杨国英, 余元善, 温靖, 等. 不同品种橄榄果实品质特性综合分析及加工适宜性评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 23−35. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100098

YANG Guoying, YU Yuanshan, WEN Jing, et al. Comprehensive Analysis of Quality Characteristics and Evaluation of Processing Suitability of Different Varieties of Chinese Olive (*Canarium album* (Lour.) Raeusch.) Fruits[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 23−35. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100098

**·特邀主编专栏—标准化赋能食品及相关产品高质量发展（客座主编: 云振宇、史波林、兰韬、刘鹏、赵琳）·**

# 不同品种橄榄果实品质特性综合分析及加工适宜性评价

杨国英[1,2], 余元善[2], 温　靖[2], 邹　波[2], 李　璐[2], 卜智斌[2], 钟南京[1,3,*], 傅曼琴[2,*]

（1.广东药科大学公共卫生学院, 广东广州 510006;
2.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;
3.广东药科大学食品科学学院, 广东中山 528458）

**摘　要:** 为研究不同品种橄榄果实综合品质的差异及加工适宜性，以 14 种橄榄为研究对象，分析了果实的一般性状、质构特性、抗氧化活性和酚类物质含量等指标，并采用主成分分析法和聚类分析法对 14 种橄榄（‘三捻’‘黄橄榄’‘原味二号’‘香甜二号’‘老树灵峰’‘土种青果’‘脆 2 号’‘黄腊香’‘小个子’‘脆灵峰’‘纳种’‘檀香’‘酥脆 2 号’和‘惠圆’）进行综合品质的评价和归类。结果表明，14 种橄榄的平均单果重、可食率、含水率、pH 和可溶性固形物（TSS）范围分别为 5.46~12.19 g、77.74%~84.48%、77.93%~85.65%、3.49~4.06 和 9.61~15.43 °Brix，其中‘原味二号’的 pH 和‘黄腊香’的 TSS 含量显著高于其他品种（$P<0.05$）；总糖、总酸、总酚、总黄酮含量分别介于 35.71~151.71 mg/g DW、224.13~299.20 mg/g DW、17.18~34.66 mg GAE/g DW、7.35~12.46 mg RE/g DW，其中‘老树灵峰’的总糖含量最高，‘檀香’的总酸含量最高，而‘黄腊香’在总酚、总黄酮含量最高及 DPPH 和 $ABTS^{+}$自由基清除能力最强，差异均具有统计学意义（$P<0.05$）。采用高效液相色谱法定性定量分析橄榄果实中没食子酸、焦性没食子酸、绿原酸等 8 种酚类化合物，其中没食子酸含量最高。将橄榄品质特性的 33 个指标进行主成分分析，表明橄榄的品质可以用 5 个主成分表达（累计贡献率达到 81.236%），其中‘三捻’综合评价得分最高，‘小个子’得分最低。此外，聚类分析将橄榄品种主要划分为两类，第一类包含‘三捻’‘黄橄榄’‘黄腊香’，这类品种的特性适配果汁、果浆等制品的加工；第二类涵盖其余 11 个品种，其中‘檀香’等适合整果腌制，加工成果脯、蜜饯；‘老树灵峰’‘脆灵峰’等更适宜开发发酵类产品；‘纳种’‘土种青果’等则具备制备功能性配料产品的潜力。

**关键词:** 橄榄, 果实品质, 主成分分析（PCA）, 聚类分析, 加工适宜性

**中图分类号:** TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0023−13

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025100098

本文网刊:

# Comprehensive Analysis of Quality Characteristics and Evaluation of Processing Suitability of Different Varieties of Chinese Olive (*Canarium album* (Lour.) Raeusch.) Fruits

**YANG Guoying[1,2], YU Yuanshan[2], WEN Jing[2], ZOU Bo[2], LI Lu[2], BU Zhibin[2], ZHONG Nanjing[1,3,*], FU Manqin[2,*]**

**收稿日期:** 2025−10−15

**基金项目:** 以农产品为单元的广东省现代农业产业技术体系创新团队建设项目（优稀水果产业技术体系, 2024CXTD09）; 广东省农业科学院科技创新战略（农业科研主力军建设）专项（R2023PY-JG015）; 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目（加工与保鲜共性关键技术）（2024CXTD16）; 广东省农业科学院现代种业创新能力提升工程。

**作者简介:** 杨国英（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品卫生学, E-mail: 2953996939@qq.com。

*** 通信作者:** 钟南京（1980−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 油脂改性, E-mail: adong473@163.com。

傅曼琴（1985−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 食品科学, E-mail: fumanqin84@126.com。

（1.School of Public Health, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China；
2.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；
3.School of Food Science, Guangdong Pharmaceutical University, Zhongshan 528458, China）

**Abstract:** To investigate the differences in comprehensive quality and processing suitability among different varieties of Chinese olive (*Canarium album* (Lour.) Raeusch.) fruits, 14 olive varieties were selected as the research subjects. The general traits, texture characteristics, antioxidant activity, and phenolic content of the fruits were analyzed. Principal component analysis and cluster analysis were employed to evaluate and classify the comprehensive quality of the 14 olive varieties ('Sannian' 'Huangganlan' 'Yuanwei 2' 'Xiangtian 2' 'Laoshulingfeng' 'Tuzhongqingguo' 'Cui 2' 'Huanglaxiang' 'Xiaogezi' 'Cuilingfeng' 'Nazhong' 'Tanxiang' 'Sucui 2' and 'Huiyuan'). The results showed that the average single fruit weight, edible rate, moisture content, pH, and total soluble solids (TSS) range of the 14 olive varieties were 5.46~12.19 g, 77.74%~84.48%, 77.93%~85.65%, 3.49~4.06, and 9.61~15.43 °Brix, respectively. Among them, the pH value of 'Yuanwei 2' and the TSS content of 'Huanglaxiang' were significantly higher than those of other varieties ($P$<0.05). The total sugar, total acid, total phenol, and total flavonoid contents ranged from 35.71~151.71 mg/g DW, 224.13~299.20 mg/g DW, 17.18~34.66 mg GAE/g DW, and 7.35~12.46 mg RE/g DW, respectively. Among them, 'Laoshulingfeng' had the highest total sugar content, 'Tanxiang' had the highest total acid content, and 'Huanglaxiang' had the highest total phenol and total flavonoid contents, as well as the strongest DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging abilities, with statistically significant differences ($P$<0.05). High-performance liquid chromatography was used to qualitatively and quantitatively analyze eight phenolic compounds, including gallic acid, pyrogallic acid, and chlorogenic acid, in olive fruits. Among them, gallic acid was the most abundant. A principal component analysis was conducted on 33 indicators of olive quality characteristics, indicating that olive quality can be expressed through five principal components (with a cumulative contribution rate of 81.236%). Among them, 'Sannian' had the highest comprehensive evaluation score, while 'Xiaogezi' had the lowest. In addition, cluster analysis mainly divided olive varieties into two categories. The first category includes 'Sannian', 'Huangganlan', and 'Huanglaxiang', which are suitable for processing into juice, fruit pulp, and other products. The second category covers the remaining 11 varieties, among which 'Tanxiang' and others are suitable for whole fruit pickling, processed into preserved fruits and candied fruits; 'Laoshulingfeng' and 'Cuilingfeng' are more suitable for developing fermentation products; 'Nazhong' and 'Tuzhongqingguo' have the potential to be used in the preparation of functional ingredient products.

**Key words:** *Canarium album* (Lour.) Raeusch./Chinese olive; fruit quality; principal component analysis (PCA); cluster analysis; processing suitability

橄榄（*Canarium album*（Lour.）Raeusch.）又名青果、黄榄（云南金平）、红榄、青子（广东）、山榄、白榄（两广）、谏果、忠果（古称）[1]，属于被子植物门双子叶植物纲橄榄科橄榄属乔木植物，是著名的热带亚热带特产果树。在广东、福建和广西等地广泛栽培，种植品种包括‘三捻’‘脆 2 号’和‘檀香’等。橄榄内部含有大量多酚、黄酮、必需氨基酸、维生素、矿物质等营养成分，可鲜食或加工为多种相关功能性产品[2]，具有较高营养与保健价值。橄榄的传统加工方式以盐渍和糖渍为主，旨在改善风味并延长保质期。此外，果实中富含的碳水化合物及可发酵糖分，也使其成为酿酒的理想原料[3]。随着食品科技的进步，橄榄的加工形式日趋多元化，涌现出如橄榄茶、口服液、咀嚼片等新型加工产品[4−5]。

橄榄果实的研究主要集中在种质资源分析、果实品质评价与生物活性探索等领域。已有研究揭示了橄榄品种间存在的显著差异：例如，赖瑞联等[6] 通过单重复序列间隔区和随机扩增 DNA 多态性技术对福建地区的 86 份橄榄资源进行了遗传多样性分析，发现橄榄种质资源具有丰富的且与地域相关的遗传多样性；谢倩等[7] 对 59 个品种（系）橄榄果实表型性状（单果质量、纵径、横径、果形指数）进行测定分析，得出 4 个表型性状的变异丰富，变异系数范围为 10.70%~26.67%；Yeh 等[8] 则鉴定了橄榄果实提取物中具有生物活性的 13 种酚类化合物；刘芸彤[9] 进一步研究了青果中酚类物质的抗氧化与抗衰老活性，凸显了其生物活性潜力。然而，这些丰富的遗传多样性和品质差异，在受到各地区气候与生长环境的复杂影响后，导致了橄榄果实加工特性的不确定性。

目前，哪些品种适宜发酵，或适宜制备为蜜饯、果汁等产品的加工方向尚不明确，造成橄榄资源无法合理利用，因此，系统性地探究不同品种橄榄的加工适宜性十分必要。为此，本研究以 14 个橄榄品种作为研究对象，分析果实的一般性状、质构特性、抗氧化活性和酚类物质含量等指标，对其进行加工适宜性评价，并运用主成分分析法和聚类分析法，分析橄榄果实的品质特征与差异，为橄榄的综合加工利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

从广州天平架水果市场购置的成熟度一致、颜色较均匀的果实，购买时与商家确定产地来源及品

表 1　14 个橄榄品种及产地

Table 1　14 Chinese olive varieties and their respective production areas

| 编号 | 品种 | 产地 | 编号 | 品种 | 产地 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 三捻 | 广东汕头 | 8 | 黄腊香 | 广东汕头 |
| 2 | 黄橄榄 | 广东汕头 | 9 | 小个子 | 广东汕头 |
| 3 | 原味二号 | 广东汕头 | 10 | 脆灵峰 | 广东汕头 |
| 4 | 香甜二号 | 广东汕头 | 11 | 纳种 | 广东汕头 |
| 5 | 老树灵峰 | 广东汕头 | 12 | 檀香 | 福建福州 |
| 6 | 土种青果 | 广东汕头 | 13 | 酥脆2号 | 福建福州 |
| 7 | 脆2号 | 广东汕头 | 14 | 惠圆 | 福建福州 |

