

## 外源褪黑素对采后西梅的贮藏品质及软化相关基因表达的影响

乔沛, 李慧星, 罗建成, 程爽, 于海彦

**Effect of Exogenous Melatonin on Postharvest Storage Quality and Softening-related Gene Expression of *Prunus domestica***

QIAO Pei, LI Huixing, LUO Jiancheng, CHENG Shuang, and YU Haiyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060076>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 褪黑素处理对百香果采后贮藏品质的影响

Effect of Melatonin Treatment on Storage Quality of Passion Fruit after Harvest

食品工业科技. 2021, 42(20): 294–300 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010068>

#### 外源褪黑素处理对采后火龙果贮藏品质和活性氧清除能力的影响

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on Storage Quality and ROS Scavenging Capacity of Harvested Pitaya Fruit

食品工业科技. 2024, 45(21): 302–309 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120053>

#### 褪黑素结合丁香酚处理对红桃贮藏品质的影响

Effect of Melatonin Coupling with Eugenol Treatment on Storage Quality of Red *Amygdalus persica*

食品工业科技. 2022, 43(23): 341–346 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022070080>

#### 外源褪黑素处理对金丝绞瓜贮藏品质和抗氧化能力的影响

Effects of Exogenous Melatonin Treatment on the Storage Quality and Antioxidant Capacity of Spaghetti Squash

食品工业科技. 2024, 45(12): 294–301 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070220>

#### 外源褪黑素处理对红托竹荪鲜品贮藏品质的影响

Effect of Exogenous Melatonin Treatments on the Storage Quality of *Dictyophora rubrovolvata*

食品工业科技. 2022, 43(16): 363–370 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021120009>

#### 褪黑素对青椒低温贮藏品质及能量代谢影响

Effects of Melatonin on Storage Quality and Energy Metabolism of Green Pepper (*Capsicum frutescens* L.) During Low Temperature Storage

食品工业科技. 2024, 45(2): 324–332 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023040056>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

乔沛, 李慧星, 罗建成, 等. 外源褪黑素对采后西梅的贮藏品质及软化相关基因表达的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 340–351. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060076

QIAO Pei, LI Huixing, LUO Jiancheng, et al. Effect of Exogenous Melatonin on Postharvest Storage Quality and Softening-related Gene Expression of *Prunus domestica*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 340–351. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060076

· 贮运保鲜 ·

# 外源褪黑素对采后西梅的贮藏品质及软化相关基因表达的影响

乔沛<sup>1,2,\*</sup>, 李慧星<sup>1,2</sup>, 罗建成<sup>1,2</sup>, 程爽<sup>1,2</sup>, 于海彦<sup>1,2</sup>

(1. 南阳理工学院, 河南省工业微生物资源与发酵重点实验室, 河南南阳 473004;  
2. 南阳理工学院生物与化学工程学院, 河南南阳 473004)

**摘要:** 目的: 探究外源褪黑素处理对采后西梅果实贮藏品质和相关代谢的影响。方法: 该研究分别以 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  的褪黑素 (melatonin, MT) 处理四川广安西梅果实作为处理组, 并以清水处理为对照组, 观察西梅果实常温 ( $22\pm3^\circ\text{C}$ ,  $65\%\pm5\%$  RH) 贮藏过程中的果实色度、失重率、可溶性固形物 (total soluble solid, TSS) 含量、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、丙二醛 (Malondialdehyde, MDA) 含量等贮藏品质及相关代谢的变化。结果表明: 关于果实色度方面, 不同 MT 处理组的  $L^*$  和  $b^*$  值相对于对照组均无明显的差异 ( $P>0.05$ ), 而  $c^*$  值在贮藏后期 (9~12 d) 具有明显差异 ( $P<0.05$ ), 其中 60 和 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组与对照组的差异最明显; 关于贮藏品质方面, 在贮藏中后期 (6~12 d) 不同 MT 处理组相对于对照组均显著抑制失重率的上升 ( $P<0.05$ ), 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  处理组效果最佳, 同时不同 MT 处理组相对于对照组均可以有效抑制 TSS 含量的下降 ( $P<0.05$ ), 其中 240  $\mu\text{mol/L}$  处理组效果最佳; 关于西梅果实细胞膜结构方面, 不同处理组相对于对照组均在贮藏中期 (3~9 d) 显著抑制西梅果实细胞膜通透性和 MDA 含量的上升 ( $P<0.05$ ), 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  处理组效果最佳; 关于西梅果实活性氧代谢方面, 不同处理组相对于对照组均在贮藏后期 (9~12 d) 显著促进超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD) 和过氧化物酶 (peroxidase, POD) 酶活性上升 ( $P<0.05$ ), 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  处理组效果最佳; 关于软化相关代谢方面, 相对于对照组, 不同 MT 处理组均抑制多聚半乳糖醛酸酶 (polygalacturonase, PG)、 $\beta$ -半乳糖苷酶 ( $\beta$ -galactosidase,  $\beta$ -Gal) 和纤维素酶 (cellulase, Cx) 的活性和 *PdPG2*、*PdCx6* 和 *Pd $\beta$ -GAL3* 相对表达量的上升, 同时有效维持 *PdPME3I* 的表达量, 但只有 60  $\mu\text{mol/L}$  LMT 组与 CK 组之间存在显著性差异 ( $P<0.05$ ), 而 120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组却无显著差异 ( $P>0.05$ )。经过主成分分析发现 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理相对于 120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理具有更好的保鲜效果。结论: 外源 MT 处理一方面可有效调控软化相关酶活性及相关基因的表达量, 延缓贮藏期间果实软化, 另一方面可提高抗氧化酶活性, 减轻活性氧对细胞膜结构的破坏, 最终达到延缓采后西梅果实货架期的目的。研究结果为采后外源褪黑素在采后果蔬中的应用提供理论依据。

**关键词:** 西梅, 褪黑素, 贮藏品质, 基因表达

中图分类号: Q946.92

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)09-0340-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060076

本文网刊:



## Effect of Exogenous Melatonin on Postharvest Storage Quality and Softening-related Gene Expression of *Prunus domestica*

QIAO Pei<sup>1,2,\*</sup>, LI Huixing<sup>1,2</sup>, LUO Jiancheng<sup>1,2</sup>, CHENG Shuang<sup>1,2</sup>, YU Haiyan<sup>1,2</sup>

(1. Henan Key Laboratory of Industrial Microbial Resources and Fermentation Technology, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China;

2. College of Biology and Chemistry Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, China)

**Abstract:** Objective: This study investigated the effects of exogenous melatonin treatment on the post-harvest quality and

收稿日期: 2024-06-07

基金项目: 南阳理工学院 2024 年度实验室开放基金; 南阳理工学院 2024 年大学生科研基金项目。

作者简介/通信作者\*: 乔沛 (1996-), 男, 硕士, 助教, 研究方向: 果蔬采后生物分子学, E-mail: qiaopei@nyist.edu.cn。

related metabolism of postharvest prune fruits. Methods: The Sichuan Guang'an prunes fruit with 60, 120 and 240  $\mu\text{mol/L}$  melatonin (MT) were treated as the treatment groups, and water treatment was treated as the control group in this study. The changes in storage quality and related metabolism of prunes fruit including color, weight loss rate, total soluble solid content (TSS), soluble protein content, cell membrane permeability and malondialdehyde (MDA) content were observed during room temperature ( $22\pm3^\circ\text{C}$ ,  $65\%\pm5\%$  RH) storage. Results: In terms of fruit color, there was no significant difference in  $L^*$  and  $b^*$  values between different MT treatment groups and the control group ( $P>0.05$ ), while  $c^*$  values showed significant differences in the later stage of storage (9~12 days) ( $P<0.05$ ), with the 60 and 120  $\mu\text{mol/L}$  MT treatment groups showing the most significant differences compared to the control group. In terms of storage quality, during the later stages of storage (6~12 days), the increase in weight loss rate was inhibited significantly in different MT treatment groups relative to the control group ( $P<0.05$ ), with the 60  $\mu\text{mol/L}$  treatment group showing the best effect. At the same time, different MT treatment groups were able to effectively inhibit the decrease in TSS content relative to the control group ( $P<0.05$ ), with the 240  $\mu\text{mol/L}$  treatment group showing the best effect. While the decrease in TSS content inhibited effectively in different MT treatment groups compared to the control group ( $P<0.05$ ), with the 240  $\mu\text{mol/L}$  treatment group showing the best effect. Regarding the cell membrane structure of prunes fruit, the increase of cell membrane permeability and MDA content were inhibited effectively in different treatment groups of prunes fruit during the mid storage period (3~9 days) compared to the control group ( $P<0.05$ ), with the 60  $\mu\text{mol/L}$  treatment group showing the best effect. Regarding the metabolism of reactive oxygen species in prunes fruit, different treatment groups were found to effectively promote the increase of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) enzyme activities during the late storage period (9~12 days) compared to the control group ( $P<0.05$ ), with the 60  $\mu\text{mol/L}$  treatment group showing the best effect. Regarding softening related metabolism, compared to the control group, the activities of polygalacturonase (PG),  $\beta$ -galactosidase ( $\beta$ -Gal), and cellulase (Cx) were all inhibited in different MT treatment groups, as well as the relative expression increase in the expression levels of *PdPG2*, *PdCx6* and *Pd $\beta$ -GAL3*. The expression level of *PdPME31* was effectively maintained, but there was only a significant difference between the 60  $\mu\text{mol/L}$  MT group and the CK group ( $P<0.05$ ), while there was no significant difference between the 120 and 240  $\mu\text{mol/L}$  MT treatment groups ( $P>0.05$ ). Finally, after principal component analysis, it was found that the 60  $\mu\text{mol/L}$  MT treatment had better preservation effect compared to the 120 and 240  $\mu\text{mol/L}$  MT treatments. Conclusion: Exogenous MT treatment can effectively regulate the activity of softening related enzymes and the expression levels of related genes, delaying fruit softening during storage. On the other hand, it increases antioxidant enzyme activity, reduces the damage of reactive oxygen species to cell membrane structure, and ultimately achieves the goal of delaying the shelf life of post harvest plum fruit. The research results provide a theoretical basis for the application of exogenous melatonin in post-harvest fruits and vegetables.

