林育钊, 庄倩莹, 杨华芬, 等. 褪黑素维持冷藏余甘子果实采后品质及其与活性氧和膜脂代谢的关系 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 398−409. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060364
LIN Yuzhao, ZHUANG Qianying, YANG Huafen, et al. Melatonin Improved the Postharvest Quality of Cold-stored *Phyllanthus emblica* Fruit and Its Relationship with the Metabolisms of Reactive Oxygen Species and Membrane Lipid[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 398−409. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060364

·贮运保鲜·

褪黑素维持冷藏余甘子果实采后品质及其与活性氧和膜脂代谢的关系

林育钊[1], 庄倩莹[1,2], 杨华芬[1], 蒋璇靓[1,3], 陈亚珍[1], 郑金水[4], 陈洪彬[1,3,*]
（1.泉州师范学院海洋与食品学院, 福建泉州 362000;
2.福州大学先进制造学院, 福建泉州 362200;
3.近海资源生物技术福建省高校重点实验室, 福建泉州 362000;
4.泉州市农业科学研究所, 福建泉州 362212）

摘　要: 本研究以‘蓝丰’余甘子果实为材料，探究褪黑素处理对冷藏余甘子果实采后品质的影响及其与活性氧（Reactive oxygen species，ROS）和膜脂代谢的关系。采用 0.4 mmol/L 褪黑素和蒸馏水（对照）处理果实，在（4±1）℃、相对湿度 85%~90% 下贮藏 49 d，每隔 7 d 测定果实贮藏品质、细胞膜透性、ROS 和丙二醛含量、ROS 清除酶活性及物质含量、膜脂代谢酶活性、膜脂组分含量等指标。结果发现，褪黑素处理的余甘子果实冷害指数、失重率、a^*、ΔE^*值显著低于对照果实，而商品率、L^*、b^*值、总糖、可溶性固形物及可滴定酸含量显著高于对照果实，进而提升采后冷藏品质。褪黑素处理还降低果实细胞膜透性、超氧阴离子自由基产生速率与丙二醛含量，提高超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性，提升抗坏血酸和谷胱甘肽含量，提高 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清除能力。另外，褪黑素处理可降低果实磷脂酶 D、脂氧合酶、脂酶活性，减少磷脂酸、棕榈酸、硬脂酸含量，而升高磷脂酰胆碱、磷脂酰肌醇、油酸、亚油酸、亚麻酸含量。因此，褪黑素通过调节冷藏余甘子果实的 ROS 和膜脂代谢，提高果实 ROS 清除能力而降低 ROS 水平，以及降低膜脂代谢酶活性而稳定膜脂组分含量，维持细胞膜结构的稳定性，提高果实在冷藏期间的采后品质，延长果实贮藏期。

关键词: 余甘子, 褪黑素, 冷藏品质, 活性氧代谢, 膜脂代谢
中图分类号: TS255.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0398−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060364
本文网刊:

Melatonin Improved the Postharvest Quality of Cold-stored *Phyllanthus emblica* Fruit and Its Relationship with the Metabolisms of Reactive Oxygen Species and Membrane Lipid

LIN Yuzhao[1], ZHUANG Qianying[1,2], YANG Huafen[1], JIANG Xuanjing[1,3], CHEN Yazhen[1], ZHENG Jinshui[4], CHEN Hongbin[1,3,*]
（1.College of Oceanology and Food Science, Quanzhou Normal University, Quanzhou 362000, China;
2.School of Advanced Manufacturing, Fuzhou University, Quanzhou 362200, China;
3.Key Laboratory of Inshore Resources Biotechnology, Quanzhou 362000, China;
4.Quanzhou Institute of Agricultural Sciences, Quanzhou 362212, China）

Abstract: In this study, the harvested *Phyllanthus emblica* (*P. emblica*) fruit cv. 'Lanfeng' was used as material to investigate the effects of melatonin treatment on the postharvest quality of cold-stored *P. emblica* fruit and its relationship with

收稿日期: 2025−06−29
基金项目: 福建省自然科学基金（2023J01902, 2024J08069, 2025J01358）; 泉州师范学院引进人才科研启动项目（H23026）。
作者简介: 林育钊（1992−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果蔬采后生物学与保鲜技术, E-mail: yuzhaolin820@163.com。
*** 通信作者:** 陈洪彬（1989−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与贮藏, E-mail: yummyway@163.com。

reactive oxygen species (ROS) and membrane lipid metabolisms. The fruit was treated by soaking in 0.4 mmol/L melatonin and distilled water (as control), respectively, then stored at (4±1) ℃ and relative humidity of 85%~90% for 49 days. During storage, the indicators related to storage quality, cell membrane permeability (CMP), contents of ROS and malondialdehyde (MDA), levels of ROS-scavenging enzyme activities and substance contents, activities of membrane lipid metabolism-related enzymes and contents of membrane lipid components were measured every 7 days. Results showed that, compared with control *P. emblica* fruit, melatonin-treated *P. emblica* fruit maintained the notably lower chilling injury index, weight loss rate and values of a^* and ΔE^*, but kept the clearly higher commercially acceptable fruit rate, values of L^* and b^*, and amounts of total sugar, TSS and TA, thus retaining the postharvest quality during cold storage. Moreover, melatonin lowered CMP, superoxide anion production rate and MDA content, raised activities of superoxide dismutase, catalase and ascorbate peroxidase, increased contents of ascorbic acid and glutathione, and rose scavenging ability of 1,1-diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine radical of *P. emblica* fruit. In addition, in melatonin-treated fruit, the activities of phospholipase D, lipoxygenase and lipase were decreased. Meanwhile, the levels of phosphatidic acid, palmitic acid and stearic acid were reduced, whereas the levels of phosphatidylcholine, phosphatidylinositol, oleic acid, linoleic acid and linolenic acid were raised. Therefore, melatonin could retain the postharvest quality of cold-stored *P. emblica* fruit by regulating their ROS and membrane lipid metabolisms. Specifically, it enhanced the ROS-scavenging capacity of the fruit to reduce ROS level, and decreased the activities of membrane lipid metabolism-related enzymes to stabilize the contents of membrane lipid components. These regulatory effects helped maintain the stability of cell membrane structure, thereby improving the postharvest quality during cold storage, and extending the fruit's storage time.

Key words: *Phyllanthus emblica*; melatonin; cold storage quality; reactive oxygen species metabolism; membrane lipid metabolism

余甘子（*Phyllanthus emblica* L.），亦称油甘、滇橄榄等，是一种热带、亚热带地区的特色水果[1−2]。果实原产于印度、巴基斯坦、斯里兰卡等地[2−4]。在我国已有 1800 多年的种植历史[5]，现主要分布在福建、广西、海南、广东、云南等省区[2,6−7]。余甘子果实富含维生素 C、黄酮类、多酚类、氨基酸等营养物质[3−4,7]，具有抗氧化、抗菌、降血压、抗肿瘤、护肝、消炎镇痛等功效[3−4,6,8]。然而，余甘子果实采后极易发生失水、褐变、皱缩、腐烂等品质败坏症状，降低采后贮藏性能，难以维持果实品质[2−3,9]。低温贮藏可有效延缓果实采后品质劣变，维持较好的贮藏特性，延长货架期[10]。因此，研究余甘子果实在冷藏期间的品质变化，以维持其采后品质、延长贮藏期具有重要意义。

活性氧（Reactive oxygen species, ROS）代谢可调节果实采后品质[11−12]。超氧阴离子自由基（Superoxide anion, $O_2^{-}\cdot$）等 ROS 大量累积将破坏 ROS 代谢平衡，诱导严重的膜脂过氧化及产生丙二醛（Malondialdehyde, MDA），致使果实品质丧失[13−14]。ROS 清除系统可影响 ROS 水平，从而调节 ROS 的生成与清除。超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase, SOD）、过氧化氢酶（Catalase, CAT）、抗坏血酸过氧化物酶（Ascorbate peroxidase, APX）等 ROS 清除酶及谷胱甘肽（Glutathione, GSH）、抗坏血酸（Aascorbic acid, AsA）等 ROS 清除物质作为该系统的重要组成部分，能调节 ROS 水平[11,13−14]。有研究表明，微酸性电解水[12]、硫化钠[15] 等处理能提高果实 ROS 清除能力，进而减少 ROS 累积而维持采后品质。另外，膜脂代谢也是影响果实采后品质的关键因素[11,16]。较高磷脂酶 D（Phospholipase D, PLD）、脂氧合酶（Lipoxygenase, LOX）、脂酶活性将提高膜脂代谢水平，加速降解果实的磷脂酰胆碱（Phosphatidylcholine, PC）、磷脂酰肌醇（Phosphatidylinositol, PI）等磷脂组分和不饱和脂肪酸（Unsaturated fatty acid, USFA），进而破坏细胞膜结构，促进品质败坏[17−18]。有研究报道，三磷酸腺苷[17]、壳寡糖[18] 等处理能降低果实膜脂代谢酶活性而维持膜脂组分含量，从而维持细胞膜结构，稳定其采后品质。因此，ROS 与膜脂代谢水平的改变对果实采后品质具有调节作用。