种，并经仲恺农业工程学院徐玉娟研究员鉴定为 14 个品种（表 1）。每个品种果实不少于 2 kg，立即运送至实验室，其中部分果实立即进行相关指标的测定，剩余冷冻并储存于 4 ℃ 冰箱，用于下一步试验。甲醇、乙腈　色谱纯，天津大茂化学试剂公司；苯酚、氢氧化钠、亚硝酸钠、碳酸钠、焦性没食子酸　分析纯，福晨（天津）化学试剂有限公司；硫酸　分析纯，广东广试试剂科技有限公司，硝酸铝　分析纯，天津市科密欧化学试剂有限公司；维生素 E 衍生物（Trolox）、1,1-二苯基苦基苯肼（DPPH）、2,2′-联氨-双（3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸）二胺盐（ABTS）、芦丁、没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸、福林酚（Folin-Ciocalteu）　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；无水乙醇　分析纯，天津市富宇精细化工有限公司；槲皮素　分析纯，上海麦克林生化科技有限公司；柚皮素　分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司。

PBJ-S02E 型破壁料理机　江门市贝尔斯顿电器有限公司；HBS-800A 多功能粉碎机　东莞市华太电器有限公司；101-3ABS 型电热鼓风干燥箱　上海科恒实业发展有限公司；DK-98-1 型电热恒温水浴锅　上海精密仪器仪表公司；JW-1042 型低速离心机　安徽嘉文仪器装备有限公司；TS7700 分光测色仪　广东三恩时科技有限公司；ME204 电子分析天平、FE28 pH 计　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；JJ1000 型电子天平　常熟市双杰测试仪器厂；ZAY-30-900DS 超声波清洗器　郑州生元仪器有限公司；LC-20AT 高效液相色谱仪、UV-1800 紫外可见分光光度计　岛津仪器（苏州）有限公司。

### 1.2　实验方法

1.2.1　原料处理　不同品种的橄榄果实分别剔除残次果和外伤果，选取新鲜无腐烂的橄榄果实，清洗、晾干后，手动去核，将橄榄果肉切成小块烘干至恒重，粉碎机粉碎后过 40 目筛，得到橄榄干粉，4 ℃ 贮藏备用。

1.2.2　橄榄果实性状的测定　每个品种橄榄随机选取 20 个，果实（果核）重量采用电子天平测量；果实纵径和横径采用电子数显游标卡尺测定，果形指数是果实纵径与果实横径之比。按公式测定可食率和出核率。

$$可食率(\%)=\frac{果肉质量}{果实质量}\times 100 \qquad 式（1）$$

$$出核率(\%)=\frac{果核质量}{果实质量}\times 100 \qquad 式（2）$$

1.2.3　含水率的测定　参考丁云爽等[10] 的含水率测定方法。将每个品种的橄榄果肉放入铝箔称量皿中，于 105 ℃ 下烘至恒重为止。含水率的计算公式如（3）所示。

$$含水率(\%)=\frac{m_2-m_0}{m_1-m_0}\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：$m_0$ 表示称量皿重量，g；$m_1$ 表示烘干前总重量，g；$m_2$ 表示烘干后重量，g。

1.2.4　橄榄果皮颜色的测定　每个品种橄榄随机选取 10 个，使用分光测色仪测定每个果实赤道面上相对 4 个部位的 $L^*$值、$a^*$值、$b^*$值指标，计算综合色度指标色泽比 $h$ 和饱和度 $C$。

$$h=a^*/b^* \qquad 式（4）$$

$$C=\sqrt{a^{*2}+b^{*2}} \qquad 式（5）$$

1.2.5　橄榄果实质构特性的测定　参考文献 [11] 的方法，略作修改。取完整的橄榄果实，每个橄榄品种 10 个果实，测试时将每个果实放置于 TPA 质构仪的载物台中心，穿刺位置选取果实最大横径处，使探头贯入时正对果实中部。采用直径 2 mm 的 P/2 圆柱形探头，设定测前速度为 1.50 mm/s，测中速度 1.00 mm/s，测后速度 10 mm/s，最小感知力 5 g，穿刺深度设为 3 mm。测试指标主要有果皮硬度、果皮脆性、果肉硬度、果肉脆性 4 项。

1.2.6　pH、可溶性固形物（TSS）的测定　新鲜橄榄果实洗净、擦干，取可食部分切碎、混匀，放入破壁料理机中，粉碎榨汁后用四层纱布过滤两次，挤出匀浆汁液待测。

pH 使用 pH 计测定；可溶性固形物（TSS）采用数字阿贝折射仪测定。

1.2.7　总糖和总酸的测定　精确称取 0.2 g 橄榄干粉，加入 5 mL 80% 乙醇，进行超声辅助萃取 120 mim，常温下 4201×g 的离心力离心 10 min，取上清液，定容至 25 mL，即得橄榄提取液待测。

总糖含量采用苯酚硫酸法[12] 测定总糖的含量，并略作修改。取适当稀释的提取液 1 mL，加入 1 mL 5% 苯酚溶液，快速加入 5 mL 18.4 mol/L 的硫酸，振荡溶液，将试管放在 30 ℃ 水浴锅中反应 30 min 后，在 490 nm 测定其吸光度值，以葡萄糖浓度为横坐标，以吸光度值为纵坐标，制定葡萄糖标准曲线（$y=7.6381x+0.0234$，$R^2=0.9994$）。

总酸采用 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》的方法中的第二法-pH 计电位滴定法，结果以柠檬酸计。

1.2.8　总酚含量的测定　称取 1 g 橄榄干粉，加入

10 mL 80% 乙醇, 进行超声辅助萃取 120 mim, 常温下 4201×g 的离心力离心 10 min, 取上清液, 定容至 25 mL, 即得橄榄待测液。

采用 Folin-Ciocalteu 法[13] 测定总酚的含量, 并略作修改。取适当稀释的提取液 1 mL, 加入 2 mL Folin-Ciocalteu 试剂, 振荡混匀后静置 5 min, 加入 2 mL 10% 碳酸钠溶液, 室温下避光放置 120 min 后, 4201×g 的离心力离心 5 min 后于 760 nm 吸光度下测定其吸光度值。以没食子酸浓度为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制没食子酸标准曲线(y=16.18x+0.0876, $R^2$=0.9994), 总酚含量以没食子酸当量(mg GAE/g DW)表示。总酚含量的计算公式如(6)所示。

$$\text{总酚含量(mg GAE/g DW)} = \frac{c \times D \times V}{m} \quad \text{式（6）}$$

式中: c 表示根据吸光度值代入标准曲线计算出的提取液质量浓度, mg/mL; D 表示提取液稀释倍数; V 表示待测液体积, mL; m 表示橄榄干粉取样量, g。

1.2.9 总黄酮含量的测定 采用分光光度法[14] 测总黄酮含量, 并略作修改。取适当稀释后 1.2.8 制备的橄榄提取液 1 mL, 加入 0.3 mL 的 5% 亚硝酸钠溶液, 振荡混匀后静置 5 min, 加入 0.3 mL 的 10% 硝酸铝溶液振荡混匀后放置 6 min, 加入 2 mL 4% 氢氧化钠溶液, 振荡混匀后静置 30 min, 4201×g 的离心力离心 10 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=1.6575x+0.0588, $R^2$=0.9993), 总黄酮含量以芦丁的当量(mg RE/g DW)表示。总黄酮含量的计算公式如(7)所示。

$$\text{总黄酮含量(mg RE/g DW)} = \frac{c \times D \times V}{m} \quad \text{式（7）}$$

式中: c 表示根据吸光度值代入标准曲线计算出的提取液质量浓度, mg/mL; D 表示提取液稀释倍数; V 表示待测液体积, mL; m 表示橄榄干粉取样量, g。

1.2.10 抗氧化能力的测定 DPPH 法[15]: 取 1 mL 适度稀释的提取液加入 2 mL DPPH 溶液(0.2 mmol/L), 混匀后在室温条件下避光反应 20 min, 4201×g 的离心力离心 10 min 后于 517 nm 处的吸光度, 以 Trolox 为标准品, 测定不同浓度 Trolox 对 DPPH 自由基的清除能力并绘制标准曲线(y=−19.8160x+0.9575, $R^2$=0.9993, 其中 y 是吸光度值, x 为 Trolox 浓度), 结果以 Trolox 当量(mg TE/g DW)表示。DPPH 自由基清除能力的计算公式如(8)所示。

$$\text{PPH自由基清除能力(mg TE/g DW)} = \frac{c \times D \times V}{m} \quad \text{式（8）}$$

式中: c 表示根据吸光度值代入标准曲线计算出的提取液质量浓度, mg/mL; D 表示提取液稀释倍数; V 表示待测液体积, mL; m 表示橄榄干粉取样量, g。

ABTS 法[16]: 将 7 mmol/L 的 ABTS 溶液(50 mL)与 140 mmol/L 的过硫酸钾溶液(0.88 mL)混合, 在室温、避光的条件下静置过夜, 形成 ABTS 储备液。使用前用无水乙醇稀释至 734 nm 波长处吸光度为 0.7±0.02, 为 ABTS 工作液。取 0.10 mL 适度稀释的提取液加入 2 mL ABTS 工作液, 摇匀后避光反应 20 min, 于 734 nm 下测定吸光度; 以 Trolox 为标准品, 绘制标准曲线(y=−3.3944x+0.6278, $R^2$=0.9993, 其中 y 是吸光度值, x 为 Trolox 浓度), 结果以 Trolox 当量(mg TE/g DW)表示。$ABTS^+$自由基清除能力的计算公式如(9)所示。

$$ABTS^+\text{自由基清除能力(mg TE/g DW)} = \frac{c \times D \times V}{m} \quad \text{式（9）}$$

式中: c 表示根据吸光度值代入标准曲线计算出的提取液质量浓度, mg/mL; D 表示提取液稀释倍数; V 表示待测液体积, mL; m 表示橄榄干粉取样量, g。

1.2.11 酚类物质含量测定 精确称取 2 g 橄榄干粉, 加入 5 mL 80% 乙醇, 进行超声辅助萃取 120 mim, 常温下 4201×g 的离心力离心 10 min, 取上清液,获得橄榄待测液。

采用高效液相色谱法(HPLC)[17] 测定, 取 1 mL 待测液经 0.22 μm 的有机相滤膜过滤备用。色谱条件: Waters $C_{18}$ 色谱柱(4.6 mm×250 mm, 5 μm); 二极管阵列(PDA)检测器; 流动相 A: 0.4% 乙酸溶液, 流动相 B: 色谱级乙腈; 柱温 30 ℃; 流速 0.8 mL/min; 进样量 10 μL; 梯度洗脱程序: 0~40 min, 95% A, 5% B; 40~45min, 75%A, 25%B; 45~50min, 50% A, 50% B; 50~60 min, 10% A, 90% B; 280 nm。以标准品的峰面积和浓度绘制标准曲线, 橄榄中酚类物质的含量根据标准曲线进行计算。

