李金林, 黄双双, 沈祺昌, 等. 不同植物油对烤制草鱼块鱼肉品质及风味特征的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 82−93. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070332

LI Jinlin, HUANG Shuangshuang, SHEN Qichang, et al. Effects of Different Vegetable Oils on the Quality and Flavor Characteristics of Roasted Grass Carp Fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 82−93. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070332

· 研究与探讨 ·

不同植物油对烤制草鱼块鱼肉品质及风味特征的影响

李金林[1], 黄双双[1], 沈祺昌[1], 金玉颜[1], 徐钧洪[1], 彭　斌[1], 胡明明[1], 钟比真[1], 涂宗财[1,2], 余诚玮[1,*]

（1.江西师范大学生命科学学院国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022;
2.南昌大学食品科学与资源挖掘全国重点实验室, 江西南昌 330047）

摘　要: 本文以草鱼块为对象，使用六种不同食用植物油（大豆油、葵花油、山茶油、棕榈油、紫苏油、芝麻油）涂刷草鱼块，探究烤制后对其色度、质构、感官特性、挥发性风味化合物及脂肪酸组成的影响。结果表明，涂刷植物油显著改善了烤制鱼肉的总体可接受度。经检测，不同烤制组的草鱼块中共检测出挥发性风味化合物 42 种，其中关键挥发性风味化合物 8 种，主要是醛类物质，包含（Z）-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛、反,顺-2,4-癸二烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛等。涂刷芝麻油烤制时，其特征吡嗪类物质赋予产品浓郁烘烤香，综合感官评分最高，关键挥发性风味化合物的种类最多，而葵花油对鱼肉本味影响最小，能够更好保持鱼肉的原本风味。相关性分析表明正壬醛作为共性风味物质与多种 PUFA（C18:3n6、C20:3n6 和 C22:6n3）和 SFA（C11:0、C14:0、C15:0 和 C20:0）呈正相关，2-庚烯醛和苯甲醇则与（C11:0、C14:0、C15:0 和 C20:0）呈负相关，揭示了鱼块中几种关键性风味物质与脂肪酸间的关系。本研究的结果能够为优化烤制鱼肉制品的风味品质提供科学选油依据与理论指导。

关键词: 草鱼, 烤制, 植物油, 鱼肉品质, 挥发性风味化合物

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0082−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070332　　本文网刊:

Effects of Different Vegetable Oils on the Quality and Flavor Characteristics of Roasted Grass Carp Fillets

LI Jinlin[1], HUANG Shuangshuang[1], SHEN Qichang[1], JIN Yuyan[1], XU Junhong[1], PENG Bin[1], HU Mingming[1], ZHONG Bizhen[1], TU Zongcai[1,2], YU Chengwei[1,*]

（1.National R & D Center for Freshwater Fish Processing, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;
2.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330047, China）

Abstract: To investigate the effects of six different edible oils (soybean oil, sunflower oil, camellia oil, palm oil, perilla oil, and sesame oil) applied by brushing onto grass carp pieces, this study evaluated their color, texture, sensory characteristics, volatile flavor compounds, and fatty acid composition after baking. The results showed that brushing with vegetable oils significantly improved the overall acceptability of the baked fish. A total of 42 volatile flavor compounds were detected, with 8 identified as key compounds, primarily aldehydes such as (Z)-2-nonenal, trans-2-decenal, trans,cis-2,4-decadienal, and trans,trans-2,4-decadienal. The sesame oil treatment imparted a rich roasted aroma due to its characteristic pyrazines, achieving the highest overall sensory score and the greatest variety of key volatile flavor compounds. In contrast, sunflower oil had the least impact on the inherent flavor of the fish, better preserving its original taste. Correlation analysis revealed

收稿日期: 2025−07−28

基金项目: 江西省自然科学基金项目（20252BAC200434, 20224ACB215010）; 国家自然科学基金项目（32260604, 32560578）; 国家现代农业产业技术体系建设专项（CARS-45）。

作者简介: 李金林（1983−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 水产加工与风味化学, E-mail: lijinlin405@126.com。

*** 通信作者:** 余诚玮（1994−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 水产品精深加工和高值化综合利用, E-mail: yuchengwei@jxnu.edu.cn。

that nonanal, a common flavor compound, was positively correlated with multiple PUFAs (C18:3n6, C20:3n6, C22:6n3) and SFAs (C11:0, C14:0, C15:0, C20:0), whereas 2-heptenal and benzyl alcohol exhibited negative correlations with the same set of SFAs (C11:0, C14:0, C15:0, C20:0). This elucidates the relationships between several key flavor substances and specific fatty acids in the fish fillets. The findings of this study provide a scientific basis and theoretical guidance for optimizing the flavor quality of grilled fish products through targeted oil selection.

Key words: grass carp; baked; vegetable oil; fish quality; volatile flavor compounds

草鱼（*Ctenopharyngodon idellus*）是我国产量最高的淡水鱼类，据中国渔业统计年鉴显示，其年产量超 590 万吨[1]，具有重要的经济价值和广泛的消费基础。在营养价值方面，草鱼肉富含蛋白质、不饱和脂肪酸，以及多种微量元素和维生素[2]。为开发出风味多样、口感及营养品质俱佳的鱼肉制品，需要对鱼肉进行加工处理。在众多加工方式中，热加工因其能显著改变产品风味和质构特性而成为最常用的方法。

目前鱼肉制品的热加工方式主要包括蒸、煮、烤制和油炸等。由于不同的热加工方式在传热介质上存在差异，导致加工后的鱼肉在营养价值、理化性质和风味特性等方面产生显著差异[3−4]。蒸煮能最大限度地保留鱼肉的鲜味，减少营养成分的损失[5]，油炸能赋予产品酥脆口感，其中美拉德反应和脂质氧化作用赋予鱼肉浓郁油炸风味和金黄色泽[6]，而烤制过程中发生的美拉德反应、脂质氧化及 Strecker 降解等复杂反应能产生新的风味化合物，赋予鱼肉独特的焦糖化风味和坚果香气。同时烤制处理能改善鱼肉的脂肪酸比例，使其更符合人体营养需求，且烤制鱼肉具有硬度大、咀嚼性大等特点，丰富了鱼肉的食用口感[5]。近年来，烤制草鱼制品因其独特的风味和口感，深受消费者喜爱，市场需求日益增长。因此，优化烤制工艺以提升其风味品质和营养价值具有重要意义。

植物油作为我国居民膳食的重要组成部分，主要是通过压榨、浸出或精炼等工艺从油料作物中提取[7]。不仅是人体所需能量的重要来源，还富含不饱和脂肪酸、维生素 E 及甾醇等，极具营养价值[8]。同时，植物油在烹饪中能显著改善食物色泽、增添独特风味与香气[9]。目前市售的植物油繁多，棕榈油饱和脂肪酸含量高，可以称作饱和脂肪酸类植物油[8]，是少数在常温下呈固体的植物油，且棕榈油颜色较浅、气味较淡，被广泛应用于工业生产油炸食品中；大豆油含有丰富的亚油酸、油酸和棕榈酸等多种脂肪酸，是人体不饱和脂肪酸的重要来源[10]；葵花油是高亚油酸、低亚麻酸的食用油，同时还含有丰富的甾醇类物质[8,11]。山茶油含有极其丰富的单不饱和脂肪酸，主要以油酸为主，是典型的高油酸类植物油[12]；紫苏油中的 α-亚麻酸含量最高[13]，是良好的多不饱和脂肪酸的来源；芝麻油中的多不饱和脂肪酸的含量达 80% 以上[14]，同时由于其具有独特的香味而受到消费者的广泛喜爱。综合以上，本研究根据不同植物油的脂肪酸组成特征、风味特性及实际生产加工应用，选用了棕榈油、大豆油、葵花油、山茶油、紫苏油、芝麻油用于探究他们对草鱼块鱼肉品质及特征性风味的影响。

本研究以草鱼块（3×3×2 cm^3）为实验对象，使用六种不同食用植物油（大豆油、葵花油、山茶油、棕榈油、紫苏油、芝麻油）涂刷草鱼块，探究烤制后对其色度、质构、感官特性、挥发性风味化合物及脂肪酸组成的影响，并进而通过挥发性风味化合物与脂肪酸组成的相关性分析，阐明不同脂肪酸组成特点的植物油对挥发性风味化合物形成的影响，旨在为今后工业化生产高品质、风味独特的烤制即食草鱼块提供科学选油依据与理论指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鲜活草鱼（质量 1.5~2 kg/条）　江西省南昌市百家惠超市；食用大豆油、葵花油、山茶油、棕榈油、紫苏油、芝麻油　京东超市；正己烷、甲醇（色谱级）　上海麦克林生化科技股份有限公司；氢氧化钠（分析纯）　广东西陇化工有限公司；23 种正构烷烃混标（C8~C40）　色谱级，上海安谱璀世标准技术服务有限公司。

S220 烤箱　上海喆研机械制造有限公司；CR-10 色度仪　中国柯尼卡美能达精密光学上海有限公司；TA-TX plus 质构分析仪　英国 Stable Micro System 公司；8890GC-5977B 气相色谱-质谱联用仪　美国 Agilent 公司；50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头　美国 Supelco 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品制备　鲜活草鱼宰杀后取鱼背肉去除鱼皮并将其分切为 3 cm×3 cm×2 cm 的鱼块。鱼块随机分为 7 组，取 1 组草鱼块不涂刷任何油脂，作为烤制对照组，其余 6 组草鱼块分别均匀涂刷大豆油、葵花油、山茶油、棕榈油、紫苏油、芝麻油各 0.6 g（刷油量 2.5%）。所有样品均使用单层锡纸包裹，随后置于 210 ℃ 电烤箱中央烤制 20 min。待烤制结束后，立即取出样品，拆除锡纸，自然冷却后待测。

1.2.2　感官评价　参考 GB/T 16291.1-2012《感官分析选拔、培训与管理评价员一般导则》对 20 名感官评价候选人进行培训。待培训工作结束后，挑选 10 名表现优异人员（5 名男士、5 名女士，年龄范围为 20~30 岁）作为感官评价正式人员。在评价过程中，评定员需要对鱼块的外观形态、色泽、气味、组织

