钟思彦, 邹波, 林锦波, 等. 不同品种黄皮果实营养成分及加工特性评价 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 253−263. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080284

ZHONG Siyan, ZOU Bo, LIN Jinbo, et al. Evaluation of Nutrient Composition and Processing Characteristics of Different Varieties of Wampee[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 253−263. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080284

· 分析检测 ·

不同品种黄皮果实营养成分及加工特性评价

钟思彦[1,2,3], 邹　波[2,3], 林锦波[4], 傅曼琴[3], 吴继军[3], 余元善[2,3], 陈晓维[2,3], 徐玉娟[2,3,*]

（1.广东海洋大学食品科技学院, 广东湛江 524000;
2.岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心, 广东河源 517000;
3.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;
4.郁南县富赢田田圈生态农业有限公司, 广东云浮 527199）

摘　要: 为研究不同品种黄皮果实综合品质的差异及加工特性，以七种黄皮为研究对象，分析了果实的物理性状、化学组成和抗氧化能力，并采用主成分分析法和聚类分析法对七种黄皮（‘冰糖黄皮’‘鸡心黄皮’‘金黄皮’‘贵妃 3 号’‘白蜜黄皮’‘华南 1 号’‘无核黄皮’）进行加工特性评价和归类。结果表明：七种黄皮的出浆率、可溶性糖和有机酸含量分别介于 50.51%~60.71%、18.93~48.91 mg/g 和 8.13~14.00 mg/g，其中，‘冰糖黄皮’出浆率最高，‘白蜜黄皮’可溶性糖含量最高，‘鸡心黄皮’有机酸含量最高；果皮总酚、果肉总酚、果皮总黄酮和果肉总黄酮含量分别介于 2446.4~4045.5 mg/kg DW、763.7~118.2 mg/kg、234.1~678.7 mg/kg DW 和 96.8~143.4 mg/kg，其中‘贵妃 3 号’果皮果肉的总酚和总黄酮含量最高，抗氧化能力最强（铁离子还原能力（Ferric ion reducing antioxidant power, FRAP）、DPPH 自由基清除能力）。采用超高效液相色谱-串联质谱仪鉴定出黄皮中 9 种酚类化合物，其中芦丁含量最高。将黄皮营养及加工特性的 25 个指标进行主成分分析，结果表明，黄皮的品质可以用 4 个主成分表达（累计贡献率达到 87.51%），其中‘贵妃 3 号’综合评价得分最高，‘冰糖黄皮’得分最低。聚类分析结果与主成分分析结果基本一致。整体而言，‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’的总酚、总黄酮含量最高，抗氧化能力最强，但是可溶性糖含量比较少，适合功能成分提取；‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’可溶性糖含量高，有机酸含量少，口味酸甜适中，适合鲜食；‘金黄皮’‘华南 1 号’和‘鸡心黄皮’有机酸含量高，更适合加工成食品配料。

关键词: 黄皮, 果实品质, 抗氧化, 主成分分析（PCA）, 聚类分析

中图分类号: TS255.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2024)14−0253−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080284　　本文网刊:

Evaluation of Nutrient Composition and Processing Characteristics of Different Varieties of Wampee

ZHONG Siyan[1,2,3], ZOU Bo[2,3], LIN Jinbo[4], FU Manqin[3], WU Jijun[3], YU Yuanshan[2,3], CHEN Xiaowei[2,3], XU Yujuan[2,3,*]

（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524000, China;
2.Heyuan Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Heyuan 517000, China;
3.Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China;

收稿日期: 2023−08−29

基金项目: 岭南现代农业科学与技术广东省实验室河源分中心自主科研项目（DT20220004）; “十四五”广东省农业科技创新十大主攻方向“揭榜挂帅”项目（2023SDZG04）; 广东省现代农业产业技术体系优稀水果创新团队项目（2023KJ116）; 云浮市科技计划项目（S2021020104）; 广东省农业科学院学科团队建设项目（202109TD）; 广东省农业科学院人才培养项目（R2022PY-QY009, R2022PY-QF004）; 云浮市郁南县无核黄皮产业园加工科技支撑项目。

作者简介: 钟思彦（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1079429186@qq.com。

*** 通信作者:** 徐玉娟（1974−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品深加工, E-mail: guoshuxuyujuan@163.com。

4.Yu Nan County Fu Ying Tian Tian Quan Ecological Agriculture Co., Ltd., Yunfu 527199, China）

Abstract: In order to study the differences in the comprehensive quality and processing characteristics of different varieties of wampee (*Clausena lansium* (Lour.) Skeels), seven kinds of wampee ('Bingtanghuangpi' 'Jixinhuangpi' 'Jinhuangpi' 'Guifeisanhao' 'Baimihuangpi' 'Huananyihao' 'Wuhehuangpi') were taken as the research objects, the physical property, chemical composition and antioxidant capacity of the fruits were analyzed, and the processing characteristics of the seven kinds of wampee were evaluated and categorized using principal component analysis and cluster analysis. The results showed that the pulping rate, soluble sugar and organic acid content of seven kinds of wampee ranged from 50.51% to 60.71%, 18.93 to 48.91 mg/g and 8.13 to 14.00 mg/g. Respectively, the 'Bingtanghuangpi' had the highest pulping rate, the 'Baimihuangpi' had the highest soluble sugar content, the 'Jixinhuangpi' had the highest organic acid content. The total phenol content of pericarp, total phenol content of fruit pulp, total flavonoid content of pericarp and total flavonoid content of fruit pulp ranged from 2446.4 to 4045.5 mg/kg DW, 763.7 to 118.2 mg/kg, 234.1 to 678.7 mg/kg DW, and 96.8 to 143.4 mg/kg. Respectively, the 'Guifeisanhao' had the highest total phenolic and total flavonoid content, and the strongest antioxidant capacity (ferric reducing antioxidant power (FRAP), DPPH radical scavenging capacity). Nine phenolic compounds in wampee were identified by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (UPLC-MS/MS), and rutin was the main phenolic compound. The results of principal component analysis showed that 25 indicators reflecting the quality of different varieties of wampee, that can be expressed by four principal components (the cumulative contribution rate reached 87.51%), of which 'Guifeisanhao' scored the highest in the comprehensive evaluation of principal component analysis, and 'Bingtanghuangpi' scored the lowest. The results of cluster analysis were basically consistent with the results of principal component analysis. Overall, 'Guifeisanhao' and 'Wuhehuangpi' had the highest content of total phenolics, total flavonoids and the strongest antioxidant ability, but the soluble sugar content was relatively low, which was more suitable for the extraction of active substances. 'Bingtanghuangpi' and 'Baimihuangpi' had high soluble sugar content and low organic acid content, with moderate sweet and sour taste, which was suitable for fresh food, and the high organic acid content of 'Jinhuangpi' 'Huananyihao' and 'Jixinhuangpi' was more suitable for processing into food ingredient.

Key words: wampee; fruit quality; antioxidant; principal component analysis (PCA); cluster analysis

黄皮（*Clausena lansium*（Lour.）Skeels）是芸香科黄皮属植物[1]，主要分布在亚洲、非洲和大洋洲，目前仅在中国有商业化栽种，以广东、广西和海南等地为主[2−3]。黄皮果实香气独特，滋味甜中带酸，营养丰富，富含多酚、有机酸和维生素等营养物质，具有抗氧化，降糖降脂，抗肿瘤的作用[4−5]，深受消费者喜爱。黄皮成熟于高温高湿季节，采后极易腐烂变质，严重限制了黄皮产业的发展，目前黄皮以鲜食为主，加工制品主要是果脯蜜饯，产品附加值低。近年来新茶饮行业崛起，黄皮因其营养丰富、口味独特受到消费者青睐，市场需求逐渐增加。因此，加工不仅能延长黄皮产业链，还具有巨大的市场潜力。

