果 树 学 报 2026,43(8):2220-2235
Journal of Fruit Science

DOI:10.13925/j.cnki.gsxb.20250744

不同处理方式对库尔勒香梨货架期保绿效果及内在品质的影响

薛子杨,焦 阳,李佳格,潘 辰,滕元文,倪隽蓓*

(浙江大学农业与生物技术学院,杭州 310000)

摘 要:【目的】探索有效延缓库尔勒香梨果皮褪绿转黄及品质劣变的处理技术。**【方法】**分别采用50 mg·L^{-1} GA_3、25 μmol·L^{-1} MT、75 μmol·L^{-1} MT、40 ℃热激和1 μL·L^{-1} 1-MCP处理冷库贮藏(0~4 ℃)7个月的库尔勒香梨,并将果实于26 ℃、相对湿度80%条件下货架贮藏14 d,以未处理果实为对照,分别于处理前(即0 d)、处理后1、3、7、10和14 d拍照取样并测定相关指标。**【结果】**与对照相比,GA_3、MT、40 ℃热激和1-MCP处理均可有效延缓库尔勒香梨果皮的褪绿转黄进程,其中两种不同浓度的MT处理保绿效果较佳,均可使果皮褪绿转黄时间推迟7 d左右;而GA_3、40 ℃热激和1-MCP处理则可分别推迟3 d左右。上述处理均可抑制库尔勒香梨果皮色差*L**、*a**、*b**值的上升,延缓叶绿素的降解,降低果实呼吸速率和乙烯释放速率,并减少果实中苹果酸和柠檬酸的含量。在糖代谢方面,货架贮藏后期,除两种不同浓度的MT处理显著降低果糖含量外,其余处理对葡萄糖、蔗糖和果糖含量均无显著影响。此外,25 μmol·L^{-1} MT、75 μmol·L^{-1} MT和40 ℃热激处理还导致叶绿素降解相关基因(*PsNYC1*、*PsPAO*、*PsPAO1*、*PsPPH1*、*PsSGR1*)的相对表达水平显著下调。**【结论】**50 mg·L^{-1} GA_3、25 μmol·L^{-1} MT、75 μmol·L^{-1} MT、40 ℃热激和1 μL·L^{-1} 1-MCP处理均可有效延缓库尔勒香梨货架期果皮的褪绿转黄进程,保持果实良好的内在品质,其中25 μmol·L^{-1} MT处理对库尔勒香梨保绿效果最佳。

关键词:库尔勒香梨;货架期;保绿;品质;褪黑素;赤霉素;热激;1-MCP

中图分类号:S661.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-9980(2026)08-2220-16

Effects of different treatments on green color retention and internal quality of Kuerlexiangli pear fruit during shelf life

Xue Ziyang, Jiao Yang, Li Jiage, Pan Chen, Teng Yuanwen, Ni Junbei*

(College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310000, Zhejiang, China)

Abstract:【Objective】Kuerlexiangli pear, cultivated in the Xinjiang Uygur Autonomous Region of China, is renowned for its superior appearance, flavor, and aroma. Widely regarded as the "Prince of Fruits", Kuerlexiangli pear has gained significant popularity among consumers domestically and internationally. Kuerlexiangli pear is typically harvested within a concentrated season, yet marketed year-round. It is estimated that approximately 60% of the fruit must be placed in cold storage to enable this off-season supply. However, once removed from cold storage, pear fruit is prone to problems such as peel yellowing and rapid quality deterioration during shelf life, which significantly impacts their market value and competitiveness. Therefore, this study investigated the effects of GA_3, MT, 40 ℃ heat shock and 1-MCP treatments on the shelf-life green color retention and internal quality of Kuerlexiangli pear fruit, with the objective of providing technical references for delaying fruit peel yellowing and quality deterioration of Kuerlexiangli pear fruit.【Methods】Kuerlexiangli pear fruits were treated with 50 mg·L^{-1} GA_3, 25 μmol·L^{-1} MT, 75 μmol·L^{-1} MT, 40 ℃ hot water or 1 μL·L^{-1} 1-MCP respectively, and then the

收稿日期:2025-12-31 **接受日期:**2026-02-08

基金项目:国家自然科学基金项目(32572987;32272678);第九届中国科协青年人才托举工程项目(2023QNRC001)

作者简介:薛子杨,男,在读硕士研究生,研究方向为果实品质形成机制与调控。E-mail:1140765043@qq.com

***通信作者** Author for correspondence. Tel:0571-88982803,E-mail:nijunbei@zju.edu.cn

fruits were stored for 14 days at 26 ℃ and 80% relative humidity in darkness. During shelf storage, samples were collected at 0 (before treatment), 1, 3, 7, 10 and 14 days after treatment for the determination of fruit peel color (*L**, *a**, *b**), chlorophyll content, fruit firmness, total soluble solids (TSS) content, sugar and acid content, respiratory intensity and ethylene release rate. Meanwhile, the most effective treatment groups for green color retention of Kuerlexiangli pear fruits were selected to analyze the relative expression levels of chlorophyll degradation-related genes.【Results】All treatments (50 mg·L^{-1} GA_3, 25 μmol·L^{-1} MT, 75 μmol·L^{-1} MT, 40 ℃ heat shock and 1 μL·L^{-1} 1-MCP treatments) effectively delayed peel yellowing of Kuerlexiangli pear fruit during shelf storage. Among them, MT treatments (at both concentrations) were the most effective and delayed the peel-yellowing process by approximately 7 days, whereas GA_3, 40 ℃ heat shock and 1-MCP treatments delayed it by only about 3 days. During the later stage of shelf storage, all treatments significantly suppressed the increase of *L** and *a** values of fruit peel, reduced peel greasiness, and effectively maintained the green color. GA_3 and MT treatments also significantly inhibited the increase of the *b** values. Both heat shock and 1-MCP treatments resulted in lower *b** values, which showed no significant difference compared with the control. After 7 days of shelf storage, the chlorophyll a and the total chlorophyll contents in all treatment groups were higher than those in the control. By day 14, the chlorophyll content of the fruit peel, in descending order, was: the 25 μmol·L^{-1} MT group, the 75 μmol·L^{-1} MT group, the 40 ℃ heat shock group, the 50 mg·L^{-1} GA_3 group, the 1 μL·L^{-1} 1-MCP group, and finally the control group. Notably, both MT treatments significantly inhibited the degradation of chlorophyll a and total chlorophyll. Gene expression analysis showed that both MT groups and the 40 ℃ heat shock group significantly suppressed the relative expression levels of chlorophyll degradation-related genes (*PsNYC1*, *PsPAO*, *PsPAO1*, *PsPPH1* and *PsSGR1*) relative to the control. Regarding fruit quality, fruit firmness was markedly reduced by the 40 ℃ heat shock treatment but remained statistically unchanged in the other treatment groups. Furthermore, no significant difference in TSS content was observed among any of the treatments. By day 14, all treatments significantly reduced the content of malic acid and citric acid in the fruit flesh. Although both MT treatments significantly reduced fructose content, they had no significant effect on sucrose or glucose levels. No significant changes in sucrose, glucose or fructose content were observed in the remaining treatment groups. These results indicated that all treatments improved the internal quality of the fruit to a certain extent. In addition, all treatments significantly reduced the respiratory intensity and ethylene release rate during shelf storage. However, by day 14, only the 1-MCP treatment maintained a significantly lower ethylene release rate compared with the control, with no significant differences observed in the other groups.【Conclusion】GA_3, MT, heat shock and 1-MCP effectively delayed peel yellowing and maintained the internal fruit quality of Kuerlexiangli pear fruit during shelf storage. Notably, the 25 μmol·L^{-1} MT treatment showed the strongest effect on green color retention of Kuerlexiangli pear fruit.

Key words: Kuerlexiangli pear; Shelf life; Green color retention; Quality; Melatonin; Gibberellin; Heat shock; 1-MCP

库尔勒香梨（*Pyrus sinkiangensis*）为蔷薇科（Rosaceae）梨属（*Pyrus*）植物，是中国砂梨与西洋梨的杂交后代[1]，其色泽悦目、香气浓郁、酥脆爽口，有着“梨中珍品”和“果中王子”的美誉，是新疆当地农户增收的支柱产业之一[2]，也是中国特色梨果主要出口品种之一[3]。库尔勒香梨已被中欧双方认定为地理标志产品，在国内外市场上均享有较高声誉[4]。

为提高经济效益，约60%田间采收后的库尔勒香梨果实需通过冷库贮藏以供应11月至翌年5月的反季节市场[2]。反季节供应的果品需经过三个关键

环节来保持其良好的商品价值：首先，果实需迅速预冷并入库低温贮藏，以排除果实的田间热和呼吸热，延长果实的保鲜期；其次，果实出库后，需分级包装低温运输至各销售终端，以减少运输过程中果实的机械损伤及品质劣变；最后，在果实货架期，需提供适宜的低温贮藏环境，以保持果实最佳的销售状态[5]。尽管库尔勒地区已建立一定数量的预冷设施和冷藏保鲜库，但库尔勒香梨的冷链物流体系尚不完善[6]，专业的冷链运输车辆仍然不足，常温运输情况较为普遍[5]。目前销售终端也难以提供适宜的低温环境，仍以常温贮藏为主。因此，冷库贮藏后库尔勒香梨果实在货架期常面临果皮褪绿转黄、品质劣变快的问题，商品价值和市场竞争力也因此受到影响[7]。

关于库尔勒香梨贮藏期间的保绿技术已有较多研究。李忠等[8]研究表明，在−2~0 ℃、相对湿度90%~95%的低温高湿环境中贮藏，可有效延缓库尔勒香梨果皮的褪绿转黄进程。于宛婷等[9]发现1 μL·L^{-1} 1−甲基环丙烯（1-MCP）熏蒸处理能较好地维持库尔勒香梨的果面绿色和果柄新鲜度，并可有效延缓可滴定酸和维生素C含量的下降。贾晓辉等[10]研究表明，采用0.04 mm PE袋或PVC袋扎口包装库尔勒香梨，可在袋内维持14.5%~17.0%的O_2浓度和2.5%~3.0%的CO_2浓度，可实现在低温条件下对库尔勒香梨的良好保鲜效果。杭博[11]研究表明，控制气调环境中的O_2浓度在1%~3%、CO_2浓度低于3%，可较好地维持库尔勒香梨的果皮色泽和内在品质。此外，1.5%~2.0%壳聚糖涂膜[12-13]、10.7 mg·m^{-3}浓度臭氧[14]、7.5 kJ·m^{-2} UV-C辐照[15]以及20 μL·L^{-1} NO熏蒸[16]等处理措施，也均被证明能有效抑制采后库尔勒香梨果皮叶绿素的降解。尽管多种措施对库尔勒香梨起到较好的保绿效果，但多数存在设备要求高、成本高的缺点。此外，关于库尔勒香梨冷库出库后，果实在货架期的保绿措施研究更是鲜见报道。因此，探索成本低、操作简便、安全的保绿措施来延缓库尔勒香梨货架期果皮的褪绿转黄进程，对产业发展具有十分重要的意义。

