果 树 学 报 2026,43(8):2236-2249
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250618

采前褪黑素处理对2个甜樱桃品种贮藏品质与质地的影响

武 曦[1],郭 华[1],张 罡[2],聂国伟[1],张亚楠[1],王 勇[1],王 越[1*]

([1]山西农业大学果树研究所•果树种质创制与利用山西省重点实验室,太原 030031;[2]山西农业大学,太原 030031)

摘 要:【目的】缓解樱桃果实在冷藏期间容易出现的失重加剧、质地劣变等问题,探究采前喷施外源褪黑素(MT)对贮藏品质的调控作用。**【方法】**以鲁樱3号和鲁樱5号2个甜樱桃品种为试材,在果实硬核期(盛花后25 d)、转色期(盛花后45 d)和采收前3 d(盛花后55 d)分别喷施不同浓度褪黑素溶液,设置CK(对照)、0.05、0.10、0.20和0.30 mmol·L^{-1}共5个处理。果实成熟后于4 ℃条件下冷藏,并在贮藏0、7和14 d后测定失重率、可溶性固形物(TSS)含量、质地参数(硬度、弹性、咀嚼性等)及色差指标(*L**、*a**、*b**)。结合主成分分析(PCA)及相关性分析对贮藏效果进行综合评价。**【结果】**高浓度(0.30 mmol·L^{-1})MT处理显著提升2个品种甜樱桃在贮藏后期(14 d)的失重率,其中鲁樱3号较CK提高7.8倍。低浓度(0.05~0.10 mmol·L^{-1})处理在贮藏前期(0~7 d)使TSS含量提高1.57%~12.31%。在质地与色泽方面,鲁樱5号在0.05 mmol·L^{-1}处理下贮藏14 d时,硬度提高9.12%,同时*a**值提高44.80%;鲁樱3号在0.10 mmol·L^{-1}处理下贮藏14 d时,硬度提高37.80%,*L**值提高13.03%,*a**值提高22.47%,表明贮藏后期质地和综合色泽衰退得到一定延缓。PCA结果表明,质地性状及色泽参数是区分处理效果的主要贡献因子。**【结论】**2个甜樱桃品种对MT处理的响应存在显著差异,其中鲁樱5号对低浓度(0.05 mmol·L^{-1})响应更显著,主要表现在TSS含量和硬度维持能力上,而鲁樱3号则对中浓度(0.10 mmol·L^{-1})及部分高浓度处理响应更明显,在后期质地稳定性方面表现更优。

关键词:甜樱桃(*Prunus avium* L.);褪黑素;采前喷施;冷藏;果实品质

中图分类号:S662.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2236-14

Effects of pre-harvest melatonin treatment on storage quality and texture of two sweet cherry cultivars

Wu Xi[1], Guo Hua[1], Zhang Gang[2], Nie Guowei[1], Zhang Yanan[1], Wang Yong[1], Wang Yue[1*]

([1] Institute of Pomology, Shanxi Agricultural University/ Shanxi Provincial Key Laboratory of Genetic Improvement and Use of Pomology, Taiyuan 030031, Shanxi, China; [2]Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, Shanxi, China)

Abstract:【Objective】Sweet cherry (*Prunus avium* L.) is highly valued for its bright coloration, crisp texture and pleasant sweetness; however, its high metabolic activity and fragile skin make the fruit extremely vulnerable to postharvest deterioration, particularly under cold storage, where weight loss, textural decline and color fading frequently occur. In recent years, melatonin (MT) has been reported to participate in plant stress mitigation and postharvest physiological regulation, yet the effects of preharvest application on cold-stored sweet cherries remain insufficiently defined, especially regarding cultivar-dependent responses. Therefore, this study aimed to evaluate the influence of different MT concentrations applied at various developmental stages on fruit physicochemical quality during refrigerated storage, and to provide theoretical guidance for the precise application of melatonin in sweet cherry production.【Methods】Two commercial sweet cherry cultivars, Luying 3 and Luying 5, grown under identical orchard conditions, were subjected to foliar sprays of exogenous MT at the hard-core stage

收稿日期:2025-11-07 **接受日期:**2026-01-23

基金项目:山西农业大学科技创新提升工程(CXGC2025029);果树种质创制与利用山西省重点实验室开放基金(PILAB20241508);中央引导地方发展资金项目(YDZJSX2024C016)

作者简介:武曦,助理研究员,硕士,研究方向为果树栽培。E-mail:gsswuxi@163.com

***通信作者** Author for correspondence. E-mail:elevenshiyi_11@163.com

（25 days after full bloom, DAFB），the color-break stage (45 DAFB), and three days before harvest (55 DAFB). Multiple MT concentrations were compared. After harvest, the fruits were stored at 4 ℃ under controlled relative humidity. At 0, 7 and 14 days of storage, weight loss, total soluble solids (TSS) content, texture profile analysis (TPA) parameters (including hardness, springiness, cohesiveness, gumminess and chewiness), and color metrics (*L**, *a**, *b**) were evaluated according to standard postharvest testing protocols. Multivariate analyses, including principal component analysis (PCA) and a correlation heatmap, were used to elucidate relationships among measured variables and to comprehensively discriminate the storage performance of different treatments. Statistical differences were tested at $P \leqslant 0.05$.【Results】The application of MT demonstrated clear concentration- and cultivar-dependent effects. During cold storage, weight loss increased significantly with storage time in both sweet cherry cultivars, with consistently higher values observed in Luying 5 than in Luying 3. High melatonin concentrations (0.30 mmol · L^{-1}) significantly exacerbated weight loss at the late storage stage in both cultivars, whereas low to moderate concentrations partially alleviated weight loss at specific storage periods. Total soluble solids (TSS) content generally declined during storage; however, melatonin treatments differed in their ability to maintain TSS levels, with lower concentrations showing a relatively positive effect and higher concentrations accelerating TSS content depletion. In both cultivars, low-concentration MT (0.05−0.10 mmol · L^{-1}) consistently preserved higher TSS content, implying a delayed reduction in fruit sweetness during cold storage. MT treatment also mitigated the decline of TPA hardness and maintained superior textural integrity, possibly by stabilizing cell wall structure or suppressing pectin solubilization. Colorimetric analyses revealed that MT inhibited undesirable increases in *a** values and modulated shifts in *L** and *b**, implying delayed pigment oxidation and improved external appearance. Notably, fruit redness in MT-treated groups developed more uniformly, and surface brightness remained relatively stable. The correlation heatmap indicated that hardness, TSS content and chromatic parameters were positively associated and were critical determinants of fruit sensory acceptability. PCA analysis further demonstrated that these indicators accounted for the majority of variance among treatments, effectively distinguishing MT-treated fruits from the control at later storage stages. Cultivar-dependent responses were evident: Luying 5 exhibited high sensitivity to MT, particularly in adhesion-related texture attributes and mass retention, whereas Luying 3 displayed comparatively milder responsiveness across most parameters. At 14 days of storage, fruits treated with lower MT concentrations generally maintained higher overall quality scores, whereas excessive concentrations induced variable and sometimes negative results. These findings highlight the importance of dosage optimization in preharvest regulation.【Conclusion】Preharvest foliar application of melatonin at appropriate concentrations can effectively delay postharvest quality deterioration in sweet cherry fruits during cold storage. MT contributes to the maintenance of fruit weight, the conservation of soluble solid levels, the retention of desirable texture properties and the stabilization of color attributes. However, responses differ considerably among cultivars, underscoring the necessity of tailoring treatment strategies to specific genotypic characteristics. Low MT concentrations (0.05−0.10 mmol · L^{-1}) are generally recommended for enhancing sweetness, firmness and surface brightness, while excessive concentrations may induce adverse effects, particularly in cultivars with lower tolerance.