目前，关于黄皮采后保鲜[6]、培育优良品种[7]的研究比较广泛，对黄皮加工特性的评价较少。彭程等[8]对 20 个不同品种黄皮果汁进行分析，发现果汁的基础品质以及抗氧化活性存在明显的差异，黄皮果汁抗氧化作用与其所含的抗坏血酸、总黄酮和总酚含量关系密切，但多数品种黄皮富含多糖，不易水解，导致制汁过程中样品粘度高，出汁率低，可见不是所有品种都适合加工果汁，此外，黄皮的多酚，黄酮等活性成分主要存在于果皮果肉中，清汁含量较低；Chang 等[9]对五个品种黄皮总酚、总黄酮和抗氧化活性进行研究，发现甜黄皮总酚和总黄酮含量低于甜酸黄皮，抗氧化活性亦低于甜酸黄皮，认为总酚、总黄酮与抗氧化活性存在相关性，但是单体酚种类和含量才是决定黄皮抗氧化能力的主要因素。此外，黄皮的加工主要集中于果干蜜饯加工和黄皮复合饮料[4]工艺优化，加工专用品种尚不明确，造成黄皮资源无法合理利用，系统研究不同品种黄皮的营养成分与加工特性的关联性尚未见报道，本文拟研究不同品种黄皮营养品质和加工特性的差异，以期对黄皮加工专用品种筛选及新产品开发利用提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黄皮样品　信息如表 1。样品均为 8~9 成熟，颜色均匀的果实；甲醇、乙腈　色谱纯，天津大茂化学试剂公司；氢氧化钠、无水碳酸钠、亚硝酸钠、硝酸铝　分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；果糖、葡萄糖、蔗糖、抗坏血酸、柠檬酸、苹果酸、草酸、酒石酸　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；没食子酸、芦丁、1,1-二苯基苦基苯肼（DPPH）、维生

表 1　黄皮样品信息

Table 1　Sample information of wampee

品种	产地	采收时间
冰糖黄皮	广东云浮	2022.07
鸡心黄皮	广东云浮	2022.07
金黄皮	广东湛江	2022.07
贵妃3号	广东湛江	2022.07
白蜜黄皮	广东湛江	2022.07
华南1号	广东湛江	2022.07
无核黄皮	广东云浮	2022.07

素 E 衍生物（Trolox）、福林酚（Folin-Ciocalteu）　分析纯，天津市科密欧化试剂有限公司。

FSJ-A03E1 粉碎机　小熊电器股份有限公司；RFM3400 阿贝折光仪　英国 Stanley 公司；JW-1042 离心机　安徽嘉文仪器装备有限公司；DL-800B 智能超声波清洗器　上海之信仪器有限公司；LC-20AT 高效液相色谱仪、UV1800 紫外可见分光光度计　岛津仪器（苏州）有限公司；UPLC-QTOF-MG6540A 超高效液相色谱-四极杆-飞行时间高分辨质谱仪　美国 Agilent 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　黄皮果肉、果皮前处理　选取新鲜无腐烂的黄皮，清洗、晾干、手动去皮去核，果肉打浆后分装，储存在−20 ℃ 备用；果皮含水量低且具有韧性，制浆困难，参考 Peng 等[10] 的研究，置于 60 ℃ 热泵干燥至水分含量低于 5%，粉碎后过 40 目筛，4 ℃ 贮藏备用（果肉 mg/kg FW，果皮 mg/kg DW）。

1.2.2　黄皮理化指标测定　每个品种黄皮随机选取 15 个成熟度相似且无表面损伤的果实，单果重采用电子天平测定；横纵径采用 0~150 mm 电子数显游标卡尺测定，通过纵径和横径的比值得出果形指数；采用称重法测定果实皮重率、籽重率和出浆率，用皮重与单果重的比值表示皮重率，籽重与单果重的比值表示籽重率，果肉打浆后的重量与单果重的比值表示出浆率。

pH 采用 pH 计直接测定，总酸采用 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》的方法测定，可溶性固形物（TSS）采用数字阿贝折射仪直接测定，具体操作为：用胶头滴管滴 2~3 滴果汁于仪器载物面上，合上盖板，显示面板读数即为待测果汁的可溶性固形物含量。

1.2.3　黄皮果浆糖组分含量测定　采用 HPLC 法[11] 测定果汁果糖、葡萄糖、蔗糖，用超纯水将黄皮果汁稀释 5 倍，稀释液通过 0.22 μm 的水相滤膜过滤进液相瓶待用。色谱条件为：Shodex Asahipak NH2P-50 4E（4.6 mm×250 mm）色谱柱，柱温 40 ℃，检测器为蒸发光（ELSD）检测器，漂移管温度为 50 ℃，使用 70% 乙腈为流动相，流速为 1 mL/min，进样量为 10 μL。

1.2.4　黄皮果浆有机酸、抗坏血酸含量测定　有机酸参照国标 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。

抗坏血酸参考朱敏等[12] 的方法，稍作调整：采用 HPLC 分析法测定。将样品与等体积的 0.3% 偏磷酸混合，超声提取 30 min，离心后取上清液，过 0.22 μm 滤膜。色谱柱为 Agilent ZORBAX SB-C_{18}（4.6×250 mm）色谱柱；柱温为 30 ℃；检测器为二极管阵列检测器；流动相：0.1 mol/L $(NH_4)_2HPO_4$（磷酸调节 pH=2.70）；流速为 1.0 mL/min；检测波长为 254 nm；进样量为 10 μL。

1.2.5　黄皮总黄酮含量测定　黄皮黄酮的提取参考标准 NT/T 2010-2011《柑桔类水果及制品中总黄酮含量的测定》稍作改变，取果浆 5 g（黄皮果粉 1 g 加 4 g 超纯水），加入 10 mL 浓度为 4.0 g/L 的氢氧化钠溶液，用 160 g/L 的氢氧化钠溶液调节悬浮液 pH 至 13.0，混匀后 50℃ 超声处理 30 min，再用 200 g/L 的柠檬酸溶液调节悬浮液的 pH 至 3.0，混合均匀后离心取上清液，用超纯水定容至 25 mL 备用。

参照 Fu 等[13] 的方法，采用分光光度计法测总黄酮含量，并略作修改。取甲醇适当稀释的提取液 6 mL，加 5% $NaNO_2$ 溶液 1 mL，振荡摇匀，常温放置 5 min 后加 10% $Al(NO_3)_3$ 溶液 1 mL 振荡摇匀，常温放置 6 min 后加入 1 mol/L 的 NaOH 溶液 4 mL，振荡摇匀，置于 45 ℃ 水浴 10 min 取出冷却至常温，1000 r/min 离心 5 min，取上清液测定 510 nm 处的吸光值，以芦丁为标准品绘制标准曲线（y=5.8376 x +0.0186，R^2=0.9988），总黄酮含量以芦丁的当量表示（mg Rutin/kg）。

1.2.6　黄皮总酚含量测定　参照 Yang 等[14] 的方法，采用 Folin-Ciocalteu 法测定总酚含量，并略作修改。取 1.2.5 制备的提取液，用甲醇稀释，取稀释后的样品 1 mL，加入 2 mL Folin-Ciocalteu 试剂，振荡混合，再加入 2 mL 10% 碳酸钠溶液，避光放置 1 h，测定 760 nm 处的吸光值，以没食子酸为标准品绘制标准曲线（y=0.0815 x +0.0634，R^2 =0.9982），总酚含量以没食子酸当量表示（mg GAE/kg）。

1.2.7　黄皮抗氧化能力的测定　FRAP 法：参照 Hamrouni-Sellami 等[15] 的方法，稍加改动。将提取液（上述 1.2.5 制备的提取液）稀释后，取 1 mL 加入 0.2 mL0.2 mol/L PBS（pH6.6）和 1.5 mL 0.3% 铁氰化钾，混匀后在 50 ℃ 孵化 20 min，反应结束后取出液体迅速冷却并加入 10% 三氯乙酸，混匀后 3000 r/min 离心 10min，取上清液 2 mL 加入 0.5 mL 0.3% 三氯化铁溶液混匀，再加 3 mL 纯水，摇匀后测定波长 700 nm 处吸光度。以 Trolox 为标准品，测定不同浓度的 Trolox 对铁离子的还原能力，绘制标准曲线（y=0.0113x+0.0532，R^2=0.9983，其中 y 是吸光度值，x 为 Trolox 浓度）。结果以 Trolox 当量表示（mg TE/kg）；

DPPH 法：参照 Barreca 等[16] 的方法，以 Trolox 为标准品，测定不同质量浓度的 Trolox 对 DPPH 自由基的清除能力，绘制标准曲线（y=−0.0375x+1.1637，R^2=0.9984，其中 y 是吸光度值，x 为 Trolox 浓度），结果以 Trolox 当量表示（mg TE/kg）。

1.2.8　黄皮单体酚结构鉴定　取提取液（上述 1.2.5 制备的提取液）过 C_{18} 固层析小柱子，收集的滤液在 40 ℃ 旋转蒸发浓缩，蒸干后用甲醇溶解，5000 r/min 离心 10 min，取上清液，经 0.22 μm 有机相滤膜过滤后待测，每个样品重复 3 次。单体酚的结构采

