

微波预处理对油茶籽油综合品质的影响

蒋黎艳, 刘智辉, 邓志薇, 董加宝, 肖新生

(湖南科技学院 化学与生物工程学院, 湖南 永州 425199)

摘要:为探究提升油茶籽油品质和风味的新型加工方法, 分别在微波功率 380、540、700 W 下预处理油茶籽 2~10 min 后压榨制油, 考察微波预处理对油茶籽出油率和油茶籽油综合品质的影响。结果表明:微波预处理可显著提高油茶籽的出油率, 且对油茶籽油的脂肪酸组成无影响;微波预处理使油茶籽油的酸值和过氧化值升高, 但均符合国家标准要求;微波预处理可显著提高油茶籽油总酚含量和角鲨烯含量;在微波功率 380 W 和 540 W 下预处理 2~10 min 可提高油茶籽油中 α -生育酚含量, 而在微波功率 700 W 下预处理时间超过 4 min 后 α -生育酚含量下降;油茶籽油中主要检测到香叶基芳樟醇、羊毛甾醇、豆甾醇、羽扇豆醇和 α -香树脂醇 5 种甾醇, 不同微波预处理条件下 5 种甾醇含量出现波动, 但总体均显著高于未微波预处理的;油茶籽油中共检出 37 种挥发性化合物, 其中醛类物质是油茶籽油中主要挥发性化合物, 以正己醛的含量最高;通过相对气味活度值 (ROAV) 从油茶籽油中筛选出 10 种特征风味成分, 分别为正己醛、正庚醛、正辛醛、正壬醛、苯乙醛、癸醛、戊醛、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪和 2-乙基-6-甲基吡嗪, 微波预处理后特征风味成分明显增加, 经主成分分析, 随微波功率的增加和预处理时间的延长, 油茶籽油特征风味由油脂香、水果香和青草香逐步转变为坚果香和烤香。综上, 适宜的微波预处理可提升油茶籽油的营养品质和风味。

关键词:微波预处理;油茶籽油;综合品质;脂肪酸组成;微量营养成分;挥发性风味成分

中图分类号:TS224.2;TS225.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1003-7969(2025)08-0027-10

Effect of microwave pretreatment on the comprehensive quality of oil-tea camellia seed oil

JIANG Liyan, LIU Zhihui, DENG Zhiwei, DONG Jiabao, XIAO Xinsheng

(College of Chemistry and Bioengineering, Hunan University of Science and Engineering, Yongzhou 425199, Hunan, China)

Abstract: To investigate the novel processing methods for improving the quality and flavor of oil-tea camellia seed oil, the oil-tea camellia seed was pretreated with microwave power (380, 540, 700 W) for 2–10 min, then pressed to produce oil, and the effect of microwave pretreatment on the oil yield of oil-tea camellia seed and comprehensive quality of the oil were investigated. The results indicated that microwave pretreatment significantly increased the oil yield of oil-tea camellia seed and had no effect on the fatty acid composition of the oil. Additionally, microwave pretreatment increased the acid value and peroxide value of the oil, but both were within the national standards. Microwave pretreatment significantly increased the total phenol and squalene contents of oil-tea camellia oil. The content of α -

tocopherol in oil increased by 2–10 min of microwave pretreatment at 380 W and 540 W, while decreased after microwave pretreatment at 700 W for more than 4 min. Five phytosterols, namely geranyl linalool, lanosterol, stigmasterol, lupeol, and α -amyirin, were primarily detected in the oil. The content of these five phytosterols fluctuated under different microwave pretreatment

收稿日期:2024-05-22;修回日期:2025-03-01

基金项目:湖南省自然科学基金项目(2024JJ7192);永州市指导性科技计划项目(2023YZ022);湘南优势植物资源综合利用湖南省重点实验室项目(XNZW17C02)

作者简介:蒋黎艳(1989),女,讲师,硕士,研究方向为食品安全检测与油脂化学(E-mail)lyj5423@163.com。

通信作者:肖新生,教授,博士(E-mail)58022849@qq.com。

conditions but was overall significantly higher than that of the untreated sample. A total of 37 volatile compounds were identified in the oil, among which aldehydes were the main volatile compounds, with hexanal accounting for the highest proportion. Ten key flavor components were screened in the oil by relative odor activity value (ROAV) analysis, including hexanal, heptanal, octanal, nonanal, phenylacetaldehyde, decanal, pentanal, 2-methylpyrazine, 2,5-dimethylpyrazine, and 2-ethyl-6-methylpyrazine. The key flavor components significantly increased after microwave pretreatment and gradually shifted from fatty, fruity, and grassy notes to nutty and roasted notes with microwave power and pretreatment time increasing. In conclusion, appropriate microwave pretreatment can improve the nutritional quality and flavor of oil-tea camellia seed oil.

Key words: microwave pretreatment; oil-tea camellia seed oil; comprehensive quality; fatty acid composition; micronutrient; volatile flavor component

油茶(*Camellia oleifera* Abel.),别名茶子树、茶油树、白茶茶,为山茶科油茶属常绿小乔木,是我国特有的油料树种。我国现有油茶种植主要分布在南方亚热带地区,特别是在湖南、江西、浙江、广西、福建和安徽^[1]。油茶籽油因其脂肪酸组成与橄榄油十分相似,富含油酸,有“东方橄榄油”之称^[2]。油茶籽油还含有多酚、角鲨烯、生育酚、植物甾醇等功能活性成分,具有抗氧化、抗炎、抗菌、抗高血压和预防心血管疾病等功效,被联合国粮食及农业组织列为健康型高级食用植物油^[3-4]。此外,油茶籽油具有细腻独特的风味特征,其挥发性风味物质主要有己醛、壬醛、辛醛等,赋予油茶籽油强烈的青草香、油脂香和柑橘味^[5]。

微波是一种频率范围在 300 MHz ~ 3 000 GHz 之间的高频电磁波,主要作用于油料内部的极性分子,随着温度升高,油料内部水分汽化,可对油料的细胞结构产生破坏,具有升温速度快、穿透能力强和热惯性小等特点^[6]。研究表明,微波预处理能显著提高核桃出油率和核桃油营养成分含量^[7],提高奇亚籽油中生育酚和酚类物质含量并增加其氧化稳定性^[8],增强芝麻油中坚果味、烤芝麻味等风味,同时增加了芝麻油中杂环类香气物质的含量^[9]。目前,油茶籽油的制取方法仍以传统压榨法为主,其预处理方式主要集中在高温焙炒、热风干燥等传统方式,采用微波预处理对油茶籽的影响还缺少系统和全面的研究。

