

低温贮藏荔枝在梯度回温后的货架期品质变化

吴丹^{1, 2}, 戴凡炜¹, 刘湘玲^{1, 2}, 陈敏慧¹, 陈飞平¹, 戚英伟¹, 陈于陇¹, 叶明强¹, 王玲¹, 罗政¹, 徐玉娟^{1*}
(1. 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)(2. 江西农业大学农学院, 江西南昌 330045)

摘要: 为研究梯度回温对低温贮藏荔枝货架期品质保持的作用, 以“八月红”荔枝为实验材料, 经过1 d 1℃冷库贮藏后, 依次经过9、18和25℃三个温度环境后逐渐回到室温(25℃), 设为“梯度回温”处理组, 同时设置1 d 1℃冷库贮藏后直接放入25℃环境恢复室温(25℃)的荔枝为“直接回温”处理组作为对照, 分别模拟货架在常温放置0、1、3、5 d, 并对货架期荔枝果实各项指标进行测定。结果表明, “梯度回温”处理能够缓解荔枝褐变, 回温处理后在常温放置5 d时, “直接回温”荔枝的褐变指数为1.50, “梯度回温”荔枝的褐变指数仅为1.00。此外检测发现“梯度回温”延缓了可溶性固形物、可滴定酸、总酚、类黄酮、花青素含量的减少, 并有效抑制了果皮中多酚氧化酶和过氧化物酶活性的增加。因此, 采用梯度回温方式处理能有效缓解低温贮藏荔枝品质劣变, 延长货架保鲜期, 具有广阔的应用前景。

关键词: 荔枝; 货架期; 褐变; 回温; 梯度回温

文章编号: 1673-9078(2025)07-160-167

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0463

Quality Changes Within Shelf Life of the Litchi during Gradient Rewarming after Low-temperature Storage

WU Dan^{1,2}, DAI Fanwei¹, LIU Xiangling^{1,2}, CHEN Minhui¹, CHEN Feiping¹, QI Yingwei¹, CHEN Yulong¹,
YE Mingqiang¹, WANG Ling¹, LUO Zheng¹, XU Yujuan^{1*}

(1.Sericultural & Agri-Food Research Institute, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China)(2.College of Agronomy, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: In order to investigate the impact of gradient warming on the quality preservation of the litchi stored at low temperature during shelf life, "August Red" litchi was selected as the experimental material. After 1 day of storage at 1℃, the litchi fruits were gradually brought back to room temperature (25℃) in three different temperature environments: 9, 18, and 25℃, which was set as the "gradient rewarming" treatment group. Meanwhile, another group of litchi fruits stored at 1℃ for 1 d were directly placed in a room temperature environment (25℃) to restore to room temperature, which was set as the "direct rewarming" group as the control, to simulate the shelves placed under room temperature conditions for 0, 1, 3, and 5 d. The results showed that "gradient rewarming" treatment could alleviate litchi browning. After 5 d of storage at room temperature, the browning index of "direct rewarming" litchi was 1.50, while that of "gradient rewarming" litchi was only 1.00. In addition, it was found that "gradient rewarming" delayed the decrease of soluble solids, titratable acid, total phenol, flavonoid, and anthocyanin content, and effectively inhibited the increase of polyphenol oxidase and peroxidase activity in the peel. Therefore, the use of gradient rewarming treatment can effectively alleviate the quality deterioration of litchi stored at low temperature, extend the shelf life, and has a broad application prospect.

引文格式:

吴丹,戴凡炜,刘湘玲,等.低温贮藏荔枝在梯度回温后的货架期品质变化[J].现代食品科技,2025,41(7):160-167.

WU Dan, DAI Fanwei, LIU Xiangling, et al. Quality changes within shelf life of the litchi during gradient rewarming after low-temperature storage [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 160-167.

收稿日期: 2024-04-11

基金项目: 广东省科技计划项目(2024B0202010007); 广东省区域创新能力与支撑保障体系建设专项(2023B0202090004); 广州市重点研发计划项目(2023B01J2001)

作者简介: 吴丹, (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 农产品保鲜, E-mail: wudan123youxiang@163.com

通讯作者: 徐玉娟, (1974-), 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品保鲜与加工, E-mail: xyj6510@126.com

3, and 5 d, respectively, and various indicators related to litchi fruit quality during the shelf life were measured. The results demonstrated that the "gradient rewarming" treatment effectively mitigated browning of litchi fruits. After the "gradient rewarming" treatment followed by standing at room temperature for five days, the browning coefficient of the "direct rewarming" litchi was 1.50, whilst the browning coefficient of the "gradient rewarming" litchi was only 1.00. In addition, "gradient rewarming" was found to delay the decreases in soluble solids content, titratable acids content, total phenols content, flavonoids content, and anthocyanins content, while also inhibiting effectively the increases in the activities of polyphenol oxidase and peroxidase in the peels. Therefore, the use of gradient rewarming treatment can effectively alleviate the quality deterioration of litchi stored at low temperature, extend litchi's shelf life, indicating broad application prospects.

