网络出版时间:2025-07-18 DOI:10.13207/j.jnwafu.2026.01.006

褪黑素对枇杷果实贮藏品质的影响

周甲云[1],谭碧其[1],王羊[2],原贞超[1],汤开晶[3],
郑世玉[3],李红章[4],邓群仙[1]

(1 四川农业大学 园艺学院,四川 成都 611130;2 成都农业职业科技学院 农学园艺学院,四川 成都 611130;
3 石棉县农业农村局,四川 雅安 625000;4 仁寿县农业农村局经济作物站,四川 眉山 620599)

[摘 要] 【目的】探究外源褪黑素对枇杷果实低温贮藏期间及货架期品质的影响,以期筛选出适宜的褪黑素浓度,为枇杷果实贮藏保鲜提供参考。【方法】以'大五星'枇杷成熟果实为试验材料,分别用 0(蒸馏水,对照),50,100,150 和 200 μmol/L 褪黑素浸果 1 h,4 ℃贮藏 30 d 后再转至 20 ℃贮藏 3 d,测定果实腐烂率、失重率、硬度、内聚性及可溶性固形物(TSS)、可溶性糖、可滴定酸(TA)、类胡萝卜素、总酚、丙二醛(MDA)、木质素含量,冷害指数、相对电导率,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)、肉桂酸脱氢酶(CAD)、过氧化物酶(POD)活性,分析果实生理与相关品质指标的变化。【结果】褪黑素处理可降低枇杷贮藏期间果实的失重率、腐烂率及硬度,维持其内聚性;100 μmol/L 褪黑素处理的果实在低温贮藏至 30 d,果实可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、总酚和类胡萝卜素含量较对照分别提高了 6.9%,19.1%,41.9%,69.9%和 38.5%,转至货架期(贮藏 33 d)时较对照分别提高了 10.4%,39.0%,95.3%,73.8%和 41.3%。褪黑素处理降低了果实贮藏期间冷害指数、相对电导率和 MDA 含量,维持了 SOD、CAT 和 APX 活性;与对照相比,低温贮藏至 30 d 时,100 μmol/L 褪黑素处理后果实的相对电导率和 MDA 含量降幅最大,分别为 15.1%和 17.3%;SOD 和 CAT 活性在贮藏期间先升高后降低,贮藏 30 和 33 d 时,褪黑素处理果实 SOD、CAT 和 APX 活性较对照显著提高,其中 100 μmol/L 处理的增幅最大。褪黑素通过抑制枇杷果实贮藏中后期的 PAL、CAD 和 POD 活性,降低了果实木质素含量,其中 100 μmol/L 褪黑素处理果实在低温贮藏末期和货架期木质素含量显著低于对照。【结论】褪黑素浸果处理可有效维持枇杷果实在贮藏期间的外观品质、生理特性和营养品质,以 100 μmol/L 处理效果最佳。

[关键词] 褪黑素;枇杷果实;贮藏品质;低温贮藏期;货架期
[中图分类号] S667.309+.3 [文献标志码] A [文章编号] 1671-9387(2026)01-0057-09

Effects of melatonin on the quality of loquat fruit during storage

ZHOU Jiayun[1], TAN Biqi[1], WANG Yang[2], YUAN Zhenchao[1], TANG Kaijing[3],
ZHENG Shiyu[3], LI Hongzhang[4], DENG Qunxian[1]

(1 *College of Horticulture, Sichuan Agricultural University, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 2 *College of Agronomy and Horticulture, Chengdu Agricultural College, Chengdu, Sichuan* 611130, *China*; 3 *Shimian County Agriculture and Rural Bureau, Yaan, Sichuan* 625000, *China*; 4 *Renshou County Agriculture and Rural Bureau Cash Crop Station, Meishan, Sichuan* 620599, *China*)

Abstract: 【Objective】 This research aimed to explore the effects of exogenous melatonin on the quality of 'Dawuxing' loquat fruits during low temperature storage and shelf life, in order to screen out the appropriate melatonin concentration, to provide reference for the storage of loquat fruits. 【Method】 Loquat fruits were soaked in 0 (distilled water, CK), 50, 100, 150, and 200 μmol/L melatonin for 1 h, and stored at 4 ℃

[收稿日期] 2024-08-27 [修回日期] 2024-10-10
[基金项目] 四川省科技支撑计划"十四五"育种攻关项目(2021YFYZ0023-07);国家现代化农业产业技术体系四川水果创新团队项目(SCCXTD-2024-04)
[作者简介] 周甲云(2002—),男,甘肃平凉人,在读硕士,主要从事园艺植物栽培研究。E-mail:209342488@qq.com
[通信作者] 邓群仙(1968—),女,四川资中人,教授,博士,主要从事果树栽培理论与技术研究。E-mail:dqxlwj@sina.com.cn

for 30 days and then at 20 ℃ for 3 days. The fruit decay rate, weight loss rate, hardness, cohesion, soluble solid (TSS) content, soluble sugar content, titrable acid (TA) content, carotenoid content, total phenol content, malondialdehyde (MDA) content, lignin content, cold damage index, relative conductivity, and activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), ascorbate peroxidase (APX), phenylalanine ammonlyase (PAL), cinnamate dehydrogenase (CAD), and peroxidase (POD) were determined to analyze the physiological changes and changes of related quality indexes. 【Result】 Melatonin treatment can reduce the weight loss rate, decay rate and hardness of loquat fruits during storage, and maintain their cohesion. The contents of soluble solid matter, soluble sugar, titrable acid, total phenol and carotenoid in fruits treated with 100 μmol/L melatonin were increased by 6.9%, 19.1%, 41.9%, 69.9% and 38.5%, respectively, compared with the control when stored at low temperature for 30 days, and were increased by 10.4%, 39.0%, 95.3%, 73.8% and 41.3%, respectively, compared with the control when the fruits were transferred to shelf (stored for 33 days). Melatonin treatment decreased the chilling damage index, relative conductivity and malondialdehyde (MDA) content of fruit during storage, and maintained the activities of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX). Compared with the control, the relative conductivity and MDA content of fruits treated with 100 μmol/L melatonin showed the largest decrease after low temperature storage for 30 days, with reductions of 15.1% and 17.3%, respectively. SOD and CAT activities first increased and then decreased during storage. SOD, CAT and APX activities of fruit treated with melatonin were significantly higher than those of control at 30 d and 33 d of storage, with the largest increase observed in treatment of 100 μmol/L melatonin. Melatonin inhibited the activities of phenylalanine ammoniase (PAL), cinnamate dehydrogenase (CAD) and peroxidase (POD) in loquat fruits in the middle and later stages of storage, and the lignin content in fruits treated with 100 μmol/L melatonin was significantly lower than that in the control at the end of low temperature storage and shelf life. 【Conclusion】 Melatonin soaking can effectively maintain the appearance quality, physiological characteristics and nutritional quality of loquat fruit during storage, and 100 μmol/L melatonin has the best effect.