### 1.3 数据处理

每个实验处理均重复 3 次, 结果以平均值±标准偏差表示, 样品间的显著性差异检验用 Duncan's test 进行分析, 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 不同品种橄榄的一般性状分析

由图 1 可发现, 橄榄作为一种核果, 其果核两端

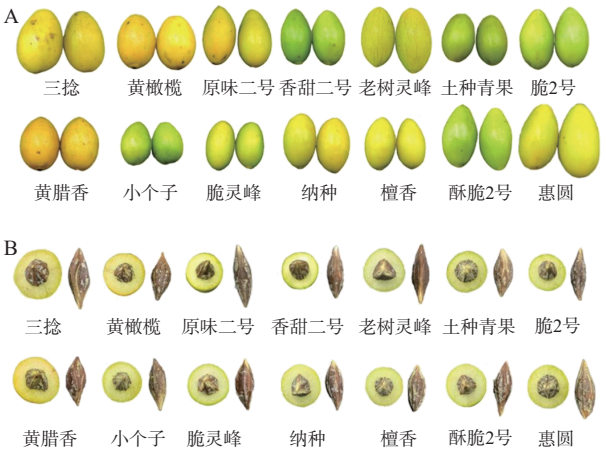



图 1 不同品种橄榄整果(A)、横截面和果核(B)

Fig.1 Whole fruit (A), cross section and kernel (B) of different varieties of Chinese olive

锐尖呈梭形，暗红棕色。果肉颜色多为黄白色，果实的形状有纺锤形、椭圆形、卵圆形、梭形和不规则形等[18]，形状多样。

单果重是评价果实品质的最基本指标。由图 2A、图 2B 可知，14 个品种橄榄的平均单果重范围为 5.46~12.19 g，平均果实纵径、横径范围分别为 2.79~3.66 cm、1.83~2.49 cm；其中‘三捻’的单果重、果实纵径、果实横径，明显大于其余 13 个品种，‘三捻’的单果重是‘小个子’的 2.23 倍，果实纵径、果实横径最短的分别是‘小个子’‘香甜二号’。果形指数表示果实的形状特征，由图 2C 可知，14 个品种橄榄的平均果形指数在 1.40~1.84 之间，‘原味二号’和‘脆 2 号’的果实狭长，‘黄腊香’‘小个子’的果实较圆。果实的可食率和果肉、果核质量有直接关系，由图 2D 可知，平均可食率在 77.74%~84.48% 之间，最大相差倍数为 1.09，变异系数为 3.30%，离散程度较小，说明不同品种橄榄的可食率差异较小；平均出核率为 15.52%~22.26%，最大相差倍数为 1.43，‘三捻’的出核率最低，‘土种青果’出核率最高；含水率与橄榄果实是否适合制汁有关，平均含水率范围在 77.93%~85.65%，含水率最高的是‘酥脆 2 号’，最低的是‘黄橄榄’。谢倩等[7]研究发现‘惠圆’‘灵峰’和‘青果’等 59 个橄榄品种的单果重量为 3.87~12.40 g，果实纵径范围为 22.60~42.65 mm，果实横径范围为 15.29~25.47 mm，果形指数在 1.32~2.40 之间，本研究结果与之相接近。

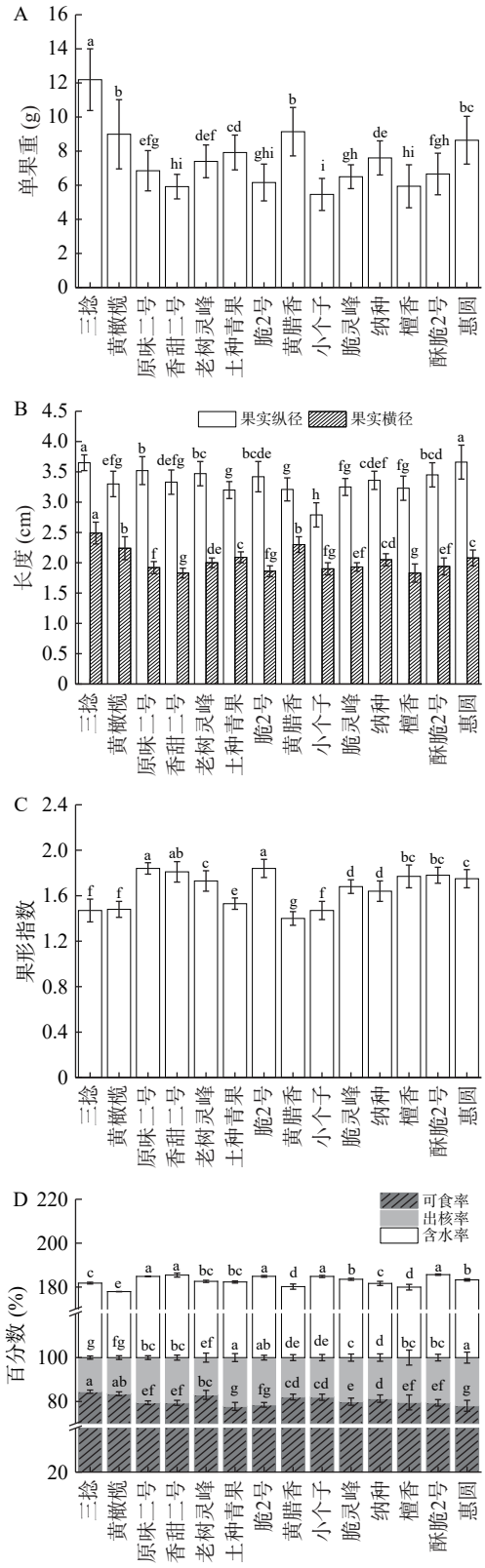



图 2　不同品种橄榄一般性状

Fig.2　General characteristics of different Chinese olive varieties

注：图中不同字母代表显著性差异（$P$<0.05）；图 2~图 9 同。

果大、肉多（高可食率、低出核率）、外形端正的果实，如‘三捻’，是制作整果蜜饯、盐渍或发酵橄榄的上佳之选；多汁（高含水率）的橄榄适宜加工成橄榄汁或果浆制品，如‘酥脆 2 号’，能最大化其食用价值和经济价值。

## 2.2　不同品种橄榄果皮颜色差异比较

果皮颜色是水果外在品质与成熟度的重要指标，会极大影响消费者的选择。本研究广东、福建的 14 个品种橄榄在外观上与地中海橄榄相似，成熟时呈现黄绿色转变，但与欧洲新鲜橄榄‘Carolea’和‘Leucocarpa’的颜色不同，完全成熟的‘Carolea’果实呈紫黑色，而‘Leucocarpa’果实呈象牙白色[19]。

$L^*$值为明度，反映色泽的亮度；$a^*$值为红绿值，正数代表红色，负数代表绿色；$b^*$值为黄蓝值，正数代表黄色，负数代表绿色；$h$ 代表色泽比，值越大，所测得绿色越浅；$C$ 值代表色彩饱和度，值越大，颜色越纯[20]。色彩饱和度描述颜色的鲜艳程度，即颜色的纯度，果实具有高饱和度的颜色更能吸引消费者的注意力，提升购买欲。由图 3 可知，14 个品种橄榄果皮的色度指标值均存在一定的差异（$P$<0.05），$L^*$、$b^*$和 $C$ 值均是正值，$a^*$和 $h$ 值有正有负。‘三捻’的 $L^*$、$b^*$和 $C$ 值最大，说明其颜色最亮、最黄、饱和度最高，分别为 63.55±0.51、46.12±0.84、46.53±0.84；‘小个子’的 $L^*$、$b^*$和 $C$ 值最小，分别为 50.31±0.70、18.53±0.65、18.80±0.66；$a^*$和 $h$ 值最小的是‘香甜二号’，说明其颜色最绿，分别为−4.75±0.46、-0.22±0.04。与之前报道的‘檀香’‘惠圆’‘两头尖’等 10 个橄榄品种果皮的亮度值 $L^*$、$a^*$、$b^*$与 $C$ 值范围分别为 46.9~56.7、-4.4~-13.5、31.0~45.1 与 31.7~45.5 结果相符合[21]，呈现出橄榄果实的黄绿色特征。

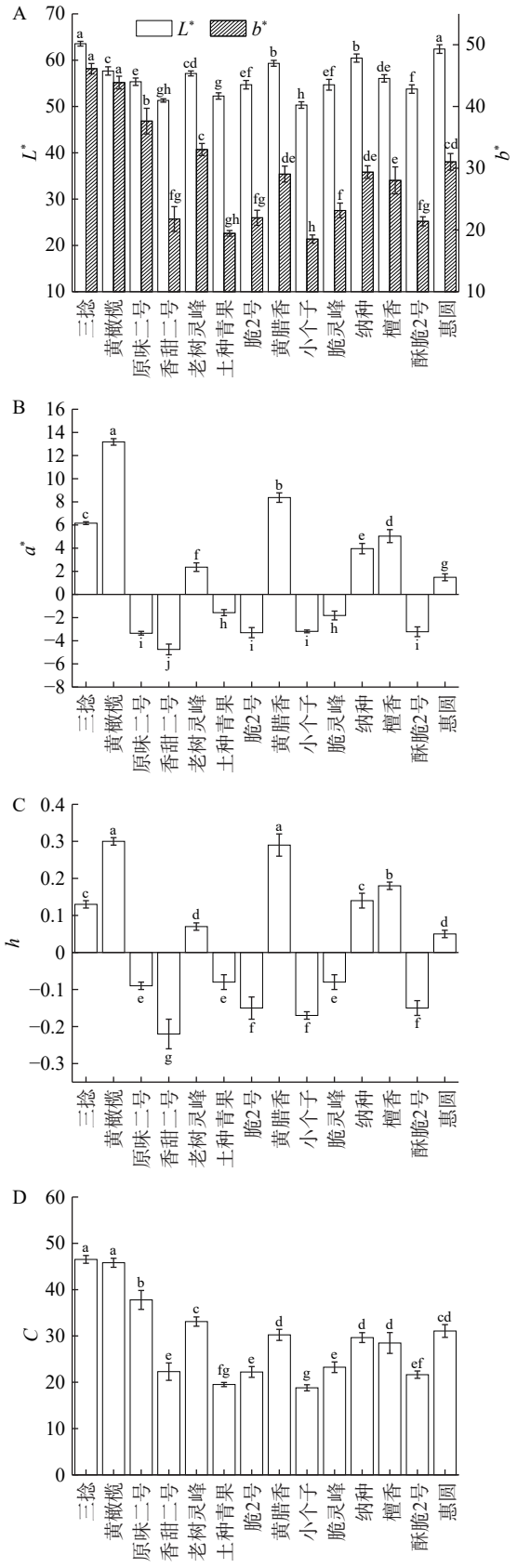



图 3　不同品种橄榄果皮颜色的测定结果

Fig.3　Determination results of Chinese olive fruit peel color of different varieties

