刘若男, 谭春生, 高建有, 等. 6 种油茶籽油特征香气物质分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 326−335. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060240

LIU Ruonan, TAN Chunsheng, GAO Jianyou, et al. Analysis of Characteristic Aroma Compounds in Six *Camellia oleifera* Seed Oils[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 326−335. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025060240

· 分析检测 ·

# 6 种油茶籽油特征香气物质分析

刘若男[1,2], 谭春生[3], 高建有[1], 叶开玉[1], 朱荣香[1], 夏黎明[1], 刘翠霞[1,*], 王发明[1,*]

（1.广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所, 广西植物功能物质研究与利用重点实验室, 广西桂林 541006;
2.吉首大学生物资源与环境科学学院, 湖南吉首 416000;
3.桂林市茶花岛花卉种源有限公司, 广西桂林 541006）

**摘　要:** 为筛选香气品质优良的油茶资源，以‘岑软 2 号’作为对照，比较冷榨法提取的 6 种油茶籽油香气成分，并结合香气雷达图、相对气味活度值和主成分分析进行综合评价。结果表明：6 种实生优株茶籽油香气品质均优于‘岑软 2 号’。研究共鉴定出 30 种香气物质。其中‘黑籽 2 号’香气种类最丰富且总含量最高，其醛类物质（以糠醛为主）含量显著高于其他油茶籽油；‘大果’、‘黑籽 1 号’和‘黑籽 2 号’吡嗪类物质含量较高且相近，均富含 2-甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪；‘岑软 2 号’各类香气物质种类及含量均较低。香气雷达图显示：‘黑籽 2 号’兼具杏仁香、烤坚果香、花果香和青草香，香气浓郁且香型丰富；‘大果’以果香为主，‘黑籽 1 号’侧重烤坚果香与花果香，‘黑籽 3 号’和‘高油’以果香为主，‘红花 1 号’虽呈花香、果香、杏仁香和烤坚果香，但不如‘黑籽 2 号’浓郁。主成分分析（principal component analysis，PCA）表明‘黑籽 2 号’综合得分最高，其次为‘黑籽 1 号’和‘大果’。综上，6 种实生优株均具优良香气品质，其中‘黑籽 2 号’可作为香型油茶品种选育的优质材料。

**关键词:** 油茶, 实生优株, 油茶籽油, 香气品质, 气相色谱-质谱联用（GC-MS）

**中图分类号:** Q949.93　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0326−10

**DOI:** 10.13386/j.issn1002-0306.2025060240

本文网刊:

# Analysis of Characteristic Aroma Compounds in Six *Camellia oleifera* Seed Oils

**LIU Ruonan[1,2], TAN Chunsheng[3], GAO Jianyou[1], YE Kaiyu[1], ZHU Rongxiang[1], XIA Liming[1], LIU Cuixia[1,*], WANG Faming[1,*]**

（1.Guangxi Key Laboratory of Functional Phytochemicals Research and Utilization, Guangxi Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China;
2.College of Biology and Environmental Science, Jishou University, Jishou 416000, China;
3.Guilin Camellia Island Floriculture Germplasm Co., Ltd., Guilin 541006, China）

**Abstract:** To screen *Camellia oleifera* germplasm resources with rich aroma profiles, the aroma components of six cold-pressed *Camellia oleifera* seed oils were compared, with 'Cenruan 2' serving as the control, and a comprehensive evaluation was conducted by integrating aroma radar charts, relative odor activity values (ROAV), and principal component analysis (PCA). The results indicated that the aroma quality of the *Camellia oleifera* seed oils derived from the six superior seedlings was superior to that of 'Cenruan 2'. A total of 30 aroma compounds were identified. Among them, 'Heizi 2' exhibited the most diverse aroma types and the highest total aroma content. Notably, its aldehyde content, predominantly furfural,

**收稿日期:** 2025−06−20

**基金项目:** 国家自然科学基金项目（32360729）; 广西自然科学基金资助（2025GXNSFBA069385）; 国家现代农业产业技术体系广西落叶果树产业创新团队（nycytxgxcxtd-2023-13-01）; 广西科技重大专项（桂科 AA23023008）。

**作者简介:** 刘若男（2002−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 果实香气品质形成机制, E-mail: 15576931508@163.com。

*** 通信作者:** 刘翠霞（1987−）, 女, 博士, 研究方向: 果实香气品质形成机制, E-mail: 13366054919@163.com。

王发明（1979−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 落叶果树和特色经济植物种质资源收集评价和种质创新等, E-mail: wfm_rz@163.com。

was significantly higher than that of the other *C. oleifera* seed oils. The seed oils of 'Daguo', 'Heizi 1', and 'Heizi 2' had similar and relatively high contents of pyrazine compounds, and all were rich in 2-methylpyrazine and 2,5-dimethylpyrazine. In contrast, 'Cenruan 2' had fewer types and lower contents of all aroma compounds. The aroma radar chart indicated that 'Heizi 2' presented a combination of almond, roasted nut, floral-fruity, and grassy aroma, therefore exhibiting intense and diverse aroma characteristics; 'Daguo' was dominated by a fruity aroma; 'Heizi 1' emphasized roasted nut and floral-fruity aromas; 'Heizi 3' and 'Gaoyou' were primarily characterized by fruity aroma; 'Honghua 1' exhibited floral, fruity, almond, and roasted nut aromas, which were less intense than those of 'Heizi 2'. Principal component analysis (PCA) showed that 'Heizi 2' had the highest comprehensive score, followed by 'Heizi 1' and 'Daguo'. In conclusion, all six superior seedling strains exhibited excellent aroma quality, among which 'Heizi 2', with its rich aroma profile, can serve as high-quality material for the breeding of aroma-type *Camellia oleifera*.

**Key words:** *Camellia oleifera*; superior seedling strains; *Camellia oleifera* seed oil; aroma quality; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)

油茶(*Camellia oleifera*)为山茶科山茶属常绿乔木或小乔木,广泛分布于我国南方丘陵山区,广西、湖南、江西等省份均为油茶重要产区[1]。广义上的油茶常指山茶属植物中种子含油率超过 15% 且具有一定栽培面积和经营价值的树种统称。常见于山茶属油茶组(Sect. *Oleifera*)、短柱茶组(Sect. *Paracamellia*)、红山茶组(Sect. *Camellia*)中约 20 多种[2]。

油茶籽油是从油茶种子中提取的脂肪油,为我国传统的木本植物油,不饱和脂肪酸含量在 90% 以上,且富含多种生物活性物质,具有抗氧化、抗炎抗菌以及预防心脑血管疾病等作用,被誉为“东方橄榄油”和“食用油之王”[3−4]。近年来,油茶作为一种兼具生态效益和经济效益的作物,在国内外市场上的认知度和需求量持续提高[5]。然而,由于油茶品种间的差异及种植环境影响,油茶籽油品质参差不齐[6]。

风味是评价食用油品质和消费者选择食用油的重要依据之一,香气品质更是风味的关键组成部分[7−8]。油茶籽油的香气成分主要包括醛类、醇类、酯类、酸类、酮类和杂环类化合物,这些物质的协同作用赋予了油茶籽油独特的风味,并反映其品质差异[9]。油茶籽油风味受多种因素的综合影响,其中榨油工艺是关键因素之一。油茶籽油的榨取工艺多样,如压榨法、浸水法和萃取法等,不同榨取工艺会导致油茶籽油香气以及营养成分的显著差异[10−12]。如冷榨法常因其榨取温度较低常保留较多的营养成分和天然风味,如不饱和脂肪酸、维生素 E、醛类香气物质等,同时油的品质较高;而热榨油因其榨取温度较高,在榨取过程中会发生美拉德反应,使其杂环类化合物含量增加,从而赋予油更为浓郁的烤香味[13−15]。He等[16]对 4 种预热处理的油茶籽油风味进行研究,发现微波和油炸预热相比烘烤和蒸煮处理含有更多的吡嗪类化合物,烘烤和蒸煮处理油茶籽油则含有更高的烃类物质。此外,产地也是影响油茶籽油风味的重要因素。Zheng 等[17] 对比不同省份的油茶籽油发现海南油茶籽油含有更多的醛类物质,香气更加醇厚,推测热带气候有助于油茶籽油风味的形成。朱晓阳等[12] 对比湖南和海南油茶籽油也发现海南油茶籽油具有更浓郁的清香味。

