包装对荔枝保鲜效果的比较[J].现代食品科技,2022,38(7):177-183.
- [20] 黄方志,沈玉华,李士阔,等.果汁中维生素C荧光法测定的实验设计与教学探索[J].实验室研究与探索,2015,34(5):105-107.
- [21] 王欲翠.超高压处理对荔枝罐头品质的研究[D].广州:华南农业大学,2019.
- [22] 杨兰,潘静宇,李永才,等.寡雄蛋白处理对马铃薯块茎活性氧代谢及病程相关蛋白的诱导[J].食品工业科技,2017,38(4):317-326.
- [23] 倪伟,盖瑞,于文章,等.不同授粉组合对苹果果实ASA含量及抗氧化协同酶、糖酸组分动态变化的影响[J].果树学报,2017,34(6):670-681.
- [24] 战宇.食品防腐剂对荔枝霜疫霉菌抑制效果的研究[J].广州大学学报(自然科学版),2005,4(5):411-414.
- [25] 王甜.外源褪黑素对荔枝采后褐变和病害的控制作用[D].海口:海南大学,2020.
- [26] SU J J, LIN H T, FU B F, 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.
- [27] JIN P, WU X, XU F, et al. Enhancing antioxidant capacity and reducing decay of Chinese bayberries by essential oils [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3769-3775.
- [28] 蒋汉蓉,陈于陇,陈飞平,等.LED蓝色光照结合气调包装对不同品种荔枝采后品质的比较[J].现代食品科技,2023,39(8):103-111.
- [29] TANG Y, LI R, JIANG Z H, et al. Combined effect of *Debaryomyces hansenii* and *Bacillus atrophaeus* on the physicochemical attributes, defense-related enzyme activity, and transcriptomic profile of stored litchi fruit [J]. Biological Control, 2022, 172: 104975.
- [30] 时文林,赵雅琦,闫志成,等.不同预冷方式对甜玉米储藏品质的影响[J].食品科学,2022,43(15):218-226.
- [31] 王宇滨,冯雨晴,马越,等.光照处理对鲜切薄皮甜瓜货架期品质的影响[J].现代食品科技,2019,35(12):122-129.
- [32] LAI D, SHAO X H, XIAO W Q, et al. Suppression of fruit decay and maintenance of storage quality of litchi by *Photobacterium luminescens* Hb1029 treatment [J]. Scientia Horticulturae, 2019, 259: 108836.
- [33] LIN Y Z, LI N, LIN H T, et al. Effects of chitosan treatment on the storability and quality properties of longan fruit during storage [J]. Food Chemistry, 2020, 306: 125627.
- [34] 李杰民,李昌宝,彭宏祥,等.新品种荔枝“三桂红”采后贮藏品质的研究[J].食品工业,2017,38(9):142-147.
- [35] TANG R F, ZHOU Y J, CHEN Z Z, et al. Regulation of browning and senescence of litchi fruit mediated by phenolics and energy status: A postharvest comparison on three different cultivars [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 168: 111280.
- [36] SHILPA, MAHAJAN B V C, SINGH N P, et al. Forced air cooling delays pericarp browning and maintains post-harvest quality of litchi fruit during cold storage [J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2022, 44: 66.
- [37] HE M Y, GE Z X, HONG M, et al. Alleviation of pericarp browning in harvested litchi fruit by synephrine hydrochloride in relation to membrane lipids metabolism [J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 166: 111223.
- [38] 柳风,詹儒林,何衍彪,等.抑菌物质肉桂醛防治芒果炭疽病机制研究[J].果树学报,2011,28(4): 651-656.