Key words: litchi; shelf life; browning; rewarming; gradient rewarming

荔枝 (*Litchi chinensis* Sonn.) 是中国南方亚热带地区广泛栽培的一种特色水果, 荔枝成熟后果皮外表色泽艳丽, 果肉晶莹饱满、汁多清甜, 具有较高的食用和经济价值, 是中国在国际市场上极具竞争力的水果之一^[1-3]。然而, 由于荔枝成熟的季节恰好是高温多雨的夏季, 且荔枝在采摘后仍然具有旺盛的生理代谢, 在贮藏期间快速消耗自身营养物质与水分, 使其在几天之内发生褐变, 色香味渐失, 严重影响其贮运和销售^[4]。因此如何提高荔枝的贮藏保鲜效果, 延长货架期一直以来是荔枝研究的热点。低温贮藏保鲜是荔枝采后保鲜的常用处理方法之一, 适当低温贮藏以及冷链运输, 可大大延长荔枝保鲜期, 对荔枝的贮藏保鲜研究亦多集中于这个方面^[5-7], 然而目前仍有大部分商家采取常温货架售卖, 当荔枝从低温贮藏环境取出逐渐恢复室温的过程中往往会在短时间内出现褐变, 从而大大降低荔枝的商品价值并缩短货架时长。

在实践中我们观察发现, 从冷库取出的荔枝通过梯度升温逐渐回到室温, 其褐变症状明显轻于直接放回到室温的荔枝。目前已有少量关于果蔬冷藏后回温过程的研究报道, 例如, 巩慧玲等^[8]将 4~10 °C 冷藏的马铃薯定期转移至 18±2 °C 环境下进行回温处理, 避免了马铃薯的“低温糖化”并保持了较高的淀粉含量; 彭丽等^[9]探究不同预冷温度对回温后樱桃品质的影响, 得出 0 °C 预冷效果最佳, 回到室温后果实品质也未严重下降的结论, 但该研究仅为自然放置在室温进行回温的研究, 并未主动设置回温梯度进行回温处理。此外, 梯度回温还应用于冷冻食品的解冻, 经过不同温度阶段解冻后能有效保持冻品品质^[10,11]。

本研究对冷藏后的荔枝进行梯度回温处理, 即对冷藏保鲜后的“八月红”荔枝于 9、18 和 25 °C 贮藏后逐渐回到室温 (25 °C), 分别在常温放置 0、1、

3、5 d 时对荔枝果实各项指标进行测定, 以期荔枝保鲜技术研发提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 植物材料

供试荔枝品种为“八月红”, 于 2023 年 7 月采于广东省广州市增城区, 在晴朗的早晨带枝叶采摘后立刻用泡沫箱运回实验基地进行处理, 剪枝除叶, 选取大小相似且饱满无病的果实, 使用 500 mg/L 质量浓度咪鲜胺浸泡 3 min 后捞出, 用吸水纸轻柔地吸干果实表面水分, 放入 1 °C 冷库贮存 24 h, 随后在冷库中用自主研发的改性聚乙烯保鲜袋 MP20 袋 (长 30 cm, 宽 40 cm, 厚度 20 μm) 随机分装, 每包 200 g 左右。

“直接回温”处理组: 将冷藏的荔枝从冷库取出后直接放置在室内 (25 °C) 中, 让其进行直接回温。

“梯度回温”处理组: 将冷藏的荔枝从冷库取出后转移至温控箱, 调节温度至 9、18 和 25 °C, 两两之间间隔 3 h, 让其进行梯度回温。

0 d 取样时间定为“梯度回温”处理组放置在 25 °C 环境下 3 h 后, 此时“直接回温”处理组也于 25 °C 环境放置 3 h 以上。此后将荔枝继续放置在 25 °C 条件下贮藏以模拟常温货架环境, 分别在 1、3、5 d 时从两个实验组分别随机抽取样品测定生理指标, 设置 3 次重复, 同时将样品用液氮冷冻存于 -80 °C 冰箱内, 用于后续测定指标。

1.2 褐变指数

果皮褐变观测方法参考蒋汉荣等^[12]的方法, 略有改动。根据褐变面积占果皮面积的比例将果皮褐变分为 4 个等级: 果皮无明显褐斑的为 0 级, 褐变面积占比小于 1/4 为 1 级果, 占比 1/4~1/2 为 2 级果, 占比 1/2~3/4 为 3 级果, 3/4 以上为 4 级果, 褐变指数 (BI) 计算参考 Zhang 等^[13]的方法:

$$B = \frac{\sum(L \times n)}{N} \quad (1)$$

式中:

B ——褐变指数(BI);

L ——褐变等级;

n ——该级果数;

N ——总果数。

1.3 呼吸速率

参考曹建康等^[14]的方法,略有修改。便携式二氧化碳检测仪测量,从两个实验组分别随机抽取10颗荔枝称重后放入气密的玻璃罐(3.2 L)中,同时将便携式二氧化碳检测仪也置入玻璃罐,封上盖子计时6 min,从0 min记录CO₂浓度[mg/(kg·s)]的初始值,之后每1 min记1次数,共7次计数,两两相减获得6个CO₂浓度在1 min内变化的数值,清空气密玻璃罐内积累的气体后再次重复测定,共获得12个数值,呼吸速率以每秒每千克果蔬(鲜重)在呼吸代谢过程中释放的CO₂的质量表示(mg/(kg·s))。

