

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

王斌, 袁晓, 林冲, 王欣悦, 刘堂茂, 曹秋艳

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

WANG Bin, YUAN Xiao, LIN Chong, WANG Xinyue, LIU Tangmao, and CAO Qiuyan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023120053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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荔枝褐变及活性氧代谢的影响

Effects of Exogenous Melatonin on Browning and Active Oxygen Metabolism of Postharvest *Litchi*

食品工业科技. 2021, 42(6): 282-287 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060279>

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>

外源褪黑素调控活性氧代谢诱导采后果实对黑斑病的抗性

Melatonin Regulates Reactive Oxygen Species Metabolism to Induce Resistance to Black Spot of Postharvest Apricot Fruit

食品工业科技. 2022, 43(24): 355-362 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040086>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王斌, 袁晓, 林冲, 等. 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 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 302–309. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120053

WANG Bin, YUAN Xiao, LIN Chong, et al. Effects of Exogenous Melatonin Treatment on Storage Quality and ROS Scavenging Capacity of Harvested Pitaya Fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 302–309. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120053

· 贮运保鲜 ·

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

王斌^{1,2}, 袁晓^{1,2}, 林冲^{1,2}, 王欣悦^{1,2}, 刘堂茂^{1,*}, 曹秋艳^{1,*}

(1. 广东省粤北食药资源利用与保护重点实验室/韶关学院生物与农业学院, 广东韶关 512005;

2. 韶关市园艺韶关学院工程技术研究中心, 广东韶关 512005)

摘要: 为研究外源褪黑素 (melatonin, MT) 处理对采后火龙果的保鲜效果, 以不同浓度 (0.05、0.10 和 0.50 mmol/L) MT 处理采后火龙果果实, 并测定其贮藏品质和活性氧清除能力。结果表明: 外源 MT 处理的保鲜效果与其浓度有关, 相较于 0.05 mmol/L 和 0.50 mmol/L, 0.10 mmol/L MT 处理能显著地抑制果实鳞片黄化, 降低失重率, 延缓总可溶性固形物和可滴定酸含量的下降, 降低腐烂率。0.10 mmol/L MT 处理还显著地提高了过氧化氢酶、过氧化物酶和抗坏血酸过氧化物酶活性及总抗氧化能力, 增强对 DPPH· 和超氧阴离子自由基的清除能力。以上结果表明 MT 处理通过提高抗氧化酶活性及时清除衰老过程中产生的活性氧, 缓解活性氧对采后火龙果造成的氧化损伤。

关键词: 火龙果, 贮藏品质, 褪黑素, 采后处理, 活性氧清除能力

中图分类号: S667.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2024)21-0302-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023120053



本文网刊:

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

WANG Bin^{1,2}, YUAN Xiao^{1,2}, LIN Chong^{1,2}, WANG Xinyue^{1,2}, LIU Tangmao^{1,*}, CAO Qiuyan^{1,*}

(1. Guangdong Provincial Key Laboratory of Utilization and Conservation of Food and Medicinal Resources in Northern Region/College of Biology and Agriculture, Shaoguan University, Shaoguan 512005, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Shaoguan Horticulture in Shaoguan University, Shaoguan 512005, China)

Abstract: To investigate preservative effects of exogenous melatonin (MT) treatment on pitaya fruit, different concentrations (0.05, 0.10, and 0.50 mmol/L) of MT were used to treat harvested pitaya fruit, and the storage quality and scavenging capacity of reactive oxygen species (ROS) of MT treatment were measured. The results showed that preservative effects of MT depended on treatment concentration, and 0.10 mmol/L MT treatment significantly enhanced storage quality in relative to 0.05 mmol/L and 0.50 mmol/L concentrations. 0.10 mmol/L MT treatment effectively inhibited scale yellowing, reduced weight loss, delayed the decline in total soluble solids and titratable acid content, as well as minimized decay rate. Furthermore, 0.10 mmol/L MT treatment significantly enhanced the activities of catalase, peroxidase, and ascorbate peroxidase, along with the total antioxidant capacity, thereby enhancing the scavenging ability to DPPH· and superoxide anion radicals. The above results suggested that MT treatment enhanced antioxidant enzyme activity, facilitating the timely removal of ROS generated during fruit senescence and reducing oxidative damages caused by ROS.

Key words: pitaya fruit; storage quality; melatonin; postharvest treatment; ROS scavenging capacity

收稿日期: 2023-12-08

基金项目: 2022 年韶关市科技计划项目 (220609104530752)。

作者简介: 王斌 (1991-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 采后果蔬贮藏与加工, E-mail: b_wang@sgu.edu.cn。

* 通信作者: 刘堂茂 (1978-), 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 植物艺术, E-mail: 843249682@qq.com。

曹秋艳 (1979-), 女, 博士, 高级实验师, 研究方向: 植物艺术, E-mail: cqiyuan79@163.com。

火龙果(*Hylocereus undulatus*)又名红龙果、仙蜜果,由于含水量和含糖量很高,组织鲜嫩,且采后呼吸代谢速率快,在不采用保鲜技术情况下很快腐烂变质^[1]。褪黑素(melatonin, MT)是一种小分子吲哚类色胺,广泛存在于植物体中^[2]。MT 在调控植物衰老、提高抗逆性方面具有重要作用,既可作为抗氧化剂直接清除活性氧(reactive oxygen species, ROS),又可作为信号物质调控植物的生长发育和抗逆性^[3]。

近几年的研究表明,MT 处理具有延缓采后果蔬衰老和品质劣变的作用^[4]。如外源 MT 处理能显著抑制菜心叶片中叶绿素的分解代谢,通过直接调控内源脱落酸(abscisic acid, ABA)合成相关基因的表达,降低内源 ABA 含量,延缓菜心叶绿素降解和叶片黄化^[5];MT 处理还能抑制鲜切芋头、马铃薯、苹果和梨等鲜切果蔬的切面褐变^[6]。这些研究表明,MT 处理对多种类型的采后果蔬具有较好保鲜效果。加之其还具有成分天然、对环境友好、安全高效等优点,表明 MT 处理技术具有较强的产业化应用潜力。但 MT 处理的保鲜效果与果蔬种类、采收季节、产地、成熟度、施用方式等因素有关^[4],要在产业中推广应用 MT 保鲜处理技术,十分有必要在不同产区、不同类型的采后果蔬上进行多次试验,以确认 MT 处理的保鲜效果。

