

采后催熟对‘台农一号’芒果理化品质及营养特性的影响

胡隆孝, 曹琳彩, 王 凯, 赵 雷

Effects of Postharvest Ripening on the Physicochemical and Nutraceutical Properties of Mango (*Mangifera indica* L. cv Tainung No.1)

HU Longxiao, CAO Lincai, WANG Kai, and ZHAO Lei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022020128>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

顶空固相微萃取-气质联用分析不同芒果品种香气成分差异

Analysis and Comparison of Aroma Components in Different Mango Varieties by Headspace-solid-phase Microextraction-Gas Chromatograph-Mass Spectrometer

食品工业科技. 2021, 42(11): 211-217 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020060377>

芒果、胡萝卜复合果酒发酵过程中理化成分和香气物质的变化

Dynamic Changes of Physicochemical and Aroma Components in the Fermentation Process of Mango-carrot Compound Fruit Wine

食品工业科技. 2020, 41(12): 7-13 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.12.002>

1-MCP和乙烯利处理对采后‘金冠’苹果常温贮藏过程中生理变化及活性氧代谢的影响

Effects of 1-methylcyclopropene and ethephon treatment on physiological changes and reactive oxygen metabolism of postharvest ‘Golden Delicious’ apple fruit during storage at ambient temperature

食品工业科技. 2017(05): 339-344 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.05.056>

顶空固相微萃取-全二维气相色谱/飞行时间质谱测定三种芒果香气成分

Detection of Aroma Components in Three Cultivars of Mango with Headspace Solid Phase Microextraction-Comprehensive Two-dimensional Gas Chromatograph/Time of Flight Mass Spectrometer

食品工业科技. 2021, 42(15): 218-226 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070275>

气相色谱-串联质谱法测定水果、蔬菜中乙烯利的残留量

Determination of Ethephon Residues in Fruits and Vegetables by Gas Chromatography-tandem Mass Spectrometry

食品工业科技. 2019, 40(15): 201-206,214 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.033>

一氧化氮对常温贮藏下芒果果实软化和细胞壁代谢的影响

Effect of Nitric Oxide on Softening and Cell Wall Metabolism of Postharvest Mango

食品工业科技. 2018, 39(17): 269-275 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.17.045>

胡隆孝, 曹琳彩, 王凯, 等. 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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020128

HU Longxiao, CAO Lincai, WANG Kai, et al. Effects of Postharvest Ripening on the Physicochemical and Nutraceutical Properties of Mango (*Mangifera indica* L. cv Tainung No.1)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(2): 369–375. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020128

· 贮运保鲜 ·

采后催熟对‘台农一号’芒果理化品质及营养特性的影响

胡隆孝¹, 曹琳彩², 王 凯², 赵 雷^{2,*}

(1.广州市果美味食品有限公司, 广东广州 510800;

2.华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘 要:采用外源乙烯利对‘台农一号’芒果进行催熟, 乙烯利添加量 0.1 (w/w), 温度 30 ℃, 湿度 40%~50%。探讨不同催熟阶段对芒果理化指标(硬度、色泽、可滴定酸、可溶性固形物), 营养成分(类胡萝卜素、维生素 C、可溶性蛋白质、总糖)和香气成分的影响。结果表明, 在催熟过程中果实硬度从 19.76 N 下降到 0.99 N, 可滴定酸从 1.37% 下降至 0.27%, 而可溶性固形物从 12.92% 上升至 23.64%。当催熟时间从 0 h 增加至 60 h, 黄色指数显著 ($P<0.05$) 增加, 约 85% 以上的果皮颜色转为黄色, 类胡萝卜素含量可升高至 4.90 $\mu\text{g/g}$, 维生素 C 从 326.66 mg/100 g 下降至 180.00 mg/100 g, 而总糖含量显著 ($P<0.05$) 增加; 继续延长催熟时间至 108 h, 类胡萝卜素升高至 10.93 $\mu\text{g/g}$; 维生素 C、可溶性蛋白质和总糖等变化不显著。芒果果实香气物质主要是萜烯类化合物, 其中异松油烯含量最高, 在催熟 60 h 之内其含量迅速增大, 外源乙烯利加快了果实中异松油烯的合成速率。综合评价催熟后果实理化及品质特性 60 h 后芒果色泽、香气等指标基本达到成熟。

关键词: 芒果, 乙烯利, 理化指标, 营养特性, 香气成分

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)02-0369-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022020128



本文网刊:

Effects of Postharvest Ripening on the Physicochemical and Nutraceutical Properties of Mango (*Mangifera indica* L. cv Tainung No.1)

HU Longxiao¹, CAO Lincai², WANG Kai², ZHAO Lei^{2,*}

(1.Guangzhou Guomeiwei Food Co., Ltd., Guangzhou 510800, China;

2.College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: The present project objective was to evaluate physicochemical and nutritional changes of mango cv. Tainung No.1 that included firmness, color, total soluble solids (TSS), titratable acidity (TA), carotenoid, vitamin C (V_C), protein, total sugar and aroma component at 10 postharvest ripening-stages under the ripeing condition (0.1% w/w ethephon, 30 °C, 40%~50% humidity). Results indicated a decrease in firmness from 19.76 to 0.99 N, while TA decreased from 1.37% to 0.27% and TSS increased from 12.92% to 23.64%. When the ripening time increased from 0 to 60 h, the yellow index increased significantly, and more than 85% of fruit skins turned yellow. The content of carotenoid increased to 4.90 $\mu\text{g/g}$ (maximum), while V_C decreased from 326.66 mg/100 g to 180.00 mg/100 g, and total sugar content increased significantly. When ripening time extended to 108 h, the content carotenoid increased to 10.93 $\mu\text{g/g}$, and the changes of the V_C , soluble protein and total sugar were not significant. The aroma compounds of mango was mainly terpenes, among which the content of terpinolene was the highest, and its content increased rapidly within 60 h of ripening. Exogenous ethephon

收稿日期: 2022-02-17

基金项目: 国家自然科学基金 (31771980); 广州市对外科技合作计划项目 (201807010113)。

作者简介: 胡隆孝 (1989-), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向: 热带水果精深加工, E-mail: Hyishi2010@126.com。

* 通信作者: 赵雷 (1982-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 天然产物绿色修饰及热带水果加工综合利用, E-mail: scauzl@scau.edu.cn。

accelerated the synthesis rate of iso-terpinene in fruits. After 60 h of ripening, the color and aroma of mango reached maturity.