褪黑素是一种天然形成的吲哚胺，广泛存在于植物体中，可参与调节多种生理过程，例如种子萌发、开花、果实成熟、应对外界胁迫等[2,11,16]。另外，褪黑素可作为 ROS 清除剂，减少 ROS 累积及其对细胞结构的损伤作用，提升果实采后品质[3,11]。本团队前期研究表明，褪黑素处理能有效提升西番莲果实 ROS 清除能力，降低 ROS 氧化损伤，进而稳定细胞膜结构而维持果实冷藏品质[11]。Ali 等[19] 研究报道，褪黑素能减少西葫芦的 ROS 累积，降低细胞膜结构损伤程度，延缓冷害发生。此外，褪黑素还能维持果实的细胞膜脂组分含量，保护细胞膜结构而增强果实贮藏品质[11]。Wang 等[20] 研究发现，褪黑素处理能提高香蕉的 USFA 水平，增强果实抗冷性。因此，ROS 和膜脂代谢对维持果实采后冷藏品质具有重要调节作用。然而，褪黑素通过调节 ROS 代谢水平和膜脂组分降解来提升冷藏余甘子果实采后品质的内在关联机制尚未见报道。因此，本研究拟揭示 ROS 和膜脂代谢在褪黑素维持冷藏余甘子果实品质中的作用，为褪黑素处理延长余甘子果实贮藏期提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

余甘子果实　以福建省主栽的‘蓝丰’余甘子果实为试材，果实采自福建省惠安县紫山镇田船余甘专业合作社管理的果园，果实于 9 成熟 [色差 L^*、a^*、b^* 值、可溶性固形物（Total soluble solids, TSS）含量分别是 58.06±0.80、−9.02±0.31、29.53±1.60、9.36%±0.10%] 采收，挑选色泽均匀、大小一致、无病虫害、无损伤的果实用于研究；褪黑素（纯度>98%）　购买于阿拉丁试剂（上海）有限公司；本研究测定指标所用的化学试剂（化学纯）　购买于国药集团化学试剂有限公司。

ME204 电子天平、S230 型电导率仪、ET18 自动电位滴定仪　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；CR400 色差仪　日本柯尼卡公司；GL-20G-Ⅱ型高速冷冻离心机　上海安亭科学仪器厂；PRX-450A 型人工气候箱　浙江宁波赛福实验仪器有限公司；Infinite M 200 Pro 型酶标仪　瑞士帝肯公司；7890B 气相色谱仪　美国安捷伦科技有限公司；Waters 2695 高效液相色谱仪　美国沃特世公司；PAL-1 糖度计　日本株式会社爱宕公司；HH-4 型数显恒温水浴锅　国华电器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1　果实采后处理　在预实验中，将清洗后的果实分成 5 组，分别浸泡在浓度为 0（对照）、0.1、0.2、0.4 和 0.6 mmol/L 的褪黑素中 30 min，晾干，装袋（30 个/袋，每个处理组 3 袋），在（4±1）℃、相对湿度 85%~90% 下贮藏 49 d。结果发现，在贮藏 49 d 时，不同浓度的褪黑素处理组的商品率（未发生冷害）分别是 51.11%（对照）、61.11%（0.1 mmol/L）、65.56%（0.2 mmol/L）、73.67%（0.4 mmol/L）、70.89%（0.6 mmol/L），而冷害指数分别是 0.22（对照）、0.17（0.1 mmol/L）、0.16（0.2 mmol/L）、0.12（0.4 mmol/L）、0.15（0.6 mmol/L）。相比之下，0.4 mmol/L 褪黑素处理的冷藏余甘子果实商品率最高、冷害指数最低，具有较稳定的采后品质。因此，选择 0.4 mmol/L 褪黑素用于后续研究。

在确定褪黑素最优浓度后，挑选 90 个余甘子果实用于测定采收当天（贮藏 0 d）的果实特性，另挑选 1260 个果实均分成 2 组（每组 630 个果实，含 3 个重复），具体如下：a. 对照组：蒸馏水浸泡果实 30 min；b. 0.4 mmol/L 褪黑素浸泡果实 30 min。经过上述处理后，取出果实晾干并装袋（30 个/袋），在（4±1）℃、相对湿度 85%~90% 条件下贮藏。在贮藏期（0~49 d），取样测定相关指标。

1.2.2　果实耐贮性的测定　参考 Fan 等[21] 的方法，取 30 个果实测定余甘子的冷害指数，以褐变或斑点面积占整个果实表面的百分比为评判标准，设 5 个等级：0 级（无褐变或斑点）、1 级（1%~10%）、2 级（11%~25%）、3 级（26%~50%）、4 级（≥51%）。此外，参考 Zhang 等[12] 的方法，取 30 个余甘子果实测定商品率及失重率。果实商品率、失重率的结果均以 % 表示。

1.2.3　果实外观色差的测定　参照 Zhang 等[12] 的方法，取 5 个余甘子果实，测定果实赤道面相对 4 个部分的外观色差，包括 a^*、b^* 和 L^* 值，同时计算 ΔE^* 值。

1.2.4　果实营养物质含量的测定　参考林育钊等[22] 的方法，取 10 个余甘子果实测定营养物质含量。将余甘子果实研磨成汁，用 PAL-1 糖度计测定果实 TSS 含量，结果以 % 表示；取 2.0 g 果实与适量蒸馏水研磨成汁，定容至 100 mL，取 20 mL 用 ET18 全自动电位滴定仪测定（以柠檬酸计）可滴定酸（Titratable acid, TA）含量，结果以 % 表示；取 1.0 g 果实与 10 mL 蒸馏水混匀研磨，煮沸提取 30 min，离心后取上清液，定容至 100 mL，取 0.5 mL，采用苯酚硫酸法测定总糖含量，结果以 g/kg 表示。

1.2.5　果实细胞膜透性（Cell membrane permeability, CMP）的测定　参考 Fan 等[21] 的方法，从 15 个果实取 30 个 0.2 cm^2 的组织圆片浸泡于 25 mL 蒸馏水，25 ℃ 静置 3 h 后，测定电导率 C_1，煮沸 0.5 h，冷却定容后测定电导率 C_2，计算相对电导率（C_1/C_2）用于评价 CMP，结果以 % 表示。

1.2.6　果实 O_2^{-}·产生速率和 MDA 含量的测定　参照 Lin 等[11] 的方法，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，加入 8 mL pH7.8 的 50 mmol/L 磷酸盐缓冲液（Phosphate buffered saline, PBS）[含 1 mmol/L 乙二胺四乙酸（Ethylene diamine tetraacetic acid, EDTA）]，研磨后离心，上清液定容至 10 mL。取 1 mL 上清液，与 1 mL pH7.8 50 mmol/L PBS、1 mL 1 mmol/L 盐酸羟胺混合，摇匀后静置 1 h，加入 1 mL α-奈胺、1 mL 对氨基苯磺酸，显色 20 min 后，测定波长 530 nm 处的吸光值（OD），O_2^{-}·产生速率结果以 μmol/（g·min）表示。此外，取 1.0 g 果实，加入 8 mL 10% 三氯乙酸（Trichloroacetic acid, TCA），研磨后离心，上清液定容至 10 mL。取 1 mL 上清液，加 1 mL 硫代巴比妥酸（0.67%），煮沸 20 min，冷却后测定波长 450、532 和 600 nm 处的 OD 值，MDA 含量结果以 nmol/g 表示。

1.2.7　果实 ROS 清除系统的评价　参照 Lin 等[13] 的方法进行余甘子果实 ROS 清除系统水平评价。从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL PBS（pH7.0）混合，摇匀后离心，上清液用于测定 ROS 清除酶活性。对于 SOD 活性的测定，取 0.1 mL 上清液、3 mL 反应介质（含 63 μmol/L 氮蓝四唑、13 mmol/L 甲硫氨酸、1.5 μmol/L 核黄素、50 mmol/L pH7.8 PBS），摇匀，光照 0.5 h，置于暗处终止反应，测定波长 560 nm 处的 OD 值。对于 CAT 活性的测定，取 0.2 mL 上清液、2.8 mL 20 mmol/L H_2O_2，摇匀，30 ℃ 下反应 10 min，用 2 mL 10% 硫酸终止反应，测定波长

240 nm 处的 OD 值。对于 APX 活性的测定，取 0.2 mL 上清液、4 mL 50 mmol/L PBS（含 0.5 mmol/L AsA，pH7.7）、0.5 mL 2 mmol/L H_2O_2，摇匀后置于 30 ℃ 下 20 min，用 2 mL 20%TCA 终止反应，于波长 290 nm 处测定 OD 值。ROS 清除酶活性以 U/mg protein 表示。对于 AsA 含量的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL 5%TCA 混合，摇匀后离心，取 3 mL 上清液、3 mL 5%TCA、3 mL 无水乙醇、1.5 mL 0.03%$FeCl_3$、1.5 mL 0.4%H_3PO_4、3 mL 0.5% 邻菲罗啉，摇匀，30 ℃ 下反应 90 min，测定波长 534 nm 处的 OD 值。对于 GSH 含量的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL 5%TCA（含 5 mmol/L EDTA）混合，摇匀后离心，取 1 mL 上清液、1 mL 50 mmol/L PBS（pH7.0）、0.5 mL 4 mmol/L 二硫代硝基苯甲酸，25 ℃ 下反应 10 min，测定波长 412 nm 处的 OD 值。ROS 清除物质含量用 g/kg 表示。对于 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-Diphenyl-2-trinitrophenylhydrazine，DPPH）自由基清除能力的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL 80% 乙醇混合，摇匀后离心，取 1.5 mL 上清液、1.5 mL 60 μmol/L DPPH，摇匀，暗处反应 30 min，测定波长 517 nm 处的 OD 值，结果以 % 表示。