**Key words:** prunes fruit; melatonin; storage quality; gene expression

西梅又名欧洲李(*Prunus domestica*), 原产于西亚和欧洲, 近年来在中国的种植面积不断扩大。西梅果实椭圆, 肉质细腻, 风味浓郁, 含有丰富的矿物质、抗氧化活性成分及膳食纤维, 果肉鲜嫩多汁, 果核小, 可食率高达 85%<sup>[1]</sup>, 也是补充维生素 A 的最佳来源<sup>[2]</sup>。目前, 鲜食西梅受到越来越多消费者的青睐, 具有很好的市场前景。但西梅属于呼吸跃变型的果实, 呼吸作用较强, 后熟较快。采后如果贮藏不当, 室温放置 6 d 左右, 果实开始严重失水软化皱缩、损失率高达 20%~30%<sup>[3]</sup>, 严重影响了西梅果实的外观品质和营养成分, 降低了果实的经济价值。由此可见, 为保持西梅果实品质、延长贮藏期、提高经济价值, 解决采后西梅贮藏保鲜问题十分重要。目前近冰温贮藏<sup>[4~5]</sup>、微环境气调<sup>[6]</sup>和高浓度二氧化碳<sup>[7]</sup>等均已被证明可以有效延缓采后西梅软化, 并维持较好的贮藏品质, 然而这些处理均对处理准确度具有较高要求, 这增加了处理方法应用难度, 因此寻找安全简单的处理方法显得尤为重要。

褪黑素(N-乙酰-5 甲氧基色胺)是一种色氨酸衍生物, 也是一种内源性植物生长调节剂<sup>[8]</sup>。目前, 褪

黑素作为一种高效安全的生物保鲜试剂, 在果蔬采后贮藏保鲜中展现出巨大的应用潜能<sup>[9]</sup>。研究发现, 褪黑素外源处理能抑制草莓的腐烂, 延缓果实硬度和可溶性固形物质量分数的下降, 并维持抗坏血酸含量<sup>[10]</sup>。袁瑞敏等<sup>[11]</sup>研究发现褪黑素处理有效缓解了沙果果实硬度的下降和失重率的上升, 抑制了呼吸作用。王天菊等<sup>[12]</sup>研究发现外源褪黑素处理可以保持‘红地球’葡萄果实的色泽和硬度, 维持果实的水分和可溶性固形物含量, 抑制果实 MDA、PPO 活性、POD 活性升高, 保持了细胞膜的完整性, 其中 100  $\mu\text{mol/L}$  的褪黑素处理可以更好地延长‘红地球’葡萄采后贮藏保鲜的时间和保持贮藏期间的品质。孙萌萌等<sup>[13]</sup>研究发现 150  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$  外源褪黑素处理的蓝莓果实保鲜效果最佳, 可保持果胶含量, 抑制 PG、PL、PME 和  $\beta$ -GAL 细胞壁降解酶活性, 减少果胶去甲基化, 抑制果胶相关酶活性延缓细胞壁多糖的降解。陈强等<sup>[14]</sup>研究发现 200  $\mu\text{mol/L}$  的褪黑素处理‘花姑娘’甜瓜可以有效延缓果实软化、重量损失, 显著抑制 *CmPG1* 等结构基因的表达, 通过抑制果实软化相关基因的表达, 延长果实的货架期。Liu 等<sup>[15]</sup>表

明,外源褪黑素处理可以调控梨果实蔗糖的基因,使可溶性糖和还原性糖的含量增加,维持相关酶的活性,保持单果重量。然而,目前尚缺乏外源褪黑素处理对采后西梅室温贮藏品质和相关软化基因表达影响的研究,因此,研究外源褪黑素和西梅果实软化生理指标之间的联系,探究外源褪黑素对西梅果实软化基因的影响,以及各种指标之间的相关性,确定适宜的处理浓度,对延长西梅贮藏时间和保持采后品质具有重要意义。

因此,本研究分别以 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  的 MT 处理四川广安西梅果实作为处理组,并以清水处理为对照组,观察西梅果实在常温( $22\pm3^\circ\text{C}$ ,  $65\% \pm 5\%$  RH)贮藏过程中的贮藏品质及软化相关基因表达的变化,以期为 MT 在采后果蔬的应用提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

西梅 采自四川广安现代农业园区(北纬  $30^{\circ}01' \sim 30^{\circ}52'$ , 东经  $105^{\circ}56' \sim 107^{\circ}19'$ ), 9 成熟度, 运至实验室后, 挑选果形圆润, 无病虫害, 没有机械损伤, 作为本实验材料; 三氯乙酸、乙酸、氯蓝四唑、磷酸二氢钠 分析纯, 天津市华盛化学试剂有限公司; 多聚半乳糖醛酸、水杨苷、EDTA-2Na 分析纯, 无锡市亚泰联合化工有限公司; 愈创木酚、 $\text{H}_2\text{O}_2$ 、邻苯二酚、磷酸氢二钠 分析纯, 深圳市勋业化学试剂有限公司; 盐酸、酒石酸钾钠、蛋氨酸 分析纯, 天津市致远化学试剂有限公司; 氢氧化钠、核黄素 分析纯, 广东翁江化学试剂有限公司; 硫代巴比妥酸、乙酸钠、羧甲基纤维素钠 分析纯, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 施保功 工业纯, 苏州市富美实植物保护试剂有限公司; 植物 RNA 提取试剂盒、植物反转录提取试剂盒、PCR Mix(含 SYBR 荧光染料) 北京华越洋生物有限公司; *PdPG2*、*PdCx6*、*Pd $\beta$ -GAL3*、*Pd PME31* 基因的引物设计 上海生工。

NR10QC 色差仪 广东三恩时智能科技有限公司; HB-114ATC 糖度计 郑州市南北仪器有限公司; UV2802 紫外可见分光光度计 上海尤尼柯公司; Dds307 电导率仪 北京得利特公司; D1008e 微量离心机 赛洛捷克公司; ViiA 7 实时荧光定量 PCR 仪 美国赛默飞公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 分组及处理 将实验所用西梅先用清水洗净晾干, 取 2 g 施保功, 用 2000 mL 蒸馏水溶解, 将西梅浸泡 5 min, 清除果实表面可能附着的霉菌和虫卵, 清水清洗后取出室温晾干。分组处理: 对照组(CK): 置于清水中浸泡 5 min; 处理组(MT): 参考乔沛等<sup>[16]</sup>研究中对采后荔枝的褪黑素处理浓度, 并稍作修改, 分别采用 60、120、240  $\mu\text{mol/L}$  MT 的溶液浸泡 5 min; 每组处理 100 个左右果实, 晾干后放在常温下贮藏。在 0、3、6、9 和 12 d 取样测定各个组

的相关生理指标(色度、失重率、可溶性固形物和细胞膜通透性), 同时每次取样时取 6 个西梅果实果肉, 液氮速冻后置于  $-80^\circ\text{C}$  贮藏, 可溶性蛋白含量、丙二醛含量、酶活及基因表达等指标测定前先利用液氮研磨成粉以便于后续实验的开展。

1.2.2 色泽测定 参考潘家丽等<sup>[17]</sup>的方法, 取样当天采用色差仪测定果皮的颜色, 测定并记录  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  和  $c^*$  值。每个处理三个重复, 每个重复 6 个果实, 依次在果实赤道处随机等距测定三个点。

1.2.3 失重率测定 参照许俊齐等<sup>[18]</sup>的方法, 测定西梅果实 0 d 的质量( $m_1$ )与第 3、6、9、12 d 的质量( $m_2$ )。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100 \quad \text{式 (1)}$$

1.2.4 可溶性固形物(TSS)测定 参考帅良等<sup>[19]</sup>的方法。取样当天每组处理取 6 个西梅果实, 去皮后用破壁机打成匀浆状, 用纱布过滤备用。吸取 3 mL 果汁置于 4.5 mL 离心管中, 于室温 12000 r/min 条件下离心 5 min, 取上清液, 用糖度计测定其 TSS, 单位以 % 表示。

1.2.5 可溶性蛋白测定 参考陈亚婷等<sup>[20]</sup>的方法并修改, 称取 2 g 果实粉末, 加入 5 mL 蒸馏水充分振荡,  $4^\circ\text{C}$ 、8000 r/min 条件下离心 20 min, 上清液为可溶性蛋白酶液,  $-4^\circ\text{C}$  保存备用。移取 1 mL 上清液于试管中, 加入 5 mL 考马斯亮蓝 G-250 溶液, 混匀静止 2 min 后, 在 595 nm 处测定吸光度值, 重复三次, 以每克鲜重所含可溶性蛋白质的质量表示, 即 mg/g。

1.2.6 细胞膜通透性测定 参考李静等<sup>[21]</sup>的方法, 取样当天用打孔器取直径为 8 mm 的相同大小的圆形果皮, 取 6 片放入 50 mL 螺口离心管中, 先用去离子水清洗三次后, 加入去离子水 20 mL, 室温放在摇床上振荡 1 h, 用电导仪测定电导率  $A_1$ , 接着将含有圆形果皮的离心管沸水浴中煮沸 20 min, 降至室温后测定电导率  $A_2$ 。

$$\text{相对导电率}(\%) = \frac{A_1}{A_2} \times 100 \quad \text{式 (2)}$$

1.2.7 丙二醛(MDA)含量测定 MDA 含量测定参考殷菲胧等<sup>[22]</sup>的方法, 采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法。称取西梅果实粉末 2 g 置于 50 mL 预冷的离心管中, 然后用移液管移取 10 mL 预冷的 10% 三氯乙酸(TCA)溶液, 一同加入到预冷的 50 mL 离心管中, 漩涡振荡 30 s, 冰水浴静止提取 10 min 后, 常温 4000 r/min 条件下离心 40 min。加入 2 mL 的 0.6% TBA 溶液, 然后在沸水浴中煮沸 20 min, 取出后冷却至室温后, 于 4000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液, 以 0.6% TBA 溶液为空白, 分别测量其在 450、532 和 600 nm 处的吸光度, MDA 含量以  $\mu\text{mol/g}$  为单位。

$$\text{MDA 含量}(\mu\text{mol/g}) = \frac{[6.45 \times (\text{OD}_{532} - \text{OD}_{600}) - 0.56 \times \text{OD}_{450}] \times V}{Vs \times m \times 1000} \quad \text{式 (3)}$$

式中: V 代表提取液总体积, mL; Vs 代表测定时所取样品提取液总体积, mL; m 代表样品质量, g。

1.2.8 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定 SOD 活性的测定参考曹建康等<sup>[23]</sup>的方法, 采用氮蓝四唑(NBT)光还原反应法。称取 2 g 西梅果实粉末置于预冷的 50 mL 离心管, 然后加入 10 mL 0.1 mol/L, pH7.8 的磷酸缓冲溶液, 振荡 1 min, 冰浴条件下静置提取 10 min, 取出后于常温、4000 r/min 条件下离心 40 min, 上清液即为酶液, 备用。