Key words: mango; ethephon; physical and chemical indicators; nutrient characteristic; aroma characteristics

芒果(*Mangifera indica* L.)在全世界超过 90 个国家都有种植,是最重要的热带水果之一^[1-2]。成熟的芒果具有鲜艳的颜色,香甜的味道、浓郁的风味以及丰富的营养成分(糖、维生素、矿物质、纤维和植物化学成分),素有“热带果王”之美誉。近年来,在中国的海南省、广西省百色市、四川省攀枝花市形成芒果的主产区,以台农一号、金煌芒、红玉、贵妃、红象牙芒、鹰嘴芒和青芒等形成了“早”、“中”、“晚”熟的主栽品种,其中台农一号以其营养丰富、品质优良、丰产性好、适应性强等特点在我国海南、广西等省份得到大面积的推广种植。

芒果是一种典型的呼吸跃变型果实,在脱离母体后仍能够继续成熟。芒果的品质受成熟阶段等因素的影响,在成熟过程中发生的生理生化和分子等变化直接影响其品质性状^[3]。芒果采后成熟的过程中,一方面,叶绿素的消解及类胡萝卜素的生物合成导致其果皮和果肉颜色的变化,细胞壁降解酶活性增加导致细胞壁的变化,总酚含量的变化^[4]、维生素 C 含量的下降,以及总可溶性固体增加等^[5],于此同时,果实的成熟,芳香性物质的增多,果实香气愈发浓烈;另一方面,随着果实的成熟和衰老,其自身的抗病性大大减弱,果实腐烂亦会加剧。一般而言,芒果采摘后自然成熟需要 5~8 d^[6]。外源乙稀(乙稀利)作为催熟剂已被广泛应用于具有后熟现象的园艺产品上^[7],与温度、湿度及封闭状况等共同调节采后芒果的成熟时间。

优质水果的产品不仅依赖于加工技术,还依赖于对水果成熟度的合理选择,因此需加强对芒果采收后催熟过程的研究,深入探讨果实采后催熟过程中主要品质及营养的变化规律,以期获得更优质的芒果产品,并促进对健康更有益的芒果的加工。因此本文以生芒果(台农一号)为研究对象,探讨不同催熟阶段芒果理化指标、营养物质、色泽及香气成分的变化,为完善芒果采后品质调控技术提供实验依据。

1 材料与仪器

1.1 材料与仪器

生芒果(台农一号) 采摘于广西;乙稀利 上海华谊集团华原化工有限公司;环己酮、乙腈 色谱纯, Sigma 公司;2,6-二氯靛酚、抗坏血酸、草酸、牛血清蛋白、考马斯亮蓝 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司。

Uvmini-1240 紫外分光光度计、EZ-Test EZ-SX 单柱式电子万能试验机 日本岛津公司;PR-201 α 数显糖度计 日本 ATAGO 公司;NR60CP 精密色差计 深圳三恩时科技有限公司;1260 Infinity 高效液相色谱仪、7890B-5977A 型 GC-MA 质谱联用仪

美国安捷伦公司;100 μ m PDMS 型萃取头 美国 Supelco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 芒果催熟方法 催熟方法参考梁敏华等^[1],选取果形、成熟度、大小一致芒果 20 $\pm$ 1 个(15 kg),将 15 g 乙烯利置于纸巾上,卷成一个纸球,放置于芒果中的中心位置。保持环境温度 30 $^{\circ}$ C,相对湿度 40%~50% 左右。每 12 h 取样 20 个芒果,每个采样时间为一个催熟期,催熟期标记为从 1 到 10。每个催熟期的样品立即进行硬度的测试,而后打浆放置于 -20 $^{\circ}$ C 的冰箱中待测。

1.2.2 果肉硬度测定 采用电子万能试验机测定样品果肉硬度,将果实赤道轴中心处果皮削去,沿中心处测定上中下三点位置的硬度取平均值。探头尖端为直径 2 mm 圆柱形。测定条件:前速率 5 mm/s,贯入速度 1 mm/s,后速度 5 mm/s,最小感知力 5 g,穿刺深度 8 mm,硬度单位以牛顿(N)表示。

1.2.3 果皮色泽指数测定 利用色差计测定芒果表皮的中 L^* 、 a^* 和 b^* 值,其中 L^* 表示亮度, a^* 表示红绿度变化, b^* 表示黄蓝度变化。根据公式计算黄色指数。

$$\text{黄色指数(Yellow Index, YI)} = 184.86 \times (b^*/L^*) \quad \text{式(1)}$$

1.2.4 可滴定酸测定 参照国标 GB 12456-2008 中的指示剂滴定法,以苹果酸计。称取芒果果肉匀浆 100 g,定容至 250 mL,在 75~80 $^{\circ}$ C 水浴 30 min,过滤后取 50 mL 样液,加入酚酞,用 NaOH 标准溶液滴定,微红色 30 s 不褪色为终点,记下消耗体积。

$$\text{可滴定酸(\%)} = C \times V_1 \times \frac{K}{V_0} \times \frac{F}{m} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: C 为 NaOH 浓度, mol/L; V_1 为滴定消耗的 NaOH 体积, mL; V_0 为吸取的样液体积, mL; K 为苹果酸的换算系数, 0.067; F 为试样的稀释倍数; m 为试样的质量, g。