1.4 果肉可溶性固形物(TSS)和可滴定酸(TA)含量

采用手持式糖酸度计测量,从两个实验组中分别随机抽取5颗荔枝剥皮去核,取完整果肉放在纱布中挤压成汁水接入烧杯中,将其充分混合后在糖酸度计检测镜面凹槽处滴加荔枝果肉汁液3~5滴,读取TSS值(%),重复3次。在此基础上吸取100 μL荔枝汁液,用蒸馏水稀释50倍,测定并记录,得到TA值(mg/L),重复3次。

1.5 果皮过氧化物酶POD活性的测定

参考曹建康等^[14]的方法,略有修改。称取1 g使用液氮冷冻并打成粉末的荔枝果皮样品,加入5.0 mL预冷好的提取缓冲液(含1 mmol/LPGE 6 000、4% (V/V) PVPP和1% (V/V) Triton X-100)并充分震荡混合,于离心机4 ℃、12 000×g离心30 min,收集上清液存为酶提取液。在试管中加入3.0 mL 25 mmol/L愈创木酚溶液和50 μL酶提取液,最后加入200 μL 0.5 mol/LH₂O₂溶液启动反应,同时立即开始计时,于15 s时利用分光光度计在波长470 nm处测定吸光度值,此后每隔1 min记录一次,至少获取6个数据,重复3次。

1.6 果皮多酚氧化酶PPO活性的测定

参考曹建康等^[14]的方法,略有修改。使用同上

方法获取酶提取液。在试管中加入4.0 mL 50 mmol/L、pH值5.5的乙酸-乙酸钠缓冲液(用200 mmol/L醋酸溶液与200 mmol/L醋酸钠溶液按比例配置)和1.0 mL 50 mmol/L邻苯二酚溶液,最后加入1 mL酶提取液启动反应,同时立即计时,于15 s时利用分光光度计在波长420 nm处测定吸光度值,此后每隔1 min记录一次,至少获取6个点的数据,重复3次。

1.7 果皮的总酚、类黄酮和花青素含量测定

参考曹建康等^[14]的方法,略有修改。称取1.0 g荔枝果皮粉末,加入预冷的1% HCl-甲醇溶液摇匀,定容至10 mL,于4 ℃避光20 min,期间摇晃数次,过滤,取滤液,利用分光光度计分别在波长280、325、600和530 nm处测定吸光度值,重复3次。

1.8 数据处理

使用Excel 16整理数据;使用IBM SPSS Statistics 26软件检验试验数据之间的显著性和相关性分析(*为 $P < 0.05$, **为 $P < 0.01$, ***为 $P < 0.001$);使用Origin 2021作图。

2 结果与分析

2.1 不同回温处理下果实的外观品质变化

荔枝采后极易出现腐败褐变现象,这往往是制约荔枝远销和出口的主要瓶颈^[15],果皮褐变的外在表现为颜色由红变为褐色,同时伴随着失水、腐烂等现象^[16]。荔枝果实在直接回温与梯度回温处理下的外观变化如图1a所示,0 d时两种处理下的荔枝果实均鲜红饱满,表皮完整,没有出现褐变;1 d时有少量果实出现褐变,果皮颜色加深变暗;3 d时两种果实均出现大量褐变现象;5 d时荔枝在外观上的褐变已经影响到了果实的商品价值。

褐变指数如图1b所示,两种处理下的荔枝褐变指数皆随贮藏时间逐渐上升。1 d时“直接回温”荔枝的褐变指数达到0.07,显著高于“梯度回温”荔枝(0.02),达极显著差异水平($P < 0.001$);5 d时“梯度回温”荔枝的褐变指数仅为1.00,显著($P < 0.01$)低于“直接回温”荔枝(1.50)。通常情况下荔枝可在1~5 ℃低温条件下贮藏30 d,然而当荔枝从冷库转入常温环境下后,果皮出现迅速褐变以及腐烂^[17]。本实验发现,梯度回温可有效缓解荔枝出库后迅速褐变现象,从而延长货架期。

