

乙烯利处理对红贵妃芒果后熟品质生理和代谢的影响

高远会^{1,2}, 王鑫^{1,3}, 陈燕娇^{1,2}, 李金河^{1,2}, 李雯^{1,2*}

1. 海南大学三亚南繁研究院, 海南三亚 572025; 2. 海南大学热带农林学院, 海南儋州 571018; 3. 海南大学食品科学与工程学院, 海南海口 570228

摘要: 为了探究乙烯利对芒果后熟过程中果实外观色泽及内在品质的影响, 本研究以海南红贵妃芒果为材料, 研究外源乙烯 (ETH)、1-甲基环丙烯 (1-MCP) 和 ETH+1-MCP 复合处理对果实贮藏品质和生理变化的影响。结果表明: 与对照相比, ETH 和 ETH+1-MCP 复合处理显著加速了果实硬度、可滴定酸、叶绿素、类黄酮、总酚和抗坏血酸含量的下降, 增强了细胞膜透性, 促进了色度值 a^* 、贮藏初期可溶性固形物 (TSS)、类胡萝卜素含量的升高, 其中 ETH+1-MCP 复合处理的果实 TSS、胡萝卜素含量最高, 1-MCP 处理有效延缓了果实营养物质和硬度的下降, 抑制了果皮叶绿素的降解。进一步对 CK 和乙烯处理组的代谢组进行分析, 共发现 140 种差异代谢物, 其中 88 种上调, 52 种下调, 且其中大多数黄酮类物质在 ETH 处理组果实中的含量显著低于对照组, 说明 ETH 处理加速了类黄酮物质的降解。本研究结合生理和代谢组揭示 ETH 对芒果催熟品质形成的代谢机理, 为深入研究芒果后熟品质变化机制提供理论依据。

关键词: 红贵妃芒果; 贮藏保鲜; 果皮色泽; 营养品质; 类黄酮

中图分类号: S667.7

文献标志码: A

Effects of Ethephon Treatment on Post-ripening Quality, Physiology and Metabolism of Mango Hongguifei

GAO Yuanhui^{1,2}, WANG Xin^{1,3}, CHEN Yanjiao^{1,2}, LI Jinhe^{1,2}, LI Wen^{1,2*}

1. Sanya Nanfan Research Institute, Hainan University, Sanya, Hainan 572025, China; 2. School of Tropical and Forestry, Hainan University, Danzhou, Hainan 571018, China; 3. School of Food Science and Engineering, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China

Abstract: The effects of exogenous ethylene (ETH), 1-methylcyclopropene(1-MCP) and a combined ETH+1-MCP treatments on fruit storage quality and physiological changes were evaluated to investigate the effects of ethephon on the fruit appearance color and internal quality during the ripening process of mangoes Hongguifei. The results showed that compared with the control, both ETH and ETH+1-MCP treatments significantly accelerated the decline in fruit firmness, titratable acid, chlorophyll, flavonoids, total phenolics, and ascorbic acid content, increased cell membrane permeability, and promoted in a^* color value, total soluble solids (TSS) in the early stage of storage, and carotenoid. Among the treatments, the ETH+1-MCP group showed the highest level of TSS and carotenoids while 1-MCP group effectively delayed the loss of nutrients and firmness, and inhibited chlorophyll degradation in the fruit peel. Further analysis of the metabolomes of the CK and ethylene treatment groups revealed 140 different metabolites, among which 88 were upregulated and 52 were downregulated. The content of flavonoids in the fruits of the ETH treatment group was significantly lower than that of the control group, indicating that the ETH treatment accelerated the degradation of flavonoids. This study revealed the metabolic mechanism of ETH in promoting the ripening and quality formation of mangoes, which would provide a theoretical basis for in-depth research on the mechanism of post-ripening quality changes in mangoes.

Keywords: Hongguifei mango; storage and preservation; appearance color; nutrition quality; flavonoids

收稿日期 2025-07-21; 接受日期 2025-08-16

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32360778); 海南大学芒果产业体系建设项目。

作者简介 高远会 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 热带作物采后贮藏保鲜。*通信作者 (Corresponding author): 李雯 (LI Wen), E-mail: liwen9-210@163.com。

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.11.021

芒果 (*Mangifera indica* L.) 属漆树科、杧果属常绿乔木, 因其果实口感、风味独特, 营养物质丰富而备受消费者喜爱。目前我国芒果种植区域主要在海南、云南、贵州、广西、广东等热带、亚热带地区^[1]。近年来, 海南省芒果产业发展迅速, 已经成为海南省热带园艺产业的主导、优势产业, 在海南农业发展和乡村振兴中发挥着重要的作用。

果实的外观色泽是评价芒果商业价值的重要指标, 也是影响消费者选择的重要因素, 同时也是评价果实成熟度最直观的指标。芒果外表皮色泽丰富, 包括黄色、绿色、红色等多种颜色^[2]。大量研究表明, 叶绿素、花青素和类胡萝卜素是果皮中的主要色素, 参与了果实光合作用和果皮着色^[3]。芒果果皮颜色的变化主要由叶绿素的降解、花青素和类胡萝卜素等的积累共同作用^[4]。

芒果中富含大量有益于人体健康的生物活性物质, 如维生素 C (Vc)、有机酸、类黄酮、 β -胡萝卜素、多酚以及各种矿物质元素, 具有抗癌、抗菌和抗氧化等作用^[5]。芒果属于典型的热带水果, 其采摘后易成熟软化和腐烂, 保质期很短。同时, 芒果是呼吸跃变型果实, 具有后熟的特点, 采摘后自然成熟需要 5~8 d^[6], 生产上通常在生理成熟期采摘, 经过催熟处理后使其达到最佳的食用品质^[7]。乙烯利 (ETH) 是生产上常用的催熟物质, 具有促进芒果转色和成熟的显著作用^[8]。ETH 使用的浓度、时间等与果实的成熟和品质密切相关, ETH 使用不当常常导致果实软化过快, 易出现炭疽病, 同时营养丧失严重。1-甲基环丙烯 (1-MCP) 是一种有效的乙烯抑制剂, 可与乙烯受体发生竞争性的结合, 从而抑制乙烯信号转导, 延缓果实成熟和着色^[9]。近年来, 随着研究技术的不断发展成熟, 众多研究者从关注果实外观和一些生理品质的研究, 逐渐转向深入研究果实中次生代谢物质对果实品质的影响。一些次生代谢物质如花青素、类黄酮、类胡萝卜素和挥发性代谢物等的检测随着代谢组学技术的发展, 已在百香果^[10]、枇杷^[11]、黄桃^[12]等多种果实中广泛应用。但芒果代谢组的研究相对较少, 且主要集中在香气成分、色泽变化等单一代谢通路^[13-15]。本研究从广靶代谢组方面全面分析, 通过对比乙烯利处理和自然成熟过程中芒果的代谢差异物变

化, 揭示芒果后熟过程中的关键代谢物质, 为深入研究芒果后熟品质变化机制提供理论依据。

本研究以海南主栽芒果品种红贵妃为试验材料, 探讨 ETH 处理、1-MCP 处理和 ETH+1-MCP 联合处理对芒果理化性质、果皮色泽以及果实营养物质的影响, 并通过代谢组揭示 ETH 处理组和对照组之间的代谢差异, 旨在为芒果着色和品质形成的调控提供理论依据, 为改善红贵妃芒果采后品质和贮藏保鲜提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 植物材料 供试芒果品种为红贵妃, 于 2025 年 2 月、4 月采自海南省三亚市崖州区保平村的芒果种植园, 采收成熟度为八成熟 (开花后 110 d, 果核坚硬)。采摘后在 2 h 内立即运至海南大学三亚南繁研究院实验室, 选取无病虫害, 无机械伤, 形状、大小和色泽相对一致的芒果果实, 留取 0.5 cm 果柄作为试验材料。

1.1.2 主要试剂与设备 主要试剂: 氢氧化钠、2,6-二氯酚靛酚、酚酞、标准抗坏血酸, 购自上海麦克林生化科技股份有限公司; 磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、草酸, 购自上海源叶生物科技有限公司; 福林酚、碳酸钠, 购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 盐酸、甲醇、丙酮, 购自西陇科学股份有限公司; 乙烯利, 购自上海试四化学品有限公司; 聪明鲜, 购自山东奥维特生物科技有限公司; 0.02 mm 聚乙烯保鲜袋 (食品级), 购自石家庄铭塑塑料制品有限公司。