果实颜色主要由叶绿素(绿)、类胡萝卜素(黄橙)和花青素(紫黑)三种色素调控[22]。橄榄具有黄绿色果皮,表明果实富含叶绿素与类胡萝卜素,尤其是像‘三捻’‘黄橄榄’这类亮度高、饱和度突出的品种,其内在色素品质优异,这使得它们在加工中能更好地保留鲜艳、稳定的天然色泽,该类果实是加工色泽鲜亮、品质稳定的果汁、果浆等制品的理想原料。

## 2.3　不同品种橄榄果实质构特性分析

由图 4 可知,14 个品种橄榄果实的果皮硬度、

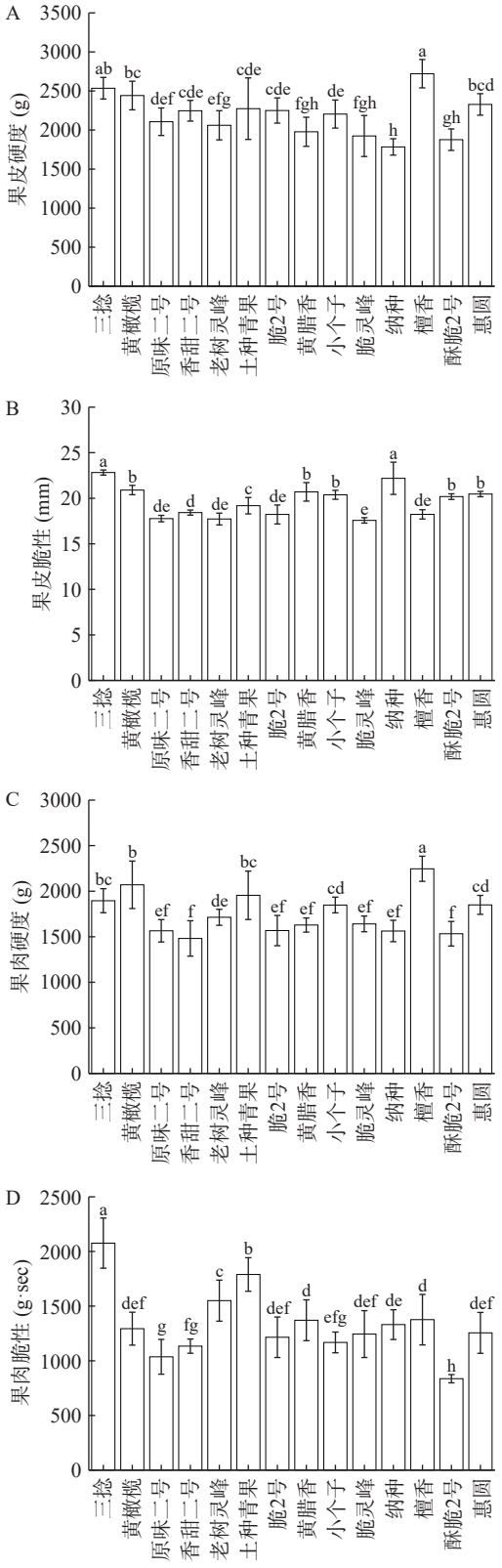



图 4　不同品种橄榄果实的质构特性测定结果

Fig.4　Texture property determination results of Chinese olive fruit of different varieties

果皮脆性、果肉硬度、果肉脆性均存在差异（$P<0.05$），平均范围分别为 1783.53~2721.32 g、17.57~22.82 mm、1481.37~2245.96 g、836.37~2075.93 g·sec；其中‘檀香’的果皮、果肉硬度最大，与其他 13 个品种之间差异显著（$P<0.05$），果皮、果肉硬度最小的分别是‘纳种’‘香甜二号’；果皮脆性最大的为‘三捻’和‘纳种’，两者之间无显著差异，果皮脆性最小的为‘脆灵峰’；‘三捻’的果肉脆性最大，‘酥脆 2 号’的果肉脆性最小。肖维强等[23]发现广东省的‘三棱’‘青皮’和‘香种’等不同橄榄品种的果肉硬度为 1531.88~2172.47 g，变异系数为 13.34%，与本研究结果一致。

质构特性是反映食品内部组织结构和口感的重要指标[24]。硬度可以反映出对压力的抵抗能力，硬度值也可以用于判断橄榄果实的成熟程度，对于橄榄的采摘、加工、收获储存和出口运输等方面有重要的参考价值。脆性则反映橄榄果实在外力下断裂而非变形的特性，通常情况下，脆性越高，橄榄果实的口感越脆爽。高硬度、高脆性果实，如‘檀香’和‘三捻’，适宜加工为整果腌制/发酵的餐用橄榄、果脯、高档蜜饯（如凉果）；低硬度、低脆性果实，如‘纳种’和‘酥脆 2 号’，适用于制作软质果酱。

### 2.4　不同品种橄榄果实 pH 和可溶性固形物（TSS）含量比较

由图 5 可知，橄榄果实的平均 pH 范围在 3.49~4.06 之间，‘原味二号’的 pH 最高，显著高于其他橄榄品种（$P<0.05$），‘三捻’的最低，变异系数为 4.64%。叶倩倩[25]研究发现福州橄榄‘灵峰’‘檀香’‘惠圆’果实呈高酸性，总酸含量分别为 1.06%、1.13%、1.43%，与本研究结果接近。‘黄腊香’的 TSS 含量最高，为 15.43±0.01 °Brix，显著高于其他品种（$P<0.05$），其次是‘檀香’，为 15.19±0.03 °Brix，而‘原味二号’的含量最低，为 9.61±0.03 °Brix，变异系数为 13.82%。池毓斌等[26]发现 12 个品种橄榄果实的 TSS 含量在 8.13%~11.97% 之间，本研究结果与之接近。

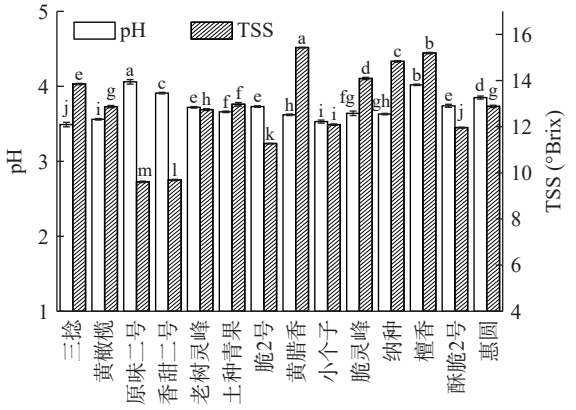



图 5　不同品种橄榄果实 pH 和 TSS 含量

Fig.5　pH and TSS content of Chinese olive fruit of different varieties

pH 和 TSS 含量的大小会直接影响橄榄果实的滋味和口感[27]，都是影响消费者对橄榄果实可接受度的因素。低 pH 或高 pH 且低 TSS 品种（如‘原味二号’和‘脆 2 号’）酸涩味重，需通过清水浸泡、加糖中和等预处理改善，适配果脯、蜜饯加工；低 pH 或高 pH 且高 TSS 品种（如‘檀香’和‘黄腊香’），酸甜适口，既可直接鲜食，亦可加工成橄榄汁或发酵产品。pH 越高（酸度越低）、TSS 越高（糖度越高）的“低酸高糖”型果实，更符合消费口味，加工适宜性更广。

### 2.5　不同品种橄榄果实总糖、总酸含量和糖酸比差异分析

总糖、总酸和糖酸比反映了果实的甜度和酸度，高糖酸比赋予水果更佳的口感，更受消费者的喜爱[28]。由图 6A 可知，14 个品种橄榄的总糖、总酸含量存在显著的差异，‘老树灵峰’总糖最高，为 151.71±1.07 mg/g DW，显著高于其他橄榄品种（$P<0.05$），是‘黄腊香’的 4.25 倍；‘檀香’总酸含量显著高于其他品种（$P<0.05$），含量为 299.20±3.20 mg/g DW，‘香甜二号’的含量最低，为 224.13±3.72 mg/g DW。由图 6B 可知，‘老树灵峰’的糖酸比最高，为 67.41%，‘黄腊香’的最低，为 13.32%。赖瑞联等[29]发现‘灵峰’‘闽清 2 号’和‘清榄 1 号’总糖含量为 4.43%~5.13%，总酸含量 1.18%~1.37%，‘三棱榄’‘惠圆’等 10 个品种橄榄的糖酸比范围为 0.133~0.227[30]，与本研究结果有较大差别，这可能是品种、产地和生长环境的差异或提取方法的不同造成的。

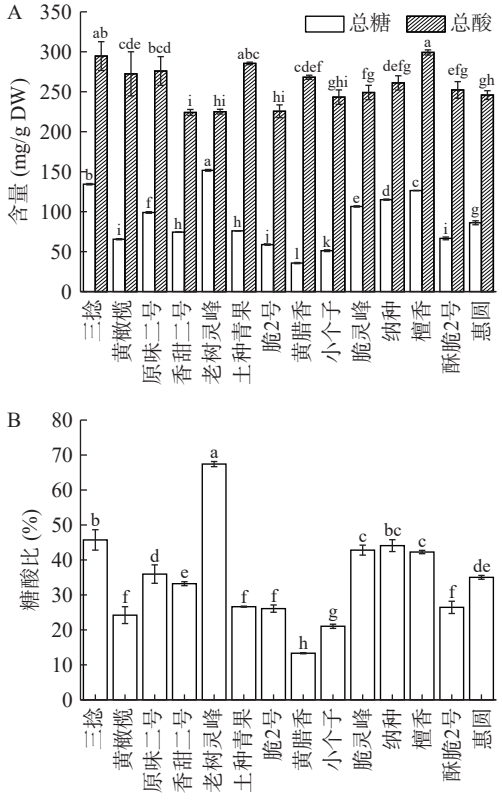



图 6　不同品种橄榄果实总糖、总酸的含量（A）和糖酸比（B）

Fig.6　Total sugar, total acid contents (A) and sugar acid ratio (B) of Chinese olive fruit of different varieties

