

1-MCP与MT联合处理对芒果保鲜效果的影响

袁芳¹, 黎文卓², 王春艳^{1*}, 李丽^{3,4}, 李志红¹

(1. 广西民族师范学院化学与生物工程学院, 广西崇左 532200)(2. 崇左市食品药品检验所, 广西崇左 532200)(3. 广西农业科学院农产品加工研究所, 广西南宁 530007)
(4. 广西果蔬贮藏与加工新技术重点实验室, 广西南宁 530007)

摘要: 为探究 1-甲基环丙烯(1-MCP)与褪黑素(MT)联合处理对芒果保鲜效果的影响, 该研究用 0.1 mg/L 1-MCP 和 0.2 mmol/L MT 联合处理芒果后, 于 25 °C 贮藏 10 d, 每 2 d 取样测定相关指标。结果显示: 1-MCP 和 MT 联合处理可以延缓芒果果皮叶绿素降解和类胡萝卜素含量升高, 在贮藏第 10 天, 处理组的果皮叶绿素为 0.078 mg/g, 是对照组的 5.27 倍; 延缓了果肉 L^* 值的下降和 a^* 、 b^* 值的升高, 抑制原果胶降解和可溶性果胶含量的升高, 贮藏第 6 天处理组的原果胶含量比对照高 2.53 倍, 而可溶性果胶含量比对照低 44.04%, 同时在贮藏前期显著抑制了多聚半乳糖醛酸酶(PG)和纤维素酶(Cx)活性, 降低了 β -半乳糖苷酶(β -Gal)活性, 并且维持了果肉更完整的细胞结构, 但果肉类黄酮含量在贮藏中期显著低于对照。综上, 1-MCP 和 MT 联合处理保持了芒果良好的外观品质, 延缓了细胞壁物质的降解, 提高了货架期品质。

关键词: 1-MCP; MT; 芒果; 果胶; 细胞壁降解酶

文章编号: 1673-9078(2024)09-219-225

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.9.1015

Freshness-preserving Effects of 1-methylcyclopropene and Melatonin Treatment on Mango Fruit

YUAN Fang¹, LI Wenzhuo², WANG Chunyan^{1*}, LI Li^{3,4}, LI Zhihong¹

(1.College of Chemistry and Biological Engineering, Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo 532200, China)
(2.Chongzuo Institute for Food and Drug Control, Chongzuo 532200, China)(3.Agro-Food Science and Technology Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)(4.Key Laboratory of Fruits and Vegetables Storage-processing Technology, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China)

Abstract: Mango fruits (*Mangifera indica* L.) can be kept fresh using a combined treatment of 1-Methylcyclopropene (1-MCP) and melatonin (MT). To explore its effectiveness, mangoes were treated with a combination of 0.1 mg/L 1-MCP and 0.2 mmol/L MT and stored at 25 °C for 10 days, and the relevant indexes of mangoes were measured every two days. The results showed that chlorophyll degradation and carotenoid content increase in mango fruit peel were delayed by the combined treatment. Furthermore, the chlorophyll content in the mango peel of the treated group was 0.078 mg/g, which was 5.27 times higher than that of the control group. The dropping of L^* value, the rise of a^* and b^* values in the mango pulp

引文格式:

袁芳,黎文卓,王春艳,等.1-MCP与MT联合处理对芒果保鲜效果的影响[J].现代食品科技,2024,40(9):219-225.

YUAN Fang, LI Wenzhuo, WANG Chunyan, et al. Freshness-preserving effects of 1-methylcyclopropene and melatonin treatment on mango fruit [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(9): 219-225.

收稿日期: 2023-08-28

基金项目: 广西自然科学基金项目(2020GXNSFBA297099)

作者简介: 袁芳(1986-),女,硕士,副教授,研究方向:农产品加工与贮藏, E-mail: yf2018yuyu@126.com

通讯作者: 王春艳(1994-)女,硕士,研究方向:微生物发酵、农产品加工与贮藏, E-mail: wcy1510016681@163.com

were delayed, and the degradation of protopectin and the raising of the soluble pectin content were reduced. On the sixth day of storage, the protopectin content of the treated group was 2.53 times higher than that of the control group, while the soluble pectin content was 44.04% lower than that of the control group. Moreover, galacturonidase (PG) and cellulase (Cx) activities were inhibited significantly in the early stage of storage, and β -Gal activity was decreased. The cell structure of the pulp in the treatment group was preserved, but the flavonoid content in the pulp was reduced in the mid-storage period. In summary, the appearance of mango fruits was maintained, cell wall material degradation was delayed, and shelf-life quality was improved by the combined treatment of 1-MCP and MT.

