

郑自奋, 陈晓维, 邹波, 等. 油柑品种制汁特性评价及特征性风味成分分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 248–258. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090165

ZHENG Zifen, CHEN Xiaowei, ZOU Bo, et al. Evaluation of Juice Production Characteristics and Analysis of Characteristic Flavor Components of *Phyllanthus emblica* Fruit Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 248–258. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090165

· 分析检测 ·

油柑品种制汁特性评价及特征性风味成分分析

郑自奋^{1,2}, 陈晓维¹, 邹波¹, 余元善^{1*}, 肖更生², 马路凯²

(1. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所/农业农村部功能食品重点实验室/广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610;

2. 仲恺农业工程学院轻工食品学院/农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东广州 510000)

摘要: 为探究不同油柑品种的加工适宜性, 为油柑汁加工产业发展提供参考, 本文以广东和广西两省主栽的 8 个油柑品种为原料, 分别测定果汁的理化指标、活性成分、抗氧化能力及挥发性香气成分, 并利用相关性分析、主成分分析、聚类分析、“合理-满意度”多维价值理论分析建立油柑品种制汁适宜性评价方法。结果表明, 不同品种油柑汁品质具有显著性差异 ($P < 0.05$), 其中总酚、总黄酮、抗坏血酸、富马酸、鞣花酸、柚皮素含量差异较大, 而出汁率、pH、可溶性固形物含量差异较小; 共检测出 68 种挥发性香气成分, 筛选出 ROAV > 1 的香气成分 15 种, 反式-2-癸烯醛、正辛醛、壬醛为油柑汁的主要香气成分; 通过主成分分析提取了 6 个主成分, 累计方差贡献率达 96.033%, 结合聚类分析, 将品质指标简化为糖酸比、出汁率、总糖、褐变度、没食子酸、苹果酸、乳酸 7 个代表性指标, 利用“合理-满意度”多维价值理论建立了油柑汁评价模型, 综合排名为‘丙甜’>‘赤皮’>‘玻璃’>‘白玉’>‘灵山 4 号’>‘平丹 1 号’>‘水晶’>‘直生苗’, 与感官评价排名结果具有高度正相关性。该研究可为两广地区油柑制汁品种的选择提供理论参考。

关键词: 油柑汁, 活性成分, 香气成分, 抗氧化能力

中图分类号: TS255.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)01-0248-11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023090165



本文网刊:

Evaluation of Juice Production Characteristics and Analysis of Characteristic Flavor Components of *Phyllanthus emblica* Fruit Varieties

ZHENG Zifen^{1,2}, CHEN Xiaowei¹, ZOU Bo¹, YU Yuanshan^{1*}, XIAO Gengsheng², MA Lukai²

(1. Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;

2. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering/Lingnan Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to explore the processing suitability of different *Phyllanthus emblica* varieties and provide reference for

收稿日期: 2023-09-18

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2100802); 广州市重点研发计划项目 (202206010123)。

作者简介: 郑自奋 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 609285132@qq.com。

* 通信作者: 余元善 (1983-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 499072725@qq.com。

the development of *Phyllanthus emblica* juice processing industry, this paper took 8 *Phyllanthus emblica* varieties mainly grown in Guangdong and Guangxi Provinces as raw materials to determine the physical and chemical indexes, active components, antioxidant capacity and volatile aroma components of the fruit juice. Correlation analysis, principal component analysis, cluster analysis and "reasonably-satisfaction" multidimensional value theory were used to establish the evaluation method of the suitability of *Phyllanthus emblica* juice production. The results showed that the juice quality of different varieties had significant differences ($P < 0.05$), among which the contents of total phenol, total flavone, ascorbic acid, fumaric acid, ellagic acid and naringin were significantly different, while the juice yield, pH and soluble solid content were little different. A total of 68 volatile aroma components were detected, and 15 aroma components with ROAV > 1 were selected. Trans-2-decenoaldehyde, n-octyl aldehyde and nonylaldehyde were the main aroma components. Six principal components were extracted through principal component analysis, and the cumulative variance contribution rate reached 96.033%. Combined with cluster analysis, the quality index was simplified into seven representative indexes: sugar-acid ratio, juice yield, total sugar, browning degree, gallic acid, malic acid and lactic acid. The evaluation model of *Phyllanthus emblica* juice was established by using the multidimensional value theory of "reasonably-satisfaction". The comprehensive ranking was 'Bingtian' > 'Chipi' > 'Boli' > 'Baiyu' > 'Lingshan No.4' > 'Pingdan No.1' > 'Shuijing' > 'Zhishengmiao', which had a high positive correlation with the ranking results of sensory evaluation. This study can provide theoretical reference for the selection of *Phyllanthus emblica* juice varieties in Guangdong and Guangxi areas.

Key words: *Phyllanthus emblica* juice; active ingredient; aroma component; antioxidant capacity

油柑(*Phyllanthus emblica* L.)是大戟科叶下珠属余甘子的果实,又名余甘果、油甘子、余甘子、庵摩勒、滇橄榄等^[1],为热带、亚热带地区特色水果^[2-3],原产于印度和东南亚地区^[4-5],在我国已有 1800 多年的栽培历史,主要分布于广东、广西、福建、云南、海南等省份^[6]。据统计目前全国油柑种植面积约 13.3 万 hm^2 ,每公顷产量为 30 吨左右,是世界最主要的油柑产地之一^[1]。

近年来,随着新茶饮行业的快速兴起,新兴饮品店选用优质原叶茶现萃,加入纯牛奶、坚果、新鲜水果等天然食材,研制出类型丰富、口味多样的新茶饮产品,深受消费者喜爱。众多知名饮品店以油柑为原料,利用其特殊的回甘风味,开发的油柑新茶饮产品,吸引了大量消费者,市场潜力巨大。消费者对油柑的认可度正在不断增加,油柑汁的需求量也随之增大。目前油柑的加工方式主要有榨汁、腌制、干制、发酵和活性成分的提取等,榨汁是油柑最主要的加工方式,但由于油柑加工品种不明确,导致油柑汁相关产品质量参差不齐。

油柑汁的品质优劣与原料密切相关,目前油柑产业发展存在鲜食品种过剩、加工品种不足的问题,开展不同油柑品种制汁适宜性评价研究有利于促进油柑汁产业的健康发展。目前,对油柑的研究主要集中在营养品质的分析,对适宜制汁方面的研究较少。本研究对‘丙甜’‘玻璃’‘赤皮’‘白玉’‘平丹 1 号’‘水晶’‘灵山 4 号’‘直生苗’8 个油柑品种的理化指标、有机酸、酚类物质、抗氧化能力及香气成分进行测定,并采用相关性分析、主成分分析、聚类分析、“合理-满意度”多维价值理论分析进行综合评价,筛选出评价的关键指标,建立油柑制汁适宜性评价模型,旨在为两广地区油柑主栽品种的制汁加工适宜性提供理论依据,提升两广地区油柑汁加工产业竞争力。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

选择成熟度八成、无病虫害且无机械损伤的油柑果实作为试验材料。产自广东陆丰的品种有‘丙甜’‘玻璃’‘赤皮’‘白玉’,采摘时间均为 8 月中旬,产自广西灵山的有‘平丹 1 号’‘水晶’‘灵山 4 号’‘直生苗’,采摘时间均为 9 月上旬,每个品种均采自 20 株油柑树,每株树采摘 500 g,每株树间隔为 10 m;亚硝酸钠、硝酸铝、氢氧化钠、无水乙醇、95% 乙醇、无水甲醇、福林酚试剂、碳酸钠、氯化钠 分析纯,国药集团化学试剂有限公司;2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(ABTS)、1,1-二苯基苦基苯肼(DPPH)、果糖、葡萄糖、蔗糖 分析纯,上海麦克林生化科技有限公司;没食子酸、绿原酸、柯里拉京、诃子鞣酸、鞣花酸、柚皮素、抗坏血酸、草酸、酒石酸、苹果酸、乳酸、柠檬酸、富马酸 色谱纯,上海源叶生物科技有限公司。

Shimadzu LC-20A 高效液相色谱仪、UV-1780 紫外分光光度计 日本岛津公司;XBLL-S01 型破壁机 中国西贝乐公司;DK-98-1 型电热恒温水浴锅 上海精密仪器仪表公司;Mili-QSynthesis 超纯水系统 美国 Milipore 公司;FA1104 型电子天平 上海乐平科学仪器有限公司;7890A-5975C 气相色谱质谱联用仪 美国 Agilent 公司;101-2 型电热鼓风干燥箱 天津市泰斯特仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 油柑汁的制备 选择成熟度适中、无霉变的新鲜油柑,用清水冲洗干净,去核,放入榨汁机榨汁,反复榨取 3 次,用 5 μm 过滤袋过滤得到澄清油柑汁。