主要仪器设备: CM-700 色差仪, 购自日本 Minolta 公司; Multiskan GO 台式酶标仪, 购自美国赛默飞世尔科技; TA touch 质构分析仪, 购自上海腾拔仪器科技有限公司; 数显糖度计, 购自日本 ATAGO 公司; 电导率仪, 购自德国 Knick 公司。

1.2 方法

1.2.1 样品处理 将新鲜芒果清洗干净后晾干 2 h, 随机分成 4 组, 每组 50 个果实, 进行 4 个处理:

(1) CK, 对照组不处理, 将果实放入保鲜袋; (2) ETH, 用 0.5 g/L 的乙烯利溶液浸泡 5 min, 密封 24 h 后放入保鲜袋; (3) 1-MCP, 将 1 包聪明鲜 (SmartFresh, 0.625 g, 1-MCP 有效成分为 0.014%, USA) 和果实一起放入保鲜袋; (4)

ETH+1- MCP, 先用 0.5 g/L 的乙烯利溶液浸泡 5 min, 密封 24 h 后, 加入一包聪明鲜, 放入保鲜袋。将各处理置于 $(25\pm 1)^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 80%~85% 条件下贮藏, 每隔 2 d 取样进行指标测定。3 个果实为 1 次重复, 每个处理重复 3 次。

1.2.2 果肉硬度测定 参考 WANG 等^[16]的方法, 在芒果果实中部赤道面的两侧选取 2 个点, 削去果皮, 将直径为 2 mm 的探头插入果肉中, 深度约 0.5 cm, 记录显示器上的数值, 取平均值代表该果实的硬度 (N)。质构分析仪的工作参数设置如下: 试验前速度为 2 mm/s, 试验速度为 4 mm/s, 试验后速度为 3 mm/s, 中间间隔为 2 s。

1.2.3 细胞膜透性测定 参考 ZHANG 等^[17]的方法, 用相对电导率表示细胞膜透性。取下果皮, 刮去残留果肉, 切成细丝, 称取 2 g 新鲜果皮浸没在 20 mL 蒸馏水中, 静置 30 min, 上下摇晃均匀后使用电导率仪测定初始电导率 γ_1 , 然后沸水浴 15 min, 待其自然冷却 1 h 后测定电导率 γ_2 , 每个处理重复 3 次。细胞膜透性的计算公式为: 细胞膜透性 = $\frac{\gamma_1}{\gamma_2} \times 100\%$ 。

1.2.4 可溶性固形物和可滴定酸含量的测定 可溶性固形物含量采用数显糖度计进行测定, 将果肉混匀后置于纱布中, 挤出汁液滴到糖度计上, 记录显示器数值, 每个处理重复 3 次, 平均值代表该果实的可溶性固形物含量 (%)。

可滴定酸含量参考张瑜等^[18]的方法, 称取 2 g 果肉, 加入少量石英砂和 5 mL 蒸馏水于冰上研磨至匀浆, 12 000 r/min 离心 20 min, 取上清液 1 mL 用蒸馏水稀释 10 倍, 加入 2 滴酚酞指示剂, 用 0.01 mol/L 的氢氧化钠进行滴定, 30 s 不褪色, 记录氢氧化钠用量并计算可滴定酸含量 (%)。

1.2.5 色泽的测定 芒果果实的色泽采用手持分光色差仪进行测定, 选择果皮颜色分布均匀的赤道点作为测量点, 测量并记录果皮的 a^* 值。 a^* 值若为负, 表示果皮颜色偏向绿色; 若为正, 则表示果皮颜色偏向红色。

1.2.6 叶绿素和类胡萝卜素含量测定 叶绿素和类胡萝卜素含量的测定参考 RICCARDI 等^[19]的方法, 略有改动。称取 0.5 g 样品, 加入少量石英砂和 8 mL 80% 的丙酮, 在黑暗条件下充分研磨并转移到 10 mL 离心管中, 加入 0.1 g 碳酸钙摇匀, 避光提取 2 h, 4°C 、12 000 r/min 离心 20 min, 取上清液在 470、645、663 nm 的波长下测量吸光

度, 叶绿素和类胡萝卜素含量以 mg/g 表示。

1.2.7 类黄酮和总酚含量测定 参照曹建康等^[20]的方法测定类黄酮含量, 采用福林酚比色法测定总酚含量^[21], 稍有改动。准确称取 2 g 果肉, 加入少量石英砂和 8 mL 无水甲醇, 充分研磨成匀浆并转移到 10 mL 离心管中, 避光提取 2 h, 4°C 、12 000 r/min 离心 20 min, 取上清液 0.2 mL 并测定其在 325 nm 处的吸光值, 计算类黄酮的含量。另取 0.1 mL 上清液加入 2.7 mL 10% 的碳酸钠溶液和 0.2 mL 的福林酚试剂, 50°C 水浴 30 min, 于 760 nm 处测定吸光值, 计算总酚含量。

1.2.8 抗坏血酸含量的测定 参照 ZHANG 等^[22]的方法, 用 2,6-二氯酚靛酚滴定法测定抗坏血酸含量。称取 2 g 果肉, 加入 5 mL 2% 的草酸溶液, 冰上研磨成匀浆, 转移到 10 mL 离心管中, 4°C 、12 000 r/min 离心 20 min, 取上清液 1 mL 用草酸稀释 10 倍, 用 2,6-二氯酚靛酚溶液进行滴定, 30 s 不褪色, 记录读数并计算, 抗坏血酸含量以 mg/100 g 表示。

1.2.9 差异代谢物的检测 收集处理 12 d 的 CK 和 ETH 处理组样本, 各 3 个重复, 用于代谢组分析。使用 Vanquish (Thermo Fisher Scientific) 超高效液相色谱仪, 利用 Agilent ZORBAX Eclipse XDB-C₁₈ 色谱柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μm) 分析, 色谱条件如下: 流速, 1.0 mL/min; 柱温, 30°C ; 进样量, 10.0 μL ; 检测波长, 210 nm; 以乙腈 (A) 和 0.02% 磷酸水溶液 (B) 作为流动相, 进行梯度洗脱, 程序为: 0~20 min, 3%~5% A; 20~35 min, 5%~15% A; 35~55 min, 15%~23% A; 55~75 min, 23%~65% A; 75~77 min, 65%~80% A; 77~82 min, 80% A; 82~84 min, 80%~3% A; 84~89 min, 3% A。采用 Q-Exactive 型高分辨率串联质谱仪检测洗脱代谢物。使用自建数据库 MWDB (Metware database, 武汉迈特维尔生物科技公司), 利用三重四级杆质谱进行代谢物定量和二级谱信息进行物质定性, 并委托武汉迈特维尔生物科技公司进行数据分析。

1.3 数据处理

以上试验均采用 3 次生物学重复, 使用 Microsoft Excel 2019 软件对数据进行处理分析, 使用 GraphPad Prism 8.0 软件分析数据并制图, 使用多因素方差分析 (Multi-way ANOVA), F 检验进行差异显著性分析, 采用不同字母表示组间差异显著性 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 芒果贮藏期间外观品质变化

不同处理后的芒果果皮颜色变化如图 1 所示,在贮藏过程中,果皮颜色由绿色逐渐转为黄色,但颜色转变的程度和速度差异较大。与对照相比,ETH 和 ETH+1-MCP 处理加速了果实转黄,其中 ETH 处理组在第 4 天开始发生转色,ETH+1-MCP 处理组在第 6 天开始转色。而 1-MCP 处理则抑制了果实转色,不仅颜色变化缓慢,而且着色不均,后期甚至出现黑色斑点。整体而言,ETH+1-MCP 处理组的果实外观最好,不仅着色均匀且果皮干净无斑点。