Key words: 1-methylcyclopropene (1-MCP); melatonin (MT); mango; pectin; cell wall degrading enzyme

芒果 (*Mangifera indica* L.) 是一种重要的热带与亚热带水果, 风味浓郁、肉滑多汁、营养丰富深受人们喜爱, 在全世界范围广泛种植, 中国是世界第二大芒果生产国, 2019 年芒果种植面积为 $2.80 \times 10^5 \text{ hm}^2$, 产量为 $2.46 \times 10^9 \text{ kg}^{[1]}$ 。但芒果属于典型的呼吸跃变型果实, 通常采摘于炎热的夏季, 贮藏期间很快后熟软化, 进而衰老腐烂, 每年都有大量芒果因为过度成熟而浪费, 因此提高芒果贮运期间的品质、延长货架期至关重要。

褪黑素 (Melatonin, MT) 化学名称为 N-乙酰基-5-甲氧基色胺, 由色氨酸代谢形成血清素后再进一步合成^[2], 它广泛存在于动植物中, 是一种植物激素, 具有强大的抗氧化活性^[3,4], 对植物的生长、开花、衰老和应激反应代谢具有直接或者间接的调节作用^[5,6]。近年来, 已有研究证实 MT 在果实成熟与衰老中发挥作用。例如, 施用外源 MT 显著影响了番茄果实的成熟衰老、细胞壁物质、类黄酮以及脂肪酸的生物合成^[7]; 能降低梨果实多聚半乳糖醛酸酶 (PG) 和纤维素酶 (Cx) 的合成速率, 延缓了梨的衰老^[8], 抑制红枣中 PG、Cx 和 β -Gal 等细胞壁降解酶的活性, 并减缓红枣中水溶性果胶的产生, 维持原果胶的含量, 从而保持了红枣较好的品质^[9]。1-甲基环丙烯 (1-MCP) 作为一种被广泛使用的乙烯竞争抑制剂, 在果蔬的采后保鲜中发挥着重要的作用。1.0 $\mu\text{L/L}$ 1-MCP 处理降低了贮藏期间苹果细胞壁降解酶的活性, 延缓了原果胶的降解, 减少水溶性果胶的产生^[10,11]; 延缓了龙丰果果皮颜色向深红或暗红转变, 保持果实外观的颜色鲜艳度^[11]。越来越多的研究开始关注 1-MCP 与其他方式联合使用对果蔬采后保鲜的影响。例如, 1-MCP 与低温结合可以维持早生新水梨^[12]和水蜜桃^[13]贮藏期间更好的生理品质, 此外, 1-MCP 与气调^[14]、一氧化氮^[15]、植酸^[16]等联合处理在果蔬的保鲜上具有更好

的效果。1-MCP 影响果蔬的乙烯代谢途径, 而 MT 作为一种内源激素调节植物代谢的途径和机制更为复杂, 两种联合使用对于果蔬采后的保鲜效果还有待研究。

目前, 单独使用 1-MCP 或者 MT 对芒果的贮藏品质和生理代谢已有报道, 但是将两者联合使用对芒果的保鲜效果还未见报道。课题组在前期预实验中对比了 1-MCP 与 MT 单独或联合处理芒果在贮藏期间的感官评价, 发现两者联合处理评价最好。因此, 本文采用 1-MCP 与 MT 联合处理芒果, 进一步研究两者联合使用对采后芒果在常温下保鲜效果的影响, 旨在为芒果的采后贮藏技术提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

芒果: 台农 1 号, 采摘于广西百色的一个农场; 1-MCP: 有效成分含量 0.18%, 龙杏生技制药有限公司; MT: 纯度 98%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 其他试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

3-18KS 冷冻离心机, 德国 Sigma; EVO 18 扫描电子显微镜, 德国蔡司; Christ/Alpha1-2 冷冻干燥机, 德国 Christ 公司; UV759CRT 紫外可见分光光度计, 上海佑科仪器仪表有限公司; WSC-S 测色色差仪, 上海仪电物理光学仪。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

7~8 成熟的芒果早上 6 点采摘于广西百色市的果园, 并于当天运送至实验室。经过人工挑选去除有机损伤、染病及残缺的果实, 选择大小与成熟

度基本一致的芒果浸泡在 30 mg/L ClO_2 溶液中消毒 10 min, 再用蒸馏水清洗, 然后随机分为 2 组, 每组约 150 个果实, 分别按照以下步骤进行处理:

(1) 对照组 (CK): 将芒果果实浸入蒸馏水 (含有 0.01 mL/L Tween 20) 中避光处理 30 min 后于 25 °C 黑暗条件下风干 60 min, 再用 0 mg/L 1-MCP 在 25 °C 下密封 12 h。

(2) 处理组 (1-MCP+MT): 浸入 0.2 mmol/L 的 MT 溶液 (含有 0.01 mL/L Tween 20) 中避光处理 30 min 后于 25 °C 黑暗条件下风干 60 min, 再用 0.1 mg/L 1-MCP 在 25 °C 下密封处理 12 h。

以上两种方法处理之后的芒果分别用聚乙烯薄膜袋子 (美丽雅, 厚度为 0.007 mm) 分装, 3 个果实/袋, 置于 25 °C, 相对湿度为 80%~90% 的条件下贮藏 10 d, 每 2 d 取样进行分析。