Key words: Sweet cherry (*Prunus avium* L.); Melatonin; Preharvest spraying; Cold storage; Fruit quality

甜樱桃（*Prunus avium* L.）是全球广受欢迎的高值鲜食水果，以色泽艳丽、风味浓郁及富含花青素、褪黑素等抗氧化物质著称，具有重要的营养与经济价值[1-2]。然而，甜樱桃果皮薄易失水、采后呼吸代

谢旺盛，即使在（0±1）℃冷藏条件下，仍会出现单果质量下降、可溶性固形物降解、质地软化（硬度与弹性降低）及色泽褪变等品质劣变问题，严重缩短货架期并降低商品价值[3-5]。

褪黑素（melatonin，MT）作为一种具有多种生物学功能的吲哚化合物[6]，已被证实通过清除活性氧（ROS）、抑制脂质过氧化、调节抗氧化酶系统、抑制乙烯合成与活性等途径，从而延缓成熟进程、减轻冷害影响，并延长跃变及非跃变水果的保鲜期[7-9]。例如，王锋等[4]以萨米脱甜樱桃为试材，发现采后0.1 mmol·L^{-1}褪黑素处理可显著抑制果实褐变、维持较高的可溶性固形物与抗坏血酸含量；宋聪慧等[10]进一步指出，褪黑素通过调控苯丙烷代谢与防御基因表达，增强果蔬对采后逆境的耐受性。

尽管采后褪黑素处理的效果已得到验证，但采前喷施对甜樱桃冷藏品质的调控效应仍缺乏系统探究。与采后处理相比，采前喷施可通过叶片吸收并转运至果实，提前激活果实内源褪黑素合成与抗逆系统，更有利于长期冷藏中的品质稳定[11-13]。褪黑素的作用存在明显的浓度依赖效应，低浓度促进植物生长与抗逆，高浓度则可能产生抑制作用[14-15]。此外，甜樱桃不同品种间的遗传差异，可能导致它们对褪黑素的响应存在异质性[16]。鲁樱5号与鲁樱3号作为新品种，在山西省晋中地区抗寒性强，能抵御倒春寒带来的低温逆境，二者对褪黑素的敏感度及适宜浓度范围尚未明确，限制了其在生产中的精准应用。采后处理易引发消费者对化学残留物的顾虑。因此，亟须深入研究采前处理对樱桃果实品质特性的影响机制。

本研究以鲁樱3号、鲁樱5号甜樱桃为材料，探讨采前褪黑素处理对其贮藏期间质地参数及品质指标的影响，结合相关性分析与主成分分析法解析其内在调控机制，旨在为甜樱桃采后保鲜技术优化提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本研究在山西农业大学果树研究所的樱桃园（112.50° E，37.33° N）进行。供试材料为2022年引进的鲁樱3号和鲁樱5号甜樱桃，均为6月初成熟的中熟品种。试验于2025年4—6月分别在果实硬核期（盛花后25 d）、转色期（盛花后45 d）和采收前3 d（盛花后55 d）进行，喷施4种浓度（0.05、0.10、0.20、0.30 mmol·L^{-1}）的褪黑素溶液（溶液中添加0.05% Tween 20和1%无水乙醇）和对照溶液（CK，仅含0.05% Tween 20和1%无水乙醇），直至叶片表面的溶液开始滴落，每个处理3次重复，每个重复3棵树。在成熟期适时采收果实，选取果形端正、大小一致、成熟度相近且无病虫害、无机械损伤的果实进行后续测定。

1.2 试验设计

将采收的果实放入无菌密封袋，放置在（4±1）℃冰箱进行贮藏试验，相对湿度为（60±5）%。贮藏期间，每间隔7 d取样1次，每次随机取样9个果实，进行果实质地、色差、可溶性固形物含量和失重率的测定。

1.3 测定方法

1.3.1 *樱桃果实质地测定* 测定仪器：质构分析仪（英国StableMicro Systems公司生产的TA.XT plus质构仪）。测定方法：将樱桃果实赤道部朝上，置于防滑硅胶垫上，采用质构剖面分析技术（TPA）进行质地测定。参数设置如下：用P/2圆柱探头（直径2 mm），位移距离为果肉厚度的40%，测前、测中和测后速度均为1 mm·s^{-1}，触发力为5 g，双次压缩。选取硬度、内聚性、弹性、黏性、胶着性和咀嚼性共6个参数作为质地评价指标。

1.3.2 *樱桃果实色差测定* 采用色彩色差计CR-400测定果实色泽，记录樱桃果实表面颜色参数*L**、*a**和*b**值。各处理随机选取9个果实，每隔7 d进行色差测定。*L**表示光泽明亮度，*L**值越大，亮度越高；*a**代表红/绿，正值越大，红色越深，当*a**值为负值时表示绿色，负值越小，绿色越深；*b**代表黄/蓝，正值越大，黄色越深，当*b**为负值时表示蓝色，负值越小，蓝色越深。

1.3.3 *樱桃果实品质及失重率测定* 可溶性固形物（Total soluble solids，TSS）含量：采用SW-32A数字折光仪测定。失重率：随机选取9个樱桃果实，用电子天平（精度0.01 g）称量，并计算失重率。失重率/%=（M_0－M_1）/M_0×100，其中：M_0是贮藏当天的质量，M_1是贮藏第*n*天的质量。

1.4 数据处理与分析

用WPS office中Excel软件对原始数据进行整理与预处理，用SPSS 19.0和Origin 2024软件进行相关性分析和主成分分析，并完成相应图形的绘

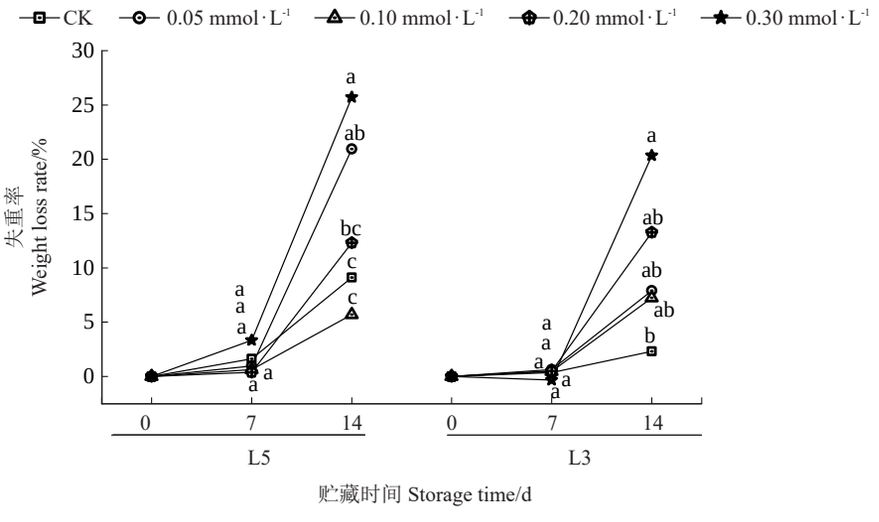
制。采用Origin 2024软件进行单因素方差分析（One-way ANOVA）及Tukey多重比较检验（差异显著性水平设为5%），以比较两种甜樱桃果实各指标均值之间的差异。

2　结果与分析

2.1　不同褪黑素处理对两个樱桃品种贮藏期间果实失重率的影响

由图1可以看出，在贮藏期间，鲁樱5号果实的失重率整体高于鲁樱3号。随着贮藏时间的延长，鲁樱5号果实失重率大幅上升，0.30 mmol·L^{-1}处理下的上升幅度最大，第14天的失重率较第7天上升了6.7倍，其次是0.05、0.20、CK和0.10 mmol·L^{-1}处理。在果实贮藏第7天，0.05、0.10和0.20 mmol·L^{-1}处理的失重率均低于CK，但差异不显著（P＞0.05）；在第14天时，0.30 mmol·L^{-1}处理下的失重率最高，其次是0.05 mmol·L^{-1}，分别较CK显著增加了1.8、1.3倍（P≤0.05），仅0.10 mmol·L^{-1}处理的失重率低于CK，但差异不显著（P＞0.05）。

与鲁樱5号类似，贮藏第7天，鲁樱3号各处理失重率整体较低，与CK的差异均不显著（P＞0.05）。贮藏第14天，果实失重率显著上升，但不同处理间的变化趋势与鲁樱5号存在一定差异，CK处理下的果实失重率低于其他处理组；0.30 mmol·L^{-1}处理下的果实失重率最高，为20.33%，较CK显著增加了7.8倍（P＜0.05），而0.05、0.10和0.20 mmol·L^{-1}



L5 表示鲁樱 5 号，L3 表示鲁樱 3 号；不同小写字母代表不同处理在同一贮藏时期差异显著（P＜0.05）。下同。

L5 indicates Luying 5, L3 indicates Luying 3. Different small letters represent significant differences among treatments during the same storage period (P＜0.05). The same below.