尽管油茶籽油品种繁多并含有丰富营养成分,但与花生油、菜籽油等常见食用油相比整体风味偏淡[18−19]。食品调研显示,食用油口感风味是消费者选择产品的重要品质属性。但目前市场上缺乏香味浓郁的油茶籽油品种,在一定程度上限制了油茶籽油的市场竞争力。目前相关油茶籽油香气的研究多数集中在不同榨油工艺对其的影响上,而对不同油茶籽油进行比较以筛选香气更优油茶资源的研究较少[20]。本课题组在野外调查过程中发现了一些香气浓郁的油茶植株。通过对这些植株的实生后代进行筛选,最终选出了 6 种实生优株(‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 2 号’、‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘大果’)(图 1)。这些实生优株油茶籽油相较于其他品种香气更为浓郁,因此将其暂定义为香型油茶。此外,油茶品种‘岑软 2 号’为广西主栽油茶之一,具有丰产、稳产、油质良好、适应性广等特点[21]。本研究将 6 种香型油茶实生优株,以普通油茶品种‘岑软 2 号’作为对照,使用冷榨法进行榨油以保证其更好的天然风味。采用气相色谱–质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用技术对它们的香气物质进行检测分析,结合气味活度值(odor activity values, OAV)、相对气味活度值(relative odor activity values, ROAV)和香气特征雷达图确定不同油茶籽油中的关键香气

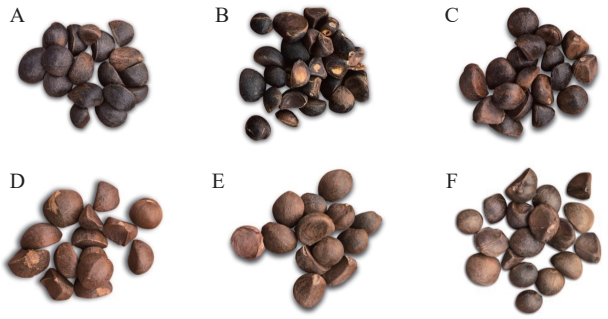



图 1　6 种实生优株油茶籽图片

Fig.1　Pictures of six superior aromatic seedling strains of *Camellia oleifera* seeds

注: A.‘黑籽 1 号’; B.‘黑籽 2 号’; C.‘黑籽 3 号’; D.‘红花 1 号’; E.‘大果’; F.‘高油’。

成分及其整体风味，再结合主成分分析（principal component analysis, PCA）比较各油茶籽油的整体风味差异，为选育香气品质优良的油茶品种提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

油茶 来自于广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所和桂林市雁山区雁山镇茶花岛花卉种源有限公司茶油基地，其中，1~6 号为香味较浓的实生优株，7 号为广西主栽茶油品种，名称、产地信息及榨油方式见表 1；无水乙醇（色谱纯） 西陇科学股份有限公司；十一烷（纯度 99 %） 上海麦克林生化科技股份有限公司。

表 1 不同品种茶油的名称、产地及榨油方式

Table 1 Names, origins and oil extraction methods of different *Camellia oleifera* oils

| 编号 | 样品名称 | 产地 | 榨油方式 |
|---|---|---|---|
| 1 | ‘高油’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 2 | ‘黑籽1号’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 3 | ‘黑籽2号’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 4 | ‘黑籽3号’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 5 | ‘红花1号’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 6 | ‘大果’1号 | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |
| 7 | ‘岑软2号’ | 广西壮族自治区桂林市 | 冷榨 |

7890A 气相色谱-质谱联用仪（配备不分流进样口和火焰离子化检测器（FID）、5975C 质谱仪 美国安捷伦公司；DBS-100Max 热混仪 浙江群安科学仪器有限公司；OSE-DB-05 干式恒温金属浴仪 北京天根生化科技有限公司；30 μm PDMS/DVB SPME 萃取头 美国 Supelco 公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 茶油籽榨油工艺 油茶籽烘箱 60 ℃ 烘干，待茶籽籽仁与籽壳分离后，转入籽壳分离机去除籽壳，从而获得茶油籽仁，粉碎后通过榨油机进行压榨（60~67 ℃），静置分层，得到压榨毛油。毛油初滤后，置于 4 ℃ 冰箱冷藏 4 h，以 4000 r/min 离心 5 min，去除沉淀，得到清亮、淡黄色的茶油籽油，备用。

1.2.2 香气成分测定 采用顶空固相微萃取气相色谱法（HS-SPME-GC-MS）测定油茶籽油中挥发性化合物。每个样本取 5 mL 油茶籽油至 20 mL 顶空萃取瓶中，放入热混仪 50 ℃ 平衡 30 min，后放入干式恒温金属浴仪 55 ℃ 萃取 60 min。

色谱条件：色谱柱：DB-WAX 石英毛细柱（30 m×0.25 mm, 0.25 μm）；升温程序：40 ℃ 保持 3 min，以 3 ℃/min 升至 70 ℃，保持 1 min，以 5 ℃/min 升至 180 ℃，保持 1 min，以 10 ℃/min 升至 230 ℃，保持 0 min；载气（He）流速 1.0 mL/min，压力 5 kPa，进样口温度 250 ℃；前检测器温度 33 ℃；不分流。

质谱条件：接口温度：230 ℃；离子源温度 230 ℃；电离方式：EI+，70 eV；扫描方式：全扫描；质量范围：33~550。

定性定量：定性分析通过 AMDS 解卷积软件。解卷积后检索标准化合物的质谱图（NIST08）、广西落叶果树团队已经分析过的标准品的保留时间以及与相关文献报道进行保留指数等信息比对。对挥发物的定量分析采用十一烷作为外标物，以 1.85、3.70、7.40、14.80、22.20、29.60、37.00 mg/100 mL 设置质量浓度梯度制作标准曲线进行分析。

1.2.3 OAV、ROAV 值计算 OAV、ROAV 值计算参考刘登勇等[22] 的方法。油茶籽油中香气成分的相对含量（mg/kg）与其在水中的阈值之比即为该物质的 OAV 值。分别设置每种油茶籽油中 OAV 值最大的香气成分其 OAV 值为 100，则油茶籽油中其他香气成分 OAV 值与该物质 OAV 值之比的 100 倍即为该油茶籽油中其他香气成分 ROAV 值。

$$\mathrm{OAVa(i)} = \frac{\mathrm{Ca(i)}}{\mathrm{Ta(i)}} \qquad 式（1）$$

$$\mathrm{ROAV(i)} = 100 \times \frac{\mathrm{OAVa(i)}}{\mathrm{OAVa(max)}} \qquad 式（2）$$

式中：Ca（i）为油茶籽油 a 中香气物质 i 相对含量（mg/kg）；Ta（i）为油茶籽油 a 中香气物质 i 在水中的阈值[23]；OAVa（i）为油茶籽油 a 中香气物质 i 的 OAV 值；OAVa（max）为油茶籽油 a 中 OAV 值最大的香气物质。

1.2.4 香气特征雷达图绘制 作图方法参考杜文文等[24] 的方法，稍作改动。分别将各油茶籽油中 OAV> 1 的香气成分按香型分类，同一香型的 OAV 值相加，计算各油茶籽油中每种香型的总 OAV 值。为便于作图，以各类香型总 OAV 值的 $10^{-3}$ 倍绘制香气特征雷达图。

### 1.3 数据处理

实验结果以均值±标准差呈现。采用 Excel 2016 对数据进行处理，采用 SPSS 20.0 进行显著性分析以及主成分分析，$P<0.05$ 表示有显著性差异。主成分分析综合得分计算方法参考张文霖[25] 的方法。使用 Duncan 法对数据进行多重比较，采用 Origin2021 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同油茶籽油香气种类及总含量的比较

