

3种芒果品种不同成熟度的营养指标聚类 和主成分分析

邓浩¹, 吴广¹, 陈小妹², 郭莉¹, 尹青春^{1,2*}

(1. 海南省热带果蔬冷链研究重点实验室, 农业农村部热带果蔬遗传资源评价利用重点实验室
(部省共建), 海南省农业科学院农产品加工设计研究所, 海南海口 571100)

(2. 国家市场监督管理总局重点实验室(热带果蔬质量与安全), 海南省食品检验检测中心, 海南海口 570311)

摘要: 芒果为呼吸跃变型水果, 不同采收成熟度的芒果色泽、理化、营养指标差异较大。该实验在对3种不同成熟度的贵妃(GF)、台农(TN)和金煌(JH)芒果主要品质指标对比的基础上, 利用聚类分析和主成分分析对其进行了综合评价。结果表明: GF和JH芒果综合色泽指数为-0.01到-0.35, 说明果皮以绿色为主, 转色不如TN芒果明显。3种芒果在成熟过程中硬度分别降低了56.05%, 48.58%, 69.69%。可滴定酸分别降低了30.61%, 61.29%, 85.06%, 而可溶性固形物、pH值、固酸比则逐渐增大。起主导作用的糖是蔗糖, 主导有机酸为柠檬酸、己二酸、丁二酸, 主导氨基酸为丙氨酸、谷氨酰胺、赖氨酸、精氨酸、天冬氨酸。对以上15个关键品质指标进行聚类分析将其可分为3类。主成分分析表明: 3个主成分代表了以上指标的91.361%的信息。进一步的数学模型评价表明: 十成熟的芒果综合品质排序为: GF>TN>JH。因此, 十成熟的GF芒果品质最佳, 且比九成熟的GF芒果综合得分提升了154.29%, 适宜做“树上熟”农场采摘体验项目主推品种。

关键词: 成熟度; 芒果; 营养; 主成分分析; 品质

文章编号: 1673-9078(2024)06-198-205

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2024.6.0680

Cluster and Principal Component Analyses of Key Nutritional Indicators for Mangoes at Different Harvest Maturities

DENG Hao¹, WU Guang¹, CHEN Xiaomei², GUO Li¹, YIN Qingchun^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Tropical Fruit and Vegetable Cold-Chain of Hainan Province, Key Laboratory of Genetic Resources Evaluation and Utilization of Tropical Fruits and Vegetables (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Agro-product Processing and Design, Hainan Academy of Agricultural Sciences, Haikou 571100, China) (2. Key Laboratory of Tropical Fruits and Vegetables Quality and Safety for State Market Regulation, Hainan Institute for Food Control, Haikou 570311, China)

Abstract: Mango is a climacteric fruit, with significant differences in color, physicochemical, and nutritional indicators when harvested at different maturity levels. By comparing the main quality indicators of three mango varieties, Guifei (GF),

引文格式:

邓浩,吴广,陈小妹,等.3种芒果品种不同成熟度的营养指标聚类 and 主成分分析[J].现代食品科技,2024,40(6):198-205.

DENG Hao, WU Guang, CHEN Xiaomei, et al. Cluster and principal component analyses of key nutritional indicators for mangoes at different harvest maturities [J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 198-205.

收稿日期: 2023-06-07

基金项目: 海南省芒果产业集群科技支撑服务项目; 海南省重点研发计划(ZDYF2023XDNY051)

作者简介: 邓浩(1987-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: denghao@hnaas.org.cn

通讯作者: 尹青春(1986-), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 农产品质量安全, E-mail: yinqingchun@163.com

Tainan (TN), and Jinhuang (JH), at different maturity levels, a comprehensive evaluation was carried out using cluster analysis (CA) and principal component analysis (PCA). The results showed that the comprehensive color index of GF and JH mangoes ranged from -0.01 to -0.35 , indicating that the skin was predominantly green and that the color change was not as significant as that in the TN mango. The hardness of the three mangoes was also observed to decrease by 56.05, 48.58, and 69.69%, respectively, during the ripening process. The titratable acids decreased by 30.61, 61.29, and 85.06%, respectively, and the soluble solids, pH value, and solid-acid ratio gradually increased. The dominant sugar in mangoes was sucrose; the dominant organic acids were citric acid, adipic acid, and succinic acid. The predominant amino acids were alanine, glutamine, lysine, arginine, and aspartic acid. CA of the 15 key quality indicators revealed three categories, with PCA capturing 91.361% of the indicator information. Mathematical modeling confirmed that the quality ranking of fully matured mangoes ranked in the order GF>TN>JH. Notably, fully matured GF mangoes exhibited the highest quality, with an overall score 154.29% higher than 90% mature GF mango, making it an ideal variety for “tree-ripened” farm-picking activities.