Key words: melatonin; loquat fruit; storage quality; low temperature storage period; shelf life

枇杷(*Eriobotrya japonica* Lindl.)是起源于四川大渡河流域的特色果树,其因味美且富含营养物质而具有极高的经济价值,备受种植户与消费者青睐[1]。枇杷成熟于高温多雨的初夏,采后在常温环境下极易失水皱缩、变质腐烂,难以长期贮运,这极大地损害了种植户经济效益[2]。低温贮藏作为延缓枇杷采后品质下降的有效手段,被广泛应用[3],然而低温贮藏枇杷果实易发生冷害,出现果皮皱缩、果肉木质素含量增加、硬度增大和风味减弱等现象,严重降低果实品质与商业价值[4]。为减轻采后枇杷果实的冷害和延长贮藏时间,人们常用1-甲基环丙烯(1-MCP)熏蒸、壳聚糖涂膜和苯并噻重氮溶液浸果等方法处理果实[5-7],但因安全性、性价比以及枇杷品种差异,这些方法的保鲜效果并不理想[8],因此寻找安全有效的延缓枇杷低温贮藏和货架期品质下降的方法具有重要的现实意义。

褪黑素(melatonin,MT)化学名为N-乙酰基-5-甲氧基色胺,是与生长素功能相似的多功能信号分子和天然植物激素,现已被广泛应用于采后贮藏保鲜[9]。已有研究证实,0.1 mmol/L 褪黑素处理可激发梨果实防御酶和病程相关蛋白基因的表达,显著提高梨果实贮藏品质[10];0.5 mmol/L 褪黑素处理可以显著维持草莓果实超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶的活性,减少腐烂发生率[11];50 μmol/L 褪黑素处理可以降低采后荔枝果实的褐变指数[12]。不同浓度褪黑素处理对多种果实的贮藏保鲜有显著效果。然而,关于褪黑素对枇杷果实低温贮藏及货架期品质和冷害影响的相关报道较少。为此,本试验以川渝主栽枇杷品种'大五星'成熟果实为试材,采用不同浓度褪黑素溶液浸果,探究外源褪黑素对枇杷果实低温贮藏及转至货架期常温环境中的果实品质和生理特性的影响,以期筛选出适宜的褪黑素浓度,为枇杷果实贮藏保鲜提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验材料

在四川省雅安市石棉县丰乐乡（海拔约 900 m，北纬 29°18′55″，东经 102°32′17″）采摘商品成熟、大小一致、无病虫害无机械损伤的‘大五星’枇杷果实（果实充分着色，果皮果肉均呈橙黄色，可溶性固形物含量≥10 g/hg）作为贮藏样本。采摘当天将果实置于气候培养箱中 10 ℃预冷 12 h，备用。

1.2　试验设计

枇杷果实预冷结束后，随机选用 30 个作为贮藏 0 d 的样品，其余果实随机分成 5 组。每组样本分别用 0（清水，对照（CK）），50，100，150 和 200 μmol/L 的褪黑素溶液避光浸果 1 h，70 个果实作为 1 个重复，每处理重复 3 次。果实自然晾干后装入聚乙烯自封保鲜袋（中部双面各剪两个直径 2 cm 圆孔），随后转移到（4±1）℃、相对湿度 90%～95%的气候培养箱中贮藏 30 d，随后将贮藏温度调至常温 20 ℃（模拟货架期环境条件）再贮藏 3 d。冷藏期间每隔 6 d、常温贮藏第 3 天（即果实贮藏至 33 d）各取 10 个果实测定果实贮藏生理与品质相关指标，重复 3 次。

1.3　指标测定

1.3.1　*果实感官品质的测定*　腐烂率参照郑永华等[13]的方法测定，以腐烂面＞10%计为腐烂，腐烂率＝腐烂果实数/调查果实数×100%。失重率＝（贮藏前质量－贮藏后质量）/贮藏前质量×100%。使用 TMS-PILOT 质构仪（美国 FTC）测定果实硬度和内聚性，采用 P/100 柱头对仪器进行 TPA 测试，测前速度 10 mm/min，测试速度 6 mm/min，测后上行速度 10 mm/min，由质地特征曲线得到枇杷果实硬度和内聚性参数[14]。

1.3.2　*果实内在品质的测定*　参照熊庆娥[15]的方法，采用手持折光仪测定果实可溶性固形物的含量，采用蒽酮乙酸乙酯法测定可溶性糖含量，采用氢氧化钠滴定法测定可滴定酸含量，类胡萝卜素含量采用分光光度法测定（丙酮浸提）。用 Folin-Ciocalteu 方法测定总酚含量[16]。糖酸比＝可溶性糖含量/可滴定酸含量。

1.3.3　*果实冷害及抗氧化相关指标的测定*　参考张四奇[17]的方法进行冷害级别调查，计算冷害指数：冷害指数＝Σ（冷害级别×该级别果数）/（4×总果数）。参照熊庆娥[15]的方法测定相对电导率（relative electrical conductivity，REC）、丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量及超氧化物歧化酶（superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（catalase，CAT）和抗坏血酸过氧化物酶（ascorbate peroxidase，APX）活性，其中 MDA 含量采用硫代巴比妥酸法测定，SOD 活性采用氮蓝四唑光还原法测定，CAT 活性采用紫外吸收法（波长 240 nm）测定，抗坏血酸氧化物酶（APX）活性采用分光光度法（波长 290 nm）测定。