1.2.2 出汁率 每个品种随机选择 150~200 个油柑鲜果,称重记录鲜果质量。榨汁后,收集榨出的全部果汁,称重并记录果汁质量。按公式(1)计算出汁率:

$$W(\%) = \frac{m_1}{m_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中: W 为出汁率, %; m_1 为果汁质量, g; m_2 为鲜果质量, g。

1.2.3 基本理化指标 pH 采用 pH 计测定; 可溶性固形物采用数字阿贝折射仪测定; 总酚的测定参照 Folin-Ciocalteu 法^[7] 进行; 总黄酮的测定参照文培华等^[8] 的方法; 总糖的测定参照任晓晨^[9] 的方法; 总酸采用 GB/T 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》的方法测定^[10], 结果以柠檬酸计; 糖酸比为总糖/总酸; 果汁褐变度的测定参照苏艳丽等^[11] 的方法并加以改进, 取 5 mL 果汁于离心管, 5000 r/min 离心 10 min, 取上清液在 420 nm 波长处测定 OD 值, 以 $A_{420 \text{ nm}}$ 表示褐变度; 有机酸含量参照国标 GB 5009.157-2016《食品安全国家标准 食品中有机酸的测定》进行测定; 抗坏血酸的含量采用 HPLC 分析法^[12] 测定; 糖组分及含量采用 HPLC 法测定^[13], 包括果糖、葡萄糖、蔗糖。

1.2.4 酚类物质含量的测定 酚类物质含量的测定采用 HPLC 分析法。色谱柱为 Waters XBridge C₁₈ 柱(250×4.6 mm, 5 μm); 流动相 A 为 0.4% 的乙酸溶液, B 为乙腈; 梯度洗脱, 0~40 min, 5%~25%B, 40~45 min, 25%~35%B, 45~50 min, 35%~50%B, 柱温 30 °C; 流速 1 mL/min, 检测波长 280 nm。

1.2.5 抗氧化能力的测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力 参考 Sokol-Letowska 等^[14] 的方法, 稍作修改。取 1 mL 样品稀释液, 加入 5 mL 0.13 mmol/L 的 DPPH 溶液, 混匀后置于室温环境下避光反应 20 min, 以无水乙醇为空白在 517 nm 处测得吸光度 A_i , 以 1 mL 无水乙醇和 5 mL DPPH 在 517 nm 处测得吸光度 A_j 。DPPH 自由基清除率的计算公式如下:

$$M(\%) = \frac{A_j - A_i}{A_j} \times 100 \quad \text{式(2)}$$

式中: M 为 DPPH 自由基清除率, %; A_i 为样品组吸光度; A_j 为同体积无水乙醇代替样品溶液的吸光度。

1.2.5.2 ABTS⁺自由基清除能力 参考 Re 等^[15] 的方法, 稍作修改。取 0.25 mL 样品稀释液, 加入 5 mL ABTS 溶液, 混匀后置于室温条件下避光反应 6 min, 以无水乙醇为空白在 734 nm 处测得吸光度 A_0 , 以 0.25 mL 无水乙醇和 5 mL ABTS 溶液在 734 nm 处测得吸光度 A_1 , ABTS⁺自由基清除率的计算公式

如下:

$$M(\%) = \frac{A_1 - A_0}{A_1} \times 100 \quad \text{式(3)}$$

式中: M 为 ABTS⁺自由基清除率, %; A_0 为样品组吸光度; A_1 为同体积无水乙醇代替样品溶液的吸光度。

1.2.6 感官评价 以色泽、风味、口感、外观、总体可接受性 5 个指标为评价标准, 评价标准见表 1, 邀请 30 名专业人员组成感官评定小组对不同品种油柑汁进行感官评定。

1.2.7 挥发性成分的测定 油柑汁挥发性成分的测定参考刘昊澄等^[16] 的方法。

1.2.8 关键香气成分分析 参照刘登勇等^[17] 的方法, 计算香气活性值(Odor Activity Value, OAV):

$$OAV = \frac{C}{T} \quad \text{式(4)}$$

式中: C 为香气成分的相对含量, %; T 为该香气成分的气味阈值, μg/kg。

参照刘登勇等^[17] 的研究结果, OAV 最大的香气成分其相对香气活性值(Relative Odor Activity Value, ROAV)定义为 100, 其他挥发性香气成分的 ROAV 计算如下:

$$ROAV = \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \quad \text{式(5)}$$

式中: C_i 为各香气成分的相对含量, %; T_i 为相对应的感觉阈值, μg/kg; C_{\max} 为 OAV 最大香气成分的相对含量, %; T_{\max} 为 OAV 最大香气成分的感觉阈值, μg/kg。

一般认为 $ROAV \geq 1$ 的香气成分对样品的气味有着重要的贡献, 是关键挥发性香气物质; $0.1 \leq ROAV < 1$ 的香气成分只起到修饰作用; $ROAV < 0.1$ 的香气成分对样品的风味基本无贡献, 是潜在挥发性香气物质。

1.2.9 果汁品质评价方法 参照高甜甜等^[18] 的制汁适宜性评价模型, 采用相关性分析法、主成分分析法, 根据累计贡献率确定品质评价因素的个数, 采用聚类分析法确定重要的核心指标。运用层次分析法构建判断矩阵确定指标权重, 并进行一致性检验。采用“合理-满意度”多维价值理论进行油柑汁品质的综合评价, 并与感官评价结果进行比较, 验证评价模型。“合理-满意度”即人们对品种表现出来的综合品质满意的程度, 对于测定值越大则该项品质越好的指标, 满意度得分按公式(6)计算, 对于测定值越小则该

表 1 油柑汁感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of *Phyllanthus emblica* juice

分数	色泽	风味	口感	外观	总体可接受性
7~9	淡黄色	具有强烈的油柑香气, 香气浓郁	好的滋味, 适度的糖酸比及回甘	良好的流动性和一致性, 没有絮凝	优秀
4~6	黄色	具有油柑汁香气, 香气不够浓郁	滋味一般	一般的流动性和一致性, 轻微絮凝	一般
1~3	黄褐色	不具有油柑香气, 并且有异味	滋味不好	差的流动性和一致性, 明显的絮凝	不合格

项品质越好的指标,满意度得分按公式(7)计算。各品种的综合“合理-满意度”按公式(8)计算,得分越高,说明该品种品质越好。

$$K = \frac{D - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad \text{式 (6)}$$

$$K = \frac{D_{\max} - D}{D_{\max} - D_{\min}} \quad \text{式 (7)}$$

式中: K 为样品该指标满意度; D 为样品测定值; D_{\max} 为此指标最大测定值; D_{\min} 为此指标最小测定值。

$$Z = \sum Q \times K \quad \text{式 (8)}$$

式中: Z 为“合理-满意度”综合得分; Q 为指标权重; K 为样品满意度。

1.3 数据处理

所有实验重复 3 次,取平均值,数据处理及作图采用 Origin、SPSS、Hplot 软件,结果为“平均值±标准偏差”,采用 Duncan 验证法分析显著性差异, $P < 0.05$ 为差异性显著。

2 结果与分析

2.1 不同品种油柑汁理化指标

由表 2 可知,不同品种油柑汁理化指标差异较大。出汁率是反映品种制汁适宜性的重要指标,‘直生苗’出汁率最低,为 46.25%,说明其水分含量较低,其他品种出汁率在 55% 以上,‘平丹 1 号’出汁率最高,为 63.34%,较高的出汁率有利于果汁加工。褐变度是衡量果汁品质的重要指标之一,‘直生苗’的褐变度最高,表明其果汁最有可能发生氧化褐变,不利于加工后保存;而‘丙甜’的褐变度最低,说明其果汁氧化褐变反应较慢。果汁中的可溶性固形物由游离或组合形式的还原糖和非还原糖组成,是影响消费者对果蔬汁可接受度的主要因素之一^[19],而 pH 的大小会直接影响果汁的滋味和口感^[20]。不同品种油柑汁的 pH 在 3.0 左右,其中‘赤皮’的 pH 最高,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),酸涩味较低,‘灵山 4 号’的 pH 最低,酸涩味较重;可溶性固形物含量在 7°Brix~