赤霉素（gibberellin）是一种广泛存在于植物体内的天然生长调节剂，GA_3则是赤霉素家族中应用最广泛的一种。GA_3分解速率快，适宜浓度处理后，果蔬几乎无残留，在生产中已广泛应用[17]。研究表明GA_3可有效抑制Valencia橙[18]、海南绿橙[19]、云宁一号青柠[20]、Himsagar芒果[21]等果实的叶绿素降解。褪黑素（melatonin，MT，N-乙酰基-5-甲氧基色胺）是一种吲哚类色胺，属于内源性激素[22]。MT具有较强的抗氧化作用，能够通过与活性氧（ROS）互作清除自由基，是植物体内一种重要的抗氧化剂[23]。研究表明MT可促进果蔬残留农药的降解[24]，且能有效抑制南果梨[22]、Keitt芒果[25]等果实的叶绿素降解。热激处理是指将果实短时间内置于非致死高温中的一种物理保鲜方式。适宜的热激处理不仅可以杀死或抑制病原微生物，还可以调节果实生理生化代谢，并诱导其产生抗逆性[26]。多项研究表明热激处理可以抑制不同果实的叶绿素降解并延缓果实衰老，如45 ℃热空气处理大叶青香蕉12 min[27]、48 ℃热水处理Pichit 1青柠5 min[28]等均能有效延缓果皮的褪绿转黄进程。

基于上述三种处理在多种果实中展现出的保绿潜力，探究其对库尔勒香梨货架期品质的影响，并通过分析叶绿素降解途径中关键基因的表达水平来评估其保绿效应，具有重要的应用价值。目前，叶绿素降解途径已被充分阐明，Non-Yellow Coloring 1（*NYC1*）、Pheophorbide a Oxygenase（*PAO*）、Pheophytinase（*PPH*）、Stay-Green（*SGR*）等基因在此过程中发挥着关键调控作用[29-30]。Chl-b（叶绿素b）转化为Chl-a（叶绿素a）的过程通过两步酶促反应完成：NYC1及其同源基因NYC1-LIKE（NOL）编码的Chl-b还原酶催化Chl-b还原为7-羟甲基叶绿素a；7-羟甲基叶绿素a还原酶（HCAR）进一步催化将其完全转化为叶绿素a。后续叶绿素a经过SGR、PPH和PAO基因编码的三种酶依次作用，降解为红色叶绿素代谢物（Red Chl Catabolite，RCC）。PAO是催化叶绿素四吡咯环裂解的关键酶，直接导致绿色结构消失[31]。明确以上基因在特定采后处理下的表达规律，有助于从分子层面揭示不同处理发挥保绿效果的潜在机制。

本研究分别采用50 mg·L^{-1} GA_3、25 μmol·L^{-1} MT、75 μmol·L^{-1} MT、40 ℃热激和1 μL·L^{-1} 1-MCP处理冷库贮藏7个月的库尔勒香梨，系统评估对库尔勒香梨的保绿效果及内在品质的影响，并进一步分析叶绿素降解相关基因的表达特点，筛选最适的调控方式，以期为延缓库尔勒香梨货架期果皮褪绿转黄及品质劣变提供有效的技术参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料及处理

所用库尔勒香梨购自新疆维吾尔自治区库尔勒

市一管理良好的商业果园，果实于2024年9月18日采收，后于0~4 ℃冷库中贮藏7个月，2025年4月21日装箱，常温运输至浙江大学农业与生物技术学院果树科学研究所，运程4 d。挑选大小一致、着色均匀、无病虫害及机械损伤的果实作为试验材料进行以下处理（表1）。

表1　库尔勒香梨处理方式

Table 1　Treatments of Kuerlexiangli pear fruit

组别 Groups	处理方式 Treatments
对照 Control	室温单蒸水（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Soak in room-temperature single-distilled water (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes
处理组1 Treatment group 1	50 mg·L^{-1} GA_3（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Soak in 50 mg·L^{-1} GA_3 solution (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes
处理组2 Treatment group 2	25 μmol·L^{-1} MT（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Soak in 25 μmol·L^{-1} MT solution (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes
处理组3 Treatment group 3	75 μmol·L^{-1} MT（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Soak in 75 μmol·L^{-1} MT solution (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes
处理组4 Treatment group 4	40 ℃单蒸水（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Soak in 40 ℃ single-distilled water (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes
处理组5 Treatment group 5	1 μL·L^{-1} 1-MCP熏蒸24 h+室温单蒸水（含1%乙醇+0.1% Tween-20）浸泡10 min Fumigate with 1 μL·L^{-1} 1-MCP for 24 h, then soak in room-temperature single-distilled water (containing 1% ethanol and 0.1% Tween-20) for 10 minutes

将处理后的果实于避光阴凉处风干，后转移至人工气候室培养架上，于26 ℃、相对湿度80%条件下货架贮藏14 d。分别于处理前（即0 d）、处理后1、3、7、10、14 d拍照取样，所取果皮和果肉样品保存于−80 ℃冰箱中，用于后续指标测定。

试剂：GA_3（Solarbio，中国）、MT（源叶生物，中国）、1-MCP（AgroFresh Solutions，Inc.，美国）、无水乙醇（沪试，中国）、Tween-20（BBI，中国）。

试剂浓度（ρ，后同）的选择依据如下：50 mg·L^{-1} GA_3，参考南果梨研究中采用的有效保绿浓度[32]；MT设置25和75 μmol·L^{-1}两个浓度，依据南果梨相关研究[22]及结合前期预试验结果；40 ℃热激温度为前期预试验筛选所得最佳处理温度；1 μL·L^{-1} 1-MCP，参考库尔勒香梨研究中采用的有效保绿浓度[9]。

1.2　果皮色泽测定

果皮色泽（L^*、a^*和b^*）采用CHROMA METER CR-400（Konica Minolta，日本）手持色差仪测定，每个果实选取赤道线部位4个点进行测量，每组测定5个果实，3次生物学重复。

1.3　果皮叶绿素含量测定

果皮叶绿素含量的测定参照席宏康[33]的方法并稍作修改。称取0.1 g经液氮研磨的果皮粉末样品于2 mL离心管中，避光加入1 mL 80%丙酮溶液，充分涡旋后置于4 ℃避光条件下萃取24 h，其间摇晃数次。萃取完成后4 ℃、12 000 r·min^{-1}离心10 min，收集上清液。使用BioSpectrometer紫外分光光度计（Eppendorf，德国），以80%丙酮溶液作为空白调零，测定上清液在663、645 nm波长下的吸光值，根据公式计算果皮总叶绿素、叶绿素a和叶绿素b含量，每组设置3次生物学重复。

1.4　果实呼吸速率测定

果实呼吸速率的测定参照葛永红等[34]的方法并稍作修改。每组处理随机选择3个果实，置于1.8 L塑料盒中密封1 h，使用Check Point II O_2/CO_2分析仪（PBI Dansensor，丹麦）测定盒中O_2和CO_2体积分数，每个气体样品重复测定3次，以未放置果实的塑料盒中的O_2和CO_2体积分数为对照，根据公式计算果实呼吸速率，3次生物学重复。

1.5　果实乙烯释放速率测定

果实乙烯释放速率的测定参照Zhang等[35]的方法并稍作修改。每组处理随机选择3个果实，置于1.8 L塑料盒中密封1 h后抽取1 mL气体用于乙烯含量检测。乙烯释放量采用Agilent 7890B气相色谱仪（Agilent，美国）测定，炉温100 ℃、进样温度140 ℃、检测温度230 ℃。每个气体样品重复测定3次，3次生物学重复。

1.6　果实硬度测定

果实硬度采用TA-XT-Plus型质构仪（Stable Micro System，英国）检测，选用P5探头，测定果实的去皮硬度，测定深度为5 mm，测前、测中和测后的探头速度分别为20、1和20 mm·s^{-1}。每个果实测定赤道

线部位对称的2个点，每组测定5个果实，3次生物学重复。

1.7 果实可溶性固形物含量测定

可溶性固形物（TSS）含量采用便携式数字折射仪POCKET REFRACTMETER PAL-1（Atago，日本）进行测定，每个果实在赤道线部位对称的两个区域取样榨汁测定，取其平均值作为该果实的TSS含量，每组测定5个果实，3次生物学重复。

1.8 果实糖酸含量测定

果实葡萄糖、蔗糖、果糖、苹果酸和柠檬酸含量的测定参照彭麟等[36]的方法。

1.9 总RNA的提取和cDNA合成

总RNA的提取参照改良后的CTAB法[37]。总RNA浓度采用BioDrop分光光度计（Biochrom，Cambridge，英国）测定。使用HiScript Ⅳ All-in-One Ultra RT SuperMix for qPCR试剂盒（Vazyme，中国）进行RNA逆转录。

1.10 实时荧光定量PCR

使用ChamQ Universal SYBR qPCR Master Mix（Vazyme，中国）试剂盒，按照说明书进行实时荧光定量PCR试验。使用CFX Connect™ Real-Time PCR system（Bio-Rad，美国）仪器检测。检测程序如下：预变性95 ℃，3 min；40个循环的95 ℃，10 s和60 ℃，30 s。利用在线工具Primer3.0软件（https://www.ncbi.nlm.nih.gov/tools/primer-blast/）设计引物，引物序列见表2，其中*PsPAO*和*PsPAO1*为PAO（Pheophorbide a Oxygenase）家族的不同成员，基因的相对表达量采用$2^{-\Delta\Delta Ct}$法计算，3次生物学重复。

表2 叶绿素降解相关基因qPCR引物

Table 2 Real-time quantitative PCR primers for chlorophyll degradation-related genes

基因名称 Genes name	上游引物（5'−3'） Forward primer (5'−3')	下游引物（5'−3'） Reverse primer (5'−3')
PsACTIN	CCATCCAGGCTGTTCTCTC	GCAAGGTCCAGACGAAGG
PsNYC1	GAAGAAGGGAGGTGGGAGTG	GGCAGCAGATTGACAGACCT
PsPAO	GACGGGTGTGGATCATGTGT	TCTTGGAGACCGAACAGCAC
PsPAO1	TTTGTTAGAACCCCTGCTTGC	GAGACTTGAGACAGCGTCGT
PsPPH1	ACAGCTGCATAGGTTCCTCC	CTATTGCAATGGCGGAGCAG
PsSGR1	CCCCTTTGATCCCGTTGCAT	CTCTTCCATTTCTGGGGCTGT

1.11 数据分析

利用Microsoft Excel 2019（Microsoft，美国）进行数据处理与绘图，采用IBM SPSS statistics 26（IBM，美国）进行单因素方差检验（one-way ANOVA），若处理间差异达到显著水平（$P<0.05$），则进一步采用Duncan's新复极差法进行多重比较，并在图表中以不同小写字母标注组间的显著性差异。