1.3.4　*果实木质素及其关键合成酶活性的测定*　果实木质素的提取及含量测定参考陈发河等[18]的方法进行。参照曹建康等[19]的方法测定苯丙氨酸解氨酶（phenylalanine aminolyase，PAL）活性，参照张春红等[20]的方法测定肉桂酸脱氢酶（cinnamate dehydrogenase，CAD）活性，采用愈创木酚法[19]测定过氧化物酶（peroxidase，POD）活性。

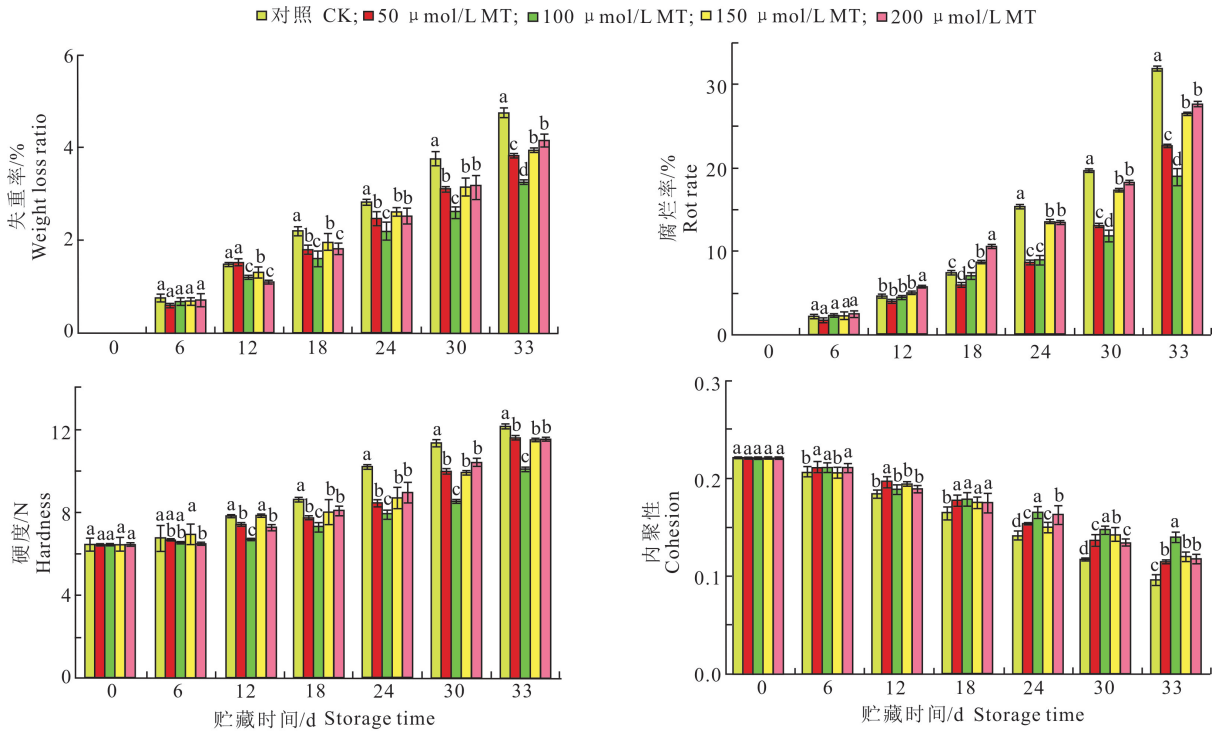
1.4　数据处理

试验数据用 Microsoft Excel 进行整理和作图，采用 SPSS 16.0 进行统计学分析。

2　结果与分析

2.1　褪黑素对枇杷果实贮藏期间感官品质的影响

褪黑素浸果处理可显著抑制枇杷果实贮藏期水分丢失，降低果实失重率、腐烂率和硬度，并维持内聚性（图 1）。50～200 μmol/L 褪黑素处理的枇杷果实失重率从低温贮藏 18 d 开始至货架储存期均显著低于对照；在贮藏温度调至模拟货架期 20 ℃的第 3 天（即贮藏 33 d），100 μmol/L 褪黑素处理果实失重率较对照显著降低了 31.9%。随着贮藏时间的延长，果实腐烂率逐渐增加，货架期腐烂率增加更为明显；在冷藏 24～30 d 外，不同浓度褪黑素处理果实腐烂率均显著低于对照，冷藏 30 d 时 50，100，150 和 200 μmol/L 褪黑素处理果实腐烂率较对照分别降低了 33.5%，39.6%，12.5%和 6.9%。随着贮藏时间的延长，枇杷果实硬度逐渐上升，内聚性逐渐减小，而不同浓度的褪黑素浸果处理可以显著延缓果实变硬的进程，增加其内聚性；贮藏 18～33 d，50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的内聚性均显著高于对照；贮藏 24～33 d，100 μmol/L 褪黑素处理果实的内聚性均显著高于其他处理；模拟货架期第 3 天（贮藏 33 d）100 μmol/L 褪黑素处理果实内聚性较对照显著提高了 35.4%，果实硬度显著降低了 16.7%。



图柱上标不同小写字母表示同一时间不同处理间差异显著($P<0.05$),下图同。

Different lowercase letters on the bar indicate significant differences($P<0.05$) between different treatments at the same time. The same below.

图 1 不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实失重率、腐烂率、内聚性和硬度的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of melatonin(MT) on weight loss rate, decay rate, cohesion and hardness of loquat fruits in storage