1.2.5 可溶性固形物含量测定 芒果打浆过滤后采用数显糖度仪测定可溶性固形物(Total Soluble Solids, TSS)。

1.2.6 可溶性糖含量测定 参考《果蔬采后生理生化实验指导》^[8]中“果蔬中可溶性糖含量的测定”苯酚-硫酸法稍作修改,以无水葡萄糖制作标准曲线,芒果匀浆(1.0 g),加入 10 mL 蒸馏水,沸水中煮沸提取 30 min 冷却、过滤,残渣加入 5~10 mL 蒸馏水二次煮沸 10 min,过滤收集。取 2 mL 稀释后的样液,加入 6% 苯酚 1.0 mL 及浓硫酸 5.0 mL,摇匀后室温放

置 20 min, 待冷却后于 490 nm 测光值, 计算总糖含量。

1.2.7 类胡萝卜素含量测定 参照 Ibarra-Garza 等^[5]的方法略有改进, 芒果匀浆(3.0 g), 用 80% 的丙酮在避光冰浴中充分研磨, 直至无色, 8000 r/min 离心 10 min, 在 440 nm 处测定吸收计算类胡萝卜素含量, 以 $\mu\text{g/g}$ FW 表示。

1.2.8 维生素 C 含量测定 将 10 g 果肉在冰水浴中用 50 mL 草酸(2%, v/v)研磨并过滤, 用 2,6-二氯苯酚法测定维生素 C 含量^[9]。

1.2.9 可溶性蛋白质含量测定 参考王贵一等^[10]采用的考马斯亮蓝法。芒果匀浆(2.0 g), 加入 5 mL 蒸馏水摇匀后于 4 ℃、12000 r/min 离心 20 min, 收集上清液。取 1 mL 上清液, 加入 5 mL 考马斯亮蓝, 混合均匀后放置 20 min, 在 595 nm 下测定吸光值, 计算蛋白质含量。

1.2.10 果实香气成分分析

1.2.10.1 顶空固相萃取(HS-SPME)检测方法 取样品 8.0 g 样品于 20 mL 顶空样品瓶, 密封。室温 25 ℃ 平衡 12 h, 固相微萃取纤维 PDMS 100 μm 顶空萃取 40 min, 220 ℃ 解吸 3 min 进样。

1.2.10.2 气相色谱质谱联用(GC-MS) 参考刘华南等^[11]的方法有所改动。色谱柱 HP-5(30 m $\times$ 0.25 mm); 载气高纯氦气: 1.0 mL/min; 程序升温: 初始温度 50 ℃ 保持 1 min, 以 5 ℃/min 升至 250 ℃ 保持 10 min, 进样口温度 250 ℃; 进样方式: 不分流。质谱条件: 离子源温度 200 ℃; EI 离子源: 70 eV, 质量范围为 m/z 35~500。

选用环己酮(0.5 mg/mL)做内标物, 该成分不出现在样品香气中, 出峰位置附近无干扰峰出现, 且出现在组分中前部, 是较为理想的内标物利用 NIST 标准谱库自动检索各组分质谱数据, 参考有关文献资料及标准谱图对机检结果进行核对和确认, 按面积归一化法计算各组分相对含量。

1.3 数据处理

取 3 次测定结果的平均值, 所得数据采用 OriginPro8.0 作图。利用 Duncan's 新复极差检验 ($P<0.05$), 评价样品平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同催熟阶段芒果理化指标的变化

果实的硬度反应果实的质地, 是评价其采后成熟衰老程度的重要指标之一^[12]。表 1 为不同催熟阶段芒果理化指标, 如表 1 所示, 生芒果的硬度为 19.76 N, 随着催熟时间的延长, 其硬度呈现逐渐下降的趋势。其中, 催熟时间从 0 h 达到 48 h 时, 芒果的硬度下降至 2.14 N, 在此阶段中果肉的硬度显著性下降 ($P<0.05$); 而催熟时间从 48 h 达到 108 h 时, 芒果的硬度继续下降至 0.99 N, 虽然硬度仍然处于下降趋势, 但是与 48 h 相比并无显著性差异。在乙烯利的调控下, 芒果的呼吸跃变可由体内乙烯触发, 呼

吸跃变一旦发生, 果皮细胞膜通透性逐渐增大, 多糖的降解及葡聚糖酶、糖苷酶和酯酶等作用下果肉发生软化^[13]。

表 1 不同催熟阶段芒果理化指标

Table 1 Physicochemical property of mango at different ripening stages

不同催熟阶段	硬度(N)	可滴定酸(%)	TSS质量分数(%)
1 (0 h)	19.76 $\pm$ 4.28 ^a	1.37 $\pm$ 0.25 ^a	12.92 $\pm$ 0.51 ^a
2 (12 h)	11.07 $\pm$ 1.91 ^b	1.07 $\pm$ 0.15 ^b	16.02 $\pm$ 0.11 ^b
3 (24 h)	8.31 $\pm$ 3.31 ^c	1.04 $\pm$ 0.06 ^b	17.04 $\pm$ 1.48 ^{bc}
4 (36 h)	3.27 $\pm$ 1.42 ^d	0.87 $\pm$ 0.12 ^{bc}	18.25 $\pm$ 0.92 ^{bc}
5 (48 h)	2.14 $\pm$ 0.69 ^e	0.67 $\pm$ 0.06 ^{cd}	18.84 $\pm$ 2.32 ^{cd}
6 (60 h)	1.88 $\pm$ 0.67 ^e	0.64 $\pm$ 0.15 ^{cd}	21.36 $\pm$ 1.73 ^{ef}
7 (72 h)	1.64 $\pm$ 0.53 ^e	0.54 $\pm$ 0.06 ^{de}	23.64 $\pm$ 0.91 ^{fg}
8 (84 h)	1.41 $\pm$ 0.47 ^e	0.40 $\pm$ 0.01 ^e	23.85 $\pm$ 1.03 ^{fg}
9 (96 h)	1.17 $\pm$ 0.24 ^e	0.50 $\pm$ 0.09 ^{ef}	24.13 $\pm$ 0.82 ^g
10 (108 h)	0.99 $\pm$ 0.18 ^e	0.27 $\pm$ 0.06 ^f	23.64 $\pm$ 1.53 ^g