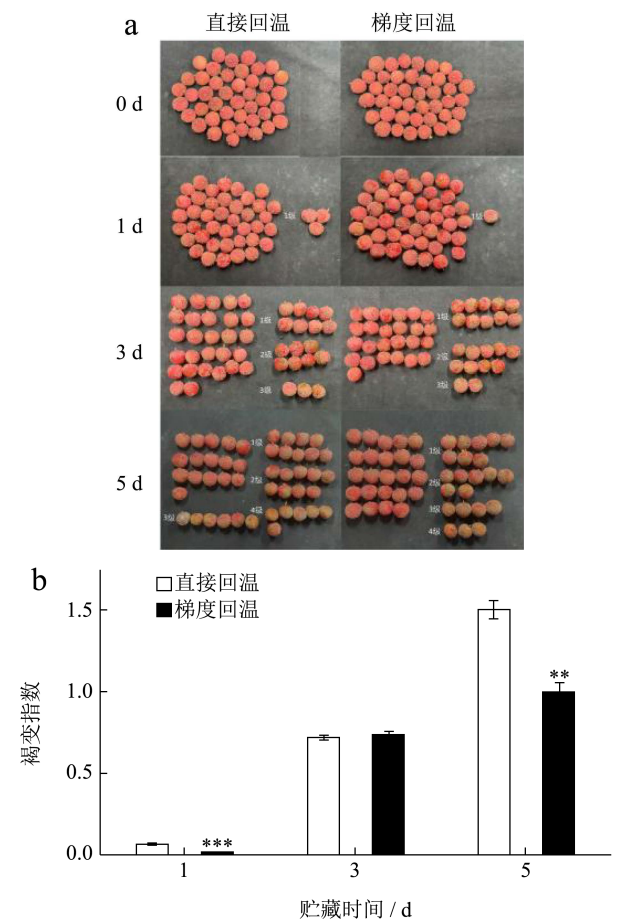


图 1 不同回温处理下荔枝果实外观变化 (a) 及褐变指数 (b)

Fig.1 Changes in appearance (a) and browning index (b) of litchi fruit under different warming treatments

注：* 代表水平 $P<0.05$ 显著，** 代表水平 $P<0.01$ 显著，*** 代表水平 $P<0.001$ 极显著，下同。

2.2 不同回温处理对荔枝呼吸速率的影响

呼吸作用是指植物消耗氧气将有机成分氧化分解为简单分子，同时释放能量的过程，植物在此过程中会分解各类有机物，是导致植物成熟、衰老等生理现象的主要原因^[18]。如图 2 所示，随着贮藏两种处理荔枝呼吸速率呈现下降的趋势。0 d 时“梯度回温”荔枝的呼吸速率为 46.28 mg/(kg·s)，“直接回温”荔枝为 55.58 mg/(kg·s)，达成显著差异 ($P<0.01$)；1 d 时“梯度回温”荔枝呼吸速率下降至 38.17 mg/(kg·s)，也显著 ($P<0.01$) 低于“直接回温”荔枝 44.00 mg/(kg·s)。3 d 之后两个处理的呼吸速率变化趋于稳定，无显著差异，这可能是由于梯度回温处理下荔枝温度变化较为平缓，“梯度回温”荔枝呼吸速率的升高较“直接回温”荔枝缓慢，因此在 0~1 d 时两种处理荔枝的呼吸速率形成显著差异，而在室温环境下放置 3 d 后二者的呼

吸速率趋于相似，没有显著差异。荔枝采后呼吸速率旺盛，易造成大量营养物质的损耗，加速褐变进程^[19]，有研究通过使用原花青素抑制荔枝果实呼吸代谢，从而达到抑制酶促褐变的效果^[20]，本实验中也得到了呼吸速率降低伴随荔枝褐变指数降低的结果。由此可见，贮藏早期梯度回温处理能有效降低荔枝呼吸速率，从而减少荔枝采后营养物质的减少，降低活性氧的积累，延缓褐变进程。

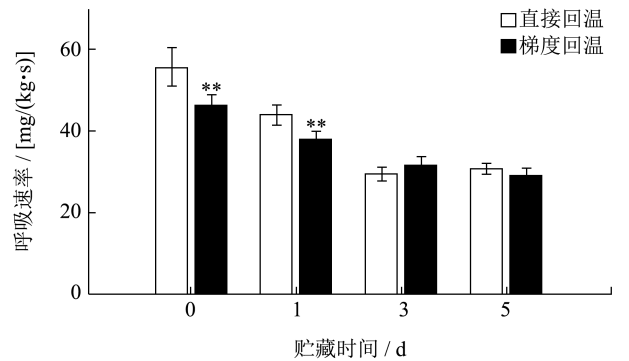


图 2 不同时期两个处理荔枝的呼吸速率变化

Fig.2 Changes in the respiration rate of the two treatments at different times

2.3 不同回温处理对荔枝果肉可溶性固形物 (TSS) 和可滴定酸 (TA) 含量的影响

可溶性固形物 (TSS) 影响水果的营养品质与风味品质，是判断水果品质的重要指标。荔枝采后消耗自身营养物质将造成 TSS 含量减少。由图 3a 所示，两种处理荔枝果实的 TSS 含量都随时间推移呈现下降趋势，0 d 时“梯度回温”荔枝的 TSS 含量为 16.23%，极显著 ($P<0.001$) 高于“直接回温”荔枝 (15.10%)。1~3 d 时“梯度回温”荔枝的呼吸速率逐渐增强，TSS 大量消耗，此时两种荔枝的 TSS 含量没有显著差异，但于数值上“梯度回温”荔枝仍高于“直接回温”荔枝。5 d 时“梯度回温”荔枝的 TSS 为 14.30%，同样极显著 ($P<0.001$) 高于“直接回温”荔枝 (13.13%)，这是因为经过 5 d 贮藏后“直接回温”荔枝的 TSS 含量大幅下降，而“梯度回温”荔枝仍然保持较好的水平，因此形成差异。

可滴定酸 (TA) 是果实采后的重要品质之一，影响果实风味品质。由图 3b 所示，随着贮藏时间的推移两种处理的 TA 含量总体呈先上升后下降的趋势，均于 1 d 达到 TA 积累的顶峰，1 d 之后“梯度回温”荔枝的 TA 显著高于“直接回温”荔枝，5 d 时“梯度回温”荔枝和“直接回温”荔枝的 TA 分