2 结果与分析

2.1 不同处理方式对库尔勒香梨果皮色泽的影响

随着货架贮藏时间的延长，对照组库尔勒香梨的果皮逐渐褪绿转黄，在货架贮藏第7天即出现肉眼可见的黄化，至第10天黄化程度进一步加剧；GA_3、40 ℃热激和1-MCP处理组的果皮在第10天开始显现黄化表型，至第14天黄化程度加剧；25 μmol·L^{-1} MT（记为MT-1）和75 μmol·L^{-1} MT（记为MT-2）处理组的果皮在14 d贮藏期间均未出现明显的黄化现象（图1）。以上结果表明，本试验所用的处理方式均能有效延缓库尔勒香梨货架期果皮的褪绿转黄进程，两种不同浓度的MT处理效果最为显著。

*L**值反映亮度，值越大，果皮表面越亮，油腻化现象越严重；*a**值反映红绿色度，负值的绝对值越大，绿色越深；*b**值反映黄蓝色度，数值越低，黄色越弱[9]。如图2-A所示，在货架贮藏期间，对照组和40 ℃热激组的*L**值总体呈上升趋势，其他4组呈下降趋势，且对照组始终高于处理组。货架贮藏第10天，所有处理组的*L**值均显著低于对照；至第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的*L**值与对照相比分别降低了3.6%、3.6%、3.8%、1.1%和2.6%。这表明本试验所有处理方式均能有效延缓库尔勒香梨果皮*L**值的增加，减轻果皮的油腻化程度，且MT-2组处理的效果最突出。图2-B显示，库尔勒香梨果皮的*a**值在货架贮藏期间总体呈上升趋势，且对照组的*a**值始终高于处理组。货架贮藏7 d后，处理组的*a**值均显著低于对照。货架贮藏第14天，对照组的*a**值与0 d相比上升了5.83，GA_3、MT-1、

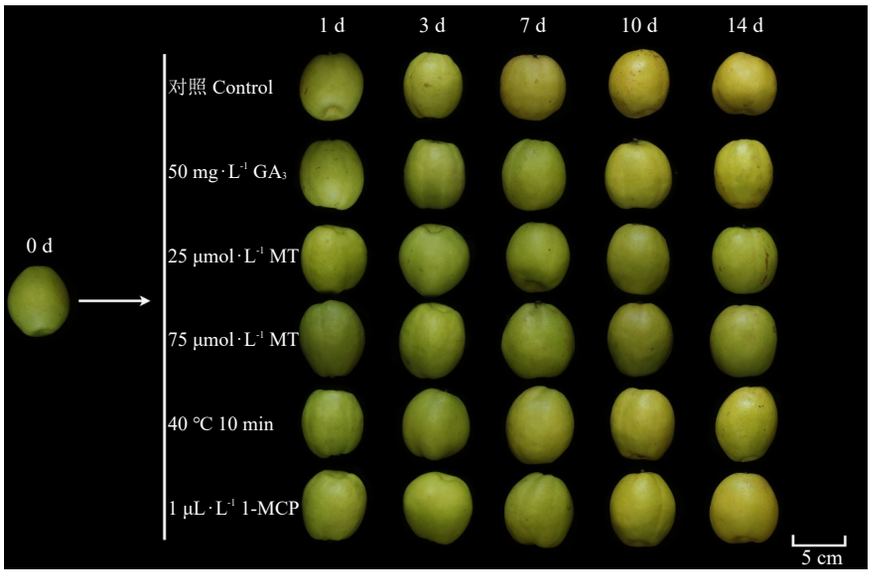
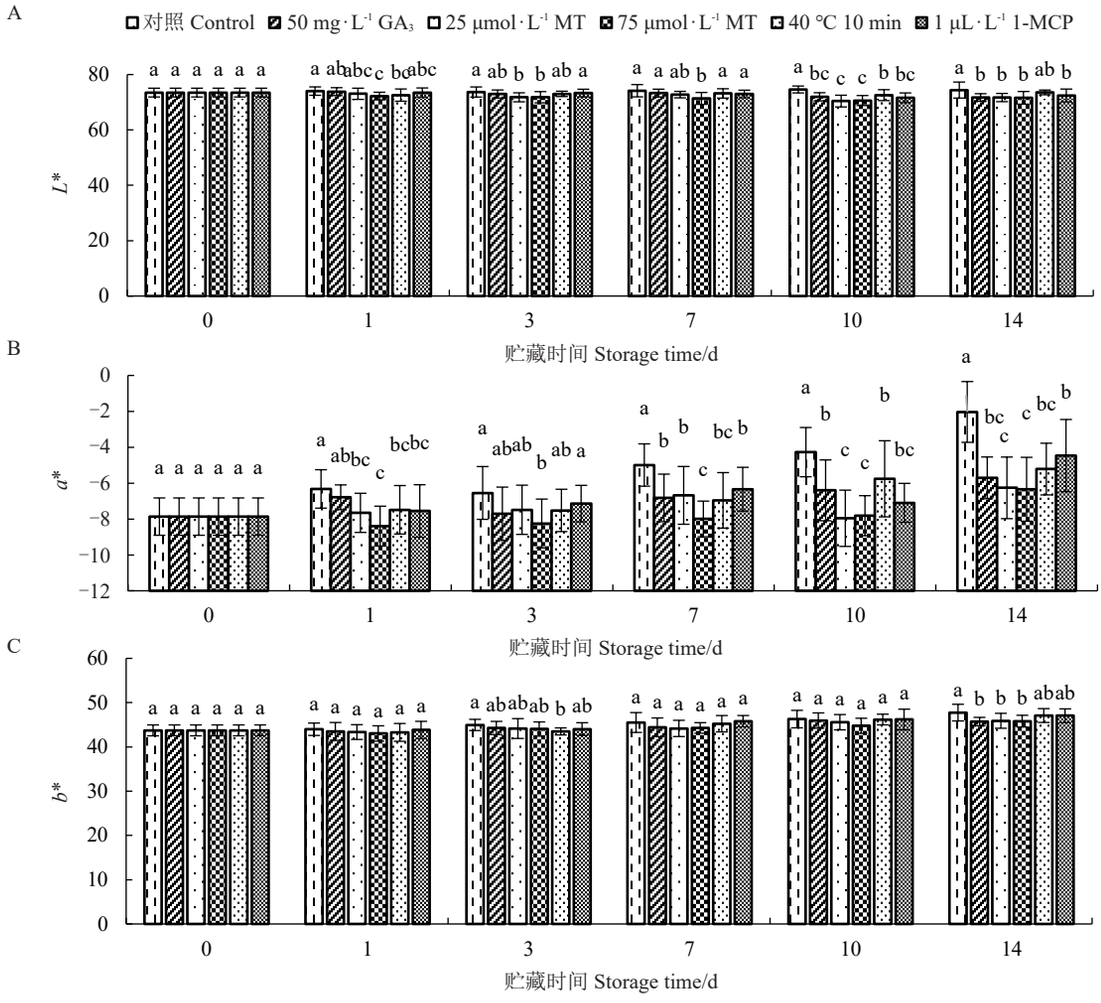


图 1　不同处理方式对库尔勒香梨果皮色泽的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on the peel color of Kuerlexiangli pear fruit



同一时间不同小写字母表示差异显著（$P < 0.05$）。下同。

Different small letters at the same time indicate significant differences ($P < 0.05$). The same below.

图 2　不同处理方式对库尔勒香梨果皮色差（*L**、*a**、*b**值）的影响

Fig. 2　Effects of different treatments on the peel color difference (*L, *a**, *b** values) of Kuerlexiangli pear fruit**

MT-2、40 ℃热激和1-MCP组*a**值的上升量分别为对照组的37.0%、27.5%、26.1%、45.4%和58.3%。这表明本试验的各处理方式均能有效延缓库尔勒香梨果皮*a**值增加，有利于保持果面绿色色泽，其中MT-2组处理效果最佳。从图2-C可见，库尔勒香梨果皮的*b**值在货架贮藏期间均呈上升趋势，且对照组的*b**值始终高于处理组。货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的*b**值与对照相比分别降低了4.2%、3.9%、4.0%、1.4%和1.5%，其中GA_3、MT-1和MT-2组显著低于对照，而其他两组与对照相比未达到显著水平。这表明本试验所用处理方式均能在一定程度上抑制库尔勒香梨果皮*b**值增大，延缓香梨果皮变黄，其中GA_3、MT-1和MT-2组处理效果较佳，40 ℃热激和1-MCP处理效果有限。

2.2 不同处理方式对库尔勒香梨果皮叶绿素含量的影响

如图3-A所示，货架贮藏期间，库尔勒香梨果皮的叶绿素a含量总体呈下降趋势，在货架贮藏7 d后，处理组的叶绿素a含量均高于对照。货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的叶绿素a含量分别为对照组的1.35、2.19、1.81、1.38和1.14倍，其中MT-1和MT-2组的叶绿素a含量显著高于对照，其他三组与对照相比未达到差异显著水平。图3-B显示，库尔勒香梨果皮的叶绿素b含量在货架贮藏期间也均呈下降趋势。在货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的叶绿素b含量分别为对照组的1.39、2.44、1.81、1.35和1.21倍，其中，MT-1组的叶绿素b含量显著高于对照，其他4组与对照相比未达到差异显著水平。从图3-C可见，库尔勒香梨果皮的总叶绿素含量在货架贮藏期间均呈下降趋势，货架贮藏7 d后，处理组的总叶绿素含量均高于对照。货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的总叶绿素含量分别为对照组的1.36、2.25、1.81、1.37和1.16