总糖含量直接关联橄榄果实的甜味强度，并为发酵类产品（如果酒、醋）提供必需的底物[3]；总酸含量则主导酸味，并在加工过程中起到以稳定产品色泽的多重作用；糖酸比则直观反映甜酸平衡关系，成为指导加工路径选择的依据。例如，低糖酸比品种（‘黄腊香’）适于加工成果脯、蜜饯，高糖酸比品种（‘老树灵峰’）利于鲜食或发酵。

### 2.6 不同品种橄榄果实总酚和总黄酮含量比较

不同品种橄榄的总酚含量存在显著性差异（$P<0.05$）（图 7），变异系数为 15.85%，其中‘黄腊香’的总酚含量显著高于其它品种（$P<0.05$），为 34.66±0.12 mg GAE/g DW，其次是‘檀香’和‘三捻’，分别是 29.16±0.24 mg GAE/g DW 和 27.19±0.26 mg GAE/g DW，‘小个子’总酚含量最低，为 17.18±0.21 mg GAE/g DW。14 个品种橄榄中测得总酚的最大值是最小值的 2.02 倍。总黄酮含量变异系数为 16.19%，其中‘黄腊香’的总黄酮含量高于其它品种，是 12.46±0.15 mg RE/g DW，‘原味二号’最低，为 7.35±0.12 mg RE/g DW。本研究结果与文献 [31] 报道的总酚（26.26~104.74 mg GAE/g DW）和总黄酮（6.26~17.47 mg RE/g DW）含量接近。

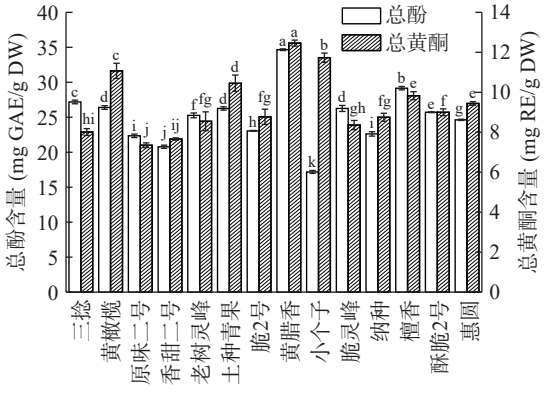



图 7 不同品种橄榄果实总酚、总黄酮含量比较

Fig.7 Comparison of total phenol and total flavonoid content of different varieties of Chinese olive fruit

### 2.7 不同品种橄榄果实体外抗氧化能力比较

采用 DPPH、ABTS 两种方法测定橄榄果实的抗氧化能力，结果如图 8 所示，14 个品种橄榄果实的 DPPH 自由基清除能力和 ABTS$^+$自由基清除能力变化范围分别为 50.99~101.27 mg TE/g DW 和 3.56~53.62 mg TE/g DW，变异系数分别为 19.89% 和 56.15%，而且 DPPH 自由基清除能力和 ABTS$^+$自由基清除能力变化趋势基本一致，均为‘黄腊香’最高，其次是‘黄橄榄’和‘纳种’，‘香甜二号’和‘小个子’最低。本研究结果与文献 [32] 报道的‘Tan xiang’‘Xiang zhong’和‘Na zhong’橄榄品种的 DPPH 自由基清除活性（158.20~171.62 mg TE/g DW）和 ABTS$^+$自由基清除活性（93.93~113.66 mg TE/g DW）相接近。

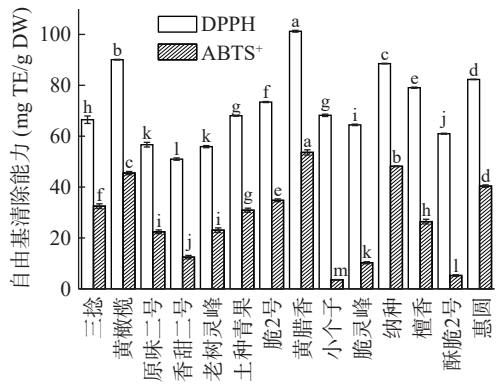



图 8 不同品种橄榄果实抗氧化能力的变化

Fig.8 Changes in antioxidant capacity of different varieties of Chinese olive fruit

### 2.8 不同品种橄榄果实酚类化合物含量比较

采用高效液相色谱法定性定量分析酚类化合物，通过标准品比对结合参考文献，从 14 个品种橄榄果实中共检测出 8 个酚类化合物（图 9），分别为没食子酸、焦性没食子酸、绿原酸、咖啡酸、阿魏酸、芦丁、槲皮素和柚皮素。其中没食子酸的平均含量为 101.48 mg/100 g DW，显著高于其他单体酚的含量（$P<0.05$）；咖啡酸的平均含量最低，只有 5.24 mg/100 g DW。‘三捻’的没食子酸和阿魏酸含量最高，分别为 229.03±12.82 mg/100 g DW、22.44±2.28 mg/100 g DW；焦性没食子酸含量最高的是‘黄橄榄’，为 253.42±19.45 mg/100 g DW，含量最低是‘檀香’，为 22.50±5.45 mg/100 g DW；绿原酸和柚皮素含量最高的是‘土种青果’，分别为 31.72±6.55 mg/100 g DW 和 38.34±5.74 mg/100 g DW，含量最低的分别是‘小个子’和‘三捻’。‘黄腊香’的咖啡酸和芦丁含量最高，分别为 12.53±4.68 mg/100 g DW 和 170.08±27.81 mg/100 g DW，明显高于其他品种；槲皮素含量最高的是‘小个子’，为 12.91±0.60 mg/100 g DW，含量最低是‘三捻’。林玉芳[33]报道 20 个品种橄榄果实中含有 12 种单体酚，本研究结果与其中的没食子酸（1.92~14.67 mg/100 g DW）、绿原酸（7.45~135.31 mg/100 g DW）、咖啡酸（2.86~27.55 mg/100 g DW）、芦丁（96.39~490.14 mg/100 g DW）、阿魏酸（2.41~119.71 mg/100 g DW）、槲皮素（0.00~5.22 mg/100 g DW）含量相接近。

### 2.9 不同品种橄榄果实抗氧化特性与活性物质相关性分析

由图 10 可知，不同品种橄榄果实中的总酚和总黄酮含量以及没食子酸、绿原酸和咖啡酸的含量与 DPPH、ABTS$^+$自由基清除能力均呈显著正相关（$P<0.05$），总酚含量与 DPPH、ABTS$^+$自由基清除能力的相关系数分别是 0.529、0.523；总黄酮含量与 DPPH 自由基清除能力呈极显著正相关（$P<0.01$），相关系数是 0.676，与 ABTS$^+$自由基清除能力呈显著正相关（$P<0.05$），相关系数是 0.311；没食子酸、绿原酸、咖啡酸、芦丁和槲皮素的含量与 DPPH 自由基清除能力均呈显著正相关（$P<0.05$），相关系数分别

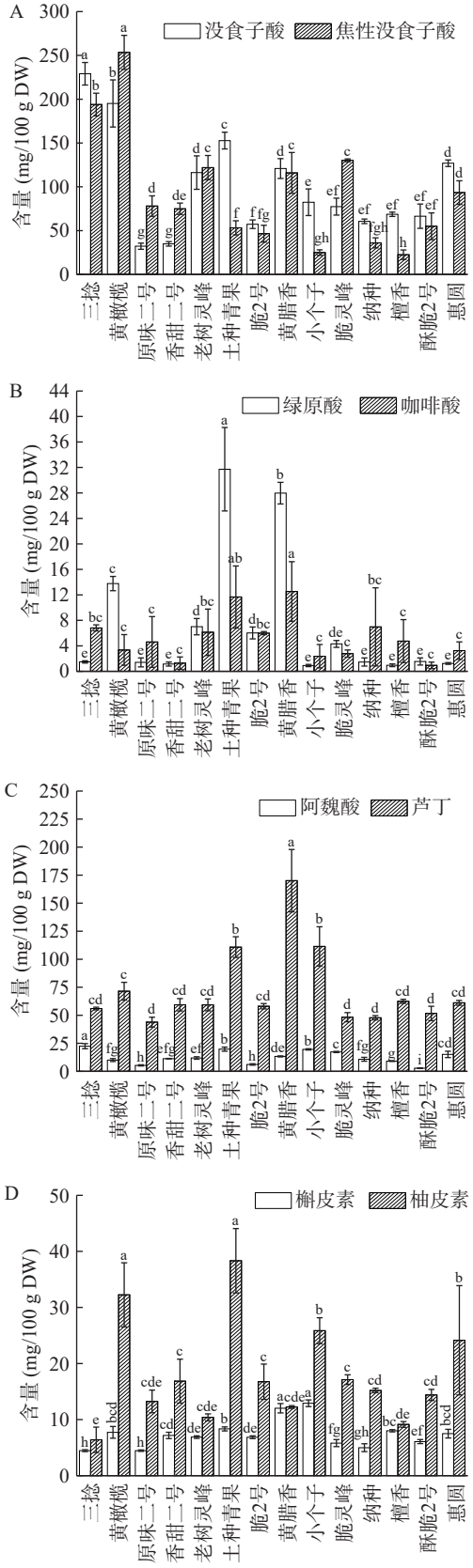



图 9　不同品种橄榄果实单体酚种类及含量

Fig.9　Types and contents of monomer phenols in different varieties of Chinese olive fruit

是 0.309、0.398、0.366、0.486 和 0.376；没食子酸、焦性没食子酸、绿原酸和咖啡酸的含量与 ABTS⁺自由基清除能力均呈显著正相关（$P$<0.05），相关系数分别是 0.414、0.317、0.446 和 0.515，说明酚类物质是

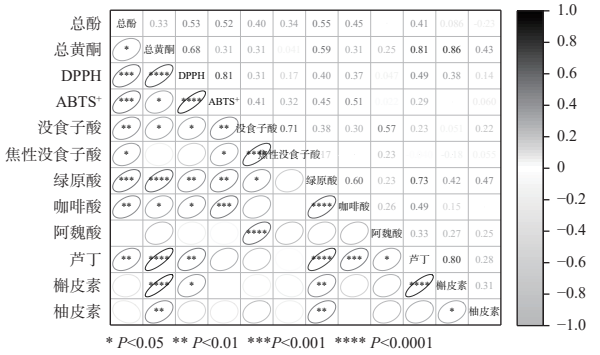



图 10　橄榄抗氧化特性与活性物质之间的相关性

Fig.10　Correlation between antioxidant properties and active substances of Chinese olive

橄榄果实抗氧化能力的主要物质。橄榄果实提取物的总多酚和总黄酮含量与 DPPH、ABTS⁺自由基清除能力表现出良好的相关性[34−35]。

酚类物质是植物重要的次生代谢产物，与水果的成熟衰老、色泽变化以及抗氧化活性密切相关，是水果中一种主要的天然抗氧化剂[36]。酚类物质与抗氧化能力的动态协同变化对其加工功能特性具有关键调控作用[37]。例如‘黄腊香’‘檀香’和‘纳种’等品种，总酚、总黄酮含量较高及富含没食子酸、绿原酸等多种酚类活性成分，且抗氧化性较强，可针对性提取活性成分制备功能性配料产品。