别为 0.75 和 0.71 mg/L, 较 0 d 分别下降了 0.04 和 0.06 mg/L, 可见梯度回温处理在货架早期能有效保持荔枝果实中 TA 含量, 延缓荔枝果实衰老。综上所述, 梯度回温处理能有效延缓荔枝果实中 TSS 和 TA 含量的下降, 有效保持荔枝的营养品质。

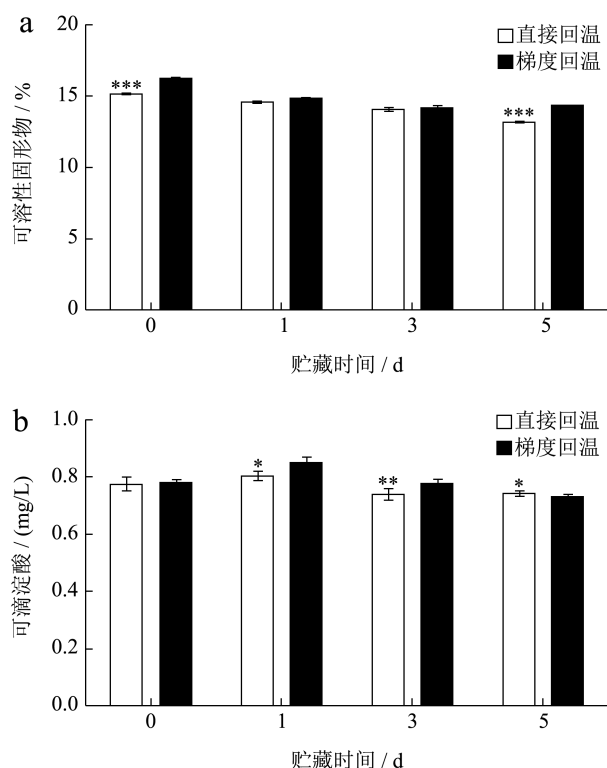


图3 不同时期两个处理荔枝的可溶性固形物 (a) 及可滴定酸 (b) 变化

Fig.3 Changes of soluble solid (a) and titratable acid (b) in two treated litchi at different periods

2.4 不同回温处理对荔枝果皮的总酚含量的影响

酚类物质是植物天然色素, 具有较强的还原性, 可消除自由基, 是天然的抗氧化剂^[21]。如图 4 所示, “直接回温”处理荔枝的果皮总酚含量随时间的推移变化趋势平缓, 而“梯度回温”处理下果皮总酚含量呈现稳步上升的趋势, 这可能是荔枝贮藏过程中酚类物质不断累积的结果, 在樱桃中也存在类似的酚类物质累积现象^[22]。0~1 d 时, 两个处理之间没有显著差异。3 d 和 5 d 时“梯度回温”荔枝的果皮总酚含量分别为 16.80 和 17.18 $\Delta\text{OD}_{280}/\text{g}\cdot\text{FW}$, “直接回温”荔枝分别为 16.60 和 16.84 $\Delta\text{OD}_{280}/\text{g}\cdot\text{FW}$, 皆形成显著差异 ($P<0.01$)。“梯度回温”荔枝在常温贮藏 5 d 后仍具有相对较高水平的总酚含量, 比“直接回温”荔枝高 0.34 $\Delta\text{OD}_{280}/\text{g}\cdot\text{FW}$ 。多项研

究^[4,23,24]表明酚类物质也是果实褐变反应的底物, 酚类物质含量可在一定程度反应果实发生酶促褐变的情况, 本实验中“梯度回温”荔枝的总酚含量保持较高水平, 同时褐变指数较“直接回温”荔枝低, 这符合前人研究里酚类物质随酶促褐变发生而减少的规律。

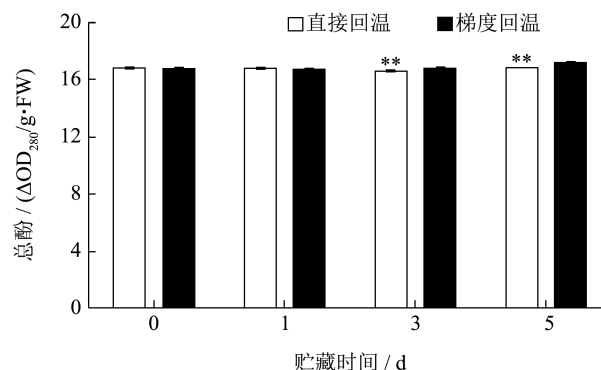


图4 不同时期两个处理荔枝的总酚含量变化

Fig.4 Changes in total phenolic content of litchi in two treatments at different stages