1.3.2 芒果果皮叶绿素和类胡萝卜素含量的测定

参考曹建康等^[17]的方法稍作修改, 叶绿素和类胡萝卜素含量以鲜重计, 单位为 mg/g。

1.3.3 芒果果肉色差的测定

沿着芒果纵向剖开, 取果实赤道部位果皮下方 1.1~1.3 厘米深处的果肉, 用色差仪测定其色差 L^* 、 a^* 和 b^* 值, 重复 5 次。

1.3.4 芒果果肉类黄酮含量的测定

参考 Jiang 等^[18]的方法稍作修改, 取冷冻果肉粉 5 g 加入 15 mL 甲醇溶液 (含 $\varphi=1\%$ HCl), 低速漩涡震荡 10 s, 浸提 0.5 h, 过滤, 洗涤沉淀, 合并滤液定容至 25 mL, 在 325 nm 处测定 OD 值。以儿茶素做标准, 类黄酮含量以鲜重计, 单位为 $\mu\text{g/g}$ 。

1.3.5 芒果果肉原果胶和可溶性果胶含量的测定

原果胶和可溶性果胶含量的测定参考 Lin 等^[19]的方法。原果胶和水溶性含量以 % 表示。

1.3.6 芒果果肉 PG、Cx、 β -Gal 活性的测定

芒果果肉 PG、Cx 和 β -Gal 的活性采用 ELISA 试剂盒 (江苏酶免实业有限公司) 按照说明书测定。根据标准品的活性及其在 450 nm 处的吸光度绘制标准曲线。三种酶的活性以鲜重计, 单位为 U/g 表示。

1.3.7 芒果果肉微观结构的测定

取芒果赤道附近的果肉, 切成 3 mm 的立方块, 经过 24 h 固定、梯度脱水、梯度置换后真空冷冻干燥^[19]。样品喷金后用扫描电子显微镜, 加压电压为

12 kV, 放大 500 倍观察果肉组织的结构。

1.4 数据处理

用软件 SPSS Statistics 17.0 对实验数据进行分析, 使用 Duncan 法比较平均值之间的差异显著性, 表示统计显著性 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$), 采取 Origin 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果皮叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

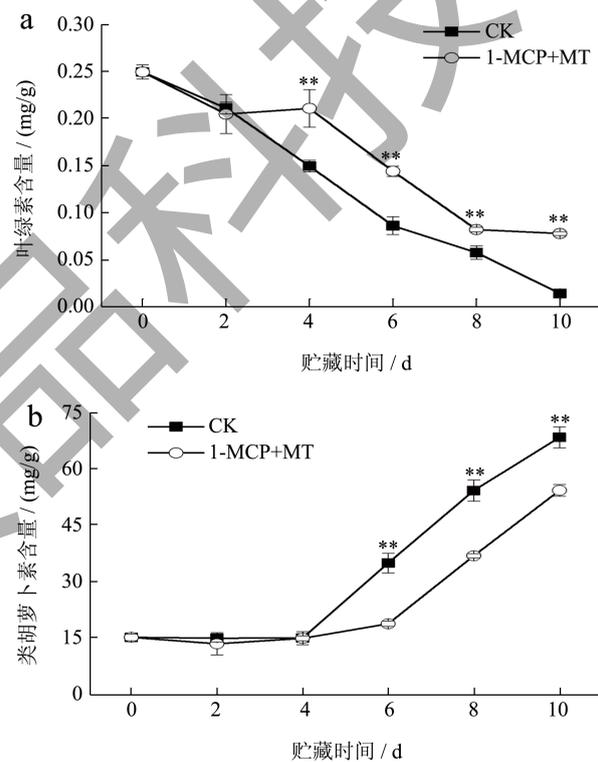


图 1 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果皮叶绿素和类胡萝卜素的影响

Fig.1 Effects of treatment with 1-MCP and MT on chlorophyll and carotenoid contents in mango peel

注: *, ** 分别代表同一时间点不同处理之间差异显著 ($P < 0.05$) 和极显著 ($P < 0.01$), 下同。

芒果在贮藏期间表皮褪绿转黄, 同时果肉的颜色也由淡黄转为深黄, 这些变化一定程度上反应了果实的后熟快慢^[21]。由图 1a 可知, 在贮藏期间对照组芒果果皮的叶绿素含量一直呈现较快的下降趋势, 处理组在 0~2 d 和 4~8 d 内下降较快, 其他贮藏期间变化不大, 对照组的叶绿素含量在 4~10 d 低于处理组, 且差异极显著 ($P < 0.01$), 在第 10 天,

处理组的果皮叶绿素含量为 0.08 mg/g, 是对照组的 5.27 倍, 说明 1-MCP 与 MT 联合处理有效减缓了芒果果皮叶绿素的降解, 更好地维持了贮藏期间芒果果皮的绿色, 使其保持更新鲜的感官品质。