## 2.10　不同品种橄榄品质的主成分分析

2.10.1　主成分因子的选择　由于不同品种橄榄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[38]，以 14 个样品的 33 个品质指标构成 33×14 矩阵进行主成分分析，根据特征值大于 1.0、累积方差贡献率大于 80% 的原则确定主成分的个数[39]。由表 2 可知，主成分 1、2、3、4、5 的特征值均大于 1.0，主成分 5 的特征值为 2.130，累计方差贡献率达到 81.236%，综合了橄榄品质指标的大部分信

表 2　14 个品种橄榄果实品质指标主成分分析的特征值及方差贡献率

Table 2　Eigenvalues and variance contribution of the principal component analysis of fruit quality indexes of 14 varieties of Chinese olive

| 主成分 | 特征值 | 贡献率(%) | 累计贡献率(%) |
|---|---|---|---|
| 1 | 12.629 | 38.270 | 38.270 |
| 2 | 6.571 | 19.913 | 58.183 |
| 3 | 3.010 | 9.120 | 67.303 |
| 4 | 2.467 | 7.477 | 74.780 |
| 5 | 2.130 | 6.456 | 81.236 |
| 6 | 1.911 | 5.792 | 87.028 |
| 7 | 1.252 | 3.795 | 90.823 |
| 8 | 0.960 | 2.909 | 93.732 |
| 9 | 0.720 | 2.182 | 95.914 |
| 10 | 0.652 | 1.977 | 97.891 |
| 11 | 0.323 | 0.980 | 98.870 |
| 12 | 0.257 | 0.779 | 99.649 |
| 13 | 0.116 | 0.351 | 100 |

息，因此可以选取前 5 个主成分（PC）代替上述的 33 个品质指标对不同品种橄榄品质进行评价。

表 3 为不同品种橄榄果实品质指标的主成分载荷矩阵，数据表示的是所提取的各主成分对原始变量的影响程度。结合表 2 和表 3，第一主成分的方差贡献率为 38.270%，单果重、果实横径、$a^*$、$h$ 在第一主成分上有较大的载荷，其权重系数分别为 0.847、0.906、0.909、0.877，主要包含了果实外形特征、果皮颜色等方面的信息；第二主成分的方差贡献率为 19.913%，总糖、糖酸比、总黄酮含量在第二主成分上有较大的载荷，主要包含了总糖、黄酮类物质等方面的信息；第三主成分的方差贡献率为 9.120%，pH、可食率、总酚、DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力在第三主成分上有较大的载荷，主要包含了果实可食率和抗氧化能力等方面的信息；第四主成分的方差贡献率为 7.477%，果皮硬度、果肉硬度在第四主成分上有较大的载荷，主要包含了果实质构特性等方面的信息；第五主成分的方差贡献率为 6.456%，绿原酸、咖啡酸和阿魏酸含量在第五主成分上有较大的载荷，主要包含了果实酚类活性物质等方面的信息。在上述分析结果表明，前 5 个主成分综合反映了橄榄果实大部分品质指标的信息，在橄榄加工适宜性品质筛选工作中作为重要参考依据。

表 3　14 个品种橄榄果实品质指标的主成分载荷矩阵

Table 3　Principal component loadings matrix of fruit quality indexes of 14 Chinese olive varieties

| 品质指标 | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 | PC5 |
|---|---|---|---|---|---|
| 单果重 | 0.847 | 0.283 | −0.12 | −0.13 | 0.291 |
| 果实纵径 | 0.115 | 0.787 | 0.264 | −0.219 | 0.295 |
| 果实横径 | 0.906 | 0.084 | −0.182 | −0.19 | 0.226 |
| 果形指数 | −0.772 | 0.476 | 0.382 | 0.023 | −0.026 |
| 可食率 | 0.667 | 0.213 | −0.487 | −0.176 | −0.307 |
| 出核率 | −0.667 | −0.213 | 0.487 | 0.176 | 0.307 |
| 含水率 | −0.849 | 0.064 | −0.296 | −0.181 | 0.262 |
| $L^*$ | 0.699 | 0.481 | 0.226 | −0.239 | 0.121 |
| $a^*$ | 0.909 | 0.052 | 0.192 | −0.045 | −0.321 |
| $b^*$ | 0.679 | 0.613 | −0.003 | −0.069 | −0.209 |
| $h$ | 0.877 | 0.068 | 0.351 | −0.052 | −0.236 |
| $C$ | 0.695 | 0.584 | 0.001 | −0.081 | −0.236 |
| 果皮硬度 | 0.3 | 0.123 | 0.07 | 0.715 | −0.269 |
| 果皮脆性 | 0.65 | −0.027 | −0.251 | −0.318 | −0.007 |
| 果肉硬度 | 0.514 | −0.095 | 0.099 | 0.757 | −0.311 |
| 果肉脆性 | 0.673 | 0.15 | −0.21 | 0.423 | 0.493 |
| pH | −0.549 | 0.288 | 0.619 | 0.23 | −0.125 |
| TSS | 0.665 | −0.167 | 0.256 | 0.099 | 0.063 |
| 总糖 | 0.115 | 0.783 | −0.012 | 0.384 | 0.141 |
| 总酸 | 0.576 | 0.04 | 0.272 | 0.414 | 0.018 |
| 糖酸比 | −0.021 | 0.761 | −0.083 | 0.261 | 0.148 |
| 总酚 | 0.621 | −0.083 | 0.526 | −0.036 | 0.171 |
| 总黄酮 | 0.45 | −0.83 | 0.037 | 0.009 | −0.25 |
| DPPH | 0.653 | −0.394 | 0.434 | −0.252 | −0.193 |
| $ABTS^+$ | 0.703 | −0.036 | 0.486 | −0.256 | 0.115 |
| 没食子酸 | 0.852 | 0.053 | −0.296 | 0.179 | 0.126 |
| 焦性没食子酸 | 0.664 | 0.311 | −0.261 | −0.136 | −0.166 |
| 绿原酸 | 0.435 | −0.62 | 0.193 | 0.023 | 0.405 |
| 咖啡酸 | 0.545 | −0.334 | 0.295 | 0.006 | 0.584 |
| 阿魏酸 | 0.439 | −0.198 | −0.551 | 0.379 | 0.379 |
| 芦丁 | 0.39 | −0.825 | 0.018 | −0.077 | 0.123 |
| 槲皮素 | 0.123 | −0.863 | −0.107 | 0.067 | −0.23 |
| 柚皮素 | 0.021 | −0.568 | −0.156 | 0.221 | 0.019 |

2.10.2　不同品种橄榄品质性状的综合评价　利用主成分载荷矩阵（表 3）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 5 个主成分中各指标所对应的系数即特征向量，设 5 个主成分得分依次为 $Y_1$、$Y_2$、$Y_3$、$Y_4$、$Y_5$，以特征向量为权重，根据标准化后的各指标计算各主成分得分，5 个主成分的得分表达式如下所示：

$$Y_1=0.238\times Z_{单果重}+0.032\times Z_{果实纵径}+0.255\times Z_{果实横径}-0.217\times Z_{果形指数}+0.188\times Z_{可食率}-0.188\times Z_{出核率}-0.239\times Z_{含水率}+0.197\times Z_{L^*}+0.256\times Z_{a^*}+0.191\times Z_{b^*}+0.247\times Z_h+0.196\times Z_C+0.084\times Z_{果皮硬度}+0.183\times Z_{果皮脆性}+0.145\times Z_{果肉硬度}+0.189\times Z_{果肉脆性}-0.154\times Z_{pH}+0.187\times Z_{TSS}+0.032\times Z_{总糖}+0.162\times Z_{总酸}-0.006\times Z_{糖酸比}+0.175\times Z_{总酚}+0.127\times Z_{总黄酮}+0.184\times Z_{DPPH}+0.198\times Z_{ABTS^+}+0.240\times Z_{没食子酸}+0.187\times Z_{焦性没食子酸}+0.122\times Z_{绿原酸}+0.153\times Z_{咖啡酸}+0.124\times Z_{阿魏酸}+0.110\times Z_{芦丁}+0.035\times Z_{槲皮素}+0.006\times Z_{柚皮素}$$

$$Y_2=0.110\times Z_{单果重}+0.307\times Z_{果实纵径}+0.033\times Z_{果实横径}+0.186\times Z_{果形指数}+0.083\times Z_{可食率}-0.083\times Z_{出核率}+0.025\times Z_{含水率}+0.188\times Z_{L^*}+0.020\times Z_{a^*}+0.239\times Z_{b^*}+0.027\times Z_h+0.228\times Z_C+0.048\times Z_{果皮硬度}-0.011\times Z_{果皮脆性}-0.037\times Z_{果肉硬度}+0.059\times Z_{果肉脆性}+0.112\times Z_{pH}-0.065\times Z_{TSS}+0.305\times Z_{总糖}+0.016\times Z_{总酸}+0.297\times Z_{糖酸比}-0.032\times Z_{总酚}-0.324\times Z_{总黄酮}-0.154\times Z_{DPPH}-0.014\times Z_{ABTS^+}+0.021\times Z_{没食子酸}+0.121\times Z_{焦性没食子酸}-0.242\times Z_{绿原酸}-0.130\times Z_{咖啡酸}-0.077\times Z_{阿魏酸}-0.322\times Z_{芦丁}-0.337\times Z_{槲皮素}-0.222\times Z_{柚皮素}$$

$$Y_3=-0.069\times Z_{单果重}+0.152\times Z_{果实纵径}-0.105\times Z_{果实横径}+0.220\times Z_{果形指数}-0.281\times Z_{可食率}+0.281\times Z_{出核率}-0.171\times Z_{含水率}+0.130\times Z_{L^*}+0.111\times Z_{a^*}-0.002\times Z_{b^*}+0.202\times Z_h+0.001\times Z_C+0.040\times Z_{果皮硬度}-0.145\times Z_{果皮脆性}+0.057\times Z_{果肉硬度}-0.121\times Z_{果肉脆性}+0.357\times Z_{pH}+0.148\times Z_{TSS}-0.007\times Z_{总糖}+0.157\times Z_{总酸}-0.048\times Z_{糖酸比}+0.303\times Z_{总酚}+0.021\times Z_{总黄酮}+0.250\times Z_{DPPH}+0.280\times Z_{ABTS^+}-0.171\times Z_{没食子酸}-0.150\times Z_{焦性没食子酸}+0.111\times Z_{绿原酸}+0.170\times Z_{咖啡酸}-0.318\times Z_{阿魏酸}+0.010\times Z_{芦丁}-0.062\times Z_{槲皮素}-0.090\times Z_{柚皮素}$$

$$Y_4=-0.083\times Z_{单果重}-0.139\times Z_{果实纵径}-0.121\times Z_{果实横径}+0.015\times Z_{果形指数}-0.112\times Z_{可食率}+0.112\times Z_{出核率}-0.115\times Z_{含水率}-0.152\times Z_{L^*}-0.029\times Z_{a^*}-0.044\times Z_{b^*}-0.033\times Z_h-0.052\times Z_C+0.455\times Z_{果皮硬度}-0.202\times Z_{果皮脆性}+0.482\times Z_{果肉硬度}+0.269\times Z_{果肉脆性}+0.146\times Z_{pH}+0.063\times Z_{TSS}+0.244\times Z_{总糖}+0.264\times Z_{总酸}+0.166\times Z_{糖酸比}-0.023\times Z_{总酚}+0.006\times Z_{总黄酮}-0.160\times Z_{DPPH}-0.163\times Z_{ABTS^+}+0.114\times Z_{没食子酸}-0.087\times Z_{焦性没食子酸}+$$