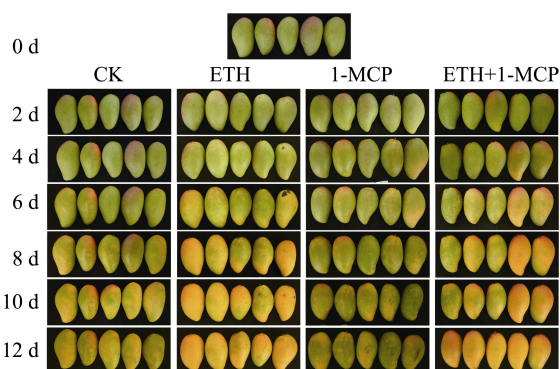
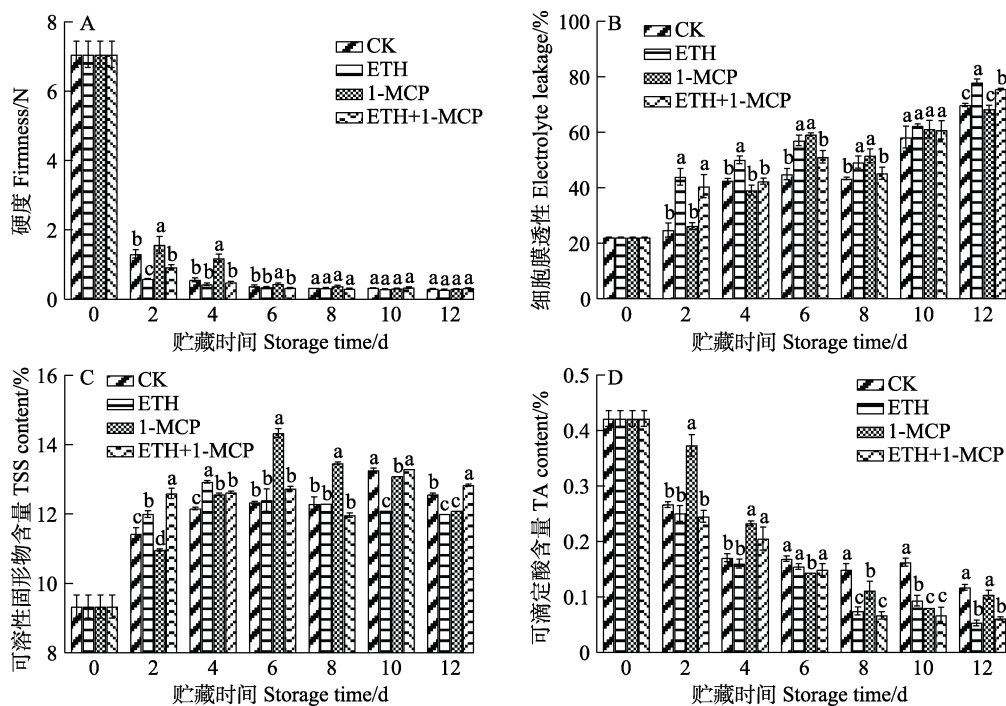


图 1 不同处理对果实外观的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on fruit appearance



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同处理对果实硬度 (A)、细胞膜透性 (B)、可溶性固形物 (C) 和可滴定酸 (D) 含量的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on firmness (A), electrolyte leakage (B), TSS (C) and TA (D) content of mango fruit

2.2 芒果贮藏期间果肉品质的变化

如图 2A 所示,随着贮藏时间的延长,果实硬度呈逐渐下降的趋势,其中 ETH 处理组果实硬度下降速度最快,ETH+1-MCP 处理组次之,1-MCP 处理组果实硬度下降最慢,但贮藏后期无明显差异,说明 ETH 处理加快了果实的成熟和软化,1-MCP 处理则正好相反。

如图 2B 所示,随着贮藏时间的增长,果实细胞膜透性呈逐渐上升的趋势。ETH 处理组果实细胞膜透性在贮藏第 2 天便迅速升高,到贮藏第 12 天仍较其他处理更高。1-MCP 处理在贮藏前 4 d 显著抑制了果实细胞膜透性的增加,但随后迅速升高。ETH+1-MCP 处理组加速了果实细胞膜透性的增加,但和 ETH 处理相比,仍具有一定的抑制效果。由此可知,ETH 处理加快了果实的成熟和软化,1-MCP 处理则正好相反,尤其是在贮藏前期效果显著。

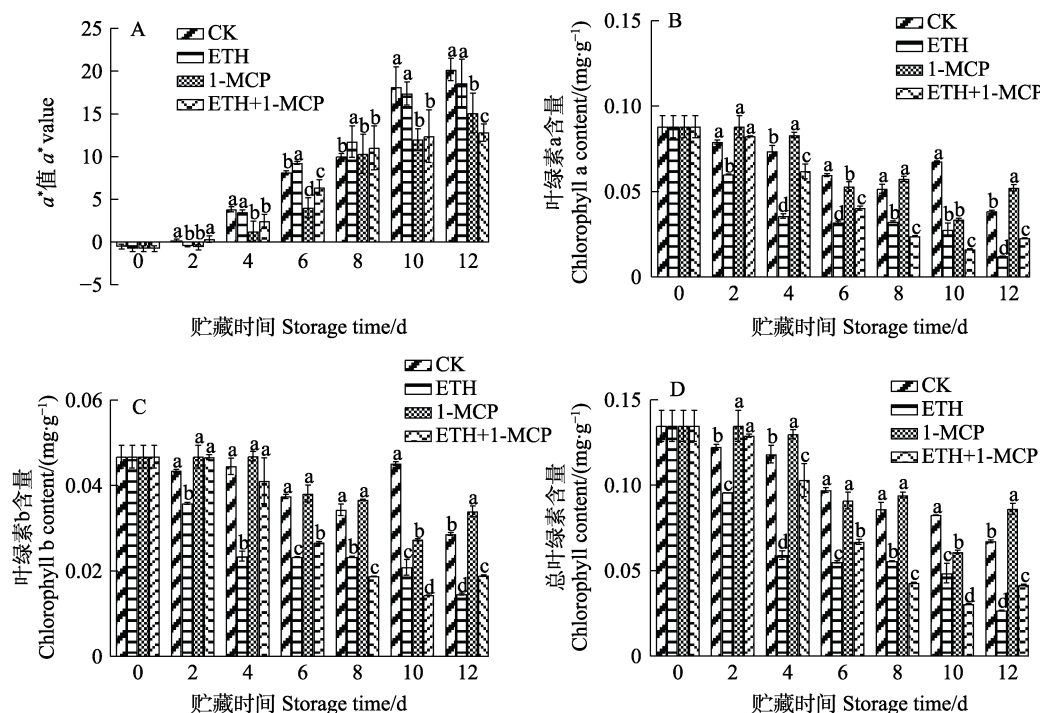
如图 2C 所示,随着贮藏时间的增加,TSS 含量呈先上升后下降的趋势,其中 ETH 处理组果实在第 4 天最先达到峰值,随后缓慢下降,1-MCP 处理组果实则在第 6 天达到峰值,且所有处理中含量最高,达到了 14.3%,随后逐渐下降。值得注意的是,ETH+1-MCP 处理组果实在贮藏后期仍保持较高的 TSS 含量水平。

如图 2D 所示, 在果实贮藏过程中, 芒果果肉酸度呈持续下降的趋势, 但下降速度差异较大, 从大到小依次是 ETH 处理组、ETH+1-MCP 处理组、CK 组和 1-MCP 处理组。

2.3 芒果贮藏期间果皮色泽和叶绿素含量变化

贵妃芒果果皮以红绿色为主, 故本研究以 a^* 值作为评估芒果转色程度的主要指标。如图 3 所示, 各处理组果皮的 a^* 值均呈逐渐上升趋势。其中 CK 组和 ETH 处理组的 a^* 值的上升速度显著

高于 ETH+1-MCP 处理组和 1-MCP 处理组 ($P < 0.05$)。在整个贮藏过程中, 1-MCP 处理抑制了叶绿素降解, 其果皮叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量均显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。相反, ETH 处理促进了叶绿素降解, 从而加快果实着色。而 ETH+1-MCP 处理相较于 ETH 处理而言, 显著抑制了叶绿素降解。由此可见, 1-MCP 处理可以通过减缓叶绿素的降解而影响果实转色。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同处理对果实 a^* 、叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on a^* value, chlorophyll a, chlorophyll b, and total chlorophyll content of mango fruit