由图 1b 可知, 芒果果皮类胡萝卜素含量在 0~4 d 内变化很小, 在第 0 天类胡萝卜素含量为 15.21 mg/g, 与第 4 天无显著差异, 而后对照组在 4 d 后开始快速上升, 处理组在 4~6 d 内变化缓慢而后快速上升。在 6~10 d 内, 对照组的类胡萝卜素含量显著高于处理组 ($P < 0.01$), 在贮藏第 10 天, 处理组果皮的胡萝卜素含量为 54.24 mg/g, 比对照组低 20.6%, 由此可见 1-MCP 与 MT 联合处理延缓了贮藏中后期芒果果皮的转黄, 果皮转黄是芒果成熟的标志之一, 处理组的果实转黄更缓慢, 说明 1-MCP+MT 联合处理延缓了芒果的后熟。

而单独使用 1-MCP 处理可以降低芒果采后贮藏前期的转黄速率, 而对贮藏后期的芒果色泽影响不大^[21], 单独使用 MT 处理同样可以在贮藏后期降低芒果果皮叶绿素的降解^[22]。而 1-MCP+MT 联合处理在贮藏的中期与后期 (4~10 d) 维持了芒果果皮的叶绿素含量, 同时减少了果皮类胡萝卜素的升高, 使芒果的良好外观品质保持了更长时间。

2.2 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果肉色差的影响

由图 2 可知, 在贮藏期间, 随着芒果成熟其果肉的 L^* 值不断下降, 而 a^* 和 b^* 值上升, 说明果肉颜色随着成熟度的增大颜色变深 (暗), 黄色和红色也逐渐突出。图 2a 显示 L^* 值在 2~6 d 内快速下降, 对照组由 75.99 降到 56.62, 处理组由 79.84 降到 64.43, 在贮藏初期和后期变化很小。处理组果肉的 L^* 值一直高于对照组, 统计分析表明, 4~10 d 两者达到极显著差异 ($P < 0.01$), 在贮藏的中后期, 对照组果肉颜色更暗, 说明成熟度更高, 同时反应果实衰老更快。

图 2b 显示对照组和处理组果肉 a^* 值变化趋势一致, 在 0~2 d 内几乎不变, 2~6 d 内快速上升, 对照组由 -0.56 升高至 15.25, 处理组由 -1.55 升高至 9.21, 但在 4~10 d 内对照组的 a^* 值显著高于处理组 ($P < 0.01$), 说芒果果肉转红主要发生在 2~6 d 内, 且对照组换红的速度更快, 程度更深, 果实后熟更快。

图 2c 显示对照组芒果果肉的 b^* 值在 0~2 d 内快速上升, 在 2~8 d 内变化很小, 8~10 d 内又缓慢上升; 处理组在 0~4 d 内上升较快, 而后一直缓慢升高。

在 2~6 d 内处理组的 b^* 值都小于对照, 其中第 2 天对照组果肉的 b^* 值为 62.87, 处理组为 53.78, 且两者差异极显著 ($P < 0.01$), 说明果肉转黄主要发生在贮藏前期, 且对照组果实转黄的速度更快, 同样反应了果实后熟更快。