11°Brix 之间,‘灵山 4 号’可溶性固形物的含量最高,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),‘丙甜’可溶性固形物的含量最低。总糖、总酸和糖酸比反映了果汁的甜度和酸度,对果汁的感官影响较大。‘丙甜’总糖的含量最高,为 48.89 mg/g,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),‘平丹 1 号’总糖的含量最低,为 18.51 mg/g;‘直生苗’总酸的含量最高,为 20.04 mg/g,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),含量最低的是‘赤皮’,为 7.38 mg/g,两者相差近两倍;‘赤皮’和‘丙甜’的糖酸比较高,口感更佳,更易于为消费者所接受。糖和酸的含量基本上呈现负相关,广东和广西两地油柑汁总糖和总酸含量差别明显可能与当地的气候条件和土壤类型相关。总酚、总黄酮是油柑中重要的功能活性成分,具有抗肿瘤、抗菌、抗炎和抗氧化等作用^[21-23],是评价油柑营养保健功能的重要指标。‘直生苗’总酚的含量最高,为 11.66 mg/g,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),‘丙甜’总酚的含量最低,为 3.60 mg/g。‘平丹 1 号’总黄酮的含量最高,为 6.37 mg/g,显著高于其他品种 ($P < 0.05$),‘赤皮’总黄酮的含量最低,为 1.41 mg/g。

2.2 不同品种油柑汁有机酸和抗坏血酸的含量

不同品种油柑汁有机酸和抗坏血酸的含量如表 3 所示。抗坏血酸是果汁中重要的活性成分之一,具有抗病毒、抗氧化、抗肿瘤、降血糖、抑制肥胖以及提高免疫力等作用^[5,24]。不同品种油柑汁抗坏血酸含量均值为 123.97 mg/100 g,‘平丹 1 号’抗坏血酸的含量最高,为 238.13 mg/100 g,显著高于其他品种 ($P < 0.05$)。有机酸是构成果汁滋味的重要成分,对于评价果汁的品质必不可少,有机酸组分与含量的差异使不同品种的果汁各具独特的风味。乳酸、苹果酸是油柑汁中主要的有机酸,总量占有有机酸的 90% 以上。乳酸的含量最高,均值达到 978.29 mg/100 g,‘直生苗’的乳酸含量显著高于其他品种 ($P < 0.05$);其次是苹果酸含量较高,均值为 759.10 mg/100 g,在‘直生苗’‘平丹 1 号’‘灵山 4 号’中的含量较高;柠檬酸含量均值为 78.12 mg/100 g,‘灵山 4 号’的柠檬酸含量最高;酒石酸含量均值为 61.19 mg/100 g,‘平丹

表 2 油柑汁的理化指标

Table 2 Physicochemical indexes of *Phyllanthus emblica* juice

品种	pH	可溶性固形物(°Brix)	总酚(mg/g)	总黄酮(mg/g)	总糖(mg/g)	总酸(mg/g)	糖酸比	出汁率(%)	褐变度($A_{420\text{nm}}$)
丙甜	2.95±0.02 ^c	7.31±0.03 ^e	3.60±0.09 ^e	1.80±0.04 ^f	48.89±0.50 ^a	7.77±0.06 ^e	6.29±0.08 ^a	61.91±1.11a ^b	0.134±0.011 ^d
玻璃	2.94±0.01 ^c	8.14±0.02 ^f	4.69±0.09 ^e	2.06±0.05 ^c	37.61±0.72 ^c	12.73±0.04 ^d	2.95±0.05 ^c	59.26±1.25 ^c	0.145±0.007 ^d
赤皮	3.23±0.01 ^a	9.43±0.01 ^d	3.70±0.07 ^e	1.41±0.06 ^e	46.62±1.43 ^b	7.38±0.05 ^b	6.32±0.26 ^a	57.28±0.96 ^d	0.163±0.007 ^c
白玉	3.04±0.01 ^b	8.14±0.01 ^f	4.22±0.06 ^f	2.11±0.06 ^c	35.16±0.60 ^d	8.27±0.05 ^f	4.25±0.07 ^b	56.20±1.10 ^c	0.170±0.005 ^c
平丹1号	2.75±0.01 ^e	10.54±0.02 ^b	10.19±0.11 ^b	6.37±0.08 ^a	18.51±0.50 ^e	18.88±0.22 ^b	0.98±0.04 ^e	63.34±0.49 ^a	0.187±0.006 ^b
水晶	2.92±0.01 ^d	8.77±0.03 ^e	5.15±0.17 ^d	3.68±0.10 ^d	20.96±0.77 ^f	12.32±0.09 ^c	1.70±0.05 ^d	61.07±0.19 ^b	0.161±0.007 ^c
灵山4号	2.72±0.01 ^f	10.87±0.02 ^a	8.74±0.09 ^c	5.81±0.08 ^b	28.54±0.39 ^d	16.28±0.12 ^c	1.75±0.02 ^d	62.04±0.25a ^b	0.185±0.007 ^b
直生苗	2.74±0.01 ^e	10.19±0.03 ^e	11.66±0.08 ^a	5.54±0.17 ^c	19.54±0.56 ^e	20.04±0.14 ^a	0.97±0.02 ^e	46.25±0.27 ^f	0.264±0.011 ^a
平均值	2.91	9.26	6.49	3.60	31.98	12.96	3.15	58.42	0.176
变异系数(%)	5.98	14.79	49.32	56.53	37.59	38.77	70.64	9.41	22.61

注: 同列肩标小写字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$); 表3、表4同。

表3 油柑汁有机酸与抗坏血酸含量

Table 3 Content of organic acid and ascorbic acid in *Phyllanthus emblica* juice

品种	含量(mg/100 g)						
	抗坏血酸	草酸	酒石酸	苹果酸	乳酸	柠檬酸	富马酸
丙甜	139.43±6.47 ^e	17.36±0.18 ^d	67.69±0.60 ^b	585.98±19.40 ^e	672.67±20.54 ^f	55.57±0.88 ^d	2.60±0.28 ^c
玻璃	76.63±2.02 ^e	15.93±0.51 ^e	72.42±1.74 ^a	740.86±13.24 ^d	953.30±60.94 ^d	93.34±2.36 ^b	2.63±0.24 ^c
赤皮	86.53±2.03 ^f	19.86±0.41 ^b	68.58±1.62 ^b	614.55±15.17 ^a	777.18±26.17 ^e	43.94±1.55 ^e	4.58±0.11 ^a
白玉	51.75±0.68 ^b	18.67±0.11 ^c	53.01±1.36 ^d	387.62±7.23 ^f	673.49±8.01 ^f	78.81±1.98 ^c	4.17±0.06 ^b
平丹1号	238.13±5.73 ^a	14.77±0.27 ^f	74.27±1.07 ^a	986.25±29.86 ^b	1201.86±14.83 ^b	100.67±10.51 ^{ab}	1.52±0.13 ^d
水晶	128.19±2.66 ^d	17.72±0.10 ^d	57.55±0.68 ^c	786.44±12.06 ^c	977.35±9.20 ^d	54.18±8.74 ^d	4.16±0.08 ^b
灵山4号	166.44±4.30 ^b	12.71±0.20 ^e	37.37±0.21 ^c	811.16±22.52 ^c	1119.89±43.54 ^c	106.05±6.18 ^a	1.4±0.08 ^d
直生苗	104.68±2.42 ^c	22.64±1.22 ^a	57.65±2.04 ^c	1159.93±35.10 ^a	1450.54±11.28 ^a	92.39±3.47 ^b	1.52±0.16 ^d
平均值	123.97	17.46	61.19	759.10	978.29	78.12	2.82
变异系数(%)	47.55	17.62	20.20	31.68	27.87	30.50	46.76

1号’含量最高。草酸、富马酸在油柑汁中含量相对较低,含量均值分别只有17.46、2.82 mg/100 g,其中富马酸的变异系数为46.76%,不同品种之间含量差异较大。