用高效液相色谱四级杆飞行时间质谱联用仪进行鉴定[17]。色谱条件：色谱柱为 BEH C_{18} 柱（100×2.1 mm, 1.7 μm）；流动相 A 为 0.1% 甲酸溶液，流动相 B 为色谱级乙腈。洗脱程序为：0~3 min, 5% B；3~25 min, 5%~50% B；25~30 min, 50%~70% B；30~37 min, 70%~95% B, 37~40 min, 95%~5% B。进样量为 10 μL，流速为 1 mL/min，检测器为二极管阵列检测器，柱温为 35 ℃。质谱条件：电喷雾电离离子源（ESI），正离子扫描模式，扫描范围 100~1000 u，毛细管电压 4.0 kV，雾化器压力 1.5 bar，毛细管温度 300 ℃，干燥气体流速 10.0 L/min。

1.2.9 黄皮单体酚含量测定 单体酚含量采用 HPLC法[18]测量，色谱条件：Waters C_{18} 色谱柱（4.6 mm×250 mm, 5 μm）；流动相 A 为 0.4% 乙酸溶液，流动相 B 为色谱级乙腈；柱温 30 ℃；流速 0.8 mL/min；进样量 10 μL；检测波长：表没食子儿茶素、儿茶素、二氢槲皮素、橙皮素 280 nm，龙胆酸、咖啡酸、邻香豆酸、川陈皮素 320 nm，芦丁 360 nm；梯度洗脱程序：0~40 min, 5%~25% B, 40~45 min, 25%~35% B, 45~50 min, 35%~50% B。以标准品的峰面积和浓度绘制标准曲线，黄皮中单体酚的含量根据标准曲线进行计算。

1.3 数据处理

每个试验进行 3 次测定，结果以平均值±标准差表示。采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行显著性分析，样品间的显著性差异检验用 Waller-Duncan 法。使用 Microsoft office Excel 2021 和 Origin 2022 进行数据统计分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 黄皮果实一般性状

如图 1 所示，分别是七种黄皮的外观形态，黄皮果实形状各异，主要呈现：长心形、椭圆形、圆形和卵形，果皮的色泽主要呈现：黄色、橙黄色、黄褐色和古铜色。由表 2 可知，不同品种黄皮果实理化性质存在差异，平均单果质量在 6.93~11.25 g 之间，单果质量最重的品种是‘贵妃 3 号’，较轻的品种是‘金黄皮’和‘华南 1 号’，变异系数为 18.07%，离散程度较小，说明不同黄皮的单果重差异较小；果形指数在 1.08~1.42 之间，其中‘鸡心黄皮’果形指数最大，形状呈现椭圆形，‘白蜜黄皮’果形指数最小，形状近似圆形；平均皮重率在 12.87%~27.08% 之间，‘华南 1 号’果皮占比最小，‘无核黄皮’果皮占比最大；除无核黄皮外，平均籽重率在 7.40%~23.43% 之间，‘冰糖黄皮’籽重率最低为 7.40%，‘贵妃 3 号’籽重率最高为 23.43%；出浆率测定范围在 50.51%~67.09%，其中‘贵妃 3 号’出浆率最低，‘无核黄皮’出浆率最高。

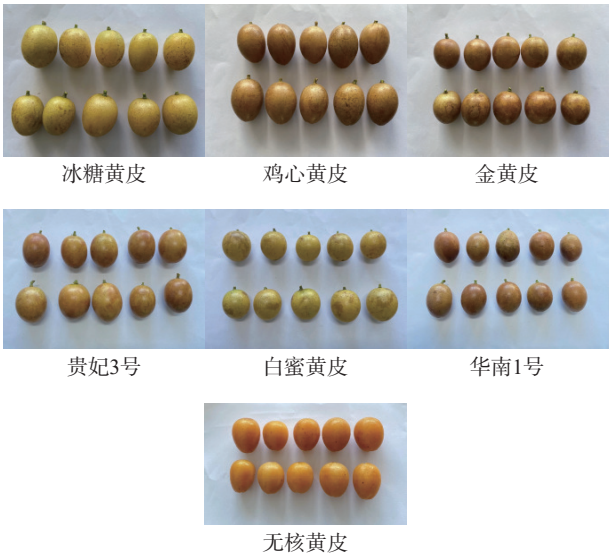

图 1 不同品种黄皮

Fig.1 Different varieties of wampee

2.2 黄皮果实 pH、可溶性固形物（TSS）和总酸（TA）含量

pH、可溶性固形物（TSS）和总酸（TA）的含量是评价水果的综合性指标[19]，会直接影响消费者的感官体验。如图 2 所示，黄皮果浆 pH 范围在 3.34~4.90 之间，其中‘鸡心黄皮’和‘无核黄皮’的 pH 较小，‘白蜜黄皮’的 pH 最大，变异系数为 14.10%；TSS 的范围在 11.57~15.20 之间，‘冰糖黄皮’的 TSS 最小，‘贵妃 3 号’的 TSS 最大，变异系数为 9.47%；TA 的范围在 1.73~2.15 之间，‘金黄皮’‘白蜜黄皮’‘无核黄皮’三个品种的 TA 较小，‘鸡心黄皮’的 TA 最大，变异系数为 8.86%。不同品种黄皮的三个指标变异系数较小，可能与产地相近，果实成熟度相似有关。固酸比是 TSS 和 TA 的比值，在一定程度上决定了黄皮风味的差异，固酸比越高，果实的滋味越甜，反之滋

表 2 不同品种黄皮理化性状

Table 2 Physicochemical characteristics of different wampee species

品种	m（单果, g）	果形指数	w（皮重, %）	w（籽重, %）	w（出浆率, %）
冰糖黄皮	9.99 ± 1.67^{ab}	1.26 ± 0.05^{bc}	17.37 ± 0.37^{c}	7.40 ± 0.20^{e}	60.71 ± 0.45^{b}
鸡心黄皮	10.50 ± 1.10^{ab}	1.41 ± 0.05^{a}	19.07 ± 0.14^{b}	13.32 ± 0.46^{d}	53.53 ± 1.22^{d}
金黄皮	7.34 ± 0.66^{c}	1.15 ± 0.02^{d}	13.75 ± 0.25^{f}	22.23 ± 0.55^{b}	55.84 ± 0.64^{c}
贵妃3号	11.25 ± 1.49^{a}	1.22 ± 0.04^{c}	16.13 ± 0.21^{d}	23.43 ± 0.29^{a}	50.51 ± 0.52^{e}
白蜜黄皮	9.72 ± 1.53^{b}	1.08 ± 0.02^{e}	15.30 ± 0.25^{e}	21.61 ± 0.33^{b}	57.03 ± 0.84^{c}
华南1号	6.93 ± 0.64^{c}	1.27 ± 0.04^{b}	12.87 ± 0.24^{g}	20.60 ± 0.46^{c}	55.83 ± 0.60^{c}
无核黄皮	10.98 ± 1.60^{ab}	1.26 ± 0.05^{bc}	27.08 ± 0.21^{a}	–	67.09 ± 0.26^{a}

注：“-”为未检测出，同一列不同字母代表显著性差异（$P<0.05$）；表3同。

味偏酸，但是固酸比不是越大越好，因为高糖低酸的果实滋味清甜单一、风味寡淡[20]，黄皮固酸比变化范围在 5.71~8.36，变异系数为 15.35%，其中‘冰糖黄皮’和‘鸡心黄皮’固酸比较小，‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’固酸比较大。

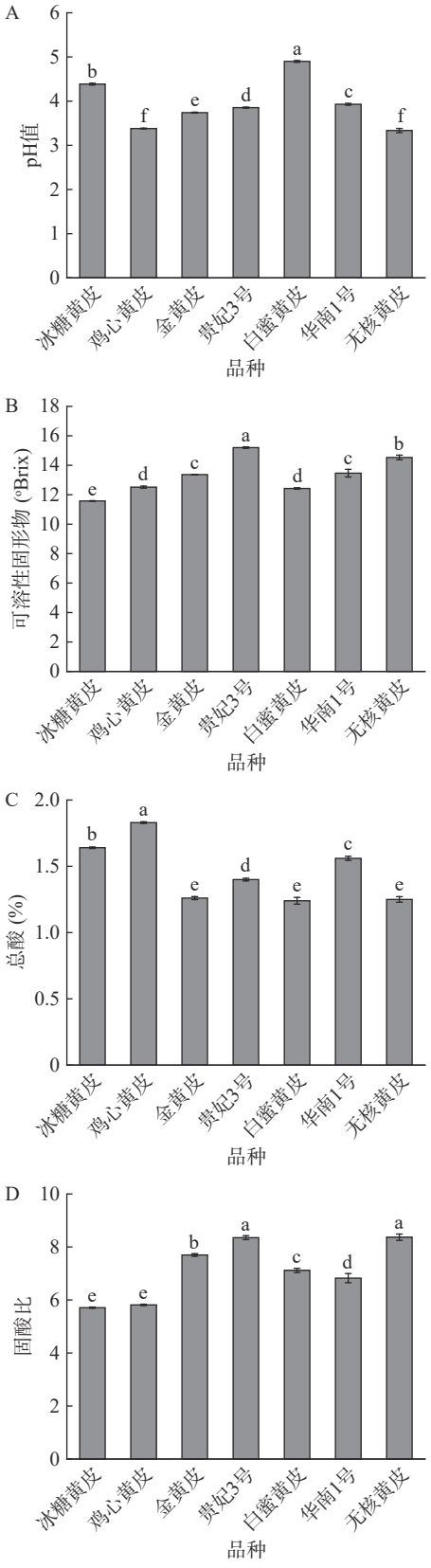

图 2　不同品种黄皮果实理化性质的比较

Fig.2　Comparison of physicochemical properties of fruits of different varieties of wampee