Key words: maturity; mango; nutrition; principal component analysis; quality

芒果 (*Mangifera indica* L) 属漆树科 (Anacardiaceae) 芒果属 (*Mangifera* L.), 为世界五大水果之一, 被誉为“热带果王”^[1]。成熟的芒果颜色鲜艳、香甜多汁, 富含糖、有机酸、氨基酸等大量营养物质和多酚、黄酮等抗氧化活性成分^[2,3]。采收成熟度是影响芒果营养品质和商品性的关键因素之一。芒果是呼吸跃变型果实, 采摘后在流通过程仍能继续成熟^[4]。采收过早, 果实风味口感差。采收时成熟度过高, 由于呼吸高峰的出现, 在流通销售过程中易腐烂或出现黑斑, 严重影响商品价值。不同成熟度芒果在后熟过程中, 一方面由于叶绿素的降解和类胡萝卜素的合成导致果皮和果肉转色, 成熟度越高越容易转色, 且转色越快^[5]。另一方面, 伴随果皮颜色变化和果肉可溶性固形物的增加, 成熟度越高硬度下降越快。八成熟果实硬度在 12 d 后会快速下降^[6]。因此, 选择合适的成熟度采收对芒果商品流通意义重大。

目前, 关于不同成熟度的芒果品质特性研究主要集中在口感和风味方面。Xin 等^[7]研究发现成熟度越高的芒果总糖和胡萝卜素越高, 采收 12 d 内总酸呈线性减少。檀业维等^[8]发现伴随“桂热 82 号”成熟度增加, 己酸乙酯、丁酸乙酯含量逐渐上升, 完熟时达到峰值。高文科等^[9]则认为商品成熟期芒果风味不足的原因是 34 种有机酸明显低于全熟的芒果。芒果的品质指标间是存在相互关系的, 这就导致指标反映的众多信息中存在相互重叠的情况, 而系统性评价能消除这些重叠的信息。当前, 不同成熟度贵妃、台农和金煌芒果中糖类、有机酸、氨基酸等关键营养成分的系统性、综合性评价报道较少。

海南是我国芒果主产区之一, 其中贵妃、台农和金煌是主要的芒果品种。为系统地评价 3 种不同成熟度的贵妃、台农和金煌芒果品质指标, 消除各指标间的重叠信息, 本文在主要理化和营养指标对比分析和聚类分析 (Cluster Analysis, CA) 的基础上, 利用果蔬营养品质多元统计方法中一种常用的数学手段^[10-12], 即主成分分析法 (Principal Component Analysis, PCA), 通过降维的方式把芒果的多个指标转化为少数几个综合指标, 简化数据且揭示了变量间的关系^[13], 之后通过构建数学模型对不同品种芒果进行全面的综合评价。研究结果为不同品种芒果品质评价和科学采收提供了参考借鉴。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本实验所用贵妃 (GF)、台农 (TN) 芒果采于海南省三亚市福返芒果基地, 金煌 (JH) 芒果采于三亚市立才农场。芒果经挑选, 大小相近, 重量相近, 无损伤, 无病害。不同成熟度的芒果具体采样标准如表 1 所示。

色谱级果糖、葡萄糖和蔗糖 (纯度 $\geq 99.4\%$), 中国计量科学研究院; 色谱级乳酸、酒石酸、苹果酸、柠檬酸、丁二酸、富马酸 (纯度 $\geq 99.4\%$), 美国 Achemtek 公司; 色谱级己二酸 (纯度 $\geq 99.0\%$), 上海源叶生物科技有限公司; 色谱级 21 种氨基酸混合溶液 (纯度 $\geq 98.5\%$), 美国 Achemtek 公司; 色谱级乙腈、甲醇和甲酸, 德国 Merck 公司。所有其他化学品均为分析试剂级。

表 1 不同成熟度芒果采样标准

Table 1 Sampling standards of mangoes with different maturities			
品种	编号	采样标准	采样地点
台农	TN-8	外皮绿色, 均重 175.2 g, 均长 6.5 cm	三亚市福返芒果基地
	TN-9	外皮浅黄, 均重 176.8 g, 均长 6.5 cm	三亚市福返芒果基地
	TN-10	外皮深黄, 均重 175.4 g, 均长 6.5 cm	三亚市福返芒果基地
金煌	JH-8	外皮深绿, 均重 282.6 g, 均长 12.9 cm	三亚市立才农场
	JH-9	外皮浅绿, 均重 280.1 g, 均长 12.9 cm	三亚市立才农场
	JH-10	外皮浅黄, 均重 281.4 g, 均长 12.9 cm	三亚市立才农场
贵妃	GF-8	果尖绿色, 均重 122.4 g, 均长 9.5 cm	三亚市福返芒果基地
	GF-9	果尖浅黄, 均重 121.6 g, 均长 9.5 cm	三亚市福返芒果基地
	GF-10	果尖深黄, 均重 122.9 g, 均长 9.5 cm	三亚市福返芒果基地