在采后火龙果的研究中,MT 处理能延缓鲜切火龙果低温贮藏期间的品质劣变^[7];MT 处理还能在一定程度上提高 20 ℃ 贮藏条件下“紫红龙”火龙果过氧化物酶(peroxidase, POD)、过氧化氢酶(catalase, CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(ascorbate peroxidase, APX)等抗氧化酶的活性,延缓果实衰老^[8]。但 MT 处理对采后果蔬的保鲜效果呈现出明显的浓度效应,高处理浓度会加速采后果蔬的成熟进程,导致抗病性降低而增加腐烂变质率,而低处理浓度不能激活或启动自身防御反应,不能有效保持贮藏品质^[9]。是否 MT 处理对不同贮藏温度下、不同产地来源、不同品种的火龙果具有一个适合产业化处理的通用浓度,值得进一步研究。确定适合不同品种和不同产地来源的火龙果保鲜的通用处理浓度,能保证采后处理效果的可靠性、提高产业化应用效率、减少采后损失。此外,MT 处理对室温贮藏采后火龙果的保鲜作用,是否与其增强对 ROS 的清除能力有关,有待明确。

因此,本研究以广东韶关本地所产的‘台湾大红’红肉火龙果为研究材料,研究了不同浓度 MT 处理对采后火龙果常温(25 ℃)贮藏品质和 ROS 清除活性的影响,以进一步明确外源 MT 处理对采后火龙果的保鲜效果,为 MT 处理技术在常温贮藏火龙果产业中的推广应用奠定一定基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

火龙果 品种为‘台湾大红’,采收 9 成熟的火龙

果作为供试材料,试验果园位于广东省韶关市曲江区大塘镇东岗岭村庙背,此时的火龙果果实已达到理想的食用状态,总可溶性固形物(total soluble solids, TSS)含量在 11%~14% 左右,火龙果在 1 h 内运回实验室,随即开展试验;RP30 塑料保鲜袋 美国 GLAD 佳能公司;褪黑素、愈创木酚、邻苯三酚 生工生物工程(上海)有限公司;氢氧化钠(NaOH)、二水合磷酸二氢钠、30% 过氧化氢(H₂O₂)、1,1-二苯基-2-苦基肼自由基、乙醇、盐酸、2,4,6-三(2-吡啶基)三嗪、乙酸钠、氯化铁、冰乙酸 阿拉丁生化科技有限公司;酚酞、聚乙烯吡咯烷酮、L-抗坏血酸 麦克林试剂有限公司。

SOP 电子天平 德国赛多利斯(Sartorius)公司;CR-400 色差仪 日本柯尼卡美能达公司;PR-201a 数显折射仪 日本 ATAGO 公司;MIR-554-PC 低温恒温培养箱 松下电器(中国)有限公司;GT300 组织研磨仪 北京格瑞德曼仪器设备有限公司;Sorrall ST 16R 低温冷冻高速离心机 热电实验设备有限公司奥斯特罗德分公司;T2602 可见紫外分光光度计 上海佑科仪器仪表有限公司;SMART-N30UV 全自动超纯水仪 力康生物医疗科技控股有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 褪黑素处理 挑选成熟度和大小基本一致(单果重约 220 g)、果皮色泽均匀、无虫眼,果柄处果皮未被拉伤,其他部位无机械伤的果实作为试验用果。将挑选的果实随机分成四组,每组包含 60 个果(包含 3 个重复,每重复 20 个果)。将四组果实分别在含有 0(对照,CK)、0.05、0.10 和 0.50 mmol/L MT 的溶液中浸泡处理 30 min,然后装入塑料筐密封包装处理 6 h。处理结束后,再次打开包装袋,用一次性干纸巾吸干果实表面多余水分后再次密封包装,并贮藏在相对空气湿度为 85%~90% 的 25 ℃ 恒温培养箱中。每间隔 2 d 定期测定相关指标,并收集果肉于液氮中速冻处理后,保存于-80 ℃ 冰箱中用于测定抗氧化酶活性和 ROS 清除能力指标。

1.2.2 病情指数和好果率测定 按照 Zhang 等^[10]描述的方法统计采后火龙果自然腐烂情况,并根据给出的公式计算病情指数。将病情严重程度分为 5 级:0 级表示果皮表面没有出现病斑,1 级表示病斑面积小于单果总面积的 25.00%,2 级表示病斑面积占单果总面积的 26.00%~50.00%,3 级表示病斑面积占单果总面积的 51.00%~75.00%,4 级表示病斑面积超过单果总面积的 75.00%。

$$\text{病情指数} = \frac{\sum(\text{腐烂级数} \times \text{对应级数腐烂果实的数量})}{\text{总果数}}$$

$$\text{好果率}(\%) = \frac{\text{未发病的果实数量}}{\text{总果数}} \times 100$$

1.2.3 果皮色度测定 使用色差仪分别测定除鳞片以外的果皮部分和鳞片表面的色度(L^* 、 a^* 和 b^*)