注：不同小写字母表示数据差异显著，$P<0.05$；图 3~图 5 同。

2.3　不同品种黄皮可溶性糖含量的比较

果实的甜度不是各种可溶性糖含量的简单叠加，为了明确黄皮中的糖组成，采用 HPLC 法测定了黄皮果浆中的可溶性糖组成及含量[5]，结果见图 3，黄皮中可溶性糖主要为果糖、葡萄糖和蔗糖，以蔗糖含量为主，蔗糖、果糖和葡萄糖三者比例接近 2∶1∶1，除无核黄皮外，其他品种可溶性糖含量均为蔗糖>果糖>葡萄糖，这个比例与柑橘中可溶性糖的比例相似，这可能与黄皮属于芸香科柑橘亚科相关[5]。黄皮中蔗糖含量变化范围为 10.76~26.74 mg/g，其中‘白蜜黄皮’的含量显著高于其他品种（$P<0.05$）；果糖含量变化范围为 3.56~11.69 mg/g，‘无核黄皮’含量最低，‘白蜜黄皮’含量最高；葡萄糖含量变化范围为 4.61~10.48 mg/g，‘无核黄皮’含量最低，‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’含量较高，这两个品种无显著性差异（$P>0.05$）。

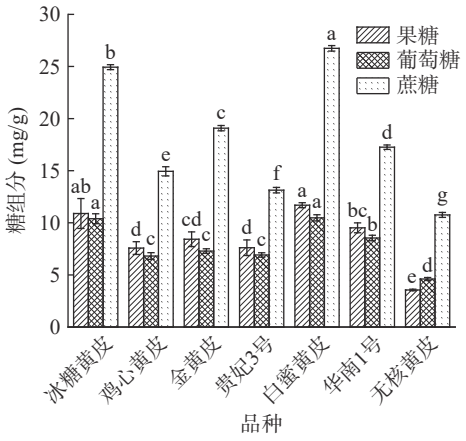

图 3　不同品种黄皮糖组分含量比较

Fig.3　Comparison of sugar content of different varieties of wampee

2.4　不同品种黄皮主要有机酸含量的比较

研究认为水果中糖的含量变化较小，酸的含量波动大[21]，因此酸成为决定水果糖酸比的关键因素。通过 HPLC 法对黄皮果浆中的有机酸进行分析，发现黄皮果浆中含有柠檬酸、草酸、苹果酸、酒石酸和抗坏血酸等有机酸，其中柠檬酸含量最高。从表 3 可知，柠檬酸含量范围在 4.71~8.19 mg/g 之间，‘冰糖黄皮’‘白蜜黄皮’和‘华南 1 号’柠檬酸含量较低，无显著性差异（$P>0.05$）；鸡心黄皮 8.19 mg/g 含量最高。草酸含量范围在 1.95~4.32 mg/g 之间，‘冰糖黄皮’含量最低；‘白蜜黄皮’和‘华南 1 号’草酸含量较高，无显著性差异（$P>0.05$）。苹果酸含量范围在 0.77~3.09 mg/g之间，‘无核黄皮’苹果酸含量为 3.09 mg/g，显著高于其他品种（$P<0.05$）。酒石酸含量在 0.26~0.53 mg/g之间，‘贵妃 3 号’含量最低；‘华南 1 号’含量最高。抗坏血酸含量范围在 11.37~18.98 mg/100 g 之间，‘金黄皮’和‘白蜜黄皮’含量较低，两者含量无显

表 3 黄皮果实抗坏血酸及有机酸含量

Table 3 Contents of ascorbic acid and organic acid in the fruits of wampee

品种	草酸(mg/g)	酒石酸(mg/g)	苹果酸(mg/g)	柠檬酸(mg/g)	抗坏血酸(mg/100 g)
冰糖黄皮	1.95±0.20^{e}	0.42±0.01^{b}	0.77±0.11^{e}	4.99±0.06^{d}	14.15±0.47^{c}
鸡心黄皮	3.06±0.12^{c}	0.35±0.03^{c}	2.40±0.35^{b}	8.19±0.10^{a}	13.16±0.25^{d}
金黄皮	3.80±0.09^{b}	0.45±0.02^{b}	1.21±0.03^{d}	5.81±0.39^{c}	11.79±0.54^{e}
贵妃3号	2.40±0.06^{d}	0.26±0.01^{e}	0.89±0.01^{e}	5.82±0.25^{c}	16.09±0.66^{b}
白蜜黄皮	4.18±0.08^{a}	0.30±0.01^{d}	2.23±0.03^{b}	4.71±0.02^{d}	11.37±0.12^{e}
华南1号	4.32±0.03^{a}	0.53±0.01^{a}	1.53±0.07^{c}	4.77±0.12^{d}	13.21±0.34^{d}
无核黄皮	2.42±0.12^{d}	0.37±0.01^{c}	3.09±0.11^{a}	7.38±0.11^{b}	18.98±1.19^{a}

著性差异(P>0.05),‘无核黄皮’含量最高。

2.5 不同品种黄皮活性物质含量比较

黄皮果皮、果肉中总酚含量结果如图 4A 所示,不同品种黄皮果皮和果肉的总酚含量存在显著性差异(P<0.05),其中贵妃 3 号果皮和果肉的总酚含量显著高于其它品种(P<0.05),分别是 4045.5±60.4 mg/kg DW 和 1118.2±1.1 mg/kg,‘冰糖黄皮’和‘金黄皮’果皮的总酚含量较低,分别为 2446.4±49.8 和 2476.1±34.3 mg/kg DW,两品种差异不显著(P>0.05),‘金黄皮’果肉总酚含量为 763.7±2.9 mg/kg,显著低于其他品种(P<0.05)。同一品种,总酚含量表现为果皮>果肉,果皮(果肉)中测得总酚的最大值是最小值的 1.65(1.46)倍。石友盛[22] 对黄皮不同部位总酚含量进行检测,发现果皮总酚含量最高,果肉次之,果籽最低;Lin 等[1] 研究发现黄皮果皮总酚含量高于果肉总酚含量,两个结果与本文研究结果一致。

黄皮果皮、果肉中总黄酮含量结果如图 4B 所示,不同品种黄皮果皮和果肉的总黄酮含量存在显著性差异(P<0.05),推测是因为黄皮基因类型差异和生长环境不同[1]。其中‘华南 1 号’果皮和果肉的总黄酮含量高于其它品种,分别是 678.7±6.1 mg/kg DW 和143.4±0.8 mg/kg,‘白蜜黄皮’果皮总黄酮含量为 234.1±3.3 mg/kg DW,显著低于其他品种(P<0.05),在果皮中测得的总黄酮最大值是最小值的 2.90 倍。‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’果肉的总黄酮含量较低,分别是 96.9±0.6 和 96.8±0.6 mg/kg,两者差异不显著(P>0.05),‘华南 1 号’果肉总黄酮含量是‘白蜜黄皮’含量的 1.48 倍。

2.6 不同品种黄皮体外抗氧化能力比较

抗氧化包括抑制过氧化物的生成,清除自由基

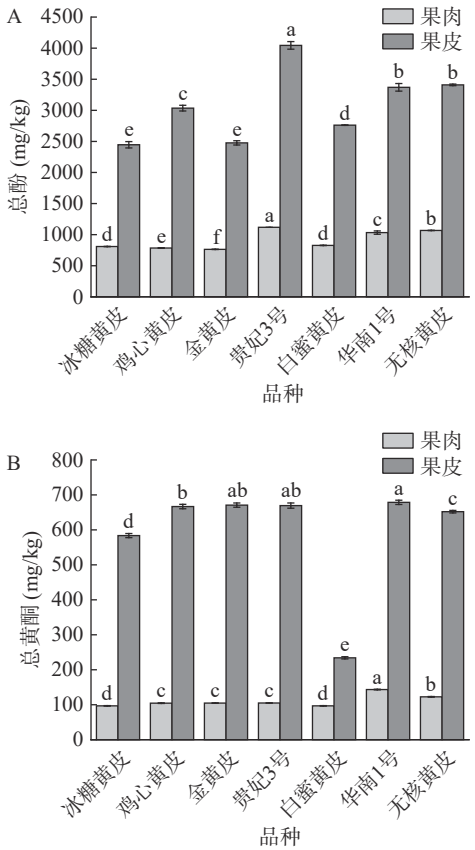

图 4 不同品种黄皮果实总酚、总黄酮含量比较

Fig.4 Comparison of total phenolics and total flavonoids in different varieties of wampee