$0.015\times Z_{绿原酸}+0.004\times Z_{咖啡酸}+0.241\times Z_{阿魏酸}-0.049\times Z_{芦丁}+0.043\times Z_{槲皮素}+0.141\times Z_{柚皮素}$

$Y_5=0.199\times Z_{单果重}+0.202\times Z_{果实纵径}+0.155\times Z_{果实横径}-0.018\times Z_{果形指数}-0.210\times Z_{可食率}+0.210\times Z_{出核率}+0.180\times Z_{含水率}+0.083\times Z_{L*}-0.220\times Z_{a*}-0.143\times Z_{b*}-0.162\times Z_{h}-0.162\times Z_{C}-0.184\times Z_{果皮硬度}-0.005\times Z_{果皮脆性}-0.213\times Z_{果肉硬度}+0.338\times Z_{果肉脆性}-0.086\times Z_{pH}+0.043\times Z_{TSS}+0.097\times Z_{总糖}+0.012\times Z_{总酸}+0.101\times Z_{糖酸比}+0.117\times Z_{总酚}-0.171\times Z_{总黄酮}-0.132\times Z_{DPPH}+0.079\times Z_{ABTS^+}+0.086\times Z_{没食子酸}-0.114\times Z_{焦性没食子酸}+0.277\times Z_{绿原酸}+0.400\times Z_{咖啡酸}+0.260\times Z_{阿魏酸}+0.084\times Z_{芦丁}-0.158\times Z_{槲皮素}+0.013\times Z_{柚皮素}$

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：$Y=0.38270\times Y_1+0.19913\times Y_2+0.09120\times Y_3+0.07477\times Y_4+0.06456\times Y_5$，根据主成分综合得分模型，

表 4　橄榄品质指标的主成分得分、综合得分及排序

Table 4　Principal component scores, comprehensive scores and ranking of Chinese olive quality indicators

| 品种 | $Y_1$ | $Y_2$ | $Y_3$ | $Y_4$ | $Y_5$ | 综合得分(Y) | 排名 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 三捻 | 6.265 | 4.113 | −2.482 | 0.561 | 1.296 | 3.116 | 1 |
| 黄橄榄 | 5.481 | −0.245 | −0.364 | −0.246 | −2.997 | 1.804 | 2 |
| 原味二号 | −3.223 | 2.720 | 1.154 | −0.413 | −0.192 | −0.630 | 9 |
| 香甜二号 | −4.910 | 0.418 | −0.952 | −0.163 | −0.130 | −1.903 | 13 |
| 老树灵峰 | 0.112 | 2.745 | −0.922 | 0.285 | 0.396 | 0.552 | 6 |
| 土种青果 | 0.652 | −3.666 | 0.152 | 2.473 | 3.054 | −0.085 | 8 |
| 脆2号 | −3.329 | −0.477 | 0.969 | −0.877 | 0.508 | −1.313 | 11 |
| 黄腊香 | 5.136 | −4.309 | 1.780 | −2.381 | 0.574 | 1.129 | 3 |
| 小个子 | −2.072 | −4.329 | −3.623 | 0.695 | −1.676 | −2.042 | 14 |
| 脆灵峰 | −1.900 | 0.460 | −0.821 | 0.262 | 0.599 | −0.652 | 10 |
| 纳种 | 1.002 | 1.096 | 0.706 | −1.856 | 0.392 | 0.553 | 5 |
| 檀香 | 0.206 | 0.472 | 3.125 | 3.441 | −1.826 | 0.597 | 4 |
| 酥脆2号 | −3.682 | 0.139 | 0.026 | −1.736 | −0.345 | −1.531 | 12 |
| 惠圆 | 0.262 | 0.864 | 1.253 | −0.046 | 0.349 | 0.406 | 7 |

计算出 14 个品种橄榄的综合得分和排序结果如表 4 所示。分析发现，‘三捻’‘黄橄榄’和‘黄腊香’在单果重、果实横径、$a^*$、$h$ 等指标上表现较佳；‘三捻’和‘老树灵峰’的总糖含量、糖酸比、总黄酮含量较高；‘檀香’‘黄腊香’和‘惠圆’在 pH、总酚、DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力等指标上表现突出；‘檀香’和‘土种青果’的果皮硬度、果肉硬度较高；‘三捻’‘土种青果’和‘脆灵峰’的绿原酸、咖啡酸和阿魏酸含量较高。综合评价结果表明，‘三捻’评分最高，表明其综合品质优于其他品种。

### 2.11　不同品种橄榄聚类分析与加工适宜性

对橄榄 33 项品质指标数据进行 Z-score 标准化处理，采用 Ward 法对橄榄品种进行系统聚类分析，结果如图 11 所示，14 个品种橄榄主要聚为两类：‘三捻’‘黄橄榄’和‘黄腊香’为第一类，特点是果实较大、色泽鲜亮、可食率较高，适宜加工成橄榄果汁、果浆等制品；‘原味二号’‘香甜二号’和‘脆 2 号’等 11 个品种为第二类，果实较小、可食率较低，其中‘檀香’高硬度、高脆性、高酸度适宜于整果腌制，制作果脯、蜜饯等，高糖酸比品种（如‘老树灵峰’和‘脆灵峰’）适宜鲜食或发酵（如果酒、醋）等；‘纳种’和‘土种青果’等品种，总酚、总黄酮含量较高，富含绿原酸、槲皮素等多种酚类活性成分，且抗氧化活性较强，可针对性提取活性成分制备功能性配料产品。

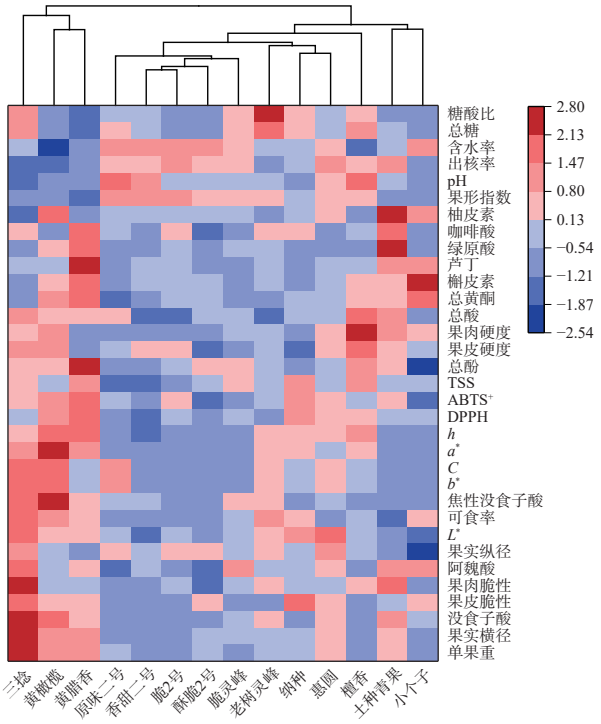



图 11　不同品种橄榄聚类分析热图

Fig.11　Heat map of cluster analysis of different varieties of Chinese olive

## 3　结论

本研究系统分析了 14 个品种橄榄的一般性状、质构特性、酚类物质含量和抗氧化活性等品质指标，发现不同品种橄榄果实在品质指标上存在显著差异。主成分分析法共提取出 5 个主成分，累计方差贡献率达到 81.236%，其中第 1 主成分（果实性状和色泽）和第 2 主成分（总糖和糖酸比）在橄榄品种评价方面占据着主要作用，得出 14 个橄榄品种的综合品质评价排序从高到低依次为：‘三捻’‘黄橄榄’‘黄腊香’‘檀香’‘纳种’‘老树灵峰’‘惠圆’‘土种青果’‘原味二号’‘脆灵峰’‘脆 2 号’‘酥脆 2 号’‘香甜二号’和‘小个子’。聚类分析法将橄榄品种划分为两大类：第一类品种的特性适宜鲜食或加工成果汁、果浆等制品；第二类品种则呈现多样化加工潜力，其中‘檀香’等适宜于整果腌制，制作果脯、蜜饯等，‘老树灵峰’和‘脆灵峰’等同样可鲜食，也能加工为发酵制品；‘纳种’和‘土种青果’等，可用于提取活性成分制备功能性配料产品。本研究结果可为橄榄鲜食或加工品种的筛选提供参考，为我国橄榄资源的综合开发利用提供科学的依据。但是，对橄榄原料以及加工制品的风味形成机理还不清楚，需进一步深入研究。

© The Author(s) 2026. 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] 杨洛萍. 青果化学成分及其抗病毒活性研究[D]. 广州: 南方医科大学, 2018. [YANG Luoping. Study on chemical constituents and antiviral activity of olive[D]. Guangzhou: Southern Medical University, 2018.]

[2] 刘强, 孙云, 侯帅, 等. 橄榄多酚成分鉴定及生物活性的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(9): 213−223. [LIU Qiang, SUN Yun, HOU Shuai, et al. Research progress on identification of olive polyphenol components and their biological activities[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2024, 39(9): 213−223.]

[3] YU Kuo, WANG Yan, HU Wenjing, et al. Chinese olive (*Canarium album* Rauesch.): A critical review on its nutritional value, phytochemical composition, health benefits, and practical applications[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1275113.

[4] 贲锦华, 彭欣雨, 王嘉颖, 等. 大曲发酵橄榄茶制备工艺的响应面优化及其抑制消化酶活性研究[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 63−69. [BEN Jinhua, PENG Xinyu, WANG Jiaying, et al. Optimization of fermentation technology of daqu fermented olive tea by response surface method and its inhibit activity on digestive enzyme[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 63−69.]