2.2 褪黑素对采后枇杷果实内在品质的影响

不同浓度褪黑素(MT)对贮藏期间枇杷果实内在品质的影响如图 2 所示。

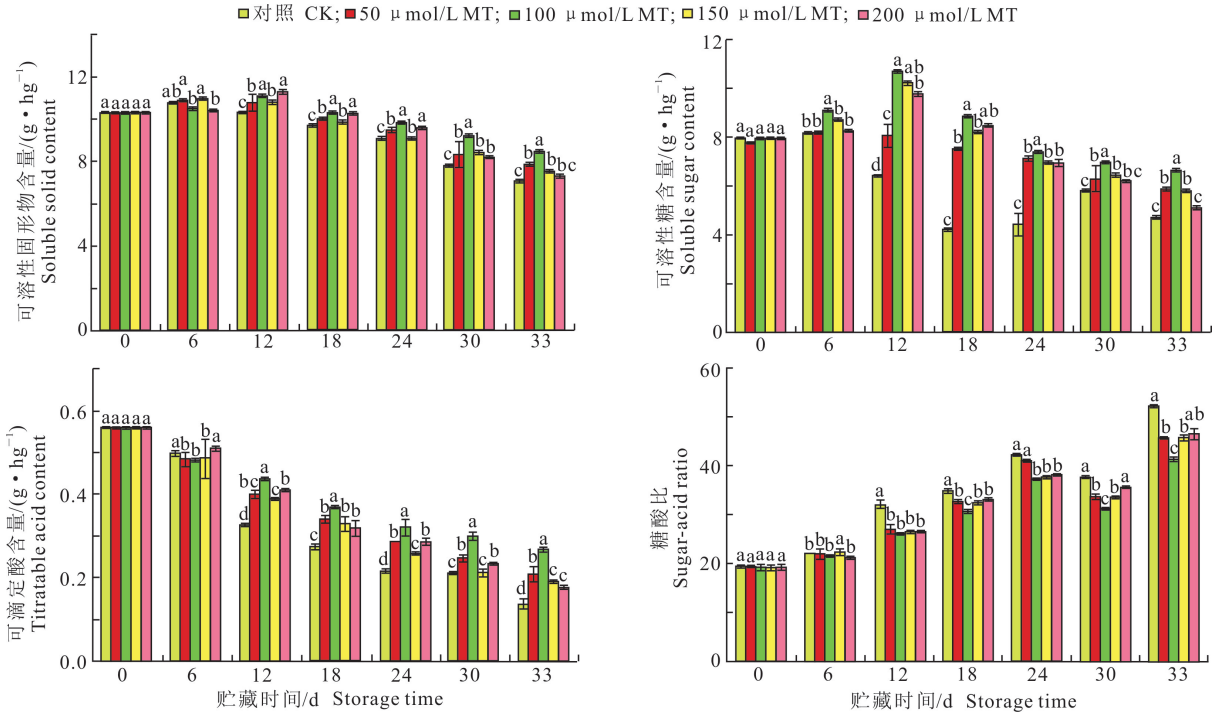


图 2 不同浓度褪黑素(MT)对贮藏期间枇杷果实内在品质的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of melatonin(MT) on the intrinsic quality of loquat fruit during storage

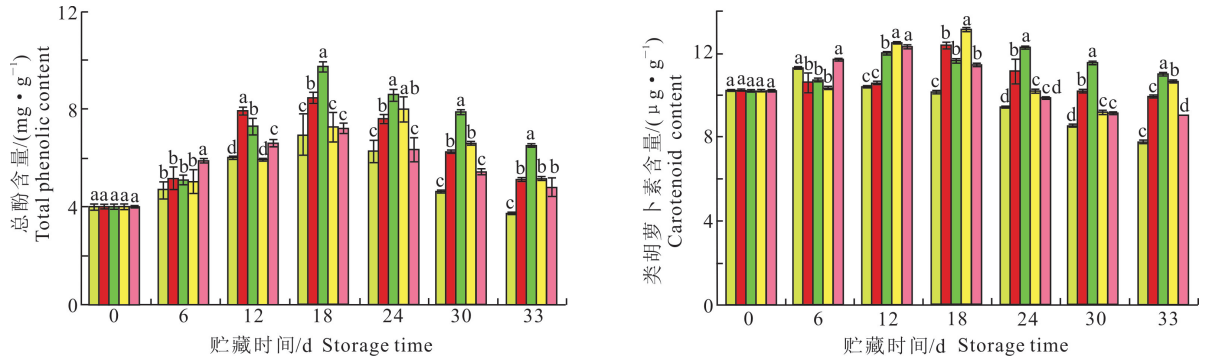


图 2　不同浓度褪黑素(MT)对贮藏期间枇杷果实内在品质的影响(续)

Fig. 2　Effects of different concentrations of melatonin(MT) on the intrinsic quality of loquat fruit during storage(continued)

由图 2 可以看出，随着采后贮藏时间的延长，对照果实可溶性糖、可滴定酸、类胡萝卜素及酚类物质逐渐被降解，内在品质降低，褪黑素处理可延缓枇杷果实品质下降。贮藏 6～12 d 内果实可溶性固形物和可溶性糖含量分别略有增加，随后逐渐降低；贮藏 12～33 d 内 50，100，150 和 200 μmol/L 褪黑素处理果实的可溶性糖含量均高于对照，其中 33 d 时的可溶性糖含量较其对照分别提高了 19.2%，39.0%，22.4%和 8.2%。果实可滴定酸含量在贮藏一周内缓慢下降，之后快速下降，从而导致果实糖酸比整体呈上升趋势；低温贮藏 30 d 时，对照果实可滴定酸含量仅为贮藏前的 23.2%。褪黑素处理可显著抑制低温贮藏期间枇杷果实类胡萝卜素和总酚的降解，使其含量维持在较高的水平，贮藏 12～33 d 内 50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的总酚含量大多显著高于对照，贮藏 30 d 时各处理果实总酚含量较对照分别提高了 19.7%，38.5%，8.2%和 7.9%，贮藏 33 d 时较对照分别提高了 27.5%，41.3%，37.1%和 16.8%；贮藏 18～33 d，50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的类胡萝卜素含量大多显著高于对照，其中 33 d 时各处理果实类胡萝卜素含量较对照分别提高了 38.4%，75.9%，38.3%和 34.2%。