1.2.8　果实膜脂代谢酶活性的测定　参照 Lin 等[11,17] 的方法测定。对于 PLD 活性的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，和 10 mL 0.1 mol/L 醋酸缓冲液（pH5.6）混合，摇匀后离心，取 3 mL 上清液、3 mL 0.4 mg/mL 卵磷脂，28 ℃ 下振荡 1 h，加 5 mL 石油醚洗涤 3 次，收集水层，加 3 mL 1% 雷氏盐后离心，用 5 mL 丙酮溶解沉淀，测定波长 520 nm 处的 OD 值。对于 LOX 活性的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL 0.1 mol/L PBS（pH6.8）混合，摇匀后离心，取 0.2 mL 上清液、0.05 mL 亚油酸钠，摇匀，30 ℃ 下反应 5 min，随后加 7 mL 60% 乙醇、2 mL 无水乙醇，测定波长 234 nm 处的 OD 值。对于脂酶活性的测定，从 10 个余甘子果实取 1.0 g 样品，与 10 mL0.2 mol/L PBS（pH7.8）混合，摇匀后离心，取 1 mL 上清液、2.3 mL 0.2 mol/L PBS，在 30 ℃ 下反应 5 min 后加 0.5 mL 0.5% 乙酸-1-萘酯，摇匀后放置 0.5 h，加 0.2 mL 0.15% 坚固蓝（含 6% 十二烷基硫酸钠）后测定波长 520 nm 处的 OD 值。以上结果均以 U/mg protein 表示。

1.2.9　果实膜脂组分含量的测定　取 10 个余甘子果实，参照 Lin 等[11,17] 的方法测定。将 5 g 果实与 15 mL 氯仿∶甲醇（2∶1）混合，超声，离心后取氯仿相，与丙酮混合，振荡后氮气吹干，用 1 mL 氯仿∶甲醇（2∶1）进行溶解，随后采用高效液相色谱仪进行 PC、PI、磷脂酸（Phosphatidic acid，PA）等磷脂组分含量的测定。以正己烷∶异丙醇∶甲醇∶1% 乙酸（4∶9∶5∶2）为流动相，色谱柱、蒸发光检测器型号分别为 nersil SIL 100A（250 mm×4.6 mm）、Waters 2424，检测波长、柱温、流速、进样体积分别为 254 nm、30 ℃、0.8 mL/min、10 μL。结果以 g/kg 表示。此外，取 5 g 果实干燥至恒重，取 0.5 g 干样溶解于 2 mL 0.4 mol/L 氢氧化钾，振荡后加 8 mL 蒸馏水、8 mL 苯∶石油醚（1∶1）混匀，取上清液采用气相色谱仪检测脂肪酸组分相对含量。色谱柱型号为 DB-23（60 m×0.25 mm），FID 检测器、进样口温度分别为 250、200 ℃，氢气、空气、氮气尾吹流速分别为 30、300、30 mL/min。结果用 % 表示。

1.3　数据处理

在本研究中，所测定指标都进行 3 次重复。使用 Microsoft Excel 2019 软件绘制数据图。基于方差分析和邓肯检验，采用 SPSS 软件对数据进行统计及分析。在同一贮藏时间内，用**（P<0.01）或*（P<0.05）分别表示褪黑素处理组与对照组间存在极显著或显著差异。另外，对于 Mantel 分析，采用 ggcor 计算并通过 Chiplot 在线工具（https://www.chiplot.online）对结果进行可视化。

2　结果与分析

2.1　果实耐贮性的变化

由图 1A 可知，贮藏 0 d（采收当天）时，余甘子果实外观完好，呈现明亮的黄绿色，绿色调更明显。从贮藏 21 d 开始，对照组果实表面开始出现褐变或斑点等冷害症状，随贮藏时间延长（尤其是 35 d 后），该症状逐渐加重，其贮藏价值也急剧降低。然而，褪黑素处理能减缓果实冷害发生进程，维持较好的外观品质，延长保鲜期。

冷害指数可直观反映果实在冷藏期间所遭受冷胁迫的程度。由图 1B 可知，在贮藏 49 d，对照组和褪黑素处理组的冷害指数分别比贮藏 0 d 高 200.00% 和 125.00%。此外，和对照组对比，褪黑素处理组的冷害指数在贮藏 28 d 具有显著（P<0.05）差异，在贮藏 35~49 d 具有极显著（P<0.01）差异。

商品率是衡量健康果实在商业上可接受程度的关键指标[22]。由图 1C 可知，两组商品率均在贮藏 14~49 d 快速下降，而褪黑素处理组高于对照组，并在 28 d 达显著（P<0.05）差异，在贮藏 35~49 d 达极显著（P<0.01）差异。

失重率与果实采后耐贮性有关，可影响果实贮藏品质[23]。由图 1D 可知，对照组和褪黑素处理组的失重率分别由贮藏 0 d 的 0 上升至贮藏 49 d 的 4.22% 和 3.48%。褪黑素处理组失重率在贮藏 35~42 d 显著（P<0.05）低于对照组。

因此，褪黑素处理可降低冷藏余甘子果实的冷害指数与失重率，维持果实的商品率。

2.2　果实外观色差的变化

色差系统可体现果实颜色变化，评价其外观品质[12,22]。其中，L^*、a^*、b^*值分别代表色泽明亮水平、红绿色度、黄蓝色度[2]。由图 2A 可知，余甘子果实的 L^*值在贮藏 0~49 d 快速下降，这可能是因为果实

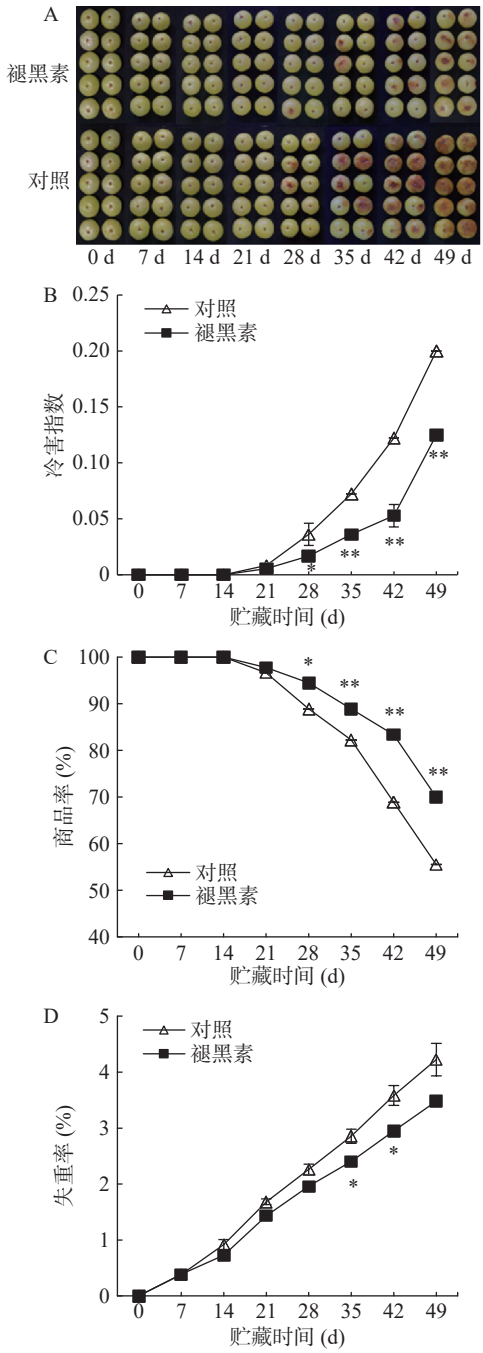


图 1 褪黑素对冷藏余甘子果实外观品质(A)、冷害指数(B)、商品率(C)和失重率(D)的影响

Fig.1 Effects of melatonin on appearance quality (A), chilling injury index (B), commercially acceptable fruit rate (C) and weight loss rate (D) of cold-stored *P. emblica* fruit

注: 在同一贮藏时间内, 用**(*P*<0.01)或*(*P*<0.05)分别表示褪黑素处理组与对照组间存在极显著或显著差异, 图 2~图 8 同。

表面出现褐变或斑点等冷害症状, 导致其外观色泽变暗。而褪黑素处理组始终高于对照组, 且在贮藏 21~35 d 达显著(*P*<0.05)差异, 在贮藏 42~49 d 达极显著(*P*<0.01)差异。在贮藏 49 d, 褪黑素处理组的 L^*值比对照组高 11.43%。

由图 2B 可知, 对照组 a^*值在贮藏 0~49 d 加速上升, 这说明了果实外观色泽逐渐向红色转变; 而褪黑素处理组 a^*值在贮藏 0~14 d 快速升高, 14~21 d