7 种油茶籽油总离子流图如图 2 所示，主要成分为 2-甲基吡嗪、2, 5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、醋酸和丁内酯等。7 种油茶籽油经检测共发现 30 种香气物质（图 3，物质含量见附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版），包括 13 种杂环类，6 种醛类，4 种醇类，2 种烃类，2 种酮类。此外，发现酯类、酸类和醚类各 1 种，将它们归为其他类。6 种油茶实生优株的油茶籽油香气种类均高于‘岑软 2 号’。其中‘黑籽 2 号’香气种类最多，

有 27 种，其次为‘黑籽 1 号’和‘红花 1 号’，均含 26 种香气物质。‘岑软 2 号’最低，含 8 种香气物质。杂环类香气物质各油茶籽油中在 1~12 种之间，‘黑籽 2 号’中最多，为 12 种，‘岑软 2 号’最低，含 1 种；醛类香气物质在每个品种中均被检测到，种类数量在 2~6 种之间，在‘黑籽 1 号’和‘黑籽 2 号’中种类最多，均为 6 种。

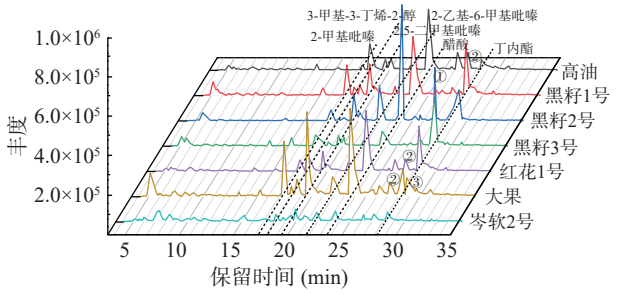



图 2　不同油茶籽油总离子流图

Fig.2　Total ion flow diagram of different *Camellia oleifera* seed oils

注：①5-甲基糠醛；②2,3-丁二醇；③苯乙醛。

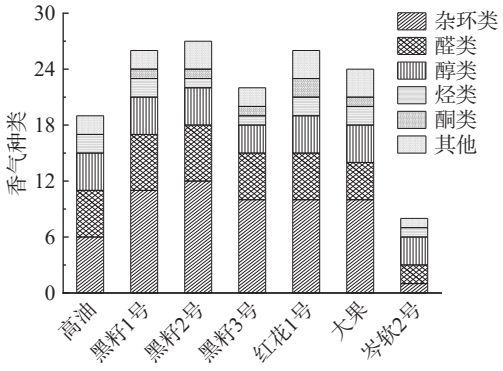



图 3　不同油茶籽油香气种类

Fig.3　Aroma types of different *Camellia oleifera* seed oils

6 种油茶实生优株的油茶籽油香气总含量均高于‘岑软 2 号’。其中‘黑籽 2 号’的香气含量最高，为 882.57 mg/kg，显著（$P$<0.05）高于其他油茶籽油，是‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’、‘大果’的 1.38~3.15 倍，是‘岑软 2 号’的 10.93 倍，说明‘黑籽 2 号’油茶籽油香味最浓。其次为‘大果’和‘黑籽 1 号’，香气含量分别为 638.55 mg/kg 和 560.43 mg/kg，分别为‘岑软 2 号’香气含量的 7.70 和 6.75 倍（图 4A）。

杂环类、醛类和醇类物质是 6 种实生优株和‘岑软 2 号’油茶籽油中的主要香气物质，在这 7 种油茶籽油中含量占比均较高。其中，‘黑籽 2 号’中醛类含量占比最高，为 32.60%，杂环类含量占比次之，为 26.80%（图 4B）。冷榨工艺能保持油茶籽油更多的天然风味，Cao 等[26] 研究了 5 种榨油温度保持在 40 ℃ 以下的冷榨油茶籽油，发现醛类物质在这些油茶籽油中种类最多，且在总含量中占比最高，介于 47.50% 至 65.30% 之间。但本研究中，冷榨油温度控制在 60 ℃ 左右，醛类占比在 32.70% 以下，除‘黑籽 2 号’外，其他油茶籽油为醇类或杂环类占比最高，因此认为‘黑籽 2 号’可能保留了较好的天然风味。此外，相比于 Cao 等[26] 的研究结果，上述 7 种油茶籽油醛类占比均较低，这可能是由于部分醛类成分对油温较为敏感，较高的温度可能导致这些醛类成分发生转化，从而降低了其在香气成分中的占比。结合香气种数和香气总含量来看，6 种油茶实生优株的油茶籽油香气均优于‘岑软 2 号’，其中，‘黑籽 2 号’的香气品质最优，其次为‘大果’和‘黑籽 1 号’油茶籽油。

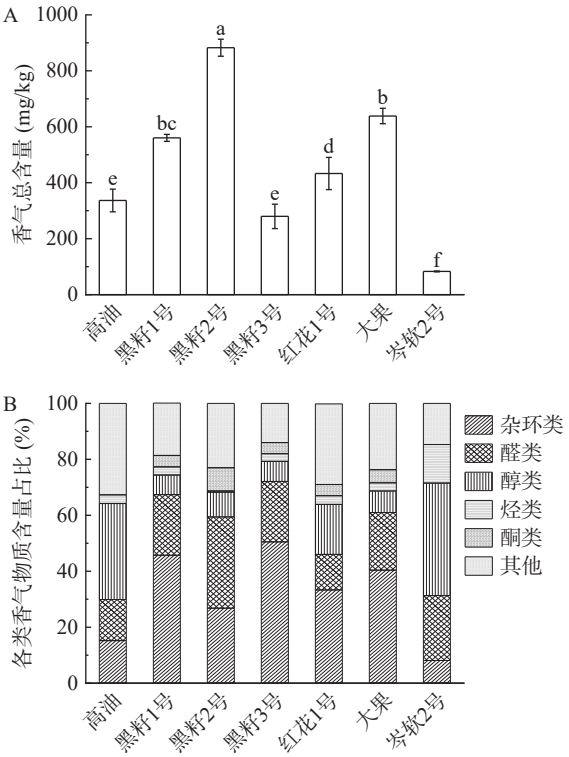



图 4　不同油茶籽油总香气含量（A）及各类香气含量在总含量中的占比（B）

Fig.4　Total aroma content of different *Camellia oleifera* seed oils (A) and the proportion of each type of aroma content in the total content (B)

注：不同小写字母表示各组样品之间具有显著性差异（$P$<0.05），图 5 同。

## 2.2　不同油茶籽油各类香气成分含量比较

2.2.1　杂环类物质　各类香气物质在不同油茶籽油中的含量如图 5 所示。其中，杂环类含量最高的是‘大果’油茶籽油，为 258.18 mg/kg，其次为黑籽 1 号和‘黑籽 2 号’油茶籽油，分别为 255.85 mg/kg 和 236.87 mg/kg。尽管‘黑籽 2 号’香气总含量最高，但杂环类含量与‘黑籽 1 号’、‘大果’油茶籽油无显著差异。‘黑籽 3 号’和‘红花 1 号’杂环类含量相近，分别为 141.21 mg/kg 和 144.21 mg/kg。‘岑软 2 号’杂环类含量最低，为 6.75 mg/kg（图 5A）。食用油中的杂环类化合物如吡嗪，主要由氨基酸与还原糖在预热处理过程中的美拉德反应和 Strecker 降解生成，为油茶籽油提供烘焙香和坚果香[26−28]。‘大果’、‘黑籽 1 号’和‘黑籽 2 号’油茶籽油吡嗪类香气物质含量最高的 2 种成分均为 2-甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪，其中，2-甲基吡嗪在‘大果’、‘黑籽 1 号’和‘黑籽 2 号’油茶