每组处理取 1 支空白管, 1 支对照管和 3 支样品管, 3 mL 反应体系包含 1.5 mL 的 50 mmol/L 磷酸缓冲溶液(PBS)、0.3 mL 100 μmol/L EDTA-2Na 溶液、0.3 mL 750 μmol/L NBT 溶液、0.3 mL 130 mmol/L 蛋氨酸溶液、0.05 mL 酶液和 0.25 mL 蒸馏水, 再加入 0.3 mL 20 μmol/L 核黄素溶液, 振荡均匀后立即将空白管放入避光处, 将对照管和样品管放在阳光下光照反应 20 min, 随后置于避光处终止反应, 测定各管在 560 nm 处的吸光度, 一个 SOD 活性单位以每分钟每克样品抑制 NBT 光化还原的 50% 表示。

1.2.9 过氧化物酶(POD)活性测定 过氧化物酶(POD)活性的测定参考朱广廉等<sup>[24]</sup>的方法, 采用愈创木酚法。粗酶液提取: 方法同 1.2.8。3 mL 反应体系含有 1 mL 0.3% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, 0.95 mL 0.2% 愈创木酚溶液, 1 mL pH7.0 PBS, 加入 50 μL 酶液后立即启动反应, 记录 470 nm 处吸光度降低速度。将每分钟的吸光度 A<sub>470</sub> 增加 0.01 定义为一个酶活性单位。

1.2.10 多酚氧化酶(PPO)活性测定 多酚氧化酶(PPO)活性的测定, 采用邹朋<sup>[25]</sup>的方法。粗酶液提取: 方法同 1.2.8。向试管中加入 8 mL 0.2% 邻苯二酚和 2 mL 粗酶液, 振荡均匀, 立即在 30 °C 水浴条件下反应 10 min, 之后测量 420 nm 处吸光度, 以每克鲜重每分钟吸光值增加 1 为一个 PPO 活性单位(U)。

1.2.11 多聚半乳糖醛酸酶(PG)活性测定 参考杨宏顺<sup>[26]</sup>的方法对西梅果实粉末进行酶液提取。将 0.5 mL 酶液和煮沸 5 min 的 0.5 mL 酶液分别置于带有刻度的 25 mL 具塞试管中, 加入 1 mL 50 mmol/L, pH5.5 的乙酸-乙酸钠缓冲液和 0.5 mL 1% 的多聚半乳糖醛酸溶液, 在 37 °C 水浴条件下水浴 1 h, 加入 1.5 mL 还原糖含量测定试剂(DNS), 然后煮沸 5 min, 迅速冷却至室温, 之后用蒸馏水加至 25 mL, 混匀, 于 540 nm 处测定其吸光度。以每小时每克果蔬组织样品在 37 °C 催化多聚半乳糖醛酸水解成半乳糖醛酸的质量表示 PG 活性, 即 μg·h<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> FW。

1.2.12 纤维素酶(Cx)活性测定 参考刘程惠<sup>[27]</sup>的方法对西梅果实粉末进行酶液提取。分别取 0.5 mL 酶液和煮沸 5 min 的 0.5 mL 酶液分别置于 25 mL 具塞刻度试管中, 加入 1.5 mL 10 g/L 羧甲基纤维素

钠(CMC)溶液, 余下操作同 PG 活性测定。以每小时每克果蔬组织样品在 37 °C 催化 CMC 水解成还原糖的质量表示 Cx 活性, 即 μg·h<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> FW。

1.2.13 β-半乳糖苷酶(β-GAL)活性测定 参考刘程惠<sup>[27]</sup>的方法对西梅果实粉末进行酶液提取。分别取 0.5 mL 酶液和煮沸 5 min 的 0.5 mL 酶液于分别置于 25 mL 具塞刻度试管中, 加入 1.5 mL 10 g/L 水杨苷溶液, 余下操作同 PG 活性测定。以每小时每克果蔬组织样品在 37 °C 催化水杨苷水解成葡萄糖的质量表示 β-GAL 活性, 即 μg·h<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup> FW。

1.2.14 相关基因差异性表达 先利用液氮将西梅果实研磨成粉, 采用植物 RNA 提取试剂盒提取西梅果实 RNA, 利用植物反转录提取试剂盒将 RNA 反转录为 cDNA 片段, NCBI 检录搜索和论文查阅西梅相关基因<sup>[24]</sup>, 通过上海生工公司设计制作引物(表 1)。采用 20 μL 反应体系, 包含 10 μL PCR Mix、1 μL 正向引物、1 μL 反向引物、1 μL cDNA 片段和 7 μL RNase-Free Water。设置反应条件: 95 °C 预变性 90 s; 95 °C 变性 30 s, 65 °C 退火 15 s, 72 °C 延伸 20 s, 进行 40 个循环。所有 RT-qPCR 试验均设置 3 个生物学重复, 平行测定三次, 以 PdActin 作为内参基因并按照 2<sup>-ΔΔCt</sup> 法计算基因的相对表达。

表 1 RT-qPCR 引物

Table 1 RT-qPCR primers

基因名称	正向引物(5'-3')	反向引物(5'-3')
PdActin	AGCCAGAAATGGGGCACAA	GCCACGCAAAGTAACCAAGA
PdPG2	GCTTGGGAGAAAGACAACGCA	ACTTGAACCTGCCACCTCTG
PdCx6	AGAGGTGGGAGATGGAAACA	AGTGGCGGAAGACAATGGAG
Pdβ-GAL3	ATGGGCAAGGGTCAAGTATGG	AGCGTTGGGTGGTGTCTT
PdPME31	ACCAGGCTCTCGTGTGATT	TCAAAGGTGATTTCTCGGC

### 1.3 数据处理

实验数据为 3 次重复试验的平均值, 结果以平均值±标准差表示。实验所测得的数据使用 Excel 2019、SPSS 19.0、Origin 2018 软件进行分析制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 贮藏期间品质变化

2.1.1 表观和色泽变化 果实表观是反映采后果蔬贮藏品质和货架期最直观的指标。如图 1A 可知, 对照组的西梅果实在贮藏 6 d 发生了果皮皱缩, 12 d 果皮皱缩尤为明显, 而不同浓度的 MT 处理均可以抑制果皮皱缩的发生, 其中 60 μmol/L MT 处理组在贮藏 12 d 表观品质最好, 这说明 MT 处理可有效延长采后西梅的货架期。

采后果实在贮藏期间, 色度的各项指标也会发生变化, 故可以通过色度指标评价果实的成熟程度<sup>[28]</sup>。如图 1B 所示, 不同处理组西梅果实的 L\* 均呈现逐渐下降的趋势, 其中 CK 组 L\* 下降最为迅速, 12 d 的 L\* 达到 27.84±0.62。与 CK 组相比, 不同浓度的 MT 处理在贮藏 12 d 时均可以抑制 L\* 下降, 但

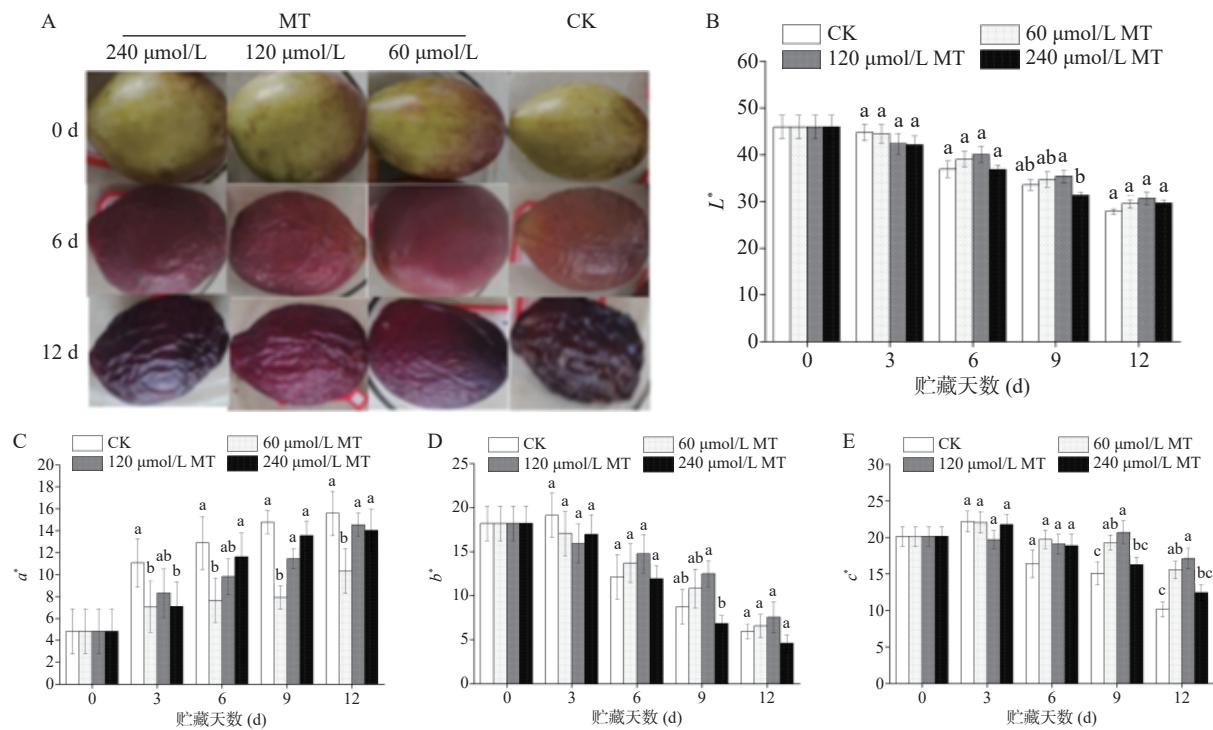


图1 贮藏期间西梅表观(A)和色泽(B~E)的变化

Fig.1 Changes in appearance (A) and color (B~E) of prune fruit during storage

注: 不同字母表示相同贮藏时间下不同处理组组间具有显著差异( $P<0.05$ ), 图2~图5同。

无显著差异( $P>0.05$ ), 此时 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 的  $L^*$  分别为 CK 组的 105.91%、110.11% 和 106.43%。