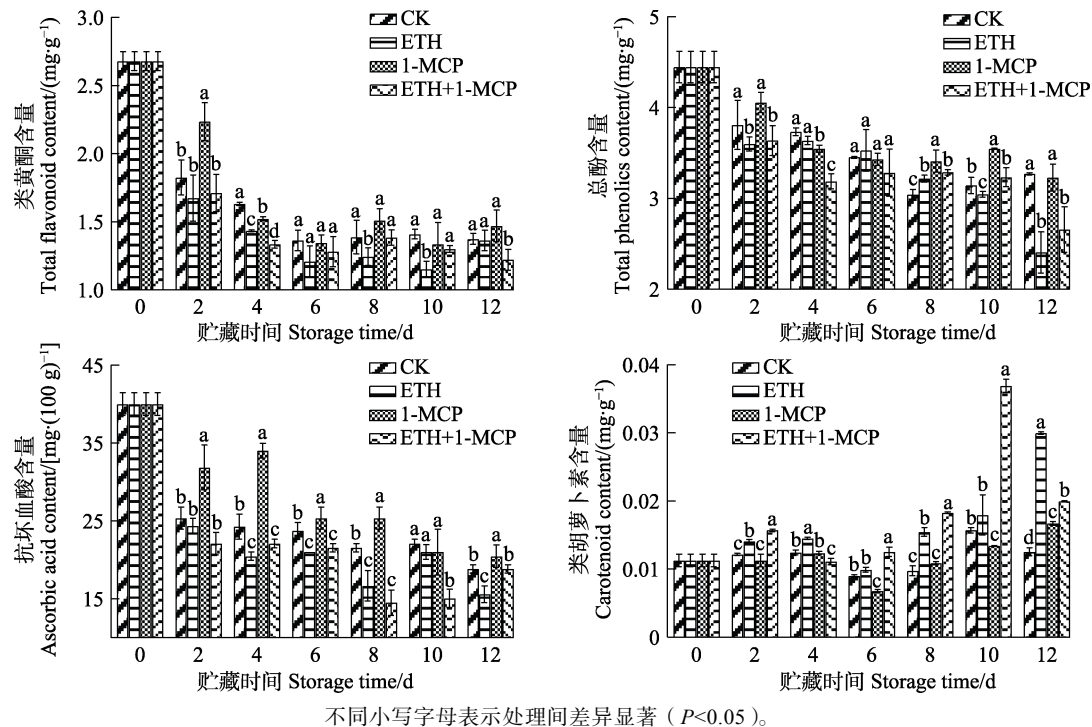
2.4 芒果贮藏期间果实营养品质的变化

如图 4 所示, 果实类黄酮、总酚和抗坏血酸含量均呈逐渐下降的趋势, 但 1-MCP 处理的类黄酮、总酚和抗坏血酸含量显著高于其他处理组 ($P < 0.05$), 说明 1-MCP 处理可以有效减缓芒果果肉营养物质的流失。ETH 和 ETH+1-MCP 处理加速了果实类黄酮、总酚和抗坏血酸的流失, 这些物质也是果实重要的抗氧化物质, 可能在抵抗果实衰老中发挥重要作用。类胡萝卜素是果实呈现黄色的主要色素, 同时也是果实重要的营养物质, 其呈现出逐渐上升的趋势, ETH 和 ETH+1-MCP 处理组果实的类胡萝卜素含量上升速度显著高于对照组和 1-MCP 处理组, 其中 ETH+1-

MCP 处理组最快, 在第 10 天达到峰值, 此时类胡萝卜素含量是对照组的 2.25 倍 ($P < 0.05$)。

2.5 ETH 处理组和 CK 组之间的差异代谢物分析

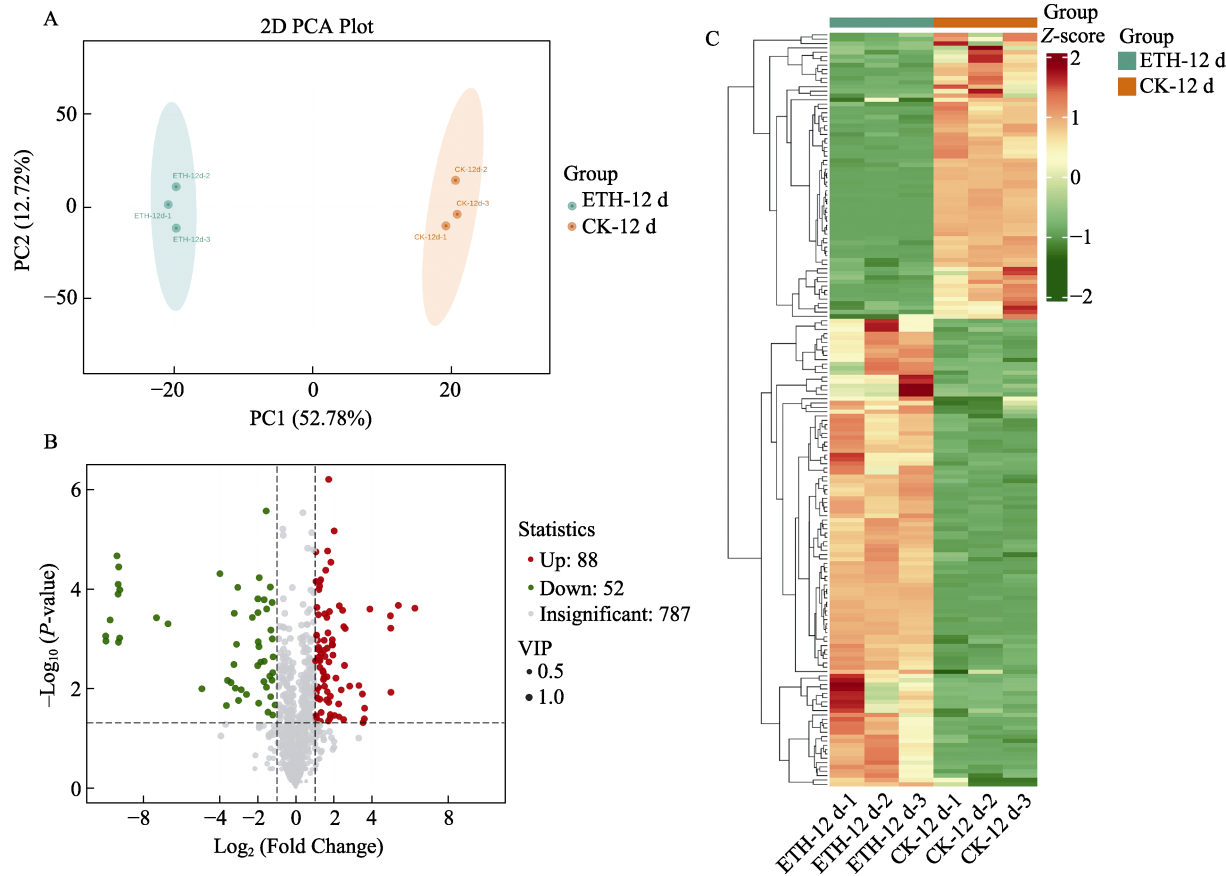
为了进一步揭示 ETH 处理对采后芒果果实品质的影响, 对 ETH 处理组和 CK 组果实进行代谢组分析。通过对 2 组样品的主成分分析 (图 5A) 发现, 2 组样品在 3 次生物学重复中的代谢物组成明显分离。代谢组分析结果表明 2 个处理间共有 140 种差异代谢物, 其中 88 种上调, 52 种下调 (图 5B)。与对照相比, ETH 处理组芒果果实的大多数代谢物呈上调趋势 (图 5C), 将排名前 50 的差异代谢物的相对表达量的变化绘制成小提琴图 (图 6)。利用 KEGG 数据库对差异代谢物进



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 4 不同处理对果实类黄酮、总酚、抗坏血酸和类胡萝卜素含量的影响

Fig. 4 Effects of different treatments on flavonoid, phenolics, ascorbic acid and carotenoid content of mango fruit



A: PCA 分析; B: 差异代谢物火山图; C: 代谢产物热图。
A: PCA analysis; B: Volcano plot of significantly different metabolites; C: Heatmap of metabolites phenolics.