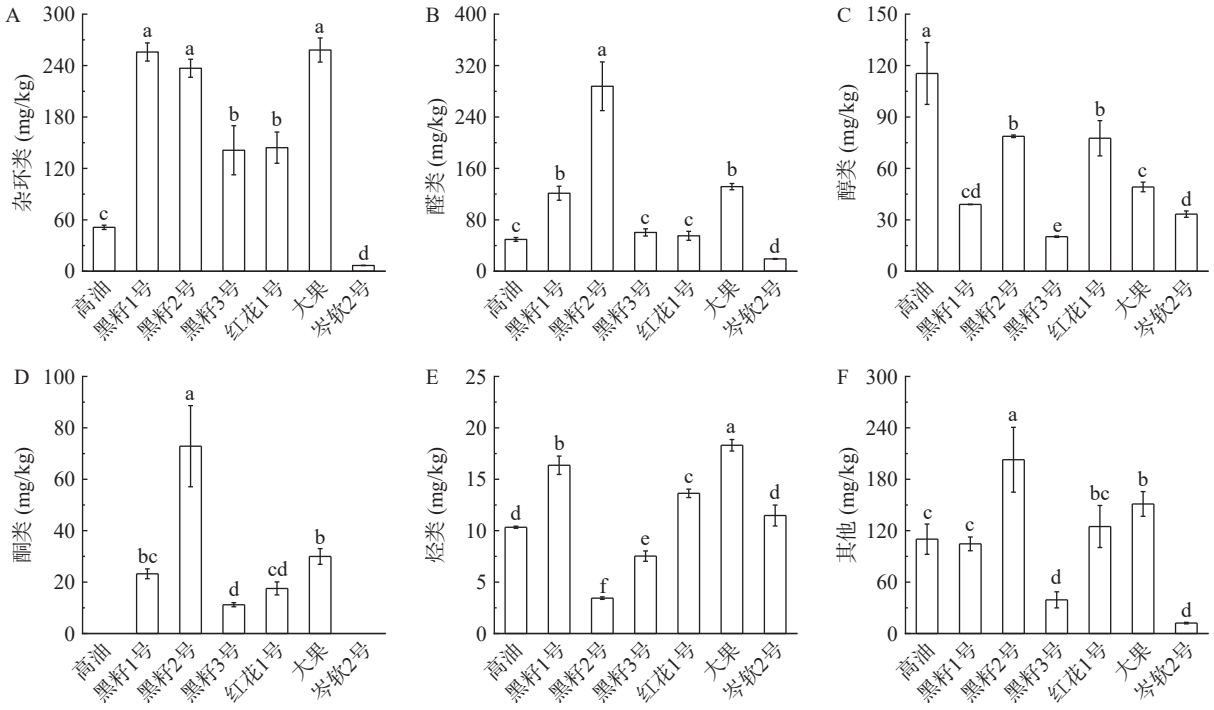



图 5 各类香气物质在不同油茶籽油中的含量

Fig.5 Content of various aroma substances in different *Camellia oleifera* seed oils

注: A.不同油茶籽油中的杂环类香气含量; B.不同油茶籽油中的醛类香气含量; C.不同油茶籽油中的醇类香气含量; D.不同油茶籽油中的酮类香气含量; E.不同油茶籽油中的烃类香气含量; F.不同油茶籽油中的其他类香气含量。

籽油中含量分别为 73.74、68.78 和 60.66 mg/kg, 2,5-二甲基吡嗪含量分别为 75.57、60.24 和 47.34 mg/kg, 在上述 3 种油茶籽油中这 2 种香气成分之和分别占其杂环类含量的 45.59%~57.83% 之间, 占比相近。因此认为‘黑籽 2 号’、‘黑籽 1 号’和‘大果’油茶籽油具有较近似的烘焙香、坚果香风味。以往研究表明, 冷榨油茶籽油中杂环类香气物质含量通常较低, 而热榨油中含量较高[14,16]。但在本实验中, ‘黑籽 2 号’、‘大果’和‘黑籽 1 号’油茶籽油在冷榨条件下, 均检测出较高的杂环类含量, 可能是由于这几个品种的相关前体物质含量较高。此外, 前人研究显示水分调节预处理能改变芝麻细胞结构, 使油脂更易释放, 促进美拉德反应和脂质氧化等风味相关反应[29]。本实验中, 油茶籽前期预处理采用 60 ℃ 烘干控制水分, 可能导致油茶籽细胞结构改变, 氨基酸和还原糖更容易接触, 从而促进了杂环类物质的生成。

在香气成分方面, 在发现的 13 种杂环类化合物中, 吡嗪类化合物种类最为丰富。其中, 2-甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪呈坚果香, 烘焙香, 在除‘岑软 2 号’外的其他 6 个油茶籽油品种中均被检出。在‘黑籽 2 号’、‘黑籽 1 号’和‘大果’油茶籽油中, 这两种杂环类物质含量均在其他杂环类的 1.39 倍以上, 使得上述 3 种油茶籽油杂环类含量显著($P$<0.05)高于其他油茶。因此 2-甲基吡嗪和 2,5-二甲基吡嗪可能是上述油茶籽油呈现烘焙香、坚果香的关键香气物质(附表 1, 详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版)。这与林琅[30] 在热榨油茶籽油中的结果相似。

2.2.2 醛类物质 醛类物质具有较低的香气阈值, 是油茶籽油风味的重要组成部分之一[26]。不同油茶籽油醛类总含量存在显著($P$<0.05)差异。其中, ‘黑籽 2 号’的醛类香气含量显著($P$<0.05)高于其他油茶籽油, 为 287.83 mg/kg, 是‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘大果’的 2.18~5.74 倍, 是‘岑软 2 号’的 14.96 倍。其次为‘大果’和‘黑籽 1 号’油茶籽油, 二者醛类含量相近, 分别为 131.71 mg/kg 和 121.38 mg/kg。‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘高油’油茶籽油醛类含量在 49.50~60.50 mg/kg 之间。上述 6 种油茶籽油醛类物质含量均高于‘岑软 2 号’(19.24 mg/kg)(图 5B)。

糠醛主要呈杏仁香, 能够加强油茶籽油的焙烤风味, 是浓香型油茶的一种重要风味成分[9,13]。从化合物含量上来看, 在‘黑籽 2 号’油茶籽油中, 糠醛含量最高, 为 171.97 mg/kg, 是该油中醛类物质的主要部分, 且为其他油茶籽油醛类总含量的 1 倍以上; 其次为苯乙醛和 5-甲基糠醛, 含量分别为 49.58 和 39.47 mg/kg, 分别赋予‘黑籽 2 号’油花香和焦糖香。这表明‘黑籽 2 号’较其他油茶籽油具有更浓郁的杏仁香味, 并兼具花香和焦糖香, 风味更为丰富。苯乙醛和异戊醛分别呈现出花香和果香。在‘大果’油茶籽油中, 苯乙醛和异戊醛的含量较高且相近, 均在 56.30 mg/kg 左右; ‘黑籽 1 号’油茶籽油中, 苯乙醛含量为 53.30 mg/kg, 异戊醛为 31.42 mg/kg, 上述两种物质共同为这两种油茶籽油贡献花果香。‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘高油’油茶籽油中醛类含量相

近，其中，‘黑籽 3 号’和‘高油’中含量较高的醛类物质也为苯乙醛和异戊醛，在 15.64~25.67 mg/kg 之间，呈现花果香；‘红花 1 号’中含量较高的醛类为苯乙醛，为 28.13 mg/kg，更多呈现花香味（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