2.3 不同品种油柑汁糖组分及含量

油柑汁中可溶性糖主要由葡萄糖、果糖、蔗糖组成。由图1可知,8个品种油柑汁中果糖的含量最高,其次是葡萄糖,蔗糖含量最低。蔗糖和葡萄糖甜

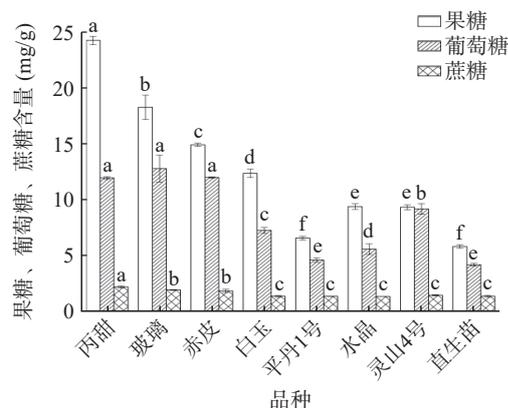


图1 油柑汁果糖、葡萄糖和蔗糖的含量

Fig.1 Content of fructose, glucose and sucrose in *Phyllanthus emblica* juice

注:柱状图中小写字母不同表示差异显著(P<0.05);图2同。

味稳定,具有高热量,过多摄入易导致肥胖,而果糖是一种活性低聚糖,甜味峰值出现得早,消退得快,能与各种不同的香味和谐并存,代谢快,也不会引起血糖水平的波动,对人体的健康益处较大^[25-26]。不同品种油柑汁果糖、葡萄糖、蔗糖的含量均值分别为12.59、8.42和1.59 mg/g。‘丙甜’果糖的含量最高,‘直生苗’的含量最低,两者的含量相差3倍以上;‘玻璃’葡萄糖的含量最高,‘直生苗’的含量最低;蔗糖含量较低,不同品种油柑汁中的含量差异较小。

2.4 不同品种油柑汁酚类物质组成及含量

果汁中丰富的酚类物质不仅能够给予果汁良好的贮藏性,并且具有抗癌、抗氧化和保护神经的作用^[27-28]。不同品种油柑汁中酚类化合物组成及含量如表4所示,没食子酸、柯里拉京、诃子鞣酸和鞣花酸是油柑汁中主要的单体酚,占酚类物质近90%,其中没食子酸含量最高,均值达到230.76 μg/g,‘玻璃’的含量显著高于其他品种(P<0.05);其次是柯里拉京含量较高,均值为150.50 μg/g,‘灵山4号’的含量显著高于其他品种(P<0.05);诃子鞣酸、鞣花酸的含量也较高,均值分别为114.64、84.54 μg/g,‘平丹1号’和‘直生苗’诃子鞣酸的含量较高,‘灵山4号’和‘直生苗’鞣花酸的含量显著高于其他品种(P<0.05)。绿原酸和柚皮素在油柑汁中的含量较少,均值分别为

表4 油柑汁酚类物质组成及含量

Table 4 Composition and content of phenolic substances in the *Phyllanthus emblica* juice

品种	酚类物质含量(μg/g)					
	没食子酸	绿原酸	柯里拉京	诃子鞣酸	鞣花酸	柚皮素
丙甜	175.11±4.60 ^{ef}	47.56±0.32 ^d	116.58±1.98 ^{ef}	71.66±3.66 ^d	18.45±4.16 ^e	29.65±1.69 ^a
玻璃	392.67±9.05 ^a	59.87±2.22 ^b	186.28±9.99 ^c	116.74±1.10 ^c	71.11±8.09 ^c	10.92±0.11 ^d
赤皮	293.60±3.79 ^b	54.51±0.38 ^c	107.15±1.69 ^f	67.94±1.34 ^d	53.52±3.01 ^d	16.04±2.13 ^c
白玉	183.05±3.04 ^e	55.79±3.06 ^{bc}	140.89±4.01 ^d	118.22±2.82 ^c	89.68±2.13 ^b	11.19±0.17 ^d
平丹1号	163.78±4.77 ^f	66.09±5.12 ^a	125.07±5.96 ^e	171.58±5.92 ^a	73.73±0.50 ^c	17.32±0.59 ^c
水晶	241.40±15.44 ^c	53.36±0.12 ^c	95.61±6.88 ^e	70.81±1.74 ^d	55.28±5.43 ^d	12.08±3.14 ^d
灵山4号	210.83±7.36 ^d	56.91±2.46 ^{bc}	234.20±5.81 ^a	127.21±5.26 ^b	151.32±4.93 ^a	9.96±0.74 ^d
直生苗	185.67±4.60 ^e	52.57±1.14 ^c	198.18±5.72 ^b	172.98±3.15 ^a	163.26±3.67 ^a	21.23±0.38 ^b
平均值	230.76	55.83	150.50	114.64	84.54	16.05
变异系数(%)	33.79	9.80	33.07	37.26	58.57	41.88

55.83、16.05 μg/g, 绿原酸变异系数为 9.80%, 不同品种之间含量差异较小, 柚皮素变异系数为 41.88%, 不同品种之间含量差异较大。

2.5 油柑汁的抗氧化能力

样品对 DPPH 和 ABTS⁺自由基的清除能力反映其抗氧化能力, IC₅₀ 值越低, 说明其抗氧化能力越强。由图 2 可知, ‘玻璃’对 DPPH 自由基的清除能力最强, 显著高于其他品种(P<0.05), ‘灵山 4 号’‘平丹 1 号’和‘直生苗’次之, ‘白玉’对 DPPH 自由基清除能力最弱。‘直生苗’对 ABTS⁺自由基的清除能力最强, 显著高于其他品种(P<0.05), ‘平丹 1 号’和‘灵山 4 号’次之, ‘丙甜’对 ABTS⁺自由基清除能力最弱。总体上看, 油柑汁对 DPPH 和 ABTS⁺自由基的清除能力与总酚的含量成正相关性, 与邓健康等^[29]的研究结果相一致。

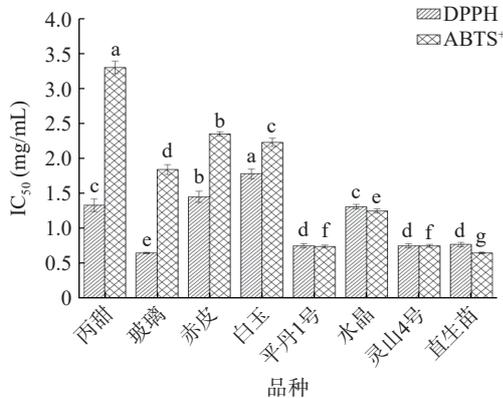


图 2 油柑汁对 DPPH 和 ABTS⁺自由基的清除能力
Fig.2 Scavenging ability of *Phyllanthus emblica* juice on DPPH and ABTS⁺ free radicals

2.6 不同品种油柑汁感官评价

以色泽、风味、口感、外观、总体可接受性 5 项指标对油柑汁做感官评价, 每个指标评分标准为 1~9 分。由图 3 可知, 感官评价得分综合排名为‘丙甜’>‘玻璃’>‘白玉’>‘赤皮’>‘平丹 1 号’>‘水晶’>‘灵山 4 号’>‘直生苗’, ‘丙甜’油柑汁 5 项指标的得分均最高, 口感更符合消费者的需求, 具有良好的加工潜力。

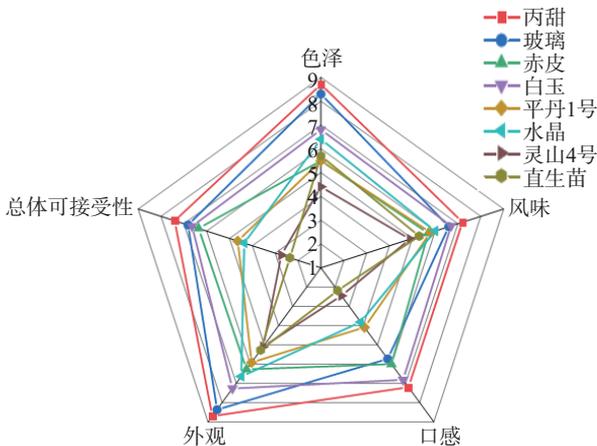


图 3 油柑汁的感官评价
Fig.3 Sensory evaluation of *Phyllanthus emblica* juice

2.7 不同品种油柑汁挥发性香气成分

2.7.1 不同品种油柑汁香气成分分析 由图 4 可知, 8 个品种油柑汁中共检测出匹配度大于 70% 的挥发性香气成分 68 种, 分别为醛类 16 种、酯类 8 种、烷烃类 12 种、醇类 11 种、酮类 6 种、烯炔类 7 种、酚、酸和杂环类共 8 种, 醛类相对含量最高, 酚、酸和杂环类相对含量较低。醛类、酯类、烷烃类、醇类和酮类是油柑汁挥发性物质中的重要组分, 但各品种之间在化合物种类和相对含量上仍有所不同。‘丙甜’‘玻璃’和‘白玉’主要的挥发性香气成分均为乙酸乙酯和正辛醛; ‘赤皮’主要的挥发性香气成分为正辛醛、乙酸乙酯和正己酸乙酯; ‘平丹 1 号’‘水晶’和‘直生苗’的主要挥发性香气成分均为正辛醛和正己酸乙酯; ‘灵山 4 号’主要的挥发性香气成分是正己醛和正己酸乙酯。8 个品种油柑汁醛类和烷烃类化合物种类较多且相对含量较高, 醛类物质的阈值较小而烷烃类物质的阈值较大, 相同含量下, 阈值越大的物质对香