状态、可接受度进行评分。为保证同一指标下每条评定标准所对应的分值均匀分布，将所有指标评分范围设定为 0~10，具体评分细则如表 1 所示[15]。为消除样品之间的相互影响，感官评定员在评价每个样品前需用清水漱口，评价过程中各成员之间不互相交流。

表 1 草鱼块感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of grass carp blocks

项目	标准	评分
外观形态	质地均匀、形态完整，手撕断面有清晰肌肉纤维、呈蒜瓣状	8~10
	质地较均匀、形态较完整、肉质较黏	5~7
	质地不均匀、易碎、或肉质很黏	0~4
色泽	色泽光亮、颜色亮白、色度均匀	8~10
	色泽暗淡、颜色灰白、色度较均匀	5~7
	颜色灰暗、不均一、有焦黑色	0~4
气味	有烤鱼香味、无异味、有特异油香	8~10
	鱼香味不明显	5~7
	鱼腥味重、油哈喇味严重	0~4
组织状态	韧性强、肉质软硬适中	8~10
	韧性较强、肉质较硬	5~7
	组织软烂无韧性或肉质坚硬	0~4
可接受度	接受度高	8~10
	可接受	5~7
	不可接受	0~4

1.2.3 色度测定 使用 CR-10 型色度仪测定鱼块表面色泽。测定样品之前，使用标准白板对设备进行校准，将光斑和镜口垂直对准并紧贴草鱼块表面中心位置，记 L^*、a^*、b^*值。其中 L^*、a^*、b^*分别代表鱼块表面亮度、红度和黄度。

1.2.4 质构测定 使用 TA.XT Plus 物性测试仪测定草鱼块的质构。将样品裁剪成 1 cm×1 cm×1 cm 的均匀块状，选择全质构(TPA)模式，测试探头 P/36，每个样品进行两次轴向压缩，压缩时间间隔 5 s，压缩比为 50%，测试前速度 1 mm/s，测试中速度 1 mm/s，测试后速度 1 mm/s[16]。

1.2.5 油脂氧化指标的测定

1.2.5.1 酸价 参照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》。

1.2.5.2 过氧化值 参照 GB 5009.227-2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》。

1.2.6 挥发性风味化合物的测定

1.2.6.1 固相微萃取条件 参考崔宁等[17]的方法，使用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱仪(HS-SPME-GC-MS)测定鱼块中的挥发性风味化合物，具体方法：将鱼肉粉碎后，取 3 g 样品于顶空瓶中，加入 3 mL 饱和 NaCl 溶液。将样品置于 55 ℃ 水浴环境中保温 30 min。随后插入萃取纤维吸附挥发性风味化合物 30 min，待吸附结束后取出纤维，插入进样口解吸 10 min。

1.2.6.2 GC-MS 测定条件 参照课题组方法[18]。GC 条件：色谱柱：Agilent DB-WAX(30 m×0.25 mm，0.25 μm)；升温程序：40 ℃ 保持 3 min，以 5 ℃/min 升至 240 ℃，保持 15 min；进样口温度：250 ℃；载气：He(99.99%)；流速 1 mL/min；不分流模式。

MS 条件：EI 电离源；电离电压：70 eV，离子源温度 230 ℃；四极杆温度 150 ℃；质谱扫描范围：35~500 m/z。

1.2.6.3 挥发性风味化合物的鉴定与分析 通过 NIST20 谱库检索，保留匹配度大于等于 800 的化合物，并通过计算保留指数(retention index，RI)对各挥发性风味化合物进行定性；各挥发性风味化合物所得峰面积与总峰面积之比记作其相对含量。

$$RI = 100 \times \left[n + \frac{lgt_i - lgt_n}{lgt_{n+1} - lgt_n} \right]$$

式中：RI 为保留指数；t_i 为各挥发性风味化合物的保留时间；t_n 和 t_{n+1} 分别为碳原子数 n 和 n+1 对应正构烷烃的保留时间[19]。

1.2.6.4 关键挥发性风味化合物的鉴定 参照王琳琳等[20]的方法计算各挥发性风味化合物的相对气味活度值(ROAV)。将对样品风味贡献最大的物质的 ROAV 定为 100。再通过下式计算其他挥发性风味化合物的 ROAV。

$$ROAV = 100 \times \frac{C\%}{C\%_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T}$$

式中：C% 为样品某一挥发性风味化合物的相对含量(%)；$C\%_{stan}$ 为样品所有挥发性风味化合物中贡献最大的物质的相对含量(%)；T 为样品某一挥发性风味化合物的感觉阈值(mg/L)；T_{stan} 为样品所有挥发性风味化合物中贡献最大的物质的感觉阈值(mg/L)。

1.2.7 脂肪酸组成的测定 参照 GB 5009.168-2016《食品中脂肪酸的测定》第一法测定。

1.3 数据处理

采用 SPSS 26.0 统计软件对实验数据进行单因素 ANOVA 分析，$P<0.05$ 表示差异显著。Origin 2024 软件绘制折线图、柱状图，Chiplot 软件绘制热图。所有实验均包含 3 次平行，结果采用平均值±标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 不同植物油对烤制草鱼肉感官评分的影响

对照组和涂刷 6 种植物油的烤制草鱼肉感官评价如图 1 所示。涂刷植物油烤鱼块的总体可接受度明显高于对照组烤鱼块，这可能是因为涂刷油烤鱼的鱼肉香味和脂肪香味掩盖了鱼的腥味[21]。这与 Wei 等[22]的研究一致，大黄鱼经过烤制后，可以赋予鱼肉脂肪香味，同时减弱鱼腥味。芝麻油组的总体可接受度高于其他 5 组样品，其原因可能是芝麻油具有浓郁的坚果香和焦糖化香气受人们喜爱[14]。芝麻油对样品的气味影响最大，而在外观形态、色泽、组

织状态等方面各组无明显区别。综上所述，涂刷芝麻油组感官评分最高。

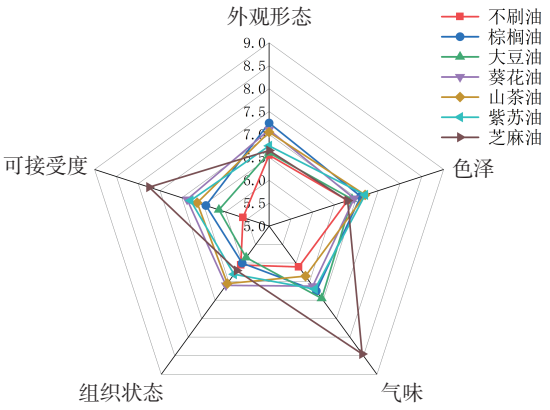


图 1　涂刷不同植物油对烤制草鱼块感官评价的影响

Fig.1　Effect of different vegetable oils on the sensory evaluation of grilled grass carp fillets

2.2　不同植物油对烤制草鱼肉色度的影响

色泽是烤鱼肉的重要理化指标之一。L^*、a^*、b^*分别代表鱼块表面的亮度、红绿度和黄蓝度。L^*值越大，亮度越大；$a^*>0$ 时颜色倾向红色，$a^*<0$ 颜色倾向绿色；$b^*>0$ 时颜色倾向黄色，$b^*<0$ 时颜色倾向蓝色。涂刷不同植物油条件下，烤制草鱼肉的 L^*、a^*、b^*值如表 2 所示。涂刷大豆油、葵花油、山茶油、紫苏油和芝麻油组的 L^*值显著高于对照组（$P<0.05$），其原因可能是鱼肉表面残留有油，增大了对光的反射能力，使得鱼肉的亮度增大。棕榈油组因其颜色较浅，对鱼肉亮度的影响较小。不同处理组间的 a^*值存在显著差异（$P<0.05$）。对照组与芝麻油组的 a^*值为正且最高，表明其色泽偏红。这可能与芝麻油中富含芝麻酚等强效天然抗氧化成分，能够有效抑制烤制过程中高铁肌红蛋白的生成，从而更好地保持了肉质的鲜红色泽[23]。大豆油组和山茶油组的 a^*值呈现负值，表明其色泽略微偏绿。此现象主要可归因于所涂刷植物油自身的色泽属性。研究表明，未精炼或初榨的大豆油和山茶油中通常含有“微量叶绿素”等天然绿色色素[24]。在烤制加热过程中，这些脂溶性色素可能部分降解但仍能保持绿色特征，并可附着于鱼肉蛋白表面，从而对产品的整体色泽构成贡献，导致色度仪检测到绿色调的增加（即 a^*值降低）。b^*值在不同组别间也表现出显著差异（$P<0.05$）。大豆油组和山茶油组的 b^*值显著低于其他组（$P<0.05$），表明其黄色调较弱。其原因可能是其固有的绿色调（$a^*<0$）在色彩视觉上可能对黄色调产生一定的中和作用。

综上所述，涂刷芝麻油对于烤制草鱼块色度的影响较小，而涂刷大豆油和山茶油对烤制草鱼块色度的影响较大。

表 2　涂刷不同植物油对烤制草鱼块的色度影响

Table 2　Effect of different vegetable oils on the color parameters of grilled grass carp fillets

组别	L^*值	a^*值	b^*值
对照组	71.33 ± 0.96^{d}	0.60 ± 0.31^{a}	8.83 ± 0.59^{a}
棕榈油组	71.89 ± 0.57^{cd}	0.31 ± 0.05^{bc}	8.14 ± 0.07^{a}
大豆油组	75.62 ± 0.70^{b}	-0.83 ± 0.29^{d}	6.64 ± 1.22^{b}
葵花油组	72.61 ± 0.25^{c}	0.22 ± 0.12^{c}	8.90 ± 0.17^{a}
山茶油组	77.89 ± 0.31^{a}	-0.69 ± 0.19^{d}	6.82 ± 0.36^{b}
紫苏油组	78.31 ± 0.19^{a}	-0.02 ± 0.05^{c}	8.24 ± 0.08^{a}
芝麻油组	76.47 ± 0.17^{b}	0.65 ± 0.08^{a}	8.98 ± 0.12^{a}