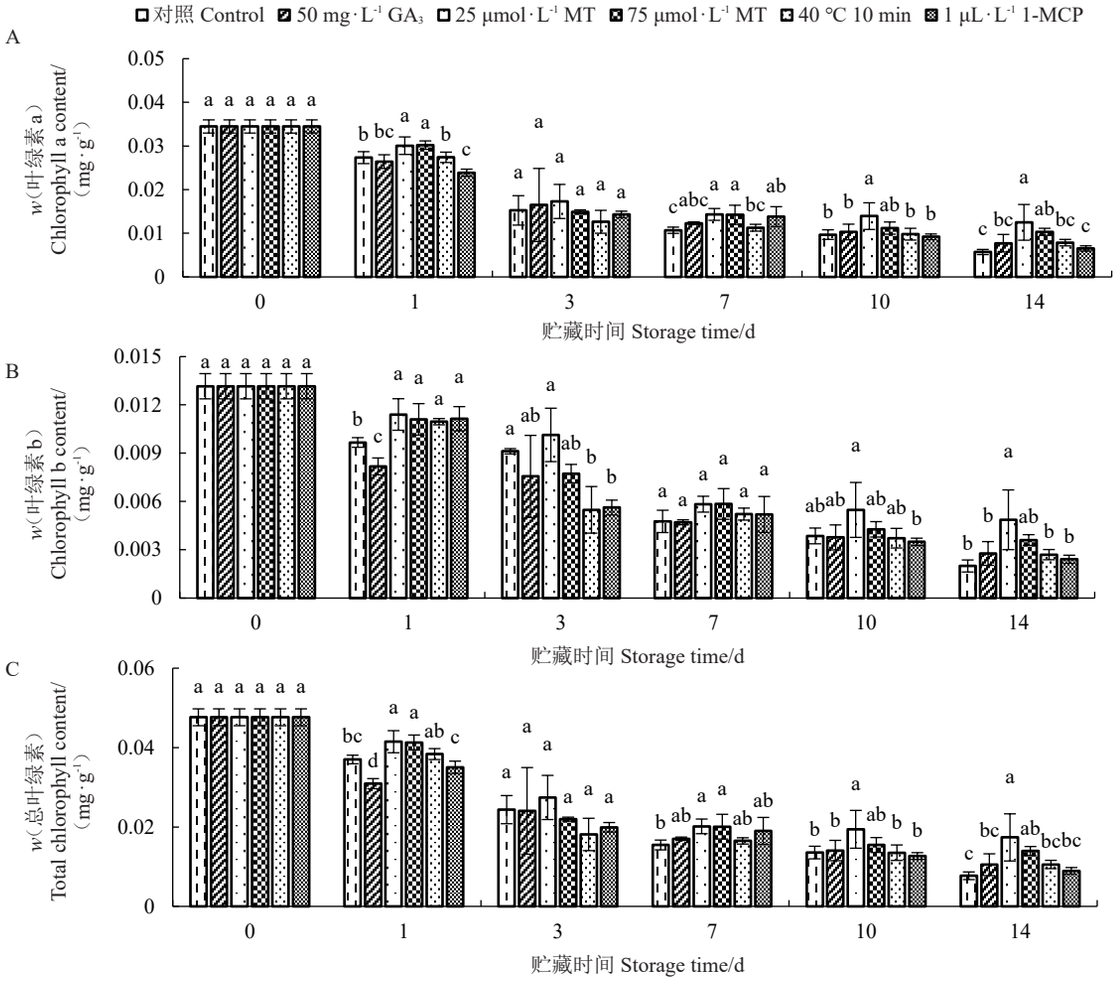


图3 不同处理方式对库尔勒香梨果皮叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on the chlorophyll content in the peel of Kuerlexiangli pear fruit

倍，其中，MT-1和MT-2组的总叶绿素含量显著高于对照，其他3组与对照相比未达到差异显著水平。上述结果表明，本试验所有处理方式均能在一定程度上延缓库尔勒香梨果皮叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量的下降，较好地保持果皮绿色色泽，其中MT-1组处理效果最佳。

2.3　不同处理方式对库尔勒香梨果皮叶绿素降解相关基因相对表达水平的影响

本试验中，由于MT-1、MT-2和40 ℃热激三个处理组库尔勒香梨果皮的叶绿素含量相对较高，因此选取此三组和对照组进行叶绿素降解相关基因*PsNYC1*（Non-Yellow Coloring 1）、*PsPAO*（Pheophorbide a Oxygenase）、*PsPAO1*（Pheophorbide a Oxygenase 1）、*PsPPH1*（Pheophytinase 1）、*PsSGR1*（Stay-Green 1）的相对表达水平分析。如图4-A所示，*PsNYC1*的相对表达量在货架贮藏期间总体呈先下降后上升的趋势。货架贮藏第14天，三组处理*PsNYC1*的相对表达水平均显著低于对照（分别降低了40.1%、39.4%和44.2%）。图4-B显示，货架贮藏期间对照组*PsPAO*的相对表达量总体呈先下降后上升的趋势，而其他三组则总体呈下降趋势。货架贮藏第14天，三组处理*PsPAO*的相对表达水平均显著低于对照（分别降低了62.8%、51.9%和60.5%）。图4-C显示，*PsPAO1*的相对表达量在货架贮藏期间总体呈先下降后上升的趋势。货架贮藏10 d后，三组处理*PsPAO1*的相对表达水平均显著低于对照；第14天，三组处理*PsPAO1*的相对表达水平与对照相比分别降低了53.4%、45.7%和43.0%。图4-D显示，MT-1组*PsPPH1*的相对表达量在货架贮藏期间总体呈下降趋势，而其他三组则总体呈先下降后上升的趋势。货架贮藏10 d后，三组处理*PsPPH1*的相对表达水平均显著低于对照；第14天，三组处理*PsPPH1*的相对表达水平与对照相比分别降低了65.6%、48.6%和56.2%。从图4-E可见，各组*PsSGR1*的相对表达量在货架贮藏期间总体呈先下降后上升的趋势。货架贮藏第10天，三组处理*PsSGR1*的相对表达水平均显著低于对照；至第14天，MT-1和MT-2组*PsSGR1*的相对表达水平仍显著低于对照，与对照相比分别降低了28.9%和40.8%，40 ℃热激组*PsSGR1*的相对表达水平与对照相比虽也有所降低，降低了12.7%，但无显著差异。上述结果表明，MT-1、MT-2和40 ℃热激处理均可通过下调库尔勒香梨货架贮藏期间叶绿素降解相关基因*PsNYC1*、*PsPAO*、*PsPAO1*、*PsPPH1*和*PsSGR1*的相对表达水平，延缓叶绿素的降解，较好地保持果面绿色。

2.4　不同处理方式对库尔勒香梨呼吸速率和乙烯释放速率的影响

如图5-A所示，随着货架贮藏时间的延长，库尔勒香梨的呼吸速率总体呈先下降后上升趋势，其中对照组和GA_3组在货架贮藏第7天出现呼吸高峰，1-MCP组在第10天出现呼吸高峰，MT-1组在第1天呼吸速率最高，其他2组则在第0天呼吸速率最高。与对照相比，MT-1（第7天）、MT-2（第7天）、40 ℃热激（第7天）、GA_3（第1、7天）和1-MCP（第3、7天）组均在相应时段内显著降低了果实的呼吸速率，这表明本试验所有处理方式均能在一定程度上降低库尔勒香梨货架贮藏期间果实的呼吸代谢水平，从而延缓果实的衰老进程。从图5-B可见，库尔勒香梨的乙烯释放速率在货架贮藏期间呈不同的变化趋势，对照组和40 ℃热激组总体呈先上升后下降的趋势，并分别在第3天和第1天出现释放高峰；其他四组则总体呈下降趋势，未出现明显的乙烯释放高峰。与对照相比，MT-1（第1、3、7、10天）、MT-2（第3、7、10天）、GA_3（第1、3天）、40 ℃热激（第3天）和1-MCP（第1、3、7、10、14天）组均在相应时段内显著降低了果实的乙烯释放速率，这表明本试验所有处理方式均能有效抑制库尔勒香梨果实的乙烯生成，尤以1-MCP处理效果最佳。

2.5　不同处理方式对库尔勒香梨果实硬度和可溶性固形物含量的影响

如图6-A所示，货架贮藏期间，库尔勒香梨的果实硬度总体呈下降趋势，其中40 ℃热激组的硬度在货架贮藏第14天显著低于对照，GA_3、MT-1、MT-2和1-MCP组与对照相比未出现显著差异，这表明40 ℃热激处理会在货架贮藏后期显著降低果实硬度，而其他处理对库尔勒香梨果实的硬度并无显著影响。从图6-B可见，库尔勒香梨的可溶性固形物含量在货架贮藏期间变化较小，其中1-MCP组仅在货架贮藏第3天显著高于对照，其他处理与对照相比未出现显著差异，这表明本试验所有处理对库尔勒香梨货架贮藏后期的可溶性固形物含量并无显著影响。

2.6　不同处理方式对库尔勒香梨果实糖酸含量的影响

随着货架贮藏时间的延长，库尔勒香梨果实的葡萄糖、蔗糖、果糖、苹果酸和柠檬酸含量总体均呈

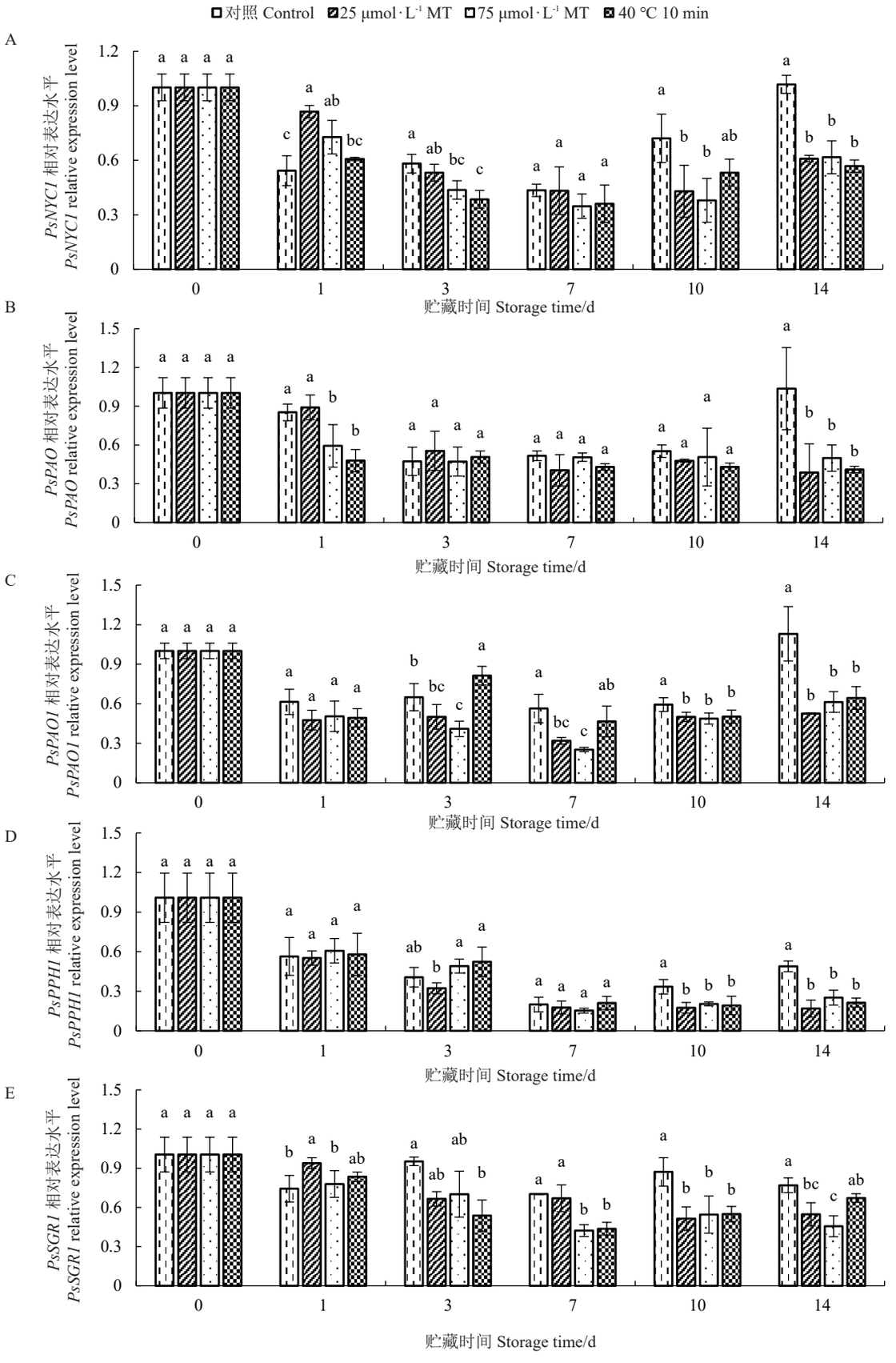


图 4 不同处理方式对库尔勒香梨果皮叶绿素降解相关基因相对表达水平的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on the relative expression levels of chlorophyll degradation-related genes in the peel of Kuerlexiangli pear fruit