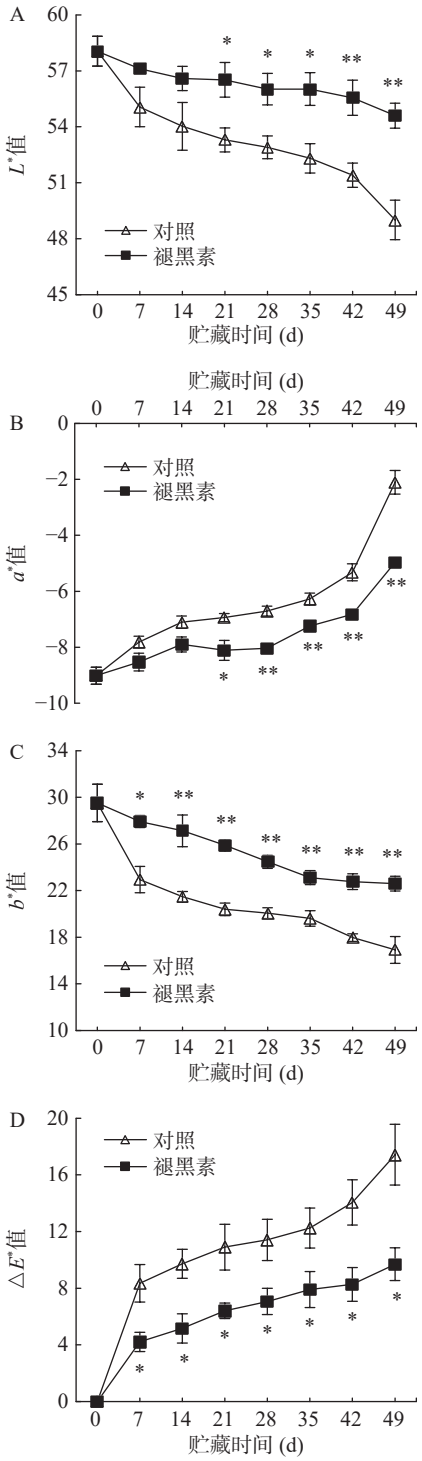


图 2 褪黑素对冷藏余甘子果实外观色差的影响

Fig.2 Effects of melatonin on appearance chromaticity of cold-stored *P. emblica* fruit

呈现下降变化, 随后加速上升。相比之下, 褪黑素处理组 a^*值低于对照组, 并在贮藏 21 d 具有显著(*P*<0.05)差异, 在贮藏 28~49 d 具有极显著(*P*<0.01)差异。

从图 2C 可得, 对照组与褪黑素处理组的 b^*值分别从贮藏 0 d 的 29.53 下降到贮藏 49 d 的 16.91 和 22.60, 并且褪黑素处理组维持在较高水平, 同时在贮藏 7 d 呈现出显著(*P*<0.05)差异, 在贮藏 14~49 d 表现出极显著(*P*<0.01)差异。

ΔE^*值表示果实在贮藏过程中外观色泽的整体变化[12]。对照组和褪黑素处理组的 ΔE^*值分别从 0(贮藏 0 d)上升到 17.41 与 9.70(贮藏 49 d)，褪黑素处理组维持在较低水平，这表明了果实外观色泽变化较缓。另外，在贮藏 7~49 d，两组的 ΔE^*值具有显著(P<0.05)差异。

因此，褪黑素处理可延缓冷藏余甘子果实 L^*、b^*值的下降，而减缓 a^*、ΔE^*值的升高。

2.3　果实营养物质含量的变化

TSS、TA 及总糖作为果实主要的营养物质，是衡量营养价值的重要依据[22]。由图 3A 可得，对照组 TSS 含量在贮藏 0~7 d 快速降低，7~21 d 快速上升，21~49 d 快速减少。而褪黑素处理组 TSS 含量在贮藏 0~21 d 快速提高，21~49 d 快速下降。与对照组相比，褪黑素处理组具有较高水平，并在贮藏 7~21、35~49 d 具有极显著(P<0.01)差异，在贮藏 28 d 达到显著(P<0.05)差异。

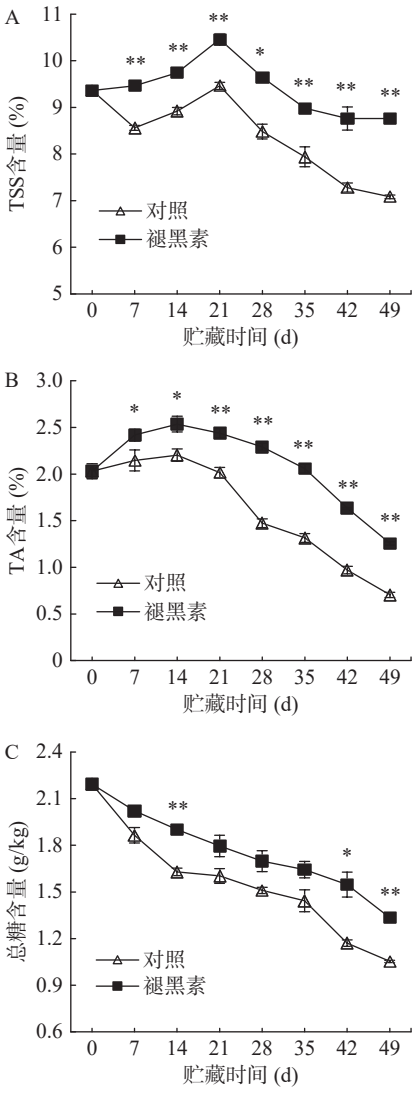


图 3　褪黑素对冷藏余甘子果实营养物质含量的影响

Fig.3　Effects of melatonin on nutrient substance contents of cold-stored *P. emblica* fruit

由图 3B 可得，对照组 TA 含量从 2.03%(贮藏 0 d)上升至 2.20%(贮藏 14 d)，随后下降到 0.70%(贮藏 49 d)。然而，褪黑素处理组 TA 含量从 2.03%(贮藏 0 d)升高到 2.54%(贮藏 14 d)，之后快速减少到 1.26%(贮藏 49 d)。与对照组对比，褪黑素处理组在贮藏 7~14 d 达显著(P<0.05)差异，在贮藏 21~49 d 达极显著(P<0.01)差异。

从图 3C 发现，在贮藏 49 d，对照组与褪黑素处理组的总糖含量分别比贮藏 0 d 低 51.94% 和 39.17%。褪黑素处理组在贮藏 14、49 d 极显著(P<0.01)高于对照组，在贮藏 42 d 显著(P<0.05)高于对照组。

因此，褪黑素处理可延缓冷藏余甘子果实 TSS、TA 及总糖等营养物质水平的下降。

2.4　果实 CMP 的变化

CMP 是衡量细胞膜损伤程度的关键指标，其数值越高，膜结构遭受的破坏越严重[11]。由图 4 可知，在贮藏 49 d，对照组和褪黑素处理组的 CMP 分别比贮藏 0 d 高 170.94% 与 128.96%。此外，和对照组对比，褪黑素处理组保持较低水平，并在贮藏 14、42 d 有显著(P<0.05)差异，在贮藏 28~35、49 d 有极显著(P<0.01)差异。

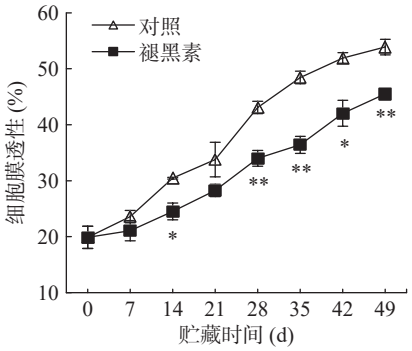


图 4　褪黑素对冷藏余甘子果实 CMP 的影响

Fig.4　Effects of melatonin on CMP of cold-stored *P. emblica* fruit

因此，褪黑素处理能减缓冷藏余甘子果实 CMP 的升高。

2.5　果实 $O_2^{-}\cdot$产生速率和 MDA 含量的变化

ROS(如 $O_2^{-}\cdot$)可破坏细胞膜完整性，诱导膜脂过氧化，促进其产物 MDA 积累，破坏细胞正常功能[11]。对于 $O_2^{-}\cdot$产生速率(图 5A)，两组果实均呈现快速升高趋势。在贮藏 49 d，对照组和褪黑素处理组分别比贮藏 0 d 增高了 47.77% 和 36.19%，同时在贮藏 7、28~35、49 d 达到显著(P<0.05)差异。另外，对于 MDA 含量(图 5B)，两组果实均呈现加速上升趋势。在贮藏 49 d，褪黑素处理组是对照组的 87.65%。相比之下，两组在贮藏 35 d 有显著(P<0.05)差异，在贮藏 49 d 有极显著(P<0.01)差异。