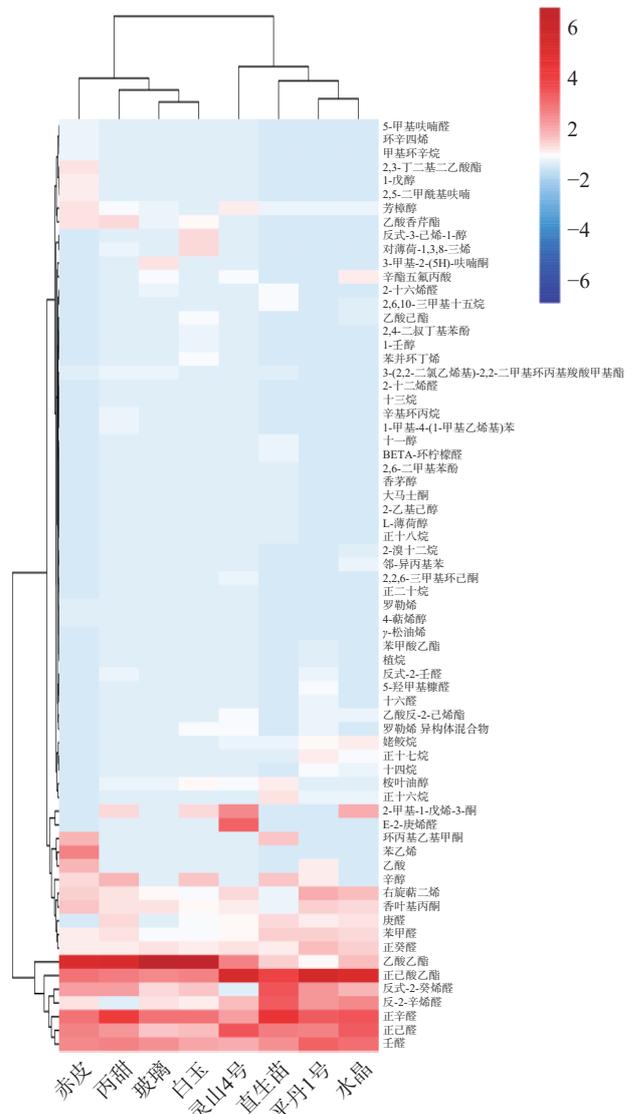


图 4 油柑汁挥发性化合物含量聚类热图
Fig.4 Clustering heat map of volatile compounds in *Phyllanthus emblica* juice

气的贡献率越小, 阈值越小的物质对香气的贡献率越大, 由此可推断出, 醛类物质应该是决定油柑果汁香气的主要成分。

2.7.2 不同品种油柑汁关键香气成分分析 本研究鉴定出的香气成分种类较多, 但并非每种成分都对油柑汁的风味起到显著作用, 其中一部分关键挥发性物质对油柑汁的整体风味贡献较大, 其余挥发性物质对油柑汁的整体风味的呈现只起到修饰和协同作用^[30]。香气对风味的贡献大小取决于相对含量高低及阈值大小。因此, 查询了 68 种挥发性成分的风味阈值, 共找到 28 个化合物的阈值, 对查询到阈值的挥发性物质进行了 ROAV 分析。ROAV ≥ 1 的物质对样品香气贡献较大, 为关键性香气化合物, 并且 ROAV 值越大的物质对样品总体风味的贡献也越大。由表 5 可知, 通过计算各类香气成分的 ROAV 值进行对比分析, 得出 ROAV ≥ 1 的香气有 15 种, 不同品种油柑汁有所差异。8 个品种油柑汁共有的香气成分 (ROAV ≥ 1) 有 5 种, 分别是正己酸乙酯、正己醛、正辛醛、壬醛、正癸醛, 这几种挥发性物质呈现青草味、甜香味、柑橘味、玫瑰香等香味, 是

8 个品种油柑汁的共有香味。其中对‘丙甜’贡献最大的是反式-2-癸烯醛, 其 ROAV 为 100, 正辛醛、壬醛、反式-2-壬醛、正癸醛等 9 种香气成分 (ROAV ≥ 1) 的贡献也比较大, 其中正辛醛、壬醛、反式-2-壬醛的 ROAV 值分别为 95.49、38.54、26.69; 正辛醛、壬醛、正癸醛、反式-2-癸烯醛等 8 种香气成分 (ROAV ≥ 1) 对‘玻璃’风味贡献较大, 其中贡献最大的是正辛醛; ‘赤皮’‘平丹 1 号’‘水晶’和‘直生苗’的关键性香气 (ROAV ≥ 1) 分别为 11、11、9、9 种, 对香气贡献最大的均为反式-2-癸烯醛, 正辛醛、壬醛对香气贡献也比较大; ‘白玉’‘灵山 4 号’的关键性香气 (ROAV ≥ 1) 分别为 9、11 种, 香气贡献最大的均是正辛醛, 反式-2-癸烯醛、壬醛、正癸醛、正己醛对香气贡献也比较大。

为了直观感知各挥发性香气成分对不同品种油柑汁香气贡献率的大小, 根据 ROAV ≥ 1 筛选出 15 种香气成分, 使用 Z-score 标准化每种香气成分的 ROAV 值并绘制聚类热图 (图 5)。由图 5 可知, 反式-2-癸烯醛、正辛醛和壬醛是油柑汁重要的挥发性香气成分。其中正辛醛是 8 个品种油柑汁的共有

表 5 油柑汁特征香气成分 ROAV 分析

Table 5 ROAV analysis of characteristic aroma components of *Phyllanthus emblica* juice

化合物	英文名称	阈值(μg/kg)	香气描述	ROAV							
				丙甜	玻璃	赤皮	白玉	平丹1号	水晶	灵山4号	直生苗
桉叶油醇	Eucalyptol	10	草药味、樟脑味	0.22	0.31	0.14	0.98	0.19	0.32	1.35	0.58
辛醇	1-Octanol	6	橘香、花香	3.97	-	2.61	5.11	1.48	-	-	1.79
芳樟醇	Linalool	6	铃兰香、木香	0.74	0.42	2.12	0.28	0.53	0.85	4.21	0.27
1-戊醇	1-Pentanol	150.2	果香味	-	-	0.07	-	-	-	-	-
4-萜烯醇	Terpinen-4-ol	130	胡椒、木香	-	-	0.01	-	-	-	-	-
1-壬醇	1-Nonanol	600	青草味	-	-	-	0.00	-	-	-	-
反式-3-己烯-1-醇	Trans-3-Hexen-1-ol	400	生青味、草药味	-	-	-	0.06	-	-	-	-
香茅醇	Citronellol	100	香叶香、玫瑰香	-	-	-	-	-	-	-	0.01
右旋萜二烯	(+)-Dipentene	10	柑橘香气	1.09	1.04	1.67	0.82	2.45	2.77	3.14	0.18
γ-松油烯	Gamma-Terpinene	0.26	柠檬香、甜花香	-	-	4.86	-	-	-	-	-
罗勒烯	Ocimene	34	果香味	-	-	0.06	-	-	-	-	-
乙酸乙酯	Ethyl acetate	7500	甜果香、花香	0.01	0.03	0.01	0.02	-	-	0.01	-
正己酸乙酯	Ethyl caproate	14	青苹果、香蕉味	2.85	4.21	3.04	4.50	6.34	8.04	15.22	2.42
乙酸己酯	Hexyl acetate	1500	果香、梨、樱桃香	-	-	-	0.01	-	-	-	-
苯甲酸乙酯	Ethyl benzoate	60	樱桃、葡萄香	-	-	-	-	0.01	-	-	-
香叶基丙酮	Geranylacetone	60	清香	0.18	0.28	0.34	0.20	0.28	0.31	0.42	0.04
正己醛	Hexanal	4.5	清香	7.04	6.38	8.50	7.20	8.15	14.86	27.74	5.19
庚醛	Heptaldehyde	3	橘香	4.38	-	-	1.89	3.33	5.50	6.30	2.64
苯甲醛	Benzaldehyde	2000	芳香植物味、苦杏仁味	0.01	-	0.01	-	0.01	0.01	0.01	-
正辛醛	Octanal	0.7	强烈的柑橘香、玫瑰香	95.49	100.00	60.55	100.00	71.64	99.16	100.00	58.96
壬醛	1-Nonanal	1	脂肪香、青草芳香	38.54	54.45	36.74	44.66	47.19	58.01	58.09	19.06
反式-2-壬醛	Trans-2-Nonenal	0.08	青味、黄瓜	26.69	-	-	-	39.81	-	-	-
正癸醛	Decanal	1	青草味、甜香味	10.46	16.77	11.04	14.19	19.70	20.59	27.51	6.15
反式-2-癸烯醛	3-Heptylacrolein	0.3	水果味	100.00	74.04	100.00	95.77	100.00	100.00	-	100.00
反-2-辛烯醛	(E)-2-Octenal	3	坚果香、油味	-	5.33	4.58	4.35	10.22	15.90	16.90	9.63
5-甲基呋喃醛	5-Methyl furfural	1110	甜香、谷物	-	-	-	-	-	-	-	-
5-羟甲基糠醛	5-Hydroxymethylfurfural	59	焦糖味、果香	-	-	-	-	0.09	-	-	-
E-2-庚烯醛	Trans-2-Heptenal	13	脂肪香、果香	-	-	-	-	-	-	8.68	-