值^[11],在每个果的 3 个不同部位测定,结果以三次测定的平均值表示。由于病斑处的果皮会发黑,测定色度时若果皮表面出现病斑,仅测定未产生病斑果皮的色度。

1.2.4 失重率测定 使用电子天平称量各处理组的果实重量。

$$\text{失重率}(\%) = \frac{\text{贮前质量} - \text{贮后质量}}{\text{贮前质量}} \times 100$$

1.2.5 TSS 和可滴定酸含量(titratable acidity, TA)测定 参考曹秋艳等^[12]描述的方法测定火龙果果实的 TSS 和 TA 含量。

每处理各称取 5 g 新鲜火龙果果肉榨取汁液,吸取 0.20 mL 滤液用于测定 TSS 含量。TSS 含量由数显折射仪测得,结果以百分比(%)表示。

称取 20 g 新鲜果肉样品于研钵中研磨成匀浆液,将匀浆液转移至 200 mL 的容量瓶中用蒸馏水定容至刻度,用脱脂棉过滤匀浆液。吸取 20 mL 滤液至三角瓶中,以酚酞为指示剂,使用 0.10 mol/L NaOH 溶液滴定果肉 TA 含量,结果以百分数表示。

$$\text{固酸比} = \frac{\text{TSS}}{\text{TA}}$$

1.2.6 抗氧化酶活性测定 称取 1 g 液氮速冻样品在 5 mL 的 0.10 mol/L 磷酸缓冲溶液(pH7.8)中研磨成匀浆液,于 4 ℃、11000 r/min 下离心 15 min,上清液即为酶粗提液。按照 Wang 等^[13]的方法测定 CAT、POD 和 APX 活性。

CAT 活性测定:吸取 0.20 mL 酶粗提液至石英比色皿中,加入 2.80 mL 的 1% H₂O₂ 溶液,立即记录在 240 nm 波长处反应产物 3 min 内的吸光度值(OD)变化。

APX 活性测定:吸取 0.10 mL 酶粗提液至石英比色皿中,加入 2.90 mL 的反应混合液(含 1 mmol/L AsA 和 0.5% H₂O₂),于 290 nm 波长下立即测定反应液在 3 min 内 OD 值变化。

POD 活性测定:量取 0.2 mL 酶粗提液至玻璃比色皿杯中,加入 2.80 mL 反应混合液(含 3%愈创木酚和 2% H₂O₂),测定反应液在 470 nm 波长处 3 min 内 OD 值变化。

以 OD 值每分钟变化 10 表示一个酶活性单位(U),酶活性结果以每单位活性每千克鲜重(U/kg FW)表示。

1.2.7 活性氧清除能力测定 使用 1.2.6 制备的酶粗提液,按照 Yuan 等^[14]的方法测定果肉的总抗氧化能力及对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-Diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH·)和超氧阴离子(superoxide anion, O₂^{·-})自由基的清除能力。

总抗氧化能力测定:吸取 0.20 mL 酶粗提液于离心管中,加入 5 mL 的 FRAP 工作液,混匀后室温条件下避光反应 1 h,于 593 nm 波长处测定反应液的 OD 值。用不同浓度的维生素 E 绘制标准曲线

(y=6.51x+0.02, R²=0.99),通过标准曲线计算出总抗氧化能力。

DPPH·清除能力测定:吸取 0.50 mL 酶粗提液至离心管中,加入 2 mL 的 0.20 mmol/L DPPH·溶液和 0.50 mL 纯净水,混匀后室温避光反应 30 min,于 517 nm 处测定反应液的 OD 值(A₁)。不含酶粗提液的反应液测得的吸光度值为 A₀,用等量的 95% 乙醇替换 DPPH·溶液,测得的吸光度值为 A₂。

$$\text{DPPH} \cdot \text{清除能力}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100$$

O₂^{·-}清除能力测定:将 0.20 mL 酶粗提液与 1.80 mL 的 25 mmol/L 邻苯三酚溶液在 5 mL 离心管中混匀反应 5 min。加入 1 mL 的 8 mol/L 盐酸溶液终止反应,于 320 nm 波长处测定吸光度值 A₁。用无水乙醇代替样品测得的吸光值为 A₀。

$$\text{O}_2 \cdot \text{清除能力}(\%) = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100$$

1.3 数据处理

在 Excel 2016 软件中记录和整理实验数据,并绘制柱形图。所有数据至少包含 3 个重复,用 3 个重复求得的平均值表示结果。处理组间的差异显著性在 SPSS 22 软件中使用 Duncan 多重比较和 T 检验分析得出,并用小写字母在图片中标注。

2 结果与分析

2.1 褪黑素处理对火龙果采后腐烂的影响

腐烂是引起采后果蔬损失的主要原因之一,也是衡量采后处理技术保鲜效果的关键指标^[15]。随贮藏时间增加,病情指数逐渐增加,好果率逐渐降低(图 1)。与 CK 组相比,9 d 时不同浓度 MT 处理的病情指数显著降低(P<0.05),0.05 mmol/L MT、0.10 mmol/L MT 和 0.50 mmol/L MT 处理组的病情指数分别比 CK 低 58.38%、83.33% 和 47.62%(图 1A)。除 0.05 mmol/L MT 处理组在 3 d 与 CK 组无显著差异外,贮藏期间各浓度 MT 处理组的好果率显著高于 CK 组(P<0.05)(图 1B)。经过 9 d 的贮藏,0.10 mmol/L MT 处理的果实仍表现出完好的外观(图 1C)。张亚琳等^[16]报道外源 MT 处理显著降低损伤接种互隔交链孢(*Alternaria alternata*)杏果实的发病率,抑制了病斑直径的增大。本研究的结果显示,MT 处理降低了火龙果的自然腐烂率,抑制了病程进展,0.10 mmol/L MT 处理对火龙果的自然腐烂率抑制效果最明显。结合文献表明 MT 处理既能降低病原菌的致病能力,又能提高果蔬自身抗病性,从而降低自然病害发生率和腐烂率,保持采后火龙果贮藏品质。

2.2 褪黑素处理对火龙果果皮色度的影响

果皮颜色是衡量果蔬新鲜度和品质特性的重要指标,也是直接影响引消费者选购果蔬的重要因素^[17]。果皮颜色主要取决于色素种类和含量,在采后果蔬成熟衰老过程中,呈色色素会氧化分解导致果皮