2.3　褪黑素对采后枇杷果实冷害指数和抗氧化系统的影响

不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实冷害指数和抗氧化系统的影响如图 3 所示。

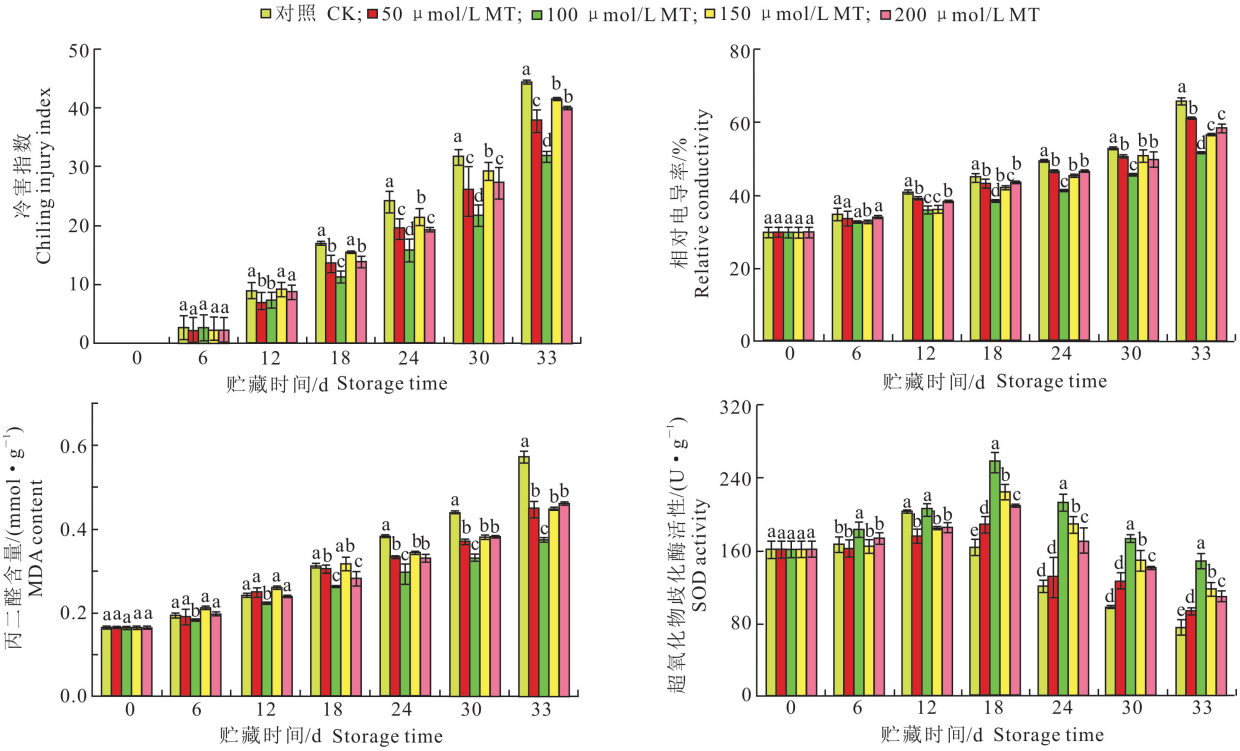


图 3　不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实冷害指数和抗氧化系统的影响

Fig. 3　Effects of different concentrations of melatonin(MT) on chilling damage index and antioxidant system of loquat fruits in storage

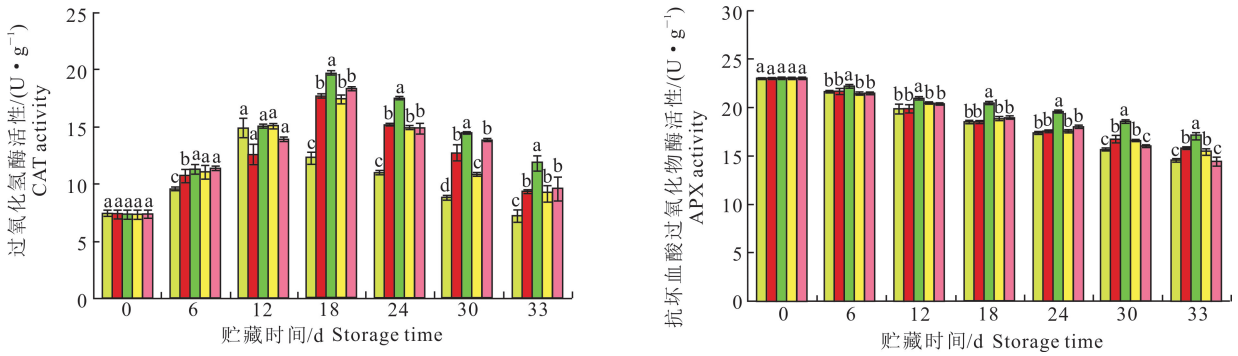


图 3 不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实冷害指数和抗氧化系统的影响(续)

Fig. 3 Effects of different concentrations of melatonin(MT) on chilling damage index and antioxidant system of loquat fruits in storage (continued)

由图 3 可知,低温和模拟货架期贮藏期间,褪黑素处理有效缓解了枇杷果实冷害指数、相对电导率和丙二醛含量的上升趋势,减轻低温及急剧变温至货架期对枇杷果实细胞膜的伤害,同时提高果实抗氧化酶的活性。贮藏 18～33 d,50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的冷害指数、相对电导率和 MDA 含量均显著低于对照。冷藏 30 d 时 50,100,150 和 200 μmol/L 褪黑素处理果实的冷害指数较对照分别降低了 17.1%,31.1%,7.1%和 13.6%,相对电导率较对照分别降低了 5.8%,15.1%,3.8%和 3.9%,MDA 含量较对照分别降低了 15.9%,17.3%,13.7%和 13.5%;贮藏温度升高至 20 ℃的第 3 天(即贮藏 33 d),50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的冷害指数和 MDA 含量较对照分别降低了 7.3%～27.8%和 21.1%～35.1%。枇杷果实 SOD 和 CAT 活性均呈现先上升后下降的变化趋势(在冷藏 18 d 达到峰值),APX 活性呈下降趋势;贮藏 18～33 d,50～200 μmol/L 褪黑素处理果实 SOD 和 CAT 活性均显著高于对照,贮藏 30～33 d 时 APX 活性均显著高于对照。整个贮藏期间,100 μmol/L 褪黑素处理果实的冷害指数、相对电导率和 MDA 含量均最低,而 SOD、CAT 和 APX 活性均最高。