注: “-”表示未检出。

成分且对香气的影响较大;反式-2-癸烯醛在‘灵山4号’中未检测出来,而在其他品种中均检测出来,且对香气影响较大;壬醛对‘灵山4号’‘玻璃’香气的影响最大,对‘水晶’、‘平丹1号’香气的影响次之。桉叶油醇、芳樟醇、右旋萜二烯等 12 种挥发性成分对香气的贡献较小。综上所述,反式-2-癸烯醛、正辛醛和壬醛 3 种挥发性成分对油柑汁的香气贡献最大,呈现出柑橘香、玫瑰香、水果味等香气,不同品种油柑汁香气成分存在一定的相似性和差异性,造成它们风味的普遍性与独特性。

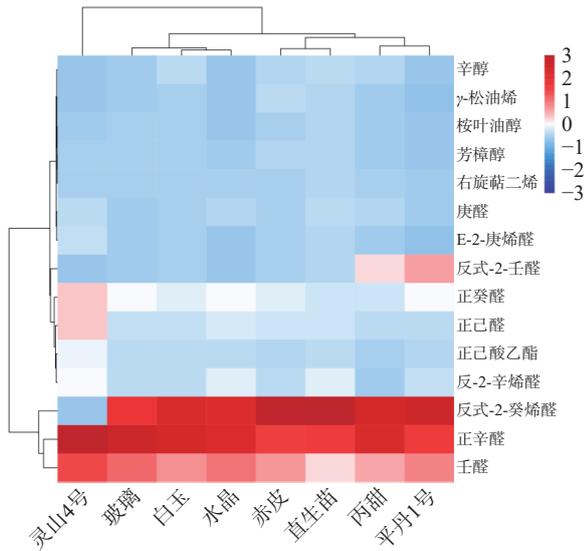


图 5 油柑汁关键香气成分聚类热图
Fig.5 Clustering heat map of key aroma components of *Phyllanthus emblica* juice

2.8 不同品种油柑汁综合评价

2.8.1 主成分分析 如表 6 所示,前 6 个主成分的累计方差贡献率达到 96.033%,说明前 6 个主成分可反映原始变量的绝大部分信息。由 PCA 得分(图 6)可知:每个样品 3 个平行结果相对接近,表明样品之间的可重复性。‘丙甜’与‘赤皮’油柑点与点之间相距较近,说明其品质具有相似性;‘玻璃’‘白玉’‘水晶’油柑品种同样具有相似性。由表 6、表 7 可知,第 1 主成分包含了原来信息量的 47.629%,与总酚、总黄酮、总酸、乳酸含量有明显的正相关性,与糖酸比、ABTS⁺高度负相关,载荷值绝对值均大于 0.8。第 2 主成分包含了原信息量的 20.282%,与正己酸乙酯、壬醛、正癸醛有明显的正相关性,与草酸含量有

表 6 主成分的特征值和贡献率

Table 6 Characteristic values and contribution rates of principal components

主成分	特征值	方差贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	15.241	47.629	47.629
2	6.49	20.282	67.911
3	3.067	9.583	77.494
4	2.567	8.021	85.514
5	2.136	6.675	92.189
6	1.23	3.844	96.033

明显的负相关性。第 3 主成分包含了原信息量的 9.583%,与蔗糖、抗坏血酸、酒石酸、柚皮素含量有明显的正相关性,与富马酸、DPPH 具有明显的负相关性,第 4、5、6 主成分包含了原信息量的 8.021%、6.675%、3.844%,表明了剩余指标信息。

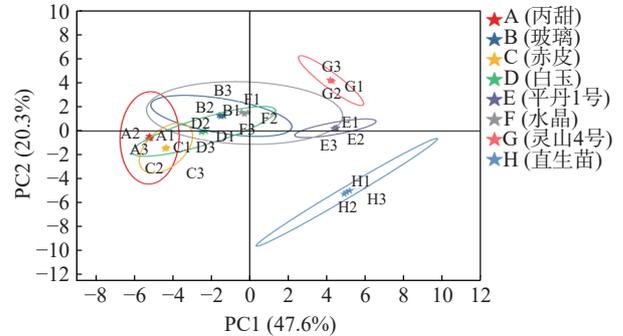


图 6 油柑汁的 PCA 得分图
Fig.6 PCA score of *Phyllanthus emblica* juice

表 7 油柑汁品质指标的主成分载荷矩阵

Table 7 Principal component load matrix of quality index of *Phyllanthus emblica* juice

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
出汁率	-0.226	0.798	0.381	-0.375	-0.061	0.06
pH	-0.862	-0.125	-0.248	-0.06	0.286	0.245
TSS	0.842	0.044	-0.066	-0.057	0.018	0.468
总酚	0.938	-0.309	0.128	-0.032	-0.061	0.01
总黄酮	0.963	0.065	0.09	-0.173	-0.161	0.044
总糖	-0.877	0.027	0.167	0.325	-0.126	0.156
总酸	0.966	-0.118	0.191	0.023	0.057	-0.019
糖酸比	-0.92	-0.097	0.047	0.096	-0.179	0.175
果糖	-0.846	0.101	0.392	0.283	-0.154	-0.095
葡萄糖	-0.71	0.273	0.305	0.504	0.073	0.231
蔗糖	-0.711	-0.012	0.56	0.349	-0.112	0.139
抗坏血酸	0.54	0.268	0.538	-0.484	-0.272	0.167
草酸	-0.187	-0.894	-0.345	0.028	0.051	0.034
酒石酸	-0.357	-0.37	0.642	-0.306	0.47	-0.011
苹果酸	0.824	-0.319	0.283	-0.008	0.062	0.199
乳酸	0.919	-0.26	0.102	0.077	0.084	0.129
柠檬酸	0.774	0.206	0.184	0.333	0.089	-0.329
富马酸	-0.742	-0.01	-0.522	-0.279	0.27	0.103
没食子酸	-0.321	0.201	0.094	0.445	0.727	0.209
绿原酸	0.461	0.291	0.241	-0.224	0.598	-0.09
柯里拉京	0.58	0.156	-0.021	0.784	-0.069	-0.058
诃子鞣酸	0.839	-0.254	0.157	0.093	0.121	-0.298
鞣花酸	0.791	-0.058	-0.363	0.456	-0.067	0.034
柚皮素	-0.228	-0.561	0.522	-0.107	-0.568	0.002
DPPH	-0.698	-0.096	-0.544	-0.335	-0.2	-0.108
ABTS ⁺	-0.953	-0.069	0.141	0.061	-0.198	-0.109
褐变度	0.753	-0.568	-0.243	0.127	-0.077	0.074
正己酸乙酯	0.472	0.806	-0.192	0.05	-0.225	0.191
正己醛	0.349	0.75	-0.256	0.12	-0.328	0.349
正辛醛	-0.257	0.75	-0.109	0.151	-0.134	-0.51
壬醛	-0.034	0.953	-0.017	-0.131	0.207	-0.084
正癸醛	0.349	0.925	-0.046	-0.115	0.036	0.064