因此，褪黑素处理能延缓冷藏余甘子果实 $O_2^{-}\cdot$和 MDA 的累积。

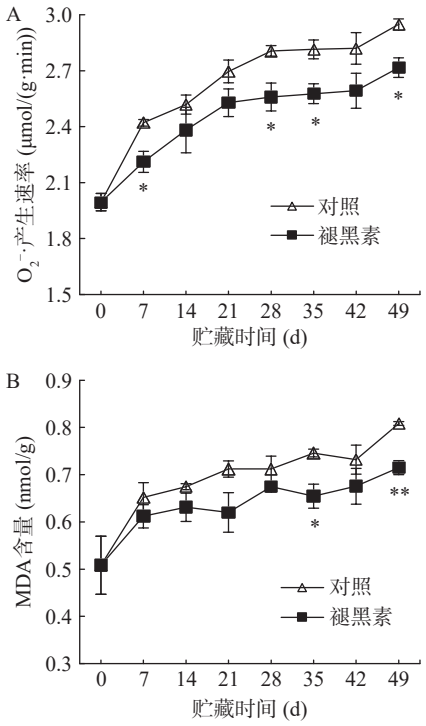


图 5　褪黑素对冷藏余甘子果实 $O_2^{\cdot-}$产生速率(A)和 MDA 含量(B)的影响

Fig.5　Effects of melatonin on $O_2^{\cdot-}$ production rate (A) and MDA content (B) of cold-stored *P. emblica* fruit

2.6　果实 ROS 清除系统的变化

SOD、CAT 与 APX 是重要的 ROS 清除酶, 可调节 ROS 水平[12−13]。由图 6A 可得, 余甘子果实的 SOD 活性在贮藏期先升高而后下降。其中, 对照组在贮藏 14 d 达到峰值(95.00 U/mg protein), 而褪黑素处理组在贮藏 28 d 达到峰值(112.38 U/mg protein)。与对照组对比, 褪黑素处理组具有较高 SOD 活性, 同时在贮藏 7、21~42 d 呈现极显著(P<0.01)差异。

由图 6B 可得, 在贮藏 0~49 d, 余甘子果实的 CAT 活性先上升随后减小。其中, 对照组在贮藏 35 d 达到峰值(30.82 U/mg protein), 而褪黑素处理组在贮藏 28 d 达到峰值(37.06 U/mg protein)。和对照组相比, 褪黑素处理组表现出较高 CAT 活性, 同时在贮藏 28 d 呈现显著(P<0.05)差异, 在贮藏 49 d 呈现极显著(P<0.01)差异。

由图 6C 可得, 对照组和褪黑素处理组的 APX 活性在贮藏 0~7 d 快速减小, 7~21 d 加速升高, 21~49 d 快速下降, 而褪黑素处理组具有较高水平。另外, 与对照组相比, 褪黑素处理组在贮藏 14~21 d 具有显著(P<0.05)较高的 APX 活性。

AsA 与 GSH 作为 ROS 清除物质, 可清除多余 ROS, 保持 ROS 产生与清除平衡[13−14]。由图 6D 可知, 余甘子果实的 AsA 含量在贮藏期表现出整体减少趋势, 而褪黑素处理组维持较高水平。此外, 和对照组对比, 褪黑素处理组 AsA 含量在贮藏 7~42 d 具有极显著(P<0.01)差异, 在贮藏 49 d 具有显著(P<0.05)差异。

由图 6E 可得, 对照组 GSH 含量在贮藏 0~21 d 快速提高, 之后加速下降。然而, 褪黑素处理组 GSH 含量在贮藏 0~21 d 加快提高, 21~35 d 快速下降, 之后又较快升高。相比之下, 褪黑素处理组保持较高水平, 同时在贮藏 14~21 d 达显著(P<0.05)差异。

DPPH 自由基清除能力是评价果实采后抗氧化水平的关键指标, 能反映 ROS 清除能力[11]。余甘子

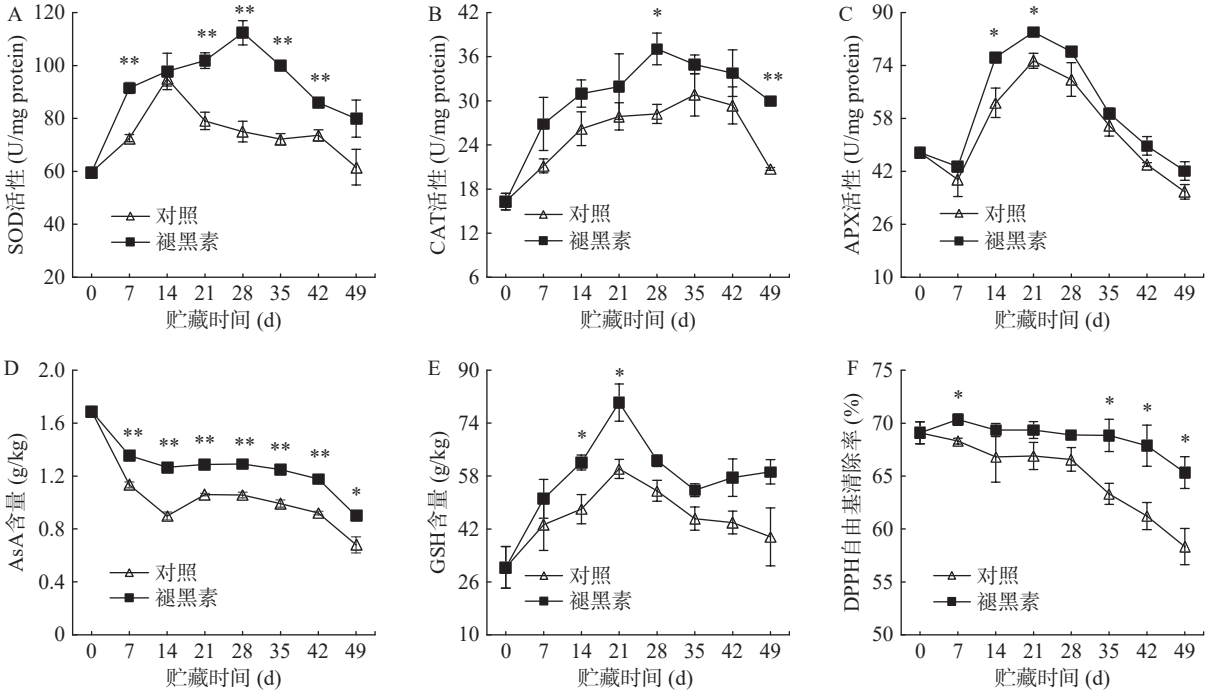


图 6　褪黑素对冷藏余甘子果实 ROS 清除系统的影响

Fig.6　Effects of melatonin on ROS-scavenging system of cold-stored *P. emblica* fruit

果实的 DPPH 自由基清除能力在贮藏 0~49 d 整体呈现降低趋势，而褪黑素处理组保持较高水平（图 6F）。另外，褪黑素处理组在贮藏 7、35~49 d 显著（$P<0.05$）高于对照组。

因此，褪黑素处理能保持冷藏余甘子果实较高的 ROS 清除酶活性、ROS 清除物质水平、DPPH 自由基清除能力。

2.7　果实膜脂代谢酶活性和磷脂组分含量的变化

PLD、脂酶、LOX 是主要的膜脂代谢酶，可降解膜脂组分，使得细胞膜结构不稳定[14,24]。从图 7A 可知，余甘子果实的 PLD 活性呈现先上升后下降的趋势，对照组在贮藏 28 d 达到峰值（6.25 U/mg protein），而褪黑素处理组在贮藏 21 d 达到峰值（4.45 U/mg protein）。此外，褪黑素处理组的 PLD 活性在贮藏 28、42 d 极显著（$P<0.01$）低于对照组，在贮藏 35、49 d 显著（$P<0.05$）低于对照组。

从图 7B 可知，对于脂酶活性，对照组和褪黑素处理组在贮藏 7 d 达到峰值，分别是 9.46、8.26 U/mg protein。相比之下，褪黑素处理组的脂酶活性低于对照组，在贮藏 21~35 d 具有显著（$P<0.05$）差异。

从图 7C 可知，余甘子果实的 LOX 活性呈现先升高而后降低的趋势，其中对照组在贮藏 21 d 达到峰值（2.11 U/mg protein），而褪黑素处理组在贮藏 14 d 达到峰值（1.85 U/mg protein）。此外，与对照组比较，褪黑素处理组在贮藏 21、42 d 显著（$P<0.05$）较低，在贮藏 49 d 极显著（$P<0.01$）较低。

PC、PI、PA 等磷脂是膜脂主要的构成部分，PC 与 PI 的降解及 PA 的累积将导致严重的膜损伤[11,24]。

由图 7D 可知，在贮藏 49 d，对照组与褪黑素处理组的 PC 含量分别比贮藏 0 d 减少 74.73% 和 48.39%。与对照组对比，褪黑素处理组在贮藏 35 d 显著（$P<0.05$）较高，在贮藏 42~49 d 极显著（$P<0.01$）较高。

从图 7E 可得，余甘子果实的 PI 含量在贮藏 0~49 d 整体呈现减少趋势，而褪黑素处理组高于对照组，同时在贮藏 14、28~49 d 表现出显著（$P<0.05$）差异。褪黑素处理组在贮藏 49 d 时比对照组高 64.73%。

由图 7F 可知，余甘子果实的 PA 含量在贮藏期呈升高变化。相比之下，褪黑素处理组低于对照组，并在贮藏 42~49 d 表现出极显著（$P<0.01$）差异。在贮藏 49 d，褪黑素处理组比对照组低 31.24%。