本文以油茶籽为研究对象,研究不同的微波功率和预处理时间对油茶籽油品质、活性成分和风味的影响,以为油茶籽油产业的进一步发展提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

油茶籽[水分含量(7.56 ± 0.05)%,脂肪含量

(35.47 ± 0.07)%],购于江西省抚州市宜黄县油茶种植基地($116^{\circ}01' \sim 116^{\circ}28'E$, $27^{\circ}03' \sim 27^{\circ}43'N$),挑选颗粒饱满、大小均匀、无病虫害,表面无腐败、无霉菌的油茶果实剥壳后得到。

37种脂肪酸甲酯标准品,角鲨烯标准品(色谱级,纯度 $\geq 95\%$),香叶基芳樟醇、羊毛甾醇、豆甾醇、羽扇豆醇和 α -香树脂醇标准品(色谱级,纯度 $\geq 98\%$), α -生育酚标准品(色谱级,纯度 $\geq 95\%$),无水乙醚,无水乙醇,95%乙醇,氢氧化钾,上海泰坦科技有限公司;正己烷、甲醇,均为色谱纯,上海杰星生物科技有限公司;无水硫酸钠、异辛烷、硫酸氢钠、异丙醇,天津市光复科技发展有限公司;没食子酸、福林-酚试剂,天津市光复精细化工研究所;酚酞、氢氧化钠,国药集团化学试剂有限公司;石油醚、二氯甲烷,天津市致远化学试剂有限公司。

1.1.2 仪器与设备

JA3003 电子天平,上海衡平仪器仪表厂;P70D20TL-D4 微波炉,佛山市顺德区格兰仕微波炉电器有限公司;ZYJ-9018 榨油机,贝尔斯顿电器有限公司;KH19A 高速离心机,湖南凯达科学仪器有限公司;UV-1780 紫外可见分光光度计;GCMS-QP2010S 气相色谱-质谱仪、GC-2010Plus 气相色谱仪,日本岛津公司;PK15730-U 型手动 SPME 进样器,美国 Agilent 公司;50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头,美国 Supelco 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 油茶籽的微波预处理

准确称取 150 g 油茶籽放入微波炉中,在微波功率 380、540、700 W 下分别处理 2、4、6、8、10 min^[10]后取出,冷却至室温。每个处理组重复 3 次。以未微波预处理的油茶籽作为对照组。

1.2.2 压榨油茶籽油的制备

将油茶籽放至榨油机中,在 60 MPa 下常温压榨,制得油茶籽粗油,然后在 4 000 r/min 下离心 10 min,取上层,即为油茶籽油,密封,于 4℃ 冷藏。以油茶籽油质量与原料油茶籽质量比值计算出油率。

1.2.3 油茶籽油酸值、过氧化值的测定

参照 GB 5009.229—2016 中冷溶剂指示剂滴定法测定酸值;参照 GB 5009.227—2016 中滴定法测定过氧化值。

1.2.4 油茶籽油脂脂肪酸组成的测定

参照 GB 5009.168—2016 中的归一化法测定油茶籽油脂脂肪酸组成。

1.2.5 油茶籽油总酚含量的测定

参考文献[11-12],以没食子酸为标准物质,采用福林-酚法测定油茶籽油中总酚含量。

1.2.6 油茶籽油角鲨烯、甾醇及 α -生育酚含量的测定

参照 GB/T 5535.2—2008 提取油茶籽油中的不皂化物。取 10 mg 上述不皂化物,加入二氯甲烷定容至 10 mL,取 1.5 mL 过 0.45 μm 有机微孔滤膜后待气相色谱-质谱(GC-MS)测定。

GC 条件:Inertcap 石英毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);升温程序为初始柱温 80℃,保持 2 min,以 10℃/min 升温至 310℃,保持 8 min;进样口温度 310℃;载气为高纯 He(99.999%),流速 1.1 mL/min;进样方式为分流进样,分流比 20:1;进样量 5.0 μL 。MS 条件:电离方式为 EI,电子能量 70 eV,离子源温度 230℃,接口温度 310℃,质量扫描范围(m/z)45~500,溶剂延迟时间 2 min。

以角鲨烯、甾醇、 α -生育酚混合标准液为标样,以出峰时间对样品中的角鲨烯、甾醇和 α -生育酚进行定性,采用外标法对 3 种化合物进行定量。

1.2.7 油茶籽油挥发性成分的检测

参考杨凯舟等^[13]的方法并稍作改进。准确称取 2.00 g 油茶籽油于 20 mL 顶空瓶中,使用聚四氟乙烯隔膜将瓶口密封,置于 60℃ 恒温箱中平衡 30 min,同时将 SPME 纤维萃取头(使用前在 250℃ 下老化 60 min)插入顶空瓶中吸附,然后将萃取头于 GC 进样口解吸 5 min,同时启动 GC-MS 采集数据。

GC 条件:HP-5MS 毛细管色谱柱(30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm);升温程序为初始柱温 40℃,以 4℃/min 升至 180℃,保持 3 min,再以 10℃/min 升至 250℃,保持 8 min;载气为高纯 He(99.999%),流速 6 mL/min;进样方式为不分流进样。MS 条件:

全扫描模式,电子能量 70 eV,进样口、离子源、传输线和四极杆温度分别为 250、230、250℃ 和 150℃,质量扫描范围(m/z)30~400,扫描速率 2.0 scan/s。

使用系统自带软件(GC-MS solution)处理所得数据后,在 NIST14 标准谱库中对采集的数据进行检索,记录相似度大于 80% 的挥发性物质,并根据烷烃标准品(C7~C40)提供的保留时间计算保留指数,以对挥发性成分进行定性,通过峰面积归一化法估算各挥发性成分相对含量。

1.2.8 油茶籽油特征风味成分的确定

采用相对气味活度值(ROAV)表示挥发性化合物对香味的贡献,ROAV 大于或等于 1 的化合物被认为是特征风味物质^[14]。ROAV(V_{ROA})的计算见式(1)。

$$V_{\text{ROA}} = \frac{C_i}{C_{\text{stan}}} \times \frac{T_{\text{stan}}}{T_i} \times 100 \quad (1)$$

式中: C_i 为各挥发性组分的相对含量; T_i 为各挥发性组分的气味阈值; C_{stan} 和 T_{stan} 分别为对样品总体风味贡献最大组分(挥发性组分的相对含量与该组分的气味阈值比值最大)的相对含量和气味阈值。