图 5 代谢组分析

Fig. 5 Metabolomic analysis

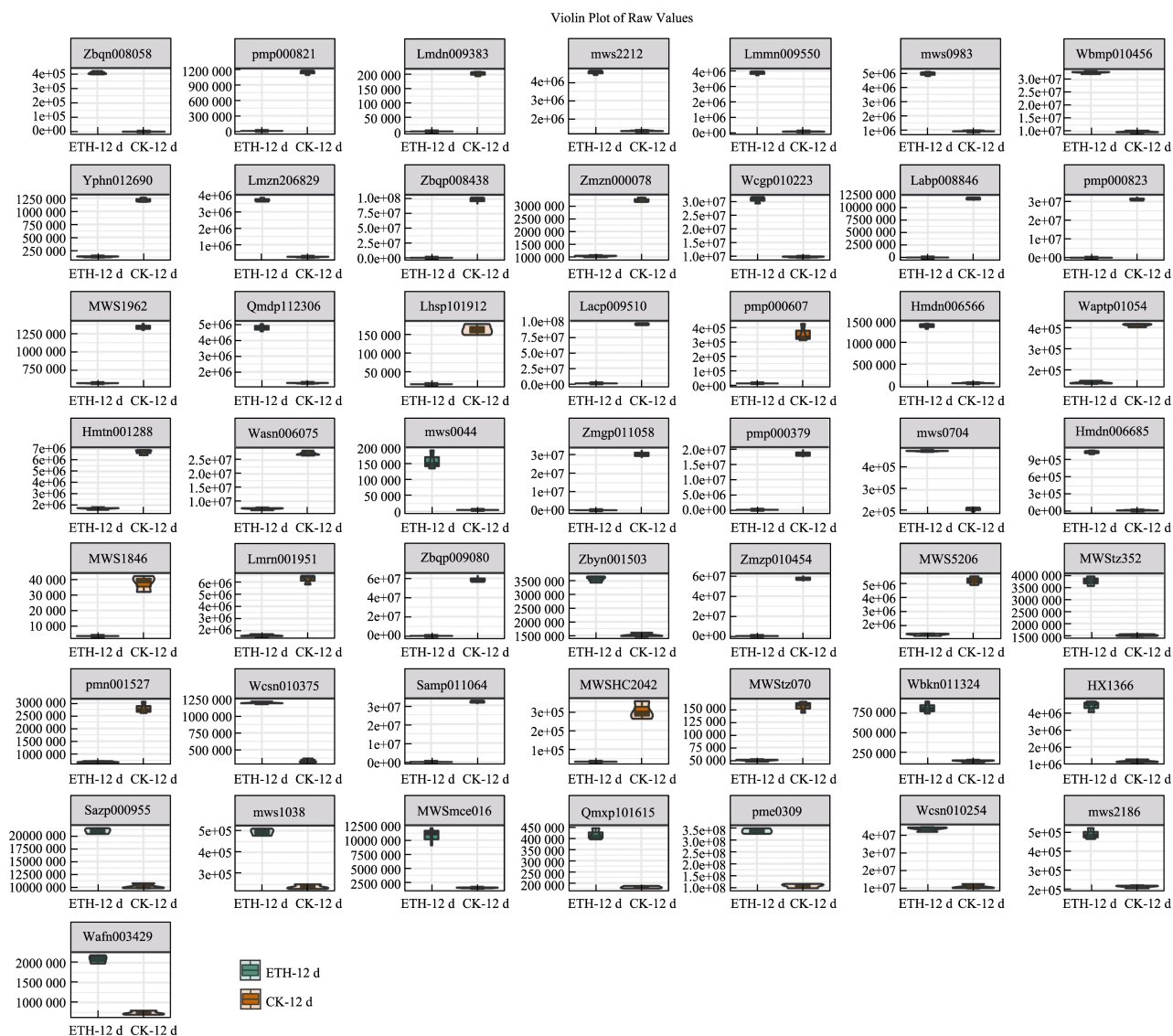


图 6 前 50 差异代谢物分析
Fig. 6 Analysis of top 50 differential metabolites

行注释分析,共注释到 6 个主要差异代谢途径:次生代谢物生物合成、类黄酮生物合成、黄酮和黄烷醇生物合成、苯丙氨酸代谢、吡啶类生物碱的生物合成和氨基酸的生物合成(图 7)。由此可见,黄酮类物质代谢受到 ETH 处理的影响较大,可能是成熟芒果口感和风味更加丰富的重要原因。

2.6 黄酮类差异代谢物分析

黄酮类物质是果实重要的营养物质,同时在抗氧化和抗病方面发挥重要作用,为了更加清楚地了解 ETH 处理对果实黄酮物质含量的影响,将 $VIP > 1$ 、 $|\log_2 FC| > 5$ 作为显著差异的阈值,从 CK 组和 ETH 处理组中筛选出 12 种明显差异表达的黄酮物质进行表达分析(图 8)。与 CK 组相比,12 种物质中有 11 种黄酮类物质在 ETH 处理组果

实中的相对含量下降,包括佳木宁 E2、大豆素Ⅲ、5,7,3',4'-四羟基-6,8-二异戊二烯异黄酮等,显著上升的只有 1 种,即花旗松素*。这一结果与生理结果一致,即总黄酮含量呈逐渐下降趋势,且 ETH 处理加快了这一进程。该结果为探索芒果果实中类黄酮含量的调控措施和培育富含类黄酮的芒果新品种奠定基础。

3 讨论

外观色泽是芒果果实重要的商品性状之一。贵妃芒果的果皮颜色由叶绿素的降解以及花青素和类胡萝卜素的积累共同作用决定^[4]。植物叶绿素降解的生物过程已被阐明^[23-25],果实的叶绿素降解过程除了受到相关酶活性的影响,还受到诸