如图 1C 所示, 整个贮藏期间, CK 组和 MT 处理组的  $a^*$  值均呈现上升趋势, 西梅果实随着贮藏时间增加而变红, 且 MT 处理组的  $a^*$  值均小于 CK 组, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组显著( $P<0.05$ )低于 CK 组。12 d 时, CK、60、120、240  $\mu\text{mol/L}$  MT 的  $a^*$  值分别为 15.56、10.32、14.52、14.02, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组显著( $P<0.05$ )低于其他三组。

如图 1D 所示, CK 组和 MT 处理组的  $b^*$  值均呈现下降趋势, 在 6~12 d 时, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 和 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的  $b^*$  值均大于 CK 组, 表明 MT 处理组可以延缓西梅果实成熟由黄变红进程, 但不存在显著性差异( $P>0.05$ )。

如图 1E 所示, 贮藏前期(0~3 d)CK 组、60 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 组的  $c^*$  值(色彩度)呈上升趋势, 6~12 d 时呈下降趋势。在贮藏 9 d 和 12 d 时, 60 和 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组均显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 而 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 组与 CK 组无显著差异( $P>0.05$ ), 这表明, 60 和 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理采后西梅果实, 可有效维持贮藏期内西梅果实的色泽, 但两者之间无显著差异( $P>0.05$ ), 因此, 基于成本考虑, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组效果较优。

**2.1.2 失重率、TSS 和可溶性蛋白的变化** 果实失重率是反映采后果实内容物消耗速率的重要指标之一<sup>[29]</sup>。如图 2A 所示, 随着贮藏时间的延长, CK 组和 MT 处理组的西梅失重率均不断上升, CK 组由 0 升至 12 d 的 35.30%, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组由 0

升至 12 d 的 25.36%, 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组由 0 升至 12 d 的 31.17%, 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组由 0 升至 12 d 的 30.59%, 其中 3~12 d 不同 MT 处理组的失重率显著低于对照组( $P<0.05$ )。整个贮藏期间, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的西梅失重率均显著低于其它三组( $P<0.05$ )。结果表明外源褪黑素处理可有效维持西梅贮藏期间的果实重量, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组效果较优。

TSS 含量受果实的成熟度影响<sup>[30]</sup>。如图 2B 所示, CK 组和不同 MT 处理组的西梅果实 TSS 含量整体上均呈下降趋势。然而整个贮藏期内, MT 处理组的西梅果实 TSS 含量均显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。结果表明外源褪黑素处理可以有效保持西梅贮藏期间 TSS 含量。

可溶性蛋白是重要的渗透调节物质和营养物质<sup>[31]</sup>。如图 2C 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组的西梅果实可溶性蛋白含量均呈先上升后下降趋势, 且在 9 d 时达到峰值, 此时 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实可溶性蛋白含量约为 0.08 mg/g, 显著高于其它三组( $P<0.05$ )。贮藏末期 12 d 时, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实可溶性蛋白含量比 CK 组、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组高 16.83%、12.78%、18.93%, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。由此可知, 外源 MT 处理可有效维持西梅贮藏期间可溶性蛋白含量, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理效果最优。

**2.1.3 细胞膜通透性和丙二醛含量的变化** 果实的衰老与细胞膜结构有着密不可分的关系, 当细胞膜结构的完整性和细胞膜的功能性因果实衰老受到损伤

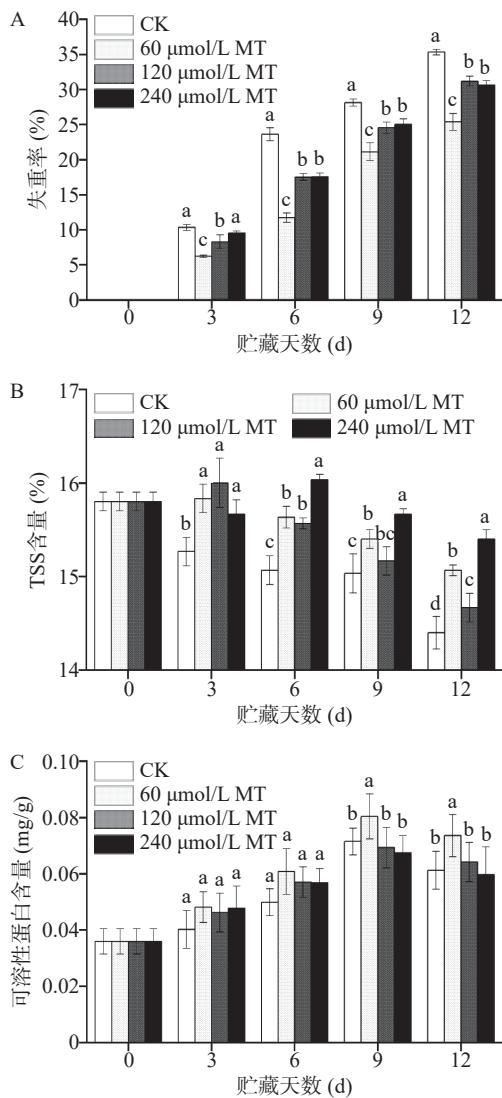


图 2 西梅贮藏期间失重率(A)、TSS(B)和可溶性蛋白(C)变化

Fig.2 Changes in weight loss rate (A), TSS (B) and soluble protein content (C) of prune fruit during storage

时,组织细胞膜的相对导电率也会增加,膜脂过氧化产物丙二醛含量也会上升<sup>[32]</sup>。如图 3A 所示,整个贮藏期内,CK 组和 MT 处理组的西梅细胞膜通透性均呈上升趋势,期间 CK 组始终高于 MT 组,但只有 60 μmol/L MT 处理组显著低于 CK 组( $P<0.05$ )并低于其他 MT 组。在 12 d 时,60 μmol/L MT 处理组分别显著低于 CK 组、120 和 240 μmol/L MT 处理组 14.14%、9.98% 和 11.07%( $P<0.05$ )。在西梅果实贮藏期内,外源褪黑素处理可以有效延缓西梅的细胞膜通透性,其中 60 μmol/L MT 处理效果最佳。

如图 3B 所示,整个贮藏期间,CK 组和 MT 处理组的西梅 MDA 含量均呈上升趋势。贮藏末期 12 d 时,CK 组的西梅 MDA 含量升至 24.38 μmol/g,显著高于所有 MT 处理组( $P<0.05$ )。3~12 d 内,60 μmol/L MT 处理组的西梅 MDA 含量始终显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。在西梅果实贮藏期间,外源褪黑素处理可以有效降低西梅果实的 MDA 含量,其中 60 μmol/L MT 处理效果最佳。

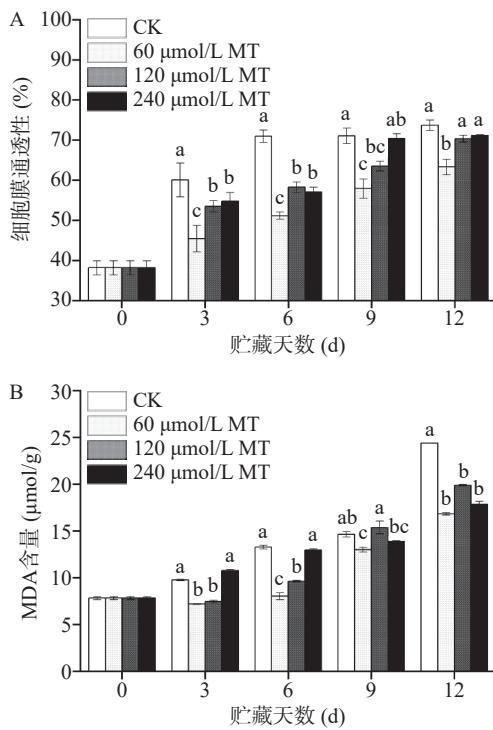


图 3 西梅贮藏期间细胞膜通透性(A)与丙二醛(B)含量变化

Fig.3 Changes in membrane permeability (A) and malondialdehyde content (B) during storage of prune fruit

综上,外源褪黑素处理可有效延缓采后西梅贮藏品质的降低,其中 60 μmol/L MT 处理组具有最好的效果。

## 2.2 贮藏期间酶活变化

果实的硬度、果胶含量、原生细胞壁的完整性以及细胞中间层结构时刻影响着果实的衰老软化进程,参与这些变化过程的酶主要有果胶甲酯酶(PME)、SOD<sup>[33]</sup>、POD<sup>[34]</sup>、PPO<sup>[35]</sup>、PG<sup>[36]</sup>、Cx<sup>[37]</sup> 和  $\beta$ -GAL 等<sup>[38]</sup>。如图 4A 所示,整个贮藏期内,西梅果实 SOD 活力均呈上升趋势,MT 处理组均高于 CK 组,其中 60 μmol/L MT 处理组显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。12 d 时,60 μmol/L MT 处理组的西梅果实 SOD 活力分别高于 CK 组、120 和 240 μmol/L MT 处理组 26.61%、11.90% 和 10.84%,并具有显著性差异( $P<0.05$ )。

如图 4B 所示,整个贮藏期内,CK 组和 MT 处理组的西梅果实 POD 活力均呈先上升后下降趋势,MT 处理组均高于 CK 组,其中 60 μmol/L MT 处理组显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。3 d 时,CK 组、60 和 240 μmol/L MT 处理组的西梅果实 POD 活力到达峰值,其中 60 μmol/L MT 处理组西梅果实 POD 活力是 CK 组的 1.38 倍( $P<0.05$ )。贮藏结束(12 d)时,60、120 和 240 μmol/L MT 处理组的西梅果实 POD 活力分别是 CK 组的 2.01 倍、1.95 倍和 1.92 倍,并具有显著性差异( $P<0.05$ )。

如图 4C 所示,整个贮藏期内,CK 组和 MT 处理组的西梅果实 PPO 活力均呈先上升后下降趋势,MT 处理组始终低于 CK 组,其中 CK 组和 120 μmol/L MT 处理组在 6 d 时达到峰值,60 和 240 μmol/L

MT 处理组在 9 d 时达到峰值。贮藏中期(3~9 d)时, CK 组的西梅果实 PPO 活性高于 60 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组。贮藏结束时, 各组之间的西梅果实 PPO 活性无显著性差异( $P>0.05$ )。

如图 4D 所示, CK 组和 MT 处理组的 PG 活性在整个贮藏期内呈先上升后下降趋势, 均在 9 d 时达到峰值, 此时 CK 组的 PG 活性为 6260.53  $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ , 显著高于( $P<0.05$ ) 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 5058.46、5553.74 和 5491.83  $\mu\text{g}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$ , 同时 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组显著低于 120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组( $P<0.05$ )。另外贮藏期(3~12 d)内, 只有 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的西梅果实 PG 活性显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。