注: 同一列内不同字母表示各成熟期之间有统计学差异 ($P<0.05$)。

采后催熟过程中芒果可滴定酸和 TSS 的变化如表 1 所示, 芒果在催熟过程中, 可滴定酸的含量呈现下降趋势, 从 1.37% 下降至 0.27%, 催熟时间从 0 h 达到 24 h 的过程中, 可滴定酸下降显著 ($P<0.05$), 催熟期间可滴定酸度的下降归因于芒果中的有机酸作为呼吸底物的被氧化分解为糖, 促进了有机酸的分解^[5]。于此同时, 芒果催熟过程中 TSS 呈现上升趋势, 果肉中 TSS 质量分数到催熟 72 h 内快速增大, 从 12.92% 上升至 23.64%, 继续增加催熟时间, 其 TSS 含量相对变化不明显, 这与先前的报道相类似, 梁敏华等采用外源乙烯催熟“圣心”芒果, 其 TSS 也随着催熟时间的延长呈现上升趋势。TSS 的增加可能是由于淀粉转化为葡萄糖和果糖, 而葡萄糖和果糖是果实呼吸过程中的底物^[14-15]。

2.2 不同催熟阶段芒果果皮色泽的变化

颜色是芒果成熟度最直接的感官指标^[16]。由图 1 可见, 随着催熟时间的延长, 芒果果皮的颜色由绿色逐渐转变为黄色、橙色。大量样本的基础上由图 1 可观察到当催熟时间达到 60 h 以后, 约 85% 以上的果皮颜色均转为黄色。图 2 为不同催熟阶段芒果表皮黄色指数的变化, 色差仪检测的指标中, a^* 为果实表皮由红色转为绿色的色泽指标, b^* 为果实表皮由黄色转为蓝色的色泽指标, 根据式(1), YI 是黄色指数即反应果皮的发黄程度。从图 2 中可以明显发现, 未经催熟的芒果表皮的黄度值为 112.17, 在催熟至 12、48 及 108 h 时, 其黄度值均显著增加至 119.71、134.38 和 146.66 ($P<0.05$), 说明随着催熟程度的增加, 芒果果皮的颜色逐渐转黄, 这与果肉和果皮中类胡萝卜素的增加有一定的关联^[17], 随着芒果的成熟胡萝卜素在质体中合成并积累, 促使果皮和果肉的颜色转黄。

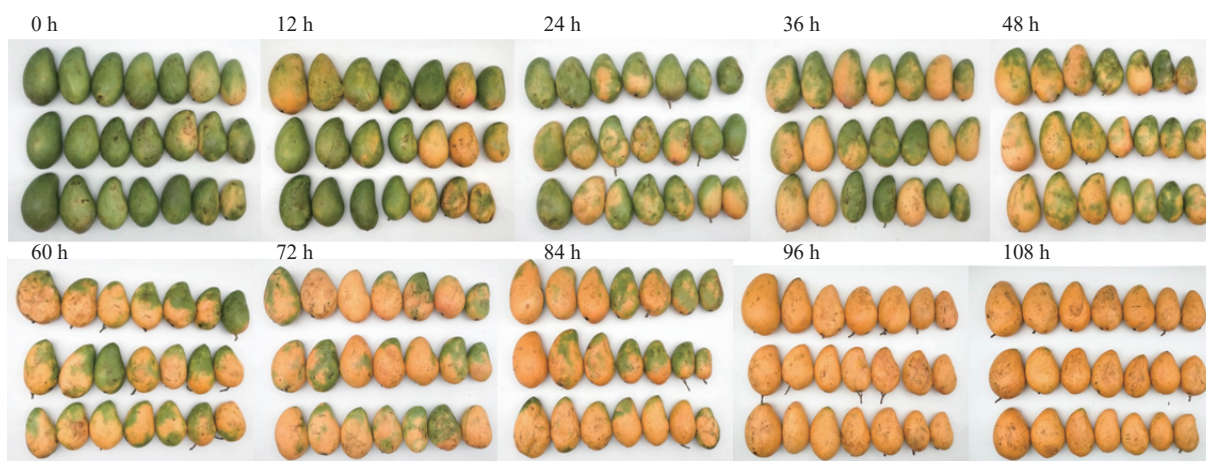


图1 不同催熟阶段芒果表皮色泽的变化

Fig.1 Changes of mango skin color at different ripening stages

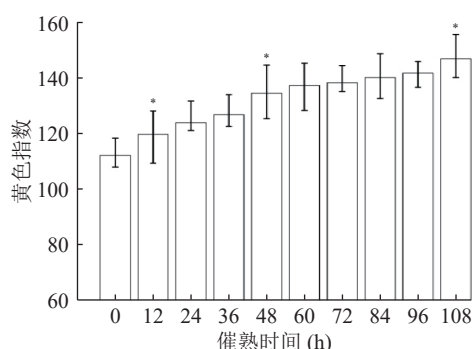


图2 不同催熟阶段芒果表皮黄色指数的变化

Fig.2 Changes of mango yellow index at different ripening stages

注: *表示不同催熟时间下黄色指数的差异显著性($P<0.05$)。

2.3 不同催熟阶段芒果营养品质的变化

类胡萝卜素作为一种脂溶性色素,具有抗氧化、免疫调节、抗癌、延缓衰老等功效,在水果中作为一种重要的功能因子目前逐渐被人们所重视^[18]。表2为不同催熟阶段芒果中主要营养成分的变化。如表2所示,芒果中的类胡萝卜素含量在催熟过程变化分为三个阶段,第一个阶段从0 h到催熟48 h,在这个过程中类胡萝卜素含量虽有所波动,但是并无显