糠醛及其衍生物 5-甲基糠醛、糠醇在油茶中通常被认为是戊糖、六碳糖裂解和美拉德反应的产物，常在热榨油茶籽油中检测到[31]。在本研究中，冷榨油茶籽油‘黑籽 2 号’中糠醛含量以及 5-甲基糠醛显著（$P$<0.05）高于其他油茶籽油，原因可能是‘黑籽 2 号’油茶籽中具有较高含量的糖类化合物，在低温条件下脱水产生糠醛。此外，在冷榨过程中，榨油机的机械摩擦和剪切力可能导致局部温度升高，从而为糠醛的生成提供条件。苯乙醛和异戊醛可分别经由苯丙氨酸和亮氨酸 Strecker 降解产生[9]。在 40 ℃ 以下低温冷榨油茶籽油中未检测到这两种物质，而在热榨油中含量相对较高[16,26]。本研究中，冷榨温度控制在 60 ℃ 左右，结果在桂林地区采集的 7 种油茶籽油中均检测到了苯乙醛和异戊醛，且‘大果’和‘黑籽 1 号’油茶籽油中含量较高。由此推测，40~60 ℃ 可能是苯乙醛和异戊醛生成的最低温度范围。在前人研究中，己醛、庚醛、辛醛是不同热处理压榨油茶籽油和不同品种油茶籽油的共同风味成分，且己醛含量均较高[26,31]。然而，在本研究中，己醛在‘红花 1 号’、‘大果’和‘岑软 2 号’油茶籽油中未被检测到，且在其他油茶籽油中的含量也较低，这可能是由于不同品种油茶籽油在化学成分上的差异所致。

2.2.3　醇类、酮类、烃类及其他类化合物　醇类多为青草香，与醛类共同为油茶籽油提供清香风味[10]。本研究中，‘高油’中醇类含量显著（$P$<0.05）高于其他油茶籽油，达到 115.40 mg/kg。其次为‘红花 1 号’和‘黑籽 2 号’，这 2 个品种醇类物质含量相近，分别为 77.60 mg/kg 和 78.75 mg/kg（图 5C）。‘高油’中含量较高的醇类为 3-甲基-3-丁烯-2-醇和 1-丙氧基-2-丙醇，含量分别为 47.97 mg/kg 和 48.20 mg/kg，其中 3-甲基-3-丁烯-2-醇具有刺激性气味。‘红花 1 号’中也含有较高含量的 3-甲基-3-丁烯-2-醇，含量在 30.50 mg/kg 左右，可能是榨油过程中产生的副产物。值得注意的是糠醇在‘黑籽 2 号’油茶籽油中含量较高，可能为该油茶籽油提供焦香味（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

酮类物质是不饱和脂肪酸受热氧化后的降解产物，可以提供果香、甜香等风味[20,32]。本研究中，酮类物质的种类较少。在 7 种油茶籽油中，‘黑籽 2 号’的酮类含量最高，且仅检测到 1 种酮类物质即羟基丙酮，含量为 72.87 mg/kg，可为‘黑籽 2 号’油茶籽油提供焦糖香味（图 5D，附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。7 种油茶籽油中烃类含量均较低，在 20.00 mg/kg 以下（图 5E）。此外，酯类也对油茶籽油的风味有重要贡献[20]。在其他类中，乙酸甲酯在‘黑籽 2 号’油茶籽油中的含量较高，为 73.00 mg/kg，呈现果香味，也可能是该油茶籽油的风味的重要组成部分（图 5F，附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

从不同油茶籽油的各类香气物质含量来看，‘黑籽 2 号’油茶籽油呈现出浓郁的烘焙香、坚果香、杏仁香以及焦糖香和焦香，其香型最为丰富。‘黑籽 1 号’和‘大果’油茶籽油则以浓郁的烘焙香、坚果香和花果香为主。‘红花 1 号’和‘黑籽 3 号’油茶籽油的烘焙香和坚果香也较为明显，并带有些许花香、果香。相比之下，‘高油’杂环类和醛类香气含量均较低，整体香味较清淡，具有一定的烤坚果香和花果香。‘岑软 2 号’各类香气物质含量普遍较低。

### 2.3　不同油茶籽油主要香型及关键香气成分探究

尽管香气物质含量可以一定程度上反映油茶籽油总体风味情况，但并非所有香气成分都对总体风味产生显著贡献。香气成分的实际贡献需要综合其含量和感觉阈值来判断。OAV 通常用来表示香气成分对总体风味的贡献，OAV>1 表示该香气成分对物质风味有直接影响，OAV 值越大，表明该香气成分对总体风味的贡献越高[22]。通过查询阈值并根据公式（1）计算 OAV 值，共筛选出 16 种对油茶籽油风味产生直接影响的香气物质（附表 2，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。其中包括 6 种醛类、6 种吡嗪类、1 种醇类、1 种呋喃类、1 种酮类和 1 种酸类。根据上述 16 种香气成分的主要香型进行分类，计算各油茶籽油品种不同香型的总 OAV 值（附表 2，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版），并通过雷达图展示各品种油茶籽油的香气特征（图 6）。结果显示，‘黑籽 2 号’OAV 总值在 7 种油茶籽油中最高，为 38264.57，其香味最为浓郁且香型最为丰富，主要呈现杏仁香、烤坚果香、花香、果香和青草香。其中，杏仁香的 OAV 值最大，是‘黑籽 2 号’的主要香型，其次是花香和烤坚果香。‘大果’的总 OAV 值位居第二，为 29525.32，呈果香、花香和烤坚果香，其中果香为其主要香型。‘黑籽 1 号’油茶籽油总 OAV 值第三，为 24115.49，呈果香、花

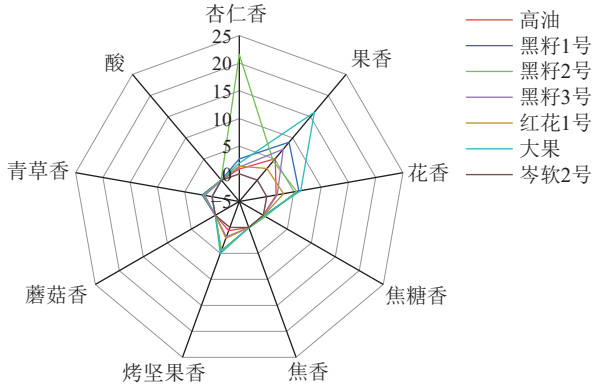



图 6　不同油茶籽油的香气特征雷达图

Fig.6　Radar chart of aroma characteristics of different *Camellia oleifera* seed oils

香、烤坚果香、杏仁香和青草香，其中，果香、花香和烤坚果香 OAV 值较高，为‘黑籽 1 号’油茶籽油的主要香型。其次分别为‘黑籽 3 号’、‘高油’和‘红花 1 号’，总 OAV 值在 9958~13104 之间，其中，果香为‘高油’和‘黑籽 3 号’主要香型。‘红花 1 号’油茶籽油则呈现花香、果香、杏仁香和烤坚果香，各类香型 OAV 值相近。‘岑软 2 号’油茶籽油总 OAV 值最低，与上文结论基本一致。

为了更深入地探究各品种油茶籽油的关键香气物质，本研究参考了前人研究中关于相对气味活度值（ROAV）的定义：认为 ROAV>1 的物质是对油茶籽油风味产生重要影响的关键香气成分，而 0.1≤ROAV<1 的组分则对油茶籽油的总体风味起到重要的修饰作用[22,33]。采用上述 16 种 OAV>1 的香气物质进行计算。根据附表 2（详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版），‘黑籽 2 号’油茶籽油中 OAV 值最高的物质是糠醛；‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 3 号’、‘大果’和岑溪 2 号油茶籽油中 OAV 值最高的物质是异戊醛；‘红花 1 号’油茶籽油中 OAV 值最高的物质是苯乙醛。因此，本研究以这些物质的 OAV 值作为对应油茶籽油品种的阈值，根据公式（2）计算各品种中香气成分的 ROAV 值（表 2）。

在 6 种油茶实生优株油茶籽油中，‘高油’中的关键香气成分有 8 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪、正己醛、2-乙基-6-甲基吡嗪、苯甲醛和醋酸。‘黑籽 1 号’中的关键香气成分有 11 种，分别为异戊醛、苯乙醛、2,5-二甲基吡嗪、糠醛、正己醛、2,3,5-三甲基吡嗪、2-甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、羟基丙酮和苯甲醛。‘黑籽 2 号’的关键香气成分有 9 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪、正己醛、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、羟基丙酮和 2-甲基吡嗪。‘黑籽 3 号’中的关键香气成分有 9 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪、正己醛、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、2-甲基吡嗪和 2-乙基-6-甲基吡嗪。‘红花 1 号’中的关键香气成分有 11 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪、2,3,5-三甲基吡嗪、2-乙基-5-甲基吡嗪、羟基丙酮、2-甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪、苯甲醛和醋酸。‘大果’中的关键香气成分有 6 种，分别为异戊醛、苯乙醛、2,5-二甲基吡嗪、糠醛、2,3,5-三甲基吡嗪和 2-甲基吡嗪。上述 6 种油茶籽油共有的关键香气成分为 4 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪。