注：同列不同字母代表不同组别之间存在显著差异（$P<0.05$）；表3同。

2.3　不同植物油对烤制草鱼肉质构的影响

质构是烤鱼肉的一项重要理化指标，在一定程度上影响食品的品质。涂刷不同植物油条件下，烤制草鱼肉的硬度、咀嚼性、弹性、内聚性和胶着性如表 3 所示。与对照组相比，芝麻油组的硬度值最高，而其他实验组与对照组之间无显著差异（$P>0.05$），这可能与芝麻油中富含芝麻酚等强效天然抗氧化成分，在烤制过程中能够有效抑制脂质过氧化和蛋白质氧化降解，使蛋白质氧化调控在一个适宜的水平，更好的保持蛋白网络的完整性，减少了过度氧化导致的组织软化，从而形成较高的硬度[23]。棕榈油组的咀嚼性最高，且显著高于紫苏油组（$P<0.05$）。胶着性的变化与咀嚼性类似，这可能是由于棕榈油的饱和脂肪酸含量高使其在高温下具有更好的氧化稳定性，在肉制品的应用中，会增强脂肪的分散性并形成更好的质地，从而提升产品的胶着性[25]。棕榈油组胶着性显著高于大豆油组、葵花油组和紫苏油组（$P<0.05$）。所有实验组之间的弹性均无显著差异（$P>0.05$），说明植物油种类并未对鱼肉的弹性产生影响。对照组内聚性显著高于大豆油组和芝麻油组（$P<0.05$）。

综上所述，涂刷植物油对烤鱼质构的影响因油品种类而异。芝麻油在保持鱼肉硬度方面表现突出，而棕榈油则在维持咀嚼性和胶着性方面效果较好。

表 3　涂刷不同植物油对烤制草鱼块的质构影响

Table 3　Effect of different vegetable oils on the texture properties of grilled grass carp fillets

样本	硬度(g)	咀嚼性(g)	弹性	内聚性	胶着性(g)
对照组	237.29 ± 8.25^{bc}	44.94 ± 11.13^{ab}	0.44 ± 0.07^{a}	0.34 ± 0.04^{a}	101.01 ± 11.11^{abc}
大豆油组	244.84 ± 17.52^{bc}	34.60 ± 6.78^{ab}	0.44 ± 0.08^{a}	0.25 ± 0.02^{c}	78.22 ± 7.13^{c}
葵花油组	222.53 ± 13.99^{c}	30.06 ± 1.66^{ab}	0.38 ± 0.03^{a}	0.29 ± 0.04^{abc}	79.69 ± 3.88^{c}
山茶油组	270.09 ± 14.81^{b}	40.88 ± 8.29^{ab}	0.41 ± 0.05^{a}	0.30 ± 0.05^{abc}	99.33 ± 18.68^{abc}
棕榈油组	275.23 ± 13.26^{ab}	49.14 ± 19.15^{a}	0.42 ± 0.13^{a}	0.33 ± 0.04^{ab}	114.18 ± 8.63^{a}
紫苏油组	268.74 ± 40.30^{b}	26.08 ± 8.14^{b}	0.30 ± 0.03^{a}	0.27 ± 0.03^{bc}	85.29 ± 20.26^{bc}
芝麻油组	309.63 ± 13.85^{a}	39.24 ± 5.63^{ab}	0.38 ± 0.06^{a}	0.26 ± 0.01^{c}	104.84 ± 3.69^{ab}

2.4 不同植物油对烤制草鱼肉氧化指标的影响

酸价是衡量鱼肉制品中游离脂肪酸含量的指标，反映脂肪水解程度。由图 2 可知，涂刷不同植物油处理组烤制后的酸价显著上升（$P<0.05$），远高于对照组，这是由于脂肪在高温作用下会水解成为游离脂肪酸，刷油处理组增加了样品中会发生反应的脂肪总量。其中，山茶油组的酸价显著高于其他组（$P<0.05$），这可能与山茶油本身的特质及加热过程密切相关，山茶油的活性成分皂苷，在高温烤制过程中，可能起到天然乳化剂的作用，加剧了油脂与鱼肉中水分的相互作用，从而显著加速了甘油三酯的水解反应，

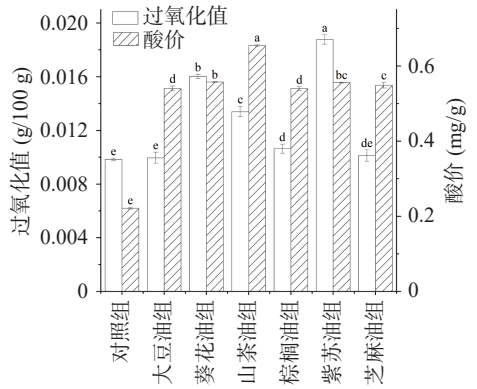


图 2 涂刷不同植物油烤制草鱼块的酸价和过氧化值

Fig.2 Acid value and peroxide value of grilled grass carp fillets brushed with different vegetable oils

注：同一指标不同字母代表不同组别之间存在显著差异（$P<0.05$）。

生成更多的游离脂肪酸[26]。使得山茶油组烤制后酸价显著高于其他处理组。

过氧化值表示食品中油脂和脂肪酸等被氧化的程度，其主要反映氢过氧化物的含量[27]。由图 2 可知，紫苏油组的过氧化值显著高于其他组（$P<0.05$），可能是由于其不饱和脂肪酸含量高。紫苏油的 α-亚麻酸含量可达 50% 以上，α-亚麻酸分子含有三个不饱和双键，在高温烤制过程中，极易发生氧化，生成大量的氢过氧化物[28]。

根据 GB 2716-2018《食品安全国家标准 植物油》可知，本实验中所有组别的酸价和过氧化值均符合国标的规定，不会存在油脂过度氧化的健康隐患。

2.5 不同植物油对烤制草鱼肉挥发性风味化合物的影响

2.5.1 挥发性风味化合物的定性和定量分析 风味特征是评价产品品质及其对消费者吸引力的重要指标。采用 HS-SPME-GC-MS 对植物油原油和烤制草鱼块的挥发性风味化合物进行分析，结果如表 4、表 5 所示。表 4 显示，植物油原油共检测到 88 种挥发性风味化合物，其中包括醛类 16 种、酮类 6 种、醇类 10 种、芳香族化合物 16 种、酯类 8 种、酸类 8 种、呋喃 1 种、吡嗪 16 种、吡啶 1 种、吡咯 3 种以及其他物质 3 种。各组所含有的挥发性风味化合物在种类和含量上存在显著差异（$P<0.05$）。芝麻油挥发性风味化合物种类最为丰富（64 种），主要包括吡

表 4 不同植物油挥发性风味化合物组成和相对含量

Table 4 Composition and relative content of volatile flavor compounds in different vegetable oils

风味化合物种类	风味化合物编号	CAS	风味化合物名称	相对含量(%)					
				大豆油	葵花油	山茶油	棕榈油	紫苏油	芝麻油
醛类	1	124-13-0	正辛醛	1.50±0.55^{c}	ND	7.31±1.58^{a}	6.94±0.62^{a}	5.36±0.38^{b}	ND
	2	18829-55-5	反-2-庚醛	8.70±1.75^{a}	6.15±1.06^{b}	4.96±0.11^{b}	6.46±0.71^{b}	4.87±0.49^{b}	ND
	3	124-19-6	正壬醛	3.24±0.91^{c}	1.95±0.61^{cd}	16.95±0.89^{a}	15.98±1.34^{a}	12.17±0.33^{b}	1.27±0.14^{d}
	4	2548-87-0	E-2-辛烯醛	ND	3.23±0.93	ND	ND	ND	ND
	5	4313-03-5	(E,E)-2,4-庚二烯醛	ND	ND	ND	ND	13.23±0.51	ND
	6	112-31-2	癸醛	ND	ND	2.25±0.39^{a}	2.23±0.68^{a}	1.64±0.09^{b}	ND
	7	18829-56-6	反-2-壬醛	2.25±0.55^{c}	1.80±0.46^{c}	3.80±0.17^{b}	6.15±0.13^{a}	3.46±0.14^{b}	ND
	8	3913-81-3	反式-2-癸烯醛	3.47±1.08^{b}	2.91±1.69^{b}	10.98±0.66^{a}	12.13±0.59^{a}	10.62±0.25^{a}	ND
	9	98-01-1	糠醛	ND	ND	0.22±0.04^{b}	ND	ND	5.01±0.2^{a}
	10	60784-31-8	(Z)-2-壬烯醛	ND	ND	ND	ND	ND	0.30±0.02
	11	620-02-0	5-甲基-2-糠醛	ND	ND	ND	ND	ND	3.88±0.16
	12	5910-87-2	反,反-2,4-壬二烯醛	ND	ND	ND	0.95±0.14^{a}	ND	0.10±0.03^{b}
	13	25152-83-4	反,顺-2,4-癸二烯醛	5.23±1.37^{ab}	6.99±2.73^{a}	3.47±0.03^{b}	4.52±0.25^{ab}	3.41±0.15^{b}	ND
	14	25152-84-5	反,反-2,4-癸二烯醛	17.24±5.09^{b}	30.06±4.65^{a}	10.42±0.33^{c}	13.69±1.36^{bc}	9.93±0.36^{c}	1.51±0.11^{d}
	15	120-57-0	3,4-亚甲二氧基苯甲醛	ND	ND	ND	ND	ND	0.05±0.01
	16	67-47-0	5-羟甲基糠醛	ND	ND	ND	ND	ND	0.1±0.01
酮类	17	821-55-6	2-壬酮	ND	ND	0.68±0.12	ND	ND	ND
	18	116-09-6	羟基丙酮	ND	ND	ND	ND	ND	0.09±0.01
	19	1003-04-9	四氢噻吩-3-酮	ND	ND	ND	ND	ND	0.29±0.02
	20	497-23-4	2(5H)-呋喃酮	ND	ND	ND	ND	ND	0.42±0.01
	21	80-71-7	甲基环戊烯醇酮	ND	ND	ND	ND	ND	0.75±0.05
	22	498-02-2	香草乙酮	ND	ND	ND	ND	ND	0.14±0.01