如图 4E 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组的西梅果实的 Cx 活性呈先上升后下降趋势, 其中 CK 组和 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组在 3 d 时到达峰值, 120  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组在 6 d 时达到峰值,

240  $\mu\text{mol/L}$  MT 在 9 d 时到达峰值。贮藏后期(9~12 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的西梅果实 Cx 活性显著低于其它三组( $P<0.05$ ); 12 d 时, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的西梅果实 Cx 活性分别低于 CK 组、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组 19.97%、13.18% 和 18.56%, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。

如图 4F 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组的西梅果实的  $\beta$ -GAL 活性呈先上升后下降趋势, 其中 CK 组在 3 d 时达到峰值, 120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组在 6 d 时达到峰值, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组在 9 d 时达到峰值。贮藏前期(3~6 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的  $\beta$ -GAL 活性显著低于 CK 组( $P<0.05$ ); 3 d 时, CK 组的  $\beta$ -GAL 活性分别是 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 1.17 倍、1.13 倍和 1.12 倍, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。

综上, 外源褪黑素处理可有效延缓采后西梅衰老软化相关酶活性的上升, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 抑制

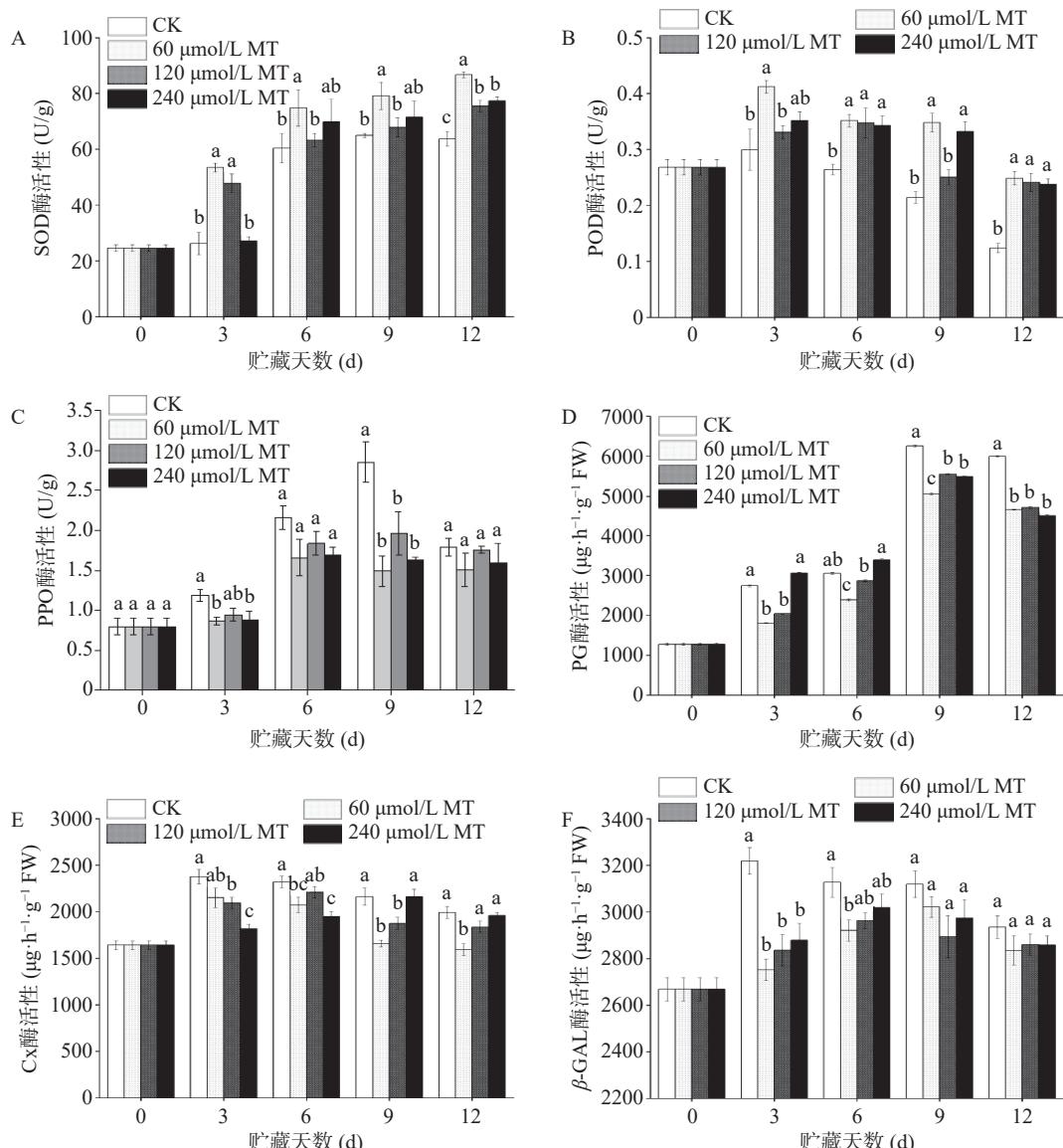


图 4 西梅贮藏期间 SOD (A)、POD (B)、PPO (C)、PG (D)、Cx (E) 和  $\beta$ -GAL (F) 酶活变化

Fig.4 Changes in SOD (A), POD (B), PPO (C), PG (D), Cx (E) and  $\beta$ -GAL (F) enzyme activity during storage of prune fruit

效果最为显著( $P<0.05$ )。

### 2.3 贮藏期间相关基因表达量的变化

如图 5A 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组西梅果实的 *PdPG2* 表达量呈先上升后下降趋势, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组在 6 d 时达到峰值, 其它三组在 9 d 时达到峰值; 其中 CK 组 *PdPG2* 表达量的

峰值是 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 1.43 倍。贮藏后期(9~12 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实的 *PdPG2* 表达量显著低于其它三组( $P<0.05$ ); 12 d 时, CK 组、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 *PdPG2* 表达量是 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 1.38 倍、1.17 倍和 1.32 倍, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。

如图 5B 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组西梅果实的 *PdCx6* 表达量均呈先上升后下降趋势, 且均在 3 d 时到达峰值, 此时 CK 组分别高于 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组 17.52%、13.41% 和 8.54%, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。贮藏期内(3~12 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实的 *PdCx6* 表达量始终显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。

如图 5C 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组西梅果实的 *Pd $\beta$ -GAL3* 表达量呈先上升后下降趋势, 且均在 3 d 时到达峰值, 此时 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组分别低于 CK 组和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组 17.12% 和 14.02%, 并具有显著性差异( $P<0.05$ )。贮藏期内(3~12 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实的 *Pd $\beta$ -GAL3* 表达量始终显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。

如图 5D 所示, 整个贮藏期内, CK 组和 MT 处理组西梅果实的 *PdPME31* 表达量均呈下降趋势。3 d 时, 60、120 和 240  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的 *PdPME31* 表达量依次是 CK 组的 1.8 倍、1.74 倍和 1.71 倍, 并具有显著性差异( $P<0.05$ ); 贮藏中期(3~9 d), 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组西梅果实的 *PdPME31* 表达量始终显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。

综上, 外源褪黑素处理可以在一定程度上调控采后西梅果实衰老软化基因的表达量, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组效果最优。

### 2.4 各指标相关性分析

对西梅果实整个贮藏期间贮藏品质、酶活性和相关基因表达进行 Pearson 相关分析如图 6 所示。贮藏品质中, 色度指标中的  $L^*$ 、 $b^*$  和  $c^*$  与 POD 酶活、TSS 和 *PdPME31* 表达量呈不同程度的显著性正相关( $P<0.05$ ), 色度指标中的  $L^*$ 、 $b^*$  和  $c^*$  与贮藏品质指标和酶活性呈不同程度的负相关;  $a^*$  值仅与 *PdPME31* 表达量呈极显著性负相关( $P<0.01$ ); 失重率与 TSS 和 *PdPME31* 表达量呈极显著性负相关( $P<0.01$ ), 与酶活性(除 POD 外)呈不同程度的正相关; TSS 与  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$  和 POD 酶活性和 *PdPME31* 表达量呈极显著性正相关( $P<0.01$ ); 可溶性蛋白、细胞膜通透性和 MDA 之间互相呈极显著性正相关( $P<0.01$ ), 并且同时与酶活性(除 POD 外)呈不同程度的正相关。酶活性之间, SOD 酶活性与 PPO 和 PG 酶活性呈极显著正相关( $P<0.01$ ), 与  $\beta$ -GAL 呈显著性相关( $P<0.05$ ); POD 酶活性仅与 PG 和  $\beta$ -GAL 酶活性呈极显著性正相关( $P<0.01$ ); Cx 酶活性仅与  $\beta$ -GAL 酶活性呈极显著性正相关( $P<0.01$ )。此

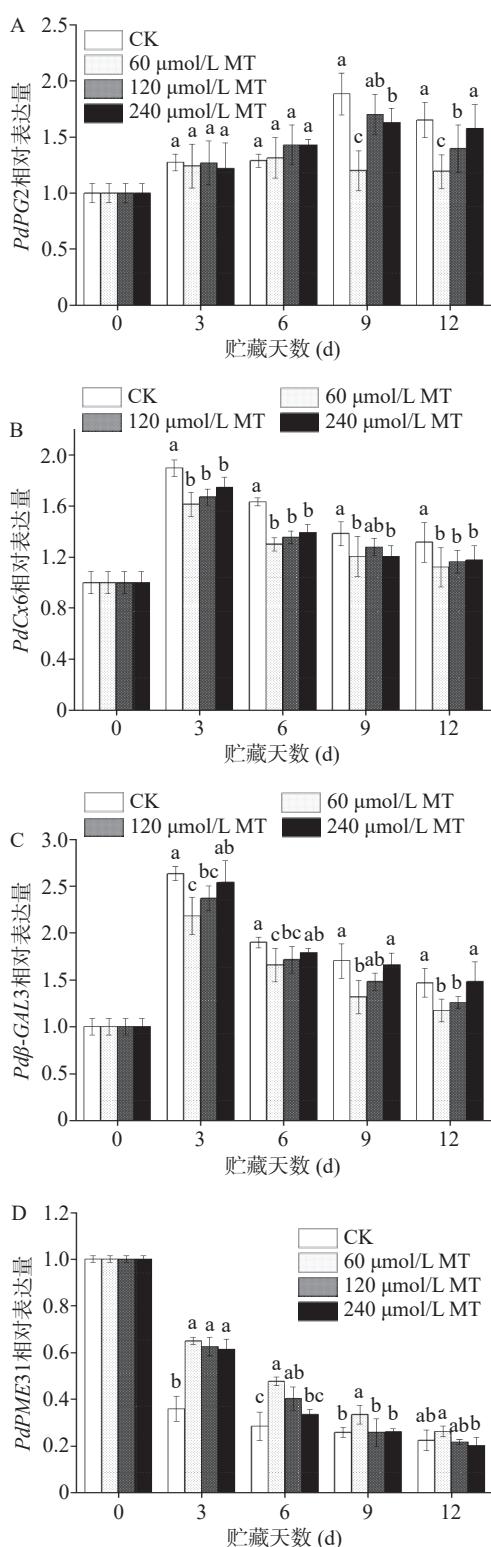


图 5 贮藏期间西梅果实中 *PdPG2* (A)、*PdCx6* (B)、*Pd $\beta$ -GAL3* (C) 和 *PdPME31* (D) 表达量的变化