2.4 褪黑素对枇杷果实木质素含量及其关键合成酶活性的影响

不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实木质素含量及其关键合成酶活性的影响如图 4 所示。

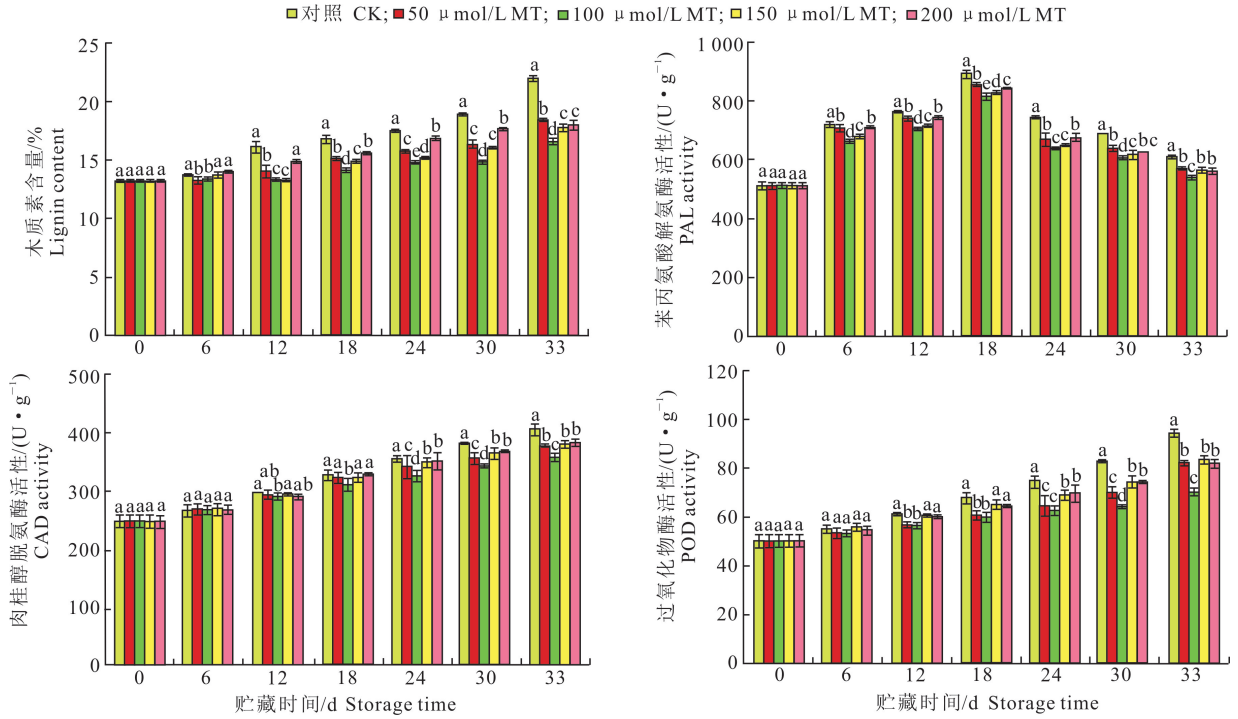


图 4 不同浓度褪黑素(MT)对贮藏枇杷果实木质素含量及其关键合成酶活性的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of melatonin(MT) on lignin content and key synthase activities of loquat fruits in storage

由图 4 可知，随贮藏时间的延长，枇杷果实木质素含量增加，木质素合成关键酶 CAD 和 POD 活性增强；PAL 活性呈先升高后降低的变化趋势，在冷藏 18 d 时活性最强；而褪黑素处理可有效延缓枇杷果实的木质化。褪黑素处理可有效降低枇杷果实贮藏期间木质素合成关键酶 PAL、CAD 和 POD 活性，减少果实木质素的合成。贮藏 12～33 d，对照处理果实的木质素含量均显著高于褪黑素处理；贮藏 30 和 33 d，50～200 μmol/L 褪黑素处理果实木质素含量较对照分别降低了 6.4%～21.3%和 16.4%～25.5%。50～200 μmol/L 褪黑素处理果实的 PAL 活性在整个贮藏期间均显著低于对照，冷藏至 30 d 时果实 PAL 活性比对照低 2.5%～13.5%。整个贮藏期间，50～200 μmol/L 褪黑素处理果实 CAD 和 POD 活性上升速率明显慢于对照，并在贮藏后期(贮藏 24～33 d)酶活性显著低于对照。冷藏 30 d，50～200 μmol/L 褪黑素处理果实 CAD 和 POD 活性较对照分别降低了 4.1%～10.6%和 9.5%～21.6%。整个贮藏期间，100 μmol/L 褪黑素处理果实的木质素含量及木质素合成关键酶 PAL、CAD 和 POD 活性均最低。

3　讨　论

枇杷果实的水分含量很高，采后代谢活跃，衰老快，品质劣变迅速且严重，采取有效措施延缓枇杷果实贮藏寿命是生产中急需解决的问题。本试验中，褪黑素处理显著抑制了采后枇杷果实的腐烂率，延缓了果实失重，这与前人在甜樱桃[21]、草莓[22]、香蕉[23]和梨[24]上的研究结果一致。内聚性表示果实抵抗牙齿咀嚼所表现出来的内部收缩力，反映了果实细胞间结合力的大小[25]，内聚性降低说明细胞间结合力变小，果肉组织疏松，口感变差。本研究发现，褪黑素浸果处理延缓了贮藏期间枇杷果实内聚性的下降和硬度的增加，可以有效维持细胞间结合力，保持较佳口感，与前人在枸杞上的研究结果类似[26]。表明褪黑素处理能有效维持枇杷果实贮藏期间的感官品质。

枇杷果实采后仍然是活的有机体，果实进行新陈代谢而不断消耗组织内部的营养成分，随着贮藏时间的延长，品质不断降低[3]。可溶性固形物、可溶性糖与可滴定酸的含量与枇杷果实风味密切相关。有研究证实，褪黑素处理能提高番茄果实可溶性固形物和可滴定酸含量[27]，本研究中，50～200 μmol/L 褪黑素处理均可以有效延缓枇杷果实可溶性固形物、可溶性糖和可滴定酸的降解，稳定果实糖酸比在适宜的范围，以 100 μmol/L 处理效果最佳，结果与前人对甜樱桃的研究结果[21]一致。类胡萝卜素和酚类化合物是植物体内最重要且分布最广泛的功能活性物质之一，具有抗氧化活性，对植物的品质、颜色和风味有影响[28]。本试验低温贮藏期间，枇杷果实类胡萝卜素和总酚含量均表现为先上升后下降的趋势，褪黑素处理果实中 2 种物质的含量仍然维持在较高水平，这可能与自由基激活非酶促防御系统有关。