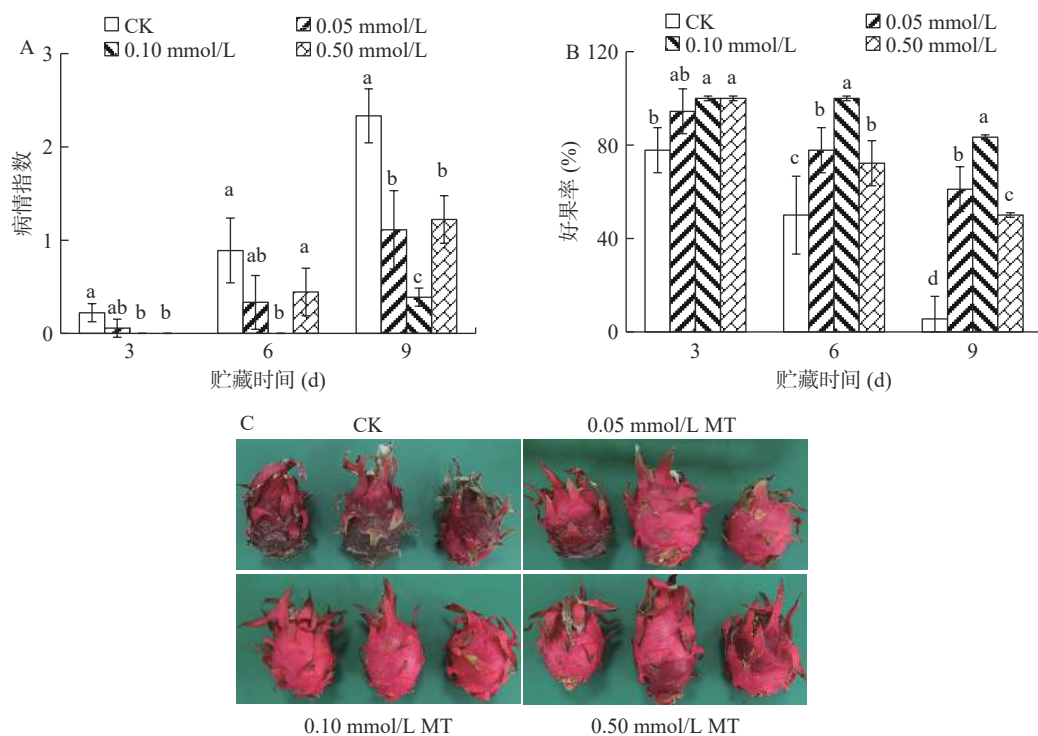


图 1 不同浓度褪黑素处理对火龙果腐烂的影响

Fig.1 Effects of melatonin (MT) treatments with different concentrations on the decay of pitaya fruit

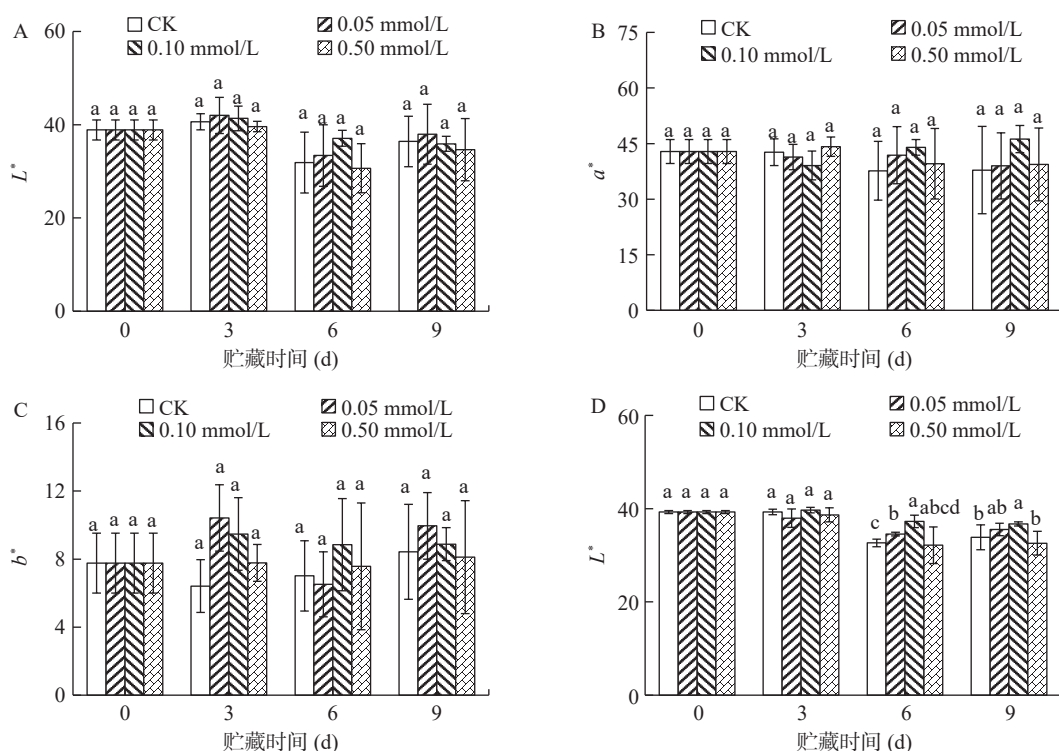
注: 不同小写字母表示同一贮藏时间点不同处理在 $P < 0.05$ 水平上差异显著, 图 2~图 5 同; 照片在贮藏 9 d 时拍摄。

变黄、变暗^[18], 从而失去明亮鲜艳的外观。如图 2 所示, 火龙果果皮和鳞片表面的 L^* 、 a^* 和 b^* 均为正值。在整个贮藏期间, 除鳞片之外的果皮色度值总体变化不大, 且不同处理间没有显著差异 ($P > 0.05$) (图 2A~2C), 说明在贮藏期间除鳞片以外的果皮色泽并不会发生显著变化。