Fig.5 Changes of *PdPG2* (A)、*PdCx6* (B)、*Pd $\beta$ -GAL3* (C) and *PdPME31* (D) expression during storage of prune fruit

外, PG 酶活与 *PdPG2* 表达量呈极显著性正相关 ( $P<0.01$ ), Cx 酶活与 *PdCx6* 表达量呈极显著性正相关 ( $P<0.01$ ),  $\beta$ -GAL 酶活与 *Pd $\beta$ -GAL* 表达量呈极显著性正相关 ( $P<0.01$ ); *PdPME31* 表达量与 *L<sup>\*</sup>*、*a<sup>\*</sup>*、*b<sup>\*</sup>*、*c<sup>\*</sup>*、POD 酶活性和 TSS 呈不同程度的正相关, 与其他所有指标呈不同程度的负相关。

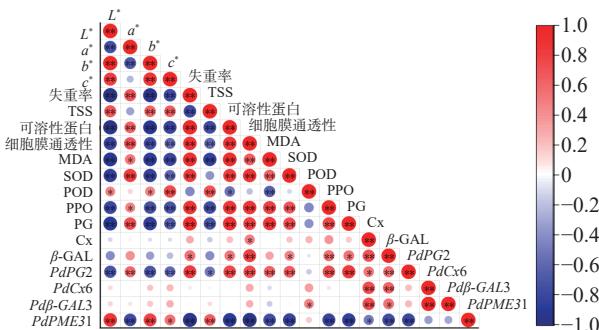


图 6 贮藏期间西梅果实各指标的相关性分析  
Fig.6 Correlation analysis among indexes during storage of prune fruit

注:图中\*为  $P<0.05$ , \*\*为  $P<0.01$ , 红色为正相关, 蓝色为负相关。

## 2.5 主成分分析

对西梅贮藏过程中贮藏品质及软化相关基因表达指标数据标准化处理之后进行主成分分析, 第 1、2 和 3 主成分特征值分别为 11.547、3.77 和 1.544, 第 1、2 和 3 主成分贡献率分别为 60.771%、19.844% 和 8.126%, 前 3 个主成分特征值均大于 1 且累积贡献率达到 88.741%, 可见前 3 个主成分可以说明西梅贮藏过程中贮藏品质及软化相关基因表达有关数据的变化趋势, 完全符合主成分分析的基本要求, 因此取前 3 个主成分进行数据分析。用 3 个变量 FAC1、FCA2、FAC3 代替原来的 19 个指标, 得出线性组合为(其中  $Z_1$ ~ $Z_{19}$  均为标准化变量, 且依次代表 *L<sup>\*</sup>*、*a<sup>\*</sup>*、*b<sup>\*</sup>*、*c<sup>\*</sup>*、失重率、TSS 含量、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、MDA 含量、SOD 酶活性、POD 酶活性、PPO 酶活性、PG 酶活性、Cx 酶活性、 $\beta$ -GAL 酶活性、*PdPG2* 基因相对表达量、*PdCx6* 基因相对表达量、*Pd $\beta$ -GAL3* 基因相对表达量和 *PdPME31* 基因相对表达量):

$$\begin{aligned} \text{FAC1-1} &= -0.083Z_1 + 0.06Z_2 - 0.079Z_3 - 0.067Z_4 + 0.086Z_5 - 0.066Z_6 + 0.085Z_7 + 0.079Z_8 + 0.077Z_9 + 0.073Z_{10} - 0.038Z_{11} + 0.077Z_{12} + 0.08Z_{13} + 0.028Z_{14} + 0.053Z_{15} + 0.071Z_{16} + 0.008Z_{17} + 0.005Z_{18} - 0.081Z_{19} \\ \text{FAC2-1} &= 0.055Z_1 + 0.031Z_2 + 0.07Z_3 + 0.107Z_4 - 0.009Z_5 + 0.055Z_6 - 0.027Z_7 + 0.076Z_8 - 0.08Z_9 + 0.012Z_{10} + 0.164Z_{11} + 0.002Z_{12} - 0.013Z_{13} + 0.213Z_{14} + 0.166Z_{15} + 0.062Z_{16} + 0.242Z_{17} + 0.247Z_{18} - 0.067Z_{19} \\ \text{FAC3-1} &= -0.086Z_1 + 0.423Z_2 - 0.095Z_3 + 0.174Z_4 + 0.005Z_5 + 0.286Z_6 - 0.035Z_7 + 0.054Z_8 - 0.088Z_9 + 0.28Z_{10} + 0.38Z_{11} - 0.121Z_{12} + 0.06Z_{13} - 0.188Z_{14} - 0.118Z_{15} + 0.024Z_{16} - 0.166Z_{17} - 0.078Z_{18} - 0.063Z_{19} \end{aligned}$$

$$\text{主成分得分 } Y = \text{FAC1-1} \times 0.60771 + \text{FAC2-1} \times$$

0.19884 + FAC3-1  $\times$  0.08126。

由图 7A 可知, *a<sup>\*</sup>*、失重率、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、MDA 含量、SOD 酶活性、PPO 酶活性、PG 酶活性和 *PdPG2* 基因相对表达量聚集在 PC1(60.771%)正轴上, *L<sup>\*</sup>*、*b<sup>\*</sup>*、*c<sup>\*</sup>* 和 TSS 含量在 PC1(60.771%)负轴上, 表明 PC1(60.771%)越大, *a<sup>\*</sup>*、失重率、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、MDA 含量、SOD 酶活性、PPO 酶活性、PG 酶活性和 *PdPG2* 基因相对表达量越高, 而 *L<sup>\*</sup>*、*b<sup>\*</sup>*、*c<sup>\*</sup>* 和 TSS 含量越小, 故定义 PC1 为贮藏品质指标; 同时 Cx 酶活性、*PdCx6* 基因相对表达量和 *Pd $\beta$ -GAL3* 基因相对表达量聚集在 PC2(19.844%)正轴上, 表明 PC2(19.844%)越高, Cx 酶活性、*PdCx6* 基因相对表达量和 *Pd $\beta$ -GAL3* 基因相对表达量越高, 故定义 PC2 为软化代谢相关指标。没有指标聚集在 PC3(10.202%)两端, 因此随后不对因子得分图中 PC3(8.126%)的变化做过多的分析。

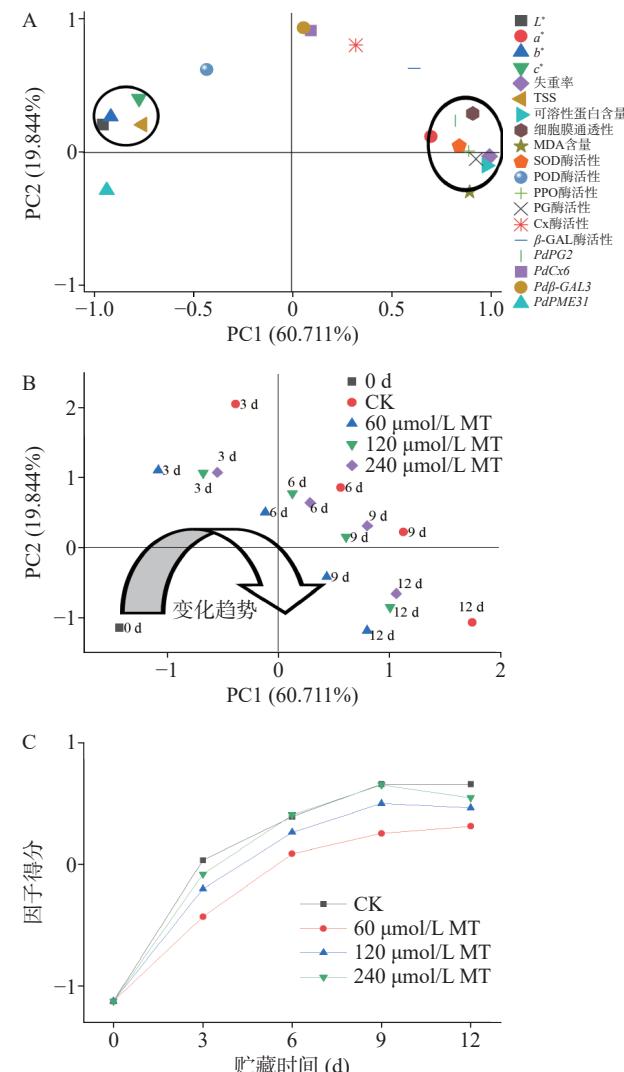


图 7 主成分分析因子载荷图(A)、因子得分分布图(B)、因子得分总分图(C)

Fig.7 Principal component analysis factor load diagram (A), factor score distribution diagram (B), factor score total score diagram (C)

由图 7B 可知, 不同处理组变化趋势既有相似处又有明显差异, 相似之处是整体均由 PC1(60.771%)负轴变化至 PC1(60.771%)正轴, 结合因子载荷图来看, 这伴随着  $a^*$ 、失重率、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、MDA 含量、SOD 酶活性、PPO 酶活性、PG 酶活性和 *PdPG2* 基因相对表达含量的升高和  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$  和 TSS 含量的下降。这表明, 在常温贮藏下,  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $c^*$  和 TSS 含量均会逐渐下降而  $a^*$ 、失重率、可溶性蛋白含量、细胞膜通透性、MDA 含量、SOD 酶活性、PPO 酶活性、PG 酶活性和 *PdPG2* 基因相对表达含量逐渐上升, MT 处理不会改变其变化趋势; 明显差异首先表现在由 PC1(60.771%)负轴变化至 PC1(60.771%)正轴的变化速率以及程度, 由因子得分图可以明显发现, 相对 CK 组, 不同浓度的 MT 处理明显抑制了该变化, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的效果最为明显。同样由图 7C 可知, 不同处理组的因子得分均呈现逐渐上升的趋势, 而不同浓度的 MT 处理明显抑制了该变化, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组的效果最为明显。