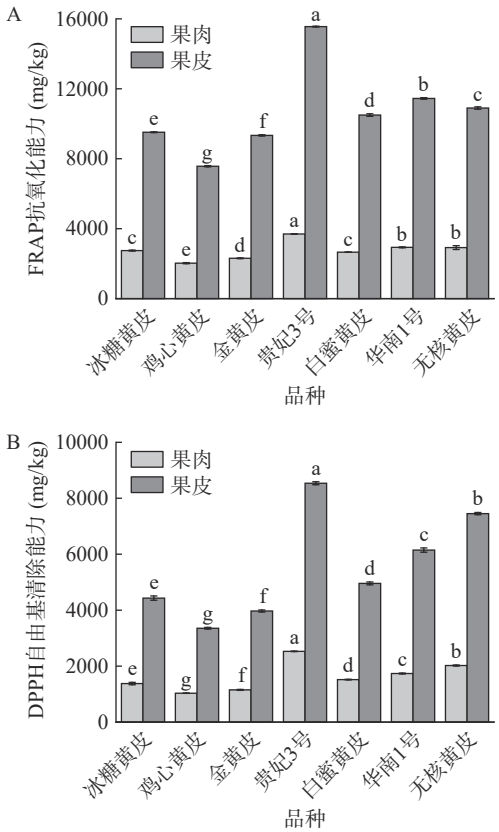

图 5 不同品种黄皮果实抗氧化能力的变化

Fig.5 Changes in antioxidant capacity of different varieties of wampee

等[23]，本研究采用 FRAP、DPPH 两种方法测定黄皮果皮、果肉的抗氧化能力，结果如图 5 所示，不同品种之间的抗氧化能力存在显著性差异（P<0.05），果皮的 FRAP 变化范围为 7568~15556 mg/kg DW，果肉的变化范围为 2056~3695 mg/kg，其中‘贵妃 3 号’果皮和果肉的铁离子还原能力显著强于其他品种（P<0.05），‘鸡心黄皮’的铁离子还原能力是七个品种中最弱的；不同品种果皮的 DPPH 自由基清除能力变化范围为 3353~8537 mg/kg DW，果肉的变化范围为 1033~2527 mg/kg，‘贵妃 3 号’DPPH 自由基清除能力最强，‘鸡心黄皮’能力最弱，实验表明同一品种的抗氧化能力表现为果皮>果肉，不同品种的 DPPH 自由基清除能力与铁离子还原能力相似。彭程等[8] 研究了 20 个黄皮品种，发现基因型是决定黄皮品质和抗氧化能力的重要因素，推测本研究不同品种抗氧化能力存在显著性差异与基因型不同有关。陆育生等[24] 测定了 120 份黄皮的抗氧化能力，发现黄皮的 DPPH 自由基清除能力和 FRAP 抗氧化能力间呈极显著的正相关，该研究结果与本研究结果一致。

2.7　不同品种黄皮抗氧化性能与活性物质相关性分析

由表 4 可知，果皮的总酚含量与果肉总酚含量、果皮（果肉）FRAP 及 DPPH 均呈极显著正相关（P<0.01）。其中果皮总酚含量与果肉总酚含量、果皮（果肉）FRAP 和 DPPH 的相关系数分别是 0.899、0.781 和 0.852（0.735 和 0.850），果肉总酚含量与果皮（果肉）FRAP 及 DPPH 也呈极显著正相关（P<0.01），相关系数分别为 0.821、0.958（0846、0.930），说明酚类物质是果实抗氧化能力的主要物质，有研究报道了抗氧化能力与总酚含量之间的相关性[25−26]，本研究结果与之一致。此外，两种体外抗氧化评价方法两两之间均呈极显著正相关（P<0.01），说明各品种黄皮果皮果肉提取物铁离子还原能力和 DPPH 自由基清除能力的效果基本一致，结果与图 5 分析一致。

2.8　不同品种黄皮单体酚种类及含量

为进一步研究黄皮果实中酚类物质组成，明确不同品种间多酚的差异，采用超高效液相色谱四极杆飞行时间高分辨质谱对黄皮多酚进行结构解析，通过质谱信息、特征吸收波长、保留时间与标准品对比、文献查阅[27] 等方法，共鉴定出 9 种酚类化合物，其中果皮 9 种，果肉 8 种。以芦丁为例，正离子模式准分子离子峰 m/z 611.2 $[M+H]^+$；m/z 465.1020（$[M-C_6H_{10}O_4+H]^+$）为该化合物分子离子脱去一分子鼠李糖得到的特征碎片；m/z 303.0517（$[M-C_{12}H_{20}O_9+H]+$）为该化合物分子离子再脱去一分子葡萄糖得到的碎片，与标准品对照确定该化合物是芦丁，其他物质的结构鉴定与之类似。结果如表 5 所示，9 种酚类物质分别是表没食子儿茶素、儿茶素、二氢槲皮素、橙皮素、龙胆酸、咖啡酸、邻香豆酸、川陈皮素和芦丁。通过高效液相色谱法对这些物质进行定量，结果如表 6 所示，黄皮果实不同部位的多酚含量有显著差异（P<0.05），果皮多酚含量普遍比果肉高，其

表 4　黄皮抗氧化特性与活性物质之间的相关性

Table 4　Correlation between antioxidant properties and active substances in wampee

相关性	果皮总酚	果肉总酚	果皮总黄酮	果肉总黄酮	果皮FRAP	果肉FRAP	果皮DPPH	果肉DPPH
果皮总酚	1							
果肉总酚	0.899**	1	.					
果皮总黄酮	0.336	0.311	1					
果肉总黄酮	0.425	0.578**	0.443*	1				
果皮FRAP	0.781**	0.821**	0.080	0.178	1			
果肉FRAP	0.735**	0.846**	0.084	0.203	0.963**	1		
果皮DPPH	0.852**	0.958**	0.178	0.369	0.905**	0.922**	1	
果肉DPPH	0.850**	0.930**	0.122	0.274	0.942**	0.955**	0.955**	1

注：**在0.01级别（双尾），相关性显著；*在0.05级别（双尾），相关性显著。

表 5　不同黄皮果实单体酚化学结构定性鉴别

Table 5　Qualitative identification of the chemical structure of monomer phenols in different wampee

序号	名称	化学式	$[M+H]^+$	正离子模式下的碎片离子	$[M-H]^-$	负离子模式下的碎片离子	部位
1	表没食子儿茶素	$C_{15}H_{14}O_7$	–	–	305.0669	305.07; 125.02; 137.02	整果
2	儿茶素	$C_{15}H_{14}O_6$	–	–	289.0721	289.07; 245.08; 205.05; 109.03	整果
3	龙胆酸	$C_7H_6O_4$	–	–	153.0185	153.02; 132.82; 125.02; 109.03; 98.33	整果
4	咖啡酸	$C_{21}H_{20}O_{11}$	–	–	179.0344	179.04; 135.05; 107.05; 89.02; 63.31	整果
5	二氢槲皮素	$C_{15}H_{12}O_7$	–	–	303.0514	303.05; 286.99; 273.04; 191.02; 85.76	整果
6	邻香豆酸	$C_9H_8O_3$	165.0549	165.06; 147.04; 119.05; 91.06; 65.04	–	–	整果
7	芦丁	$C_{27}H_{30}O_{16}$	611.1617	611.16; 465.10; 303.05; 231.08	–	–	整果
8	橙皮素	$C_{16}H_{14}O_6$	303.1050	303.10; 177.07; 153.03	–	–	整果
9	川陈皮素	$C_{21}H_{22}O_8$	403.1396	403.14; 388.12; 373.09; 355.08; 327.09	–	–	果皮

表 6 不同品种黄皮单体酚含量比较(μg/g)

Table 6 Comparison of monomer phenol content of different varieties of wampee (μg/g)