著性差异;第二个阶段从当催熟60到84 h,催熟至60 h后类胡萝卜素含量可升高至 $4.90 \mu\text{g/g}$,显著高于第一个阶段的;第三个阶段催熟至96 h之后,类胡萝卜素的含量进一步上升,当催熟至108 h时,含量可达到最高 $10.93 \mu\text{g/g}$,与0 h($3.37 \mu\text{g/g}$)相比含量上升了3倍。报道显示芒果中存在的类胡萝卜素主要包含反式- β -胡萝卜素、顺式-叶黄素、玉米黄素、反式-紫黄素、反式- α -胡萝卜素、反式- β -隐黄质、13或15-顺- α -胡萝卜素、9-顺- β 胡萝卜素、顺-玉米胡萝卜素和13-顺- β 胡萝卜素等物质^[19]。因此为了探讨催熟过程中类胡萝卜素代谢趋势,其被认为是总胡萝卜素和总叶黄素的总和。芒果催熟过程中,颜色中黄度的变化与中果皮组织中类胡萝卜素的积累和胡萝卜素的形成有关。许多报道已经证明随着芒果的成熟胡萝卜素在质体中合成并积累,其合成基因是在组织成熟过程中激活的,短时间内可以迅速累积至高浓度^[20-21]。但是从表2中却发现催熟60 h内,其类胡萝卜素的含量并无显著变化,甚至还有下降的趋势。这主要是因为类胡萝卜素中另外一类物质,叶黄素作为一种植物激素在果实成熟过程中参与不同的代谢变化,如细胞壁代谢和果实软化、糖代谢、酸代谢和乙烯代谢。而叶黄素是脱落酸生产的前体,而

表2 不同催熟阶段芒果营养成分的变化

Table 2 Changes of nutritional ingredients of mango at different ripening stages

不同催熟阶段	类胡萝卜素($\mu\text{g/g}$)	维生素C($\text{mg}/100 \text{ g}$)	蛋白质(mg/g)	可溶性糖(mg/mL)
1 (0 h)	$3.37 \pm 0.85^{\text{ab}}$	$326.66 \pm 23.08^{\text{a}}$	$0.14 \pm 0.01^{\text{a}}$	$73.93 \pm 2.35^{\text{a}}$
2 (12 h)	$2.67 \pm 0.85^{\text{a}}$	$273.33 \pm 23.10^{\text{b}}$	$0.41 \pm 0.03^{\text{b}}$	$83.93 \pm 3.91^{\text{b}}$
3 (24 h)	$2.24 \pm 0.58^{\text{a}}$	$240.00 \pm 20.11^{\text{bc}}$	$0.46 \pm 0.08^{\text{bc}}$	$93.74 \pm 5.52^{\text{c}}$
4 (36 h)	$3.29 \pm 0.65^{\text{ab}}$	$214.10 \pm 28.28^{\text{cd}}$	$0.59 \pm 0.04^{\text{cd}}$	$104.71 \pm 6.53^{\text{d}}$
5 (48 h)	$2.48 \pm 0.17^{\text{a}}$	$233.33 \pm 11.55^{\text{c}}$	$0.62 \pm 0.13^{\text{d}}$	$123.55 \pm 10.43^{\text{e}}$
6 (60 h)	$4.90 \pm 1.45^{\text{b}}$	$180.00 \pm 30.25^{\text{de}}$	$0.87 \pm 0.12^{\text{e}}$	$136.71 \pm 1.75^{\text{f}}$
7 (72 h)	$3.96 \pm 0.55^{\text{b}}$	$166.66 \pm 23.08^{\text{ef}}$	$1.07 \pm 0.02^{\text{f}}$	$142.84 \pm 3.87^{\text{fg}}$
8 (84 h)	$3.53 \pm 0.35^{\text{b}}$	$160.56 \pm 28.25^{\text{ef}}$	$1.12 \pm 0.11^{\text{f}}$	$142.90 \pm 1.67^{\text{fg}}$
9 (96 h)	$8.94 \pm 1.88^{\text{c}}$	$153.33 \pm 11.25^{\text{ef}}$	$1.12 \pm 0.02^{\text{f}}$	$140.13 \pm 1.01^{\text{f}}$
10 (108 h)	$10.93 \pm 1.35^{\text{d}}$	$126.66 \pm 11.58^{\text{f}}$	$1.10 \pm 0.08^{\text{f}}$	$149.48 \pm 0.28^{\text{g}}$

注: 同一列内不同字母表示各成熟期之间有统计学差异($P<0.05$)。

在果实催熟过程中叶黄素含量会发生下降是由于脱落酸大量的形成。因此,在催熟 60 h 内类胡萝卜素的 变化不大,而随着催熟时间的延长,其胡萝卜素的 累积进一步增加,从而导致其含量上升。