鳞片的 L^* 和 a^* 值随贮藏时间整体呈下降趋势, b^* 值呈增加趋势 (图 2D~2F), 说明鳞片色度在贮藏期

间发生了明显变化。0.05 和 0.50 mmol/L MT 处理能在一定程度上延缓鳞片 L^* 和 a^* 值的下降、 b^* 值的增加, 但与 CK 组的差异在多个贮藏时间点处并不显著。0.10 mmol/L MT 处理组的 L^* 值和 a^* 值显著高于 CK 组 ($P < 0.05$), b^* 值显著低于 CK 组 ($P < 0.05$) (图 2D~2F), 表明 0.10 mmol/L MT 处理能有效抑制鳞片褪色。

一些研究表明, MT 处理可以抑制果蔬色素的降



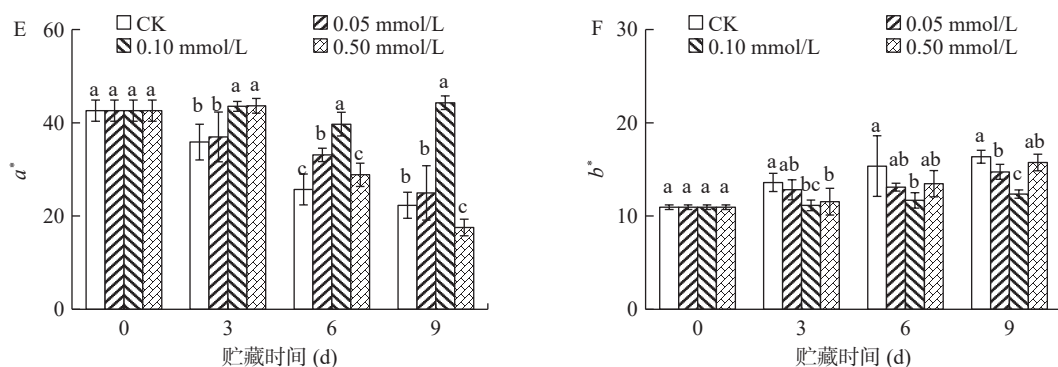


图2 不同浓度褪黑素处理对火龙果果皮色度的影响

Fig.2 Effects of melatonin (MT) treatments with different concentrations on the color of pitaya fruit peels

注: A~C: 除鳞片以外的果皮色度; D~F: 鳞片色度。

解, 延缓果皮色度变化^[19-21]。火龙果果皮中的色素主要以甜菜红素和花青素为主, 伴随着衰老进程甜菜红素等色素发生分解, 导致果皮变黄^[22]。本研究, 0.10 mmol/L MT 处理显著抑制鳞片黄化和亮度的下降, 表明 MT 处理能抑制采后火龙果的衰老进程。相较于鳞片色度变化, 除鳞片之外的果皮部分的色度变化不明显, 表明鳞片能更准确反映火龙果新鲜度。

2.3 褪黑素处理对失重率的影响

果蔬采收后仍是鲜活的生命体, 仍要进行一系列的生理代谢以维持正常的生命状态, 在呼吸作用和蒸腾作用的影响下, 导致果蔬失重和失鲜^[23]。各处理组的失重率在贮藏期间逐渐增加, 贮藏后期 CK 组的失重率快速变大, 但不同浓度 MT 处理组的增加速率明显慢于 CK 组(图 3)。与 CK 相比, 0.05 mmol/L 和 0.50 mmol/L MT 处理并没有显著降低失重率 ($P>0.05$), 但 0.10 mmol/L MT 处理组的失重率在整个贮藏期间均显著低于 CK 组 ($P<0.05$)。Ba 等^[8]也得到了相似的结果, 即只有 0.10 mmol/L MT 能显著降低 20 °C 下贮藏火龙果的呼吸强度和失重率。本研究进一步确认了不同贮藏温度下, MT 处理对其他产地来源和其他品种火龙果的保鲜效果。失水是引起采后果实失重的主要原因, 表明 MT 处理能抑制采后火龙果失水。

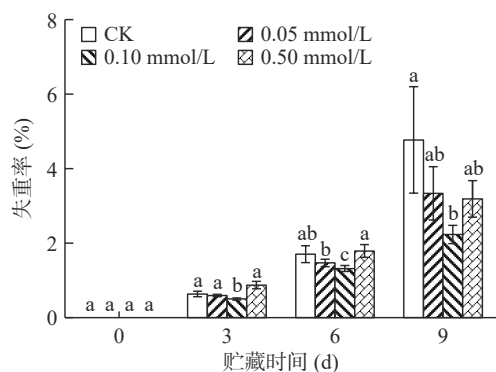


图3 不同浓度褪黑素处理对火龙果失重率的影响

Fig.3 Effects of melatonin (MT) treatments with different concentrations on weight loss ratio of pitaya fruit

2.4 褪黑素处理对火龙果 TSS 和 TA 含量的影响

可溶性糖是体现果实甜度的主要物质, 采后果

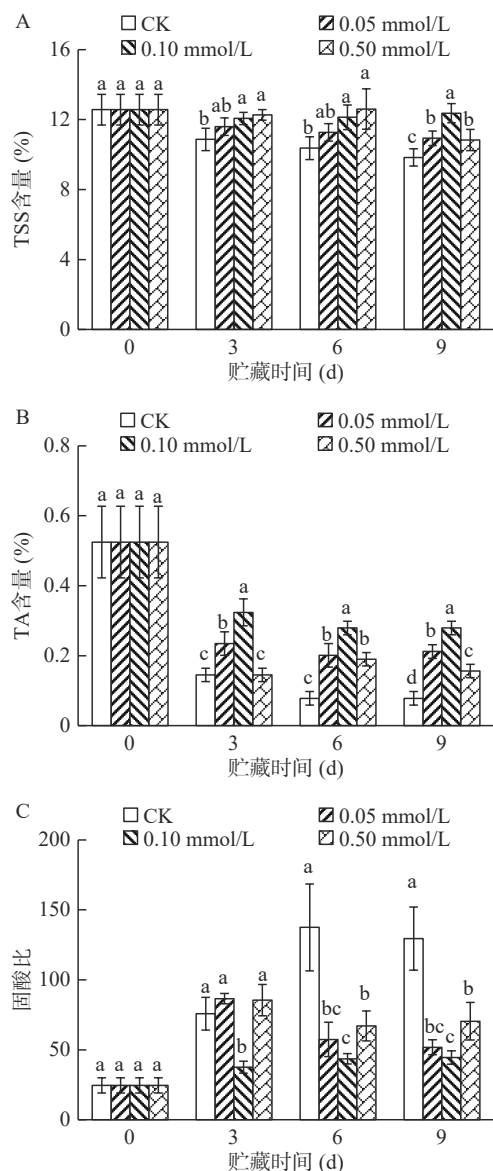


图4 不同浓度褪黑素处理对火龙果 TSS、TA 含量和固酸比的影响

Fig.4 Effects of melatonin (MT) treatments with different concentrations on contents of TSS, TA and sugar-acid ratio of pitaya fruit