2.5 不同回温处理对荔枝果皮的类黄酮含量的影响

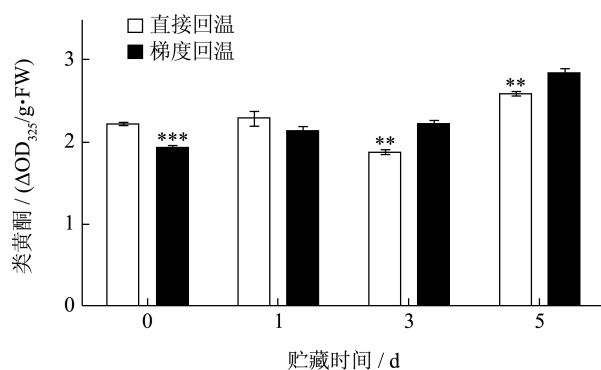


图5 不同时期两个处理荔枝的类黄酮含量变化

Fig.5 Changes in flavonoid content of litchi in two treatments at different times

荔枝果皮中具有丰富的类黄酮物质, 其含量与荔枝的抗氧化性有直接关系^[22]。如图 5 所示, 0 d 时“直接回温”处理下果皮中类黄酮产生大量积累, 极显著 ($P<0.001$) 比“梯度回温”荔枝高, 这是由于类黄酮早期在荔枝果皮中有积累的现象^[25], 而“直接回温”荔枝在回温后代谢水平较“梯度回温”荔枝高, 因此更快地呈现类黄酮积累现象; “梯度回温”荔枝的类黄酮含量随贮藏时间呈持续上升趋势, 于 0~1 d 期间较“直接回温”荔枝低, 在 3 d 时达到 2.21 $\text{OD}_{325}/\text{g}\cdot\text{FW}$, 超过“直接回温”荔

枝的 $1.87 \text{ OD}_{325}/\text{g}\cdot\text{FW}$ ，形成显著差异 ($P < 0.01$)，之后持续上升，在 5 d 时则达到 $2.84 \text{ OD}_{325}/\text{g}\cdot\text{FW}$ ，同样显著 ($P < 0.01$) 高于“直接回温”荔枝 ($2.58 \text{ OD}_{325}/\text{g}\cdot\text{FW}$)。前人研究表明，类黄酮等酚类化合物与荔枝抗氧化性有直接联系，保持更高水平的类黄酮含量有利于荔枝抗氧化系统的维持，从而延缓荔枝果皮褐变并延长荔枝货架期寿命^[26]，这与本实验中“梯度回温”荔枝的类黄酮含量更加稳定的结果相对应。

2.6 不同回温处理对荔枝果皮的花青素含量的影响

花青素已被证实是荔枝褐变过程中主要相关的多酚物质之一^[27]，与荔枝的抗氧化性有关。如图 6 所示，0 d 时“直接回温”荔枝果皮的花青素含量较高，之后呈现持续下降趋势，于 3 d 时降低到 $0.90 (\text{OD}_{530}\sim\text{OD}_{600})/\text{g}\cdot\text{FW}$ ，极显著 ($P < 0.001$) 低于“梯度回温”荔枝；“梯度回温”荔枝果皮的花青素含量变化稳定且呈缓慢上升趋势，在 5 d 时花青素含量最高，达到 $1.64 (\text{OD}_{530}\sim\text{OD}_{600})/\text{g}\cdot\text{FW}$ ，极显著 ($P < 0.001$) 高于“直接回温”荔枝 $0.96 (\text{OD}_{530}\sim\text{OD}_{600})/\text{g}\cdot\text{FW}$ ，这表明梯度回温处理维持荔枝果皮花青素含量的效果十分显著。花青素在荔枝贮藏过程中存在少量积累的情况^[24]，贮藏早期“直接回温”荔枝率先完成花青素积累与快速降解的过程，而“梯度回温”荔枝仍处于不断积累的过程，因此其花青素含量呈现缓慢上升的趋势。荔枝采后随着花青素不断降解，抗氧化性逐渐减弱，从而加速荔枝果皮的褐变^[28]，本实验结果中梯度回温方式能有效保持荔枝果实花青素含量的稳定，从而保持荔枝果实品质，延缓褐变发生。且综合图 4~6 判断，梯度回温处理对荔枝果皮中花青素的保护效果相较类黄酮与总酚更佳。

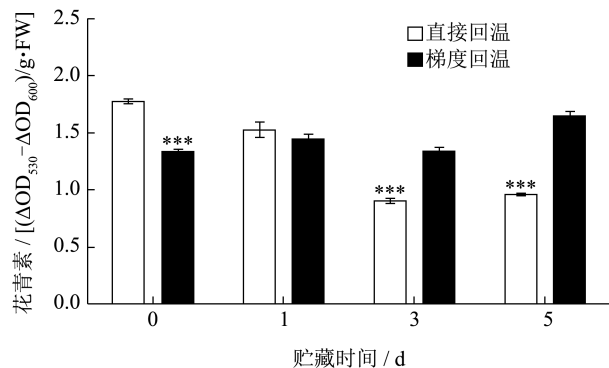


图 6 不同时期两个处理荔枝的花青素含量变化

Fig.6 Changes in anthocyanin content of litchi in two treatments at different times