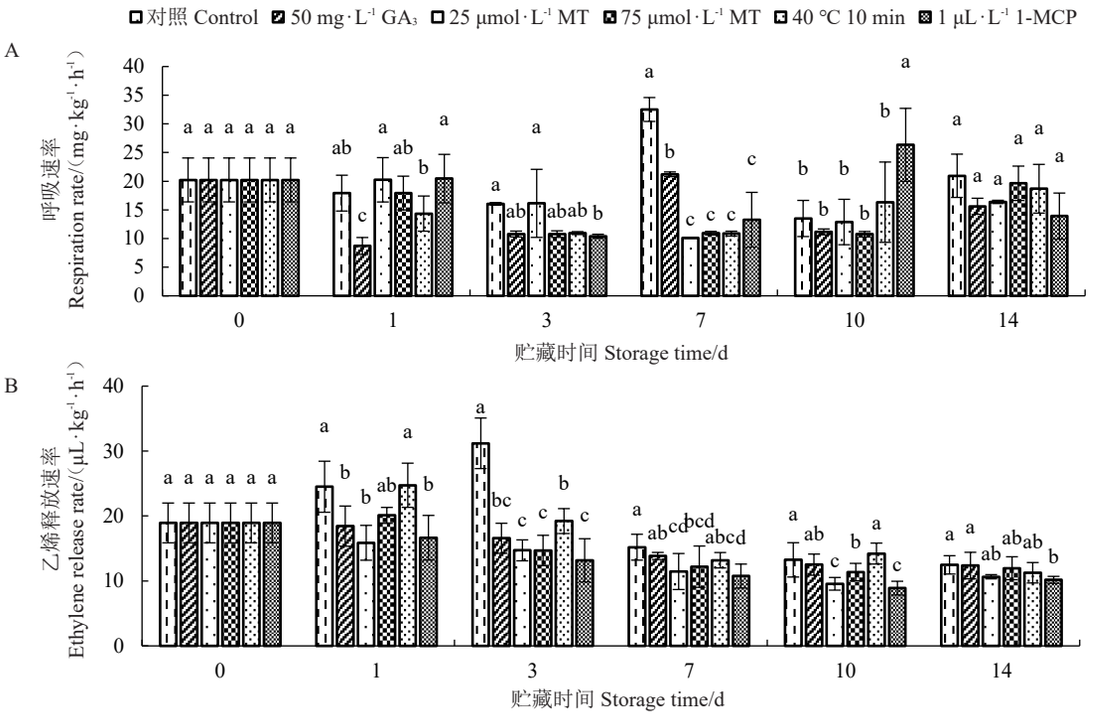


图 5　不同处理方式对库尔勒香梨呼吸速率和乙烯释放速率的影响

Fig. 5　Effects of different treatments on the respiration rate and ethylene release rate of Kuerlexiangli pear fruit

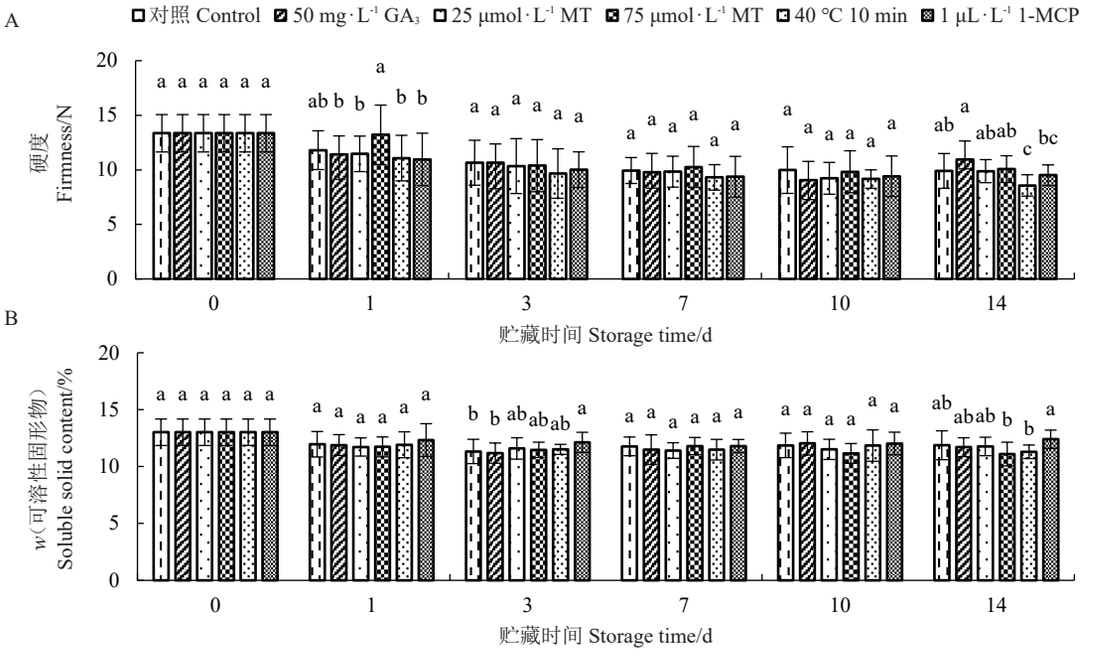


图 6　不同处理方式对库尔勒香梨硬度和可溶性固形物含量的影响

Fig. 6　Effects of different treatments on the firmness and total soluble solid content of Kuerlexiangli pear fruit

下降趋势（图7）。如图7-A所示，货架贮藏第10天，MT-1组的葡萄糖含量显著低于对照，GA_3组显著高于对照，但在第14天，所有处理组与对照相比均无显著差异。图7-B显示，在货架贮藏第10天，MT-1组的蔗糖含量显著低于对照；在货架贮藏第7、10天，MT-2和1-MCP组的蔗糖含量均显著低于对照；在货架贮藏第7天，GA_3组显著低于对照；在货架贮藏第1天，40 ℃热激组显著高于对照，而第7、10天显著低于对照；在第14天，所有处理组的蔗糖含量与对照相比均无显著差异。从图7-C可见，MT-1组

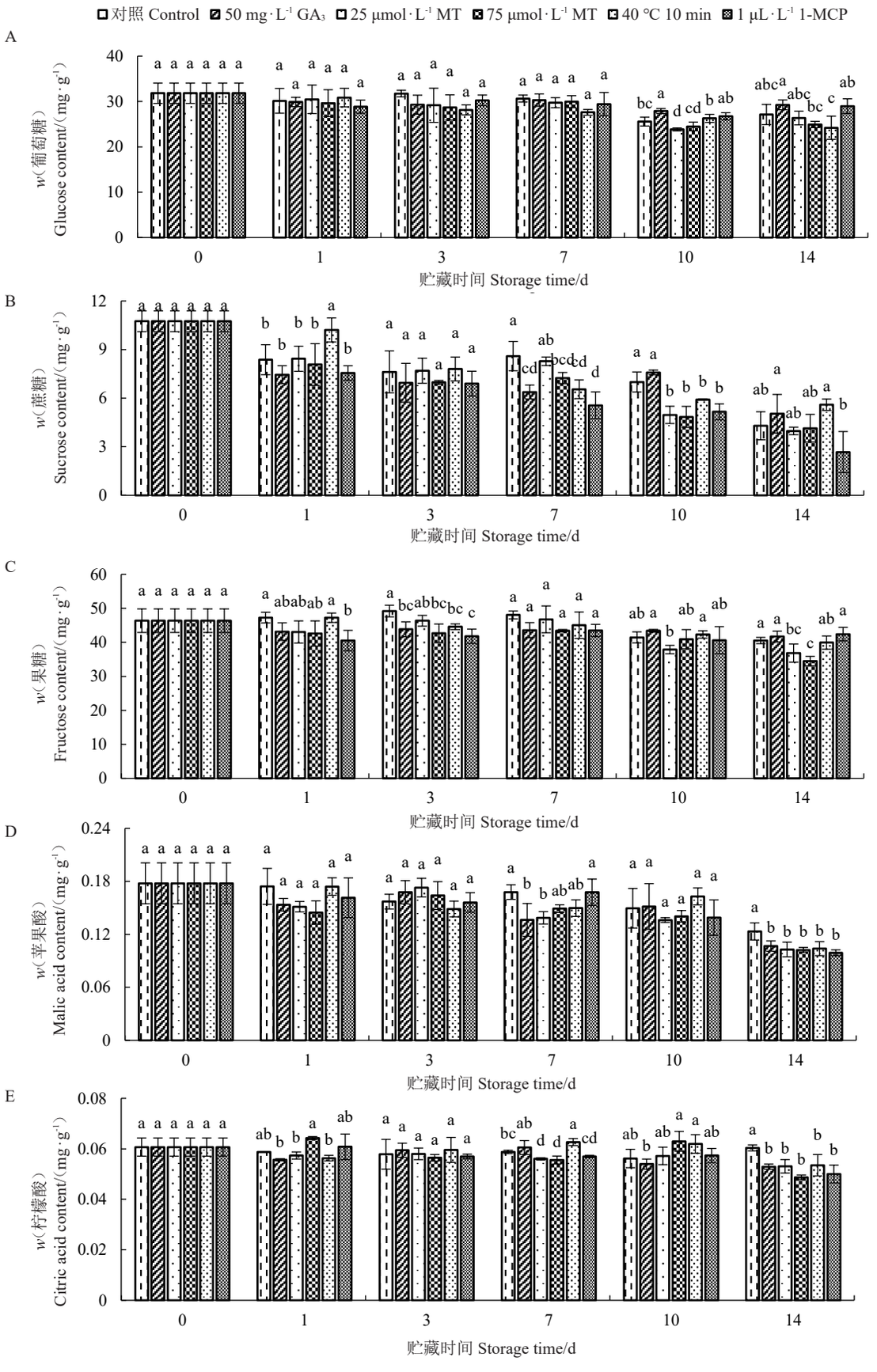


图 7 不同处理方式对库尔勒香梨果实糖酸含量的影响

Fig. 7 Effects of different treatments on the sugar and acid content of Kuerlexiangli pear fruit

的果糖含量在货架贮藏第10、14天显著低于对照，MT-2组在货架贮藏第3、14天显著低于对照，GA_3和40 ℃热激组在货架贮藏第3天显著低于对照，1-MCP组在货架贮藏第1、3天显著低于对照。上述结果表明，本试验所有处理方式均会在一定程度上降低库尔勒香梨货架贮藏期间蔗糖和果糖含量，但在货架贮藏第14天，除MT处理会显著降低库尔勒香梨的果糖含量外，其他处理对库尔勒香梨的葡萄糖、蔗糖和果糖含量均无显著影响。