### 2.4 不同油茶籽油香气的主成分分析

2.4.1 主成分分析结果 PCA 具有可消除评价指标间的相关影响、保证评价的客观性等优点，因此被用于比较不同产地或不同制取工艺油茶籽油的差异[34]。将 OAV 值大于 1 的 16 种香气成分含量进行主成分分析，以特征值大于 1 提取主成分。结果显示提取了 3 个主成分，按照其贡献值由大到小分别命名为 PC1、PC2 和 PC3。3 个主成分累计解释了总方差的 91.884%，表明这 3 个主成分能够有效反映样品中的大部分数据（表 3）。

参考张文霖[25] 计算特征向量及主成分得分。用表 4 中的成分载荷值除以主成分相对应的特征值开平方根便得到 3 个主成分中每个指标的特征向量。由表 4 可知，2,3,5-三甲基吡嗪、羟基丙酮、苯乙醛、2-甲基吡嗪、苯甲醛、2-乙基-6-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、糠醇、醋酸、糠醛、2-乙基-5-甲基吡嗪和 5-甲基糠醛在 PC1 中有较高载荷值（|载荷|>0.7），表明 PC1 主要反映上述 12 种成分的信息；异戊醛和 2-乙

表 2 不同油茶籽油的关键香气物质及其 ROAV

Table 2 Key aroma substances of different *Camellia oleifera* seed oils and their ROAV

| 物质 | 阈值（mg/kg） | ‘高油’ | ‘黑籽1号’ | ‘黑籽2号’ | ‘黑籽3号’ | ‘红花1号’ | ‘大果’ | ‘岑软2号’ | 香气 | 主要香型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 糠醛 | 0.008 | 15.60 | 28.64 | 100.00 | 15.63 | 42.14 | 11.34 | – | 甜木香杏仁香烤面包混合气味 | 杏仁香 |
| 苯乙醛 | 0.009 | 34.02 | 65.97 | 25.63 | 26.54 | 100.00 | 38.96 | 76.95 | 具有强烈的风信子香气和绿叶似得清香香气 | 花香 |
| 异戊醛 | 0.0035 | 100.00 | 100.00 | 21.05 | 100.00 | 89.14 | 100.00 | 100.00 | 果香 | 果香 |
| 2,5-二甲基吡嗪 | 0.02 | 9.95 | 33.56 | 11.01 | 12.15 | 35.49 | 23.50 | – | 炒花生香气和巧克力、奶油风味 | 烤坚果香 |
| 正己醛 | 0.00366 | 33.15 | 20.13 | 7.33 | 17.74 | – | – | – | 青草气及苹果香味 | 青草香 |
| 2,3,5-三甲基吡嗪 | 0.01 | – | 8.55 | 4.60 | 6.90 | 16.80 | 4.96 | – | 烘烤的气味，具有咖啡和可可气息 | 烤坚果香 |
| 2-乙基-5-甲基吡嗪 | 0.016 | – | 2.86 | 3.04 | 3.02 | 8.42 | 0.00 | – | 咖啡香气 | 烤坚果香 |
| 羟基丙酮 | 0.2 | – | 1.29 | 1.69 | 0.76 | 2.13 | 0.93 | – | 焦糖香气 | 焦糖香 |
| 2-甲基吡嗪 | 0.25 | 0.73 | 3.07 | 1.13 | 1.26 | 2.49 | 1.83 | – | 坚果味，烘培香气 | 烤坚果香 |
| 2-乙基-6-甲基吡嗪 | 0.051 | 1.31 | 2.24 | 0.64 | 1.41 | 3.54 | 0.90 | – | 具有坚果、焙烤和甜香香气 | 烤坚果香 |
| 糠醇 | 0.3 | 0.19 | 0.17 | 0.53 | 0.16 | 0.41 | 0.08 | – | 呈微弱香气，有焦香味 | 焦香 |
| 苯甲醛 | 0.05 | 1.34 | 1.33 | 0.48 | 0.89 | 2.40 | 0.56 | – | 杏仁味 | 杏仁香 |
| 醋酸 | 1.2 | 1.53 | 0.75 | 0.47 | 0.32 | 2.63 | 0.57 | 1.34 | 酸 | 酸 |
| 5-甲基糠醛 | 0.5 | – | 0.08 | 0.37 | – | 0.19 | – | – | 甜香、焦糖香 | 焦糖香 |
| 2-乙酰基呋喃 | 1 | – | – | 0.043 | – | – | – | – | 呈杏仁、坚果、酵香、牛奶和甜的焦糖似香气 | 烤坚果香 |
| 2,6-二甲基吡嗪 | 10 | 0.02 | 0.02 | 0.008 | 0.02 | 0.07 | 0.02 | – | 具有咖啡和炒花生的气味 | 烤坚果香 |

注：“–”表示未检测到；香气特征主要依据ChemicalBook网站https://www.chemicalbook.com/ProductIndex.aspx。

表 3　3 个主成分特征向量及贡献率

Table 3　Three principal component eigenvectors and contribution rate

| 主成分 | 特征值 | 贡献率(%) | 累积贡献率(%) |
|---|---|---|---|
| 1 | 9.502 | 59.390 | 59.390 |
| 2 | 4.084 | 25.526 | 84.916 |
| 3 | 1.115 | 6.968 | 91.884 |

表 4　3 个主成分的特征向量和载荷矩阵

Table 4　Eigenvectors and loading matrices of three principal components

| 成分 | PC1 | | PC2 | | PC3 | | 香型 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 特征向量 | 载荷 | 特征向量 | 载荷 | 特征向量 | 载荷 | |
| 2,3,5-三甲基吡嗪 | 0.304 | 0.938 | 0.069 | 0.140 | 0.136 | 0.144 | 烤坚果香 |
| 羟基丙酮 | 0.297 | 0.917 | 0.165 | 0.334 | 0.182 | 0.192 | 焦糖香 |
| 苯乙醛 | 0.295 | 0.909 | 0.189 | 0.382 | 0.048 | 0.050 | 花香 |
| 2-甲基吡嗪 | 0.284 | 0.876 | 0.192 | 0.387 | 0.054 | 0.057 | 烤坚果香 |
| 苯甲醛 | 0.282 | 0.870 | 0.148 | 0.299 | 0.333 | 0.351 | 杏仁香 |
| 2-乙基-6-甲基吡嗪 | 0.266 | 0.821 | 0.220 | 0.444 | 0.253 | 0.268 | 烤坚果香 |
| 2,5-二甲基吡嗪 | 0.262 | 0.807 | 0.258 | 0.521 | 0.134 | 0.142 | 烤坚果香 |
| 糠醇 | 0.249 | 0.768 | 0.311 | 0.628 | 0.063 | 0.067 | 焦香 |
| 醋酸 | 0.247 | 0.762 | 0.073 | 0.148 | 0.015 | 0.016 | 酸 |
| 糠醛 | 0.247 | 0.760 | 0.315 | 0.636 | 0.077 | 0.081 | 杏仁香 |
| 2-乙基-5-甲基吡嗪 | 0.240 | 0.739 | 0.275 | 0.556 | 0.081 | 0.085 | 烤坚果香 |
| 5-甲基糠醛 | 0.235 | 0.725 | 0.337 | 0.682 | 0.080 | 0.085 | 焦糖香 |
| 2-乙酰基呋喃 | 0.224 | 0.691 | 0.347 | 0.702 | 0.106 | 0.111 | 烤坚果香 |
| 2,6-二甲基吡嗪 | 0.217 | 0.669 | 0.295 | 0.596 | 0.137 | 0.144 | 烤坚果香 |
| 异戊醛 | 0.154 | 0.476 | 0.384 | 0.777 | 0.058 | 0.061 | 果香 |
| 正己醛 | 0.119 | 0.366 | 0.112 | 0.227 | 0.833 | 0.880 | 青草香 |