2.7 不同回温处理对荔枝果皮多酚氧化酶 PPO 活性的影响

褐变分为酶促褐变与非酶促褐变，普遍认为 PPO 在酶促褐变过程中起重要作用，能催化酚类化合物生成醌类化合物，再进一步聚合生成黑、褐色的化合物，进而引起果皮褐变^[23,24]。如图 7 所示，两个处理下荔枝果皮中的 PPO 活性随着时间推移皆呈现上升趋势。0~3 d 时“梯度回温”荔枝的 PPO 活性比“直接回温”荔枝低，且皆形成显著差异，3 d 时“梯度回温”荔枝的 PPO 活性为 $1.03 \Delta\text{OD}_{420}/\text{min}\cdot\text{g}$ ，比“直接回温”荔枝低 $1.01 \Delta\text{OD}_{420}/\text{min}\cdot\text{g}$ ，5 d 时“梯度回温”荔枝的 PPO 活性快速上升，与“直接回温”荔枝失去显著性差异，这可能是因为“梯度回温”荔枝在 5 d 时，膜系统遭到严重破坏，酚类物质大量流出，从而导致 PPO 酶活性大幅提升。综上所述，梯度回温方式对荔枝果皮 PPO 活性具有抑制效果，而多项研究^[26,29]表明通过抑制荔枝果皮中 PPO 活性可以有效抑制荔枝果皮褐变发生，本实验 PPO 活性与果皮褐变程度呈正相关。

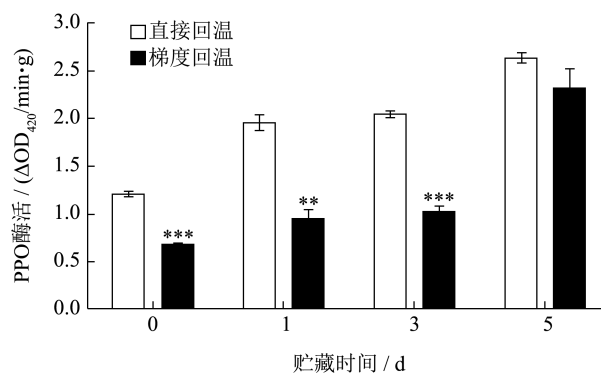


图 7 不同时期两个处理荔枝的 PPO 酶活性变化

Fig.7 Changes in PPO enzyme activity of two treatments at different stages

2.8 不同回温处理对荔枝果皮过氧化物酶 POD 活性的影响

POD 是植物中一种重要的氧化还原酶，有清除活性氧，保护细胞正常生物代谢的重要作用^[26]，且多数研究认为 POD 也是酶促褐变的重要参与者，其活性与褐变程度呈正相关^[23,24]。如图 8 所示，“直接回温”荔枝果皮 POD 活性呈现先上升后平稳的趋势，于 3 d 时达到最高，之后略有下降，“梯度回温”荔枝果皮 POD 活性呈现持续上升的趋势。0 d 时两个处理的 POD 活性没有显著性差异，1 与 3 d 时“梯度回温”荔枝的 POD 活性分别为 32.31

与 $40.14 \Delta OD_{470}/\text{min}\cdot\text{g}$, 皆极显著 ($P < 0.001$) 低于“直接回温”荔枝 (41.38 与 $63.59 \Delta OD_{470}/\text{min}\cdot\text{g}$), 这表明梯度回温处理在贮藏早期对 POD 活性有抑制作用, 且与前文所示 PPO 酶活性和总酚、类黄酮等次生代谢物的含量变化可实现对应。有相关实验指出通过抑制荔枝果皮 PPO 与 POD 酶活性可以降低荔枝中类黄酮、花青素等含量的减少, 达到延缓酶促褐变的效果^[26,29]。综上所述, 梯度回温处理能有效地抑制荔枝褐变酶促反应, 保持酚类物质的含量稳定, 从而维持荔枝营养与风味品质, 延长荔枝货架期。

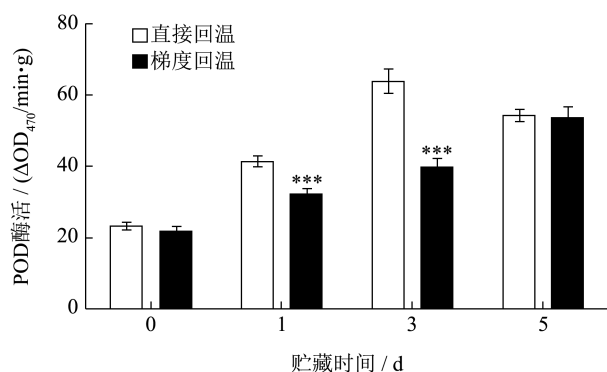


图 8 不同时期两个处理荔枝的 POD 酶活性变化

Fig.8 Changes in POD enzyme activity of two treatments at different times

3 总结

本研究主要探讨了荔枝低温贮藏后, 不同回温方式对荔枝的品质及褐变影响。根据实验结果可知, 梯度回温处理可显著降低荔枝果实呼吸速率, 减少荔枝可溶性固形物和可滴定酸的代谢损耗; 减少类黄酮与花青素含量的降解, 保持总酚含量的稳定; 抑制 PPO 与 POD 酶活性, 降低荔枝褐变指数。综上所述, 与直接将荔枝从低温环境放到常温环境的常见回温方式相比, 采用梯度回温的操作能有效维持荔枝品质, 延长荔枝低温贮藏后货架期。对于梯度回温的最佳梯度温差设置及处理时长等参数, 以及梯度回温处理缓解荔枝品质劣变分子机制等问题还有待进一步探讨与研究。