1.2 仪器与设备

Agilent1260 高效液相色谱仪, 搭配 Agela Innoval NH2 (5 μm , 4.6 mm \times 250 mm) 色谱柱和蒸发光检测器, 美国 Agilent 公司; Waters ACQUITY H UPLC[®] CLASS 超高效液相色谱仪, 搭配 Waters Luna[®] Omega Polar C₁₈ (1.6 μm , 2.1 mm \times 100 mm) 色谱柱和二极阵列检测器, 美国 Waters 公司; AB SCIEX Triple Quad 4500 超高效液相色谱-串联质谱仪, 搭配 ACQUITY UPLC BEH C₁₈ (1.7 μm , 2.1 mm \times 100 mm) 色谱柱和 ESI 电喷雾离子源, 美国 AB SCIEX 公司; 多管涡旋混合器, 德国 Heidolph 公司。GY-4 水果硬度计, 乐清市艾德堡仪器有限公司; CR-400 色彩色差计, 日本 Konica Minolta 公司; PAL-1 数显糖度计, 日本 Atago 公司; pH 818 酸碱度计, 东莞万创电子制品有限公司; 5910R 多功能离心机, 德国 Eppendorf 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 理化指标的检测

1.3.1.1 物理指标的检测

综合色泽指数的测定: 每组取 10 个果, 对果实赤道部位平均取 6 个区域用 CR-400 色彩色差计测定 a 、 b 值, 测量头与果皮完全贴合, 重复 3 组计算平均值。参考 Alos 等^[14]的方法计算果皮的综合色泽指数 a/b 。当 a/b 为负值代表果皮为绿色, a/b 为正值代表果皮为橙黄色。

硬度的测定: 每组取 10 个果, 使用配备直径 4 mm 探头的 GY-4 水果硬度计测量, 对每个果实赤道部位平均取 3 个区域测量, 重复 3 组, 结果以 N 表示。

1.3.1.2 化学指标的检测

可溶性固形物的测定: 每组 10 个果, 榨汁后使用数显糖度计进行测定, 重复 3 组, 单位为 %。可滴定酸的测定: 采用酸碱滴定法, 参照曹建康等^[15]的方法测定, 单位为 %。pH 值的测定: 每组取 10 个果, 经榨汁后过滤, 使用 pH 818 酸碱度计测定, 重复 3 组。

1.3.2 糖酸的检测

糖的测定: 称取经搅拌均匀的试样 2 g, 加入纯水 10 mL, 超声 30 min, 去离子水定容至 50 mL, 定容后, 进行初级过滤, 滤液再经 0.45 μm 水相滤膜过滤后, 采用 GB5009.8-2016《食品安全国家标准食品中果糖、葡萄糖、蔗糖、麦芽糖、乳糖的测定》高效液相色谱法测定。每组测 3 次, 计算平均值。有机酸的测定: 称取经搅拌均匀的试样 2 g, 放入 10 mL 去离子水, 经 0.45 μm 水相滤膜过滤后, 采用 GB5009.157-2016《食品安全国家标准 食品有机酸的测定》高效液相色谱法测定。每组测 3 次, 计算平均值。

1.3.3 氨基酸的检测

将 2 g 样品加入 10 mL 去离子水。超声提取 30 min 后, 用滤膜 (0.22 μm) 过滤。根据 GB/T30987-2020《植物中游离氨基酸的测定》, 采用 UPLC-MS/MS 法测定 21 种氨基酸的含量。每组测 3 次, 计算平均值。

1.4 数据处理

采用 SPSS 22.0 进行 PCA 主成分分析, $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著; 采用 Origin 2019b 进行图形处理。

表 2 不同成熟度芒果基本理化指标

Table 2 Basic physical and chemical indexes of mangoes with different maturities

编号	综合色泽指数	硬度/N	可溶性固形物/%	可滴定酸/%	pH 值	固酸比
TN-8	0.04 ± 0.45 ^a	42.80 ± 3.36 ^a	23.55 ± 0.64 ^c	0.49 ± 0.17 ^a	4.25 ± 0.03 ^c	53.16 ± 21.83 ^b
TN-9	0.19 ± 0.34 ^a	33.32 ± 6.67 ^b	26.93 ± 0.21 ^b	0.39 ± 0.02 ^a	4.50 ± 0.04 ^b	68.54 ± 2.92 ^{ab}
TN-10	0.25 ± 0.10 ^a	18.81 ± 2.59 ^c	28.60 ± 0.12 ^a	0.34 ± 0.02 ^a	4.57 ± 0.01 ^a	83.43 ± 5.48 ^a
JH-8	-0.35 ± 0.03 ^b	46.79 ± 2.68 ^a	10.25 ± 0.06 ^c	0.62 ± 0.01 ^a	3.87 ± 0.01 ^c	16.38 ± 0.05 ^c
JH-9	-0.45 ± 0.05 ^c	46.29 ± 3.61 ^a	16.75 ± 0.06 ^b	0.40 ± 0.01 ^b	4.28 ± 0.06 ^b	41.51 ± 0.77 ^b
JH-10	-0.13 ± 0.08 ^a	24.06 ± 2.91 ^b	19.00 ± 0.01 ^a	0.24 ± 0.01 ^c	4.66 ± 0.01 ^a	80.46 ± 3.59 ^a
GF-8	-0.01 ± 0.58 ^a	45.66 ± 2.41 ^a	8.95 ± 0.47 ^b	0.87 ± 0.08 ^a	3.57 ± 0.05 ^c	10.55 ± 1.31 ^c
GF-9	-0.12 ± 0.22 ^a	28.29 ± 6.75 ^b	16.73 ± 0.10 ^a	0.27 ± 0.01 ^b	4.41 ± 0.03 ^b	60.95 ± 1.90 ^b
GF-10	-0.01 ± 0.20 ^a	13.84 ± 2.43 ^c	16.40 ± 0.39 ^a	0.13 ± 0.01 ^c	4.83 ± 0.02 ^a	131.10 ± 10.19 ^a