续表 4

风味化合物种类	风味化合物编号	CAS	风味化合物名称	相对含量(%)					
				大豆油	葵花油	山茶油	棕榈油	紫苏油	芝麻油
醇类	23	71-41-0	正戊醇	5.57±1.39^{a}	2.52±0.39^{b}	2.07±0.18^{b}	2.72±0.44^{b}	ND	0.24±0.01^{c}
	24	111-27-3	正己醇	0.50±0.17^{c}	0.29±0.07^{d}	1.07±0.17^{a}	0.86±0.09^{b}	0.82±0.02^{b}	0.13±0.01^{d}
	25	111-76-2	乙二醇丁醚	ND	ND	ND	ND	0.45±0.00	ND
	26	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	3.63±0.86^{a}	2.76±0.47^{b}	1.05±0.11^{cd}	1.44±0.1^{c}	1.09±0.01^{cd}	0.27±0.03^{d}
	27	111-70-6	正庚醇	1.04±0.16^{c}	ND	1.75±0.05^{a}	1.44±0.15^{b}	ND	ND
	28	111-87-5	正辛醇	ND	0.48±0.04^{c}	2.07±0.15^{a}	1.61±0.06^{b}	1.49±0.08^{b}	0.14±0.01^{c}
	29	112-53-8	月桂醇	ND	0.36±0.01	ND	ND	ND	ND
	30	19132-06-0	(S,S)-(+)-2,3-丁二醇	ND	ND	ND	ND	ND	0.16±0.01
	31	98-00-0	糠醇	ND	ND	ND	ND	ND	6.69±0.24
	32	118-71-8	麦芽醇	ND	ND	ND	ND	ND	0.96±0.01
芳香族	33	611-14-3	邻乙基甲苯	ND	0.12±0.08	ND	ND	ND	ND
	34	3454-07-7	1-乙基-4-乙烯基苯	0.70±0.16^{a}	0.37±0.07^{b}	ND	ND	ND	ND
	35	60-12-8	苯乙醇	0.08±0.02^{c}	ND	0.19±0.03^{b}	ND	ND	0.24±0.02^{a}
	36	100-52-7	苯甲醛	0.89±0.24^{b}	0.88±0.07^{b}	ND	ND	2.38±0.15^{a}	0.61±0.04^{c}
	37	529-20-4	邻甲基苯甲醛	ND	ND	0.49±0.10^{ab}	0.57±0.07^{a}	0.47±0.02^{b}	ND
	38	98-86-2	苯乙酮	0.09±0.02^{c}	0.13±0.01^{bc}	0.17±0.02^{b}	ND	0.19±0.03^{b}	1.57±0.06^{a}
	39	4748-78-1	4-乙基苯甲醛	0.34±0.01^{c}	0.19±0.09^{d}	1.14±0.05^{b}	1.24±0.02^{b}	1.40±0.06^{a}	0.04±0.01^{e}
	40	97-53-0	丁香酚	ND	39.75±4.60	ND	ND	ND	ND
	41	108-95-2	苯酚	ND	ND	0.70±0.06^{a}	0.63±0.05^{ab}	0.57±0.14^{b}	0.27±0.02^{c}
	42	620-23-5	间甲基苯甲醛	ND	ND	ND	ND	ND	0.03±0.00
	43	122-78-1	2-苯基乙醛	ND	ND	ND	ND	ND	0.09±0.01
	44	90-05-1	愈创木酚	ND	ND	ND	ND	ND	6.32±0.29
	45	100-51-6	苯甲醇	ND	ND	ND	ND	ND	0.25±0.01
	46	7786-61-0	2-甲氧基-4-乙烯基苯酚	ND	ND	ND	ND	ND	1.94±0.10
	47	91-10-1	2,6-二甲氧基苯酚	ND	ND	ND	ND	ND	0.19±0.02
	48	2628-17-3	4-乙烯基苯酚	ND	ND	ND	ND	ND	0.03±0.00
酯类	49	76-49-3	乙酸龙脑酯	ND	ND	3.45±0.87^{a}	ND	1.09±0.26^{b}	ND
	50	108-29-2	丙位戊内酯	ND	ND	ND	ND	0.16±0.05	ND
	51	96-48-0	γ-丁内酯	0.41±0.03^{c}	0.3±0.12^{c}	1.33±0.07^{b}	0.44±0.06^{c}	0.32±0.11^{c}	1.79±0.06^{a}
	52	695-06-7	丙位己内酯	ND	0.18±0.02^{d}	0.86±0.07^{a}	0.77±0.03^{b}	0.71±0.02^{c}	ND
	53	104-50-7	丙位辛内酯	0.29±0.04^{d}	0.33±0.04^{cd}	0.83±0.12^{a}	0.58±0.08^{b}	0.49±0.11^{bc}	0.10±0.01^{e}
	54	542-28-9	δ-戊内酯	ND	ND	ND	0.51±0.05	ND	ND
	55	105-21-5	丙位庚内酯	ND	ND	ND	0.28±0.03	ND	ND
	56	599-04-2	D-(-)-泛酰内酯	ND	ND	ND	ND	ND	1.31±0.10
酸类	57	64-19-7	冰醋酸	ND	0.19±0.03^{d}	4.01±0.16^{b}	1.17±0.30^{c}	3.8±0.10^{b}	10.23±0.24^{a}
	58	79-09-4	丙酸	ND	ND	ND	ND	3.62±0.19^{a}	0.49±0.02^{b}
	59	109-52-4	正戊酸	ND	ND	1.67±0.11^{a}	ND	1.28±0.08^{a}	0.16±0.11^{b}
	60	111-14-8	庚酸	ND	ND	1.24±0.20^{a}	ND	1.09±0.43^{a}	ND
	61	124-07-2	辛酸	ND	ND	1.67±0.19^{a}	1.15±0.63^{c}	1.46±0.11^{bc}	0.26±0.00^{d}
	62	57-10-3	棕榈酸	41.92±13.36^{a}	ND	11.54±0.76^{b}	11.65±0.70^{b}	10.48±1.69^{b}	ND
	63	142-62-1	正己酸	ND	ND	ND	4.16±0.19	ND	ND
	64	112-05-0	正壬酸	ND	ND	ND	ND	ND	0.06±0.00
呋喃	65	3777-69-3	2-戊基呋喃	4.36±0.37^{a}	2.64±0.27^{b}	4.70±0.14^{a}	4.25±0.63^{a}	3.18±0.57^{b}	0.72±0.08^{c}
吡嗪	66	290-37-9	吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.28±0.09
	67	109-08-0	2-甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	15.61±3.62
	68	108-50-9	2,6-二甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	5.34±0.15
	69	13925-00-3	2-乙基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	1.95±0.07
	70	5910-89-4	2,3-二甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	1.39±0.06
	71	13925-03-6	2-乙基-6-甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	2.95±0.17
	72	15707-23-0	3-乙基-2-甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	4.90±0.20
	73	13067-27-1	2,6-二乙基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.36±0.01
	74	13360-65-1	2-乙基-3,6-二甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	5.34±0.26
	75	13925-07-0	2-乙基-3,5-二甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.96±0.04

续表 4

风味化合物种类	风味化合物编号	CAS	风味化合物名称	相对含量(%)					
				大豆油	葵花油	山茶油	棕榈油	紫苏油	芝麻油
	76	1124-11-4	川芎嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.07±0.00
	77	18138-05-1	3,5-二乙基-2-甲基-吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.55±0.03
	78	23747-48-0	5H-5-甲基-6,7-二氢环戊基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.31±0.02
	79	22047-25-2	2-乙酰基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	2.36±0.15
	80	56617-69-7	2,5-二甲基-3-戊基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	0.10±0.01
	81	61892-95-3	5-甲基-2-吡嗪甲醇	ND	ND	ND	ND	ND	0.70±0.06
吡啶	82	110-86-1	吡啶	ND	ND	ND	ND	ND	0.13±0.16
	83	109-97-7	吡咯	ND	ND	ND	ND	ND	1.11±0.02
吡咯	84	1072-83-9	2-乙酰吡咯	ND	ND	ND	ND	ND	1.77±0.07
	85	1003-29-8	吡咯-2-甲醛	ND	ND	ND	ND	ND	4.23±0.18
	86	13474-59-4	反式-ALPHA-佛手甘油烯	ND	ND	ND	ND	ND	0.31±0.04
其他	87	60-35-5	乙酰胺	ND	ND	ND	ND	ND	1.27±0.02
	88	120-72-9	吲哚	ND	ND	ND	ND	ND	0.13±0.01

注: 不同处理组中同种挥发性风味化合物之间进行显著性分析, 不同字母代表不同样品之间存在显著差异(P<0.05); “ND”代表未检测到; 表5、表7同。

表 5 涂刷不同植物油烤制草鱼块挥发性风味化合物组成和相对含量

Table 5 Composition and relative content of volatile flavor compounds in grilled grass carp fillets with different vegetable oils