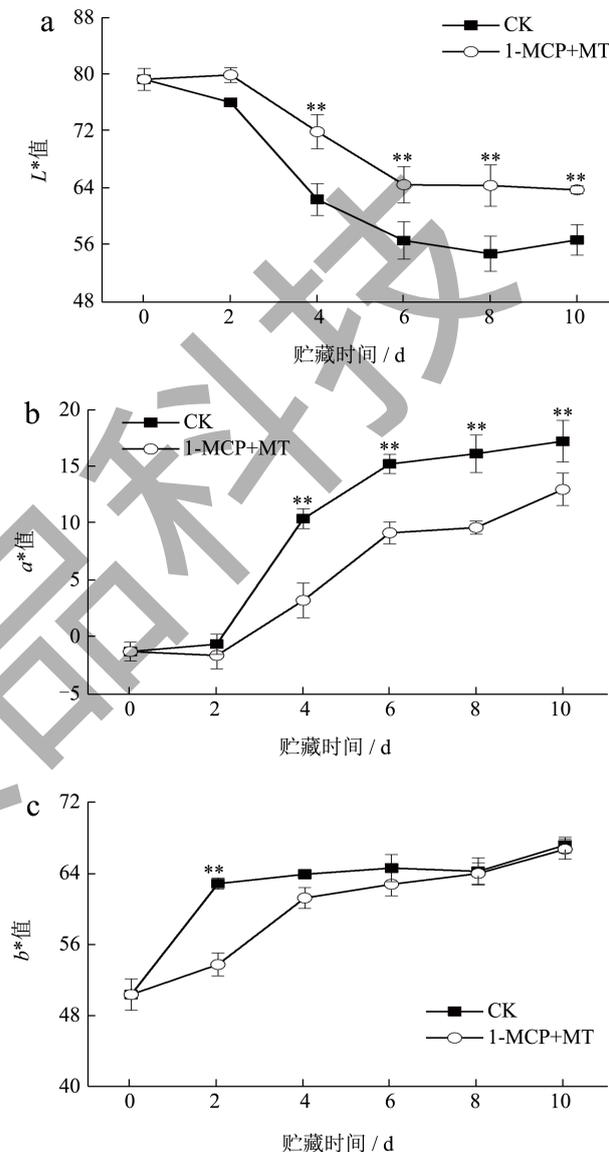


图 2 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果肉 L^* 、 a^* 、 b^* 值的影响
Fig.2 Effects of treatment with 1-MCP and MT on L^* 、 a^* 、 b^* values of mango pulp

2.3 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果肉类黄酮含量的影响

由图 3 可知, 对照组芒果果肉的类黄酮含量在 0~6 d 快速增加而后快速下降, 在第 6 天达到高峰, 为 44.79 $\mu\text{g/g}$; 处理组的类黄酮含量在前 6 d 内维持稳定, 第 6 天类黄酮含量为 25.52 $\mu\text{g/g}$, 6 d 后开始快速上升。贮藏 2~8 d 内对照组都高于处理组, 其中 2~6 d 两者之前的差异显著 ($P < 0.05$) 或者极显

著 ($P < 0.01$)；在贮藏末期，处理组的类黄酮含量则极显著地高于对照 ($P < 0.01$)。有研究显示，MT处理可以维持番茄^[7]、李子^[23]和葡萄^[24]果实更高的类黄酮含量，但在本研究中，1-MCP+MT联合处理的果实在贮藏前8 d的类黄酮含量低于对照，在贮藏末期高于对照，说明不同的MT处理方式可能对类黄酮的合成产生不同的影响。

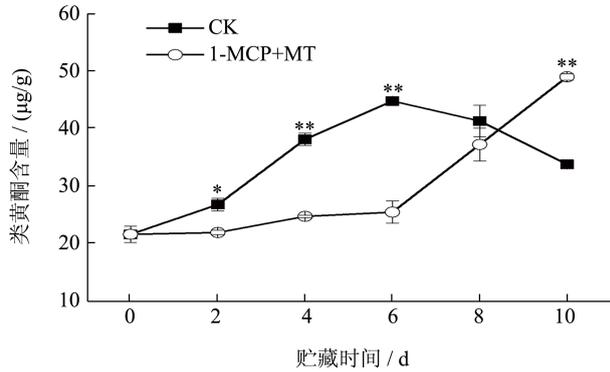


图3 1-MCP与MT联合处理对芒果果肉类黄酮含量的影响
Fig.3 Effect of treatment with 1-MCP and MT on flavonoid content in mango pulp

2.4 1-MCP与MT联合处理对芒果果肉原果胶和可溶性果胶的影响

果实在后熟软化的过程中细胞壁物质降解，细胞之间的联结边松散，原果胶含量的下降，水溶性果胶的含量增多^[25]。由图4a可知，芒果原果胶含量在整个贮藏期间呈现下降趋势，其中0~2 d内对照组和处理组差异不显著，但对照组在2~6 d内下降最快，导致4 d之后对照组的原果胶含量一直低于处理组。贮藏第4天和第6天处理组的原果胶含量分别为0.33%和0.15%，分别比对照高0.69和2.53倍。进一步分析表明，处理组在4 d和6 d与对照差异极显著 ($P < 0.01$)。

由图4b可知，芒果可溶性果胶含量在0~2 d内变化不大，且对照组和处理组差异不显著。对照组在2~4 d上升较快，在4~6 d增长迅速，在贮藏后期(6~10 d)缓慢上升；处理组在2~4 d上升较慢，而后较快上升，在贮藏末期保持稳定。整个贮藏期，处理组的可溶性果胶含量都低于对照，其中第4天和第6天对照组的可溶性果胶含量分别为0.04%和0.13%，分别比对照低39.56%和44.04%，且两组之间差异极显著 ($P < 0.01$)。综上，说明在贮藏期间，1-MCP与MT联合处理维持了芒果果肉更好的细胞壁结构，这有利于延缓芒果的后熟软化。