2.8.2 油柑汁理化指标的聚类分析 采用欧式平方距离法对 32 项指标进行系统聚类,如图 7 所示。依据 PCA 结果,聚类时将指标聚为 4 类。即出汁率、

绿原酸、酒石酸、壬醛、总糖、柠檬酸、正辛醛、褐变度、糖酸比、抗坏血酸等聚为第1类;没食子酸、苹果酸、乳酸各聚一类,分别为第2类、第3类和第4类。聚为一类的指标具有较高的相关性,可以选择其中重要的指标作为代表,以此将32项理化指标进行简化。相关研究^[18,31-32]均认为糖酸比、出汁率、总糖、褐变度对油柑制汁品质较为重要。因此综合主成分分析与聚类分析,同时考虑到生产实际中的指导意义,将油柑制汁的品质指标简化为糖酸比、出汁率、总糖、褐变度、没食子酸、苹果酸、乳酸,以此反映油柑制汁综合品质。

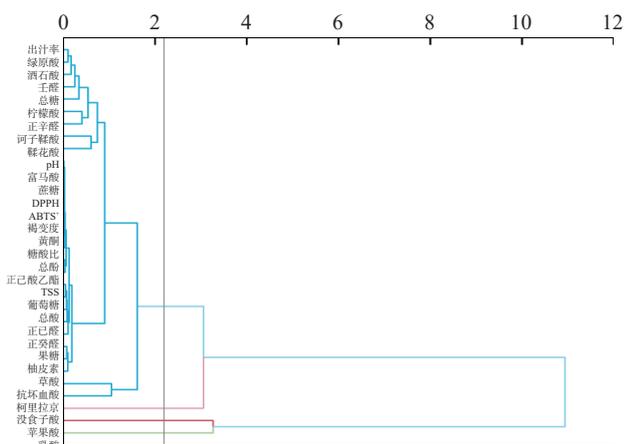


图7 油柑汁品质评价指标的聚类谱系图

Fig.7 Cluster pedigree of quality evaluation indexes of *Phyllanthus emblica* juice

2.8.3 油柑汁核心指标的权重确定 采用筛选出的7个核心指标对油柑汁进行综合评价。邀请专家根据各指标对果汁品质的影响程度,依据1~9标度法构造判断矩阵(表8)。计算判断矩阵的最大特征根 λ_{max} 为7.3374,对该矩阵利用一致性指标 $CI=(\lambda_{max}-n)/(n-1)$,一致性比率 $CR=CI/RI$ 进行一致性检验,

该矩阵阶数 $n=7$ 时,其对应的随机一致性标准值 $RI=1.3416$,经计算 $CR=0.0419$, $CR<0.1$,表明该判断矩阵一致性较好。计算各指标相对于油柑汁综合品质的权重,糖酸比和出汁率权重均为0.287,其对制汁影响最为重要。总糖权重为0.194,苹果酸和乳酸权重最小,均为0.024,表明其对制汁品质的影响相对较小。

表8 油柑汁品质评价指标判断矩阵

Table 8 Judgment matrix of quality evaluation indexes of *Phyllanthus emblica* juice

指标	糖酸比	出汁率	总糖	褐变度	没食子酸	苹果酸	乳酸	权重
糖酸比	1	1	3	5	7	9	9	0.287
出汁率	1	1	3	5	7	9	9	0.287
总糖	1/3	1/3	1	3	5	7	7	0.194
褐变度	1/5	1/5	1/3	1	3	5	5	0.121
没食子酸	1/7	1/7	1/5	1/3	1	3	3	0.064
苹果酸	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1	1	0.024
乳酸	1/9	1/9	1/7	1/5	1/3	1	1	0.024

$\lambda_{max}=7.3374$

2.8.4 油柑汁品质“合理-满意度”综合评价 对油柑汁品质而言,在一定范围内糖酸比、出汁率、总糖、没食子酸、苹果酸、乳酸含量的数值越大越好,因此采用公式(6)计算其满意度,褐变度越小越好,则采用公式(7)计算;将利用层次分析法计算出的核心指标的不同权重,代入公式(8),由此算出油柑汁的综合品质得分及其排名。由表9可知,综合得分排名为‘丙甜’>‘赤皮’>‘玻璃’>‘白玉’>‘灵山4号’>‘平丹1号’>‘水晶’>‘直生苗’,此结果与感官评价排名结果高度正相关(相关系数 $R^2=0.7347$),且本法评价相对于感官评价指标更加丰富,在油柑制汁适宜性评价上更具准确性。

表9 油柑汁品质的“合理-满意度”评价得分及排名

Table 9 Score and ranking of reasonable satisfaction evaluation on quality of *Phyllanthus emblica* juice

品种	糖酸比	出汁率	总糖	褐变度	没食子酸	苹果酸	乳酸	总分	排名	感官评价排名
丙甜	0.994	0.916	1	1	0.470	0.257	0	0.900	1	1
玻璃	0.370	0.761	0.629	0.915	0.133	0.457	0.361	0.586	3	2
赤皮	1	0.645	0.925	0.777	0.187	0.294	0.134	0.768	2	4
白玉	0.613	0.582	0.548	0.723	0	0	0.001	0.537	4	3
平丹1号	0.002	1	0	0.592	1	0.775	0.680	0.458	6	5
水晶	0.136	0.867	0.081	0.792	0.410	0.516	0.392	0.448	7	6
灵山4号	0.146	0.924	0.330	0.608	0.615	0.548	0.575	0.511	5	7
直生苗	0	0	0.034	0	0.284	1	1	0.073	8	8

3 结论

本研究测定了8个油柑品种的理化指标、抗氧化能力、挥发性香气成分以及感官评价。‘直生苗’油柑汁总酚的含量最高,‘平丹1号’油柑汁总黄酮和抗坏血酸的含量及出汁率均最高,‘丙甜’油柑汁的褐变度最低,‘丙甜’和‘赤皮’油柑汁的糖酸比显著高于其

他品种($P<0.05$),‘玻璃’油柑汁对DPPH自由基的清除能力最强,‘直生苗’油柑汁对ABTS⁺自由基的清除能力最强,显著高于其他品种($P<0.05$)。8种油柑汁中共检测出68种挥发性香气成分,反式-2-癸烯醛、正辛醛和壬醛对油柑汁的香气成分贡献最大,油柑汁呈现出柑橘香、玫瑰香、水果味等香气,不同品种油