风味化合物种类	风味化合物编号	CAS	风味化合物名称	相对含量(%)						
				对照组	大豆油组	葵花油组	山茶油组	棕榈油组	紫苏油组	芝麻油组
	1	18829-55-5	反-2-庚醛	ND	ND	7.62±1.79^{a}	ND	5.13±1.70^{b}	ND	ND
	2	124-19-6	正壬醛	ND	21.95±1.3^{ab}	23.7±0.16^{ab}	25.26±3.11^{a}	20.07±0.42^{b}	22.88±2.42^{ab}	23.62±3.66^{ab}
	3	124-13-0	正辛醛	5.59±0.47^{a}	4.58±0.07^{ab}	5.41±0.79^{a}	4.52±1.02^{ab}	4.33±0.84^{ab}	5.11±1.18^{a}	3.18±0.47^{b}
	4	57266-86-1	2-庚烯醛	7.20±0.46^{a}	6.17±0.30^{b}	ND	5.08±1.00^{c}	ND	4.58±1.48^{c}	ND
	5	112-31-2	癸醛	1.60±0.32^{a}	1.50±0.09^{a}	ND	ND	1.63±0.70^{a}	ND	1.64±0.56^{a}
醛类	6	60784-31-8	(Z)-2-壬烯醛	5.84±0.79^{ab}	4.09±0.40^{bc}	6.66±1.83^{a}	3.72±0.58^{c}	4.42±1.20^{bc}	3.92±0.81^{bc}	3.64±1.36^{c}
	7	3913-81-3	反式-2-癸烯醛	11.97±1.41^{a}	8.03±0.23^{a}	12.8±4.47^{a}	8.73±0.70^{a}	9.34±2.42^{a}	7.95±0.51^{a}	7.98±0.88^{a}
	8	5910-87-2	反,反-2,4-壬二烯醛	ND	ND	ND	ND	1.15±0.21	ND	ND
	9	25152-83-4	反,顺-2,4-癸二烯醛	8.48±1.18^{a}	6.19±1.60^{ab}	8.66±1.91^{a}	5.35±0.82^{ab}	7.08±2.85^{ab}	6.40±1.70^{ab}	4.62±0.72^{b}
	10	25152-84-5	反,反-2,4-癸二烯醛	24.28±2.89^{a}	15.26±1.19^{b}	22.81±4.69^{ab}	16.54±3.62^{ab}	19.76±6.42^{ab}	14.91±1.64^{b}	16.04±5.80^{ab}
	11	2765-11-9	十五醛	ND	ND	ND	2.04±0.25^{a}	ND	ND	1.26±0.44^{b}
	12	71-41-0	正戊醇	2.18±0.66^{a}	ND	2.09±0.5^{a}	ND	1.54±0.48^{ab}	1.11±0.18^{b}	ND
	13	111-27-3	正己醇	0.68±0.18^{a}	0.81±0.09^{a}	ND	1.06±0.17^{a}	0.69±0.14^{a}	0.91±0.31^{a}	0.93±0.18^{a}
醇类	14	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	12.79±3.45^{a}	13.97±2.87^{a}	9.45±0.72^{a}	12.14±2.63^{a}	11.56±1.39^{a}	12.55±1.38^{a}	13.03±2.10^{a}
	15	111-70-6	正庚醇	0.88±0.15^{a}	ND	ND	ND	0.54±0.22^{a}	0.84±0.38^{a}	ND
	16	111-87-5	正辛醇	1.46±0.13^{a}	1.43±0.10^{a}	1.24±0.21^{a}	1.35±0.23^{a}	1.34±0.24^{a}	1.50±0.24^{a}	1.77±0.77^{a}
	17	18409-17-1	反-2-辛烯-1-醇	3.28±0.83^{a}	3.24±0.18^{a}	ND	4.16±1.79^{a}	3.13±1.25^{a}	4.19±0.11^{a}	4.66±0.47^{a}
	18	100-42-5	苯乙烯	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.70±0.04
	19	100-52-7	苯甲醛	ND	ND	ND	5.19±1.78^{a}	ND	5.48±0.12^{a}	3.71±0.54^{b}
	20	3454-07-7	1-乙基-4-乙烯基苯	ND	ND	1.73±0.30	ND	ND	ND	ND
	21	529-20-4	邻甲基苯甲醛	0.37±0.03^{ab}	0.31±0.04^{ab}	0.45±0.16^{a}	0.26±0.03^{b}	0.29±0.05^{b}	0.29±0.07^{b}	0.25±0.03^{b}
	22	98-86-2	苯乙酮	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.89±0.03
	23	4748-78-1	4-乙基苯甲醛	1.36±0.35^{a}	0.35±0.12^{c}	ND	ND	ND	1.11±0.13^{ab}	0.98±0.37^{b}
芳香族	24	100-51-6	苯甲醇	4.14±0.06^{a}	2.01±0.01^{b}	ND	ND	1.29±0.32^{c}	ND	ND
	25	128-37-0	2,6-二叔丁基对甲基苯酚	0.13±0.03^{a}	ND	ND	ND	ND	0.07±0.01^{b}	ND
	26	108-95-2	苯酚	1.06±0.23^{b}	0.82±0.20^{bc}	2.12±0.07^{a}	0.54±0.05^{d}	0.61±0.05^{cd}	0.67±0.06^{cd}	ND
	27	90-05-1	愈创木酚	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.06±0.21
	28	97-53-0	丁香酚	2.08±0.14^{c}	1.96±0.07^{c}	3.23±0.85^{ab}	0.79±0.12^{d}	2.19±0.6^{c}	2.28±0.05^{bc}	4.16±0.05^{a}
	29	1450-72-2	2'-羟基-5'-甲基苯乙酮	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.14±0.03
	30	695-06-7	丙位己内酯	0.90±0.16^{b}	0.66±0.06^{bc}	1.46±0.15^{a}	ND	0.72±0.19^{bc}	0.51±0.18^{c}	ND
酯类	31	104-50-7	丙位辛内酯	0.32±0.06^{ab}	ND	ND	0.34±0.12^{ab}	0.2±0.06^{b}	0.27±0.09^{b}	0.46±0.15^{a}
	32	542-28-9	δ-戊内酯	ND	0.29±0.02^{b}	0.42±0.00^{a}	0.20±0.07^{c}	ND	ND	ND
羧酸类	33	109-52-4	正戊酸	1.30±0.43^{a}	ND	ND	ND	1±0.18^{b}	ND	ND
	34	142-62-1	正己酸	10.04±0.52^{a}	6.36±0.93^{bc}	ND	5.99±0.95^{c}	7.80±1.10^{b}	5.12±0.35^{c}	5.66±1.37^{c}

续表 5

风味化合物种类	风味化合物编号	CAS	风味化合物名称	相对含量(%)						
				对照组	大豆油组	葵花油组	山茶油组	棕榈油组	紫苏油组	芝麻油组
呋喃	35	124-07-2	辛酸	2.47±0.26^{bc}	ND	5.34±1.03^{a}	1.74±0.77^{c}	1.95±0.87^{bc}	1.36±0.46^{c}	1.54±0.68^{c}
	36	3777-69-3	2-戊基呋喃	ND	ND	5.94±0.77^{b}	1.71±1.59^{c}	7.90±1.86^{a}	3.75±0.86^{c}	3.74±0.20^{c}
吡嗪	37	109-08-0	2-甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.18±0.44
	38	108-50-9	2,6-二甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.96±0.36
	39	13925-03-6	2-乙基-6-甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.53±0.31
	40	17398-16-2	2-乙基-3,5,6-三甲基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.13±0.04
	41	13067-27-1	2,6-二乙基吡嗪	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.17±0.22
吡咯	42	1003-29-8	吡咯-2-甲醛	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.16±0.08

嗪类、芳香族化合物、醛类和醇类，分别占总含量的 25.00%、18.75%、12.50% 和 10.94%(图 3)。

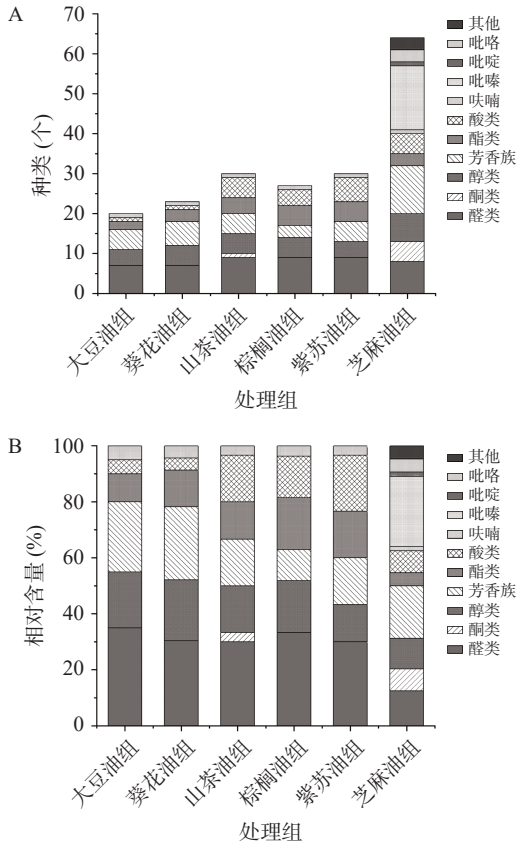


图 3　不同植物油挥发性风味化合物种类(A)和相对含量(B)变化

Fig.3　Changes in categories (A) and relative contents (B) of volatile flavor compounds from different vegetable oils

表 5 显示，不同处理组共检测到 42 种挥发性风味化合物，其中包括醛类 11 种、醇类 6 种、芳香族化合物 12 种、酯类 3 种、酸类 3 种、呋喃 1 种、吡嗪 5 种、吡咯 1 种。各组所含有的挥发性风味化合物在种类和含量上存在显著差异(P<0.05，图 4)。烤制草鱼块的主要挥发性风味化合物为醛类、芳香族化合物和醇类。张艳等[29] 在研究即食烤鱼挥发性风味化合物差异中检测到醇类和醛类为主要的挥发性风味化合物，与本研究有相似结果。各处理组中共检测出 9 种共有成分，以及数量各不相同的特有成分。其中葵花油组所含独特挥发性风味化合物种类最少，芝麻油组最多，这些物质多为芳香族化合物和吡嗪类化合物，由表 5 可知，这可能与原油中挥发性风味化合物的组成和含量有关。由于挥发性风味化合物大多通过脂肪酸的氧化降解生成，所以食用油种类不同，所含脂肪酸种类、含量和加工过程中氧化程度不同，导致涂刷不同植物油条件下烤制草鱼块挥发性风味化合物的比例存在较大差别。

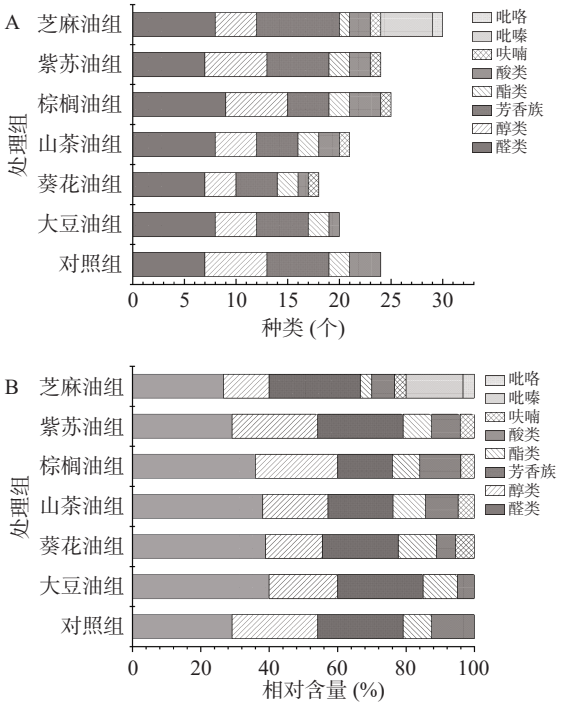


图 4　涂刷不同植物油烤制草鱼块挥发性风味化合物种类(A)和相对含量(B)变化

Fig.4　Changes in categories (A) and relative contents (B) of volatile flavor compounds in grilled grass carp fillets treated with different vegetable oils