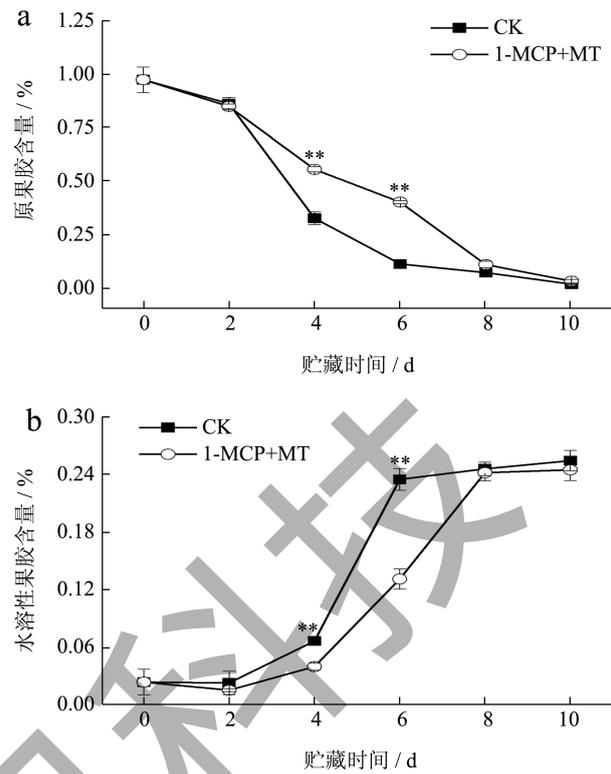


图4 1-MCP与MT联合处理对芒果果肉类黄酮含量的影响
Fig.4 Effects of treatment with 1-MCP and MT on protopectin and soluble pectin contents of mango pulp

2.5 1-MCP与MT联合处理对芒果PG、Cx、 β -Gal活性的影响

PG、Cx、 β -Gal在细胞壁分解中的作用不同，PG可以分解聚半乳糖醛酸，进而破坏细胞壁结构， β -Gal能水解 β -1,4-半乳聚糖键，去除果胶侧链的半乳糖基残基，引发许多不良反应，加速细胞壁结构的破坏^[26,27]，Cx可以促使细胞壁中纤维素的降解^[25]。由图5a可知，PG的活性在芒果贮藏期间呈现先上升后下降的趋势，在0~2 d内PG活性快速上升，而后逐渐下降，在第2天达到高峰，对照和处理组的PG活性分别为0.63和0.50 U/g。处理组的PG活性第2天极显著 ($P < 0.01$)且在4 d显著 ($P < 0.05$)低于对照，而在贮藏后期，两者差异不显著。说明1-MCP与MT联合处理在贮藏前期抑制了PG活性，延缓了果胶的降解。

由图5b可知，Cx的活性在芒果贮藏期间波动较大，其中对照组的Cx活性在0~2 d内快速上升至3 011.38 U/g，达到最高值之后快速下降至第8天后又上升；处理组在0~2 d内缓慢上升后在2~4 d内缓慢下降，在4~6 d内快速上升至3 363.16 U/g后又快速下降。在贮藏前期(2~4 d)，处理组的Cx活

性极显著地低于对照组 ($P < 0.01$), 而在贮藏后期 (6~8 d), 却极显著地高于对照组 ($P < 0.01$)。由此看出, 1-MCP 与 MT 联合处理在芒果贮藏前期显著抑制了 Cx 活性, 但是在贮藏后期, 对 Cx 活性没有积极的效果。

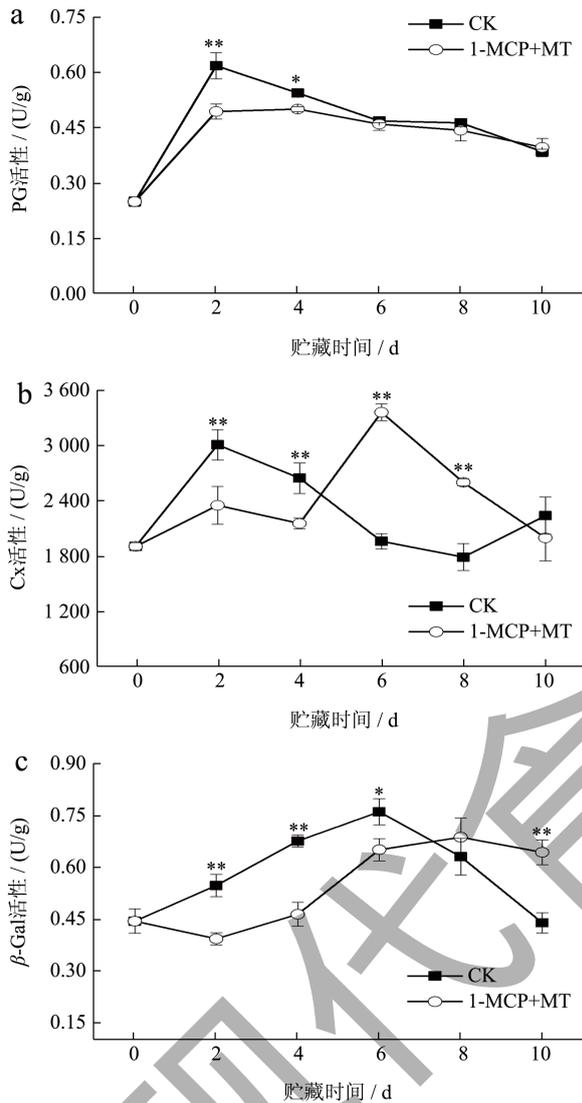


图5 1-MCP 与 MT 联合处理对 PG、Cx、 β -Gal 活性的影响

Fig.5 Effects of treatment with 1-MCP and MT on PG, Cx, β -Gal activities of mango