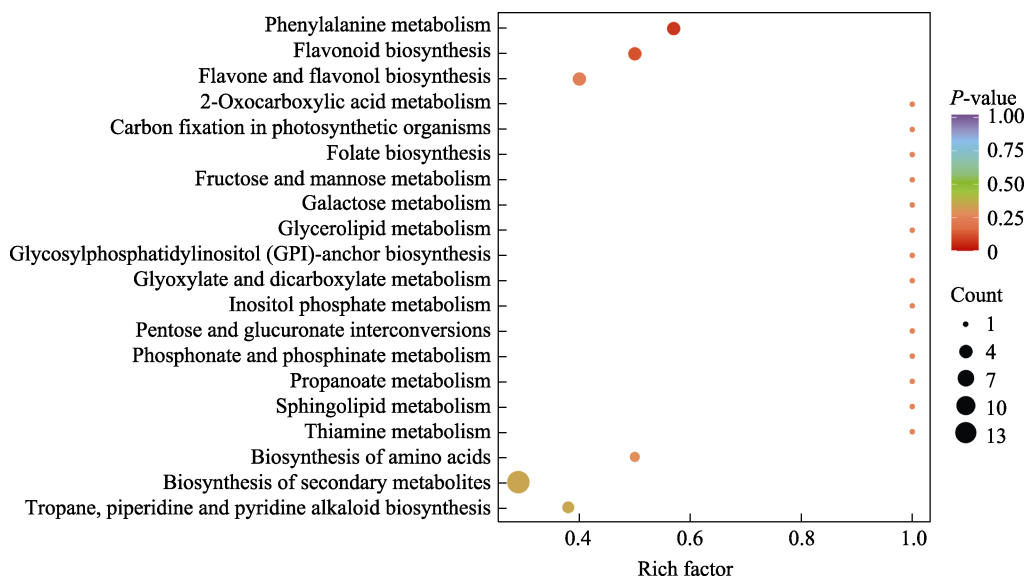


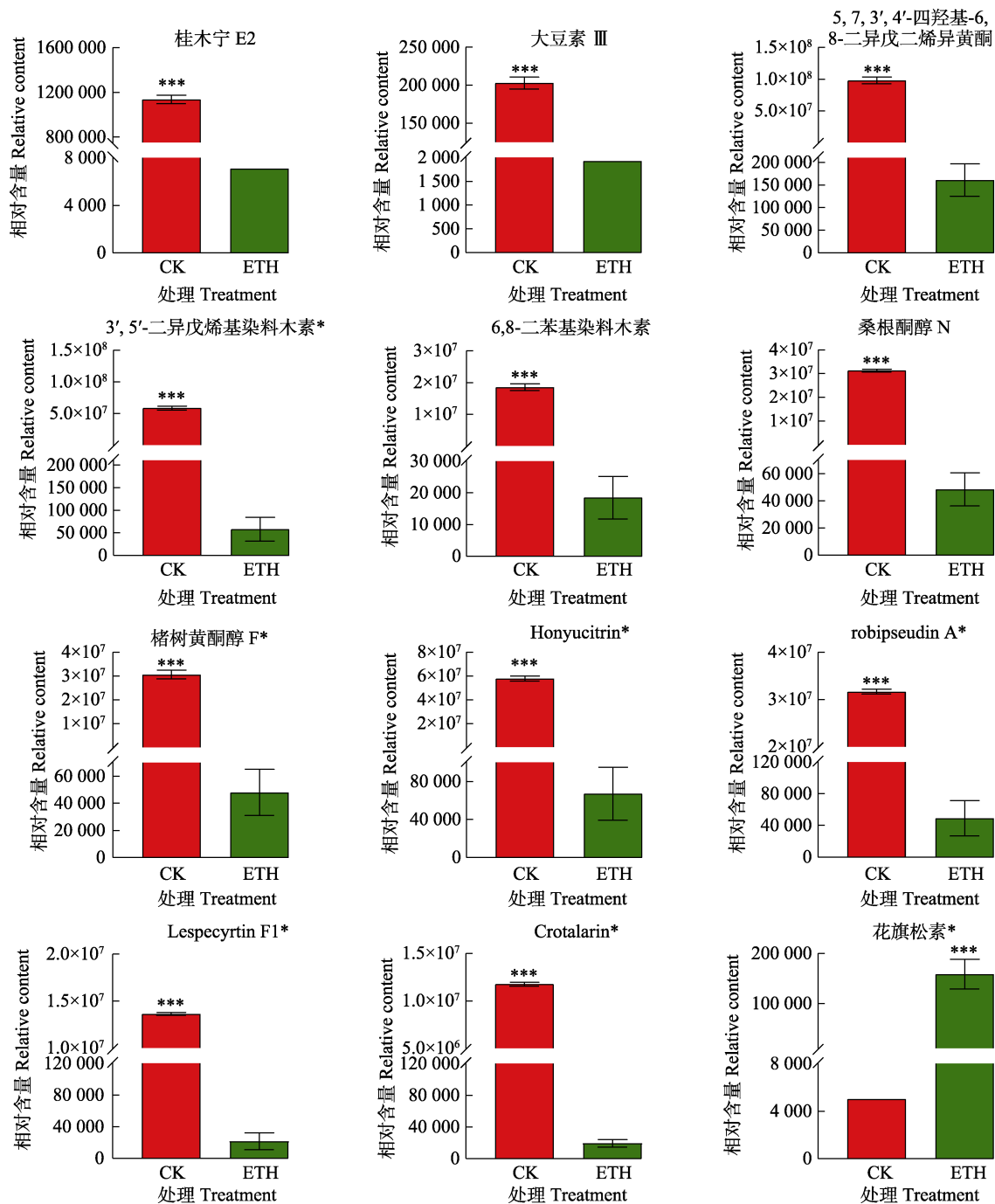
图 7 KEGG 分析

Fig. 7 KEGG analysis

多其他因素,如温度、光照及果实成熟状态等影响^[26]。有研究表明套袋处理能显著降低猕猴桃^[27]和桃^[28]中叶绿素的含量;高温能抑制香蕉^[29]中叶绿素的降解,研究发现在 25℃ 条件下蜜橘果实叶绿素降解加快,而在 32℃ 条件下则抑制了叶绿素的降解^[30]。果实花青素是一类重要的植物次生代谢产物,主要通过苯丙氨酸代谢途径和类黄酮途径合成,受一系列酶的调节^[31]。类胡萝卜素的生物合成途径以异戊烯焦磷酸为前体,经过异戊二烯焦磷酸异构酶、植物烯合成酶、胡萝卜素不饱和酶等一系列酶的作用下催化形成类胡萝卜素^[32-33]。果实花青素和类胡萝卜素的积累受到温度、光照和激素等因素的影响^[34-35]。如大量研究表明不同光质会影响柑橘^[36]、梨^[37]、草莓^[38]、葡萄柚和番茄^[39]等果实中类胡萝卜素和花青素的积累。本研究中,1-MCP 处理显著抑制了叶绿素的降解导致芒果果皮不能正常转色,而 ETH 和 ETH+1-MCP 处理则加速了叶绿素的降解,另外 ETH+1-MCP 处理组果实的叶绿素含量相较于 ETH 处理较高,进一步说明 ETH 对叶绿素降解具有促进作用,而 1-MCP 处理具有抑制作用。相似的结果同样在其他水果中发现,外源乙烯显著促进了香蕉^[40-41]、番木瓜^[42]、苹果^[43]和番茄^[44]中叶绿素的降解。在叶绿素降解的同时,类胡萝卜素快速积累,而喷施 1-MCP 可以抑制乙烯释放,从而抑制类胡萝卜素积累,这与研究中得到的结果一致,ETH+1-MCP 处理组类胡萝卜素含量峰值是

对照组的 2.25 倍,说明 ETH 和 1-MCP 处理在调控芒果果皮色泽方面效果显著。

芒果果实在贮藏过程中由于自身呼吸代谢和能量消耗,营养物质会逐渐流失,风味和口感也会随之变差。硬度、细胞膜透性和可溶性固形物含量代表了芒果的成熟度,本研究中,芒果果实硬度呈现出逐渐下降的趋势,其中 ETH 处理组果实硬度下降速度最快,但贮藏后期果实硬度变化不大,这是由于红贵妃芒果质地细腻,纤维较少,8 d 后果实基本已经达到完熟,此时硬度已经达到最低,因此不再继续下降。芒果可溶性固形物的含量呈先上升后下降的趋势,这是由于贮藏前期淀粉降解,可溶性糖含量增加,但贮藏后期由于果实呼吸以及其他代谢消耗能量,果实又会出现褪糖现象,其中乙烯利处理组果实 TSS 含量上升最快,在第 4 天就达到了峰值,而 1-MCP 处理由于降低了呼吸等能量消耗延缓了 TSS 的升高,峰值出现相对较晚,在第 6 天达到峰值,相应地褪糖也更为缓慢,因此积累了更多的可溶性糖,其峰值也是各个处理组中最高的。试验结果表明 ETH 可以起到快速催熟的作用,在香蕉^[45]、木瓜^[46]等呼吸跃变型果实中也已得到充分证实。但伴随而来的是芒果果实营养物质的快速流失,有机酸、V_C、类黄酮和总酚含量快速下降。而 1-MCP 处理则起到完全相反的作用,结果表明 1-MCP 处理延缓了果实硬度、可滴定酸、类黄酮、总酚和抗坏血酸含量的下降,在贮藏后期仍保持了果实较高



***表示差异极显著 ($P<0.001$)。
*** indicates extremely significant difference ($P<0.001$).

图 8 黄酮类差异代谢物分析
Fig. 8 Analysis of flavonoid differential metabolites

的甜度，具有很好的保鲜效果。这一结果与 XIONG 等^[47]在猕猴桃，袁富容等^[48]在蓝莓以及包特等^[49]在南红梨上采用 1-MCP 进行保鲜得到的结果一致。

黄酮类物质是果实中重要的营养物质，同时也是抗氧化和抗菌物质，不仅可以提高果实抗病性，还能抵抗病原菌的侵袭^[50]。在本研究中，异

黄酮（3',5'-二异戊烯基染料木素*、6,8-二苯基染料木素、5,7,3',4'-四羟基-6,8-二异戊二烯异黄酮），黄酮醇（robipseudin A*）以及其他类黄酮（桑根酮醇 N、桂木宁 E2）在 CK 组的含量显著高于 ETH 处理组，这些黄酮类物质含量的下降降低了芒果对病原菌的抵抗，因此这可能是乙烯催熟芒果易感病的重要原因之一。高文科等^[51]也得出过类似

的结论, 异黄酮[芒柄花素-7-O-(6"-丙二酰)葡萄糖苷]、黄酮醇(山奈酚-7-O-葡萄糖醛酸苷)、木质素(落叶松脂素-4'-O-葡萄糖苷)以及香豆素(秦皮素)等次生代谢产物分别增加 3.12 倍、8.56 倍、12.74 倍和 14.41 倍, 这些黄酮类和异黄酮类物质都有增强果实抗病性的作用。

综合分析表明, ETH 和 ETH+1-MCP 复合处理在提升果实外观品质上要优于 1-MCP 处理, 而 1-MCP 处理在提升果实内在品质上要优于其他处理。利用广泛靶向代谢组学共检测到 140 种差异代谢物和 12 种类黄酮代谢物, 全面解析了 ETH 处理对果实色泽转化和内在品质形成的代谢机理, 为深入研究芒果后熟品质变化机制提供理论依据, 为优质芒果的生产提供参考。