### 3 讨论

大多果蔬采后极易衰老, 发生失水、转色、软化及营养品质降低等的变化。本实验中西梅果实在贮藏过程中也是如此, 果实失重率不断增加而 TSS 含量逐渐降低, 同时发生明显的转色。然而外源褪黑素处理采后西梅果实, 可以有效维持其色度、失重率、TSS、可溶性蛋白和细胞膜通透性, 抑制 MDA 含量的上升, 进而维持较好的果实品质。这与褪黑素在甜瓜<sup>[39]</sup>、红毛丹<sup>[40]</sup>和鲜切紫甘蓝<sup>[41]</sup>保鲜效果一致。

关于褪黑素浓度使用方面, 本研究中, 不同浓度的外源褪黑素处理均可延缓采后西梅果实贮藏品质, 其中通过整个实验结果和主成分分析数据表明, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组效果最优。同样, 刘士琦等<sup>[40]</sup>采用不同浓度(0.125、0.25、0.5  $\text{mmol/L}$ )的褪黑素处理采后红毛丹果实, 发现不同浓度的褪黑素均可以有效维持红毛丹的色度等贮藏品质, 其中 0.125  $\text{mmol/L}$  的褪黑素处理效果最佳。张晶等<sup>[41]</sup>采用不同浓度(0.01、0.1、0.5、1  $\text{mmol/L}$ )的褪黑素处理鲜切紫甘蓝, 发现不同浓度的褪黑素均可以有效维持鲜切紫甘蓝的色度、硬度和抗氧化成分等贮藏品质, 其中 0.5  $\text{mmol/L}$  的褪黑素处理效果最佳。这表明, 褪黑素在果蔬采后使用过程中受浓度的影响较大, 这可能与外援褪黑素的使用会影响内源褪黑素的代谢有关<sup>[42]</sup>。

果实软化和内含量变化等生理变化普遍存在于果实采后贮藏过程中, 其中造成果实软化的主要原因是: 某些结构成分含量由于细胞壁多糖代谢反应导致细胞膜通透性升高而逐渐减少<sup>[43]</sup>。整个果实软化衰老进程中, 有大量的酶参与调节, 正是不同的酶在各个阶段的协同配合才导致了果实不同时期成分指标的差异<sup>[43]</sup>。SOD 酶和 POD 酶通过在代谢过程中清

理自由基, PPO 酶通过消除酶促反应, PG、Cx、 $\beta$ -GAL 和 PME 等酶通过细胞壁多糖代谢反应, 以上几种酶协同作用、互相影响进而调节反应控制果实中的色度、多糖物质, 影响果实细胞壁的完整性和细胞膜通透性, 进而影响果实水分流失程度, 同时还参与调节植物细胞生长发育过程中细胞壁的构成, 影响果实的贮藏品质, 与植物细胞的信息传递存在着密切联系<sup>[44-45]</sup>。在本实验中, 60  $\mu\text{mol/L}$  LMT 处理组的西梅果实 SOD、POD 等酶活性显著高于 CK 组, PPO、PG、Cx 和  $\beta$ -GAL 等酶活性显著低于 CK 组( $P<0.05$ ), 同时有效延缓了可溶性蛋白含量的下降, 以及细胞膜透性和 MDA 含量的上升, 积极延缓了果实的软化进程, 有效保持了西梅果实的色泽, 显著抑制了贮藏期间果实重量和可溶性固形物的下降。这说明外源褪黑素处理可以有效调控西梅果实体内软化相关酶的活性, 从而有效保护了西梅细胞组织的完整性, 减缓多糖代谢反应, 延缓了果实软化衰老进程, 保持了贮藏品质。

果实中的 *PdPG2*、*PdCx6*、*Pd $\beta$ -GAL3* 和 *PdPME31* 基因可以调节对应的酶活性<sup>[28,46]</sup>, 影响其在果实中生理代谢的协同作用, 进而影响果实的细胞膜通透性, 控制果实软化衰老进程。本研究表明, 整个贮藏期内, 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组可有效降低西梅果实的 *PdPG2*、*PdCx6* 和 *Pd $\beta$ -GAL3* 基因的表达量, 有效维持 *PdPME31* 基因的表达量。结合相关性分析, 该 4 个基因表达量与 SOD、POD 和 PPO 酶活之间存在不同程度的相关性, 推测该 4 个基因可以调控对应酶活表达的同时影响 SOD、POD、PPO、PG、Cx 和  $\beta$ -GAL 之间的协同作用, 避免相关酶活促使细胞膜通透性上升和 MDA 含量上升, 有效延缓果实的软化进程, 保持西梅较好的贮藏品质。

### 4 结论

本研究结果表明, 整个贮藏期内, 不同浓度的外源褪黑素处理均可延缓采后西梅果实贮藏品质, 其中 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组效果最佳。研究结果为采后外源褪黑素在采后果蔬中的应用提供理论依据。进一步机理分析表明外源 MT 处理一方面可有效调控 PG 酶活性、Cx 酶活性和  $\beta$ -GAL 酶活性等软化相关酶活性及相关基因的表达量, 延缓贮藏期间果实软化, 另一方面促进 SOD 酶、POD 酶、PPO 等抗氧化酶活的上升, 减轻活性氧对细胞膜结构的破坏, 最终达到延缓采后西梅果实货架期的目的。然而本实验一方面缺乏对 60  $\mu\text{mol/L}$  MT 处理组为最优效果组的探讨, 未来可通过测定如内源褪黑素含量及其合成相关代谢的表达来补充相关机理。另一方面, 本实验虽然发现褪黑素对西梅果实贮藏过程中的水分变化有明显的影响, 然而缺乏相关机理分析, 未来可通过低磁场核磁测定水分变化趋势及水通道蛋白的表达来补充相关机理。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

## 参考文献

[1] 范晓康, 张爱萍. 新疆伽师西梅产业融合现状与发展策略研究[J]. 智慧农业导刊, 2023, 3(20): 110–113, 118. [FAN Xiaokang, ZHANG Aiping. Research on the current situation and development strategy of the integration of Ximei industry in Jiashi, Xinjiang[J]. Smart Agriculture Guide, 2023, 3(20): 110–113, 118.]

[2] WU X L, BEECHER G R, HOLDEN J M, et al. Lipophilic and hydrophilic antioxidant capacities of common foods in the United States[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004, 52(12): 4026–4037.

[3] 张红, 努尔曼·阿不拉, 艾克拜尔·买买提, 等. 不同品种西梅的性状研究及营养成分分析[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(6): 14–18. [ZHANG Hong, NURMAN A, AKBAR M, et al. Characterization and nutritional analysis of different varieties of Ximei[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(6): 14–18.]

[4] 文钰, 杨莉玲, 刘岚, 等. 近冰温贮藏对西梅的采后品质及活性氧代谢的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2024, 50(11): 270–276. [WEN Yu, YANG Liling, LIU Lan, et al. Effects of near ice temperature storage on post harvest quality and reactive oxygen species metabolism of plums[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2024, 50(11): 270–276.]

[5] MA Y, ZHANG W, CHENG S, et al. Postharvest storage at near-freezing temperature maintained the quality and antioxidant properties of *Prunus domestica* L. cv. Ximei fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 293: 110720.

[6] 李雪. 微环境气调保鲜技术在黄花菜和西梅中的应用[D]. 大连: 辽宁大学, 2021. [LI Xue. Application of microenvironmental modified atmosphere preservation technology in Huanghua and Ximei [D]. Dalian: Liaoning University, 2021.]

[7] 刘志旭, 朱璇, 赵亚婷, 等. 高浓度CO<sub>2</sub>短时处理对西梅采后贮藏品质及抗氧化代谢的影响[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(12): 311–318. [LIU Zhixu, ZHU Xuan, ZHAO Yating, et al. Effects of high concentration CO<sub>2</sub> short term treatment on post-harvest storage quality and antioxidant metabolism of Ximei[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2024, 45(12): 311–318.]

[8] STÜRTZ M, CEREZO A B, CANTOS-VILLAR E, et al. Determination of the melatonin content of different varieties of tomatoes(*Lycopersicon esculentum*) and strawberries(*Fragaria ananassa*)[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1329–1334.

[9] 辛丹丹, 司金金, 张若曦, 等. 外源褪黑素处理对黄瓜采后冷藏期抗冷性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018, 46(9): 108–114, 120. [XIN Dandan, SI Jinjin, ZHANG Ruoxi, et al. The effect of exogenous melatonin treatment on the cold resistance of cucumber during the post harvest refrigeration period[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2018, 46(9): 108–114, 120.]

[10] 黄鸿晖, 顾里娟, 李美琳, 等. 褪黑素处理对草莓品质与活性氧代谢的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(15): 187–193. [HUANG Honghui, GU Lijuan, LI Meilin, et al. Effects of melatonin treatment on strawberry quality and reactive oxygen species metabolism [J]. *Food Science*, 2021, 42(15): 187–193.]

[11] 袁瑞敏, 彭静, 王佳傲, 等. 褪黑素调控水杨酸和乙烯代谢维持沙果贮藏品质[J]. *核农学报*, 2023, 37(9): 1798–1805. [YUAN Ruimin, PENG Jing, WANG Jiaao, et al. Melatonin regulates salicylic acid and ethylene metabolism to maintain the storage quality of sand fruit[J]. *Journal of Nuclear Agriculture*, 2023, 37(9): 1798–1805.]

[12] 王天菊, 沈庆庆, 况世雪. 外源褪黑素对'红地球'葡萄采后贮藏品质的影响[J]. *中国南方果树*, 2024, 53(1): 207–215. [WANG Tianju, SHEN Qingqing, KUANG Shixue. Effects of exogenous melatonin on post harvest storage quality of 'Red Earth' grapes[J]. *Chinese Journal of Southern Fruit Trees*, 2024, 53(1): 207–215.]