图1　不同浓度褪黑素对贮藏期间樱桃果实失重率的影响

Fig. 1　The effect of different concentrations of melatonin on the weight loss of cherry fruit during storage

处理与CK差异不显著（P＞0.05）。

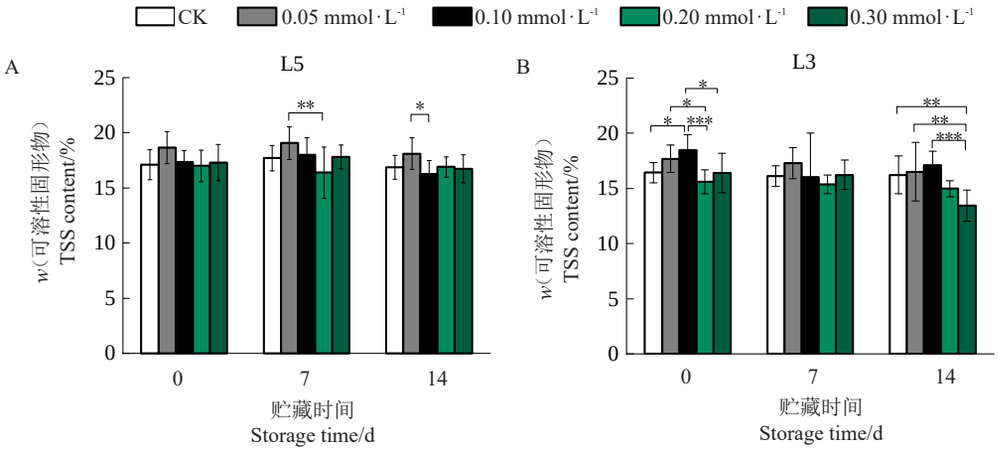
2.2　不同褪黑素处理对两个樱桃品种贮藏期间果实可溶性固形物含量的影响

由图2-A可知，在各个贮藏时期，鲁樱5号的TSS含量在0.05 mmol·L^{-1}处理下达到最大值，分别为18.46%、19.06%和18.11%。在贮藏第0天，各处理间TSS含量差异不显著（P＞0.05）；第7天，0.20 mmol·L^{-1}处理TSS含量最低，为16.39%，显著低于0.05 mmol·L^{-1}处理（P≤0.01）；第14天，0.10 mmol·L^{-1}处理TSS含量最低，为16.28%，显著低于0.05 mmol·L^{-1}处理（P≤0.05）。

由图2-B可以看出，在贮藏第0天，0.10 mmol·L^{-1}处理下鲁樱3号TSS含量最高，为18.73%，显著高于CK、0.20和0.30 mmol·L^{-1}处理（P≤0.05）。与0 d相比，7和14 d各处理下可溶性固形物含量均下降。第7天，各个处理之间差异不显著（P＞0.05）；第14天，0.30 mmol·L^{-1}处理TSS含量最低，为13.44%，显著低于CK、0.05和0.10 mmol·L^{-1}处理（P≤0.01）。

2.3　不同褪黑素处理对两个樱桃品种贮藏期间果实色泽的影响

果实色泽参数（L*、a*和b*值）的变化如图3所示。对于鲁樱5号（图3-A），果实亮度（L*值）在整个



*表示 $P \leqslant 0.05$，**表示 $P \leqslant 0.01$，***表示 $P \leqslant 0.001$.

* indicates $P \leqslant 0.05$, ** indicates $P \leqslant 0.01$, *** indicates $P \leqslant 0.001$.

图 2 不同浓度褪黑素对贮藏期间 2 个樱桃可溶性固形物含量的影响

Fig. 2 The effect of different melatonin concentrations on total soluble solids content in two cherry cultivars during storage

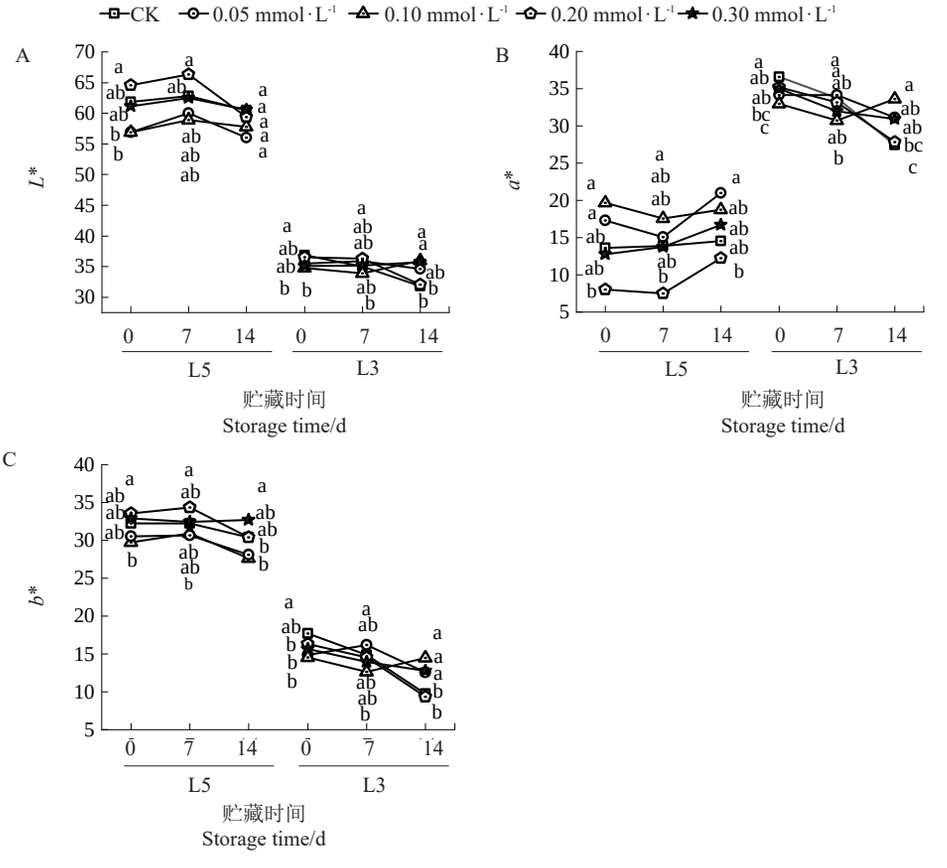


图 3 不同褪黑素处理下 2 个樱桃品种贮藏期间果实色泽变化

Fig. 3 Color changes of two cherry cultivars during cold storage under different melatonin treatments

贮藏期内总体呈先升后降的趋势，并在第7天达到峰值。在贮藏前期（0~7 d），0.20 mmol·L^{-1}处理组的L^*值高于其他处理；至第14天，各处理组L^*值均降至最低且组间无显著差异（$P>0.05$）。对于鲁樱3号红色果，在贮藏当天（0 d），处理过的果实L^*值均低于CK，0.10和0.30 mmol·L^{-1}处理差异显著（$P<0.05$），至末期（14 d），对照组的L^*值降至最低，为31.84，显著低于0.10和0.30 mmol·L^{-1}处理组（$P<0.05$）。

在表征红色度的a^*值方面，从图3-B中可以看出，由于鲁樱5号为黄色果，因此a^*值低于鲁樱3号（红色果）。在贮藏期间（0~14 d），鲁樱5号樱桃在0.20 mmol·L^{-1}处理下a^*值最低（8.05），但各处理组的a^*值与CK无显著差异（$P>0.05$）；0.05和0.10 mmol·L^{-1}的处理组a^*值始终高于其他处理，表明该浓度在红色度的维持上有一定的优势。鲁樱3号在贮藏当天（0 d），未经褪黑素处理过的果实a^*值最高（36.34），显著高于0.05和0.10 mmol·L^{-1}处理（$P<0.05$），随着贮藏时间的延长，至第14天，仅0.10 mmol·L^{-1}处理组a^*值大幅上升至最高（33.63），且显著高于CK（$P<0.05$）。

b^*值反映果实的黄度变化，图3-C结果显示，鲁樱5号在贮藏前期（0~7 d），0.20 mmol·L^{-1}处理组的b^*值始终高于CK及其他处理组，并在第7天达到最大值34.31。鲁樱3号在贮藏当天（0 d），未经褪黑素处理的果实b^*值最高（17.70），显著高于0.05、0.10和0.30 mmol·L^{-1}处理（$P<0.05$），但到贮藏后期大幅下降，至第14天，CK显著低于0.05、0.10和0.30 mmol·L^{-1}处理组（$P<0.05$）。

2.4　不同品种樱桃贮藏期间果实质地参数的变化

图4展示了2个樱桃品种在褪黑素处理后贮藏期间质地参数的变化。鲁樱5号和鲁樱3号对褪黑素处理的响应存在明显差异，且不同质地指标的变化模式各异。

从硬度（图4-A）的变化可以看出，未经褪黑素处理的鲁樱5号果实初始硬度高于鲁樱3号。在贮藏期间，鲁樱5号的硬度在0.05 mmol·L^{-1}褪黑素处理下始终保持最高（0 d：337.83 g；7 d：293.93 g；14 d：290.26 g），而其他浓度（0.10~0.30 mmol·L^{-1}）处理均导致硬度低于对照（CK）。鲁樱3号的硬度在贮藏后期（7~14 d），仅0.10 mmol·L^{-1}处理出现上升趋势，其他处理均呈下降趋势，且0.10 mmol·L^{-1}处理在第14天达到最大值（287.57 g），显著高于该时间点的其他处理及CK（$P<0.05$）。

弹性（图4-B）的变化模式更为复杂。在采样当天（0 d），鲁樱5号在0.05 mmol·L^{-1}处理下弹性值显著高于0.10 mmol·L^{-1}处理（$P<0.05$）。在贮藏后期（7~14 d），0.30 mmol·L^{-1}处理弹性呈上升趋势，对照和其他处理均有所下降。在贮藏前期（0~7 d），鲁樱3号在褪黑素处理下的弹性值均显著高于CK（$P<0.05$），在第14天，0.30 mmol·L^{-1}处理的弹性值达到最大，为0.86，显著高于CK和其他处理（$P<0.05$）。