采用主成分分析评估特征风味物质与不同微波预处理油茶籽油的相关性,确定其特征风味的变化。

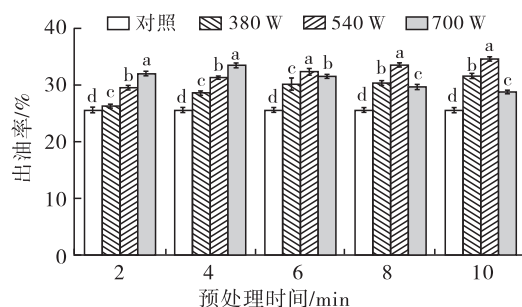
1.2.9 数据统计与分析

采用 SPSS 19.0 软件通过方差分析进行显著性检验,采用 Origin 2019 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 微波预处理对油茶籽出油率的影响

微波预处理对油茶籽出油率的影响见图 1。



注:相同时间下不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下图同

Note: Different letters at the same time indicate significant differences ($p < 0.05$). The same in the following figures

图 1 微波预处理对油茶籽出油率的影响

Fig. 1 Effect of microwave pretreatment on the oil yield of oil-tea camellia seed

从图 1 可看出,微波预处理组油茶籽出油率[(26.40 $\pm$ 0.31)% ~ (34.44 $\pm$ 0.11)%]均显著高

于对照组的 $[(25.32 \pm 0.05)\%]$ ($p < 0.05$)。在微波功率 380 W 和 540 W 下,随着预处理时间的延长(2~10 min),油茶籽出油率均呈上升趋势,这可能是因为随着预处理时间的延长,油茶籽内部水分的汽化加剧,导致蒸气压增大,使细胞壁结构和细胞内脂质体组织遭到破坏,从而提高其出油率^[15]。在微波功率 700 W 下预处理 2~4 min 时,随预处理时间延长出油率升高,在 4 min 时达到最高,为 $(33.47 \pm 0.15)\%$,而在微波预处理 6~10 min 时,随预处理时间延长出油率降低,这可能是因为随着预处理时间的延长,油茶籽含水量降低,可塑性变差,在机械压榨过程中难以形成压力,导致出油率降低^[16]。

2.2 微波预处理对油茶籽油酸值、过氧化值的影响

微波预处理对油茶籽油酸值和过氧化值的影响见表 1。

表 1 微波预处理对油茶籽油酸值和过氧化值的影响

Table 1 Effect of microwave pretreatment on the acid value and peroxide value of oil – tea camellia seed oil

微波功率/W	预处理时间/min	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)
对照		0.22 ± 0.03^h	1.10 ± 0.01^j
380	2	0.24 ± 0.01^h	1.12 ± 0.01^j
	4	0.25 ± 0.02^{gh}	1.20 ± 0.02^i
	6	0.26 ± 0.01^{fgh}	1.24 ± 0.01^h
	8	0.29 ± 0.01^{efgh}	1.27 ± 0.04^h
	10	0.33 ± 0.03^{ef}	1.46 ± 0.01^e

表 2 微波预处理对油茶籽油脂肪酸组成的影响

Table 2 Effect of microwave pretreatment on fatty acid composition of oil – tea camellia seed oil

微波功率/W	预处理时间/min	含量/%								
		棕榈酸	硬脂酸	油酸	亚油酸	亚麻酸	花生酸	花生烯酸	饱和脂肪酸	不饱和脂肪酸
对照		6.99	2.86	84.33	5.13	0.22	0.03	0.44	9.88	90.12
380	2	6.84	2.39	85.21	4.81	0.26	0.03	0.46	9.26	90.74
	4	6.91	2.67	84.73	4.90	0.22	0.05	0.52	9.63	90.37
	6	6.99	2.87	84.33	5.04	0.27	0.03	0.47	9.89	90.11
	8	6.91	2.95	84.23	5.12	0.27	0.04	0.48	9.90	90.10
	10	6.90	2.85	84.47	4.97	0.27	0.05	0.49	9.80	90.20
540	2	7.01	2.91	83.90	5.43	0.27	0.04	0.44	9.96	90.04
	4	7.10	2.71	84.41	5.01	0.25	0.05	0.47	9.86	90.14
	6	7.05	2.80	84.00	5.37	0.27	0.04	0.47	9.89	90.11
	8	7.01	2.52	84.37	5.31	0.28	0.04	0.47	9.57	90.43
	10	7.05	2.82	84.14	5.22	0.28	0.03	0.46	9.90	90.10
700	2	6.90	2.93	84.47	4.91	0.27	0.05	0.47	9.88	90.12
	4	6.89	2.84	84.24	5.21	0.28	0.05	0.49	9.78	90.22
	6	6.98	2.78	84.15	5.29	0.28	0.04	0.48	9.80	90.20
	8	6.95	2.81	83.91	5.52	0.28	0.04	0.49	9.80	90.20
	10	6.92	2.93	84.12	5.21	0.28	0.04	0.50	9.89	90.11

续表 1

微波功率/W	预处理时间/min	酸值(KOH)/(mg/g)	过氧化值/(mmol/kg)
540	2	0.26 ± 0.05^{fgh}	1.21 ± 0.02^i
	4	0.27 ± 0.01^{fgh}	1.26 ± 0.03^h
	6	0.33 ± 0.04^{ef}	1.31 ± 0.01^g
	8	0.35 ± 0.01^e	1.38 ± 0.04^e
	10	0.37 ± 0.01^e	1.53 ± 0.01^b
700	2	0.32 ± 0.01^{efg}	1.34 ± 0.01^f
	4	0.44 ± 0.03^d	1.41 ± 0.04^{de}
	6	0.73 ± 0.08^e	1.44 ± 0.02^{cd}
	8	0.92 ± 0.03^b	1.54 ± 0.02^b
	10	1.11 ± 0.09^a	1.71 ± 0.01^a

注:同列不同字母表示差异显著($p < 0.05$)。下表同

Note: Different letters in the same column indicate significant differences ($p < 0.05$). The same in the following tables

由表 1 可看出,微波预处理组油茶籽油的酸值和过氧化值均高于对照组的,其中在微波功率 700 W 下预处理 10 min 油茶籽油的酸值和过氧化值均最高,但均符合 GB/T 11765—2018 一级压榨油茶籽油的要求[酸值(KOH) ≤ 2.0 mg/g,过氧化值 ≤ 0.25 g/100 g (9.85 mmol/kg)]。

2.3 微波预处理对油茶籽油脂肪酸组成的影响

微波预处理对油茶籽油脂肪酸组成的影响见表 2。

从表 2 可看出,油茶籽油中共检出 7 种脂肪酸,其中以油酸、棕榈酸、亚油酸和硬脂酸为主,这与 Xu 等^[17]检测的油茶籽油脂肪酸组成结果类似。与对照组相比,微波预处理组油茶籽油的脂肪酸组成不变,含量总体波动较小,说明微波预处理对油茶籽油脂肪酸组成的影响较小。