因此，褪黑素处理能降低冷藏余甘子果实膜脂代谢酶活性，同时减缓 PC 和 PI 含量的下降、PA 含量的升高。

2.8　果实脂肪酸组分相对含量的变化

脂肪酸也是膜脂重要组成，USFA 和 SFA 是其主要存在形式，其含量的高低可影响细胞膜结构，其中 USFA 水平与细胞膜的稳定程度、流动特性密切相关[13,24]。由图 8A~C 可知，余甘子果实的油酸、亚油酸、亚麻酸等 USFA 相对含量呈现下降的趋势，褪黑素处理组整体高于对照组。统计分析可得，两组的油酸相对含量在贮藏 14~21 d 具有极显著（$P<0.01$）差异，在贮藏 28~35 d 具有显著（$P<0.05$）差异；亚油酸相对含量在贮藏 42~49 d 有显著（$P<0.05$）差异；亚麻酸相对含量在贮藏 14、28~35、49 d 呈现显著（$P<0.05$）差异，在贮藏 21 d 呈现极显著（$P<0.01$）差异。

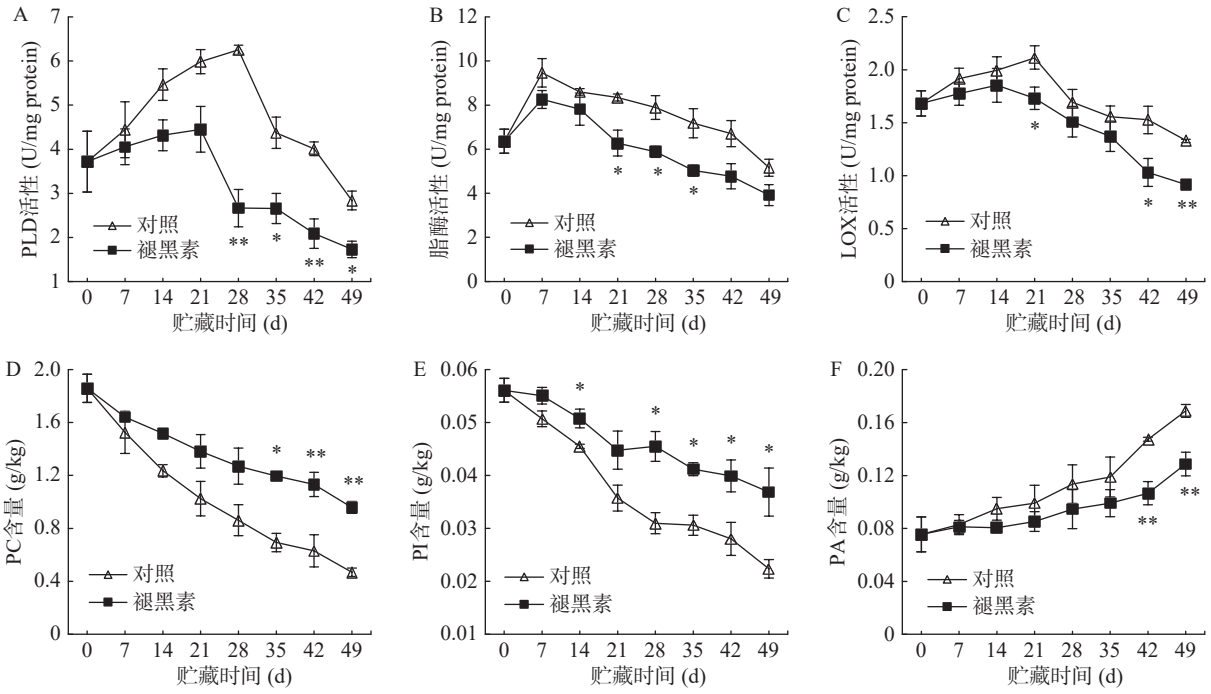


图 7　褪黑素对冷藏余甘子果实膜脂降解酶活性（A~C）和磷脂组分含量（D~F）的影响

Fig.7　Effects of melatonin on membrane lipid-degrading enzyme activities (A~C) and phospholipid component contents (D~F) of cold-stored *P. emblica* fruit

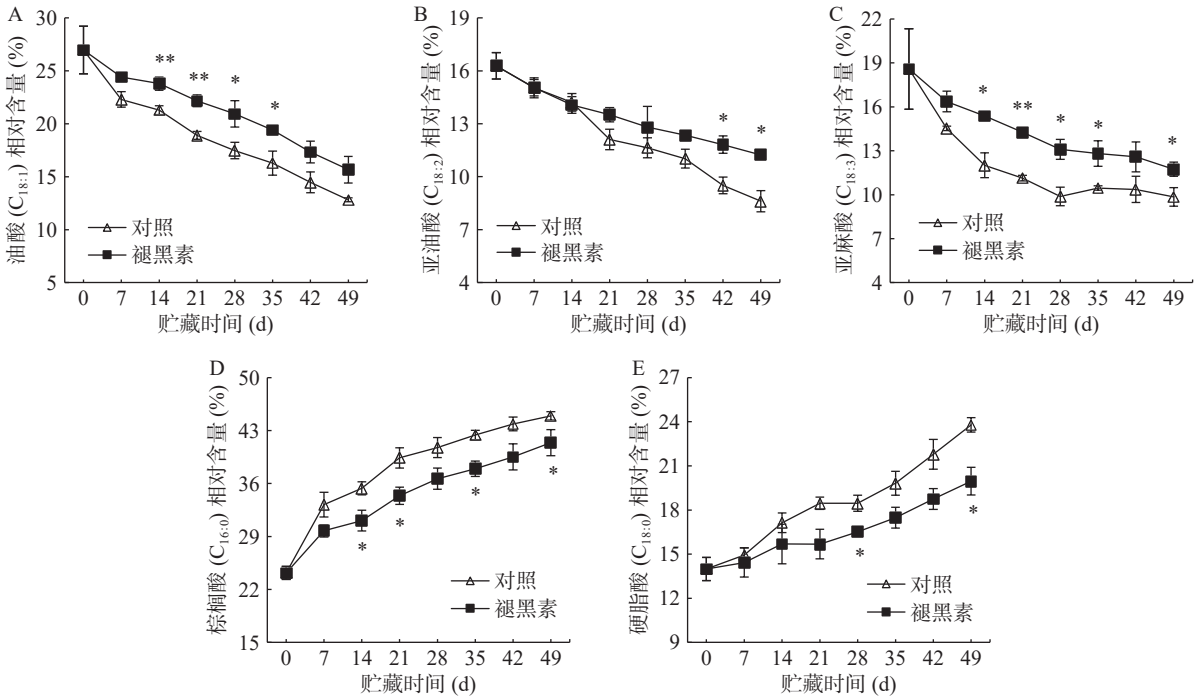


图 8 褪黑素对冷藏余甘子果实脂肪酸组分相对含量的影响

Fig.8 Effects of melatonin on fatty acid relative contents of cold-stored *P. emblica* fruit

由图 8D~图 8E 可知，余甘子果实的棕榈酸、硬脂酸等 SFA 相对含量呈现上升的趋势，褪黑素处理组低于对照组。与对照组比较，褪黑素处理组的棕榈酸相对含量在贮藏 14~21、35、49 d 呈现显著（P<0.05）差异；硬脂酸相对含量则在贮藏 28、49 d 呈现显著（P<0.05）差异。

因此，褪黑素处理能延缓冷藏余甘子果实 USFA 相对含量的降低、SFA 相对含量的提高。

2.9 冷藏余甘子果实采后品质与 ROS 和膜脂代谢的关联分析

为揭示褪黑素对余甘子果实在冷藏期间品质变化的影响，对果实采后耐贮性、外观色差和营养物质含量及其与 ROS 和膜脂代谢相关指标进行 Mantel 分析（图 9）。结果发现，余甘子果实的耐贮性与 CMP、DPPH 自由基清除能力、脂酶和 LOX 活性、磷脂组分（PC、PI、PA）和脂肪酸组分（$C_{18:1}$、$C_{18:2}$、$C_{18:0}$）含量等具有显著相关性（P<0.05）；外观色差与 CMP、O_2^{-}·产生速率、MDA 含量、CAT 活性、AsA 含量、DPPH 自由基清除能力、AsA、磷脂组分（PC、PI、PA）和脂肪酸组分（$C_{18:1}$、$C_{18:2}$、$C_{18:3}$、$C_{16:0}$、$C_{18:0}$）含量等表现出显著相关性（P<0.05）；营养物质含量与 CMP、O_2^{-}·产生速率、MDA 含量、DPPH 自由基清除能力、脂酶和 LOX 活性、磷脂组分（PC、PI、PA）和脂肪酸组分（$C_{18:1}$、$C_{18:2}$、$C_{16:0}$、$C_{18:0}$）含量等存在显著相关性（P<0.05）。由此推测，褪黑素处理可调节余甘子果实的 ROS 和膜脂代谢，影响果实耐贮性、外观色差及营养物质含量，进而维持采后冷藏品质。另外，余甘子果实的 O_2^{-}·产生速率与 CMP（P<0.01，r=0.91）、MDA 含量（P<0.01，r=0.98）具有正相关，与 AsA 含量（P<0.01，r=−0.88）、DPPH 自由基清除能力（P<0.05，r=−0.77）具有负相关；MDA 含量与 CMP（P<0.01，r=0.87）具有正相关，与 AsA 含量（P<0.01，r=−0.94）、DPPH 自由基清除能力（P<0.05，r=−0.80）具有负相关。PC 含量与 CMP（P<0.01，r=−0.98）、PA 含量（P<0.01，r=−0.91）具有负相关，而 PI 含量与 CMP（P<0.01，r=−0.97）、PA 含量（P<0.01，r=−0.91）具有负相关。另外，油酸相对含量和 CMP（P<0.01，r=−0.97）、棕榈酸（P<0.01，r=−0.98）、硬脂酸（P<0.01，r=−0.96）相对含量表现出负相关，亚油酸相对含量和 CMP（P<0.01，r=−0.95）、棕榈酸（P<0.01，r=−0.98）、硬脂酸（P<0.01，r=−0.96）相对含量表现出负相关，亚麻酸相对