参考文献

- [1] GUO X M, QIAO L, LUO T, et al. Postharvest calcium chloride treatment strengthens cell wall structure to maintain litchi fruit quality [J]. Foods, 2023, 12(13): 2478.
- [2] YAO P F, GAO Y, JESUS S, et al. Litchi (*Litchi chinensis* Sonn.): a comprehensive review of phytochemistry, medicinal properties, and product development [J]. Food & Function, 2023, 12(20): 9527-9548.
- [3] ZHAO L, WANG K, WANG K, et al. Nutrient components, health benefits, and safety of litchi (*Litchi chinensis* Sonn.): A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2020, 19(4): 2139-2163.
- [4] 潘凤仪, 林裕琼, 徐建杭, 等. 荔枝果实采后损耗发生的原因分析 [J]. 中国热带农业, 2021, 3: 8-13.
- [5] 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.
- [6] 黄方, 唐杰, 黄敏, 等. 低温结合气调包装对荔枝保鲜作用 [J]. 食品工业, 2022, 43(10): 51-55.
- [7] 郭莉, 吴广, 尹青春, 等. 二氧化氯缓释剂对低温贮藏荔枝品质及关键花青素的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(6): 297-303.
- [8] 巩慧玲, 赵萍, 杨俊丰. 马铃薯贮藏期间淀粉和还原糖含量的变化及回温处理的影响 [J]. 食品工业科技, 2008, 2: 277-279, 316.
- [9] 彭丽, 高珊, 熊思国, 等. 不同预冷温度对甜樱桃果实保鲜效果的影响 [J]. 包装工程, 2023, 44(7): 104-114.
- [10] IRJA S R, GURO M T, CHRISTOPH J B, et al. Effects of controlled thawing media temperatures on quality and safety of pre-rigor frozen Atlantic cod (*Gadus morhua*) [J]. LWT, 2018, 90: 138-144.
- [11] 吴炜俊, 程丽娜, 徐玉娟, 等. 液氮喷雾速冻及梯度解冻在荔枝品质保鲜上的优势 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(3): 105-114.
- [12] 蒋汉蓉, 陈于陇, 陈飞平, 等. LED 蓝色光照结合气调包装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.
- [13] ZHANG Y Y, DONALD J H, HU M 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.
- [14] 曹建康, 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, 2007.
- [15] YUN Z, GAO H J, CHEN X, et al. Effects of hydrogen water treatment on antioxidant system of litchi fruit during the pericarp browning [J]. Food Chemistry, 2020, 336: 127618.
- [16] JIANG Y M, YAO L H, LICHTER A, et al. Postharvest biology and technology of litchi fruit [J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2003, 1(2): 85637684.
- [17] JIANG Y M, WANG Y, SONG L, et al. Postharvest characteristics and handling of litchi fruit-an overview [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2006, 46(12): 1541-1556.
- [18] SHINTARO O, DAISUKE Y, GAKU Y, et al. Closed chamber system for easily measuring the respiration rate

- of intact fruits [J]. *Environment Control in Biology*, 2022, 60(1): 33-37.
- [19] ZHANG W L, JIANG H T, ZHANG Y Q, et al. Synergistic effects of 1-MCP and hot air treatments on delaying softening and promoting anthocyanin biosynthesis in nectarines [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111598.
- [20] SHEN W J, LI W, SHAO Y Z, et al. Proanthocyanidin delays litchi peel browning by inhibiting ethylene biosynthesis, respiratory metabolism, and phenol oxidase activities [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 309: 111677.
- [21] 李树青,杨波,李东方,等. 欧李果实不同(成熟)阶段不同部位酚类物质含量比较[J]. *安徽农业大学学报*, 2022, 49(5): 750-754.
- [22] ZHANG W L, PAN Y G, JIANG Y M, et al. Advances in control technologies and mechanisms to treat peel browning in postharvest fruit [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 311: 111798.
- [23] 白鸽,王甄妮,朱丹实,等. 采后果实的果皮褐变机理及防褐变研究进展[J]. *包装工程*, 2021, 42(5): 80-87.
- [24] 张长勇,马镠,徐匆,等. 荔枝采后腐败褐变机理及保鲜技术研究进展[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(8): 1603-1609.
- [25] MORTEZA S A, FARSHAD K, VALI R, et al. γ -Aminobutyric acid and nitric oxide treatments preserve sensory and nutritional quality of cornelian cherry fruits during postharvest cold storage by delaying softening and enhancing phenols accumulation [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 246: 812-817.
- [26] BAI X Y, YANG Z M, SHEN W J, et al. Polyphenol treatment delays the browning of litchi pericarps and promotes the total antioxidant capacity of litchi fruit [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 291: 110563.
- [27] ZHANG Z Q, PANG X Q, DUAN X W, et al. Role of peroxidase in anthocyanin degradation in litchi fruit pericarp [J]. *Food Chemistry*, 2005, 90(1-2): 47-52.
- [28] TANG R F, ZHOU Y J, CHEN Z S 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.
- [29] 刘家粮,张越,刘力霞,等. 褪黑素对采后荔枝果实冷害及生理变化的影响[J]. *中国食品学报*, 2022, 22(12): 200-213.