图7-D显示，MT-1、GA_3组的苹果酸含量在货架贮藏第7、14天显著低于对照，MT-2、40 ℃热激和1-MCP组在货架贮藏第14天显著低于对照。货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的苹果酸含量与对照相比分别降低了13.4%、16.6%、17.0%、15.8%和19.6%。从图7-E可见，MT-1、MT-2组的柠檬酸含量在货架贮藏第7、14天显著低于对照，GA_3和1-MCP组在货架贮藏第14天显著低于对照，40 ℃热激组在货架贮藏第7天显著高于对照而在第14天显著低于对照。货架贮藏第14天，GA_3、MT-1、MT-2、40 ℃热激和1-MCP组的柠檬酸含量与对照相比分别降低了12.3%、12.1%、19.3%、11.4%和17.1%。上述结果表明，本试验所有处理方式均可有效降低库尔勒香梨货架贮藏期间的苹果酸和柠檬酸含量。

3　讨　论

3.1　不同处理对库尔勒香梨果实褪绿的抑制作用及其潜在机制

本研究的结果表明，GA_3、MT、40 ℃热激和1-MCP处理均可有效延缓库尔勒香梨果皮的褪绿转黄进程。25和75 μmol·L^{-1} MT处理可使果皮褪绿转黄时间推迟7 d左右，其他处理可推迟3 d左右。与高浓度（75 μmol·L^{-1}）MT处理相比，低浓度（25 μmol·L^{-1}）MT处理维持了果实更高的叶绿素含量。综合以上结果，25 μmol·L^{-1} MT处理为本研究中延缓库尔勒香梨果皮叶绿素降解的最佳处理方式。

前人研究表明，MT可显著抑制南果梨果皮色差*L**、*b**值的上升及延缓叶绿素降解[22]。Zhang等[38]发现MT有助于维持魁绿猕猴桃冷藏期间的外观品质并促进叶绿素积累。本研究发现MT不仅能显著抑制库尔勒香梨果皮色差（*L**、*a**、*b**值）参数的上升，延缓叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量的下降，还显著下调了叶绿素降解相关基因*PsNYC1*、*PsPAO*、*PsPAO1*、*PsPPH1*和*PsSGR1*的表达水平。推测MT可以通过调控叶绿素代谢通路相关基因的表达来延缓库尔勒香梨果皮的叶绿素降解，从而维持果皮绿色。此外，前人在Barafkhana印度番石榴、Ciban青椒上研究还发现，MT能通过增强果蔬的抗氧化系统以缓解贮藏胁迫，从而保持果实较高的叶绿素含量[39-40]。笔者推测MT在库尔勒香梨中亦可能通过类似的抗氧化机制发挥保绿作用，但具体分子机制尚待阐明。

GA_3、40 ℃热激和1-MCP处理均可在一定程度上延缓库尔勒香梨果皮色差（*L**、*a**、*b**）值的上升及叶绿素的降解，但效果均不如MT处理显著。前人研究表明，GA_3可通过调控Valencia橙、黄秋葵叶绿素降解相关基因的表达维持果实较高的叶绿素含量[18,41]。笔者推测GA_3在库尔勒香梨果实中也可能通过类似机制来维持果实的叶绿素含量，但具体通路尚待进一步解析。40 ℃热激处理通过下调叶绿素降解相关基因（*PsNYC1*、*PsPAO*、*PsPAO*1、*PsPPH1*和*PsSGR1*）的表达水平来延缓库尔勒香梨果皮的褪绿转黄进程，该结果与前人在小果野蕉[42]上的报道一致。此外，前人在Mandy甜椒[43]、小果野蕉[42]上的研究表明，适宜温度热处理可增强果实的抗氧化能力，减少活性氧积累，进而延缓叶绿素降解。笔者推测适宜温度的热激处理可能通过调控叶绿素代谢通路与增强抗氧化系统等多重途径，进而在延缓库尔勒香梨果皮叶绿素降解过程中发挥作用。1-MCP作为一种乙烯受体竞争性抑制剂，可通过阻断果实内源乙烯信号转导通路，延缓果实内源乙烯生成，抑制果实成熟与衰老[44]，目前已被证明对库尔勒香梨[9]、芥蓝[45]等多种果蔬起到较好的保绿效果。前人研究表明，1-MCP可通过同时调控乙烯的合成与信号转导、叶绿素降解途径来维持Comice梨果皮绿色色泽[46]。但值得注意的是，果实乙烯合成分为系统Ⅰ（基础型）和系统Ⅱ（自催化型）两个阶段，系统Ⅱ途径启动后，乙烯可通过信号转导通路进一步促进其合成，进而导致乙烯爆发式合成并加速果实衰老[47-48]。研究表明1-MCP在系统Ⅱ乙烯合成启动前施用效果最佳；若在系统Ⅱ途径启动后施用1-MCP，其保鲜效果显著降低[49]。本研究中，1-MCP处理延缓库尔勒香梨果皮褪绿转黄的效果有限，可能与试验所用材料为冷库贮藏7个月

的果实有关，其乙烯合成可能已进入系统Ⅱ阶段，导致1-MCP无法完全逆转已激活的衰老程序，这与张琪等[50]在新鲜采摘的库尔勒香梨果实中观察到的1-MCP显著的保绿效果有所不同。

本研究中，叶绿素降解相关基因的表达在货架贮藏期间总体呈先下降后上升的变化趋势，这与席宏康[33]报道的玉露香梨货架期间叶绿素降解相关基因表达持续上升的结果存在差异。这种差异可能与试验果实的状态相关，本研究所用库尔勒香梨为冷库贮藏7个月、又经4 d常温运输的果实，运输过程中的胁迫环境可能导致叶绿素降解相关基因的表达初始水平较高；果实运达实验室后，胁迫环境解除，基因表达短期下调；后续随着果实衰老，基因表达再次上调。叶绿素降解相关基因的表达变化与果实呼吸速率的变化相一致，表明叶绿素代谢的转录调控会受到果实整体生理状态、环境胁迫等多重因素影响，从而表现出动态的变化规律。

3.2 不同处理对库尔勒香梨果实内在品质的差异化影响

呼吸速率和乙烯释放速率是表征果实采后生理活动与衰老进程的重要指标[51-52]。本研究中，GA_3、MT、40 ℃热激和1-MCP处理均抑制了库尔勒香梨的呼吸速率和乙烯释放速率，这与前人在多种果实中的报道相一致。例如，外源GA_3可降低脆枣的呼吸速率和乙烯释放速率，推迟果实褐变和酒化[53]；MT可抑制华优猕猴桃的呼吸作用和乙烯生成，并维持较高的抗氧化酶活性[54]；热激处理可推迟湖景水蜜桃呼吸高峰的出现时间并减少乙烯释放[55]；1-MCP通过下调乙烯受体基因的表达抑制乙烯信号转导，从而降低玉露香梨的乙烯释放速率[56]。本研究中，40 ℃热激处理后的果实在贮藏第1天出现乙烯释放高峰，这与前人报道的高温环境解除后，ACS（1-氨基环丙烷-1-羧酸合成酶）和ACO（1-氨基环丙烷-1-羧酸氧化酶）酶活性迅速逆转导致短时间内乙烯快速合成的现象相符[57]。此外，GA_3、MT和1-MCP处理并未加速果实软化，而40 ℃热激处理则在贮藏后期显著加速了果实硬度的下降，这与呼吸强度和乙烯释放速率的结果相符。

本研究表明GA_3、MT、40 ℃热激和1-MCP处理在抑制库尔勒香梨褪绿的同时，还对果实的内在品质性状产生了影响。库尔勒香梨的可溶性固形物、可溶性糖和有机酸含量在贮藏期间总体均呈下降趋势，表明供试果实整体生理状态进入以分解代谢为主导的衰老阶段，这与赵晓梅等[58]发现的库尔勒香梨贮藏中后期营养物质作为呼吸底物被消耗的规律相符。在贮藏后期，不同处理对糖酸组成的影响则呈现明显分化。GA_3、40 ℃热激与1-MCP处理在维持可溶性糖水平的同时，显著降低了苹果酸与柠檬酸含量，这有助于提高糖酸比，可能对果实风味具有改善作用，这一结果与GA_3在Sumbei Black葡萄[59]、热激在Dixiland桃[60]、1-MCP在Kensington Pride芒果[61]上的研究类似。此外，MT处理对库尔勒香梨果实的内在品质则表现出独特的影响：在降低有机酸含量的同时，显著减少了果糖积累。前人研究表明，MT处理可降低玉露香梨的苹果酸与柠檬酸含量[62]，与本研究结果一致。羌脆李贮藏后期，MT能通过调控糖代谢相关酶的活性抑制果糖合成与促进果糖分解，最终减少果实中果糖的含量[63]。笔者推测MT可能在库尔勒香梨果实衰老阶段通过类似的酶活性调控机制以降低果糖的积累水平。综上所述，不同处理通过差异化的生理调控，在实现保绿目标的同时，对果实风味物质的组成与比例产生了差异化调节，这为采后处理技术的精准选择与优化提供了重要依据。

4 结 论

50 mg·L^{-1} GA_3、25 μmol·L^{-1} MT、75 μmol·L^{-1} MT、40 ℃热激和1 μL·L^{-1} 1-MCP处理均可有效延缓货架期间库尔勒香梨果皮叶绿素的降解，降低果实呼吸速率和乙烯释放速率，并减少果实中苹果酸和柠檬酸的含量。在糖代谢方面，货架贮藏后期，除两种不同浓度的MT处理显著降低果糖含量外，其余处理对葡萄糖、蔗糖和果糖含量均无显著影响。MT和40 ℃热激处理均通过显著下调叶绿素降解相关基因（*PsNYC1*、*PsPAO*、*PsPAO1*、*PsPPH1*、*PsSGR1*）的表达以抑制褪绿。其中，25 μmol·L^{-1} MT处理对库尔勒香梨的保绿效果最佳，可使果皮褪绿转黄时间推迟7 d左右。上述处理在延缓果皮褪绿转黄进程的同时，还能较好地保持果实的内在品质，对提升库尔勒香梨长期贮藏后的货架期品质具有重要意义。

参考文献 References：

[1] Teng Y W，Tanabe K，Tamura F，Itai A. Genetic relationships of pear cultivars in Xinjiang，China，as measured by RAPD markers[J]. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology，

2001，76(6)：771-779.

[2] 郭慧静，周樱子，程少波，翟顺杰，杨慧 . 新疆库尔勒香梨产业发展现状及前景展望[J]. 北方园艺，2025(4)：130-136.
Guo Huijing，Zhou Yingzi，Cheng Shaobo，Zhai Shunjie，Yang Hui. Development status and prospect of Korla Fragrant Pear industry in Xinjiang[J]. Northern Horticulture，2025(4)：130-136.