参考文献

- [1] 李日旺, 黄国弟, 苏美花, 周俊岸, 陈永森. 我国芒果产业现状与发展策略[J]. 南方农业学报, 2013, 44(5): 875-878.
LI R W, HUANG G D, SU M H, ZHOU J A, CHEN Y S. Status and developmental strategies of mango industry in China[J]. Journal of Southern Agriculture, 2013, 44(5): 875-878. (in Chinese)
- [2] 武红霞. 芒果花色苷合成与调控的生理与分子机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WU H X. Physiological and molecular mechanism of anthocyanin synthesis and regulation in mango (*Mangifera indica* Linn)[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)
- [3] 李秀芳. ‘红富士’苹果采后贮藏过程中色度及其色素成分变化的相关研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
LI X F. The changes in the chromaticity and pigment composition of ‘Red Fuji’ apple fruit during postharvest storage[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014. (in Chinese)
- [4] 郑小林, 张佳佳, 励建荣. ‘凯特’芒果栽培中果实套袋对其采后品质及贮藏性的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(4): 657-665.
ZHENG X L, ZHANG J J, LI J R. Effects of bagging treatments on quality and storability of postharvest ‘Keitt’ mango fruit[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2011, 38(4): 657-665. (in Chinese)
- [5] LEBAKA V R, WEE Y J, YE W, KORIVI M. Nutritional composition and bioactive compounds in three different parts of mango fruit[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(2): 741.
- [6] 方中斌, 阮彩美. 芒果快速催熟试验[J]. 广西农业科学, 2003(3): 35-36.
FANG Z B, RUAN C M. Experiment about fast chemical ripening of mango[J]. Journal of Southern Agriculture, 2003(3): 35-36. (in Chinese)
- [7] 胡隆孝, 曹琳彩, 王凯, 赵雷. 采后催熟对‘台农一号’芒果理化品质及营养特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(2): 369-375.
HU L X, CAO L C, WANG K, ZHAO L. Effects of post-harvest ripening on the physicochemical and nutraceutical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Tainung 1)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 369-375. (in Chinese)
- [8] 汤红, 马冀恒, 邢益发, 邵远志, 李雯. 不同采收成熟度芒果对乙烯和贮藏温度的生理响应[J]. 植物生理学报, 2020, 56(3): 431-440.
TANG H, MA J H, XIN Y F, SHAO Y Z, LI W. Physiological responses of mango with different harvest maturity to ethylene and storage temperature[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(3): 431-440. (in Chinese)
- [9] TATSUKI M, ENDO A, OHKAWA H. Influence of time from harvest to 1-MCP treatment on apple fruit quality and expression of genes for ethylene biosynthesis enzymes and ethylene receptors[J]. Postharvest Biology and Technology, 2007, 43(1): 28-35.
- [10] XIA Z Q, HUANG D M, ZHANG S K, WANG W Q, MA F N, WU B, XU Y, XU B Q, CHEN D, ZOU M L, XU H Y, ZHOU X C, ZHAN R L, SONG S. Chromosome-scale genome assembly provides insights into the evolution and flavor synthesis of passion fruit (*Passiflora edulis* Sims)[J]. Horticulture Research, 2021, 8: 14.
- [11] ZOU S C, WU J C, SHAHID M Q, HE Y H, LIN S Q, LIU Z H, YANG X H. Identification of key taste components in loquat using widely targeted metabolomics[J]. Food Chemistry, 2020, 323: 126822.
- [12] PINO J A, ALMORA K, MARBOT R. Volatile components of papaya (*Carica papaya* L, Maradol variety) fruit[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2003, 18(6): 492-496.
- [13] 罗朝丹, 冯春梅, 李建强, 黎新荣, 韦勇, 杨李益, 刘筱瑾, 谭和, 任二芳, 罗小杰. 基于 GC-MS 非靶向代谢组学分析不同成熟度‘台农一号’芒果香气物质[J]. 中国农业科学, 2025, 58(3): 564-584.
LUO C D, FENG C M, LI J Q, LI X R, WEI Y, YANG L Y, LIU X J, TAN H, REN E F, LUO X J. Analysis of differential aroma volatiles of Tainong 1 mango of different ripeness by non-targeted metabolomics based on gas chromatography-mass spectrometry[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2025, 58(3): 564-584.

- [14] 冯春梅, 罗朝丹, 李建强, 黎新荣, 温立香, 黄燕婷, 张曦予, 庞春秀. 不同成熟度台农芒果果肉色泽变化和类胡萝卜素代谢差异分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 10-19. FENG C M, LUO C D, LI J Q, LI X R, WEN L X, HUANG Y T, ZHANG X Y, PANG C X. Pulp color change and the differences of carotenoids metabolism in flesh of Tainong mango of different ripeness[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 10-19.
- [15] MA X W, ZHENG B, MA Y L, XU W T, WU H X, WANG S B. Carotenoid accumulation and expression of carotenoid biosynthesis genes in mango flesh during fruit development and ripening[J]. Scientia Horticulturae, 2018, 237: 201-206.
- [16] WANG N, NIAN Y W, LI R, SHAO Y Z, LI W. Transcription factor CpbHLH3 and *CpXYNI* gene cooperatively regulate fruit texture and counteract 1-Methylcyclopropene inhibition of softening in postharvest papaya (*Carica papaya* L.)[J]. Agricultural Food Chemistry, 2022, 70(32): 9919-9930.
- [17] ZHANG Z K, HUBER D J, QU H X, YUN Z, WANG H, HUANG Z H, HUANG H, JIANG Y M. Enzymatic browning and antioxidant activities in harvested litchi fruit as influenced by apple polyphenols[J]. Food Chemistry, 2015, 171: 191-199.
- [18] 张瑜, 王鹏飞, 穆霄鹏, 张建成, 付鸿博, 杜俊杰. 欧李 F_1 果实糖酸性状的遗传变异分析[J]. 山西农业科学, 2019, 47(4): 530-535. ZHANG Y, WANG P F, MU X P, ZHANG J C, FU H B, DU J J. Genetic variation analysis of sugar-acid characters in F_1 generation fruits of Chinese dwarf cherry[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2019, 47(4): 530-535. (in Chinese)
- [19] RICCARDI M, MELE G, PULVENTO C, LAVINI A, D'ANDRIA R, JACOBSEN S E. Non-destructive evaluation of chlorophyll content in quinoa and amaranth leaves by simple and multiple regression analysis of RGB image components[J]. Photosynthesis Research, 2014, 120(3): 263-272.
- [20] 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. CAO J K, JIANG W B, ZHAO Y M. Post-harvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables[M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [21] 李芬芳. 草莓酚类物质的提取、纯化及生物活性研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2017. LI F F. Study on the extraction, purification and biological activity of phenol in strawberry[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [22] ZHANG Z Q, TIAN S P, ZHU Z, XU Y, QIN G Z. Effects of 1-methylcyclopropene(1-MCP) on ripening and resistance of jujube (*Zizyphus jujuba* cv. Huping) fruit against postharvest disease[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 45(1): 13-19.
- [23] HÖRTENSTEINER S. Update on the biochemistry of chlorophyll breakdown[J]. Plant Molecular Biology, 2013, 82(6): 505-517.
- [24] HU X Y, GU T Y, KHAN I, ZADA A, JIA T. Research progress in the interconversion, turnover and degradation of chlorophyll[J]. Cells, 2021, 10(11): 3134.
- [25] 吴莹莹. 转录因子 AcHZIP45 调控猕猴桃果实叶绿素代谢的分子机制[D]. 杭州: 浙江大学, 2023. WU Y Y. The mechanism of transcription factor AcHZIP45 in regulating chlorophyll metabolism in kiwifruit[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2023. (in Chinese)
- [26] GUNAWAN M I, BARRINGER S A. Green color degradation of blanched broccoli (*Brassica oleracea*) due to acid and microbial growth[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2000, 24: 253-263.
- [27] 陈成, 王依, 宋思言, 杨勇, 万春雁, 阎永齐. 套袋对海沃德猕猴桃果实品质及叶绿素代谢的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(7): 138-146. CHEN C, WANG Y, SONG S Y, YANG Y, WAN C Y, YAN Y Q. Effect of bagging on fruit quality and chlorophyll metabolism of Hayward kiwifruit[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2022, 50(7): 138-146. (in Chinese)
- [28] 刘鑫, 张晓煜, 孟君仁, 李昂, 段文宜, 孙世航, 潘磊, 曾文芳, 王志强, 牛良. 套袋对油桃果皮叶绿素降解及相关基因表达的影响[J]. 果树学报, 2024, 41(8): 1513-1523. LIU X, ZHANG X Y, MENG J R, LI A, DUAN W Y, SUN S H, PAN L, ZENG W F, WANG Z Q, NIU L. Effect of fruit bagging on chlorophyll degradation and related gene expression in nectarine peel[J]. Journal of Fruit Science, 2024, 41(8): 1513-1523. (in Chinese)
- [29] LUO Q, WEI W, YANG Y Y, WU C J, CHEN J Y, LU W J, KUANG J F, SHAN W. E3 ligase MaNIP1 degradation of NON-YELLOW COLORING1 at high temperature inhibits banana degreening[J]. Plant Physiology, 2023, 192(3): 1969-1981.
- [30] 邓淑芳, 刘倩, 刘玲, 陈鸥, 王文军, 曾凯芳, 邓丽莉. 蜜橘 CcHY5 的克隆及其对果实转色功能的研究[J]. 园艺学报, 2024, 51(5): 939-955. DENG S F, LIU Q, LIU L, CHEN O, WANG W J, ZENG K F, DENG L L. Cloning of mandarin fruit CcHY5 and its function in fruit coloration[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2024, 51(5): 939-955. (in Chinese)
- [31] LI S H, HE Y J, LI L Z, LI D Z, CHEN H Y. New insights