注: 不同字母代表不同成熟度间存在显著差异 ($P < 0.05$), 下同。

2 结果与讨论

2.1 理化指标评价

物理指标方面: 如表 2 所示, 3 种成熟度 TN 芒果综合色泽指数分别为 0.04、0.19、0.25, 逐渐增大, 说明伴随成熟度的增加, 果皮逐渐转黄色。GF 和 JH 芒果综合色泽指数始终介于 -0.01 到 -0.45, 说明果皮整体以绿色为主, 转色不如 TN 芒果明显。果实的硬度反映果实的质地, 是评价其采后成熟衰老程度的重要指标之一^[16]。3 个不同品种芒果在成熟过程中硬度分别降低了 56.05%、48.58%、69.69%。不同的是, TN 和 GF 芒果硬度各成熟度间都存在显著 ($P < 0.05$) 差异, 说明它们在成熟过程中, 硬度是稳步下降的过程。而 JH 芒果硬度下降最慢, 只是在九成熟和十成熟时出现显著 ($P < 0.05$) 下降。果实成熟过程中, 细胞壁中的果胶与半纤维素分子通过酶促反应不断解聚并增溶, 使细胞壁结构变得松弛而导致果实软化^[17]。以上研究说明, 3 种芒果在成熟过程中色泽和硬度都会发生明显变化, TN 芒果逐渐转成黄色, 而 GF 和 JH 转色相对较慢, JH 芒果的硬度下降相对最慢。

化学指标方面: 3 个芒果成熟过程中, 可滴定酸分别降低了 30.61%、61.29%、85.06%。十成熟的 GF 芒果的可滴定酸比八成熟下降幅度最大, 达 85.06%。可滴定酸的下降主要是由于有机酸作为呼吸作用的底物被分解成糖^[18], 同时也造成了可溶性固形物的增长。3 种芒果可溶性固形物、pH 值、固酸比逐渐增大。JH 和 GF 芒果的固酸比从八成熟的 16.38、10.55 增至十成熟的 80.46、131.10, 增

幅最大, 主要来源于 JH 和 GF 芒果可滴定酸的显著 ($P < 0.05$) 降低。胡隆孝等^[4]研究发现, 芒果在催熟过程中可滴定酸从 1.37% 快速下降至 0.27%, 而可溶性固形物则由 12.92% 增大至 23.64%, 这与本研究结果相一致。

2.2 营养指标评价

2.2.1 糖和有机酸

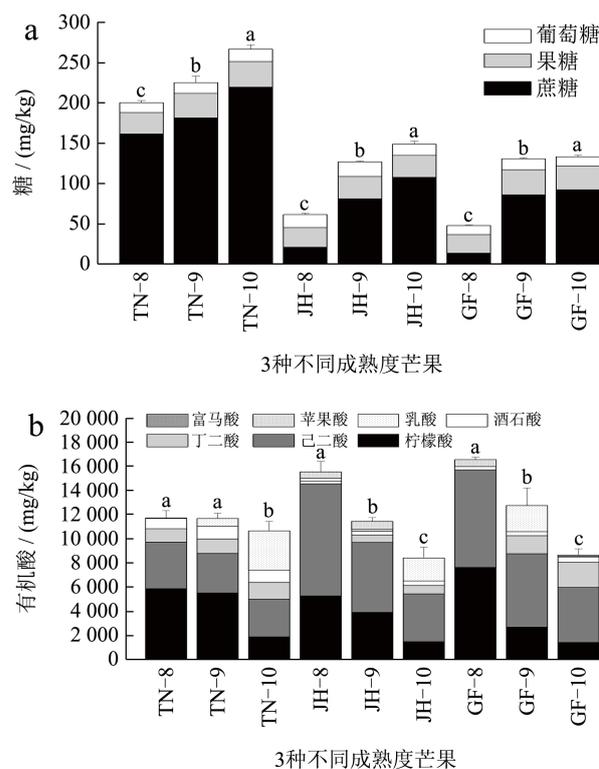


图 1 3 种不同成熟度芒果的糖 (a) 和有机酸 (b)
Fig.1 Sugars (a) and organic acids (b) of three mangoes with different maturities

糖酸含量、糖酸比是评价果实品质和风味的重要指标之一^[19]。如图 1a 所示，蔗糖是 3 种芒果的主要糖，3 种主要糖总量在逐渐成熟过程中都有显著 ($P<0.05$) 积累，其中十成熟的 TN 芒果 3 种主要糖总量最高，达 266.91 mg/kg，这与其最高的可溶性固形物含量结果相一致。郭晓杰等^[20]研究也表明，台农、金煌、贵妃芒果可溶性糖主要由蔗糖、果糖、葡萄糖组成，其中蔗糖含量最高，均值为 9.07 mg/g FW。如图 1b 所示，柠檬酸、己二酸、丁二酸是 3 种芒果的主导有机酸。TN 芒果中不含苹果酸，但其乳酸在成熟的过程中有明显的积累现象。除九成熟的 TN 芒果外，所有芒果的总有机酸在逐渐成熟过程中都有显著 ($P<0.05$) 分解，这与表 1 中可滴定酸的变化趋势相一致。