2.4 微波预处理对油茶籽油总酚含量的影响

微波预处理对油茶籽油总酚含量的影响见图 2。

从图 2 可看出,油茶籽油的总酚含量在 $(339.00 \pm 7.07) \sim (475.00 \pm 2.82)$ mg/kg 范围内,其中微波预处理组油茶籽油的总酚含量均显著高于对照组的($p < 0.05$)。相同微波功率下,油茶籽油总酚含量随预处理时间的延长而增加,在微波功率 700 W 下预处理 10 min 时,油茶籽油总酚含量最高,约为对照组的 1.4 倍,这可能是因为微波预处理在一定程度上破坏了油茶籽的细胞结构,加速了细胞组织内

酚类物质的溶出,同时还能将结合酚转化为游离酚^[18]。

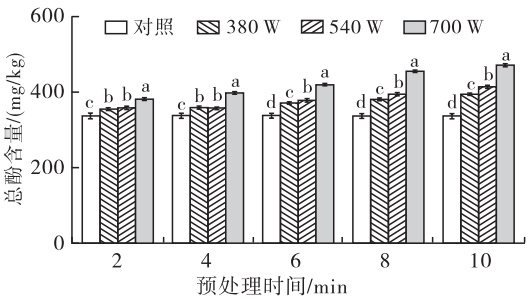


图 2 微波预处理对油茶籽油总酚含量的影响
Fig.2 Effect of microwave pretreatment on the total phenol content in oil – tea camellia seed oil

2.5 微波预处理对油茶籽油角鲨烯、甾醇和 α -生育酚含量的影响

微波预处理对油茶籽油角鲨烯、甾醇和 α -生育酚含量的影响见表 3。

表 3 微波预处理对油茶籽油角鲨烯、甾醇和 α -生育酚含量的影响
Table 3 Effect of microwave pretreatment on the content of squalene, sterols, and α -tocopherol in oil – tea camellia seed oil

微波功率/W	预处理时间/min	含量/(mg/kg)						
		角鲨烯	α -生育酚	香叶基芳樟醇	羊毛甾醇	豆甾醇	羽扇豆醇	α -香树脂醇
对照		218.63 ^l	116.94 ^k	20.33 ^g	1 104.11 ^o	124.08 ⁿ	116.07 ^l	866.99 ^m
	2	273.40 ^j	128.79 ^j	24.88 ^f	1 144.44 ⁿ	441.97 ^d	124.00 ^k	929.67 ^l
	4	370.40 ^h	154.51 ⁱ	24.27 ^{fg}	1 224.43 ^m	603.98 ^a	130.74 ^j	936.76 ^k
	6	607.83 ^d	194.84 ^f	28.67 ^f	1 344.65 ^j	464.48 ^c	143.90 ^f	944.80 ^j
	8	665.15 ^b	230.54 ^d	35.69 ^e	1 666.43 ^b	391.51 ^f	153.54 ^d	963.33 ^g
380	10	688.39 ^a	387.85 ^b	40.57 ^{cd}	1 474.68 ^g	264.33 ^k	163.94 ^b	973.15 ^{bc}
	2	575.64 ^f	127.94 ^j	33.65 ^e	1 341.41 ^j	468.44 ^b	133.33 ⁱ	946.07 ^j
	4	647.74 ^c	186.51 ^g	43.78 ^{bc}	1 426.50 ^h	439.17 ^c	141.45 ^{gh}	954.98 ⁱ
	6	666.09 ^b	212.38 ^e	49.76 ^a	1 643.50 ^c	390.18 ^f	153.05 ^d	975.50 ^{ab}
	8	575.27 ^f	213.48 ^e	46.82 ^{ab}	1 514.54 ^e	293.44 ^j	162.45 ^b	969.39 ^e
540	10	334.02 ⁱ	390.50 ^a	48.06 ^{ab}	1 536.36 ^d	206.61 ^m	167.86 ^a	972.19 ^{cd}
	2	336.07 ⁱ	166.34 ^h	35.97 ^e	1 390.63 ⁱ	306.60 ⁱ	131.97 ^{ij}	959.19 ^h
	4	520.23 ^g	259.83 ^c	51.09 ^a	1 484.25 ^f	367.82 ^g	142.70 ^{fg}	966.20 ^f
	6	581.27 ^e	166.85 ^h	47.28 ^{ab}	1 700.36 ^a	305.03 ⁱ	157.39 ^c	976.99 ^a
	8	336.19 ⁱ	72.90 ^l	44.44 ^{bc}	1 302.53 ^k	229.65 ^l	147.43 ^e	970.20 ^{de}
700	10	263.93 ^k	46.06 ^m	36.45 ^{de}	1 258.45 ^l	339.77 ^h	139.20 ^b	963.15 ^g

从表 3 可看出,微波预处理组油茶籽油中角鲨烯含量均显著高于对照组的($p < 0.05$)。这与 Zeng 等^[19]发现微波预处理对油茶籽油中角鲨烯的提取有积极作用的结论一致。在微波功率 380 W 下,油茶籽油中角鲨烯含量随着预处理时间的延长而升高;而在微波功率 540 W 和 700 W 下,油茶籽油中角鲨烯含量随预处理时间的延长先升高后降低。

从表 3 可看出,油茶籽油中 α -生育酚含量在 46.06 ~ 390.50 mg/kg,其中微波预处理组与对照组存在显著差异($p < 0.05$)。在微波功率 380 W 和 540 W 下,油茶籽油中 α -生育酚含量随着预处理时间的延长而升高;而在微波功率 700 W 下,油茶籽油中 α -生育酚含量随着预处理时间的延长先升高后下降,且在微波预处理 8、10 min 时 α -生育酚含量均比对照组的低。这是因为微波预处理可以破

坏油茶籽的细胞膜,在压榨过程中可促进更多的生育酚随油脂溶出,但预处理时间过长,油茶籽吸收过多的能量,会导致部分生育酚分解,从而造成生育酚含量降低^[10]。

从表3可看出,油茶籽油中共检出香叶基芳樟醇、羊毛甾醇、豆甾醇、羽扇豆醇、 α -香树脂醇5种甾醇。在不同的微波功率和预处理时间条件下,油茶籽油中甾醇含量出现了一定程度的波动,但总体

均显著高于对照组的($p < 0.05$)。这是因为微波预处理破坏了油茶籽油的细胞膜结构,从而促使甾醇溶出;但是预处理时间越长温度越高,甾醇氧化速度加快,造成其含量有所降低^[20]。