黏性（图4-C）方面，在采样当天（0 d），低浓度褪黑素（CK、0.05 mmol·L^{-1}）处理下，鲁樱5号的黏性显著低于中、高浓度处理（0.10、0.20和0.30 mmol·L^{-1}）（$P<0.05$）；随着贮藏时间的延长有上升趋势，在14 d时，褪黑素处理过的果实黏性均高于CK，但差异不显著（$P>0.05$）。在所有处理下，随着贮藏时间的延迟，鲁樱3号黏性均表现为先降后升，且0.30 mmol·L^{-1}处理在各时间点的黏性均高于CK和其他处理，但差异不显著（$P>0.05$）。

内聚性（图4-D）分析显示，在贮藏后期（7~14 d），褪黑素处理对鲁樱5号果实内聚性产生了负面影响，导致其内聚性均低于CK。对于鲁樱3号，除0.20 mmol·L^{-1}处理呈先升后降外，其余处理均呈先降后升的趋势，且0.30 mmol·L^{-1}处理在14 d时内聚性显著高于0.10和0.20 mmol·L^{-1}处理（$P<0.05$）。

胶着性与咀嚼性（图4-E、F）变化趋势基本一致。对于鲁樱5号，仅0.30 mmol·L^{-1}处理呈现先降后升，而其他处理均为先升后降，且胶着性在14 d时均低于CK，但差异不显著（$P>0.05$）。对于鲁樱3号，0.20 mmol·L^{-1}处理下二者呈先升后降，其余处理则均为先降后升，并在14 d时以0.30 mmol·L^{-1}处理的咀嚼性最高，显著高于0.10和0.20 mmol·L^{-1}处理（$P<0.05$）。

2.5　贮藏指数比较

为评估贮藏潜力（此处以各质地参数的变化量作为衡量指标），本研究根据前人的方法将每个评估参数在贮藏前和贮藏后的比值作为贮藏指数SI（storage index），其计算公式为：$SI = \log_2(TiD/TiH)$。其中，TiH表示收获时测得的第i个质地参数值，TiD表示该参数在贮藏n天后测得的数值。当SI>0时，表明在冷藏过程中果实质地性状得到增强；当SI<0时，则意味着质地性能出现下降；若SI=0时，则表示所研究的果实质地性状在贮藏过程中保持稳定[17-18]。

由图5可见，鲁樱5号$SI_{硬度}$与$SI_{弹性}$在各个处理组下均呈负值，但接近0，变化幅度小。在0.10~0.30 mmol·L^{-1}处理下$SI_{黏性}$>0，且明显高于CK，其中，0.30 mmol·L^{-1}处理的$SI_{黏性}$最高，为1.24。内聚性、胶着性、咀嚼性方面，CK组增强最显著（SI分别为1.02、0.64、0.75）。

如图6所示，在0.10 mmol·L^{-1}处理下鲁樱3号

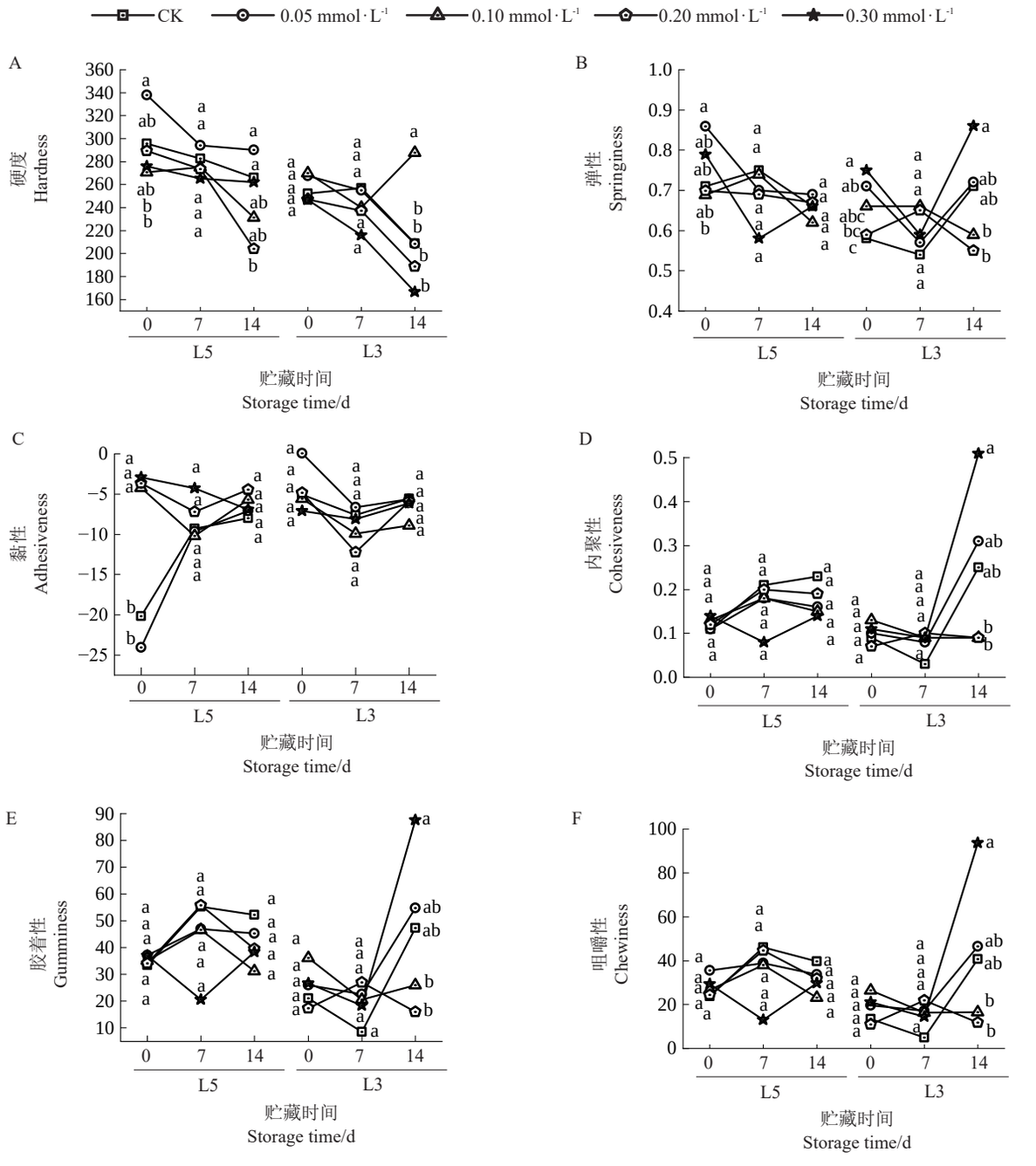


图 4 不同品种樱桃贮藏期间果实质地参数变化趋势

Fig. 4 Variation trend of fruit texture parameters during cold storage of different cherry varieties

$SI_{硬度}$和$SI_{黏性}$均为正值，且高于CK和其他处理。未经褪黑素处理的$SI_{弹性}$>0，高于其他处理组。内聚性、胶着性、咀嚼性在0.30 mmol·L^{-1}处理下的SI指数最高，质地性能得到大幅增强，在0.10 mmol·L^{-1}处理下均为负值，且最小，质地性能下降。

2.6 樱桃果实贮藏期间质地参数与果实品质之间的相关性

为探究樱桃果实贮藏期间质地参数与果实品质之间的相关性，本研究采用皮尔逊相关分析法进行分析。相关性分析（图7）显示，弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性间呈极显著正相关（P≤0.001），咀嚼性与胶着性的相关性最强，表明这4项参数可协同表征果实的质地柔嫩度与结构完整性；硬度与黏性、内聚性呈显著负相关（P≤0.01），而与弹性、咀嚼性等参数相关性不显著。TSS含量作为核心营养品质指标，与硬度呈极显著正相关（P≤0.001），与L^*