[13] 孙萌萌, 陶乐仁. 不同浓度褪黑素对采后蓝莓果实硬度和果胶的影响[J]. *亚热带植物科学*, 2023, 52(6): 475–480. [SUN Mengmeng, TAO Leren. Effects of different concentrations of melatonin on the firmness and pectin of postharvest blueberry fruits[J]. *Subtropical Plant Science*, 2023, 52(6): 475–480.]

[14] 陈强, 黄馨慧, 张峰, 等. 褪黑素对薄皮甜瓜采后软化和乙烯合成的影响[J]. *生物技术通报*, 2024, 40(4): 139–147. [CHEN Qiang, HUANG Xinhui, ZHANG Zheng, et al. Effects of melatonin on post-harvest softening and ethylene synthesis of thin skinned melons[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2024, 40(4): 139–147.]

[15] LIU J, YUE R, SI M, et al. Effects of exogenous application of melatonin on quality and sugar metabolism in 'Zaosu' pear fruit [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2019, 38: 1161–1169.

[16] 乔沛, 殷菲晓, 王雨萱, 等. 外源褪黑素处理对采后荔枝褐变及活性氧代谢的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(6): 282–287. [QIAO Pei, YIN Feiyu, WANG Yuxuan, et al. The effect of exogenous melatonin treatment on post harvest lychee browning and reactive oxygen species metabolism[J]. *Food Industry Technology*, 2021, 42(6): 282–287.]

[17] 潘家丽, 陈舒柔, 李木火, 等. 氯化钙处理对采后百香果细胞壁物质代谢的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(16): 32–39. [PAN Jiali, CHEN Shuorou, LI Muhuo, et al. The effect of calcium chloride treatment on the metabolism of cell wall substances in post harvest passion fruit[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(16): 32–39.]

[18] 许俊齐. 黄秋葵净菜加工及MAP保鲜关键工艺研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013. [XU Junqi. Key technology research on processing and MAP preservation of okra seed[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.]

[19] 帅良, 廖玲燕, 罗焘, 等. 1-MCP处理对百香果贮藏品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(15): 281–284. [SHUAI Liang, LIAO Lingyan, LUO Tao, et al. The effect of 1-MCP treatment on the storage quality of passion fruit[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(15): 281–284.]

[20] 陈亚婷, 韩祥稳, 周游, 等. 乙烯利复合包装材料对香蕉后熟品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(15): 262–268. [CHEN Yating, HAN Xiangwen, ZHOU You, et al. The effect of ethylene based composite packaging materials on the ripe quality of bananas[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 262–268.]

[21] 李静, 李顺峰, 田广瑞, 等. 短时高压二氧化碳对双孢蘑菇褐变和活性氧代谢的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(14): 308–312, 319. [LI Jing, LI Shunfeng, TIAN Guangrui, et al. The effect of short-term high-pressure carbon dioxide on browning and reactive oxygen species metabolism of *Agaricus bisporus*[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2016, 37(14): 308–312, 319.]

[22] 殷菲晓, 乔沛, 李静, 等.  $\gamma$ 氨基丁酸对黄秋葵采后品质及生理特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(4): 259–265. [YIN Feiyu, QIAO Pei, LI Jing, et al. Effects of gamma aminobutyric acid on post harvest quality and physiological characteristics of okra[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2020, 41(4): 259–265.]

[23] 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. [ CAO Jiankang, JIANG Weibo, ZHAO Yumei. Guidelines for post-harvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. ]

[ 24 ] 朱广廉, 钟海文, 张爱琴. 植物生理学实验 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1990. [ ZHU Guanglian, ZHONG Haiwen, ZHANG Aiqin. Plant physiology experiment [M]. Beijing: Peking University Press, 1990. ]

[ 25 ] 邹朋. 干旱和铅双重胁迫对紫穗槐和侧柏苗木光合及水分代谢的影响 [D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2013. [ ZOU Peng. Effects of dual stress of drought and lead on photosynthesis and water metabolism of robinia pseudoacacia and platycodon grandiflorus seedlings [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2013. ]

[ 26 ] 杨宏顺. 果蔬气调冷藏下表皮和果胶超微结构与品质变化 [D]. 上海: 上海交通大学, 2008. [ YANG Hongshun. Changes in the ultrastructure and quality of fruit and vegetable skins and pectin under controlled atmosphere refrigeration [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008. ]

[ 27 ] 刘程惠. 鲜切苹果腐败霉菌侵染生物学机理及其臭氧防控研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017. [ LIU Chenghui. Biological mechanism and ozone control of rot mold infection in fresh cut apples [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. ]

[ 28 ] 马燕燕. 近冰温贮藏对新疆西梅贮藏品质及软化的调控机制研究 [D]. 石河子: 石河子大学, 2023. [ MA Yanyan. Study on the regulatory mechanism of near ice temperature storage on the storage quality and softening of Xinjiang plums [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023. ]

[ 29 ] XU H G, QIAO P, PAN J L, et al.  $\text{CaCl}_2$  treatment effectively delays postharvest senescence of passion fruit [J]. *Food Chemistry*, 2023, 417: 135786–135786.

[ 30 ] 蒋璇靓, 姜雪, 陈洪彬, 等. 采后褪黑素处理对余甘子果实品质和耐贮性的影响 [J]. *热带作物学报*, 2022, 43(6): 1259–1266.

[ JIANG Xuanliang, JIANG Xue, CHEN Hongbin, et al. The effect of post harvest melatonin treatment on the quality and storage tolerance of Yuganzi fruit [J]. *Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(6): 1259–1266. ]

[ 31 ] 刘彩红, 张琪, 李乾, 等. 正丁醇处理对冷藏哈密瓜果实冷害和贮藏品质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2021, 42(13): 324–330.

[ LIU Caihong, ZHANG Qi, LI Qian, et al. The effect of n-butanol treatment on cold damage and storage quality of refrigerated cantaloupe fruits [J]. *Food Industry Technology*, 2021, 42(13): 324–330. ]

[ 32 ] 李聪敏, 杨晓红, 郝春梅, 等. 锦橙采后果皮结构及生理特征变化与褐斑的相关性 [J]. *食品科学*, 2010, 31(6): 274–278. [ LI Congmin, YANG Xiaohong, HAO Chunmei, et al. The correlation between changes in fruit peel structure and physiological characteristics after harvesting and brown spots in Jincheng [J]. *Food Science*, 2010, 31(6): 274–278. ]

[ 33 ] MIAO P J, DONG Q Y, ZHOU C R, et al. Enhanced antioxidant activity and quality of olecranon peach fruits (*Prunus persica* L.) through synergistic application of exogenous nano-selenium and melatonin [J]. *Crop Health*, 2023, 1(1): 17.

[ 34 ] WU Y F, YANG X L, WANG X, et al. Effect of foliar calcium fertilization on fruit quality, cell wall enzyme activity and expression of key genes in Chinese cherry [J]. *International Journal of Fruit Science*, 2023, 23(1): 200–216.

[ 35 ] ROSANA C, JAHAIRA D P, ANA A G, et al. Postharvest storage differentially modulates the enzymatic and non-enzymatic antioxidant system of the exocarp and mesocarp of hass avocado: Implications for disorders [J]. *Plants*, 2023, 12(23): 4008.

[ 36 ] NJIE ALAGIE, DONG X Q, LIU Q G, et al. Melatonin treatment inhibits mango fruit (Cv. 'Guipi') softening by maintaining cell wall and reactive oxygen metabolisms during cold storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2023, 205: 112500.

[ 37 ] HUANG P M, ZHAO W K, CAI L, et al. Enhancement of functional properties, digestive properties, and in vitro digestion product physiological activity of extruded corn gluten meal by enzymatic modification [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 104(6): 3477–3486.

[ 38 ] LI X L, SU Q F, JIA R J, et al. Comparison of cell wall changes of two different types of apple cultivars during fruit development and ripening [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2023, 22(9): 2705–2718.

[ 39 ] 姚军, 郑贺云, 张翠环, 等. 外源褪黑素处理对甜瓜采后贮藏品质和后熟衰老的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2024, 52(10): 203–209. [ YAO Jun, ZHENG Heyun, ZHANG Cuihuan, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on post harvest storage quality and post ripening senescence of cantaloupe [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2024, 52(10): 203–209. ]

[ 40 ] 刘士琦, 韦东伶, 刘家粮, 等. 褪黑素对采后红毛丹果实褐变及膜脂代谢和能量代谢的影响 [J]. *食品科学*, 2024, 45(18): 207–215. [ LIU Shiqi, WEI Dongling, LIU Jialiang, et al. Effects of melatonin on browning, membrane lipid metabolism, and energy metabolism of postharvest Red Hair Dan fruit [J]. *Food Science*, 2024, 45(18): 207–215. ]

[ 41 ] 张晶, 刘雨昕, 吴晨晨, 等. 外源褪黑素处理对鲜切紫甘蓝品质及抗氧化能力的影响 [J]. *食品工业科技*, 2025, 46(4): 324–332.

[ ZHANG Jing, LIU Yuxin, WU Chenchen, et al. Effects of exogenous melatonin treatment on the quality and antioxidant capacity of fresh cut purple cabbage [J]. *Food Industry Technology*, 2025, 46(4): 324–332. ]

[ 42 ] ZHANG Y, HUBER D J, HU M, et al. Delay of postharvest browning in Litchi Fruit by melatonin via the enhancing of antioxidative processes and oxidation repair [J]. *J Agric Food Chem*, 2018, 66(28): 7475–7484.

[ 43 ] AGHDAM M S, LUO Z, LI L, et al. Melatonin treatment maintains nutraceutical properties of pomegranate fruits during cold storage [J]. *Food Chemistry*, 2020, 303(Jan. 15): 125385.1–125385.7.

[ 44 ] CHOI J M, HAN S S, KIM H S, et al. Industrial applications of enzyme biocatalysis: Current status and future aspects [J]. *Biotechnology Advances*, 2015, 33(7): 1443–1454.

[ 45 ] SONG L J, ZHANG W W, LI Q, et al. Melatonin alleviates chilling injury and maintains postharvest quality by enhancing antioxidant capacity and inhibiting cell wall degradation in cold-stored eggplant fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2022, 194: 112092.

[ 46 ] 李瑞娟, 杨淑霞, 王丹, 等. 高能电子束辐照对猕猴桃细胞壁降解相关酶活性和基因表达的影响 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(1): 326–334. [ LI Ruijuan, YANG Shuxia, WANG Dan, et al. The effect of high-energy electron beam irradiation on enzyme activity and gene expression related to kiwifruit cell wall degradation [J]. *Food Industry Technology*, 2022, 43(1): 326–334. ]