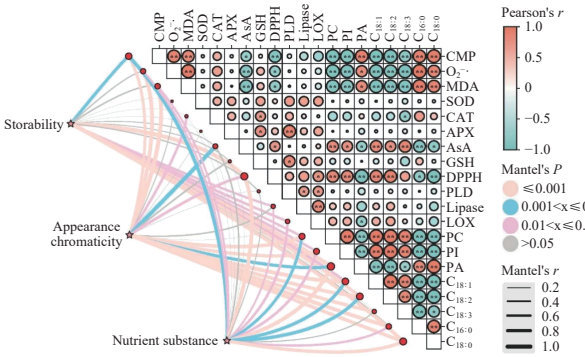


图 9 冷藏余甘子果实采后品质与 ROS 和膜脂代谢相关指标的 Mantel 分析

Fig.9 Mantel analysis of indicators related to the postharvest quality and metabolisms of ROS and membrane lipid of cold-stored *P. emblica* fruit

注：**或*分别表示不同指标之间存在极显著（P<0.01）或显著（P<0.05）相关；圆圈大小反映相关系数大小。

含量和 CMP（$P<0.01$，$r=-0.85$）、棕榈酸（$P<0.01$，$r=-0.97$）、硬脂酸（$P<0.05$，$r=-0.82$）相对含量表现出负相关。由此推测，冷藏余甘子果实采后 AsA 等 ROS 清除物质含量及 DPPH 自由基清除能力下降将导致 ROS 累积和膜脂过氧化；而较高膜脂代谢酶活性可能是磷脂组分（PC 和 PI）降解、USFA 向 SFA 转化等过程的重要因素，共同损伤了细胞膜结构而影响果实冷藏品质。因此，冷藏余甘子果实采后品质变化与 ROS 和膜脂代谢水平密切相关。

3　讨论

褪黑素作为一种具有潜力的采后保鲜技术，能维持采后西番莲[11]、荔枝[16]、杨桃[25] 等果实品质。本研究发现，和对照余甘子果实相比，褪黑素处理能提高余甘子果实的商品率、降低冷害指数、失重率，提高了果实采后耐贮性；保持较高的 L^*、b^*值，较低的 a^*、ΔE^*值，减缓了果实外观色泽改变、提升外观品质；提高总糖、TSS 及 TA 含量，提升了果实营养价值。由此可知，褪黑素可作为一种有效的处理技术，提高冷藏余甘子果实采后品质，增强贮藏特性，延长贮藏期。这与笔者前期的研究结果类似，即褪黑素能维持冷藏西番莲果实采后品质，降低果实冷害发生[11]。

ROS（如 $O_2^{-}\cdot$）的异常产生将致使其产生与清除失衡，诱导严重的膜脂过氧化，导致 MDA 大量积累，从而破坏细胞膜的正常功能，加速果实腐烂发生、品质丧失[11,13−14,26]。果实激活 ROS 清除系统，清除多余 ROS，减轻氧化损伤[11]。SOD、CAT 及 APX 作为重要的 ROS 清除酶，可降低 ROS 的异常累积[27−28]。AsA 和 GSH 等非酶 ROS 清除物质也是降低 ROS 含量、缓解其对细胞膜损伤的重要组成[11]。此外，DPPH 自由基清除能力也与 ROS 清除水平的高低有关[14]。有研究表明，维持较高水平的 ROS 清除能力能降低采后果实 ROS 累积、缓解膜脂过氧化，进而维持细胞膜完整性，提升果实贮藏品质[10−11,27]。本研究发现，和对照余甘子果实相比，褪黑素处理降低果实的 CMP、$O_2^{-}\cdot$产生速率和 MDA 水平，提高 SOD、CAT 和 APX 活性、AsA 和 GSH 含量，增强 DPPH 自由基清除能力；贮藏 49 d 时，上述指标分别为对照组的 84.50%、92.20%、87.65%、1.30 倍、1.44 倍、1.18 倍、1.32 倍、1.50 倍和 1.12 倍。因此，褪黑素处理可提升余甘子果实 ROS 清除酶活性及清除物质含量，增强果实 ROS 清除能力，减少 ROS 累积及膜脂过氧化，降低细胞膜结构损伤，维持果实在冷藏期间的品质特性，使果实具有较好的耐贮性、外观品质及营养价值。何欢等[29] 研究发现，褪黑素处理可提高杏果实 ROS 清除酶活性，降低膜脂过氧化，进而延缓冷害而维持采后品质。夏明辉等[30] 研究报道，γ-氨基丁酸处理可减缓猕猴桃果实 ROS 积累，提高 ROS 清除水平，进而维持细胞膜结构、延缓冷害发生。这些结果与本研究类似。

磷脂和脂肪酸作为细胞膜膜脂的重要成分，对膜完整性的维持具有重要作用[11,17]。PC、PI 是主要的磷脂组分，但在 PLD 水解作用下可降解为 PA[11,30]；PA 可通过脂酶的作用而进一步分解为游离脂肪酸[14]。根据饱和度的不同，脂肪酸分为 SFA 与 USFA[14]。USFA 在 LOX 的去饱和作用下生成 SFA，同时生成 MDA，进而诱发膜脂过氧化及细胞膜结构损伤[11,17]。PLD、LOX 和脂酶等膜脂代谢酶活性的提高将加快采后果实细胞膜膜脂的降解，扰乱细胞膜结构而致使其品质丧失[14,17]。然而，胺鲜酯[24]、γ-氨基丁酸[31] 等处理可降低采后果实的膜脂降解酶活性，削弱膜脂代谢水平，进而保持细胞膜完整性而提升贮藏品质。本研究发现，和对照余甘子果实比较，褪黑素处理可降低果实 PLD、LOX、脂酶活性，维持 PC、PI、USFA（$C_{18:1}$、$C_{18:2}$、$C_{18:3}$）含量，减少 PA、SFA（$C_{16:0}$、$C_{18:0}$）；贮藏 49 d 时，上述指标分别是对照组的 60.92%、69.17%、75.78%、2.04 倍、1.64 倍、1.22 倍、1.30 倍、1.19 倍、76.47%、92.15% 和 83.90%。因此，褪黑素处理减小余甘子果实的膜脂代谢酶活性而降低膜脂代谢水平，减缓 PC 与 PI 的降解、SFA 的累积；同时降低 LOX 活性而抑制膜脂过氧化，保护细胞膜完整性。这有利于提升冷藏果实采后品质，提高其耐贮性、外观品质及营养品质，表现出较好的贮藏特性。Chen 等[31] 研究发现，γ-氨基丁酸处理保持橄榄果实较低的 LOX、PLD、脂酶等膜脂代谢酶活性，有利于稳定冷藏橄榄果实品质，这与本研究结果类似。笔者前期研究也发现，褪黑素处理能提高西番莲果实 PC、PI、USFA 含量，稳定细胞膜结构，从而减缓果实冷害，增强采后品质[11]。

4　结论

综上，褪黑素处理能抑制余甘子果实冷害指数的升高，保持较高的商品率、L^*和 b^*值、TSS、TA 与总糖含量，较低的失重率、a^*和 ΔE^*值，进而保持果实耐贮性、外观品质与营养价值，增强采后品质、提高保鲜效果。褪黑素处理减缓果实 CMP、$O_2^{-}\cdot$产生速率和 MDA 含量的上升，提高 SOD、CAT 和 APX 等 ROS 清除酶活性、AsA 与 GSH 等 ROS 清除物质含量及 DPPH 自由基清除能力。另外，褪黑素处理可维持余甘子果实较低的 PLD、脂酶和 LOX 等膜脂代谢酶活性，保持较高的 PC、PI 和 USFA 含量及较低的 PA 和 SFA 含量。因此，褪黑素提高余甘子果实 ROS 清除能力，减少 ROS 生成及膜脂过氧化，同时抑制膜脂代谢酶活性，稳定 PC、PI、USFA 等膜脂组分含量，这有利于保持果实细胞膜的稳定性，进而提升冷藏余甘子果实的采后品质。因此，该技术可用于稳定余甘子果实细胞膜结构，保持其冷藏品质，延长采后保鲜期。关于褪黑素处理调控冷藏余甘子果实细胞膜结构以提升其品质的分子机制尚未深入研究；未来研究将采用转录组学、代谢组学等组学技术，进一步揭示褪黑素处理维持冷藏余甘子果实品质的分子机制。

© The Author(s) 2026. 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] 郑自奋, 陈晓维, 邹波, 等. 不同品种余甘子果实营养成分分析及加工特性评价[J]. 现代食品科技, 2024, 40(7): 166−176. [ZHENG Zifen, CHEN Xiaowei, ZOU Bo, et al. Analysis of the nutritional components and evaluation of the processing characteristics of different varieties of *Phyllanthus emblica* L. fruit[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(7): 166−176.]