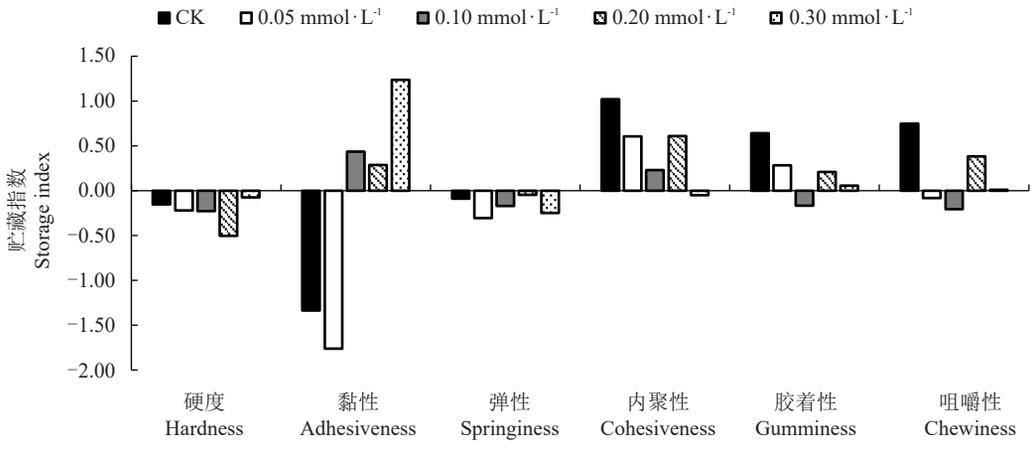


图5　鲁樱5号果实质地贮藏指数

Fig. 5　Storage index of Luying 5 fruit texture

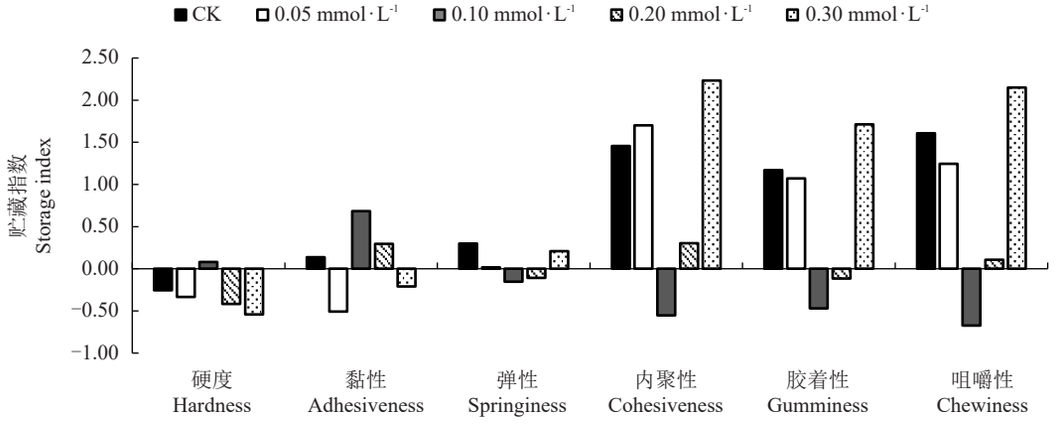


图6　鲁樱3号果实质地贮藏指数

Fig. 6　Storage index of Luying 3 fruit texture

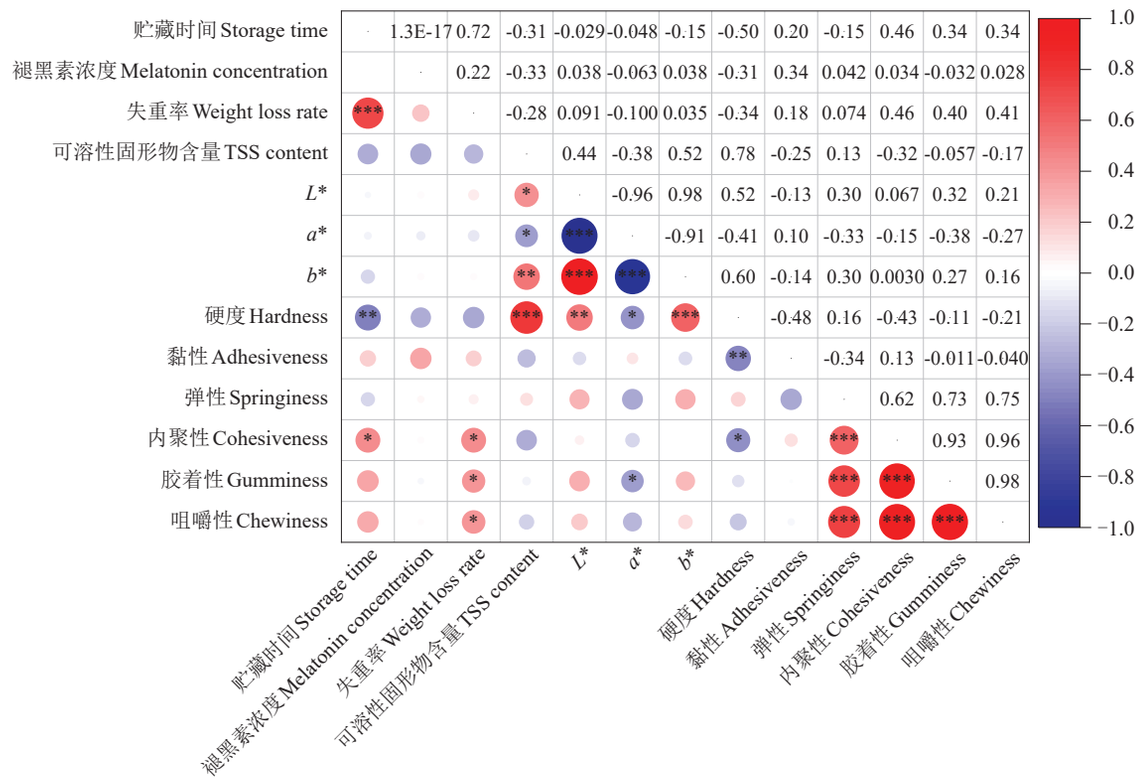
值（亮度）、*b**值（黄蓝值）呈显著正相关（$P \leqslant 0.05$），与*a**值（红绿值）呈显著负相关（$P \leqslant 0.05$）。失重率与贮藏时间呈极显著正相关（$P \leqslant 0.001$），与内聚性、胶着性和咀嚼性呈显著正相关（$P \leqslant 0.05$）。处理因素与品质指标的相关性分析显示，褪黑素浓度与果实品质之间的相关性不显著，而贮藏时间与内聚性呈显著正相关（$P \leqslant 0.05$），与硬度呈显著负相关（$P \leqslant 0.01$）。

2.7　PCA综合分析甜樱桃果实贮藏特性差异

2.7.1　*主成分分析*　本研究对2个甜樱桃品种的11个指标进行主成分分析，对标准化后的数据进行KMO和巴特利特检验。结果见表1，KMO值为0.716，巴特利特球形度检验显著（$P < 0.001$），表明变量间存在共同因子，适合进行主成分分析。由表2可见，特征值大于1的成分有3个，其特征值分别为4.253、3.578、1.416，贡献率分别为38.664%、32.527%、12.873%，累计方差贡献率为84.066%，可以反映甜樱桃果实各指标的大部分信息[19]。

表3为樱桃品质指标旋转后的成分矩阵，其中，对第一主成分产生正向影响的指标包括弹性、内聚性、胶着性和咀嚼性，咀嚼性的载荷数最大，为0.979；其次为胶着性，数值为0.947，均为果实质地性状。对第二主成分产生正向影响的指标包括*L**值、*b**值，载荷数值均为0.970，均为色泽性状。第三主成分中黏性载荷数值最大（0.790），主要反映果实的黏性性状。这三个主成分分别从质地、色泽和黏性三个方面综合反映了甜樱桃果实的品质特性。

2.7.2　*基于PCA比较3个贮藏时期果实品质的变化差异*　根据PCA得分二维散点图（图8）显示，鲁樱5号樱桃主要分布在PC1正向区域，分布范围更集中，



*表示 P≤0.05，**表示 P≤0.01，***表示 P≤0.001.

* indicates P≤0.05, ** indicates P≤0.01, *** indicates P≤0.001.

图 7 樱桃果实贮藏期间质地参数、果实品质相关性热图

Fig. 7 Correlation heatmap of texture parameters and fruit quality during cherry storage

表 1 KMO 和巴特利特检验

Table 1 KMO and Bartlett's test

KMO 和巴特利特检验 KMO and Bartlett's test		
KMO 取样适切性量数 KMO sample adequacy statistic		0.716
Bartlett球形度检验 Bartlett's sphericity test	近似卡方 Approximate chi-Square	448.414
	自由度 Degrees of freedom	55
	显著性 Significance	＜0.001

表 2 主成分的特征值、方差贡献率及累计贡献率

Table 2 Eigenvalues, contribution rates and cumulative contribution of principal components

主成分 Principal component	特征值 Eigenvalue	方差贡献率 Variance contribution rate/%	累计贡献率 Cumulative contribution rate/%
1	4.253	38.664	38.664
2	3.578	32.527	71.191
3	1.416	12.873	84.064
4	0.704	6.398	90.462
5	0.581	5.279	95.742
6	0.221	2.008	97.75
7	0.169	1.536	99.285
8	0.051	0.466	99.752
9	0.012	0.111	99.863
10	0.009	0.082	99.945
11	0.006	0.055	100.000

与TSS含量、硬度、L^*及b^*方向一致；而鲁樱3号樱桃主要分布于PC1负向区域，分布范围更广泛，与a^*、黏性方向一致，表明2个品种在色泽和质地品质特性上存在显著差异。鲁樱5号对褪黑素处理的综合响应相对一致，而鲁樱3号对处理和贮藏时间的响应更为敏感，品质变异幅度更大。