柑汁香气成分存在一定的相似性和差异性,造成它们风味的普遍性与独特性。通过聚类分析将 32 项指标聚为 4 大类,最终确定糖酸比、出汁率、总糖、褐变度、没食子酸、苹果酸、乳酸为制汁适宜性的核心指标,并对每个指标赋予权重,运用“合理-满意度”模型对不同品种油柑进行综合评价。结果表明,‘丙甜’油柑的综合得分最高,并且综合得分排名与感官评价排名呈高度正相关,本研究可为油柑汁加工企业选择适宜的原料提供理论依据。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 杨婉媛,陈晓维,刘杜娟,等. 余甘子的生物活性及加工研究进展[J]. 广东农业科学, 2022, 49(7): 120-130. [YANG W Y, CHEN X W, LIU D J, et al. Research progress on bioactivity and processing of *Radix angustifolia*[J]. Journal of Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(7): 120-130.]
- [2] 宋贺,何维,刘祚祚,等. 基于主成分分析综合评价‘热农 1 号’余甘子果实品质[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 318-325. [SONG H, HE W, LIU Z Z, et al. Comprehensive evaluation of fruit quality of ‘Renong No. 1’ Lingang fruit based on principal component analysis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 318-325.]
- [3] ANURADHA M, SINGH M D. *Phyllanthus emblica*: A herbal remedy for healthy life[J]. Electrochemical Society Transactions, 2022, 107(1): 3199.
- [4] 杨冰鑫,刘晓丽. 余甘子总多酚的提取及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 151-155,162. [YANG B X, LIU X L. Extraction and antioxidant activity of total polyphenols from *Phyllandia mollycooides*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 151-155,162.]
- [5] MARYAM G, LIU Z W, IAHTISHAM U, et al. Functional and nutraceutical significance of amla (*Phyllanthus emblica* L.): A review[J]. *Antioxidants*, 2022, 11(5): 816.
- [6] 王建超,何银莺,刘鑫铭,等. 我国 16 份余甘子种质资源果实的综合品质评价[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(3): 125-135. [WANG J C, HE Y Y, LIU X M, et al. Comprehensive quality evaluation of 16 fruits from germplasm resources in China[J]. Journal of Northwest A& F University (Natural Science Edition), 2022, 50(3): 125-135.]
- [7] ZOU B, DONG X Q, GE Z Z, et al. Development of suitable standards for quantitative determination of persimmon phenol contents in Folin-Ciocalteu and vanillin assays[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 239(3): 385-391.
- [8] 文培华,颜怡冰,王文君,等. 虎耳草总黄酮含量测定及其抗氧化性[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 315-319. [WEN P H, YAN Y B, WANG W J, et al. Determination of total flavonoid content and antioxidant activity of *P. saxifolium*[J]. Food Industry, 2022, 43(2): 315-319.]
- [9] 任晓晨. 蘑菇中总糖含量的测定[J]. 现代食品, 2020(10): 180-181,186. [REN X C. Determination of total sugar content in mushroom[J]. Modern Food, 2020(10): 180-181,186.]
- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB 12456-2021 食品安全国家标准食品总酸的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2021. [General Administration of Quality Supervision and Inspection of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 12456-2021 National food safety standard determination of total food acid[S]. Beijing: China Standards Press, 2021.]
- [11] 苏艳丽,高晓铭,杨健,等. 梨果实发育过程中褐变度、酚类物质及相关酶的变化研究[J]. 园艺学报, 2022, 49(11): 2304-2312. [SU Y L, GAO X M, YANG J, et al. Changes of browning degree, phenols and related enzymes in pear fruit during development[J]. Horticultural Plant Journal, 2022, 49(11): 2304-2312.]
- [12] 林美,李博哲,徐玉娟,等. 二甲基二碳酸盐对百香果汁的杀菌效果及品质影响[J]. 保鲜与加工, 2022, 22(9): 38-44. [LIN X, LI B Z, XU Y J, et al. Effect of dimethyl dicarbonate on bactericidal effect and quality of passion fruit juice[J]. *Preservation and Processing*, 2022, 22(9): 38-44.]
- [13] YU Y S, XIAO G S, XU Y J, et al. Effects of dimethyl dicarbonate (DMDC) on the fermentation of litchi juice by *Lactobacillus casei* as an alternative of heat treatment[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(5): M947-M954.
- [14] SOKOL-LETOWSKA A, KUCHARSKA A Z, WINSKA K, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs[J]. *Food Chemistry*, 2014, 157: 533-539.
- [15] RE R, PELLEGRINI N, PROTEGGENTE A, et al. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1999, 26(9): 1231-1237.
- [16] 刘吴澄,安可婧,傅曼琴,等. 三种方法制备的柚皮精油的分子蒸馏及 GC-MS 挥发性成分测定[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 217-223. [LIU H C, AN K J, FU M Q, et al. Molecular distillation of pomelo peel essential oil prepared by three methods and determination of volatile components by GC-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(8): 217-223.]
- [17] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 金华火腿主体风味成分及其确定方法[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(2): 173-176. [LIU D Y, ZHOU G H, XU X L. Main flavor components of Jinhua ham and their determination methods[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2009, 32(2): 173-176.]
- [18] 高甜甜,史婷,李高阳,等. 湖南主栽柑橘类品种制汁适宜性评价[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(20): 112-121. [GAO T T, SHI T, LI G Y, et al. Evaluation of suitability for juice production of main citrus varieties in Hunan[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(20): 112-121.]
- [19] VILAR M G, BAU C C B, LUISA F A D, et al. Influence of high isostatic pressure and thermal pasteurization on chemical composition, color, antioxidant properties and sensory evaluation of Jaboticaba juice[J]. *LWT*, 2021, 139: 110548.
- [20] 郑楚瑶,张司南,吴元斌,等. 不同非热加工技术对百香果果浆杀菌效果及品质变化的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 205-212. [ZHENG C Y, ZHANG S N, WU Y B, et al. Comparison of germicidal effect and quality change of passionfruit pulp by different non-thermal processing techniques[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 205-212.]
- [21] 郭志英,黄玉香,王国权. 余甘子治疗糖尿病及其并发症的研究进展[J]. 海峡药学, 2014, 26(12): 1-4. [GUO Z Y, HUANG

- Y X, WANG G Q. Research progress of Tanganzi in the treatment of diabetes mellitus and its complications[J]. *Journal of Chinese Medicine*, 2014, 26(12): 1-4.]
- [22] KAUR M, SHARMA A, BHARDWAJ P, et al. Evaluation of physicochemical properties, nutraceuticals composition, antioxidant, antibacterial and antifungal potential of waste amla seed coat (*Phyllanthus emblica*, variety Neelam) [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2020, 15(2): 1201-1212.
- [23] ROSE K, WAN C, THOMAS A, et al. Phenolic compounds isolated and identified from amla (*Phyllanthus emblica*) juice powder and their antioxidant and neuroprotective activities[J]. *Natural Product Communications*, 2018, 13(10): 1309-1311.
- [24] RAGHU V, PLATEL K, SRINIVASAN K. Comparison of ascorbic acid content of *Emblca officinalis* fruits determined by different analytical methods[J]. *Journal of Food Composition and Analysis*, 2007, 20(6): 529-533.
- [25] 陈贻钢, 韦盈, 黄圣南, 等. 海南省人心果营养价值综合评价[J]. *食品安全导刊*, 2023(22): 107-111. [CHEN Y G, WEI Y, HUANG S N, et al. Comprehensive evaluation on the nutritional value of Xinxin fruit in Hainan Province[J]. *Food Safety Guide*, 2023(22): 107-111.]
- [26] 张英春, 董爱军, 杨鑫, 等. 高效液相色谱法测定蓝莓果浆中糖的组成和含量[J]. *食品科学*, 2009, 30(6): 229-231. [ZHANG Y C, DONG A J, YANG X, et al. Determination of sugar in blueberry pulp by high performance liquid chromatography[J]. *Food Science*, 2009, 30(6): 229-231.]
- [27] LIU X, ZHAO M, WU K, et al. Immunomodulatory and anti-cancer activities of phenolics from emblica fruit (*Phyllanthus emblica* L.) [J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(2): 685-690.
- [28] 吴娜, 朱亭琛, 章旭, 等. 体外模拟消化过程中余甘子果实及醇提物的活性成分和抗氧化能力的变化[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(24): 349-358. [WU N, ZHU B C, ZHANG X, et al. Changes of the active components and antioxidant capacity of the fruit and its alcoholic extracts during simulated digestion *in vitro* [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(24): 349-358.]
- [29] 邓健康, 刘璇, 吴昕焯, 等. 基于层次分析和灰色关联度法的苹果(等外果)汁品质评价[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(4): 197-208. [DENG J K, LIU X, WU X Y, et al. Evaluation of apple juice quality based on hierarchical analysis and grey relational degree method[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2017, 17(4): 197-208.]
- [30] 袁桥娜, 涂梦婕, 董志文, 等. 不同制备工艺菜籽油的风味成分比较研究[J]. *中国油脂*, 2020, 45(8): 32-38. [YUAN Q N, TU M J, DONG Z W, et al. Comparative study on flavor components of rapeseed oil prepared by different techniques[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 45(8): 32-38.]
- [31] 范源, 徐志平, 张建博, 等. 不同防腐方法对民族药余甘子汁褐变的影响及分析[J]. *现代中药研究与实践*, 2015, 29(2): 1-4,7. [FAN Y, XU Z P, ZHANG J B, et al. Effect and analysis of different preservative methods on the browning of the juice of Yuan-yuan[J]. *Modern Chinese Medicine Research and Practice*, 2015, 29(2): 1-4,7.]
- [32] 孟晓, 文静, 金刘翠, 等. 响应面法优化复合酶解余甘子汁的工艺[J]. *食品研究与开发*, 2022, 43(19): 174-181. [MENG X, WEN J, JIN L C, et al. Optimization of complex enzyme hydrolysis process of sweet seed juice by response surface method[J]. *Food Research and Development*, 2022, 43(19): 174-181.]