2.6 微波预处理对油茶籽油风味的影响

2.6.1 对油茶籽油挥发性风味物质组成的影响

微波预处理对油茶籽油挥发性风味物质组成的影响见表4。

表4 微波预处理对油茶籽油挥发性风味物质组成的影响

Table 4 Effect of microwave pretreatment on volatile flavor compounds composition of oil – tea camellia seed oil

化合物	相对含量/%															
	对照	380 W 2 min	380 W 4 min	380 W 6 min	380 W 8 min	380 W 10 min	540 W 2 min	540 W 4 min	540 W 6 min	540 W 8 min	540 W 10 min	700 W 2 min	700 W 4 min	700 W 6 min	700 W 8 min	700 W 10 min
醛类																
正己醛	22.34	22.59	23.69	22.27	24.52	25.32	22.02	24.34	25.63	27.73	28.07	23.62	21.59	20.53	19.84	17.36
正庚醛	8.44	8.86	8.53	9.05	8.42	8.37	8.39	8.46	8.45	8.68	8.41	8.32	8.17	7.83	7.69	7.58
正辛醛	13.42	11.87	11.58	10.57	9.94	11.83	11.07	12.15	9.36	7.64	7.88	6.67	6.76	6.43	5.83	5.46
正壬醛	12.84	12.16	11.74	10.41	10.79	10.97	8.75	7.73	8.38	7.92	6.08	6.57	5.71	8.78	8.56	8.42
苯甲醛	2.53	2.39	2.18	1.91	1.86	1.67	1.84	1.78	2.41	2.17	2.52	2.88	2.75	2.68	2.47	2.34
苯乙醛	2.52	1.91	2.92	2.25	2.59	2.02	2.63	2.34	2.11	1.85	1.25	2.83	2.04	1.72	1.80	2.85
糠醛	6.77	5.29	6.36	6.57	5.58	4.48	5.24	4.43	3.69	5.18	5.44	5.39	4.61	4.53	3.71	3.24
癸醛	3.96	3.78	3.88	4.34	3.48	3.57	3.52	4.31	5.36	3.27	3.16	3.36	3.72	2.93	2.52	1.33
戊醛	1.19	1.59	1.41	1.30	1.56	1.23	1.86	1.22	1.12	1.07	0.88	1.44	1.69	1.21	0.75	1.08
2-甲基丁醛	0.43	0.55	0.72	0.89	1.52	1.17	0.82	0.91	1.13	1.11	1.15	0.96	1.09	1.02	0.91	0.89
对甲基苯甲醛												0.12	0.16	0.15	0.25	0.31
总量	74.44	70.99	73.01	69.56	70.26	70.63	66.14	67.67	67.64	66.62	64.84	62.16	58.29	57.81	54.33	50.86
烃类																
辛烷	1.88	1.37	1.42	1.73	1.51	1.28	1.29	1.57	1.48	1.27	1.11	1.32	1.54	1.37	0.96	0.82
癸烷	1.23	1.39	1.65	1.29	1.27	1.37	1.84	1.53	1.67	2.03	1.86	1.77	2.19	2.46	3.28	3.84
正十一烷	1.81	1.89	1.07	1.39	1.53	1.71	1.75	1.45	1.12	1.41	1.83	1.61	1.67	1.41	0.83	0.71
正十四烷	1.42	1.95	1.97	1.77	1.96	1.89	2.01	1.83	2.07	1.69	1.51	1.62	1.46	1.57	0.93	1.09
正十六烷	0.43	0.57	0.49	0.64	0.50	0.47	0.75	0.82	0.78	0.97	1.22	1.18	1.36	1.23	1.74	1.60
总量	6.77	7.17	6.60	6.82	6.77	6.72	7.64	7.20	7.12	7.37	7.53	7.50	8.22	8.04	7.74	8.07
酸类																
辛酸	0.32	0.84	0.74	0.58	0.66	0.75	0.59	0.72	0.64	0.46	0.83	0.21				
己酸	1.78	1.89	1.27	1.39	1.53	1.71	1.75	2.05	2.12	2.11	1.83	1.70	1.81	1.41	0.82	0.74
总量	2.10	2.73	2.01	1.97	2.19	2.46	2.34	2.77	2.76	2.57	2.66	1.91	1.81	1.41	0.82	0.74
酮类																
2-甲基四氢呋喃-3-酮										0.22	0.46	0.47	0.72	0.89	1.32	1.37
乙酰氧基-2-丙酮	0.37	0.42	0.59	0.51	0.67	0.52	0.46	0.41	0.38	0.39	0.43	0.64	0.45	0.31	0.26	0.22
甲基环戊烯醇酮												0.66	0.48	0.31	0.33	0.56
2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮							0.79	1.14	1.34	1.57	1.26	0.84	0.65	1.28	0.85	1.64
总量	0.37	0.42	0.59	0.51	0.67	0.52	1.25	1.55	1.72	2.18	2.15	2.61	2.30	2.79	2.76	3.79
酯类																
乙酰乙酸甲酯	1.16	0.34	0.39	0.35	0.22	0.29	0.36	0.42	0.58	0.74	0.87	0.52	0.72	0.68	0.75	0.84
异戊酸甲酯	0.72	0.53	0.46	0.69	0.62	0.57	0.67	0.58	0.47	0.32	0.37					
乙酸糠酯							0.51	0.47	0.51	0.87	0.76	0.62	0.85	1.27	1.47	1.34
总量	1.88	0.87	0.85	1.04	0.84	0.86	1.54	1.47	1.56	1.90	2.00	1.14	1.57	1.95	2.22	2.18
醇类																
糠醇	3.09	3.49	3.85	4.24	3.78	3.02	3.21	2.82	2.77	2.24	1.57	2.36	2.87	2.13	2.50	2.31
戊醇	2.32	2.85	2.52	1.93	1.92	1.74	1.57	1.34	1.81	1.67	1.34	1.34	1.66	1.78	2.35	2.46