为分析不同贮藏时期樱桃果实品质的变化趋势，分别对贮藏当天（0 d）、7 d和14 d的品质参数进行作图分析，结果如图9所示。每个品种在不同贮藏时期的品质差异主要集中在两个主成分上，PC1与PC2的累计方差贡献率均在70%以上。贮藏0 d（图9-A），鲁樱5号集中分布于PC1正向区域，由TSS含量、L^*、b^*及多项质地参数（硬度、弹性、内聚

表3　樱桃品质指标旋转后的成分矩阵

Table 3　Component matrix of sweet cherry quality index rotation

指标 Indicator	主成分 Principal component		
	1	2	3
失重率 Weight loss rate	0.373	0.094	0.595
可溶性固形物含量 TSS content	−0.176	0.552	−0.561
*L**	0.150	0.970	−0.038
*a**	−0.216	−0.93	−0.017
*b**	0.105	0.970	−0.114
硬度 Hardness	−0.195	0.573	−0.703
黏性 Adhesiveness	−0.170	−0.017	0.790
弹性 Springiness	0.830	0.165	−0.359
内聚性 Cohesiveness	0.931	−0.054	0.305
胶着性 Gumminess	0.947	0.205	0.117
咀嚼性 Chewiness	0.979	0.074	0.117

性、胶着性和咀嚼性）正向载荷主导；鲁樱3号则偏向PC1负向区域，且更靠近*a**、黏性等指标。从图9-B中可以看出，贮藏7 d时，鲁樱3号不同褪黑素处理之间离散度降低，鲁樱5号则表现出一定程度的空间扩散，其中低浓度组（0.05~0.20 mmol·L^{-1}）得分重心向PC1正向移动，同时与硬度、色泽区域相邻；高浓度（0.30 mmol·L^{-1}）得分重心向PC2方向上偏移较为明显，更靠近黏性、失重率指标。鲁樱3号的0.10~0.30 mmol·L^{-1}处理组得分向PC2负向移动，与*a**值负载荷方向一致。贮藏14 d时（图9-C），失重率在PC2方向上的贡献明显增大；鲁樱5号各浓度处理组均处于PC1负向，样本簇相对更为集中；鲁樱3号不同褪黑素处理之间的距离进一步拉大，尤其是高浓度处理（0.30 mmol·L^{-1}）样品偏离品种中心位置较远，低至中等浓度处理样品更接近中心，显示出

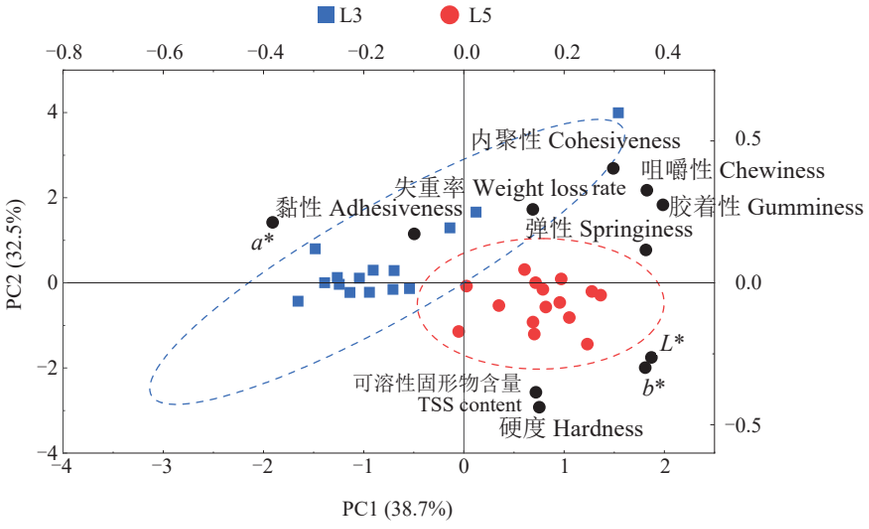


图8　采前褪黑素处理对2个樱桃品种贮藏期间品质参数的聚类分析

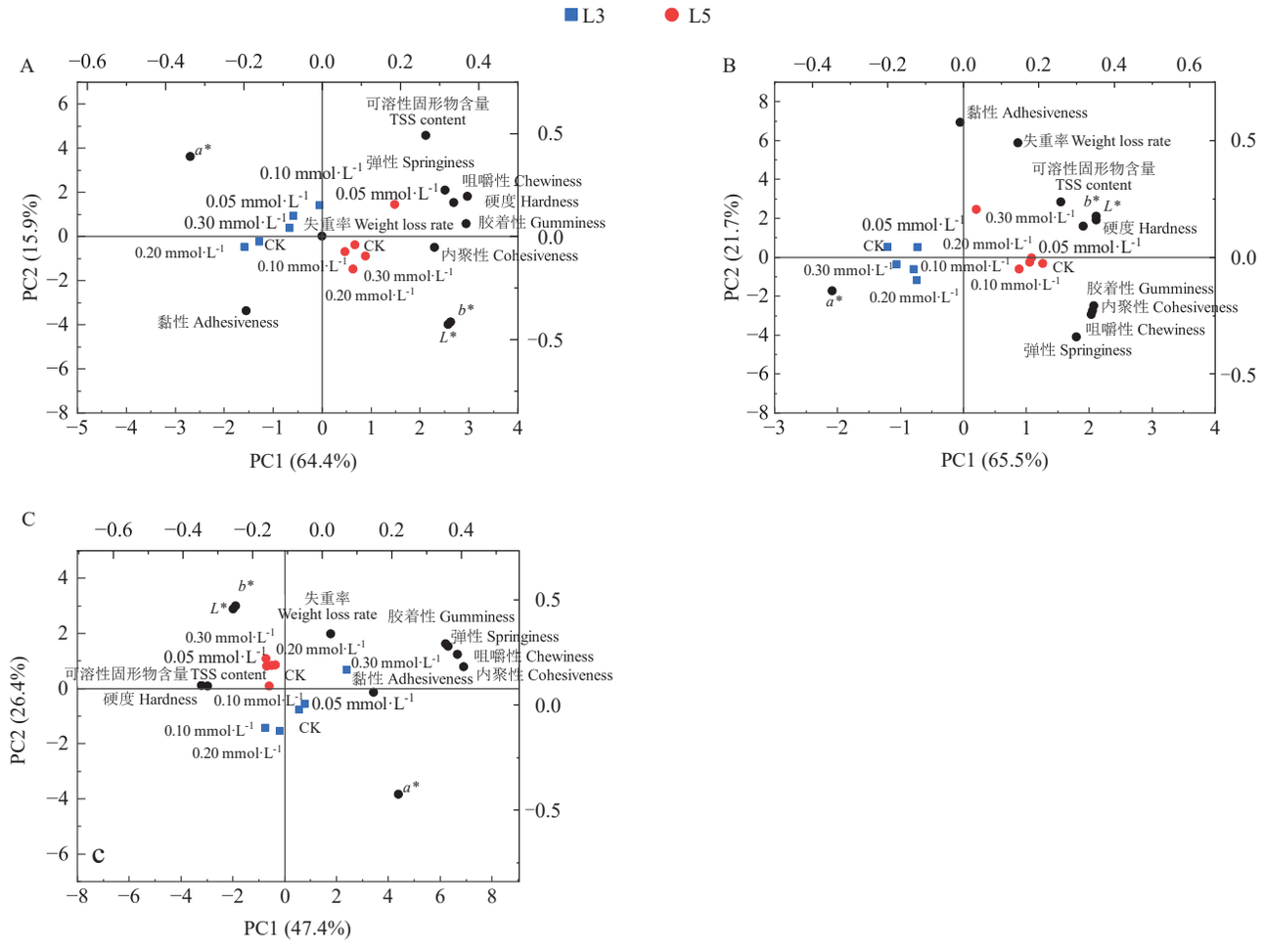
Fig. 8　PCA clustering analysis of quality parameters of two cherry varieties during storage after pre-harvest melatonin treatment

较为稳定的综合品质表现。

3　讨　论

失重率是反映果实采后失水的核心指标，其变化与细胞膜透性、气孔调节密切相关[9]。已有研究认为适宜浓度MT可通过增强抗氧化系统、延缓膜脂过氧化、调控与能量代谢及防御相关的基因表达，从而降低贮藏失重率[20-22]。在本研究中，贮藏7 d后，鲁樱5号0.05~0.20 mmol·L^{-1}处理下失重率普遍低于CK，但差异不显著，说明在贮藏早期MT对抑制失水的作用尚处于温和或滞后阶段；而至14 d时，高浓度0.30 mmol·L^{-1}在两品种均导致最高失重率，这是水分散失与衰老进程叠加的典型表现。甜樱桃在贮藏过程中以蒸腾失水为主导，因此在贮藏后期一旦表皮屏障功能下降（角质层结构受损），失重率往往呈加速上升趋势[23-24]。

可溶性固形物含量是评价果实品质与营养价值的重要指标，其变化过程反映了淀粉水解与呼吸消耗之间的动态平衡[25]。前期TSS含量的升高主要源于淀粉分解生成可溶性糖，而后期TSS含量的下