醛类物质主要来源于不饱和脂肪酸的氧化[17]，由于醛类物质的气味阈值偏低，对烤制鱼块的气味有较为主要的作用，是烤制食品的重要挥发性风味化合物。各处理组中均检测出了正辛醛、(Z)-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛、反,顺-2,4-癸二烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛。正壬醛具有独特的油香，是油炸食品中常见的香味物质，除对照组外，其余各组均检出了正壬醛，这说明涂刷油烤鱼可以为鱼肉提供独特的脂肪香气。醇类物质主要来自于脂肪氧化分解和羰基化合物的

还原[30]，影响鱼块风味的主要为阈值低的不饱和脂肪醇[29]。各处理组中都检出了 1-辛烯-3-醇和正辛醇，其中 1-辛烯-3-醇主要来自于十八碳二烯酸的氧化降解[31]，具有典型的干草香气。对照组与各实验组的醇类物质无显著性差异（P>0.05），说明涂刷油对烤鱼块产生醇类物质无明显影响。

含氮化合物（如呋喃、吡嗪）是油炸烤制食品中另一典型的挥发性风味化合物，主要通过氨基酸降解、羰氨反应及二者的交互作用产生形成[32]。由表 5 可知，除了对照组和大豆油组，其他五组都含有 2-戊基呋喃。2-戊基呋喃可以通过亚麻酸的氧化、Amadori 重排以及葡萄糖分解产生[33]，能赋予食物浓郁的黄油香味、焦糖味。芝麻油组含有独特的吡嗪类物质，因其阈值较低而使食物带有烘烤香味和坚果香味。同时，涂刷不同植物油烤制条件下还检测到芳香族化合物、羧酸类和酯类化合物，这些物质对于改善鱼肉风味也有一定作用。

综上所述，涂刷不同植物油烤制草鱼块的主要挥发性风味化合物为醛类、醇类和芳香族化合物。

2.5.2 关键挥发性风味化合物分析 挥发性风味化合物对样品整体的风味贡献不仅与物质的相对含量和浓度有关，还与该物质的气味阈值有关[34]。相对气味活度值（ROAV）可以表示挥发性风味化合物对样品整体风味的贡献度，一般认为，对样品整体风味具有重要作用的关键性风味化合物的 ROAV≥1[35]，且 ROAV 与其贡献度成正比。通过查找相关文献[36]，确定各挥发性风味化合物气味阈值，并计算获得其 ROAV，分析各样品中关键性风味化合物。表 6 展示了 ROAV≥1 的所有关键挥发性风味化合物。

由表 6 可知，所有处理组中共鉴定出 8 种关键风味化合物，主要是醛类。各组均将反,反-2,4-癸二烯醛的 ROAV 定为 100，棕榈油组正壬醛的贡献度较其余处理组低，且反,反-2,4-壬二烯醛为其特有的关键挥发性风味化合物。大豆油组和紫苏油组中反,顺-2,4-癸二烯醛的贡献度较其余处理组高。葵花油组中 1-辛烯-3-醇、芝麻油组中正辛醛并不能作为关键挥发性风味化合物，这与其余处理组不同。山茶油组、紫苏油组和芝麻油组的关键挥发性风味化合物种类和含量类似。其中正壬醛、(Z)-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛、反,顺-2,4-癸二烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛为 6 种处理组样品所共有的关键挥发性风味化合物。因此，涂刷不同植物油烤制草鱼肉的关键挥发性风味化合物多于对照组，且这些物质大多为醛类物质，为烤制鱼肉提供了特殊的油脂香味。

综上所述，烤制草鱼块的关键风味化合物主要由醛类物质构成，但其具体组成因所用植物油的不同而有所差异。

2.6 脂肪酸组成分析

脂肪酸是脂质的组成成分和风味前体物质。如表 7 所示，共检测出了 12 种饱和脂肪酸、6 种单不饱和脂肪酸和 9 种多不饱和脂肪酸。由表 7 可知，刷油和不刷油烤制后，各刷油组总脂肪酸含量比不刷油组增大，这是由于涂刷的植物油中的脂肪酸吸附于鱼肉表面或者渗入鱼肉中造成[37]。其中，大豆油组和葵花油组中亚油酸（C18:2n6c）含量高于其他各处理组，这虽然增加了 PUFA 的总量，但主要是 ω-6 PUFA。在现代饮食中 ω-6 脂肪酸往往已过量的背景下，此举对产品营养价值的提升有限，甚至可能加剧体内的 ω-6/ω-3 不平衡。同时，引入的大量 PUFA 也使其面临氧化风险。山茶油组和棕榈油组的处理提升了鱼块的 MUFA 含量，主要是油酸（C18:1n9c），这是由于其原料油中的油酸（C18:1n9c）含量高。此外，棕榈油因其本身含有较多的月桂酸（C12:0）和肉豆蔻酸（C14:0），导致其烤制后的鱼块中这些饱和脂肪酸的含量有所增加。从健康角度看，高 MUFA 的脂质构成对心血管健康有益。同时这种以 MUFA 和稳定 SFA 为主导的脂肪酸谱，使得这两组产品在烤制后具有先天的氧化稳定性优势，对应其较低的过氧化值，有利于延长货架期。紫苏油组中 α-亚麻酸（C18:3n3）含量高达 31.06 mg/g，显著高于其他组别（P<0.05），这主要是因为紫苏油中亚麻酸含量高，经烤制后，亚麻酸仍未完全损失，可作为 n-3 系列脂肪酸的优质来源，能显著增强产品的营养价值。但是其大量引入的多个不饱和双键在加热过程中极易发生

表 6 涂刷不同植物油烤制草鱼块关键风味化合物分析

Table 6 Analysis of key flavor compounds in grilled grass carp fillets with different vegetable oils

风味化合物	阈值[36]（μg/kg）	ROAV						
		对照组	大豆油组	葵花油组	山茶油组	棕榈油组	紫苏油组	芝麻油组
正辛醛	0.587	1.06	1.38	1.09	1.26	1.01	1.58	0.91
正壬醛	1.1	ND	3.53	2.55	3.75	2.49	3.77	3.61
(Z)-2-壬烯醛	0.02	32.48	36.2	39.44	30.38	30.19	35.5	30.65
反式-2-癸烯醛	0.3	4.44	4.74	5.05	4.75	4.25	4.8	4.47
反,反-2,4-壬二烯醛	0.1	ND	ND	ND	ND	1.58	ND	ND
反,顺-2,4-癸二烯醛	0.04	23.57	27.4	25.64	21.84	24.18	28.96	19.45
反,反-2,4-癸二烯醛	0.027	100	100	100	100	100	100	100
1-辛烯-3-醇	1.5	0.95	1.65	0.75	1.32	1.05	1.52	1.46

注：“ND”代表未检出。

表 7　涂刷不同植物油烤制草鱼块脂肪酸组成和含量

Table 7　Fatty acid composition and content in grilled grass carp fillets with different vegetable oils conditions

脂肪酸种类	绝对含量(mg/g)						
	对照组	大豆油组	葵花油组	山茶油组	棕榈油组	紫苏油组	芝麻油组
C10:0	ND	0.02±0.00^{b}	0.04±0.02^{b}	0.03±0.00^{b}	0.08±0.06^{a}	0.03±0.01^{b}	0.03±0.01^{b}
C11:0	ND	0.01±0.00^{ab}	0.02±0.01^{ab}	0.01±0.00^{b}	0.02±0.00^{ab}	0.02±0.00^{a}	0.02±0.00^{ab}
C12:0	0.22±0.11^{b}	0.26±0.03^{ab}	0.25±0.01^{ab}	0.24±0.02^{b}	0.38±0.12^{a}	0.23±0.02^{b}	0.29±0.06^{ab}
C13:0	0.03±0.01^{a}	0.04±0.00^{a}	0.04±0.01^{a}	0.04±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}	0.03±0.00^{a}	0.04±0.00^{a}
C14:0	8.90±0.33^{d}	10.64±0.72^{bc}	10.85±1.02^{abc}	10.89±0.66^{abc}	11.69±0.66^{ab}	10.25±0.25^{c}	11.85±0.08^{a}
C14:1	0.35±0.03^{c}	0.4±0.10^{bc}	0.42±0.08^{abc}	0.42±0.01^{abc}	0.47±0.04^{ab}	0.38±0.05^{bc}	0.52±0.02^{a}
C15:0	1.15±0.04^{b}	1.49±0.01^{a}	1.47±0.13^{a}	1.46±0.09^{a}	1.50±0.09^{a}	1.42±0.06^{a}	1.56±0.03^{a}
C16:0	110.61±5.46^{b}	132.88±6.91^{a}	133.88±5.84^{a}	135.38±5.51^{a}	140.13±5.29^{a}	133.72±2.88^{a}	137.17±0.93^{a}
C16:1	41.57±1.70^{b}	49.03±4.32^{a}	49.76±5.04^{a}	51.20±3.37^{a}	50.65±4.11^{a}	48.35±3.05^{a}	53.46±1.19^{a}
C17:0	1.08±0.15^{b}	1.50±0.28^{a}	1.43±0.08^{a}	1.52±0.23^{a}	1.38±0.06^{ab}	1.46±0.13^{a}	1.45±0.13^{a}
C18:0	38.02±14.62^{a}	30.44±1.38^{a}	31.43±2.37^{a}	29.86±0.96^{a}	32.53±1.66^{a}	30.5±0.19^{a}	32.87±2.84^{a}
C18:1n9t	23.05±8.74^{abc}	28.77±7.78^{a}	15.51±1.29^{bc}	14.67±5.19^{c}	15.30±2.99^{c}	23.03±3.12^{abc}	25.95±5.20^{ab}
C18:1n9c	103.43±23.19^{ab}	79.18±19.36^{b}	104.68±13.83^{ab}	94.59±9.51^{ab}	110.20±4.83^{a}	101.16±3.47^{ab}	95.25±21.98^{ab}
C18:2n6c	113.22±7.03^{d}	143.58±4.20^{a}	143.44±7.62^{a}	126.93±4.84^{c}	132.79±7.88^{abc}	129.03±1.96^{bc}	139.63±8.56^{ab}
C18:2n6t	0.27±0.00^{abc}	0.32±0.11^{ab}	0.18±0.02^{bc}	0.34±0.02^{a}	0.30±0.10^{abc}	0.30±0.01^{abc}	0.27±0.10^{abc}
C18:3n6	1.71±0.12^{b}	2.62±0.27^{a}	2.69±0.33^{a}	2.58±0.21^{a}	2.35±0.03^{a}	2.56±0.15^{a}	2.43±0.05^{a}
C18:3n3	11.71±0.46^{cd}	17.36±0.76^{b}	14.81±1.87^{bc}	14.61±0.44^{bc}	15.54±0.85^{b}	31.06±3.86^{a}	16.06±0.21^{b}
C20:0	1.35±0.03^{c}	1.77±0.04^{b}	1.72±0.19^{b}	1.70±0.08^{b}	1.77±0.14^{b}	1.61±0.06^{b}	2.05±0.11^{a}
C20:1	7.33±0.24^{b}	8.92±0.61^{a}	8.99±0.99^{a}	9.15±0.69^{a}	8.80±0.97^{a}	8.42±0.53^{ab}	9.46±0.32^{a}
C20:3n6	5.64±0.16^{c}	7.86±0.24^{a}	7.26±0.75^{ab}	7.34±0.50^{ab}	6.93±0.67^{b}	7.08±0.16^{ab}	7.33±0.18^{ab}
C20:4n6	9.11±0.39^{a}	11.17±4.74^{a}	11.64±1.44^{a}	12.46±1.07^{a}	10.79±1.83^{a}	12.07±0.58^{a}	11.67±0.48^{a}
C20:3n3	0.52±0.15^{a}	0.58±0.03^{a}	0.61±0.18^{a}	0.54±0.03^{a}	0.62±0.06^{a}	0.52±0.07^{a}	0.67±0.03^{a}
C20:5n3	0.71±0.07^{b}	1.05±0.24^{a}	1.02±0.25^{a}	0.98±0.15^{ab}	0.93±0.11^{ab}	0.96±0.11^{ab}	1.03±0.07^{a}
C22:0	0.14±0.01^{c}	0.28±0.02^{ab}	0.34±0.03^{a}	0.16±0.02^{c}	0.19±0.03^{c}	0.20±0.03^{c}	0.26±0.05^{b}
C22:1n9	0.42±0.25^{a}	0.53±0.18^{a}	0.35±0.04^{a}	0.46±0.11^{a}	0.36±0.03^{a}	0.33±0.08^{a}	0.27±0.10^{a}
C22:6n3	1.82±0.08^{b}	3.48±0.96^{a}	2.93±0.35^{b}	3.03±0.36^{b}	2.81±0.66^{b}	3.10±0.17^{b}	2.95±0.25^{b}
C24:0	0.01±0.00^{b}	0.03±0.01^{a}	ND	ND	ND	ND	ND
SFA	161.51±8.87^{b}	179.35±8.62^{a}	181.36±9.57^{a}	181.29±7.34^{a}	189.72±7.44^{a}	179.46±2.89^{a}	186±0.24^{a}
MUFA	176.15±33.79^{a}	166.83±30.7^{ab}	179.72±19.32^{a}	170.50±10.17^{a}	185.77±7.65^{a}	181.67±2.04^{a}	184.91±17.40^{a}
PUFA	144.63±7.66^{b}	188.02±3.57^{a}	184.52±11.77^{a}	168.80±7.12^{b}	173.07±10.30^{a}	186.68±6.04^{a}	182.04±8.12^{ab}
TFA	482.29±33.73^{a}	534.2±36.43^{a}	545.59±35.1^{a}	520.59±23.87^{a}	548.55±24.51^{a}	547.81±1.66^{a}	508.72±60.63^{a}