单体酚名称	部位	品种						
		冰糖黄皮	鸡心黄皮	金黄皮	贵妃3号	白蜜黄皮	华南1号	无核黄皮
表没食子儿茶素	果皮	3.86±0.12^{c}	5.65±0.05^{a}	0.80±0.03^{f}	1.24±0.02^{e}	4.10±0.01^{b}	4.13±0.08^{b}	3.59±0.05^{d}
	果肉	3.13±0.35^{a}	2.72±0.04^{b}	0.59±0.06^{f}	1.03±0.12^{e}	2.09±0.05^{c}	1.19±0.03^{e}	1.64±0.05^{d}
儿茶素	果皮	0.46±0.01^{d}	0.62±0.05^{c}	0.30±0.02^{e}	0.41±0.10^{de}	0.79±0.01^{ab}	0.65±0.01^{bc}	0.91±0.15^{a}
	果肉	0.34±0.01^{c}	0.29±0.01^{d}	0.28±0.01^{d}	0.29±0.01^{d}	0.16±0.03^{e}	0.38±0.01^{b}	0.61±0.01^{a}
二氢槲皮素	果皮	0.22±0.01^{cd}	0.27±0.01^{b}	0.19±0.01^{e}	0.27±0.01^{b}	0.25±0.01^{bc}	0.20±0.01^{de}	0.37±0.04^{a}
	果肉	0.27±0.08^{d}	0.30±0.01^{cd}	0.29±0.01^{cd}	0.34±0.01^{bc}	0.40±0.01^{ab}	0.35±0.01^{abc}	0.41±0.01^{a}
橙皮素	果皮	0.27±0.01^{ab}	0.30±0.01^{a}	0.18±0.01^{c}	0.21±0.01^{bc}	0.32±0.01^{a}	0.31±0.08^{a}	0.15±0.02^{c}
	果肉	0.07±0.01^{c}	0.12±0.01^{a}	0.04±0.01^{e}	0.06±0.01^{d}	–	0.12±0.01^{ab}	0.11±0.01^{b}
龙胆酸	果皮	0.27±0.01^{d}	0.44±0.01^{b}	0.26±0.01^{de}	0.24±0.01^{de}	0.73±0.01^{a}	0.23±0.04^{e}	0.32±0.01^{c}
	果肉	0.19±0.01^{bc}	0.09±0.01^{d}	0.10±0.01^{d}	0.05±0.01^{e}	0.16±0.01^{c}	0.27±0.01^{a}	0.19±0.01^{b}
咖啡酸	果皮	0.93±0.01^{c}	0.93±0.01^{c}	0.80±0.02^{d}	1.07±0.01^{b}	1.63±0.03^{a}	0.47±0.04^{f}	0.62±0.01^{e}
	果肉	0.46±0.08^{ab}	0.26±0.01^{d}	0.40±0.07^{bc}	0.28±0.01^{cd}	0.54±0.12^{a}	0.44±0.01^{ab}	0.47±0.03^{ab}
邻香豆酸	果皮	0.70±0.01^{b}	0.53±0.01^{e}	0.62±0.01^{d}	0.65±0.01^{c}	1.08±0.01^{a}	0.29±0.01^{f}	0.14±0.01^{g}
	果肉	0.21±0.01^{ef}	0.20±0.01^{f}	0.22±0.01^{e}	0.48±0.01^{b}	0.44±0.01^{c}	0.65±0.01^{a}	0.29±0.01^{d}
川陈皮素	果皮	0.36±0.03^{b}	0.35±0.02^{b}	0.19±0.02^{bc}	0.28±0.01^{bc}	0.25±0.01^{bc}	0.65±0.20^{a}	0.16±0.01^{c}
	果肉	–	–	–	–	–	–	–
芦丁	果皮	13.74±2.60^{bc}	23.46±2.60^{a}	10.96±0.13^{cd}	10.45±0.14^{d}	14.68±0.25^{b}	8.12±1.60^{d}	14.26±0.16^{b}
	果肉	2.03±0.04^{e}	0.45±0.02^{f}	3.82±0.15^{b}	3.63±0.02^{c}	4.16±0.07^{a}	3.02±0.02^{d}	–

注: “–”为未检测出, 同一行不同字母代表显著性差异(P<0.05)。

中芦丁是黄皮中含量最高的单体酚, 与叶宇童[28] 的研究结果一致。‘鸡心黄皮’果皮中芦丁的含量最高为 23.46 μg/g, ‘鸡心黄皮’果肉中含量最低, 为 0.45 μg/g, 两者相差 52.13 倍。黄皮中表没食子儿茶素含量仅次于芦丁, 以鸡心黄皮果皮含量最高(5.65 μg/g), 金黄皮果肉中含量最低(0.59 μg/g), 两者相差 9.58 倍; 川陈皮素仅在黄皮果皮中检出; 其余单体酚含量范围在 0.06~5.65 μg/g 之间。Lin 等[1] 在黄皮果实中检测出 10 种酚类物质, 分别是没食子酸、儿茶素、咖啡酸、白杨素、槲皮素、山奈酚、绿原酸、龙胆酸、芦丁和杨梅苷, 其中绿原酸、龙胆酸和芦丁含量丰富, 酚类物质种类不同可能与黄皮基因型有关, 酚类物质含量存在差异可能和酚类物质结合态有关。

2.9 不同品种黄皮品质的 PCA

2.9.1 主成分因子的选择 由于不同品种黄皮的品质指标之间存在差异, 为了消除各数据之间量纲和相对大小差异对结果产生的影响, 需要对各数据进行标准化处理[29], 以 7 个样品的 25 个品质指标构成 25×7 矩阵进行 PCA, 结合表 7 和图 6 可提取出 4 个 PC, 累计方差贡献率达到 87.509%, 综合了黄皮品质指标的大部分信息, 因此可以用这 4 个 PC 代替上述的 25 个品质指标对不同品种黄皮品质进行评价。

表 7 黄皮品质指标的特征值及贡献率

Table 7 Eigenvalues and contribution of quality indicators of wampee

主成分	特征值	贡献率(%)	累计贡献率(%)
1	10.018	40.072	40.072
2	5.952	23.809	63.881
3	3.374	13.497	77.378
4	2.533	10.131	87.509
5	1.958	7.832	95.341
6	1.165	4.659	100.000

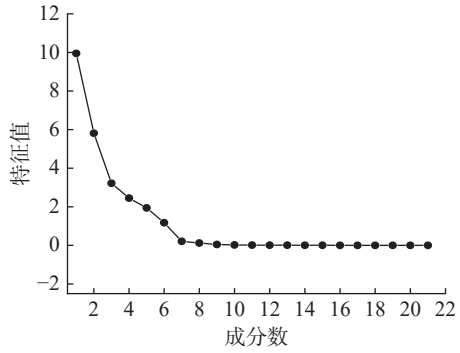

图 6 黄皮各品质性状碎石图

Fig.6 Scree plot of individual quality traits of wampee

结合表 7 和表 8, 第一主成分的方差贡献率为 40.1%, TSS、果糖、葡萄糖、蔗糖、抗坏血酸、果皮和果肉总酚含量在第一主成分上有较大的载荷; 第二主成分的方差贡献率为 23.80%, 果形指数、籽重、柠檬酸、果皮果肉 FRAP 在第二主成分上有较大的载荷; 第三主成分的方差贡献率为 13.5%, 单果重、酒石酸、果皮果肉总黄酮含量在第三主成分上有较大的载荷; 第四主成分的方差贡献率为 10.10%, 出浆率和 TA 在第四主成分上有较大的载荷。

2.9.2 不同黄皮品质性状的综合评价 利用主成分载荷矩阵(表 8)中各指标数据除以主成分相对应的特征值的算术平方根, 得到 4 个主成分中各指标所

表 8　主成分在各品质指标上的因子载荷矩阵

Table 8　Factor loading matrix of principal components on each quality indicator

品质指标	成分			
	1	2	3	4
单果重(X_1)	0.5	−0.156	−0.714	0.435
果形指数(X_2)	0.246	−0.724	0.325	0.489
皮重(X_3)	0.635	−0.563	−0.483	−0.183
籽重(X_4)	−0.345	0.684	0.407	0.153
出汁率(X_5)	0.208	−0.402	−0.411	−0.607
pH(X_6)	−0.636	0.593	−0.42	−0.033
TSS(X_7)	0.876	0.341	0.206	−0.094
TA(X_8)	−0.274	−0.512	0.282	0.659
固酸比(X_9)	0.699	0.451	−0.043	−0.412
果糖(X_{10})	−0.861	0.428	−0.053	0.195
葡萄糖(X_{11})	−0.824	0.388	−0.188	0.156
蔗糖(X_{12})	−0.882	0.268	−0.338	−0.053
草酸(X_{13})	−0.456	0.279	0.47	−0.498
酒石酸(X_{14})	−0.309	−0.202	0.674	−0.366
苹果酸(X_{15})	0.308	−0.5	−0.245	−0.502
柠檬酸(X_{16})	0.469	−0.768	−0.026	0.134
抗坏血酸(X_{17})	0.908	−0.169	−0.226	−0.004
果皮总酚(X_{18})	0.824	0.329	0.189	0.258
果肉总酚(X_{19})	0.844	0.398	0.144	−0.001
果皮总黄酮(X_{20})	0.489	−0.352	0.634	0.254
果肉总黄酮(X_{21})	0.375	−0.002	0.689	−0.368
果皮FRAP(X_{22})	0.587	0.785	0.013	0.187
果肉FRAP(X_{23})	0.602	0.711	−0.081	0.194
果皮DPPH(X_{24})	0.828	0.523	−0.051	−0.009
果肉DPPH(X_{25})	0.776	0.589	−0.099	0.094