[2] 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 Xuanjing, JIANG Xue, CHEN Hongbin, et al. Effects of postharvest melatonin treatment on fruit quality and storability of *Phyllanthus emblica* fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(6): 1259−1266.]

[3] 蒋璇靓, 赵迅, 陈洪彬, 等. 酸性电解水处理对余甘子采后生理及品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 168−173. [JIANG Xuanjing, ZHAO Xun, CHEN Hongbin, et al. The effect of acidic electrolyzed water treatment on postharvest physiology and quality of *Phyllanthus emblica* fruit[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 168−173.]

[4] HUANG Haozhou, LI Mengqi, TAN Qinchu, et al. The impact of thermal extraction on the quality of *Phyllanthus emblica* Linn. fruit: A systematic study based on compositional changes[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2023, 16(4): 104562.

[5] 杨婉媛, 陈晓维, 刘杜娟, 等. 余甘子的生物活性及加工研究进展[J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 120−130. [YANG Wanyuan, CHEN Xiaowei, LIU Dujuan, et al. Research progress in biological activity and processing of *Phyllanthus emblica*[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 120−130.]

[6] 陈军, 陈洪彬, 蒋璇靓, 等. 余甘子贮藏与加工研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 342−347. [CHEN Jun, CHEN Hongbin, JIANG Xuanjing, et al. Research progress on storage and processing of *Phyllanthus emblica*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 342−347.]

[7] 罗丹丹, 马智斌, 宋志姣, 等. 高浓度 CO_2 处理对余甘子果实品质的影响[J]. 保山学院学报, 2024, 43(5): 35−41. [LUO Dandan, MA Zhibin, SONG Zhijiao, et al. Effect of high concentration CO_2 treatment on fruit quality of *Phyllanthus emblica*[J]. Journal of Baoshan University, 2024, 43(5): 35−41.]

[8] 宋志姣, 梁凤鸣, 章金龙, 等. 余甘子果实不同发育阶段品质比较[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(9): 255−261. [SONG Zhijiao, LIANG Fengming, ZHANG Jinlong, et al. Comparison of nutritional quality during fruit development of *Phyllanthus emblica*[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(9): 255−261.]

[9] 陈雨欣, 江晓童, 张瑞敏, 等. 茶皂素和壳聚糖复合涂膜对余甘子采后冷藏效果的影响[J]. 包装工程, 2023, 44(5): 83−89. [CHEN Yuxin, JIANG Xiaotong, ZHANG Ruimin, et al. Effect of tea saponin and chitosan composite coating on cold storage quality of *Phyllanthus emblica* fruits[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(5): 83−89.]

[10] 任新雅, 石慧敏, 刘志旭, 等. 褪黑素通过调控能量代谢和抗氧化能力增强杏果实抗冷性[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 217−226. [REN Xinya, SHI Huimin, LIU Zhixu, et al. Melatonin enhances cold resistance in apricot fruits by regulating the energy metabolism and antioxidant capacity[J]. Food Science, 2024, 45(14): 217−226.]

[11] LIN Yuzhao, CHEN Hongbin, CHEN Yazhen, et al. Melatonin alleviated chilling injury of cold-stored passion fruit by modulating cell membrane structure via acting on antioxidant ability and membrane lipid metabolism[J]. Current Research in Food Science, 2025, 10: 100951.

[12] ZHANG Jing, CHEN Xuezhen, LIU Qingqing, 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.

[13] LIN Yuzhao, LIN Hetong, ZENG Lingzhen, et al. DNP and ATP regulate the pulp breakdown development in *Phomopsis longanae* Chi-infected Longan fruit through modulating the ROS metabolism[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100348.

[14] LIN Lijuan, LIN Hetong, ZHENG Shaojie, et al. Metabolisms of ROS and membrane lipid participate in *Pestalotiopsis microspora*-induced disease occurrence of harvested Chinese olives [J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 210: 112720.

[15] YI Binghan, LIU Yu, WU Zhengguo, et al. Hydrogen sulfide alleviates chilling injury of zucchini fruit by regulating antioxidant capacity, endogenous hydrogen sulfide, proline, and polyamine metabolism[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 208: 112638.

[16] WANG Tian, HU Meijiao, YUAN Debao, et al. Melatonin alleviates pericarp browning in litchi fruit by regulating membrane lipid and energy metabolisms[J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 160: 111066.

[17] LIN Yuzhao, LIN Hetong, ZENG Lingzhen, et al. DNP and ATP regulate the breakdown occurrence in the pulp of *Phomopsis longanae* Chi-infected Longan fruit through modulating the metabolism of membrane lipid[J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135330.

[18] HAN Zhanhong, LI Baojun, GONG Di, et al. Preharvest chitooligosaccharide spray alleviates chilling injury in harvested muskmelon fruit by regulating membrane lipid metabolism and activating antioxidant enzyme activity[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 204: 112452.

[19] ALI S, NAWAZ A, NAZ S, et al. Exogenous melatonin mitigates chilling injury in zucchini fruit by enhancing antioxidant system activity, promoting endogenous proline and GABA accumulation, and preserving cell wall stability[J]. Postharvest Biology and Technology, 2023, 204: 112445.

[20] WANG Zhiqiang, ZHANG Lin, DUAN Wenhui, et al. Melatonin maintained higher contents of unsaturated fatty acid and cell membrane structure integrity in banana peel and alleviated postharvest chilling injury[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133836.

[21] FAN Zhongqi, LIN Bin, LIN Hetong, et al. γ-Aminobutyric acid treatment reduces chilling injury and improves quality maintenance of cold-stored Chinese olive fruit[J]. Food Chemistry, 2022, 13: 100208.

[22] 林育钊, 冯梦桀, 陈洪彬, 等. 氧化白藜芦醇处理对黄皮果实贮藏特性和采后品质的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(4): 804−812. [LIN Yuzhao, FENG Mengfei, CHEN Hongbin, et al. Effects of oxyresveratrol treatment on the storage behavior and

postharvest quality of wampee fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(4): 804−812.]
[23] LIN Yuzhao, CHEN Hongbin, DONG Sisi, et al. Acidic electrolyzed water maintains the storage quality of postharvest wampee fruit by activating the disease resistance[J]. Foods, 2024, 13(10): 1556.
[24] 余鹏, 郑方盈, 余义和, 等. 采前喷施胺鲜酯对葡萄果实贮藏期间膜脂代谢的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 159−164. [YU Peng, ZHENG Fangying, YU Yihe, et al. Effect of preharvest spraying of diethyl aminoethyl hexanoate on membrane lipid metabolism of grapes during storage[J]. Food Science, 2023, 44(23): 159−164.]
[25] HU Ting, ZHENG Shaojie, LIU Qingqing, et al. Melatonin treatment maintains the quality properties and storability of carambola fruit by modulating energy metabolism[J]. Food Chemistry, 2025, 464: 141661.
[26] 毕凯悦, 阿依则巴·艾尼玩尔, 海子悦, 等. 1-MCP 处理对西梅果实贮藏期品质及活性氧代谢的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 395−403. [BI Kaiyue, AIZHEBA Ainiyangur, HAI Ziyue, et al. Effect of 1-MCP treatment on quality and reactive oxygen metabolism of prune fruits during storage period[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 395−403.]
[27] LI Meiling, LIN Hetong, WANG Chao, et al. Acidic electrolyzed-oxidizing water treatment mitigated the disease progression in *Phomopsis longanae* Chi-infected longans by modulating ROS and membrane lipid metabolism[J]. Food Chemistry, 2024, 449: 139175.
[28] 吴琼, 周然. 冷藏温度对振动胁迫下猕猴桃细胞膜脂氧化及活性氧成分的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 234−240. [WU Qiong, ZHOU Ran. Effect of cold temperature on membrane lipid oxidation and active oxygen species of kiwifruit under vibratory stress[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 234−240.]
[29] 何欢, 刘昭雪, 张亚琳, 等. 外源褪黑素通过调控活性氧代谢减轻采后杏果实冷害[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 168−174. [HE Huan, LIU Zhaoxue, ZHANG Yalin, et al. Exogenous melatonin ameliorates postharvest chilling injury of apricot fruit by modulating reactive oxygen species metabolism[J]. Food Science, 2022, 43(5): 168−174.]
[30] 夏明辉, 张珅, 赵云峰, 等. 外源 γ-氨基丁酸延缓采后猕猴桃果实冷害及其与活性氧代谢的关系[J]. 食品科学, 2023, 44(19): 198−206. [XIA Minghui, ZHANG Shen, ZHAO Yunfeng, et al. Exogenous γ-aminobutyric acid delays chilling injury of harvested kiwifruit and relates with reactive oxygen species metabolism[J]. Food Science, 2023, 44(19): 198−206.]
[31] CHEN Yunman, LIN Bin, LIN Yifen, et al. Involvements of membrane lipid and phenolic metabolism in reducing browning and chilling injury of cold-stored Chinese olive by γ-aminobutyric acid treatment[J]. Postharvest Biology and Technology, 2024, 209: 112664.