作为水果中重要的抗氧化物质抗坏血酸(维生素 C)的变化如表 2 所示,随着催熟时间的延长,芒果 中维生素 C 的含量呈现下降趋势。在前 60 h 内,其 维生素 C 的下降速度很快,从 326.66 mg/100 g(0 h) 下降至 180.00 mg/100 g(60 h),约 45% 的维生素 C 损 失。然而 60 h 之后,其含量虽然下降,但其下降并 无显著性差异,尤其是从 72 到 96 h 阶段内。虽然有 报道显示,果实成熟过程中产生的乙烯能增加抗坏血 酸含量,促进果实成熟^[5]。但是累积的维生素 C 在水 果存放过程中也会参与不同的反应从而被消耗^[22]。 例如,它可以用来中和自由基,用于植物激素(乙烯和 赤霉素)的生物合成,作为草酸和酒石酸生物合成的 底物,叶黄素循环中被紫黄素脱环氧酶氧化等。这就 解释了在芒果催熟过程中维生素 C 下降的主要原因。

芒果中蛋白质主要集中在芒果核中,其干物质 含量可达到 6%~13%^[23]。而在果肉中含量相对较 低,刚刚采摘下来的芒果中仅有 0.14 mg/g,在催熟过 程中蛋白的含量呈现上升趋势,从 0.14 mg/g(0 h)上 升至 1.07 mg/g(72 h),而 72 h 之后几乎不再变化。

芒果催熟过程中可溶性糖含量的变化如表 2 所 示,随着催熟时间的延长,其含量呈现增加的趋势,尤 其是在 0~60 h 之间,含量迅速增加,从 73.93 mg/mL 上升至 136.71 mg/mL,随着催熟时间的进一步延长 其含量相对变化不大。增加的主要原因为在催熟过 程中,由于酶的作用,淀粉逐渐转化为糖,淀粉的含量 下降,果实甜度增加^[24]。

2.4 不同催熟阶段芒果香气成分的变化

芒果果肉的香气成分采用 HS-SPME-GC-MS 法进行指纹识别。图 3 是芒果果实在催熟不同阶段 挥发物成分的总离子流图(TIC 图)。结合 NIST2011 谱库采用计算机检索,将 TIC 中峰的质谱碎片图与 文献进行核对^[25-26],以鉴定出香气成分的具体物质。 从检测到香气成分的数量上来看,生芒果果肉中的香 气成分被检测到的仅仅只有 43 种,随着催熟时间的 延长,达到 24 h 时,检测到 50 种香气成分,进一步延 长催熟时间(60 h),74 种香气成分被检测出来,直到 84 h 时,香气成分的种类达到最高的 78 种,然而不 能简单的从香气成分的数量上来判断种类多的一定 风味最强,因为不同化合物的相对气味强度会影响总 感知强度^[27],因此需进一步对其相对含量进行分析。 从检测到的香气成分的种类来看,主要为萜烯类、烯 烃类、芳香烃类、烷烃类、醇类、醛类、脂类和酮类 共 8 大类,其中萜烯类无论是在数目还是总含量上, 在不同催熟阶段的芒果肉中含量均是最高。根据 对芒果果肉香气物质的鉴定及含量的测定,表 3 列

出了其中含量较高的 11 种化合物,从表中可以明显 的发现 3-萜烯、4-萜烯和异松油烯的相对含量较高, 对形成芒果特有的香气都有重大的贡献^[28-29],其中 异松油烯相对含量最高,这与前期的报道结果相类 似^[14,30],如小台芒中异松油烯的含量也可达到 20% 以上,说明异松油烯对于台农一号的特征香气成分贡 献最大,需进一步探讨其在催熟过程中的变化规律。

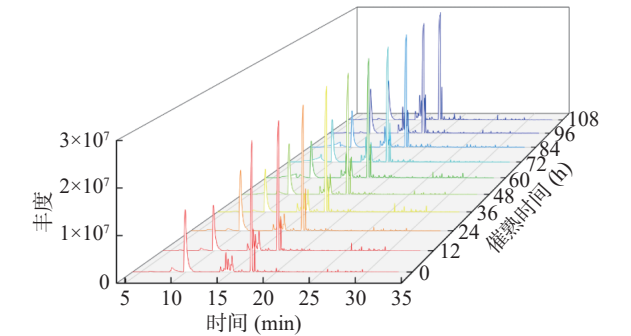


图 3 不同催熟阶段芒果香气成分的总离子流图
Fig.3 Total ionic current chromatogram of volatile components in mango fruit at different ripening stages

表 3 成熟芒果果实(108 h)中主要挥发物质的鉴定
Table 3 Identification of main volatile components in mango fruit (108 h)

序号	化合物名称	化学式	CAS号	浓度(mg/mL)
1	正丁酸	C ₄ H ₈ O ₂	107-92-6	0.055
2	反式-3-己烯-1-醇	C ₆ H ₁₂ O	928-97-2	0.027
3	月桂烯	C ₁₀ H ₁₆	123-35-3	0.051
4	2-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	1000149-94-6	0.013
5	3-侧柏烯	C ₁₀ H ₁₆	2867-05-2	0.039
6	3-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	13466-78-9	0.135
7	4-萜烯	C ₁₀ H ₁₆	29050-33-7	0.108
8	邻异丙基甲苯	C ₁₀ H ₁₄	527-84-4	0.029
9	蒎品烯	C ₁₀ H ₁₆	99-85-4	0.017
10	异松油烯	C ₁₀ H ₁₆	586-62-9	1.011
11	正十一烷	C ₁₁ H ₂₄	1120-21-4	0.069