- on the regulation of anthocyanin biosynthesis in purple Solanaceous fruit vegetables[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 297: 110917.
- [32] YUAN H, ZHANG J X, NAGESWARAN D, LI L. Carotenoid metabolism and regulation in horticultural crops[J]. *Horticulture Research*, 2015, 2: 15036.
- [33] 汪书杰. PYP2、PSY1 和 CCD4b1 在柑桔果皮类胡萝卜素积累中的作用[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- WANG S J. Roles of PYP2、PSY1 and CCD4b1 in carotenoid accumulation in citrus peel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [34] 卢雯莹, 赵磊, 李天奇, 崔鹤云, 廖平安. 蔷薇科植物果实花青苷积累研究进展[J]. *生物技术通报*, 2021, 37(1): 234-245.
- LU W Y, ZHAO L, LI T Q, CUI H Y, LIAO P A. Research advances of fruit anthocyanin accumulation in rosaceae plants[J]. *Biotechnology Bulletin*, 2021, 37(1): 234-245. (in Chinese)
- [35] 王曼曼, 薛舒丹, 吴廷全, 罗少波, 谢大森, 钟玉娟. 光照和温度调控对番茄果实中类胡萝卜素合成的影响[J]. *分子植物育种*, 2020, 18(18): 6158-6164.
- WANG M M, XUE S D, WU T Q, LUO S B, XIE D S, ZHONG Y J. Effects of illumination and temperature regulation on synthesis of carotenogenesis in tomato (*Solanum lycopersicum* L.) fruit[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2020, 18(18): 6158-6164. (in Chinese)
- [36] ZHANG L C, MA G, KATO M, YAMAWAKI K, TAKAGI T, KIRIWA Y, IKOMA Y, MATSUMOTO H, YOSHIOKA T, NESUMI H. Regulation of carotenoid accumulation and the expression of carotenoid metabolic genes in citrus juice sacs *in vitro*[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2012, 63(2): 871-886.
- [37] TAO R Y, BAI S L, NI J B, YANG Q S, ZHAO Y, TENG Y W. The blue light signal transduction pathway is involved in anthocyanin accumulation in 'Red Zaosu' pear[J]. *Planta*, 2018, 248(1): 37-48.
- [38] XU F, CAO S F, SHI L Y, CHEN W, SU X J, YANG Z F. Blue light irradiation affects anthocyanin content and enzyme activities involved in postharvest strawberry fruit[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(20): 4778-4783.
- [39] 徐燕娜. 红蓝光质对采后番茄、柑橘果实着色的影响及红光调控柑橘果实 ABA 积累的机制探究[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2024.
- XU Y N. Effects of red and blue light on color conversion in tomato and citrus fruits and the mechanism of red light on carotenoid metabolism and ABA accumulation in citrus fruits[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2024. (in Chinese)
- [40] 刘伟鑫, 苗红霞, 金志强, 刘菊华, 贾彩红, 孙佩光, 徐碧玉. 乙烯和 1-MCP 处理对香蕉采后果皮色素含量及褪绿变黄的调控[J]. *果树学报*, 2013, 30(6): 1051-1055.
- LIU W X, MIAO H X, JIN Z Q, LIU J H, JIA C H, SUN P G, XU B Y. Effects of ethylene and 1-MCP on pigment content and degreening of banana during ripening[J]. *Journal of Fruit Science*, 2013, 30(6): 1051-1055. (in Chinese)
- [41] VU H T, SCARLETT C J, VUONG Q V. Changes of phytochemicals and antioxidant capacity of banana peel during the ripening process; with and without ethylene treatment[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 253: 255-262.
- [42] FACANHA R V, SPRICIGO P C, PURGATTO E, JACOMINO A P. Combined application of ethylene and 1-methylcyclopropene on ripening and volatile compound production of 'Golden' papaya[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 151: 160-169.
- [43] 安建平. 激素和环境信号调控苹果花青苷生物合成的机理研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.
- AN J P. Study on the mechanism of hormonal and environmental signals regulating anthocyanin biosynthesis in apple[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [44] 高铭忆, 顾建明, 张婧, 常有麟, 董彪. 1-MCP 及乙烯利处理对番茄采后品质及生理变化的影响[J]. *甘肃农业大学学报*, 2024, 59(6): 68-75, 83.
- GAO M Y, XIE J M, ZHANG J, CHANG Y L, DONG B. Effects of 1-MCP and ethephon treatment on postharvest quality and physiological changes of tomatoes[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2024, 59(6): 68-75, 83. (in Chinese)
- [45] 张利伟. 高氧结合低浓度乙烯催熟对采后香蕉果实品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- ZHANG L W. Effect of high oxygen combined with low concentration ethylene on ripening of postharvest banana fruit[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [46] MANENOI A, BAYOGAN E R V, THUMDEE S, PAULL R E. Utility of 1-methylcyclopropene as a papaya postharvest treatment[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2007, 44(1): 55-62.
- [47] XIONG S G, SUN X S, TIAN M X, XU D Y, JIANG A L. 1-Methylcyclopropene treatment delays the softening of *Actinidia arguta* fruit by reducing cell wall degradation and modulating carbohydrate metabolism[J]. *Food Chemistry*, 2023, 411: 135485.
- [48] 袁富容, 杨婷, 冉雅文, 周雅涵. 基于主成分分析法评价 1-MCP 处理对'蓝丰'蓝莓果实品质及生理的影响[J]. 保鲜

- 与加工, 2024, 24(9): 8-18.
- YUAN F R, YANG T, RAN Y W, ZHOU Y H. Effects of 1-MCP treatment on 'Bluecrop' blueberry fruits quality and physiology based on principal component analysis[J]. *Storage and Process*, 2024, 24(9): 8-18. (in Chinese)
- [49] 包特, 张鹏, 贾晓昱, 吴迪, 李江阔, 魏宝东. 不同 1-MCP 处理方式对南红梨采后质地与风味品质的影响[J]. *包装工程*, 2024, 45(15): 88-97.
- BAO T, ZHANG P, JIA X Y, WU D, LI J K, WEI B D. Effect of different 1-MCP treatment methods on postharvest texture and flavor quality of Nanhong pears[J]. *Packaging Engineering*, 2024, 45(15): 88-97. (in Chinese)
- [50] SINGH R, RASTOGI S, DWIVEDI U N. Phenylpropanoid metabolism in ripening fruits[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2010, 9(4): 398-416.
- [51] 高文科, 李明海, 赵兴东, 吴兴恩, 彭磊, 王梓然. 代谢组解析商品成熟与生理成熟芒果内在品质和类胡萝卜素合成差异[J]. *中国农业大学学报*, 2022, 27(4): 95-104.
- GAO W K, LI M H, ZHAO X D, WU X D, PENG L, WANG Z R. Differences in intrinsic quality and carotenoid biosynthesis between commodity maturity and physiological maturity mango fruits by metabolome analysis[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2022, 27(4): 95-104. (in Chinese)