由图 5c 可知, 对照组的芒果 β -Gal 活性在贮藏前面 6 d 内快速上升, 在第 6 天达到最高值 0.76 U/g, 而后开始快速下降。处理组的 β -Gal 活性在 0~2 d 内缓慢下降, 而后上升, 其中在 2~4 d 内和 6~8 d 内缓慢上升, 4~6 d 内上升迅速至 0.65 U/g, 在贮藏最后 2 d 又缓慢下降。统计分析表明, 在第 2~6 天, 1-MCP 与 MT 联合处理极显著地抑制了 β -Gal 的活性 ($P < 0.01$)。综上, 1-MCP 与 MT 联合处理在芒果贮藏期间的不同时期内响应地抑制了细胞壁物

质降解相关酶的活性, 从而维持了更好的细胞壁结构, 这对延缓芒果后熟软化非常重要。

2.6 1-MCP 与 MT 联合处理对芒果果肉微观结构的影响

图 6 分别为对照组 (左) 和 1-MCP+MT 处理组 (右) 芒果果肉在贮藏第 2、4、6 天的扫描电镜图。从图 6 可以看出, 随着贮藏时间的延长, 果肉细胞壁结构逐渐从有序到无序, 由紧致到松散, 由饱满到破裂。第 2 天时, 处理组芒果的果肉细胞结构较完整, 排列整齐紧密, 而对照组的果肉细胞已经开始出现局部轻微破裂。第 4 天时, 对照组的果肉结构开始出现局部排列杂乱, 细胞结构有较多破裂, 而处理组的细胞结构依然较完整, 有少量破裂。到第 6 天时, 对照组的果肉细胞排列松散无序, 细胞壁结构破裂, 而处理组的果肉细胞排列也变得松散, 但依然保留着一定的细胞壁结构。说明 1-MCP 与 MT 联合处理能维持芒果果肉较好的细胞结构。

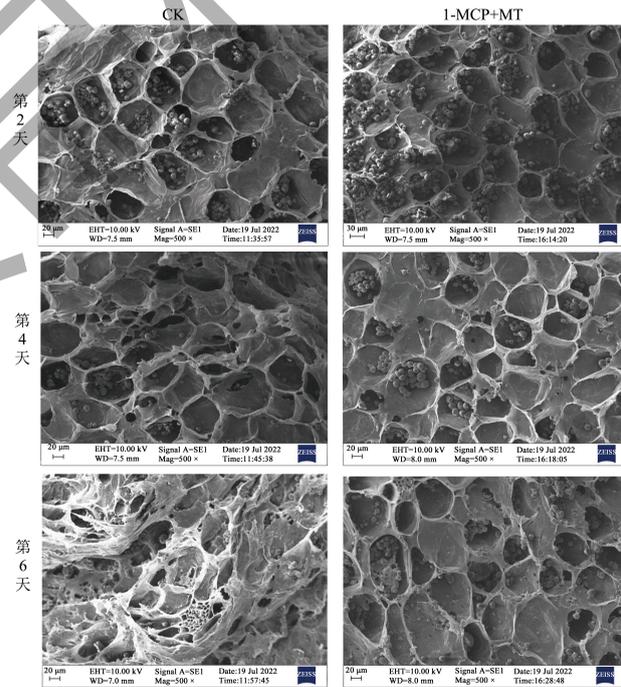


图6 1-MCP 与 MT 联合处理芒果果肉微观结构的影响

Fig.6 Effects of treatment with 1-MCP and MT on microstructure of mango pulp

3 结论

综上, 1-MCP+MT 联合处理保持了芒果果皮和果肉更好的外观品质, 维持了更高的原果胶含量, 并在贮藏前期显著地抑制了细胞壁降解酶 PG、Cx、 β -Gal 的活性, 维持了芒果果肉更完整的细胞微观