因此,以异松油烯为研究对象,选取环己酮作为 内标进行定量分析。图 4 为不同催熟阶段芒果果肉 中异松油烯含量的变化。从图 4 中可以看出,随着 催熟时间的延长,其含量呈现增加的趋势。未催熟的 芒果中异松油烯的含量仅为 0.5171 mg/mL 时,当催 熟时间达到 36 h 时,其含量显著 ($P<0.05$) 增加至 0.9031 mg/mL,进一步增加催熟时间至 60 h 时,异松 油烯的含量达到最大值 1.0508 mg/mL,随后继续延 长催熟时间,异松油烯的含量反而有所下降,但是并 不明显,且均高于 48 h 的含量。以上结果说明,在 前 60 h 之内,外源乙烯利加快了果实中异松油烯的 合成速率,对其合成起到促进的作用。植物果实中的 香气是在成长发育过程中以脂肪酸、碳水化合物或 氨基酸等物质为前体,经酶修饰而形成^[30]。芒果果肉 中的特色香气异松油烯及色泽的主要成分类胡萝卜 素的合成代谢都是以异戊二烯为前体物质,遵循类异

戊二烯生物合成途径^[31-32]。因此,结合表2中类胡萝卜素的规律,发现和异松油烯的有所类似,生芒果采摘后成熟过程中,色泽和香气是其成熟度的两个重要的外在表现形式,两者的变化往往是同步进行的。

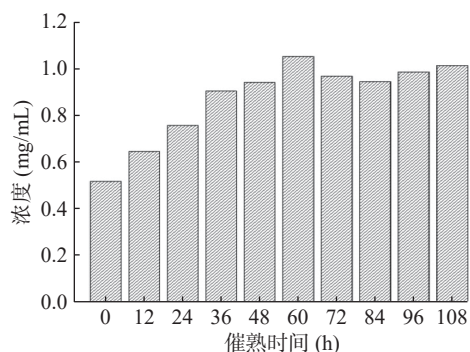


图4 不同催熟阶段芒果中异松油烯的变化

Fig.4 Changes of mango terpinolene content at different ripening stages

3 结论

“台农一号”芒果在乙烯利的催熟下,芒果的理化指标、营养品质及香气成分等都发生了显著的变化。其中硬度和可滴定酸随着催熟时间的增加而下降,TSS质量分数升高。催熟0~60 h之内,约85%以上的果皮颜色均转为黄色;类胡萝卜素含量变化不大;维生素C下降速度明显,损失约45%;总糖含量迅速增加。进一步延长催熟时间,类胡萝卜素在108 h时,含量可达到最高10.93 $\mu\text{g/g}$;维生素C虽然下降但不显著。芒果果实香气物质主要是萜烯类化合物,其中异松油烯含量最高,在催熟60 h之内其含量迅速增大,外源乙烯利加快了果实中异松油烯的合成速率。从色泽和香气等数据说明60 h的催熟后芒果已经基本达到成熟的特性,可依据芒果产品需求和加工特性来选择合适的催熟时间,本研究结果可为芒果果实采后催熟及加工特性提供有利的理论依据。

参考文献

[1] 梁敏华,邓鸿铃,梁瑞进,等.外源乙烯和1-甲基环丙烯对‘圣心’芒果采后物性和香气特征的影响[J].*食品科学*,2020,41(15):231-237. [LIANG M H, DENG H L, LIANG R J, et al. Effects of exogenous ethylene and 1-methylcyclopropene on postharvest physicochemical and aroma characteristics of ‘Shengxin’ mango[J]. *Food Science*, 2020, 41(15): 231-237.]

[2] OLIVER-SIMANCAS R, LABRADOR-FERNANDEZ L, DAZ-MAROTO M C, et al. Comprehensive research on mango by-products applications in food industry[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 118: 179-188.

[3] JAHURUL M H A, ZAIDUL I S M, GHAFOR K, et al. Mango (*Mangifera indica* L.) by-products and their valuable components: A review[J]. *Food Chemistry*, 2015, 183: 173-180.

[4] PALAFOX-CARLOS H, YAHIA E, ISLAS-OSUNA M A, et al. Effect of ripeness stage of mango fruit (*Mangifera indica* L.,

cv. Ataulfo) on physiological parameters and antioxidant activity[J]. *Scientia Horticulturae*, 2012, 135: 7-13.

[5] IBARRA-GARZA I P, RAMOS-PARRA P A, HERNANDEZ-BRENES C, et al. Effects of postharvest ripening on the nutraceutical and physicochemical properties of mango (*Mangifera indica* L. cv Keitt)[J]. *Postharvest Biology & Technology*, 2015, 103: 45-54.

[6] 张业歆,刘家粮,潘永贵,等.氯吡苯腈浸泡处理延缓采后芒果成熟和软化的生理机制[J].*食品科学*,2021,42(19):234-241.

[ZHANG Y X, LIU J L, PAN Y G, et al. Physiological mechanisms by which forchlorfenuron soaking treatment delays postharvest ripening and softening of mango fruit[J]. *Food Science*, 2021, 42(19): 234-241.]

[7] KULKARNI S G, KUDACHIKAR V B, PRAKASH M. Studies on physico-chemical changes during artificial ripening of banana (*Musa* sp.) variety ‘Robusta’[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2011, 48(6): 730-734.

[8] 曹建康,姜微波,赵淑梅.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007:58-60. [CAO J K, JIANG W B, ZHAO S M. Guidance on postharvest physiological and biochemical experiments of fruits and vegetables [M]. Beijing: China Light Industry Press, 2007: 58-60]

[9] 蔡晨晨,马瑞佳,刘涛,等.百里香精油微胶囊复合涂膜在芒果保鲜中的应用[J].*食品工业科技*,2021,42(10):275-280. [CAI C C, MA R J, LIU T, et al. Application of thyme oil microcapsule composite coating in mango preservation[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(10): 275-280.]

[10] 王贵,孟嘉璐,许文静,等.不同品种芒果的营养成分及风味物质分析[J].*食品工业科技*,2021,43(1):71-79. [WANG G, MENG J J, XU W J, et al. Analysis of nutritional components and flavor substances of different varieties of mangoes[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 43(1): 71-79.]