氧化，这不仅可能产生不良风味，更会缩短产品货架期。芝麻油组的脂肪酸组成较为均衡，更符合《中国居民膳食营养素参考摄入量》建议食用的脂肪酸比例模式为 SFA 与 MUFA、PUFA 比例为 1∶1∶1[38]。同时芝麻油中的芝麻酚等天然抗氧化成分也能够有效抑制氧化，延长货架期。

2.7　相关性分析

相关性分析是对两个或多个变量的研究，目的是测量两个变量之间的相关性。因此，本实验用相关性分析研究不同植物油烤制后鱼肉的风味物质与其脂肪酸组成之间的关系。该分析旨在揭示，在经历了与特定油脂的共同烤制过程后，最终鱼肉样品的脂肪酸与风味物质之间的相关性。图 5 结果表明，特定脂肪酸对醛类、醇类、呋喃类风味物质有显著相关性（P<0.05）。正壬醛与 C11:0、C14:0、C15:0、C20:0、C20:1、C18:3n6、C20:3n6 和 C22:6n3 呈现正相关，表明这些脂肪酸的氧化裂解是其主要来源。与之相反，2-庚烯醛和苯甲醇与 C11:0、C14:0、C15:0 和 C20:0 等呈负相关，与 C16:1 和 C18:2n6t 呈正相关，暗示刷油处理可能改变了鱼肉内部的脂质氧化路径，

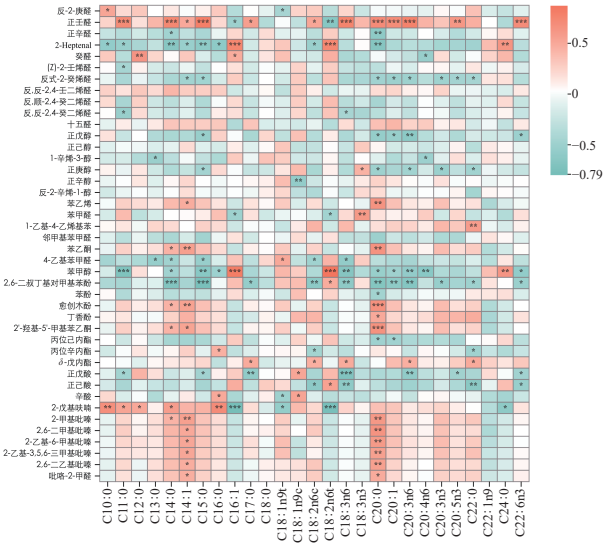


图 5　挥发性风味化合物与脂肪酸组成的相关性分析

Fig.5　Correlation analysis between volatile flavor compounds and fatty acid composition

抑制了这些物质的生成。因此，刷油烤制后 2-庚烯醛和苯甲醇的含量与对照组相比下降。

大豆油组中，正壬醛与 C18:3n6 和 C20:3n6 等 PUFA 呈正相关趋势。这与大豆油组富含 PUFA 的特征相符，提示其丰富的 PUFA 在热加工下发生氧化裂解，是构成该组烤制鱼肉风味基调的重要原因。葵花油组中，其特有的风味物质 1-乙基-4-乙烯基苯与 C22:0 呈显著正相关（P<0.05），表明 C22:0 可能参与了美拉德反应，是 1-乙基-4-乙烯基苯的前体物质。山茶油组中，正壬醛的含量最高，其与多种 PUFA 呈正相关，表明其是脂质氧化的共性产物。2-戊基呋喃通常认为是由亚油酸等不饱和脂肪酸氧化生成，而在棕榈油组中，其 2-戊基呋喃含量显著高于其他处理组（表 5）（P<0.05），且与 C16:0 呈现显著正相关（P<0.05）。这一关联为饱和脂肪酸在风味形成的间接作用中提供了新的线索。值得注意的是，芝麻油组中，其所特有的愈创木酚、吡嗪及吡咯类化合物与 C14:1 和 C20:0 呈正相关，表明 C14:1 和 C20:0 可能是这些特征香气物质形成的重要前体物。紫苏油组中，苯甲醛与 C18:3n3 呈正相关，结合表 5 对照组未检测到苯甲醛，紫苏油组检测到苯甲醛，表明 C18:3n3 是其前体之一。

综上所述，本研究通过相关性分析揭示了不同植物油烤制后鱼肉的风味物质与其脂肪酸组成的关联性，能够为食品加工中通过选用特定油脂来预测和定向塑造产品风味提供了科学策略。

3 结论

本研究通过系统探究不同植物油对烤制草鱼块品质特性的影响，结果表明植物油的种类能够显著影响烤制草鱼块的鱼肉品质及风味特征。GC-MS 鉴定出 42 种挥发性化合物，其中关键风味化合物有 8 种，包含（Z）-2-壬烯醛、反式-2-癸烯醛、反,顺-2,4-癸二烯醛和反,反-2,4-癸二烯醛等。芝麻油因其独特的挥发性风味成分（如吡嗪类物质）和抗氧化性，能显著提升产品的感官接受度与色泽稳定性；而葵花油对鱼肉本味影响最小，能够更好保持鱼肉的原本风味。除此之外，相关性分析表明正壬醛作为共性风味物质与多种 PUFA（C18:3n6、C20:3n6 和 C22:6n3）和 SFA（C11:0、C14:0、C15:0 和 C20:0）呈正相关，而 2-庚烯醛和苯甲醇则与（C11:0、C14:0、C15:0 和 C20:0）呈负相关，揭示了鱼块中几种关键性风味物质与脂肪酸间的关系。本研究的结果能够为优化烤制鱼肉制品的风味品质提供科学选油依据与理论指导。

© 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] 王轶林, 王亚军, 陈建酬, 等. 湿态发酵菜粕对草鱼生长、血清生化指标、肝脏抗氧化力、肠道消化酶活性和肠道菌群的影响[J]. 广东畜牧兽医科技, 2025, 50(1): 33−42. [WANG Yilin, WANG Yajun, CHEN Jianchou, et al. Effects of fresh fermented rapeseed meal on the growth rate, serum biochemical indexes, hepatic antioxidant capacity, intestinal digestive enzyme activity and intestinal flora in grass carp[J]. Guangdong Journal of Animal and Veterinary Science, 2025, 50(1): 33−42.]

[2] 方心如, 肖乃勇, 郭全友, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱分析蒸制过程中草鱼肉挥发性成分的变化[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(24): 241−250. [FANG Xinru, XIAO Naiyong, GUO Quanyou, et al. Identification of changes in volatile compounds in grass carp during steaming by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(24): 241−250.]

[3] LI Chao, WANG Daoying, XU Weimin, et al. Effect of final cooked temperature on tenderness, protein solubility and microstructure of duck breast muscle[J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 266−274.