结构,说明1-MCP+MT联合处理对芒果有较好的保鲜效果,但1-MCP与MT的相互协同作用机理还有待进一步研究。

参考文献

- [1] PENG Y, FEI L, LIU X, et al. Coupling of regulated deficit irrigation at maturity stage and moderate fertilization to improve soil quality, mango yield and water-fertilizer use efficiency [J]. *Scientia Horticulturae*, 2023, 307: 111492.
- [2] LEE K, BACK K. Melatonin-deficient rice plants show a common semidwarf phenotype either dependent or independent of brassinosteroid biosynthesis [J]. *Journal of Pineal Research*, 2019, 66(2): e12537.
- [3] PÖEGGELER B, REITER R J, TAN D X, et al. Melatonin, hydroxyl radical-mediated oxidative damage, and aging: a hypothesis [J]. *Journal of Pineal Research*, 1993, 14(4): 151-168.
- [4] J REITER R, TAN D X, ROSALES-CORRAL S, et al. The universal nature, unequal distribution and antioxidant functions of melatonin and its derivatives [J]. *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2013, 13(3): 373-384.
- [5] ARNAO M B, HERNÁNDEZ-RUIZ J. Melatonin in flowering, fruit set and fruit ripening [J]. *Plant Reproduction*, 2020, 33: 77-87.
- [6] ADIL M, JEONG B R. Role of Melatonin and Serotonin in Plant Stress Tolerance [M]. *Plant Life under Changing Environment*. Academic Press, 2020: 775-791.
- [7] SUN Q, ZHANG N, WANG J, et al. A label-free differential proteomics analysis reveals the effect of melatonin on promoting fruit ripening and anthocyanin accumulation upon postharvest in tomato [J]. *Journal of Pineal Research*, 2016, 61(2): 138-153.
- [8] LIU J, YANG J, ZHANG H, et al. Melatonin inhibits ethylene synthesis via nitric oxide regulation to delay postharvest senescence in pears [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(8): 2279-2288.
- [9] TANG Q, LI C, GE Y, et al. Exogenous application of melatonin maintains storage quality of jujubes by enhancing anti-oxidative ability and suppressing the activity of cell wall-degrading enzymes [J]. *Lwt*, 2020, 127: 109431.
- [10] WIN N M, YOO J, NAING A H, et al. 1-Methylcyclopropene (1-MCP) treatment delays modification of cell wall pectin and fruit softening in “Hwangok” and “Picnic” apples during cold storage [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2021, 180: 111599.
- [11] 王志华,贾朝爽,包教民,等.1-MCP对龙丰苹果常温贮藏保鲜的效应[J].*中国果树*,2022,12:8-13.
- [12] 张明昊,叶正文,骆军,等.1-MCP处理结合低温贮藏对早生新水梨采后生理及品质的影响[J].*食品与机械*,2022, 38(10):127-133,209.
- [13] 周慧娟,叶正文,张夏南,等.1-MCP处理结合不同低温条件对水蜜桃风味质地及生理的影响[J].*食品与机械*, 2022,38(3):139-146.
- [14] 贾晓辉,张鑫楠,刘佰霖,等.低O₂/高CO₂气调结合1-MCP对‘玉露香’梨贮藏品质的影响[J].*中国农业科学*,2022, 55(23):4717-4727.
- [15] GROZEFF G E G, ALEGRE M L, SENN M E, et al. Combination of nitric oxide and 1-MCP on postharvest life of the blueberry (*Vaccinium* spp.) fruit [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2017, 133: 72-80.
- [16] 张悦,李安,潘立刚,等.1-甲基环丙烯结合植酸处理对菠菜保鲜效果的影响[J].*食品科学*,2023,44(1):231-238.
- [17] 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.
- [18] JIANG X, LIN H, LIN M, et al. A novel chitosan formulation treatment induces disease resistance of harvested litchi fruit to *Peronophythora litchii* in association with ROS metabolism [J]. *Food Chemistry*, 2018, 266: 299-308.
- [19] LIN H T, ZHAO Y F, XI Y F. Changes in cell wall components and cell wall-degrading enzyme activities of postharvest longan fruit during aril breakdown [J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2007, 33(2): 137-145.
- [20] BEIRÃO-DA-COSTA S, EMPIS J, MOLDÃO-MARTINS M. Fresh-cut kiwifruit structure and firmness as affected by heat pre-treatments and post-cut calcium dips [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2014, 7: 1128-1136.
- [21] 刘荣,刘清国,雷朝云,等.1-MCP对保持采后芒果常温贮藏品质及生理的影响[J].*食品研究与开发*,2018,39(14): 197-201.
- [22] DONG J, KEBBEH M, YAN R, et al. 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.
- [23] YAN R, XU Q, DONG J, et al. Effects of exogenous melatonin on ripening and decay incidence in plums (*Prunus salicina* L. cv. Taoxingli) during storage at room temperature [J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: 110655.
- [24] XU L, YUE Q, BIAN F E, et al. Melatonin enhances phenolics accumulation partially via ethylene signaling and resulted in high antioxidant capacity in grape berries [J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1426.
- [25] 张群,舒楠,宁密密,等.不同施肥处理对“东红”猕猴桃贮藏期间果实硬度及细胞壁降解的影响[J].*保鲜与加工*, 2022,22(9):28-37.
- [26] CHEN Y, HUNG Y C, CHEN M, et al. Effects of acidic electrolyzed oxidizing water on retarding cell wall degradation and delaying softening of blueberries during postharvest storage [J]. *Lwt*, 2017, 84: 650-657.
- [27] CHEN Y, SUN J, LIN H, et al. Paper-based 1-MCP treatment suppresses cell wall metabolism and delays softening of Huanghua pears during storage [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(8): 2547-2552.