2.2.2 氨基酸

氨基酸是水果中重要的初级和次级代谢产物，也是决定着水果的关键品质之一^[21]。如图 2 所示，同一品种、不同成熟度的芒果总氨基酸都存在显著 ($P<0.05$) 差异。十成熟的 TN、JH、GF 芒果的总氨基酸分别为 834.84、1 156.10、471.18 mg/kg，差异较大。主导氨基酸为：丙氨酸、精氨酸、天冬氨酸、谷氨酰胺、赖氨酸，占全部氨基酸的 66.34%。JH 芒果中不含 Gly，其余 18 种氨基酸在 3 种芒果中均有检出。Shireesha 等^[22]也发现自然成熟的芒果

中氨基酸有 20 种，其中丙氨酸、精氨酸含量最高，分别为 973.5 和 162.4 mg/kg，这与本研究结果基本一致。

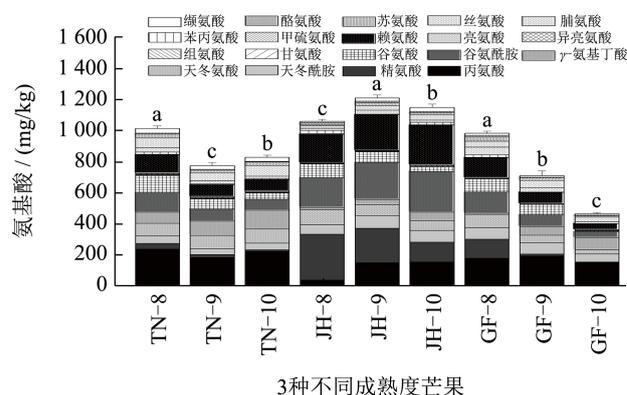


图 2 3 种不同成熟度的芒果氨基酸含量
Fig.2 Amino acid contents of mangoes with three different maturities

2.3 聚类综合分析

2.3.1 各指标均一化处理

为了综合评价 3 不同芒果在成熟过程的各指标综合变化规律，我们将以上 6 个理化指标、1 个主导糖、3 个主导有机酸、5 个主导氨基酸，共 15 个指标进行均一化处理。公式为： $X = (\text{原始值} - \text{平均值}) / \text{标准偏差}$ 。经均一化处理的 15 个指标如表 3 所示：它们平均值为 0，标准偏差为 1，消除了各指标因单位不同对综合评价的影响。

表 3 各指标均一化值

Table 3 Normalized values of quality indexes

	X_1 综合 色泽 指数	X_2 硬度	X_3 可溶 性固 形物	X_4 可滴 定酸	X_5 pH 值	X_6 固 酸比	X_7 蔗 糖	X_8 柠 檬酸	X_9 己 二酸	X_{10} 丁 二酸	X_{11} 丙 氨酸	X_{12} 谷 氨 酰胺	X_{13} 赖 氨酸	X_{14} 精 氨酸	X_{15} 天 冬 氨酸
TN-8	0.46	0.75	0.73	0.33	-0.19	-0.21	0.78	0.85	-0.68	0.24	1.20	-0.13	-0.16	-0.54	0.40
TN-9	1.12	0.00	1.23	-0.12	0.44	0.21	1.07	0.70	-0.95	0.37	0.27	-0.72	-0.72	-0.72	0.60
TN-10	1.38	-1.14	1.48	-0.35	0.62	0.62	1.62	-0.93	-1.03	0.62	0.97	-0.80	-0.76	-0.80	0.85
JH-8	-1.24	1.06	-1.23	0.92	-1.16	-1.20	-1.24	0.59	1.82	-1.38	-2.26	0.71	0.70	1.90	1.07
JH-9	-1.68	1.02	-0.27	-0.08	-0.12	-0.52	-0.38	-0.02	0.21	-0.47	-0.31	1.30	1.29	1.20	-0.09
JH-10	-0.28	-0.73	0.06	-0.80	0.84	0.54	0.01	-1.11	-0.63	-0.39	-0.23	1.60	1.63	0.31	-0.40
GF-8	0.24	0.97	-1.42	2.04	-1.91	-1.36	-1.34	1.64	1.26	-1.38	0.19	0.01	-0.01	0.27	0.61
GF-9	-0.24	-0.40	-0.27	-0.66	0.21	0.01	-0.30	-0.57	0.34	0.79	0.44	-0.73	-0.75	-0.77	-1.04
GF-10	0.24	-1.53	-0.32	-1.29	1.27	1.91	-0.21	-1.14	-0.35	1.61	-0.27	-1.23	-1.22	-0.86	-1.99