酰基呋喃在 PC2 中有较高载荷值(|载荷|>0.7)，即表明 PC2 主要反映上述 2 种成分的信息；正己醛在 PC3 中有较高载荷值(|载荷|>0.7)，即表明 PC3 主要反映上述 1 种成分的信息。根据上述各成分的主要香型，可将 PC1 定义为“烤坚果香、焦糖香、花香、杏仁香以及焦香和酸气主导因子”，PC2 定义为“果香及烤坚果香主导因子”，PC3 定义为“青草香主导因子”。

2.4.2　基于主成分分析建立香气品质评价模型　根据表 3 和表 4，以 3 个主成分代表原来的 16 种挥发性香气成分所表达的信息，建立油茶籽油香气品质的评价模型，得到如下的线性关系式，其中 A1~A16 为挥发性香气物质标准化后的值，F1、F2 和 F3 表示 3 个主成分得分：

$$F1 = 0.304A1 + 0.297A2 + 0.295A3 \cdots + 0.154A15 + 0.119A16 \quad 式（3）$$

$$F2 = 0.069A1 + 0.165A2 + 0.189A3 \cdots + 0.384A15 + 0.112A16 \quad 式（4）$$

$$F3 = 0.136A1 + 0.182A2 + 0.048A3 \cdots + 0.058A15 + 0.833A16 \quad 式（5）$$

所选的 3 个主成分对应的特征值占 3 个特征值总和的比例为该主成分在品种综合评价中的权重，对 3 个主成分得分进行加权求和，计算各品种的综合得分 F 并排序：

$$F = 0.646F1 + 0.278F2 + 0.076F3 \quad 式（6）$$

由综合得分排序可知(表 5)，‘黑籽 2 号’油茶籽油风味最优，主成分得分 F1、F2 和 F3 均为最高，说明其在烤坚果香、焦糖香、花香、杏仁香、焦香、酸气、果香、青草香等风味特征上均表现突出；其次为‘黑籽 1 号’油茶籽油以及‘大果’油茶籽油，其中‘黑籽 1 号’烤坚果香、焦糖香等风味较‘大果’突出，而‘大果’果香较‘黑籽 1 号’突出。6 种实生优株油茶籽油的风味均优于‘岑软 2 号’。

表 5　标准化后主成分得分及排序

Table 5　Principal component scores and ranking after standardization

| 品种 | F1 | F2 | F3 | F | 排序 |
|---|---|---|---|---|---|
| ‘高油’ | −2.145 | −1.869 | −0.304 | −1.929 | 6 |
| ‘黑籽1号’ | 1.887 | 1.311 | 1.956 | 1.732 | 2 |
| ‘黑籽2号’ | 4.832 | 4.604 | 2.594 | 4.599 | 1 |
| ‘黑籽3号’ | −1.175 | −0.868 | −0.033 | −1.003 | 5 |
| ‘红花1号’ | −0.598 | −0.793 | −1.042 | −0.686 | 4 |
| ‘大果’ | 1.749 | 1.458 | −0.010 | 1.535 | 3 |
| ‘岑软2号’ | −4.550 | −3.842 | −3.159 | −4.248 | 7 |

## 3　结论

本研究通过比较不同油茶籽油的香气种类、总含量及香气成分，并结合香气特征雷达图、相对气味活度值以及主成分分析，对 6 种油茶实生优株的油茶籽油香气进行综合评价，为香型油茶品种的选育提供参考依据。研究结果显示，这 6 种油茶实生优株油茶籽油香气均优于目前在广西的主推油茶品种‘岑软 2 号’。在香气种类方面，实生优株‘黑籽 2 号’油茶籽油香气种类最为丰富。在香气总含量方面，‘黑籽 2 号’油茶籽油含量最高，其次为‘大果’、‘黑籽 1 号’、‘红花 1 号’、‘高油’和‘黑籽 3 号’，‘岑软 2 号’油茶籽油香气总含量则处于相对较低水平。各类香气含量分析表明，‘黑籽 2 号’、‘黑籽 1 号’和‘大果’油茶籽油杂环类含量相近，具有相似的烘焙香和坚果香。‘黑籽 2 号’醛类含量最为丰富，其中糠醛为其主要醛类成分，赋予其浓郁的杏仁香。从不同香气成分含量以及香气特征雷达图来看，‘黑籽 2 号’油茶籽油相比其他油茶籽油具有突出杏仁香，并带有一定的烤坚果香、花果香以及青草香，整体香气浓郁且香型丰富。‘大果’油茶籽油则以浓郁的果香为主要特征，同时兼具一定的烤坚果香以及花香。‘黑籽 1 号’油茶籽油则以烤坚果香和花果香为主。‘黑籽 3 号’和‘高油’油茶籽油以果香味为主。‘红花 1 号’油茶籽油则

呈现花香、果香、杏仁香和烤坚果香。相比之下，‘岑软 2 号’油茶籽油的各类香气物质含量则普遍较低。通过 ROAV 值计算确定了‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 2 号’、‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘大果’的关键香气成分分别为 8 种、11 种、9 种、9 种、11 种和 6 种。6 种油茶实生优株共有的关键香气成分为 4 种，分别为糠醛、苯乙醛、异戊醛、2,5-二甲基吡嗪。这些关键香气成分的含量水平对于筛选香型油茶品种可能具有重要的指示作用。主成分分析表明，‘黑籽 2 号’的综合得分最高，香气品质最优，其次为‘黑籽 1 号’、‘大果’、‘红花 1 号’、‘黑籽 3 号’和‘高油’，6 种实生优株油茶籽油香气综合得分均高于‘岑软 2 号’。综上所述，认为 6 种油茶实生优株（‘高油’、‘黑籽 1 号’、‘黑籽 2 号’、‘黑籽 3 号’、‘红花 1 号’和‘大果’）均具备良好的香气品质，其中‘黑籽 2 号’的香气品质最优，其次为‘大果’和‘黑籽 1 号’，是选育香型油茶品种的优质材料。

© 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］ 时德瑞. 现阶段中国油茶产业发展现状、存在的问题及对策[J]. 农村科学实验，2024(6)：139−141. ［SHI Derui. Development status, existing problems and countermeasures of China's camellia oil industry at the present stage[J]. Rural Scientific Experiment, 2024(6): 139−141.］

［2］ 国家林业局国有林场和林木种苗工作总站. 中国油茶品种志(上篇)[M]. 北京：中国林业出版社, 2016: 3−15. ［National Forestry Administration, Station of State-owned Forest Farms and Forest Seedlings. Oil-tea *Camellia* cultivars in China (volume I)[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2016: 3−15.］

［3］ QIN P J, SHEN J J, WEI J, et al. A critical review of the bioactive ingredients and biological functions of *Camellia oleifera* oil[J]. Current Research in Food Science, 2024, 8: 100753.

［4］ 周范琳, 陈塔, 张团结, 等. 油茶籽油提取和包埋技术研究进展[J]. 食品科学，2025, 46(6)：354−370. ［ZHOU Fanlin, CHEN Gong, ZHANG Tuanjie, et al. Advances in extraction and encapsulation technologies for camellia seed oil[J]. Food Science, 2025, 46(6): 354−370.］

［5］ 岑加鑫. 广西油茶产业发展现状问题及对策[J]. 南方农业，2025, 19(2)：87−89. ［CEN Jiaxin. Development status, problems and countermeasures of *Camellia oleifera* industry in Guangxi[J]. South China Agriculture, 2025, 19(2): 87−89.］

［6］ 张路红, 资超成, 吴伟, 等. 10 个广西主栽油茶果实经济性状对比研究[J]. 中国粮油学报，2025, 40(1)：97−103. ［ZHANG Luhong, ZI Chaocheng, WU Wei, et al. Fruit economic traits of 10 main *Camellia* varieties from Guangxi[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2025, 40(1): 97−103.］

［7］ ZHANG Y F, WU Y Q, CHEN S R, et al. Flavor of rapeseed oil: An overview of odorants, analytical techniques, and impact of treatment[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(4): 3983−4018.