A. 贮藏 0 d（贮藏当天）；B. 贮藏 7 d；C. 贮藏 14 d。

A. 0 d of storage (storage day); B. 7 d of storage; C. 14 d of storage.

图 9 不同贮藏期各褪黑素浓度处理下樱桃果实品质参数主成分分析

Fig. 9 Principal component analysis (PCA) of cherry fruit quality parameters under different melatonin concentration treatments at various storage periods

降则与呼吸作用中糖分的持续消耗有关[26-27]。已有研究表明，在采前喷施 0.50 mmol·L^{-1}褪黑素对樱桃的 TSS 含量无显著影响[5]。本研究结果显示，在各贮藏时期，0.05 mmol·L^{-1}处理下鲁樱 5 号 TSS 含量均高于其他处理，且各处理随贮藏时间的延迟呈“先升后降”趋势，符合采后果实糖代谢的一般规律。早期褪黑素处理可能促进淀粉向葡萄糖和果糖的转化，使 TSS 含量上升，而贮藏后期糖分被呼吸作用消耗，TSS 含量逐渐下降。在贮藏当天，0.10 mmol·L^{-1}处理下鲁樱 3 号 TSS 含量显著高于对照，说明适量褪黑素可促进糖分积累；而在贮藏后期，高浓度处理（0.30 mmol·L^{-1}）下 TSS 含量显著低于对照，可能因褪黑素处理过度激活呼吸酶系统，从而加速糖分代谢与消耗[16]。

色泽是甜樱桃商品价值的关键外观指标，通常用 L^*、a^*、b^*对果皮颜色进行客观量化，其中 L^*反映亮度、a^*表征由绿向红转变、b^*表征由蓝向黄趋势，其变化与花青素、类胡萝卜素组成及果皮光学特性密切相关[9]。一般随着果实成熟和衰老，甜樱桃果皮 L^*值下降而 a^*值升高，颜色由明亮转为深红[28]。本研究中褪黑素处理虽未显著改变 L^*的水平，但能在贮藏期维持相对稳定的 L^*，说明其主要通过减缓亮度下降的速率来维持果面光泽并延缓颜色过度加深。a^*值作为红色积累的关键指标，主要受花青素合成、降解的动态平衡调控。已有研究表明褪黑素可通过调节 *CHS*、*ANS*、*UFGT* 等关键基因表达影响花青素积累的强度与速率[29-30]。本研究中，贮藏前期（0~7 d），鲁樱 3 号在 0.10 mmol·L^{-1}褪黑素处理下 a^*

值显著低于CK，可能原因是该处理抑制了花青素的积累；而鲁樱5号在该浓度下保持较高的*a**值，高于CK和其他处理，但差异不显著。*b**值下降通常与类胡萝卜素降解、花青素相对占比上升及果皮向深红转变有关[31]。本研究结果显示，鲁樱5号在0.20 mmol·L^{-1}褪黑素处理下*b**值最高，但与CK相比差异未达显著水平，说明该浓度对延缓黄色成分下降的作用有限；相反，在相同处理下，鲁樱3号*b**值下降幅度较大，可能与高浓度褪黑素干预色素代谢平衡、加快颜色由黄红向深红转变有关。总体来看，褪黑素对*L**、*a**、*b**的影响并非单向增强或抑制，而是通过调节不同色素代谢过程的相对速率，进而影响果实综合色泽变化轨迹。

质构特性直接反映果实细胞壁结构的完整性，其变化与细胞壁降解酶活性密切相关[32]。本研究结果显示，鲁樱5号虽然随着贮藏时间的延长呈下降趋势，但0.05 mmol·L^{-1}处理硬度始终高于CK和其他处理，与Miranda等[3]研究中褪黑素处理维持黄品种（Royal Rainier）硬度的结论一致。该褪黑素浓度在贮藏期间有效抑制了细胞壁降解酶的活性，从而使细胞壁结构得以完整维持，延缓了果实软化进程[32]。本研究中褪黑素对质构指标的调控具有浓度依赖特征，鲁樱5号在较低浓度（0.05 mmol·L^{-1}）下表现出较好的硬度与弹性维持效果，而鲁樱3号则对中等浓度（0.10~0.30 mmol·L^{-1}）处理响应更为明显，尤其在贮藏后期（14 d）0.10 mmol·L^{-1}处理显著提高硬度，而0.30 mmol·L^{-1}处理在弹性、内聚性及咀嚼性等综合指标上表现出较优维持效果。此外，本研究的SI分析显示，在大多数处理中，$SI_{硬度}$接近或略低于0，但黏性、内聚性、咀嚼性在适宜处理下可获得正向增强，说明褪黑素处理除了维持果实“硬”之外，还改善“咀嚼感”等消费者感知的质地属性。

本研究中相关性分析结果显示，褪黑素浓度与果实品质之间的相关性不显著，而贮藏时间与内聚性呈显著正相关，与硬度呈显著负相关，表明时间仍是驱动品质演变的主要因素。弹性与内聚性、胶着性、咀嚼性参数之间呈极显著正相关，与黏性呈极显著负相关，表明果实软化过程中质地协调性的破坏是质构下降的重要标志。硬度与黏性、内聚性呈极显著负相关，而与弹性、咀嚼性等无显著相关性，表明硬度下降可能主要受细胞壁结构破坏和胶质物质流失影响，而非单纯由水分流失引起。此外，TSS含量与硬度的极显著正相关以及与*L**、*b**的正相关、与*a**的负相关，揭示甜樱桃果实中糖分的积累与细胞壁结构的完整性及色素代谢过程存在内在联系。

基于主成分因子分析，果实品质变化可归因于三类因子：质地性状、色泽性状与黏性，且两个樱桃品种的品质差异主要由质地稳定性与水分散失共同驱动。贮藏0 d、7 d和14 d三阶段PCA结果揭示，褪黑素浓度是驱动贮藏期品质结构重排的重要因素，且这种效应在贮藏中后期更为突出。贮藏初期，各浓度处理在同一品种内聚集较为紧密，说明褪黑素对果实综合品质的影响尚不显著；在贮藏中后期，高浓度褪黑素（0.30 mmol·L^{-1}）更趋向失重率向量方向，并相对远离质地、风味向量聚集区，这与本研究结果中0.30 mmol·L^{-1}处理显著加剧失重并导致部分质地性状失衡的结果相互印证。相比之下，低至中等浓度处理（0.05~0.20 mmol·L^{-1}）更接近PCA空间中心区域，与多项质地和风味指标方向一致，显示出较为稳定的综合品质表现。

4　结　论

本研究系统阐述了采前褪黑素处理对不同甜樱桃冷藏期间品质的调控规律。结果表明，在贮藏过程中两品种均出现失重累积和品质演变，但响应幅度存在显著差异。鲁樱5号失重率较高，而鲁樱3号的失重率、质地与色泽指标随褪黑素浓度变化波动更大。褪黑素对果实品质的调控具有明显浓度依赖性，低至中等浓度（0.05~0.20 mmol·L^{-1}）在贮藏前期（0~7 d）有助于维持TSS含量、延缓色泽劣变并改善部分质地性状，而高浓度（0.30 mmol·L^{-1}）则加剧后期失重并削弱贮藏稳定性。未来研究将进一步解析褪黑素调控品质的代谢机制，为品种改良与栽培管理提供更精准的靶点。

参考文献 References：

[1] 崔建潮，王文辉，贾晓辉，王志华，佟伟 . 从国内外甜樱桃生产现状看国内甜樱桃产业存在的问题及发展对策[J]. 果树学报，2017，34(5)：620-631.
Cui Jianchao，Wang Wenhui，Jia Xiaohui，Wang Zhihua，Tong Wei. The domestic industry problems from the sweet cherry import situation and its development countermeasure for the future[J]. Journal of Fruit Science，2017，34(5)：620-631.

[2] Himanshu，Sharma S，Rana V S，Ankit，Thakur V，Kumar A，Prachi，Thakur S，Sharma N. Unlocking the sustainable role of melatonin in fruit production and stress tolerance：A review[J]. CABI Agriculture and Bioscience，2024，5：103.

[3] Miranda S，Vilches P，Suazo M，Pavez L，García K，Méndez M A，González M，Meisel L A，Defilippi B G，del Pozo T. 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.

[4] 王锋，杨青珍，赵旗峰，张晓萍 . 外源褪黑素对甜樱桃果实褐变和品质的影响[J]. 食品工业科技，2022，43(5)：340-347.
Wang Feng，Yang Qingzhen，Zhao Qifeng，Zhang Xiaoping. Effect of exogenous melatonin treatment on browning and quality of sweet cherry[J]. Science and Technology of Food Industry，2022，43(5)：340-347.

[5] Michailidis M，Tanou G，Sarrou E，Karagiannis E，Ganopoulos I，Martens S，Molassiotis A. Pre- and post-harvest melatonin application boosted phenolic compounds accumulation and altered respiratory characters in sweet cherry fruit[J]. Frontiers in Nutrition，2021，8：695061.