蔬中的 TSS 主要以可溶性糖为主, 因此通过测定 TSS 含量可反映可溶性糖含量^[24]。CK 和 0.05 mmol/L MT 处理组的 TSS 含量在贮藏期间呈下降趋势 (图 4A), TSS 含量分别下降了 21.75% 和 13.00%。0.10 和 0.50 mmol/L MT 处理组的 TSS 含量在贮藏期显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 表明 MT 处理延缓了 TSS 的分解代谢, 保持了采后火龙果食用品质。

有机酸是酸味的主要呈味物质, 通过滴定果实中的 TA 含量能反映有机酸含量^[25]。所有处理组的 TA 含量在贮藏期间逐渐下降 (图 4B), 不同浓度 MT 处理组的 TA 含量下降速率明显低于 CK 组。0.05 和 0.10 mmol/L MT 处理组的 TA 含量在整个贮藏期间均显著高于 CK ($P<0.05$), 0.50 mmol/L MT 处理组在 6 d 和 9 d 时显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 表明 MT 处理维持了较高 TA 含量。0.05 和 0.50 mmol/L MT 处理组的固酸比除 3 d 时与 CK 无显著差异外, 其他时间点均显著低于 CK ($P<0.05$), 而 0.10 mmol/L MT 处理组的固酸比在整个贮藏期间均显著低于 CK ($P<0.05$) (图 4C)。MT 处理降低固酸比是因为

其抑制了 TA 分解, 使得 TA 含量保持在较高水平。在余甘子果实保鲜研究中也得到了相似结果, MT 处理显著提高了余甘子果实 TSS 和 TA 含量^[26], 降低固酸比。

2.5 褪黑素处理对火龙果活性氧清除能力的影响

ROS 自由基具有很强的氧化活性, 会伴随着衰老过程合成积累, 并对果蔬组织造成严重的氧化损伤, 加速果蔬衰老进程和腐烂变质^[27]。因此, 提高果蔬对 ROS 的清除能力是延缓采后果蔬腐烂变质的重要手段^[28]。在其他果蔬的保鲜研究中, 外源 MT 处理可能通过诱导抗氧化酶活性和提高内源抗氧化物含量增强对 ROS 的清除能力, 从而延缓果实品质劣变^[29]。鉴于 0.10 mmol/L 浓度的 MT 处理保鲜效果最好, 为此检测了该处理浓度对活性氧清除能力的影响。

如图 5 所示, 果实总抗氧化能力先增加后降低, CK 组在 3 d 时达到最高值, 而 MT 处理在 6 d 时达到最高值 (图 5A)。MT 处理组的总抗氧化能力显著高于 CK 组 ($P<0.05$), 在贮藏期间的 3、6 和 9 d 时