冷害是植物活体在 0 ℃以上环境条件下所遭受的低温伤害，是一种因低温而导致的代谢失调和生理病害，是造成冷敏感果实低温贮藏损失最严重的因素[29]。枇杷作为冷敏感型水果，在细胞膜受到损伤、通透性增大时，膜脂同时会发生过氧化生成丙二醛，其含量高低与植物的衰老及受伤害的程度呈正相关[30]。本研究中，贮藏期 4 ℃的低温以及后期模拟货架期温度调高至常温(20 ℃)，温度急剧变化对枇杷果实的细胞结构产生了破坏作用，引起细胞膜损伤和膜脂氧化，细胞膜通透性增大，导致电解质外渗。褪黑素处理降低了低温贮藏期间和货架期枇杷果实相对电导率的增大幅度，有效减轻了低温和急剧温度变化对细胞膜的破坏，维持细胞膜正常的结构和功能，延缓 APX 活性的下降，提高 CAT 和 SOD 活性。有研究发现，在低温贮藏环境下，褪黑素处理能诱导荔枝 SOD 和 CAT 活性升高，增强活性氧清除能力，降低活性氧自由基对组织细胞的损伤，提高荔枝的抗氧化能力，进而保持果实的贮藏品质[31]。

低温环境下枇杷果肉木质化是一种冷害现象，木质化是果实硬度增加的主要原因之一。苯丙氨酸解氨酶(PAL)是催化苯丙烷类代谢第一步反应的酶，是木质素合成的关键酶之一；羟基肉桂酸脱氢酶(CAD)可以催化香豆醛转变为香豆，从而合成木质素前体；过氧化物酶(POD)既是活性氧清除系统的重要酶类，又是木质素合成最后一步的关键酶，可催化 3 种肉桂醇脱氢聚合形成最终的木质素[13]。已有研究表明，外源褪黑素可能参与 NAC 和 MYB 转录因子依赖的木质素合成和沉积相关的转录调控而调控高节竹笋的木质化过程，还可以通过调节 PAL 和 POD 活性降低绿芦笋木质素含量，延迟竹笋硬度的增加[32-33]。本研究表明，4 ℃低温贮藏期间至 20 ℃货架期贮藏，枇杷果实木质素含量不断增加，PAL 活性呈先升高后降低趋势，CAD、POD 活性和木质

素含量变化趋势一致,推测 PAL 在木质素合成和保护细胞中同样发挥作用;100 μmol/L 褪黑素处理可以抑制低温及温度骤变导致的枇杷果实木质素合成关键酶活性增强,延缓果实木质化,维持枇杷果实采后贮藏的食用品质。

4 结 论

褪黑素浸果处理能够抑制枇杷果实贮藏期间失重率、腐烂率和硬度的增加,有效保持果实可溶性固形物、可溶性糖、可滴定酸、总酚、类胡萝卜素含量及糖酸比,降低果实冷害指数、相对电导率、丙二醛含量和木质素含量,维持抗氧化系统相关酶活性以及降低木质素合成相关酶活性,延缓低温贮藏期间和货架期枇杷果实品质的下降,减少冷害的影响。褪黑素处理最佳作用浓度为 100 μmol/L。

[参考文献]

[1] 罗吉庆,张永杰,江丽慧,等. 枇杷营养价值和功能价值的应用研究[J]. 农产品加工,2021(4):83-87.
LUO J Q,ZHANG Y J,JIANG L H,et al. Application of nutritional and functional value of *Eriobotrya japonica*[J]. Farm Products Processing,2021(4):83-87.

[2] 温新宇,孙卫红,熊书剑. 枇杷果实的保鲜技术及现状研究[J]. 北方园艺,2015(21):197-201.
WEN X Y,SUN W H,XIONG S J. Research on preservation techniques and status of loquat fruit[J]. Northern Horticulture,2015(21):197-201.

[3] 余江平. 枇杷成熟过程中生理生化变化及采后保鲜研究概述[J]. 中国果业信息,2023,40(11):70-72.
YU J P. Review on physiological and biochemical changes and postharvest preservation of loquat during maturation[J]. China Fruit News,2023,40(11):70-72.

[4] LIN S K,WU T,LIN H L,et al. *De novo* analysis reveals transcriptomic responses in *Eriobotrya japonica* fruits during postharvest cold storage[J]. Genes,2018,9(12):639.

[5] CAO S F,ZHENG Y H,WANG K T,et al. The effects of 1-methylcyclopropene on chilling and cell wall metabolism in loquat fruit[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology,2010,85(2):147-153.

[6] MÁRQUEZ C J,CARTAGENA V J R,PÉREZ-GAGO M B. Effect of edible coatings on Japanese loquat(*Eriobotrya japonica* t.) postharvest quality[J]. Vitae,2009,16(3):304-310.

[7] 张紫微,朱世江. 苯并噻重氮对采后枇杷果实病害及品质的影响[J]. 食品科学,2009,30(6):264-267.
ZHANG Z W,ZHU S J. Effects of benzothiadiazole on diseases and quality of postharvest loquat fruit[J]. Food Science,2009,30(6):264-267.

[8] 许晶冰,蔡灵利. 枇杷采后贮藏保鲜方法的现状研究[J]. 现代食品,2017,23(4):23-25.
XU J B,CAI L L. The post-harvest preservation method of loquat[J]. Modern Food,2017,23(4):23-25.

[9] 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.

[10] 向妙莲,吴帆,李树成,等. 外源褪黑素调控活性氧代谢诱导梨果实抗采后黑斑病[J]. 园艺学报,2022,49(5):1102-1110.
XIANG M L,WU F,LI S C,et al. Exogenous melatonin regulates reactive oxygen metabolism to induce resistance of postharvest pear fruit to black spot[J]. Acta Horticulturae Sinica,2022,49(5):1102-1110.

[11] 李春平. 褪黑素处理对草莓果实采后品质的影响[J]. 分子植物育种,2020,18(21):7203-7208.
LI C P. Effect of melatonin treatment on postharvest quality of strawberry fruit[J]. Molecular Plant Breeding,2020,18(21):7203-7208.

[12] 乔沛,殷菲胧,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 P,YIN F L,WANG Y X,et al. Effects of exogenous melatonin on browning and active oxygen metabolism of postharvest *Litchi*[J]. Science and Technology of Food Industry,2021,42(6):282-287.

[13] 郑永华,李三玉,席玮芳. 枇杷冷藏过程中果肉木质化与细胞壁物质变化的关系[J]. 植物生理学报,2000,26(4):306-310.
ZHENG Y H,LI S Y,XI Y F. Changes of cell wall substances in relation to flesh woodiness in cold stored loquat fruits[J]. Acta Phytophysiologica Sinica,2000,26(4):306-310.