[3] 高启明，李疆，李阳 . 库尔勒香梨研究进展[J]. 经济林研究，2005，23(1)：79-82.
Gao Qiming，Li Jiang，Li Yang. Literature review of researches on ‘Kuerle sweet pear’[J]. Nonwood Forest Research，2005，23(1)：79-82.

[4] 刘秀秀，郭彦克，李惠霖，裴翌辰，吕旭芳，陈文禹，孙明豪，沈幸，柴仲平 . 库尔勒香梨特征风味研究进展[J]. 食品安全质量检测学报，2024，15(20)：149-156.
Liu Xiuxiu，Guo Yanke，Li Huilin，Pei Yichen，Lü Xufang，Chen Wenyu，Sun Minghao，Shen Xing，Chai Zhongping. Research progress of characteristic flavor of Korla fragrant pear[J]. Journal of Food Safety and Quality，2024，15(20)：149-156.

[5] 刘岩 . 库尔勒香梨冷链物流存在问题及对策研究[J]. 商场现代化，2025(2)：52-54.
Liu Yan. Research on the problems and countermeasures of cold chain logistics for Korla Fragrant Pears[J]. Market Modernization，2025(2)：52-54.

[6] 王秀梅，张峰，江振斌，侯丽丽，陈启民 . 库尔勒市香梨的市场营销现状及建议[J]. 落叶果树，2021，53(5)：46-49.
Wang Xiumei，Zhang Feng，Jiang Zhenbin，Hou Lili，Chen Qimin. The marketing status and suggestions of Korla fragrant pear[J]. Deciduous Fruits，2021，53(5)：46-49.

[7] 贾晓辉，王文辉，李世强，杜艳民，于强，张峰，何子顺 . 新疆库尔勒香梨贮藏保鲜情况调查[J]. 中国果树，2014(5)：75-78.
Jia Xiaohui，Wang Wenhui，Li Shiqiang，Du Yanmin，Yu Qiang，Zhang Feng，He Zishun. Investigation on the storage and preservation of Korla pear in Xinjiang[J]. China Fruits，2014(5)：75-78.

[8] 李忠，郭晓成，邓琴凤 . 库尔勒香梨冷库贮藏保绿技术[J]. 山西果树，2000(3)：16.
Li Zhong，Guo Xiaocheng，Deng Qinfeng. Green-keeping technology of Korla Fragrant Pear in cold storage[J]. Shanxi Fruits，2000(3)：16.

[9] 于宛婷，杭博，张鑫楠，杜艳民，王文辉，贾晓辉 . 1-MCP 处理对库尔勒香梨常温保绿效果和果实内在品质的影响[J]. 中国果树，2023(10)：13-18.
Yu Wanting，Hang Bo，Zhang Xinnan，Du Yanmin，Wang Wenhui，Jia Xiaohui. Effects of 1-MCP treatment on the green-keeping effect and internal quality of ‘Korla fragrant pear’ at normal temperature[J]. China Fruits，2023(10)：13-18.

[10] 贾晓辉，王文辉，佟伟，杜艳民，王志华，姜修成 . 自发气调包装对库尔勒香梨采后生理及贮藏品质的影响[J]. 中国农业科学，2016，49(24)：4785-4796.
Jia Xiaohui，Wang Wenhui，Tong Wei，Du Yanmin，Wang Zhihua，Jiang Xiucheng. Effect of modified atmosphere packaging on postharvest physiology and quality of ‘Korla Xiangli’ pears during storage[J]. Scientia Agricultura Sinica，2016，49(24)：4785-4796.

[11] 杭博 . 不同 O_2、CO_2 组分和 C_2H_4 对库尔勒香梨采后生理与品质的影响[D]. 北京：中国农业科学院，2015.
Hang Bo. Effects of different components of O_2，CO_2 and C_2H_4 on postharvest physiology and quality of Korla Fragrant Pear[D]. Beijing：Chinese Academy of Agricultural Sciences，2015.

[12] 单春会，童军茂，唐凤仙 . 常温下壳聚糖涂膜保鲜库尔勒香梨的研究[J]. 食品研究与开发，2010，31(2)：186-189.
Shan Chunhui，Tong Junmao，Tang Fengxian. Study on the preservation of Kuerle Fragrant Pear by chitosan film at room temperature[J]. Food Research and Development，2010，31(2)：186-189.

[13] 傅乐峰，郑柏存，沈军 . 壳聚糖涂膜保鲜香梨的研究[J]. 食品工业，2005，26(2)：57-58.
Fu Lefeng，Zheng Baicun，Shen Jun. Study on chitosan coating preservation of pears[J]. The Food Industry，2005，26(2)：57-58.

[14] 张佳楠，纪海鹏，董成虎，关军锋，肖建中，王志伟，陈存坤 . 臭氧处理对贮藏后期库尔勒香梨贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工，2020，20(3)：12-17.
Zhang Jianan，Ji Haipeng，Dong Chenghu，Guan Junfeng，Xiao Jianzhong，Wang Zhiwei，Chen Cunkun. Effect of ozone treatments on storage quality of Korla pear in late storage period[J]. Storage and Process，2020，20(3)：12-17.

[15] 黄玲，马晶，李学文，马晓海，赵武林，王洪伟 . UV-C 处理对库尔勒香梨贮藏品质和生理的影响[J]. 新疆农业大学学报，2011，34(5)：410-413.
Huang Ling，Ma Jing，Li Xuewen，Ma Xiaohai，Zhao Wulin，Wang Hongwei. Effects of UV-C treatments on storage qualities and physiology of Korla Fragrant Pears[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University，2011，34(5)：410-413.

[16] 郑素慧 . 一氧化氮熏蒸对库尔勒香梨采后品质及黑斑病抗性的影响[D]. 乌鲁木齐：新疆农业大学，2023.
Zheng Suhui. Effect of nitrous oxide fumigation on postharvest quality and black spot disease resistance of Korla Fragrant Pear[D]. Urumqi：Xinjiang Agricultural University，2023.

[17] 叶倩，朱富伟，陈汉才，李桂花，黄健祥，黄聪灵，孙玲 . 赤霉素对苋菜产量和营养品质的影响及其残留研究[J]. 中国农学通报，2018，34(18)：65-70.
Ye Qian，Zhu Fuwei，Chen Hancai，Li Guihua，Huang Jianxiang，Huang Congling，Sun Ling. *Amaranthus tricolor*：Effect of GA_3 on yield and nutritional quality and its residue dynamic[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin，2018，34(18)：65-70.

[18] Torimoto C，Ma G，Deng Z W，Zhang L C，Yahata M，Ojima S，Kato M. Effects of exogenous gibberellic acid on chlorophyll metabolism of Sudachi (*Citrus sudachi* Hort.) after harvest[J]. Postharvest Biology and Technology，2025，225：113476.

[19] 陈婷 . 海南绿橙保鲜技术研究[D]. 海口：海南大学，2012.
Chen Ting. Study on storage techniques of Hainan green orange[D]. Haikou：Hainan University，2012.

[20] Zhou X Y，Zhang B R，Duan M X，Yan S Y，Shi W B，Zhu Z F，Zhang H Y，Yue J Q，Xu R W，Guo L N，Zhu F，Du Y X，Gao J Y，Cheng Y J. Integrated transcriptomics and metabolomics reveal the mechanisms of postharvest uneven degreening of green lemon[J]. Postharvest Biology and Technology，2024，216：113072.

[21] Siddiqui M W，Dutta P，Dhua R S，Dey A. Changes in biochemi-

cal composition of mango in response to pre-harvest gibberellic acid spray[J]. Agriculturae Conspectus Scientificus (ACS), 2013, 78(4): 331-335.

[22] 刘佳欣, 李灿婴, 蒋超男, 李伊涵, 程园, 葛永红 . 外源褪黑素对‘南果梨’果实贮藏品质和细胞壁降解酶的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 155-162.
Liu Jiaxin, Li Canying, Jiang Chaonan, Li Yihan, Cheng Yuan, Ge Yonghong. Effects of exogenous melatonin on storage quality and cell wall-degrading enzymes of ‘Nanguo’ pears[J]. Food Science, 2022, 43(13): 155-162.

[23] Byeon Y, Tan D X, Reiter R J, Back K. Predominance of 2-hydroxymelatonin over melatonin in plants[J]. Journal of Pineal Research, 2015, 59(4): 448-454.

[24] 王岩, 彭强, 赵小明, 尹恒 . 生物降解农药残留的研究进展[J]. 中国农学通报, 2021, 37(18): 117-124.
Wang Yan, Peng Qiang, Zhao Xiaoming, Yin Heng. Pesticide residues biodegradation: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(18): 117-124.

[25] Dong J X, Kebbeh M, Yan R, Huan C, Jiang T J, Zheng X L. Melatonin treatment delays ripening in mangoes associated with maintaining the membrane integrity of fruit exocarp during postharvest[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 169: 22-28.

[26] Moreno A S, Perotti V E, Margarit E, Bello F, Vázquez D E, Podestá F E, Tripodi K E J. Metabolic profiling and quality assessment during the postharvest of two tangor varieties subjected to heat treatments[J]. Postharvest Biology and Technology, 2018, 142: 10-18.

[27] 欧利叶, 彭永宏, 李玲, 潘瑞炽 . 热空气处理对香蕉果实生理变化的影响[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 139-142.
Ou Liye, Peng Yonghong, Li Ling, Pan Ruichi. Effect of hot air treatment on pigment content, respiration and ethylene evolution in bananas *Musa aeuminate* cv. Dayeqing[J]. Acta Horticulturae Sinica, 1998, 25(2): 139-142.

[28] Kaewsuksaeng S, Nomura M, Shigyo M, Yamauchi N. Suppression of chlorophyll breakdown and quality changes by hot water treatment of ‘Pichit 1’ lime (*Citrus aurantifolia* Swingle) fruit[J]. The Horticulture Journal, 2019, 88(4): 541-547.

[29] Kuai B K, Chen J Y, Hörtensteiner S. The biochemistry and molecular biology of chlorophyll breakdown[J]. Journal of Experimental Botany, 2018, 69(4): 751-767.

[30] Shen X C, Tang X Y, Dong H Y, Yan X, Lou H D, Xu Y N, Bao S H, Wang P W, Sun X P, Gong J L. Transcription factor FcrNAC22 regulates chlorophyll catabolic genes to accelerate de-greening in kumquat fruit[J]. Plant, Cell & Environment, 2026, 49(2): 670-684.

[31] Casajús V, Bárcena A, Martínez G, Costa L. Pulses of low-intensity red light inhibit the expression of chlorophyll degradation genes during postharvest senescence of kale leaves[J]. Molecular Biology Reports, 2025, 52: 903.

[32] 吕静祎, 商馥兰, 张梦媛, 葛永红, 励建荣, 李灿婴, 孟坤 . 赤霉素处理对南果梨贮藏品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(24): 282-286.
Lü Jingyi, Shang Fulan, Zhang Mengyuan, Ge Yonghong, Li Jianrong, Li Canying, Meng Kun. Effects of gibberellic acid treatment on storage quality of Nanguo pear[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(24): 282-286.