2.3.2 聚类分析

聚类分析 (Cluster Analysis, CA) 是将样本划分为不同的类群进行相似性评价, 可以综合、客观、科学地体现研究对象之间的关系^[23,24]。结果如图3所示, 当聚类距离为4.8时, 芒果可分为三类: 第一类包括 TN-8、TN-9、TN-10、GF-9、GF-10。说明成熟度较高的 TN、GF 芒果品质比较接近。第二类包括 JH-9、JH-10。说明成熟度较高的 JH 芒果与 TN、GF 芒果品质差距较大。第三类包括 JH-8、GF-8。说明成熟度低的 JH、GF 芒果品质比较接近, 与其它成熟度高的芒果有着明显区别。八成熟的 JH 和 GF 芒果都呈现低糖高酸的现象, 3 种主要糖总量分别为 61.90、48.26 mg/kg, 显著 ($P<0.05$) 低于九、十成熟芒果。与此相反, 7 种主导有机酸总量分别为 15 538.31、16 551.24 mg/kg, 显著 ($P<0.05$) 高于九、十成熟芒果。JH 和 GF 芒果后熟过程中蔗糖大量积累, 柠檬酸、己二酸等有机酸大量分解, 是典型蔗糖积累型芒果。郭晓杰等^[20]分析了 58 份芒果样品发现, 蔗糖为最主要的糖, JH 芒果的蔗糖整体高于 GF 芒果, 蔗糖/己糖的比例在 0.47~2.50 之间, 这与图 1 结果基本一致。因此, JH-8 和 GF-8 开始出现蔗糖大量积累和有机酸降解可能是导致它们与其它成熟度高的芒果有着明显区别的主要原因之一。

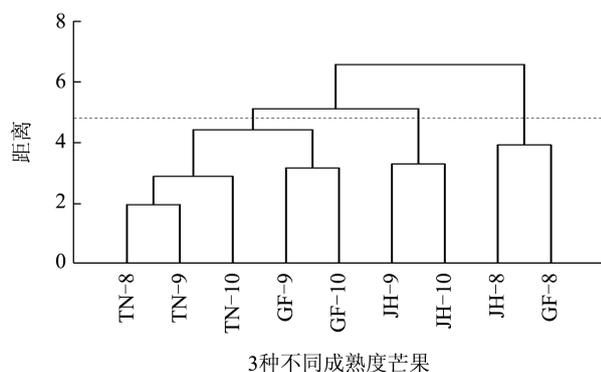


图3 品质指标聚类分析树状图

Fig.3 Cluster analysis of quality indexes

2.4 主成分综合分析

2.4.1 主成分的提取

为了进一步把 15 个指标简化为少数综合性指标对 3 个成熟度的芒果进行综合评价, 按照 PCA 降维的思路, 选择特征值 ≥ 1 , 贡献率较大的 3 个主成分, 如表 4 所示: 主成分 1 (PC1) 特征值为 8.767, 方差贡献率为 58.447%。主成分 2 (PC2) 特征值

为 3.042, 方差贡献率为 20.279%。主成分 3 (PC3) 特征值为 1.895, 方差贡献率为 12.634%。以上 2 个、3 个主成分分别能代表 15 个指标的 78.726%、91.361% 的信息, 可以建立综合评价模型。

表 4 入选的3个主成分特征值和累积方差贡献率

Table 4 Eigenvalues and cumulative variance contribution rates of principal components

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	8.767	58.447	58.447
2	3.042	20.279	78.726
3	1.895	12.634	91.361
4	0.642	4.283	95.644
5	0.402	2.677	98.322
6	0.195	1.302	99.624
7	0.051	0.341	99.965
8	0.005	0.035	100.000

2.4.2 基于PCA综合分析

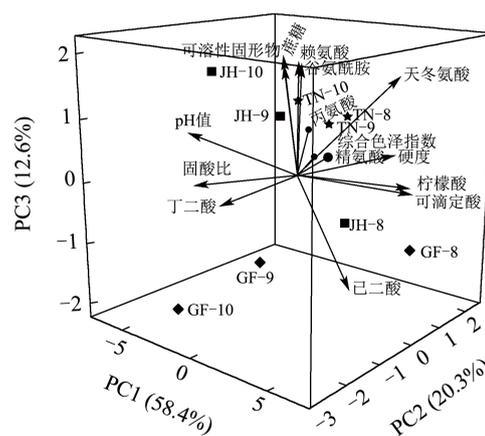


图4 PCA得分载荷图

Fig.4 PCA score loading plot

根据各成熟阶段的芒果品质指标在 PC1~3 上的得分情况绘制了三维散点图。如图 4 所示, 3 个不同成熟度的 TN 芒果都聚集在同一象限, 说明其各品质指标非常接近, 生长过程中整体变化最小。与此相反, 3 个不同成熟度的 GF 芒果最分散, 说明其各品质指标差距最大。值得注意的是, 十成熟的芒果都在 PC1[-1,0]区间, 3 个不同成熟度芒果的连线都与固酸比、pH 值的特征向量近似平行, 说明以上 2 个指标最能反映所有 15 个指标整体变化趋势。此外, 蔗糖与可溶性固形物特征向量基本重合, 说明两者有高度的相关性。李百云等^[25]也发现, 早熟灵武长枣果实在生长过程中, 3 种主要的糖 (蔗