[5] 任思琪, 蒋璇靓, 林艺芬, 等. 橄榄加工技术和综合利用研究进展[J]. 包装与食品机械, 2015, 33(5): 46−50,70. [REN Siqi, JIANG Xuanliang, LIN Yifen, et al. Advances in processing technology and integrated utilization of Chinese olive[J]. Packaging and Food Machinery, 2015, 33(5): 46−50,70.]

[6] 赖瑞联, 陈瑾, 冯新, 等. 橄榄 ISSR 和 RAPD 遗传多样性分析和核心种质构建[J]. 热带亚热带植物学报, 2022, 30(1): 41−53. [LAI Ruilian, CHEN Jin, FENG Xin, et al. ISSR and RAPD gene tic diversity analysis and core germplasms construction of *Canarium album*[J]. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2022, 30(1): 41−53.]

[7] 谢倩, 赵晴晴, 江来, 等. 橄榄果实表型性状分级及挥发性化合物鉴定与特征香气分析[J]. 食品科学, 2024, 45(10): 175−185. [XIE Qian, ZHAO Qingqing, JIANG Lai, et al. Classification of phenotypic traits, identification of volatile compounds and characteristic aroma analysis of *Canarium album* fruit[J]. Food Science, 2024, 45(10): 175−185.]

[8] YEH Y T, CHEN C K, LIAO Y C, et al. Analysis and identification of phenolic compounds with antiproliferative activity from Chinese olive (*Canarium album* L.) fruit extract by HPLC-DAD-SPE-TT-NMR[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2023, 31(4): 639−648.

[9] 刘芸彤. 青果多酚的提取及其抗衰老活性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024. [LIU Yuntong. Study on extraction and anti-aging activity of polyphenols from *Canarii fructus*[D]. Changchun: Jilin University, 2024.]

[10] 丁云爽, 李云龙, 张超华, 等. 不同成熟阶段胡椒鲜果的理化特性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 9−16. [DING Yunshuang, LI Yunlong, ZHANG Chaohua, et al. Phytochemical properties of fresh pepper berries at different stages of maturity[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 9−16.]

[11] 张诗艳. 橄榄果实硬度差异的组织结构和细胞壁组分分析[D]. 福州: 福建农林大学, 2023. [ZHANG Shiyan. Analysis of tissue structure and cell wall components of different hardness Chinese olive (*Canarium album* L.) fruits[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2023.]

[12] YUE Fangfang, ZHANG Jinrui, XU Jiaxin, et al. Effects of monosaccharide composition on quantitative analysis of total sugar content by phenol-sulfuric acid method[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 963318.

[13] AKTAS A B, OZEN B, TOKATLI F, et al. Phenolics profile of a naturally debittering olive in comparison to regular olive varieties[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(4): 691−698.

[14] LI Yuman, ZHANG Qing, FANG Qi, et al. A novel ultrasound-assisted enzyme extraction method of total flavonoids from *Viticis* Fructus and processed *Viticis* Fructus: Comparison of *in vitro* antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 110: 107045.

[15] SOKÓŁ-ŁĘTOWSKA A, KUCHARSKA A Z, WIŃSKA K, et al. Composition and antioxidant activity of red fruit liqueurs[J]. Food Chemistry, 2014, 157: 533−539.

[16] FOSS K, PRZYBYŁOWICZ K E, SAWICKI T. Antioxidant activity and profile of phenolic compounds in selected herbal plants[J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2022, 77(3): 383−389.

[17] SHENG Fang, HU Bangyan, JIN Qiang, et al. The analysis of phenolic compounds in walnut husk and pellicle by UPLC-Q-Orbitrap HRMS and HPLC[J]. Molecules, 2021, 26(10): 3013.

[18] 常强. 橄榄果实酚类物质及其抗氧化活性研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017. [CHANG Qiang. Investigation of polyphenol compounds and their antioxidant activity in the fruits of Chinese olive[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]

[19] LANZA B, Di MARCO S, SIMONE N, et al. Table olives fermented in iodized sea salt brines: Nutraceutical/sensory properties and microbial biodiversity[J]. Foods, 2020, 9(3): 301.

[20] 周星玥, 黄雅珏, 马蕾, 等. 不同种类鲜食玉米改善面包感官及营养品质的研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(18): 164−173. [ZHOU Xingyue, HUANG Yajue, MA Lei, et al. Study on improving the sensory and nutritional quality of bread with different kinds of fresh corn[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(18): 164−173.]

[21] CHANG Qiang, SU Minghua, CHEN Qingxi, et al. Physicochemical properties and antioxidant capacity of Chinese olive (*Canarium album* L.) cultivars[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(6): 1369−1377.

[22] 马舒睿, 迟福梅, 宋杨. 果树果实着色的分子调控机制研究进展[J]. 果树学报, 2025, 42(8): 1851−1870. [MA Shurui, CHI Fumei, SONG Yang. Research advances in the molecular regulatory mechanisms of fruit color-ation in fruit trees[J]. Journal of Fruit Science, 2025, 42(8): 1851−1870.]

[23] 肖维强, 刘传滨, 匡石滋, 等. 广东鲜食橄榄果实质构特性比较[J]. 中国农学通报, 2022, 38(16): 132−138. [XIAO Weiqiang, LIU Chuanbin, KUANG Shizi, et al. A comparison study on fruit texture quality of fresh *Canarium album* fruits in Guangdong[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(16): 132−138.]

[24] 孟千杰, 徐玉娟, 吴继军, 等. 不同品种水晶梨果实品质特性综合分析[J]. 现代食品科技, 2025, 41(6): 216−225. [MENG Qianjie, XU Yujuan, WU Jijun, et al. Comprehensive analysis of fruit quality characteristics of different varieties of crystal pear[J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(6): 216−225.]

[25] 叶倩倩. 地理标志产品福州橄榄品质检测与差异性评价

［J］. 东南园艺，2023，11(4)：265−270. ［YE Qianqian. Quality inspection and differential evaluation of Fuzhou olives as geographical indication products［J］. Southeast Horticulture，2023，11(4)：265−270.］
［26］池毓斌，朱丽娟，黄敏杰，等. 鲜食橄榄品质综合评价模型的建立与验证［J］. 果树学报，2017，34(8)：1051−1060. ［CHI Yubin，ZHU Lijuan，HUANG Minjie，et al. Establishment and verification of a comprehensive evaluation model for quality of fresh Chinese olive［J］. Journal of Fruit Science，2017，34(8)：1051−1060.］
［27］GERALDI M V，BETIM C C B，DIAS-AUDIBERT F L，et al. Influence of high isostatic pressure and thermal pasteurization on chemical composition，color，antioxidant properties and sensory evaluation of jabuticaba juice［J］. LWT，2021，139：110548.
［28］郑自奋，陈晓维，邹波，等. 不同品种余甘子果实营养成分分析及加工特性评价［J］. 现代食品科技，2024，40(7)：166−176. ［ZHENG Zifen，CHEN Xiaowei，ZOU Bo，et al. Analysis of the nutritional components and evaluation of the processing characteristics of different varieties of *Phyllanthus emblica* L. fruit［J］. Modern Food Science & Technology，2024，40(7)：166−176.］
［29］赖瑞联，冯新，陈瑾，等. 福州 3 个鲜食橄榄品种(系)的果实品质特征与香气组分分析［J］. 食品科学，2020，41(6)：231−238. ［LAI Ruilian，FENG Xin，CHEN Jin，et al. Quality characteristics and aroma components of three fresh edible cultivars of *Canarium album* grown in Fuzhou［J］. Food Science，2020，41(6)：231−238.］
［30］谢倩，李易易，张诗艳，等. 基于模糊数学感官评价、理化特性与电子舌的橄榄鲜食品质分析［J］. 食品科学，2023，44(3)：69−78. ［XIE Qian，LI Yiyi，ZHANG Shiyan，et al. Quality analysis of table *Cauarium album* L. based on fuzzy mathematics sensory evaluation，physicochemical properties and electronic tongue［J］. Food Science，2023，44(3)：69−78.］
［31］张向争. 不同类型橄榄(*Canarium album*)果实品质与木质素组分研究［D］. 福州：福建农林大学，2023. ［ZHANG Xiangzheng. Study on the quality and lignin components of different types of Chinese olive (*Canarium album*) fruit［D］. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2023.］
［32］HE Fangqing，DU Yixuan，PAN Zhuangguang，et al. The composition of phenolic compounds in Chinese olive (*Canarium album* L.) cultivars and their contribution to the anti-inflammatory properties of the cultivars［J］. Frontiers in Nutrition，2024，11：1334077.
［33］林玉芳. 福建橄榄(*Canarium album*(Lour.)raeusch.)若干功能成分和品质相关指标的研究［D］. 福州：福建农林大学，2012. ［LIN Yufang. Study on some functional components and quality-related indexes of Fujian olive (*Canarium album*(Lour.)Raeusch.)［D］. Fuzhou：Fujian Agriculture and Forestry University，2012.］
［34］吴晓青，刘永静，孙燕丽. 低共熔溶剂提取橄榄多酚及其抗氧化活性评价［J］. 食品工业，2023，44(6)：80−86. ［WU Xiaoqing，LIU Yongjing，SUN Yanli. Optimization of deep eutectic solvent extraction process and evaluation of antioxidant activity of olive polyphenols［J］. The Food Industry，2023，44(6)：80−86.］
［35］KUO C T，LIU T H，HSU T H，et al. Antioxidant and antiglycation properties of different solvent extracts from Chinese olive (*Canarium album* L.) fruit［J］. Asian Pacific Journal of Tropical Medicine，2015，8(12)：1013−1021.
［36］秦靖欣，杨志伟. 杨桃多酚的提取工艺优化及其抗氧化活性评价［J］. 食品工业科技，2025，46(23)：283−292. ［QIN Jingxin，YANG Zhiwei. Optimization of extraction technology and antioxidant activity evaluation of polyphenols from *Averrhoa carambola* L.［J］. Science and Technology of Food Industry，2025，46(23)：283−292.］
［37］徐莹，王文月，李旋，等. 不同贮藏时间‘黄太平’沙果品质评价及加工适宜性研究［J］. 食品工业科技，2026，47(5)：315−327. ［XU Ying，WANG Wenyue，LI Xuan，et al. Evaluation of quality and processing suitability of 'Huang Taiping' crabapples during different storage periods［J］. Science and Technology of Food Industry，2026，47(5)：315−327.］
［38］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. ［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.］
［39］肖新生，周文君，奉美桃，等. 基于主成分分析的不同干燥方式对江永香姜营养品质和抗氧化活性的影响［J］. 食品工业科技，2024，45(23)：310−321. ［XIAO Xinsheng，ZHOU Wenjun，FENG Meitao，et al. Effect of different drying method on the nutritional quality and antioxidant activity of Jiangyong fragrant ginger based on principal component analysis［J］. Science and Technology of Food Industry，2024，45(23)：310−321.］