对应的系数即特征向量[30]，设 4 个主成分得分依次为 F_1、F_2、F_3、F_4，以特征向量为权重构建 4 个主成分的得分表达式如下所示：

$$F_1=0.158X_1+0.078X_2+0.201X_3-0.109X_4+0.066X_5-0.201X_6+0.277X_7-0.087X_8+0.221X_9-0.272X_{10}-0.260X_{11}-0.279X_{12}-0.144X_{13}-0.098X_{14}+0.097X_{15}+0.148X_{16}+0.287X_{17}+0.260X_{18}+0.267X_{19}+0.154X_{20}+0.118X_{21}+0.185X_{22}+0.190X_{23}+0.262X_{24}+0.245X_{25}$$

$$F_2=-0.064X_1-0.297X_2-0.231X_3+0.28X_4-0.165X_5+0.243X_6+0.14X_7-0.21X_8+0.185X_9+0.175X_{10}+0.159X_{11}+0.11X_{12}+0.114X_{13}-0.083X_{14}-0.205X_{15}-0.315X_{16}-0.069X_{17}+0.135X_{18}+0.163X_{19}-0.144X_{20}-0.001X_{21}+0.322X_{22}+0.291X_{23}+0.214X_{24}+0.241X_{25}$$

$$F_3=-0.389X_1+0.177X_2-0.263X_3+0.222X_4-0.224X_5-0.229X_6+0.112X_7+0.154X_8-0.023X_9-0.029X_{10}-0.102X_{11}-0.184X_{12}+0.256X_{13}+0.367X_{14}-0.133X_{15}-0.014X_{16}-0.123X_{17}+0.103X_{18}+0.078X_{19}+0.345X_{20}+0.375X_{21}+0.007X_{22}-0.044X_{23}-0.028X_{24}-0.054X_{25}$$

$$F_4=0.273X_1+0.307X_2-0.115X_3+0.096X_4-0.381X_5-0.021X_6-0.059X_7+0.414X_8-0.259X_9+0.123X_{10}+0.098X_{11}-0.033X_{12}-0.313X_{13}-0.23X_{14}-0.315X_{15}+0.084X_{16}-0.003X_{17}+0.162X_{18}-0.001X_{19}+0.16X_{20}-0.231X_{21}+0.117X_{22}+0.122X_{23}-0.006X_{24}+0.059X_{25}$$

以各主成分对应的方差贡献率为权重，可得到综合评价函数为 $F=0.457F_1+0.271F_2+0.154F_3+0.117F_4$，根据主成分综合得分模型，计算出七个品种黄皮的综合得分和排序结果如表 9 所示。不同品种黄皮的品质排序从高到低依次为：‘贵妃 3 号’‘无核黄皮’‘华南 1 号’‘金黄皮’‘鸡心黄皮’‘白蜜黄皮’‘冰糖黄皮’。

表 9　黄皮品质指标的主成分得分、综合得分及排序

Table 9　Principal component scores, composite scores and ranking of wampee quality indicators

品种	F_1	F_2	F_3	F_4	F	排名
冰糖黄皮	−2.58	−0.75	−1.42	1.26	−1.46	7
鸡心黄皮	−0.75	−3.83	0.52	1.62	−1.11	5
金黄皮	−1.91	−0.03	1.30	−1.29	−0.83	4
贵妃3号	3.79	3.23	−0.10	2.03	2.83	1
白蜜黄皮	−3.15	2.19	−2.20	−1.10	−1.31	6
华南1号	−0.38	1.16	3.15	−0.63	0.55	3
无核黄皮	4.98	−1.97	−1.25	−1.89	1.33	2

2.10　不同品种黄皮聚类分析

对黄皮 25 项品质指标数据进行 Z-score 标准化处理，然后进行聚类分析，结果如图 7 所示，七种黄皮聚为四类：‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’为第一类，‘金黄皮’和‘华南 1 号’为第二类，‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’为第三类，‘鸡心黄皮’为第四类。其中第一类两个品种（‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’）的抗坏血酸、总酚、总

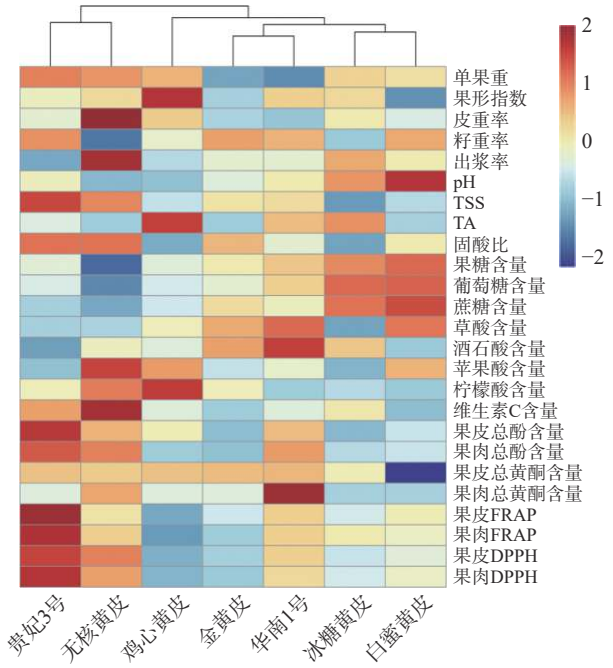

图 7　不同品种黄皮聚类分析热图

Fig.7　Heat map of cluster analysis of different varieties of wampee

黄酮含量较高，抗氧化能力强，在主成分分析中综合评价排序分别是第一和第二名；第二类两个品种（‘金黄皮’和‘华南 1 号’）酒石酸和草酸含量较高；第三类两个品种（‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’）果糖、葡萄糖、蔗糖含量较高；第四类‘鸡心黄皮’柠檬酸和苹果酸含量较高。综上，‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮’滋味更甜适合鲜食，其他品种除鲜食外，亦适合加工或用于活性成分的提取。

3 结论

本研究对七个品种黄皮的品质指标进行测定，选取了与品质相关的 25 个指标进行主成分分析，从中提取出 4 个主成分，累计贡献率达到 87.51%，可较好反映黄皮品质的综合信息。结果表明，‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’两个品种在 TSS、抗坏血酸、可溶性糖和总酚含量这几个指标上表现较佳；贵妃 3 号在果形指数、籽重百分比、柠檬酸含量和 FRAP 四个指标上得分最高；‘华南 1 号’和‘金黄皮’在单果重、酒石酸和总黄酮含量三个指标上表现突出；‘贵妃 3 号’和‘鸡心黄皮’在出浆率和 TA 两个指标上表现较佳。聚类分析将 7 个品种的黄皮划分为四大类，结果与主成分分析基本一致，‘贵妃 3 号’和‘无核黄皮’活性成分含量高；‘金黄皮’和‘华南 1 号’有机酸含量高；‘冰糖黄皮’和‘白蜜黄皮糖’含量高；‘鸡心黄皮’活性物质少，固酸比最小，可根据各种类不同特性选择不同的加工方式，研究可为黄皮鲜食及加工品种的筛选提供参考，为我国黄皮种质资源的开发利用提供科学的依据。

© The Author(s) 2024. 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] LIN X, SHI Y S, WEN P, et al. Free, conjugated, and bound phenolics in peel and pulp from four wampee varieties: Relationship between phenolic composition and bio-activities by multivariate analysis[J]. Antioxidants, 2022, 11(9): 1831.

[2] 彭程, 常晓晓, 陈喆, 等. 不同类型黄皮果实香气成分和特征香气物质分析[J]. 经济林研究, 2019, 37(4): 50−60. [PENG C, CHANG X X, CHEN Z, et al. Analysis on aromatic components and specific aromatic components in different clones of *C. lansium* fruits[J]. Non-wood Forest Research, 2019, 37(4): 50−60.]