续表 4

化合物	相对含量/%															
	对照	380 W 2 min	380 W 4 min	380 W 6 min	380 W 8 min	380 W 10 min	540 W 2 min	540 W 4 min	540 W 6 min	540 W 8 min	540 W 10 min	700 W 2 min	700 W 4 min	700 W 6 min	700 W 8 min	700 W 10 min
正己醇	2.16	2.36	2.42	2.56	2.49	2.38	2.54	2.47	2.44	2.21	2.39	2.62	2.69	2.83	2.79	2.64
正庚醇	2.14	2.42	2.29	2.52	2.89	2.94	2.29	1.86	1.54	1.88	2.22	1.83	1.75	2.06	2.18	1.94
正丙醇	3.21	3.55	2.47	3.07	2.86	2.64	2.97	3.87	3.02	2.99	3.06	3.24	3.62	2.85	2.86	2.63
芳樟醇												0.34	0.26	0.53	0.69	0.67
总量	12.92	14.67	13.55	14.32	13.94	12.72	12.58	12.36	11.58	10.99	10.58	11.73	12.85	12.18	13.37	12.65
酚类																
麦芽酚	1.52	1.78	1.95	2.25	1.85	2.13	2.56	1.64	1.84	2.14	2.35	2.21	1.97	1.82	2.56	2.74
总量	1.52	1.78	1.95	2.25	1.85	2.13	2.56	1.64	1.84	2.14	2.35	2.21	1.97	1.82	2.56	2.74
杂环类																
2-甲基吡嗪				1.04	1.02	1.18	1.41	1.26	1.66	1.35	2.32	3.16	3.31	3.96	5.27	6.17
2,5-二甲基吡嗪		0.41	0.38	1.21	1.17	1.25	2.28	2.15	2.26	2.43	2.23	3.22	3.29	3.18	4.14	5.42
2-乙基-6-甲基吡嗪												2.36	3.55	3.65	3.53	4.49
2,3,5-三甲基吡嗪							0.62	0.41	0.54	0.63	0.49	0.23	0.48	0.51	0.71	0.63
3-乙基-2-甲基吡嗪		0.96	1.06	1.28	1.29	1.53	1.64	1.52	1.32	1.82	2.85	1.77	2.36	2.70	2.55	2.17
总量		1.37	1.44	3.53	3.48	3.96	5.95	5.34	5.78	6.23	7.89	10.74	12.99	14.00	16.20	18.88

由表 4 可知,油茶籽油中共检出 37 种挥发性风味成分,其中醛类 11 种,醇类 6 种,杂环类 5 种,烃类 5 种,酮类 4 种,酯类 3 种,酸类 2 种,酚类 1 种。检出的挥发性风味物质组成与奉美桃等^[21]的结果基本一致。

由表 4 可知,醛类是油茶籽油中的主要挥发性化合物,在微波功率 380、540 W 预处理不同时间醛类物质含量变化不大,但在微波功率 700 W 下随预处理时间延长醛类物质含量明显下降,这可能是由于高功率条件下醛类物质发生了氧化分解反应^[22]。检出的 11 种醛类物质中正己醛含量(17.36%~28.07%)最高,赋予油茶籽油青草香^[23]。检出的醇类化合物有糠醇、戊醇、正己醇、正庚醇、正丙醇和芳樟醇,芳樟醇具有类似的柑橘香^[24],正己醇可为油脂提供水果香^[23]。在微波功率 380、540 W 下随预处理时间延长,醇类物质总量总体下降,在微波功率 700 W 下随预处理时间延长,醇类物质总量总体升高,另外仅在微波功率 700 W 预处理组油茶籽油中检出芳樟醇。

油茶籽油中的杂环类化合物主要为吡嗪类物质,其在植物油风味中贡献较大,主要在还原糖与活性氨基化合物发生的美拉德反应中产生^[25]。在微波功率 380 W 下预处理 2 min,2,5-二甲基吡嗪、3-乙基-2-甲基吡嗪开始被检测到,并且随着微波功率的增大和预处理时间的延长,吡嗪类物质的含量和种类均有所增加,其中:2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪含量均在微波功率 700 W 预处理 10 min 时达到最大;2,3,5-三

甲基吡嗪含量在微波功率 700 W 预处理 8 min 时达到最大;3-乙基-2-甲基吡嗪含量在微波功率 540 W 预处理 10 min 时达到最大。这些物质共同赋予了油茶籽油独特且浓郁的烤香和坚果香^[26]。

油茶籽油中烃类物质含量相对较少,其中癸烷的含量最高可达 3.84%,但烃类物质总体对油茶籽油香气的贡献不大。酮类物质在对照组油样中仅检出乙酰氧基-2-丙酮。与对照组相比,微波功率 380 W 下油茶籽油中酮类物质含量增加,微波功率 540、700 W 下酮类物质含量和种类明显增加,其中:2-甲基四氢呋喃-3-酮仅存在于微波功率 540 W 预处理 8、10 min 和 700 W 预处理组油茶籽油中;甲基环戊烯醇酮仅存在于微波功率 700 W 预处理组油茶籽油中;而 2,5-二甲基-4-羟基-3(2H)-呋喃酮仅在微波功率 540 W 和 700 W 预处理组油茶籽油中检出,其含量在微波功率 700 W 预处理 10 min 时达到最大(1.64%),是油茶籽油呈现焦糖香、水果香的主要来源物质^[27]。

油茶籽油中检出 3 种酯类物质,其中对照组中检出乙酰乙酸甲酯、异戊酸甲酯,而在微波功率 540 W 和 700 W 预处理组中还检测到了乙酸糠酯,其可赋予油脂水果香^[28]。油茶籽油中检出辛酸、己酸 2 种酸类物质。油茶籽油中检出的酚类物质为麦芽酚,其可为油茶籽油提供焦糖香^[27]。与对照组相比,微波预处理组油茶籽油中麦芽酚含量均升高。

2.6.2 对油茶籽油特征风味物质的影响

不同微波条件下油茶籽油的特征风味物质及对应的 ROAV 见表 5。

表 5 微波预处理油茶籽油特征风味物质的 ROAV
Table 5 ROAV of key flavor compounds in oil – tea camellia seed oil pretreated with microwave

化合物	气味阈值 ^[21,29-30] / (μg/kg)	ROAV							
		对照	380 W 2 min	380 W 4 min	380 W 6 min	380 W 8 min	380 W 10 min	540 W 2 min	540 W 4 min
正己醛	4.5	25.90	29.60	31.82	32.77	38.37	33.29	30.94	31.16
正庚醛	3	14.67	17.42	17.19	19.98	19.77	16.51	17.68	16.25
正辛醛	0.7	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
正壬醛	1	66.97	71.71	70.97	68.94	75.99	64.91	55.33	44.53
苯乙醛	4	3.29	2.82	4.41	3.73	4.56	2.99	4.16	3.37
癸醛	5	4.13	4.46	4.69	5.75	4.90	4.22	4.45	4.97
戊醛	12	0.52	0.78	0.71	0.72	0.92	0.61	0.98	0.59
2-甲基吡嗪	6				1.15	1.20	1.16	1.49	1.21
2,5-二甲基吡嗪	30		0.08	0.08	0.27	0.27	0.25	0.48	0.41
2-乙基-6-甲基吡嗪	40								