[6] Onik J C，Wai S C，Li A，Lin Q，Sun Q Q，Wang Z D，Duan Y Q. Melatonin treatment reduces ethylene production and maintains fruit quality in apple during postharvest storage[J]. Food Chemistry，2021，337：127753.

[7] Fawole O A，Atukuri J，Arendse E，Opara U O. Postharvest physiological responses of pomegranate fruit (cv. Wonderful) to exogenous putrescine treatment and effects on physico-chemical and phytochemical properties[J]. Food Science and Human Wellness，2020，9(2)：146-161.

[8] Yang X X，Chen J，Ma Y，Huang M H，Qiu T，Bian H W，Han N，Wang J H. Function，mechanism，and application of plant melatonin：An update with a focus on the cereal crop，barley (*Hordeum vulgare* L.)[J]. Antioxidants，2022，11(4)：634.

[9] Saud S，Jiang Z Y，Chen S Y，Fahad S. Interaction of melatonin on post-harvest physiology and quality of horticultural crops[J]. Scientia Horticulturae，2023，321：112286.

[10] 宋聪慧，郭水欢，史小强，张寒彬，吴家锴，詹丽娟 . 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 Conghui，Guo Shuihuan，Shi Xiaoqiang，Zhang Hanbin，Wu Jiakai，Zhan Lijuan. Research progress on the regulatory effect of melatonin on postharvest preservation of fruits and vegetables[J]. Food Science，2023，44(3)：228-236.

[11] Chen J Q，Ma Y S，Zhou H J，Yu R X，Xiong M，Yang N，Wang J Q，Tian Y，Su L Y. *Myrica rubra* preharvest treatment with melatonin improves antioxidant and phenylpropanoid pathways during postharvest storage[J]. Foods，2025，14(1)：64.

[12] 孙协平，罗友进，周广文 . 硒对甜樱桃叶片褪黑素和谷胱甘肽氧化还原循环的影响[J]. 中国农业科学，2017，50(22)：4373-4381.
Sun Xieping，Luo Youjin，Zhou Guangwen. Effects of selenium on melatonin content and glutathione redox cycle in sweet cherry leaves[J]. Scientia Agricultura Sinica，2017，50(22)：4373-4381.

[13] 孙协平，钟美，梁东，夏萍，冉卫军，杨沙，田洁，黄胡铃，向宇慧，寇琳羚，罗友进 . 硒元素调控富硒高褪黑素甜樱桃生产的探讨[J]. 江苏农业科学，2023，51(4)：146-152.
Sun Xieping，Zhong Mei，Liang Dong，Xia Ping，Ran Weijun，Yang Sha，Tian Jie，Huang Huling，Xiang Yuhui，Kou Linling，Luo Youjin. Regulation of selenium on production of sweet cherry with high selenium and melatonin contents：A review[J]. Jiangsu Agricultural Sciences，2023，51(4)：146-152.

[14] Li J P，Liu J，Zhu T T，Zhao C，Li L Y，Chen M. The role of melatonin in salt stress responses[J]. International Journal of Molecular Sciences，2019，20(7)：1735.

[15] 习林杰，王晨雨，严露露，杨俊伟，张静，邹志荣，潘铜华 . 外源褪黑素对生菜根系生长及内源褪黑素含量的影响[J]. 北方园艺，2019(6)：7-11.
Xi Linjie，Wang Chenyu，Yan Lulu，Yang Junwei，Zhang Jing，Zou Zhirong，Pan Tonghua. Effect of exogenous melatonin on root growth and endogenous melatonin content of lettuce[J]. Northern Horticulture，2019(6)：7-11.

[16] 李玲，马宇珩，孙协平，韩国强，叶霜，罗友进，周广文 . 重庆地区甜樱桃品种筛选及其叶片硒和褪黑素含量关系分析[J]. 南方农业学报，2019，50(3)：615-621.
Li Ling，Ma Yuheng，Sun Xieping，Han Guoqiang，Ye Shuang，Luo Youjin，Zhou Guangwen. Sweet cherry cultivars selection for Chongqing and relationship between the contents of selenium and melatonin in leaves[J]. Journal of Southern Agriculture，2019，50(3)：615-621.

[17] Costa F，Cappellin L，Fontanari M，Longhi S，Guerra W，Magnago P，Gasperi F，Biasioli F. Texture dynamics during postharvest cold storage ripening in apple (*Malus* × *domestica* Borkh.)[J]. Postharvest Biology and Technology，2012，69：54-63.

[18] 马媛媛，陆玲鸿，古咸彬，宋根华，张慧琴 . 基于 TPA 的猕猴桃质地差异分析及贮藏性评价[J]. 果树学报，2021，38(9)：1579-1589.
Ma Yuanyuan，Lu Linghong，Gu Xianbin，Song Genhua，Zhang Huiqin. Texture difference and storage characteristics evaluation based on texture profile analysis in kiwifruits[J]. Journal of Fruit Science，2021，38(9)：1579-1589.

[19] 武曦，郭华，王越，王勇 . 我国省际葡萄产业竞争力评价[J]. 北方园艺，2023(22)：138-145.
Wu Xi，Guo Hua，Wang Yue，Wang Yong. Evaluation of the competitiveness of China's interprovincial grape industry[J]. Northern Horticulture，2023(22)：138-145.

[20] Rahmanzadeh-Ishkeh S，Shirzad H，Tofighi Z，Fattahi M，Ghosta Y. Exogenous melatonin prolongs raspberry postharvest life quality by increasing some antioxidant and enzyme activity and phytochemical contents[J]. Scientific Reports，2024，14：11508.

[21] Liu C H，Zheng H H，Sheng K L，Liu W，Zheng L. Effects of

melatonin treatment on the postharvest quality of strawberry fruit[J]. Postharvest Biology and Technology，2018，139：47-55.

[22] Carrión-Antolí A，Martínez-Romero D，Guillén F，Zapata P J，Serrano M，Valero D. Melatonin pre-harvest treatments leads to maintenance of sweet cherry quality during storage by increasing antioxidant systems[J]. Frontiers in Plant Science，2022，13：863467.

[23] Athoo T O，Winkler A，Knoche M. Pedicel transpiration in sweet cherry fruit：Mechanisms，pathways，and factors[J]. Journal of the American Society for Horticultural Science，2015，140(2)：136-143.

[24] Belge B，Llovera M，Comabella E，Gatius F，Guillén P，Graell J，Lara I. Characterization of cuticle composition after cold storage of “Celeste” and “Somerset” sweet cherry fruit[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry，2014，62(34)：8722-8729.

[25] Baidya B K，Mahato A，Pattnaik R K，Sethy P. A Review of physiological and biochemical changes related to ripening along with post-harvest handling and treatments of sapota[J]. Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry，2020，9(4)：2030-2035.

[26] Amarasinghe N K，Wickramasinghe I，Wijesekara I，Thilakarathna G，Deyalage S T. Functional，physicochemical，and antioxidant properties of flour and cookies from two different banana varieties (*Musa acuminata* cv. Pisang awak and *Musa acuminata* cv. Red dacca) [J]. International Journal of Food Science，2021，2021：6681687.

[27] Rehman M A，Asi M R，Hameed A，Bourquin L D. Effect of postharvest application of aloe vera gel on shelf life，activities of anti-oxidative enzymes，and quality of ‘Gola’ guava fruit[J]. Foods，2020，9(10)：1361.

[28] Fan S L，Li Q，Feng S J，Lei Q M，Abbas F，Yao Y L，Chen W X，Li X P，Zhu X Y. Melatonin maintains fruit quality and reduces anthracnose in postharvest papaya via enhancement of antioxidants and inhibition of pathogen development[J]. Antioxidants，2022，11(5)：804.

[29] Carrión-Antolí A，Lorente-Mento J M，Valverde J M，Castillo S，Valero D，Serrano M. Effects of melatonin treatment on sweet cherry tree yield and fruit quality[J]. Agronomy，2022，12(1)：3.

[30] Pei Y G，Tang W J，Huang Y D，Li H F，Liu X W，Chen H X，He R M，Niu W Y，Du Q Y，Chu Y Z，Deng H，Liu M C，Gong R G. The PavMYB. C2-UFGT module contributes to fruit coloration *via* modulating anthocyanin biosynthesis in sweet cherry[J]. PLoS Genetics，2025，21(6)：e1011761.

[31] Huang T，Jia N，Zhu L X，Jiang W，Tu A B，Qin K，Yuan X J，Li J X. Comparison of phenotypic and phytochemical profiles of 20 *Lycium barbarum* L. Goji berry varieties during hot air-drying[J]. Food Chemistry：X，2025，27：102436.

[32] Liu R L，Shang F Z，Niu B，Wu W J，Han Y C，Chen H J，Gao H Y. Melatonin treatment delays the softening of blueberry fruit by modulating cuticular wax metabolism and reducing cell wall degradation[J]. Food Research International，2023，173：113357.