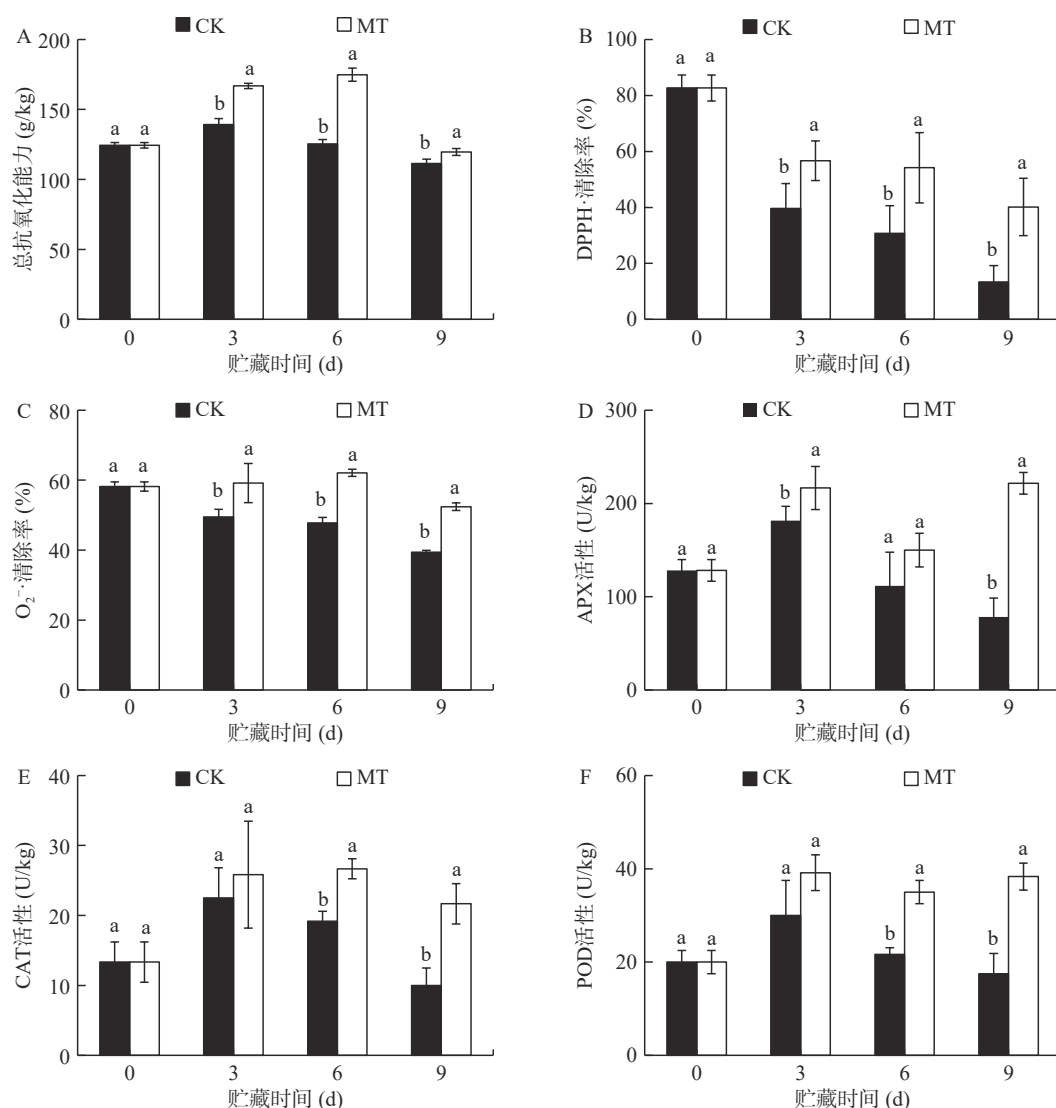


图 5 0.10 mmol/L 褪黑素处理对火龙果活性氧清除能力的影响

Fig.5 Effects of 0.10 mmol/L melatonin (MT) treatment on ROS scavenging capacity of pitaya fruit

分别比 CK 高 19.78%、39.46% 和 7.45%。随着贮藏时间的延长,火龙果果肉对 DPPH· 和 $O_2^{\cdot-}$ 的清除能力逐渐下降(图 5B~5C),这可能与火龙果自身的衰老有关。随着贮藏时间的延长,火龙果逐渐走向衰老,导致对自由基的清除能力变弱。其中,MT 处理组的 DPPH· 和 $O_2^{\cdot-}$ 清除能力下降速率明显低于 CK 组($P<0.05$)。在第 9 d 时 MT 处理组的 DPPH· 和 $O_2^{\cdot-}$ 清除活性分别是 CK 组的 3.00 倍和 1.33 倍,表明 MT 处理增强了火龙果的 ROS 清除能力。

贮藏期间 APX、CAT 和 POD 活性在前 3 d 有所增加,随后降低,但与 CK 组相比,MT 处理组的 APX 活性在 3 d 和 9 d 时显著提高($P<0.05$),CAT 和 POD 活性在 6 d 和 9 d 时显著提高($P<0.05$)(图 5D~5F),表明 MT 处理提高了 APX、CAT 和 POD 活性。MT 处理也能显著提高采后桃果实的超氧化物歧化酶、CAT、POD 和 APX 活性^[30]。表明适宜浓度的 MT 处理对采后果蔬抗氧化酶活性具有活化作用,高活性的抗氧化酶能及时清除火龙果贮藏期间产生的 ROS,从而降低 ROS 对采后火龙果造成的氧化损伤。MT 处理影响采后果蔬贮藏品质的作用机制十分复杂,0.05 mmol/L 和 0.50 mmol/L 浓度的 MT 处理对采后火龙果的保鲜效果有限,可能因为低剂量的 MT 处理未能有效激活抗氧化酶活性,而高剂量的 MT 处理对抗氧化酶活性有钝化效应,但仍需进一步研究确认。

3 结论

火龙果果实采后很容易腐烂变质,贮藏期很短。本研究表明,MT 处理能显著地减少火龙果采后贮藏期间的腐烂发生率,抑制采后火龙果鳞片的黄化,降低失重率,延缓 TSS 和 TA 含量下降,表明 MT 处理对采后火龙果具有较好的保鲜效果。相较于 0.05 mmol/L 和 0.50 mmol/L MT 处理组,0.10 mmol/L MT 处理的保鲜效果最好,表明 0.10 mmol/L 的 MT 可能是适合不同贮藏温度和不同品种火龙果的通用处理浓度。0.10 mmol/L MT 处理还能显著地提高 CAT、APX 和 POD 等清除自由基酶系的活性,提高火龙果的总抗氧化能力。进一步从生理层面确认了 0.10 mmol/L 浓度 MT 处理的可靠性,表明 MT 处理通过诱导抗氧化酶活性提高 ROS 清除能力,及时清除贮藏过程中产生的 ROS,减少 ROS 造成的氧化损伤,从而提高采后火龙果贮藏品质。

© The Author(s) 2024. 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] LI C, WANG S, WANG J Y, et al. Ozone treatment promotes physicochemical properties and antioxidant capacity of fresh-cut red pitaya based on phenolic metabolism[J]. *Frontiers in Nutrition*,

2022, 9: 1016607.

[2] VASEY C, MCBRIDE J, PENTA K. Circadian rhythm dysregulation and restoration: The role of melatonin[J]. *Nutrients*, 2021, 13(10): 3480.

[3] KHAN T A, FARIDUDDIN Q, NAZIR F, et al. Melatonin in business with abiotic stresses in plants[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2020, 26: 1931–1944.

[4] 宋聪慧,郭水欢,史小强,等.褪黑素调控果蔬采后保鲜研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(3): 228–236. [SONG C H, GUO S H, SHI X Q, et al. Research progress on the regulatory effect of melatonin on postharvest preservation of fruits and vegetables[J]. *Food Science*, 2023, 44(3): 228–236.]

[5] TAN X L, FAN Z Q, KUANG J F, et al. Melatonin delays leaf senescence of Chinese flowering cabbage by suppressing ABFs-mediated abscisic acid biosynthesis and chlorophyll degradation[J]. *Journal of Pineal Research*, 2019, 67(1): e12570.

[6] XIAO Y H, XIE J, WU C S, et al. Effects of melatonin treatment on browning alleviation of fresh-cut foods[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2021, 45(9): e13798.