[3] 张丽娟, 邹波, 肖更生, 等. 黄皮原浆超高压和热杀菌的比较分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(9): 200−206. [ZHANG L J, ZOU B, XIAO G S, et al. Comparative analysis of ultra-high hydrostatic pressure and thermal sterilization of wampee puree[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(9): 200−206.]

[4] 胡雨卿, 杨应楷, 杨启财, 等. 黄皮的生物活性及其加工研究进展[J]. 中国果菜, 2022, 42(2): 54-59. [HU Y Q, YANG Y K, YANG Q C, et al. Research progress on bioactivity and processing of *Clausena lansium*[J]. China Fruit & Vegetable, 42(2): 54-59.]

[5] 陈慧琼, 彭程, 常晓晓, 等. 黄皮种质资源果实糖组分及其含量特征分析[J]. 广东农业科学, 2022, 49(4): 8−18. [CHEN H Q, PENG C, CHANG X X, et al. Analysis of soluble sugar components and contents in fruits from different wampee germplasm resources[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2022, 49(4): 8−18.]

[6] 林育钊, 冯梦桨, 陈洪彬, 等. 氧化白藜芦醇处理对黄皮果实贮藏特性和采后品质的影响[J]. 热带作物学报, 2024, 45(4): 804-812. [LIN Y Z, FENG M F, CHEN H B, et al. Effects of oxyresveratrol treatment on the storage behavior and postharvest quality of wampee fruit[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(4): 804-812.]

[7] 洪丹霞, 徐春华, 吴佩聪, 等. 基于文献统计分析黄皮研究的现状与展望[J]. 中国热带农业, 2023(2): 13−20. [HONG D X, XU C H, WU P C, et al. Research status and prospect of *Clausena Lansium* (*Lour.*) *Skeels* based on literature statistical analysis[J]. China Tropical Agriculture, 2023(2): 13−20.]

[8] 彭程, 薛海军, 常晓晓, 等. 不同品种黄皮果汁的品质及抗氧化能力[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2020, 52(1): 70−76. [PENG C, XUE H J, CHANG X X, et al. The quality and antioxidant capacity of fruit juice of different wampee cultivars[J]. Journal of South China Normal University (Natural Science Edition), 2020, 52(1): 70−76.]

[9] CHANG X X, YE Y T, PAN J P, et al. Comparative assessment of phytochemical profiles and antioxidant activities in selected five varieties of wampee (*Clausena lansium*) fruits[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2018, 53(12).

[10] YU Y S, XIAO G S, XU Y J, et al. Slight fermentation with lactobacillus fermentium improves the taste (Sugar: Acid Ratio) of citrus (*Citrus reticulata* cv. Chachiensis)juice [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(11): M2 543-M2 547.

[11] PENG J, BU Z B, REN H Y, et al. Physicochemical, structural, and functional properties of wampee (*Clausena lansium* (Lour.) Skeels) fruit peel pectin extracted with different organic acids[J]. Food Chemistry, 2022, 386.

[12] 朱敏, 何书强, 罗石荣, 等. 高效液相色谱法测定黄皮果实中的有机酸[J]. 中国农学通报, 2016, 34: 187−192. [ZHU M, HE S Q, LUO S R, et al. Determination of organic acids in wampee fruit by high performance liquid chromatography[J]. China Agricultural Bulletin, 2016, 34: 187−192.]

[13] FU M Q, AN K J, XU Y J, et al. Effects of different temperature and humidity on bioactive flavonoids and antioxidant activity in pericarpium citri reticulata (*Citrus reticulata* 'Chachi')[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 93: 167−173.

[14] YANG J, CUI J Y, CHEN J X, et al. Evaluation of physicochemical properties in three raspberries (*Rubus idaeus*) at five ripening stages in northern China[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 263: 109146.

[15] HAMROUNI-SELLAMI I, RAHALI F Z, REBEY I B, et al. Total phenolics, flavonoids, and antioxidant activity of sage (*Salvia officinalis* L.) plants as affected by different drying methods[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(3): 806−817.

[16] BARRECA D, BISIGNANO C, GINESTRA G, et al. Polymethoxylated, C- and O-glycosyl flavonoids in tangelo (*Citrus reticulata*×*Citrus paradisi*) juice and their influence on antioxidant properties[J]. Food Chemistry, 2013, 141(2): 1481−1488.

[17] SÓJKA, JAKUB M, MARIAN B, et al. Transfer and mass balance of ellagitannins, anthocyanins, flavan-3-ols, and flavonols during the processing of red raspberries (*Rubus idaeus* L.) to juice[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2016, 64(27): 5549−5563.

[18] CHEN X W, YU Y Y, XU Y J, et al. Changes in quality

properties and volatile compounds of different cultivars of green plum (*Prunus mume* Sieb. et Zucc.) during ripening[J]. European Food Research and Technology, 2023, 249(5): 1199–1211.
[19] 张维, 付复华, 罗赛男, 等. 湖南红心猕猴桃品种品质评价及综合分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(5): 201−210. [ZHANG W, FU F H, LUO S N, et al. Quality analysis and evaluation of Hunan red kiwifruit varieties[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(5): 201−210.]
[20] 李俊, 傅曼琴, 徐玉娟, 等. 融安金桔不同生长期果实品质特性比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(2): 138−146. [LI J, FU M Q, XU Y J, et al. Comparison of fruit quality and characteristics at different growth stages of kumquat from Rongan[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(2): 138−146.]
[21] 郑丽静, 聂继云, 闫震. 糖酸组分及其对水果风味的影响研究进展[J]. 果树学报, 2015, 32(2): 304−312. [ZHENG L J, NIE J Y, YAN Z, et al. Advances in research on sugars, organic acids and their effects on taste of fruits[J]. Journal of Fruit Science, 2015, 32(2): 304−312.]
[22] 石友盛. 黄皮的风味特征、酚类化合物表征及其体外消化特征研究[D]. 海口: 海南大学, 2022. [SHI Y S. Flavor characteristics, characterization of phenolic compounds and their release from *Clausena lansium* (Lour.) Skeels during simulated *in vitro* digestion[D]. Haikou: Hainan University, 2022.]
[23] SHU B, WU G X, WANG Z N, et al. The effect of microwave vacuum drying process on citrus: Drying kinetics, physicochemical composition and antioxidant activity of dried citrus (*Citrus reticulata* Blanco) peel[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(5): 2443−2452.
[24] 陆育生, 彭程, 常晓晓, 等. 黄皮种质资源抗氧化特性的鉴定与评价[J]. 经济林研究, 2020, 38(2): 17−25. [LU Y S, PENG C, CHANG X X, et al. Appraisal and evaluation on antioxidant properties in *Clausena lansium* fruits from different germplasm resources [J]. Non-wood Forest Research, 2020, 38(2): 17−25.]
[25] GIRONÉS-VILAPLANA A, MENA P, GARCÍA-VIGUERA C, et al. A novel beverage rich in antioxidant phenolics: maqui berry (*Aristotelia chilensis*) and lemon juice[J]. LWT-Food Science and Technology, 2012, 47(2): 279−286.
[26] SHARMA S, KORI S, PARMAR A. Surfactant mediated extraction of total phenolic contents (TPC) and antioxidants from fruits juices[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 284−288.
[27] 张霞. 基于液质联用技术的中药黄酮类成分的体内外代谢研究以及鸭跖草化学成分的定性定量分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2018. [ZHANG X. The study of metabolism of main flavonoids of traditional Chinese medicine ingredients *in vitro* and quantitative analysis of chemical composition for *Commelina Communis* L. based on LC-MS technology[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2018.]
[28] 叶宇童. 黄皮种质资源果实多酚组成比较及降脂活性研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020. [YE Y T. Comparison of polyphenol composition of wampee (*Clausena lansium*) fruit germplasm resources and Lipid-lowering activity[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.]
[29] 焦扬, 折发文, 张娟娟, 等. 基于主成分与聚类分析的甘肃地区产地木耳品质综合评价[J]. 食品科学, 2019, 40(8): 130−135. [JIAO Y, SHE F W, ZHANG J J, et al. Comprehensive quality evaluation of nostoc commune vauch from Gansu province by principal component analysis and cluster analysis[J]. Food Science, 2019, 40(8): 130−135.]
[30] 谭艳, 王国庆, 陈赣, 等. 基于主成分及聚类分析的不同产地芦笋品质综合评价[J]. 现代食品科技, 2022, 38(7): 316−326. [TAN Y, WANG G Q, CHEN G, et al. Comprehensive quality evaluation of asparagus from different production areas by principal component analysis and cluster analysis[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 316−326.]