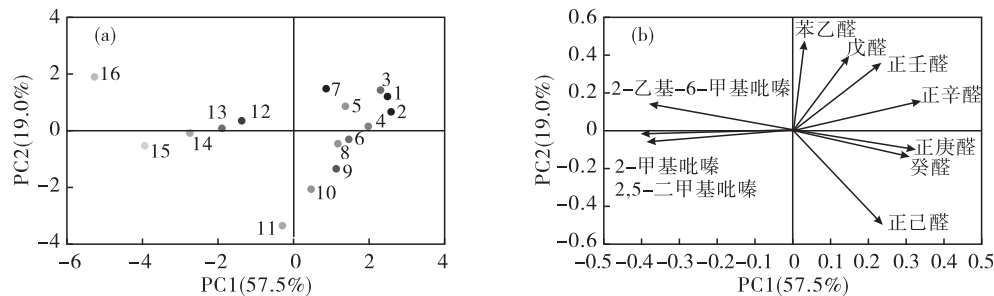
化合物	气味阈值 ^[21,29-30] / (μg/kg)	ROAV							
		540 W 6 min	540 W 8 min	540 W 10 min	700 W 2 min	700 W 4 min	700 W 6 min	700 W 8 min	700 W 10 min
正己醛	4.5	42.59	56.56	55.41	55.09	49.68	49.67	51.51	45.82
正庚醛	3	21.06	26.51	24.90	29.11	28.20	28.41	29.95	30.01
正辛醛	0.7	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	97.30	92.64
正壬醛	1	62.67	72.57	54.01	68.95	59.13	95.58	100.00	100.00
苯乙醛	4	3.94	4.24	2.78	7.43	5.28	4.68	5.26	8.46
癸醛	5	8.02	5.99	5.61	7.05	7.70	6.38	5.89	3.16
戊醛	12	0.70	0.82	0.65	1.26	1.46	1.10	0.73	1.07
2-甲基吡嗪	6	2.07	2.06	3.43	5.53	5.71	7.19	10.26	12.21
2,5-二甲基吡嗪	30	0.56	0.74	0.66	1.13	1.14	1.15	1.61	2.15
2-乙基-6-甲基吡嗪	40				0.62	0.92	0.99	1.03	1.33

由表 5 可知,在油茶籽油中共鉴定出 10 种特征风味化合物,分别为正己醛、正庚醛、正辛醛、正壬醛、苯乙醛、癸醛、戊醛、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪。在对照组中,共鉴定出 6 种特征风味化合物,且均为醛类物质,其中贡献度最大的为正辛醛,其次为正壬醛、正己醛,共同赋予油茶籽油脂香和柑橘香^[5]。随着微波功率的增加和预处理时间的延长,杂环类物质的含量有所

增加,其对风味的贡献度也有所提升,贡献度较大的为 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪,共同赋予油茶籽油烤香和坚果香。

2.6.3 微波预处理油茶籽油特征风味物质的主成分分析

对油茶籽油中 10 种特征风味物质进行主成分分析,结果见图 3。



注:图 a 中 1 为对照组,2~16 分别对应微波预处理组 380 W 2~10 min、540 W 2~10 min、700 W 2~10 min
Note: In Figure a, 1 represents the control group, and 2 to 16 correspond to microwave pretreatment conditions of 380 W 2 – 10 min, 540 W 2 – 10 min and 700 W 2 – 10 min, respectively

图 3 微波预处理油茶籽油中关键风味物质的主成分分析得分图 (a) 和载荷图 (b)
Fig.3 Score plot (a) and load plot (b) of principal component analysis of key flavor compounds in oil – tea camellia seed oil pretreated by microwave

从图 3 可看出,主成分 1(PC1)与主成分 2(PC2)对总方差的贡献率分别为 57.5% 和 19.0%,累积贡献率为 76.5%,表明这两个主成分可以解释主体风味物质的整体信息。对照组,380 W 2 min、380 W 4 min、380 W 6 min、380 W 8 min 和 540 W 2 min 预处理组油茶籽油处于第一象限,其风味与正辛醛、正壬醛、戊醛、苯乙醛有较强相关性,主要表现为油脂香、水果香、青草香^[5];700 W 2 min、700 W 4 min、700 W 10 min 预处理组油茶籽油位于第二象限,其风味与 2-乙基-6-甲基吡嗪有较强相关性,呈现出榛子的坚果香^[26];540 W 10 min、700 W 6 min、700 W 8 min 预处理组油茶籽油位于第三象限,其风味与 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪有较强相关性,呈现出可可香和烤坚果香^[26,29];380 W 10 min、540 W 4 min、540 W 6 min、540 W 8 min 预处理组油茶籽油位于第四象限,其风味与正己醛、癸醛、正庚醛有较强相关性,呈现出浓郁的青草香、果香和柑橘香^[31]。

结合 2.6.2 结果,相较于对照组,微波预处理组的特征风味成分明显增加,且随微波功率的增加和预处理时间的延长特征风味由油脂香、水果香和青草香逐步转变为坚果香和烤香,表明微波预处理会影响油茶籽油的特征风味成分。

3 结 论

本文以油茶籽油为研究对象,研究微波预处理(380、540、700 W 下预处理 2~10 min)对油茶籽油综合品质的影响。结果发现:微波预处理能显著提高油茶籽的出油率,但对油茶籽油的脂肪酸组成无影响;虽然微波预处理使油茶籽油的酸值和过氧化值升高,但均符合一级压榨油茶籽油国家标准要求;微波预处理能显著提高油茶籽油的总酚含量和角鲨烯含量;在微波功率 380 W 和 540 W 下预处理 2~10 min 可提高油茶籽油中 α -生育酚含量,而在微波功率 700 W 下预处理时间超过 4 min 后 α -生育酚含量下降;不同微波预处理条件下油茶籽油中香叶基芳樟醇、羊毛甾醇、豆甾醇、羽扇豆醇和 α -香树脂醇含量出现波动,但总体均显著高于对照组。油茶籽油中共检出 37 种挥发性风味成分,其中醛类物质是油茶籽油中主要挥发性化合物,以正己醛的含量最高;结合 ROAV 从油茶籽油中筛选出 10 种关键风味成分,分别为正己醛、正庚醛、正辛醛、正壬醛、苯乙醛、癸醛、戊醛、2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪、2-乙基-6-甲基吡嗪,微波预处理后关键风味成分明显增加,经主成分分析,随微波功率的增加和预处理时间的延长关键风味由油脂香、水果香和

青草香逐步转变为坚果香和烤香。

参考文献:

- [1] ZHANG F, ZHU F, CHEN B, et al. Composition, bioactive substances, extraction technologies and the influences on characteristics of *Camellia oleifera* oil: A review[J/OL]. Food Res Int, 2022, 156: 111159[2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111159>.
- [2] LEE C P, SHIH P H, HSU C L, et al. Hepatoprotection of tea seed oil (*Camellia oleifera* Abel.) against CCl₄-induced oxidative damage in rats[J]. Food Chem Toxicol, 2007, 45(6): 888-895.
- [3] LI Z, LIU A, DU Q, et al. Bioactive substances and therapeutic potential of camellia oil: An overview[J/OL]. Food Biosci, 2022, 49: 101855 [2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2022.101855>.
- [4] GAO L, JIN L, LIU Q, et al. Recent advances in the extraction, composition analysis and bioactivity of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) oil[J/OL]. Trends Food Sci Technol, 2024, 143: 104211[2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104211>.
- [5] HE J, WU X, YU Z. Microwave pretreatment of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seeds: Effect on oil flavor[J/OL]. Food Chem, 2021, 364: 130388[2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130388>.
- [6] GOSZKIEWICZ A, KOŁODZIEJCZYK E, RATAJCZYK F. Comparison of microwave and convection method of roasting sunflower seeds and its effect on sensory quality, texture and physicochemical characteristics[J/OL]. Food Struct, 2020, 25: 100144[2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2020.100144>.
- [7] MA X, ZHENG C, ZHOU Q, et al. Comparison evaluation pretreatments on the quality characteristics, oxidative stability, and volatile flavor of walnut oil[J/OL]. Food Chem, 2024, 448: 139124 [2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139124>.
- [8] SUNDAR S, SINGH B, KAUR A. Microwave pretreatment effects on physicochemical characteristics, antioxidant properties, tocopherols, pigments, phenolic and fatty acid composition of chia (*Salvia hispanica* L.) seed oil[J]. J Food Meas Charact, 2023, 17(6): 6253-6267.
- [9] 赵宇航,尹文婷,汪学德,等.微波预处理对芝麻油风味、营养和安全品质的影响[J].食品科学,2023,44(9): 47-57.
- [10] HUANG J, CHEN C, SONG Z, et al. Effect of microwave pretreatment of perilla seeds on minor bioactive components content and oxidative stability of oil[J/OL]. Food Chem, 2022, 388: 133010 [2024-05-22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.133010>.

- [11] 王璐. 南瓜籽不同干燥方式及工艺对南瓜籽油功能性品质的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [12] YANG M, ZHENG C, ZHOU Q, et al. Minor components and oxidative stability of cold - pressed oil from rapeseed cultivars in China[J]. J Food Compos Anal, 2013, 29(1): 1-9.
- [13] 杨凯舟, 魏征, 王佳雅, 等. 顶空固相微萃取-气质分析油茶籽油挥发性成分方法优化[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(4): 108-115.
- [14] 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, 29(7): 370-374.
- [15] UQUICHE E, JERÉZ M, ORTÍZ J. Effect of pretreatment with microwaves on mechanical extraction yield and quality of vegetable oil from Chilean hazelnuts (*Gevuina avellana* Mol.) [J]. Innov Food Sci Emerg Technol, 2008, 9(4): 495-500.
- [16] YANG M, HUANG F, LIU C, et al. Influence of microwave treatment of rapeseed on minor components content and oxidative stability of oil[J]. Food Bioproc Technol, 2013, 6(11): 3206-3216.
- [17] XU Z, LI X, FENG S, et al. Antioxidant effect of hawk tea extracts on camellia oil oxidation during microwave heating[J]. J Consum Prot Food Saf, 2018, 13(4): 391-398.
- [18] 黄颖, 郭萍梅, 郑畅, 等. 微波预处理对芝麻油营养品质及抗氧化能力的影响[J]. 中国油脂, 2019, 44(2): 1-4.
- [19] ZENG W, LIU X, CHAO Y, et al. The effect of extraction methods on the components and quality of *Camellia oleifera* oil: Focusing on the flavor and lipidomics [J/OL]. Food Chem, 2024, 447: 139046 [2024 - 05 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.139046>.
- [20] KMIECIK D, FEDKO M, RUDZIŃSKA M, et al. Thermo - oxidation of phytosterol molecules in rapeseed oil during heating: The impact of unsaturation level of the oil [J/OL]. Foods, 2020, 10(1): 50 [2024 - 05 - 22]. <https://doi.org/10.3390/foods10010050>.
- [21] 奉美桃, 刘千千, 刘智辉, 等. 预处理技术对压榨山茶油品质及挥发性风味成分的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(9): 15-23.
- [22] 毛晓慧. 炒籽过程中浓香菜籽油产香机制的研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- [23] KALUA C M, ALLEN M S, BEDGOOD D R, et al. Olive oil volatile compounds, flavour development and quality: A critical review [J]. Food Chem, 2007, 100(1): 273-286.
- [24] MATHEIS K, GRANVOGL M. Characterization of key odorants causing a fusty/musty off - flavor in native cold - pressed rapeseed oil by means of the sensomics approach [J]. J Agric Food Chem, 2016, 64(43): 8168-8178.
- [25] HE J, WU X, ZHOU Y, et al. Effects of different preheat treatments on volatile compounds of camellia (*Camellia oleifera* Abel.) seed oil and formation mechanism of key aroma compounds [J/OL]. J Food Biochem, 2021, 45(3): e13649 [2024 - 05 - 22]. <https://doi.org/10.1111/jfbc.13649>.
- [26] JIA X, ZHOU Q, HUANG D, et al. Insight into the comparison of key aroma - active compounds between camellia oils from different processing technology [J/OL]. Food Chem, 2024, 430: 137090 [2024 - 05 - 22]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.137090>.
- [27] 杨凯舟, 魏征, 王佳雅, 等. 炒制工艺对油茶籽油挥发性物质的影响[J]. 中国粮油学报, 2024, 39(1): 148-158.
- [28] PATTARAPRACHYAKUL W, SAWANGKEAW R, NGAMPRASERTSITH S, et al. Optimization of coffee oil extraction from defective beans using a supercritical carbon dioxide technique: Its effect on volatile aroma components [J/OL]. Foods, 2023, 12(13): 2515 [2024 - 05 - 22]. <https://doi.org/10.3390/foods12132515>.
- [29] 罗贤飞. 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.
- [30] 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: 277-433.
- [31] JIA X, DENG Q, YANG Y, et al. Unraveling of thearoma - active compounds in virgin camellia oil (*Camellia oleifera* Abel) using gas chromatography - mass spectrometry - olfactometry, aroma recombination, and omission studies [J]. J Agric Food Chem, 2021, 69(32): 9043-9055.