糖、果糖、葡萄糖)与可溶性固形物的增长也有高度的正相关。以上结果表明,芒果的各品质指标变化错综复杂,它们相互联系、相互影响,其整体变化规律待进一步分析。

2.4.3 基于数学模型综合分析

为了更加直观地展示3种不同芒果在成熟过程中15个关键品质指标的整体变化情况,我们将15个因子的特征向量为系数,构建了3个主成分的线性方程,如式(1)~(3)所示。

$$Y_1 = -0.076X_1 + 0.098X_2 - 0.085X_3 + 0.09X_4 - 0.1X_5 - 0.103X_6 - 0.088X_7 + 0.074X_8 + 0.098X_9 - 0.107X_{10} - 0.07X_{11} + 0.072X_{12} + 0.071X_{13} + 0.1X_{14} + 0.057X_{15} \quad (1)$$

$$Y_2 = 0.213X_1 + 0.098X_2 + 0.118X_3 + 0.186X_4 - 0.136X_5 - 0.118X_6 + 0.123X_7 + 0.219X_8 - 0.045X_9 - 0.039X_{10} + 0.178X_{11} - 0.136X_{12} - 0.138X_{13} - 0.111X_{14} + 0.210X_{15} \quad (2)$$

$$Y_3 = -0.028X_1 + 0.064X_2 + 0.276X_3 - 0.066X_4 + 0.11X_5 - 0.034X_6 + 0.256X_7 - 0.068X_8 - 0.239X_9 - 0.116X_{10} + 0.069X_{11} + 0.325X_{12} + 0.330X_{13} + 0.119X_{14} + 0.233X_{15} \quad (3)$$

将3个主成分的方差贡献率作为系数带入,得到综合评价的总方程。该综合得分包含了15个关键品质指标的91.361%的信息,能较全面展现品质指标整体变化情况。总方程如式(4)所示。

$$Y = 0.40778Y_1 + 0.20261Y_2 + 0.15741Y_3 \quad (4)$$

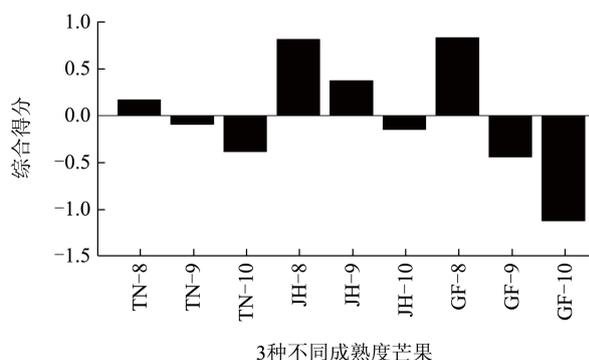


图5 不同成熟度芒果品质综合得分

Fig.5 Comprehensive scores of mangoes with three different maturities

将表3中各组芒果指标的均一化值带入以上公式,得到综合得分。如图5所示,3种芒果的在成熟过程中,综合得分都出现了由正转负的情况,这与硬度、可滴定酸、柠檬酸、己二酸等指标变化趋势相一致。说明以上4个品质指标对综合得分起主导作用。芒果在生理成熟过程中,柠檬酸盐循环(TCA循环)、次生代谢物的生物合成、乙醛酸和二

羧酸代谢等通路活跃,糖酸含量和类胡萝卜素含量不断升高使得果实呈现出更佳的口感^[26]。

十成熟的GF、TN、JH芒果的综合得分分别为-1.127、-0.387、-0.148,说明三种芒果的综合品质排序为:GF>TN>JH。黄立标等^[27]建立了芒果的pH、可溶性固形物、总糖、糖酸比、维生素C、总酚等关键品质指标的综合评分模型,认为TN综合品质高于JH芒果,这与本研究结果相一致。但该项研究评价指标仅有7个,对有机酸、氨基酸等营养指标没有全覆盖,也缺乏代表性指标的筛选。本文对35个理化和营养指标分析基础上,筛选出15个关键指标进行主成分分析获取综合得分。九成熟和十成熟的TN芒果综合得分分别为-0.094、-0.387,都已低于临界值(0),说明品质与八成熟芒果有明显提升,理化指标和营养品质均达到最佳。考虑到芒果作为一种呼吸跃变型热带水果,采摘后在流通过程仍能继续成熟。因此,建议七成熟的TN芒果即可商业采收。对于JH芒果而言,只有十成熟的JH芒果综合得分为负值(-0.148),品质和营养达到最佳。对于GF芒果而言,3个不同成熟度的GF芒果综合得分变化最大,说明在采收前期其品质提升最快。十成熟的GF芒果比九成熟的GF芒果综合得分提升了154.29%,品质和营养达到最佳,适宜做“树上熟”农场采摘体验项目主推品种。