［8］ 刘少敏, 何天鹏, 薛丹丹, 等. 六种特级初榨橄榄油挥发性香气成分的比较[J]. 食品与发酵工业，2018, 44(6)：251−256. ［LIU Shaomin, HE Tianpeng, XUE Dandan, et al. Comparative study of volatile aroma components in six kinds of extravirgin olive oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2018, 44(6): 251−256.］

［9］ 刘海, 王进, 许杰, 等. 油茶籽油挥发性风味物质研究进展[J]. 中国油脂，2023, 48(1)：42−47. ［LIU Hai, WANG Jin, XU Jie, et al. Review on volatile flavor components of oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(1): 42−47.］

［10］ ZHANG F, ZHU F, CHEN B L, et al. Composition, bioactive substances, extraction technologies and the influences on characteristics of *Camellia oleifera* oil: A review[J]. Food Research International, 2022, 156: 111159.

［11］ ZENG J, WANG W, CHEN Y, et al. Typical characterization of commercial camellia oil products using different processing techniques: Triacylglycerol profile, bioactive compounds, oxidative stability, antioxidant activity and volatile compounds[J]. Foods, 2022, 11: 3489.

［12］ 朱晓阳, 龙奇志, 钟海雁. 炒籽温度对茶油关键香气成分及感官品质的影响[J]. 食品与机械，2019, 35(5)：48−54. ［ZHU Xiaoyang, LONG Qizhi, ZHONG Haiyan. Effects of roasted temperature to seed processing components and sensory quality of camellia oil[J]. Food & Machinery, 2019, 35(5): 48−54.］

［13］ 刘芳. 不同工艺油茶籽油的生物活性成分，抗氧化及风味研究[D]. 长沙：长沙理工大学, 2022. ［LIU Fang. Study on biologically active ingredients, anti-oxidant and flavor of *Camellia oleifera* seed oil prepared by different processes[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2022.］

［14］ 罗贤非. 烘焙条件对油茶籽油抗氧化能力和风味物质的影响研究[D]. 长沙：中南林业科技大学, 2023. ［LUO Xianfei. Study on the effect of roasting conditions on antioxidant capacity and flavor substances of *Camellia* seed oil[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2023.］

［15］ 张智敏, 吴苏喜, 刘瑞兴. 制油工艺对油茶籽油营养品质的影响[J]. 食品科学，2013, 34(11)：268−272. ［ZHANG Zhimin, WU Suxi, LIU Ruixing. Effect of production process on nutritional quality of *Camellia* seed oil[J]. Food Science, 2013, 34(11): 268−272.］

［16］ HE J H, WU X H, ZHOU Y, et al. Effects of different preheat treatments on volatile compounds of *Camelli*（*Camellia oleifera Abel.*）seed oil and formation mechanism of key aroma compounds[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(3).

［17］ ZHENG X Y, ZHENG L L, YANG Y, et al. Analysis of the volatile organic components of *Camellia oleifera* Abel. oil from China using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(9).

［18］ 袁桃静, 赵笑颍, 庞一扬, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS 和 HS-SPME-GC-MS 对 5 种食用植物油挥发性风味成分分析[J]. 中国油脂，2020, 45(9)：102−111. ［YUAN Taojing, ZHAO Xiaoying, PANG Yiyang, et al. Detection of volatile flavor compounds in five edible vegetable oils by electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(9): 102−111.］

［19］ 杨春英, 刘学铭, 王思远, 等. SPME-GC/MS 分析植物油挥发性风味成分[J]. 中国粮油学报，2015, 30(10)：127−134. ［YANG Chunying, LIU Xueming, WANG Siyuan, et al. Volatile flavor compounds in vegetable oils using GC chromatography-mass spectrometry combined with solid-phase microextract[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2015, 30(10): 127−134.］

［20］ 刘旭东, 曾文权, 李力, 等. 油茶籽油生物活性成分、风味物

质及脂质组成研究进展[J]. 生物质化学工程, 2024, 58(6): 1−13. [LIU Xudong, ZENG Wenquan, LI Li, et al. Research progress on the bioactive components, flavor compounds and lipid composition of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Biomass Chemical Engineering, 2024, 58(6): 1−13.]

[21] 潘立顶. 大桂山林场'岑软 2 号'高产栽培技术探讨[J]. 南方农业, 2024, 18(22): 243−245. [PAN Liding. Discussion on high-yield cultivation techniques of Cenruan No.2 in Daguishan Forest Farm[J]. South China Agriculture, 2024, 18(22): 243−245.]

[22] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法："ROAV"法[J]. 食品科学, 2008(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. "ROAV" method: A new method for determining key odor compounds of Rugao Ham[J]. Food Science, 2008(7): 370−374.]

[23] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 第二版. 北京: 科学出版社. 2015. [L. J. van Gemert. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2015.]

[24] 杜文文, 段青, 贾文杰, 等. 4 种秋海棠花香挥发性物质测定与特征香气成分分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(5): 1043−1053. [DU Wenwen, DUAN Qing, JIA Wenjie, et al. Determination of volatile compounds and analysis of characteristic aroma components of four kind of Begonia species flowers[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 2022, 44(5): 1043−1053.]

[25] 张文霖. 主成分分析在 SPSS 中的操作应用[J]. 市场研究, 2005(12): 31−34. [ZHANG Wenlin. Operational application of principal component analysis in SPSS[J]. Market Research, 2005(12): 31−34.]

[26] CAO W M, LIN L, NIU Y W, et al. Characterization of aroma volatiles in *Camellia* seed oils (*Camellia oleifera* Abel.) by HS-SPME/GC/MS and electronic nose combined with multivariate analysis[J]. Food Science and Technology Research, 2016, 22(4): 497−505.

[27] HE J H, WU X H, YU Z L. Microwave pretreatment of *Camellia* (*Camellia oleifera* Abel.) seeds: Effect on oil flavor[J]. Food Chemistry, 2021, 364: 130388.

[28] JI J M, ZHANG Y, WANG D, et al. Impact of seed-roasting treatment on polycyclic aromatic hydrocarbons, 3-MCPD esters, heterocyclic amines and volatile components formation in sunflower oil[J]. Lwt, 2023, 185: 115121.

[29] XU T, YANG R J, HUA X, et al. Improvement of the yield and flavour quality of sesame oil from aqueous extraction process by moisture conditioning before roasting[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2019, 54(2): 471−479.

[30] 林琅. 不同来源油茶籽油香气品质分析研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2016. [LIN Lang. Characterization of volatile compounds of camellia seed oils from different processing techniques and geographical origin[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2016.]

[31] 吴苏喜, 黄艳慧, 吴优, 等. 不同热处理压榨油茶籽油的风味差异研究[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 14−20. [WU Suxi, HUANG Yanhui, WU You, et al. Flavor differences of pressed oil-tea camellia seed oils with different heat treatments[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 14−20.]

[32] JIA X, DENG Q H, YANG Y N, et al. Unraveling of the aroma-active compounds in virgin *Camellia* oil (*Camellia oleifera* Abel) using gas chromatography–mass spectrometry–olfactometry, aroma recombination, and omission studies[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(32): 9043−9055.

[33] 张欢欢, 张玲, 黄桃翠, 等. 油菜籽品种对浓香菜籽油风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(2): 187−194. [ZHANG Huanhuan, ZHANG Ling, HUANG Taocui, et al. Effects of rapeseed varieties on the flavour of fragrant rapeseed oil[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(2): 187−194.]

[34] 叶敏倩, 吴峰华, 芮鸿飞, 等. 不同产地油茶籽油主要特征组分分析[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 222−226. [YE Minqian, WU Fenghua, RUI Hongfei, et al. Comparative analysis of major characteristic components of tea seed oils (*Camellia oleifera* Abel.) from different geographic regions[J]. Food Science, 2020, 41(20): 222−226.]