[14] 高丕生,张平,朱志强. TPA 测试法分析不同保鲜剂对'克瑞森'无核葡萄质地的影响[J]. 果树学报,2013,30(1):153-158.
GAO P S,ZHANG P,ZHU Z Q. Effects of different preservatives on texture of 'Crimson' seedless grape by using texture profile analysis test[J]. Journal of Fruit Science,2013,30(1):153-158.

[15] 熊庆娥. 植物生理学实验教程[M]. 成都:四川科学技术出版社,2003.
XIONG Q E. Plant physiology[M]. Chengdu:Sichuan Scientific & Technical Publishers,2003.

[16] 徐辉艳,孙晓东,张佩君,等. 红枣汁中总酚含量的福林法测定[J]. 食品研究与开发,2009,30(3):126-128.
XU H Y,SUN X D,ZHANG P J,et al. Determination of total polyphenols of Chinese jujube juice by folin-ciocaileu method[J]. Food Research and Development,2009,30(3):126-128.

[17] 张四奇. 枇杷果实低温冷害机理及热处理对减轻冷害效应的研究[D]. 福建厦门:集美大学,2007.
ZHANG S Q. Study on the mechanism of chilling injury of loquat fruit at low temperature and the effect of heat treatment on reducing chilling injury[D]. Xiamen,Fujian:Jimei University,2007.

[18] 陈发河,张美姿,吴光斌. NO 处理延缓采后枇杷果实木质化劣变及其与能量代谢的关系[J]. 中国农业科学,2014,47

(12)：2425-2434.
CHEN F H，ZHANG M Z，WU G B. Study of lignification's delaying and its relationship with energy metabolism in loquat fruits after nitric oxide fumigation[J]. Scientia Agricultura Sinica，2014，47(12)：2425-2434.

[19] 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，2007：81-132.
CAO J K，JIANG W B，ZHAO Y M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing：China Light Industry Press，2007：81-132.

[20] 张春红，熊振豪，吴文龙，等. 黑莓果实发育成熟期木质素合成CAD酶及其基因表达[J]. 南京林业大学学报(自然科学版)，2019，43(1)：145-152.
ZHANG C H，XIONG Z H，WU W L，et al. CAD enzyme activity and gene expression in connection with lignin synthesis during fruit development and ripening process of blackberry[J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition)，2019，43(1)：145-152.

[21] WANG F，ZHANG X P，YANG Q Z，et al. Exogenous melatonin delays postharvest fruit senescence and maintains the quality of sweet cherries[J]. Food Chemistry，2019，301：125311.

[22] 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 H H，GU L J，LI M L，et al. Effect of postharvest melatonin treatment on quality and reactive oxygen species metabolism in strawberry[J]. Food Science，2021，42(15)：187-193.

[23] WANG Z Q，PU H L，SHAN S S，et al. Melatonin enhanced chilling tolerance and alleviated peel browning of banana fruit under low temperature storage[J]. Postharvest Biology and Technology，2021，179：111571.

[24] 王纪忠，童瑶，史云勇，等. 外源褪黑素处理对常温货架期梨果实贮藏品质的影响[J]. 果树学报，2021，38(4)：569-579.
WANG J Z，TONG Y，SHI Y Y，et al. Effects of exogenous melatonin treatment on storage quality of pear fruits during shelf life at room temperature[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(4)：569-579.

[25] 杨玲，肖龙，王强，等. 质地多面分析(TPA)法测定苹果果肉质地特性[J]. 果树学报，2014，31(5)：977-985.
YANG L，XIAO L，WANG Q，et al. Study on texture properties of apple flesh by using texture profile analysis[J]. Journal of Fruit Science，2014，31(5)：977-985.

[26] 邓淑芳，王鹏，张怀予，等. 褪黑素处理对枸杞果实采后生理及贮藏品质的影响[J]. 食品与发酵工业，2022，48(2)：198-204.
DENG S F，WANG P，ZHANG H Y，et al. Effects of melatonin treatment on postharvest physiology and storage quality of goji berry[J]. Food and Fermentation Industries，2022，48(2)：198-204.

[27] 孙倩倩. 外源褪黑素对番茄果实采后成熟的影响[D]. 北京：中国农业大学，2016.
SUN Q Q. Effect of exogenous melatonin on postharvest ripening of tomato fruit[D]. Beijing：China Agricultural University，2016.

[28] JAKOBEK L，BLESSO C. Beneficial effects of phenolic compounds：native phenolic compounds vs metabolites and catabolites[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition，2024，64(25)：9113-9131.

[29] 刘家粮，张越，刘力霞，等. 褪黑素对采后荔枝果实冷害及生理变化的影响[J]. 中国食品学报，2022，22(12)：200-213.
LIU J L，ZHANG Y，LIU L X，et al. Effect of melatonin on chilling injury and physiological changes in *Litchi* fruit during cold storage[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology，2022，22(12)：200-213.

[30] MARANGONI A G，PALMA T，STANLEY D W. Membrane effects in postharvest physiology[J]. Postharvest Biology and Technology，1996，7(3)：193-217.

[31] 谢晶，潘家丽，卢献婷，等. 外源褪黑素处理对采后荔枝生理品质的影响[J]. 食品研究与开发，2022，43(10)：1-8.
XIE J，PAN J L，LU X T，et al. Effects of exogenous melatonin treatment on the physiological quality of post-harvested *Litchi*[J]. Food Research and Development，2022，43(10)：1-8.

[32] 楼君，索金伟，张慧，等. 褪黑素处理对高节竹笋低温贮藏过程中木质化的影响[J]. 林业科学，2019，55(12)：41-49.
LOU J，SUO J W，ZHANG H，et al. Effect of melatonin treatment on lignification of *Phyllostachys prominens* shoots during low temperature storage[J]. Scientia Silvae Sinicae，2019，55(12)：41-49.

[33] BOONSIRIWIT A，LEE M，KIM M，et al. Exogenous melatonin reduces lignification and retains quality of green *Asparagus* (*Asparagus officinalis* L.)[J]. Foods，2021，10(9)：2111.

(责任编辑：马秋明)