3 结论

本文在对3个不同成熟度的贵妃(GF)、台农(TN)和金煌(JH)芒果主要理化和营养指标分析的基础上,利用聚类分析和主成分分析对其进行了综合评价。结果表明:3种芒果的硬度、可滴定酸在成熟过程中逐渐降低,而可溶性固形物、pH值、固酸比则逐渐增大。TN芒果蔗糖积累最多,而JH和GF芒果柠檬酸、己二酸等有机酸降解最快。6个关键理化指标和9个营养指标的PCA分析表明:3个主成分代表了15个关键品质指标的91.361%的信息,能综合反映不同成熟度对芒果品质的综合影响。根据数学模型的综合得分判定,十成熟的芒果综合品质排序为:GF>TN>JH。十成熟的GF芒果比九成熟的GF芒果综合得分提升了154.29%,品质和营养达到最佳,适宜做“树上熟”农场采摘体验项目主推品种。本研究可为芒果品质综合评价和科学采收提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 左俊.芒果香气成分分析及加工过程中芒果香气变化的研究[D].南宁:广西大学,2008.
- [2] 郭艳东,张腾,冯月梅,等.怒江峡谷8种中熟芒果营养成分分析与评价[J].中国食物与营养,2022,28(10):19-25.
- [3] VERÓNICA M, MAYRA A, MARITZA M, et al. Characterization and quantification of bioactive compounds and antioxidant activity in three different varieties of mango (*Mangifera indica* L.) peel from the Ecuadorian region using HPLC-UV/VIS and UPLC-PDA[J]. NFS Journal, 2021, 23: 1-7.
- [4] 胡隆孝,曹琳彩,王凯,等.采收催熟对‘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.
- [5] 汤红.外源 GA3和乙烯对芒果色泽变化的影响及其转录调控分析[D].海口:海南大学,2020.
- [6] 邵远志,张哲,李庚虎,等.采收成熟度与后熟处理对红贵妃芒果贮藏品质和生理的影响[J].保鲜与加工,2010,10(3):17-21.
- [7] XIN M, LI C, KHOO H, et al. Dynamic analyses of transcriptome and metabolic profiling: revealing molecular insight of aroma synthesis of mango (*Mangifera indica* L. var. Tainong) [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 666805.
- [8] 檀业维,刘帅民,冯春梅,等.不同成熟度‘桂热82号’芒果加工成原味果干前后关键香气成分变化[J].食品工业科技,2023,44(1):316-322.
- [9] 高文科,李明海,赵兴东,等.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.
- [10] PAULINA N, ANETA W, PIOTR L. Principal component analysis (PCA) of physicochemical compounds' content in different cultivars of peach fruits, including qualification and quantification of sugars and organic acids by HPLC [J]. European Food Research and Technology, 2019, 245: 929-938.
- [11] SINGH V, SINGH J, KUSHWAHA R, et al. Assessment of antioxidant activity, minerals and chemical constituents of edible mahua (*Madhuca longifolia*) flower and fruit of using principal component analysis [J]. Nutrition and Food Science, 2021, 51(2): 387-411.
- [12] 张鹏,于弘毅,李春媛,等.基于主成分分析的微环境气调对蓝莓贮后货架品质的影响[J].食品与发酵工业,2022,48(7):186-194.
- [13] CHEN P Y, YU J W, LU F L, et al. Differentiating parts of cinnamomum cassia using LC-QTOF-MS in conjunction with principal component analysis [J]. Biomedical Chromatography, 2016, 30(9): 1449-1457.
- [14] ALOS E, MARTINEZ-FUENTES A, REIG C, et al. Ethylene biosynthesis and perception during ripening of loquat fruit (*Eriobotrya japonica* Lindl.) [J]. Journal of Plant Physiology, 2017, 210: 64-71.
- [15] 曹建康,姜微波,赵玉梅,等.果蔬采后生理生化实验指导[M].北京:中国轻工业出版社,2007.
- [16] 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.
- [17] BRUMMELL D A. Cell wall disassembly in ripening fruit [J]. Functional Plant Biology, 2006, 33(2): 103-119.
- [18] 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.
- [19] 秦巧平,林飞凡,张岚岚.枇杷果实糖酸积累的分子生理机制[J].浙江农林大学学报,2012,29(3):453457.
- [20] 郭晓杰,田海,马晨,等.不同芒果品种果实可溶性糖组分含量特征分析[J].食品研究与开发,2021,42(11):125-132.
- [21] ZHANG Y, LI P, CHENG L. Developmental changes of carbohydrates, organic acids, amino acids, and phenolic compounds in ‘honeycrisp’ apple flesh [J]. Food Chemistry, 2010, 123: 1013-1018.
- [22] SHIREESHA C, VAZIDA M, MAHESHWARI T, et al. SEC-MS/MS determination of amino acids from mango fruits and application of the method for studying amino acid perturbations due to postharvest ripening [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110680.
- [23] 刘丙花,孙锐,王开芳,等.不同蓝莓品种果实品质比较与综合评价[J].食品科学,2019,40(1):70-76.
- [24] 朱周俊,袁德义,邹锋,等.不同锥栗农家种种仁中9种矿物质元素含量的因子分析与聚类分析[J].食品科学,2019,40(2):165-170.
- [25] 李白云,李慧.早熟灵武长枣果实糖代谢酶与早熟的相关性[J].江苏农业科学,2023,51(2):140-147.
- [26] 高文科,李明海,赵兴东,等.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.
- [27] 黄立标,袁艺洋,陈琳,等.基于主成分分析和HS-SPME-GC-MS技术综合评价不同品种芒果品质特性[J].食品工业科技,2023,44(3):297-306.