[4] 胡吕霖, 任思婕, 沈清, 等. 不同烹饪方式及体外模拟消化环境对鲟鱼蛋白质氧化及消化性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 63−70. [HU Lülin, REN Sijie, SHEN Qing, et al. Effect of different cooking treatments and *in vitro* digestion on protein oxidation and digestibility of sturgeon fillets[J]. Food Science, 2018, 39(20): 63−70.]

[5] 袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 81−90. [YUAN Keyi, ZHAO Tiantian, JIAO Wenjuan, et al. Effects of different cooking methods on the quality of golden pomfret fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 81−90.]

[6] PARKER J K. Thermal generation or aroma[M]. Flavour Development, Analysis and Perception in Food and Beverages. Amsterdam, 2015: 151−185.

[7] 刘红梅, 王臣, 李月, 等. 植物油中重金属消减控制技术研究进展[J]. 粮食储藏, 2024, 53(3): 48−54. [LIU Hongmei, WANG Chen, LI Yue, et al. Research progress on reduction and control technology of heavy metals in vegetable oils[J]. Grain Storage, 2024, 53(3): 48−54.]

[8] 余顺波, 陈长艳, 张品, 等. 11 种食用植物油的脂肪酸组成及主要营养成分含量[J]. 贵州农业科学, 2022, 50(7): 113−120. [YU Shunbo, CHEN Changyan, ZHANG Pin, et al. Fatty acid composition and main nutritional components of 11 edible vegetable oils[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 113−120.]

[9] 谢兆华, 李洪军, 王琴, 等. 不同食用油制备酥肉挥发性风味物质的差异性分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 259−268. [XIE Zhaohua, LI Hongjun, WANG Qin, et al. Analysis on differences of volatile flavor substances in crisp meat prepared with different edible oils[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 259−268.]

[10] 吴思雨, 谢萱, 刘雨雯, 等. 基于电子鼻、HS-SPME-GC-MS 和 HS-GC-IMS 评价不同制油工艺对大豆油品质及风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 183−196. [WU Siyu, XIE Xuan, LIU Yuwen, et al. Effects of different production processes on the quality and flavor of soybean oil as evaluated by electronic nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Science, 2024, 45(4): 183−196.]

[11] 王静. 葵花籽油组成成分及影响因素研究进展[J]. 黑龙江农业科学, 2025(1): 113−120. [WANG Jing. Research progress on composition and influencing factors of sunflower seed oil[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2025(1): 113−120.]

[12] 兰韬, 陈李品, 王涛, 等. 基于 E-nose、GC-MS 和 GC-IMS 分析不同制油工艺对海南山茶油品质及风味特征的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 63−77. [LAN Tao, CHEN Lipin, WANG Tao, et al. Investigating the impact of different oil production processes on the quality and flavor characteristics of Hainan *Camellia* oil based on E-nose, GC-MS, and GC-IMS analyses[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 63−77.]

［13］ 李晓东, 周春红, 马芮萍. 7 种甘肃产植物油中脂肪酸成分的 GC-MS 检测分析[J]. 现代食品, 2023, 29(20): 189−191. ［LI Xiaodong, ZHOU Chunhong, MA Ruiping. GC-MS detection and analysis of fatty acid components in 7 vegetable oils from Gansu[J]. Modern Food, 2023, 29(20): 189−191.］
［14］ 慕妮, 杨俊, 周易枚, 等. 气相色谱-质谱联用仪测定生干黑芝麻及芝麻油中脂肪酸组成的研究[J]. 粮食与食品工业, 2024, 31(4): 65−69. ［MU Ni, YANG Jun, ZHOU Yimei, et al. The study of fatty acid composition in raw and dry black sesame and sesame oil by GC-MS[J]. Cereal & Food Industry, 2024, 31(4): 65−69.］
［15］ 程静, 刘学军. 烤池沼公鱼加工工艺的研究[J]. 肉类工业, 2014(2): 13−16. ［CHENG Jing, LIU Xuejun. Study on processing technology of grilled *Hypomesus olidus* Pallas[J]. Meat Industry, 2014(2): 13−16.］
［16］ 陈惠, 刘焱, 李志鹏, 等. 热加工对草鱼鱼肉品质及风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 53−58,68. ［CHEN Hui, LIU Yan, LI Zhipeng, et al. The influence of thermal treatment on grass carp quality and volatile flavor compounds[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 53−58,68.］
［17］ 崔宁, 钟比真, 王双龙, 等. 油炸条件对草鱼块品质和挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 310−323. ［CUI Ning, ZHONG Bizhen, WANG Shuanglong, et al. Effect of deep-frying conditions on the quality and volatile flavor compounds of grass carp blocks[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 310−323.］
［18］ LI Jinlin, ZHANG Quan, PENG Bin, et al. Exploration on the quality changes and flavour characteristics of freshwater crayfish (*Procambarus clarkia*) during steaming and boiling[J]. LWT, 2023, 190: 115582.
［19］ 李金林. 烹煮草鱼汤风味挥发性成分 GC-MS 指纹图谱构建及形成机理初探[D]. 南昌: 江西师范大学, 2017. ［LI Jinlin. GC-MS fingerprint establishing and formation mechanism of volatiles in grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) soup prepared with frying combined with boiling[D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2017.］
［20］ 王琳琳, 张佰清, 王萍, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析藜麦茶及藜麦芽茶的香气成分[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 167−173. ［WANG Linlin, ZHANG Baiqing, WANG Ping, et al. Analysis of the aroma components of quinoa tea and quinoa sprouts tea by using combination of HS-SPME-GC-MS and ROAV[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 167−173.］
［21］ 裴昭阳, 何金鑫, 胡晴晴, 等. 刷油与不刷油电烤箱烤草鱼的风味物质差异[J]. 食品科学技术学报, 2025, 43(5): 128−140. ［PEI Z Y, HE J X, HU Q Q, et al. Differences in flavor compounds between electric oven roasted grass carp with and without oil-brushing treatment[J]. Journal of Food Science and Technology, 2025, 43(5): 128−140.］
［22］ WEI Haocheng, WEI Yukun, QIU Xujian, et al. Comparison of potent odorants in raw and cooked mildly salted large yellow croaker using odor-active value calculation and omission test: Understanding the role of cooking method[J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134015.
［23］ RAHMANIA H, NAKANISHI T, OI S, et al. Effects of different manufacturing processes on thermal and photo-oxidative stability of sesame oil[J]. Journal of Oleo Science, 2024, 73(10): 1267−1276.
［24］ 董迎章, 陈秋军, 周梅升, 等. 精炼过程中大豆油色素含量的变化及叶绿素的脱除[J]. 中国油脂, 2023, 48(6): 29−31. ［DONG Yingzhang, CHEN Qiujun, ZHOU Meisheng, et al. Changes of pigment content and removal of chlorophyll in soybean oil during refining process[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(6): 29−31.］
［25］ FU M, MAT YUSOFF M, MOHD ADZAHAN N, et al. Development and characterization of palm oil-based oleogels using beeswax and carnauba wax as healthier beef fat mimetics[J]. Journal of Food Science, 2025, 90(5): e70241.
［26］ WANG Mei, WAN Yin, LIU Ting, et al. Effect of refining degree on the quality changes and lipid oxidation of *Camellia* (*Camellia oleifera*) oil during heating[J]. Foods, 2022, 11(15): 2232.
［27］ ZHAO Mantong, SUN Ying, HUANG Yikai, et al. Effects of phenolic acid grafted-chitosan hydrocolloids on the aldehyde contents from lipid oxidation in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets during pan-frying[J]. Food Chemistry, 2025, 463: 141270.
［28］ CHOE E, MIN D B. Mechanisms and factors for edible oil oxidation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2006, 5(4): 169−186.
［29］ 张艳, 聂青玉, 王圣开, 等. 不同工艺即食烤鱼挥发性风味物质差异分析[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(6): 107−113. ［ZHANG Yan, NIE Qingyu, WANG Shengkai, et al. Difference analysis of volatile flavor compounds in instant roasted fishes with different processing technologies[J]. Storage and Process, 2021, 21(6): 107−113.］
［30］ 张权, 王为, 吴思纷, 等. 黑鱼油精制过程中品质及风味成分变化[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 208−216. ［ZHANG Quan, WANG Wei, WU Sifen, et al. Changes in the quality and flavor components of snakehead fish oil during refining[J]. Food Science, 2023, 44(12): 208−216.］
［31］ 郭京凤, 龙正森, 秦磊, 等. 不同食用油油炸挂糊罗非鱼块的风味特征分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 308−318. ［GUO Jingfeng, LONG Zhengsen, QIN Lei, et al. Analysis of the flavor characteristics of deep-fried and battered tilapia pieces prepared with various cooking oils[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(19): 308−318.］
［32］ 高敬瑶, 郑梦莹, 徐丹鹤, 等. 复热方式对含马铃薯肉丸品质的影响[J]. 食品科技, 2024, 49(8): 132−140. ［GAO Jingyao, ZHENG Mengying, XU Danhe, et al. Effects of reheating methods on quality of potato meatballs[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(8): 132−140.］
［33］ MOTTRAM D S. The Maillard reaction: Source of flavour in thermally processed foods[M]. Flavours and Fragrances: Chemistry, Bioprocessing and Sustainability. Berlin, Heidelberg, 2007: 269-283.
［34］ ZHU Yifan, CHEN Jing, CHEN Xingjie, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compounds: Application to fresh and dried eel (*Muraenesox cinereus*)[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 2257−2270.
［35］ XU Ying, WANG Yi, LI Ruixiang, et al. Characteristic aroma analysis of finger citron in four different regions based on GC–MS-HS-SPME and ROAV[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12): e17191.
［36］ 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 刘强, 冒德寿, 汤峨, 译. 北京: 科学出版社, 2015: 1−228. ［van GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media[M]. LIU Qiang, MAO Deshou, TANG E, Trans. Beijing: Science Press, 2015: 1−228.］
［37］ 王嘉楠, 刘洋, 李凯旋, 等. 炸鸡翅营养组分变化及关键香气成分分析[J]. 食品科学技术学报, 2024, 42(2): 142−155. ［WANG Jianan, LIU Yang, LI Kaixuan, et al. Analysis of changes in nutritional compositions and key aroma compounds in fried chicken wings[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 42(2): 142−155.］
［38］ 中国营养学会. 中国居民膳食营养素参考摄入量: 2023 版[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2023: 125-130. ［Chinese Nutrition Society. Dietary reference intakes for China[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2023: 125-130.］