[7] BA L J, CAO S, JI N, et al. Effects of melatonin treatment on maintenance of the quality of fresh-cut pitaya fruit[J]. *International Food Research Journal*, 2022, 29(4): 796–805.

[8] BA L, CAO S, JI N, et al. Exogenous melatonin treatment in the postharvest storage of pitaya fruits delays senescence and regulates reactive oxygen species metabolism[J]. *Food Science and Technology*, 2021, 42: 15221.

[9] 刘祯,陈贤柔,缪承杜,等.褪黑素在果蔬采后品质劣变中的调控作用[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(2): 146–153.

[LIU Z, CHEN X R, MIAO C D, et al. Regulation effects of melatonin on postharvest quality deterioration of fruits and vegetables[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2023, 14(2): 146–153.]

[10] ZHANG H F, PU J, LIU H, et al. Effects of L-cysteine and γ -aminobutyric acid treatment on postharvest quality and antioxidant activity of loquat fruit during storage[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2023, 24(13): 10541.

[11] 冯慧敏,朱云娜,谢景,等.紫色与绿色芥菜种质间色素差异及其相关品质评价[J]. *中国蔬菜*, 2023(9): 86–97. [FENG H M, ZHU Y N, XIE J, et al. Evaluation of pigments and related qualities between purple and green mustard germplasm[J]. *China Vegetables*, 2023(9): 86–97.]

[12] 曹秋艳,李海渤,冯慧敏,等.施用微生物菌肥对无花果鲜食品质和贮藏特性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(3): 807–813.

[CAO Q Y, LI H B, FENG H M, et al. Effect of applying microbial fertilizer on fresh-eating quality and storage characteristics of figs[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Science*, 2023, 39(3): 807–813.]

[13] WANG B, YUAN X, ZHU Y N, et al. Low-level cadmium exposure induced hormesis in peppermint young plant by constantly activating antioxidant activity based on physiological and transcriptomic analyses[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1088285.

[14] YUAN X, TANG B L, WANG Y K, et al. Inhibitory effects of peppermint extracts on the browning of cold-stored fresh-cut taro and the phenolic compounds in extracts[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2023, 7: 1191396.

[15] GAO C C, ZHANG Y, LI H M, et al. Fruit bagging reduces the postharvest decay and alters the diversity of fruit surface fungal community in 'Yali' pear[J]. *BMC Microbiology*, 2022, 22(1): 1–12.

[16] 张亚琳,展晓凤,马海娟,等.外源褪黑素调控活性氧代谢诱

- 导采后杏果实对黑斑病的抗性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 355–362. [ZHANG Y L, ZHAN X F, MA H J, et al. Melatonin regulates reactive oxygen species metabolism to induce resistance to black spot of postharvest apricot fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 355–362.]
- [17] 吴国欣, 林跃鑫, 欧敏锐. 复配植酸保鲜剂对荔枝果实的保鲜效果[J]. 食品工业科技, 2003, 24(9): 71–72. [WU G X, LIN Y X, OU M R. The preservation effect of compound phytic acid preservative on litchi fruit[J]. Science and Technology of Food Industry, 2003, 24(9): 71–72.]
- [18] SHEWFELT R L, ROSARIO D. The role of lipid peroxidation in storage disorders of fresh fruits and vegetables[J]. Hortscience, 2000, 35(4): 575–579.
- [19] SAUD S, JIANG Z Y, CHEN S Y, et al. Interaction of melatonin on post-harvest physiology and quality of horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae, 2023, 321: 112286.
- [20] MIRANDA S, VILCHES P, SUAZO M, et al. Melatonin triggers metabolic and gene expression changes leading to improved quality traits of two sweet cherry cultivars during cold storage[J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126360.
- [21] LIU C H, ZHENG H H, SHENG K L, et al. Effects of melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 139: 47–55.
- [22] ZHOU Z X, GAO H M, MING J H, et al. Combined transcriptome and metabolome analysis of pitaya fruit unveiled the mechanisms underlying peel and pulp color formation[J]. BMC Genomics, 2020, 21(1): 1–17.
- [23] LIU X, LIU D H, CHEN T, et al. Watercore pear fruit respiration changed and accumulated γ -aminobutyric acid (GABA) in response to inner hypoxia stress[J]. Genes (Basel), 2022, 13(6): 977.
- [24] 孙佩光, 程志号, 孙长君, 等. 火龙果果实发育过程中淀粉与可溶性糖含量变化及其相关性分析[J]. 中国果树, 2022(9): 51–54. [SUN P G, CHEN Z H, SUN C J, et al. Changes of starch and soluble sugar content and correlation analysis in pitaya fruit during its development[J]. China Fruits, 2022(9): 51–54.]
- [25] TSEGAY Z T. Total titratable acidity and organic acids of wines produced from cactus pear (*Opuntia-ficus-indica*) fruit and *Lantana camara* (*L. camara*) fruit blended fermentation process employed response surface optimization[J]. Food Science and Nutrition, 2020, 8(8): 4449–4462.
- [26] 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 X L, JIANG X, CHEN H B, 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.]
- [27] WEN M, LIN X, YU Y S, et al. Natamycin treatment reduces the quality changes of postharvest mulberry fruit during storage[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(8): e12934.
- [28] 王馨, 胡文忠, 陈晨, 等. 活性氧在果蔬采后成熟衰老过程中的作用及几种气体处理对其影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(5): 375–379. [WANG X, HU W Z, CHEN C, et al. The role of reactive oxygen in harvested fruits and vegetables during maturation and senescence and the influences which handled by several gas treatments[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(5): 375–379.]
- [29] MAGRI A, PETRICCIONE M. Melatonin treatment reduces qualitative decay and improves antioxidant system in highbush blueberry fruit during cold storage[J]. Journal of Science and Food Agriculture, 2022, 102(10): 4229–4237.
- [30] GAO H, ZHANG Z K, CHAI H K, et al. Melatonin treatment delays postharvest senescence and regulates reactive oxygen species metabolism in peach fruit[J]. Postharvest Biology and Technology, 2016, 118: 103–110.