[33] 席宏康 . 不同 CO_2 浓度对‘玉露香梨’采后品质的影响及保绿机理研究[D]. 太谷: 山西农业大学, 2023.
Xi Hongkang. Effects of different CO_2 concentrations on postharvest quality of ‘Yuluxiang pear’ and its green-keeping mechanism[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2023.

[34] 葛永红, 魏美林, 李灿婴, 陈延儒, 唐琦, 段斌, 李雪 . 苯并噻重氮对南果梨果实贮藏品质的影响[J]. 渤海大学学报(自然科学版), 2017, 38(4): 311-315.
Ge Yonghong, Wei Meilin, Li Canying, Chen Yanru, Tang Qi, Duan Bin, Li Xue. Effects of benzothiadiazole on the quality of Nanguo pear fruits during storage[J]. Journal of Bohai University (Natural Science Edition), 2017, 38(4): 311-315.

[35] Zhang D, Qian M J, Yu B, Teng Y W. Effect of fruit maturity on UV-B-induced post-harvest anthocyanin accumulation in red Chinese sand pear[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35(9): 2857-2866.

[36] 彭麟, 周超华, 倪隽蓓, 白松龄, 滕元文 . 两种树形对梨果实品质影响的初步研究[J]. 中国南方果树, 2022, 51(2): 154-159.
Peng Lin, Zhou Chaohua, Ni Juanbei, Bai Songling, Teng Yuanwen. Preliminary study on the effect of two tree shapes on the quality of pear fruit[J]. South China Fruits, 2022, 51(2): 154-159.

[37] Zhang D, Yu B, Bai J H, Qian M J, Shu Q, Su J, Teng Y W. Effects of high temperatures on UV-B/visible irradiation induced postharvest anthocyanin accumulation in ‘Yunhongli No. 1’ (*Pyrus pyrifolia* Nakai) pears[J]. Scientia Horticulturae, 2012, 134: 53-59.

[38] Zhang Y T, Tang H L, Lei D Y, Zhao B, Zhou X, Yao W T, Fan J M, Lin Y X, Chen Q, Wang Y, Li M Y, He W, Luo Y, Wang X R, Tang H R, Zhang Y. Exogenous melatonin maintains postharvest quality in kiwiberry fruit by regulating sugar metabolism during cold storage[J]. LWT, 2023, 174: 114385.

[39] Menaka M, Asrey R, Meena N K, Vargheese E, Sethi S, Vinod B R, Ahamad S, Goswami A K. Effect of melatonin on biochemical changes, antioxidant system and oxidative membrane damage of Indian guava (cv. Barafkhana) during cold storage[J]. South African Journal of Botany, 2024, 169: 95-108.

[40] Wang L Y, Shen X M, Chen X M, Ouyang Q L, Tan X L, Tao N G. Exogenous application of melatonin to green horn pepper fruit reduces chilling injury during postharvest cold storage by regulating enzymatic activities in the antioxidant system[J]. Plants, 2022, 11(18): 2367.

[41] Xiao X, Yang M J, Dong W Q, Zhou C J, Shi L Y, Chen W, Cao S F, Yang Z F, Li S S. Gibberellic acid inhibited chlorophyll degradation in post-harvest okras[J]. Postharvest Biology and Technology, 2022, 190: 111951.

[42] Si J, Fan Y Y, Liu Z L, Wei W, Xiao X M, Yang Y Y, Shan W, Kuang J F, Lu W J, Fan Z Q, Li L L, Chen J Y. Comparative transcriptomic analysis reveals the potential mechanism of hot water treatment alleviated-chilling injury in banana fruit[J]. Food Research International, 2022, 157: 111296.

[43] 张姿 . 蔬菜采后热处理抗氧化机理的研究[D]. 天津：天津大学，2007.
Zhang Zi. Study on antioxidative mechanism of vegetables by postharvest heat treatment[D]. Tianjin：Tianjin University，2007.

[44] 苏小军，蒋跃明 . 新型乙烯受体抑制剂 1-甲基环丙烯在采后园艺作物中的应用[J]. 植物生理学通讯，2001，37(4)：361-364.
Su Xiaojun，Jiang Yueming. Application of a new inhibitor of ethylene perception，1-methylcyclopropene in postharvest horticultural crops[J]. Plant Physiology Communications，2001，37(4)：361-364.

[45] 张四普，邓楠茜，胡青霞，鲁云风，牛佳佳 . 柠檬酸和植酸结合 1-MCP 复合保鲜处理对芥蓝常温贮藏品质的影响[J]. 中国瓜菜，2021，34(5)：57-63.
Zhang Sipu，Deng Nanxi，Hu Qingxia，Lu Yunfeng，Niu Jiajia. Effects of citric acid and phytic acid combined with 1-MCP on storage quality of kale at room temperature[J]. China Cucurbits and Vegetables，2021，34(5)：57-63.

[46] Zhao J，Xie X B，Wang S S，Zhu H L，Dun W W，Zhang L Z，Wang Y，Fang C B. 1-Methylcyclopropene affects ethylene synthesis and chlorophyll degradation during cold storage of ‘Comice’ pears[J]. Scientia Horticulturae，2020，260：108865.

[47] Barry C S，Giovannoni J J. Ethylene and fruit ripening[J]. Journal of Plant Growth Regulation，2007，26(2)：143.

[48] Liu M C，Pirrello J，Chervin C，Roustan J P，Bouzayen M. Ethylene control of fruit ripening：Revisiting the complex network of transcriptional regulation[J]. Plant Physiology，2015，169(4)：2380-2390.

[49] Blankenship S M，Dole J M. 1-methylcyclopropene：A review[J]. Postharvest Biology and Technology，2003，28(1)：1-25.

[50] 张琪，李宗航，雷雅馨，黄帅，贾美惠，张蔓蔓，陈海欣，王静 . 1-MCP 对近冰温贮藏库尔勒香梨采后品质与霉腐病影响的研究[J]. 核农学报，2025，39(10)：2215-2226.
Zhang Qi，Li Zonghang，Lei Yaxin，Huang Shuai，Jia Meihui，Zhang Manman，Chen Haixin，Wang Jing. Study on the effect of 1-MCP on post-harvest quality and moldy rot of Korla balsam pear stored at near-freezing temperature[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences，2025，39(10)：2215-2226.

[51] 员丽苹 . O_2/CO_2 主动自发气调对蒜薹保鲜效果的影响[D]. 淄博：山东理工大学，2019.
Yun Liping. Effects of O_2/CO_2 active modified atmospheres packaging on quality of garlic bolts[D]. Zibo：Shandong University of Technology，2019.

[52] 岳晴，李瑞，李岑，李佳琪，任小林，刘翠华 . ‘瑞雪’苹果果实采后低温贮藏条件下食用品质评价[J]. 保鲜与加工，2025，25(9)：1-14.
Yue Qing，Li Rui，Li Cen，Li Jiaqi，Ren Xiaolin，Liu Cuihua. Evaluation of edible quality of ‘Ruixue’ apple under postharvest storage at low-temperature[J]. Storage and Process，2025，25(9)：1-14.

[53] 薛梦林，张平，张继澍，王莉 . ‘脆枣’采后赤霉素处理对其生理生化的影响[J]. 园艺学报，2003，30(2)：147-151.
Xue Menglin，Zhang Ping，Zhang Jishu，Wang Li. Effect of postharvest treatment with GA_3 on physiological and biochemical changes of ‘Cui jujube’ fruit during cold storage[J]. Acta Horticulturae Sinica，2003，30(2)：147-151.

[54] 胡苗，李佳颖，饶景萍 . 褪黑素处理对采后猕猴桃果实后熟衰老的影响[J]. 食品科学，2018，39(19)：226-232.
Hu Miao，Li Jiaying，Rao Jingping. Effect of melatonin on ripening and senescence of postharvest kiwifruits[J]. Food Science，2018，39(19)：226-232.

[55] 周涛，许时婴，王璋，孙大文 . 热激处理及贮藏温度对水蜜桃果实生理生化变化的影响[J]. 中国南方果树，2003，32(2)：39-44.
Zhou Tao，Xu Shiying，Wang Zhang，Sun Dawen. Effects of hot treatment and storage temperature on physiological and biochemical changes in peach fruits[J]. South China Fruits，2003，32(2)：39-44.

[56] 马风丽，杜艳民，王阳，佟伟，刘佰霖，王文辉，贾晓辉 . 1-MCP 对‘玉露香’梨采后果实品质和叶绿素保持的影响[J]. 园艺学报，2019，46(12)：2299-2308.
Ma Fengli，Du Yanmin，Wang Yang，Tong Wei，Liu Bailin，Wang Wenhui，Jia Xiaohui. Effect of 1-methylcyclopropene (1-MCP) on quality and chlorophyll maintenance of postharvest ‘Yuluxiang’ pear[J]. Acta Horticulturae Sinica，2019，46(12)：2299-2308.

[57] Sharma M，Negi S，Kumar P，Srivastava D K，Choudhary M K，Irfan M. Fruit ripening under heat stress：The intriguing role of ethylene-mediated signaling[J]. Plant Science，2023，335：111820.

[58] 赵晓梅，叶凯，吴玉鹏，章世奎，倪建文，徐乐 . 1-MCP 处理对库尔勒香梨贮藏品质和生理效应的影响初报[J]. 食品工业，2012，33(1)：94-98.
Zhao Xiaomei，Ye Kai，Wu Yupeng，Zhang Shikui，Ni Jianwen，Xu Le. Effect preliminary report of 1-MCP on Pyrus bretschneideri Rehd storage quality and physiological function[J]. The Food Industry，2012，33(1)：94-98.

[59] Zhou Y Z，Cheng Y X，Zhong R，Tang J，Pervaiz T，Zhou S H，Liu J B，Wang B，Jia H F. Brassinolide and gibberellin promote grape fruit development and quality[J]. Scientia Horticulturae，2024，338：113619.

[60] Lara M V，Borsani J，Budde C O，Lauxmann M A，Lombardo V A，Murray R，Andreo C S，Drincovich M F. Biochemical and proteomic analysis of ‘Dixiland’ peach fruit (*Prunus persica*) upon heat treatment[J]. Journal of Experimental Botany，2009，60(15)：4315-4333.

[61] Alkenes. Study results from university of agriculture update understanding of alkenes (Role of 1-MCP in regulating ‘Kensington Pride’ mango fruit softening and ripening)[J]. Chemicals & Chemistry，2016.

[62] Zhao L L，Yan S，Wang Y F，Xu G X，Zhao D Y. Evaluation of the effect of preharvest melatonin spraying on fruit quality of ‘Yuluxiang’ pear based on principal component analysis[J]. Foods，2023，12(18)：3507.

[63] Xiao Y Y，Wu Y X，Huang Z Y，Guo M X，Zhang L，Luo X，Xia H，Zhang X L，Liang D，Lv X L，Wang J，Lin L J. Mechanism of induced soluble sugar accumulation and organic acid reduction in plum fruits by application of melatonin[J]. BMC Plant Biology，2024，24：1208.