[11] 刘华南,江虹锐,陆雄伟,等.顶空固相微萃取-气质联用分析不同芒果品种香气成分差异[J].*食品工业科技*,2021,42(11):211-217. [LIU H N, JIANG H R, LU X W, et al. Analysis and comparison of aroma components in different mango varieties by headspace-solid-phase microextraction-gas chromatograph-mass spectrometer[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(11): 211-217.]

[12] 董真真.外源赤霉素处理对不同品种芒果品质的影响[D].海口:海南大学,2016. [DONG Z Z. Effects of exogenous gibberellin treatment on mango quality of different varieties [D]. Haikou: Hainan University, 2016.]

[13] PRASANNA V, PRABHA T N, THARANATHAN R N. Fruit ripening phenomena-an overview[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, 47(1): 1-19.

[14] 普红梅,王海丹,杨芳,等.不同预处理的芒果保鲜效果比较[J].*现代食品科技*,2021,38(1):197-205. [PU H M, WANG H D, YANG F, et al. Comparison of preservation effects of different pretreatments on mango[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2021, 38(1): 197-205.]

[15] OLDONI F, BERNARDO M P, FILHO J, et al. Valorization of mangoes with internal breakdown through the production of edi-

- ble films by continuous solution casting[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 145(1): 111339.
- [16] MARCAL S, PINTADO M. Mango peels as food ingredient/additive: Nutritional value, processing, safety and applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2021, 114(3): 472–489.
- [17] ORNELAS-PAZ D J, YAHIA F, GARDEA-BEJAR A. Impact of the stage of ripening and dietary fat on *in vitro* bioaccessibility of β -carotene in 'Ataulfo' mango[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(4): 1511–1516.
- [18] RISCHER H, NOHYNEK L, PUUPPONEN-PIMIA R, et al. Plant cell cultures of Nordic berry species: Phenolic and carotenoid profiling and biological assessments[J]. *Food Chemistry*, 2022, 306: 130571.
- [19] MWAURAH P W, KUMAR S, KUMAR N, et al. Physico-chemical characteristics, bioactive compounds and industrial applications of mango kernel and its products: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020(2): 2421–2446.
- [20] ORNELAS-PAZ J D J, YAHIA E M, GARDEA A A. Changes in external and internal color during postharvest ripening of 'Manila' and 'Ataulfo' mango fruit and relationship with carotenoid content determined by liquid chromatography–APCI⁺-time-of-flight mass spectrometry[J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2008, 50: 145–152.
- [21] VITHANA M D K, SIGHN Z, JOHNSON S K. Harvest maturity stage affects the concentrations of health-promoting compounds: Lupeol, mangiferin and phenolic acids in the pulp and peel of ripe 'Kensington Pride' mango fruit[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 243: 125–130.
- [22] 卫赛超, 谢晶. 模拟运输时间对芒果低温贮藏过程中生理与品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(3): 43–50. [WEI S C, XIE J. Effect of simulated transport time on physiology and quality of mango during low-temperature storage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(3): 43–50.]
- [23] DIARRA S S. Potential of mango (*Mangifera indica* L.) seed kernel as a feed ingredient for poultry: A review[J]. *World's Poultry Science Journal*, 2014, 70(2): 279–288.
- [24] 肖丹, 普红梅, 田浩, 等. 碳量子点/壳聚糖涂膜剂在芒果保鲜中的应用[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(22): 130–135. [XIAO D, PU H M, TIAN H, et al. Application of carbon dots-chitosan coating in preservation of mango[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(22): 130–135.]
- [25] OLIVER-SIMANCE R, MUNOZ R, DAZ-MAROTO M C, et al. Mango by-products as a natural source of valuable odor-active compounds[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2020, 100(13): 4688–4695.
- [26] SUNG J, SHU J H, CHAMBERS A H, et al. The relationship between sensory attributes and chemical composition of different mango cultivars[J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2019, 67(18): 5177–5188.
- [27] PINOJ A, MESA J, MUNOZ Y, et al. Volatile components from mango (*Mangifera indica* L.) cultivars[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2005, 53(6): 2213–2223.
- [28] 黄豆, 曹烙文, 岑延相, 等. 顶空固相微萃取-全二维气相色谱/飞行时间质谱测定三种芒果香气成分[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(15): 218–226. [HUANG D, CAO G W, CEN Y X, et al. Detection of aroma components in three cultivars of mango with headspace solid phase microextraction comprehensive two-dimensional gas chromatograph/time of flight mass spectrometer[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(15): 218–226.]
- [29] LI L, MA X W, ZHAN R L, et al. Profiling of volatile fragrant components in a mini-core collection of mango germplasms from seven countries[J]. *PLoS One*, 2017, 12(12): e0187487.
- [30] 梁敏华, 苏新国, 梁瑞进, 等. 芒果果实采后香气物质合成代谢调控研究进展[J]. *农产品加工*, 2020(9): 61–64. [LIANG M H, SU X G, LIANG R J, et al. Progress on aroma substances synthesis and metabolism of postharvest mango fruit[J]. *Farm Products Processing*, 2020(9): 61–64.]
- [31] HADI M A M E, ZHANG F J, WU F F, et al. Advances in fruit aroma volatile research[J]. *Molecules*, 2013, 18(7): 8200–8229.
- [32] 张伟, 梁成伟. 植物类异戊二烯合成途径的研究进展[J]. *山东化工*, 2014, 43(5): 57–58. [ZHANG W, LISNG C W. Research progress of plant isoprenoids biosynthetic pathway[J]. *Shandong Chemical Industry*, 2014, 43(5): 57–58.]