

油茶籽油精炼过程中热特性与脂肪伴随物、风味品质的关联性

刘兆凡¹ 刘佳保¹ 李 航¹ 黄宗海¹ 何新益¹ 李 云^{2,3}

(1. 天津农学院食品科学与生物工程学院, 天津 300384; 2. 上饶师范学院生命科学学院, 江西 上饶 334000;

3. 贵州布依丽吉油茶实业有限公司, 贵州 黔西南州 562400)

摘要: [目的] 探究油茶籽油精炼过程中热特性与脂肪伴随物、风味品质的关联性, 为其精准调控精炼工艺提供理论依据。[方法] 通过采集精炼过程中(毛油、碱炼、脱色、脱臭、冬化)的油样, 系统测定其理化指标、热特性、脂肪伴随物、脂肪酸组成及挥发性风味物质的动态变化, 并分析其相关性。[结果] 精炼过程使油茶籽油的酸价从 1.79 mg/g 降至 0.26 mg/g, 过氧化值从 0.205 g/100 g 降至 0.025 g/100 g, 并且使主熔融峰温度右移 1.4 °C, 共同证实了热稳定性的提升。精炼过程中也造成了功能性成分的损失, α -生育酚、角鲨烯和多酚的总损失率分别达 45.8%, 49.0%, 76.3%, 主要发生在碱炼和脱臭阶段。脂肪酸组成变化幅度 < 0.5%。同时精炼过程促进了醛类物质与吡嗪等坚果香味的生成。相关性热图表明, 差示扫描量热法测定的特征峰温度与脂肪伴随物含量、理化指标及风味数量呈显著负相关。[结论] 精炼过程提升了油茶籽油的热稳定性与风味品质, 但也导致了油茶籽油脂肪伴随物的损失。

关键词: 油茶籽油; 精炼; 热特性; 脂肪伴随物; 风味品质

Correlation between thermal characteristics and fat concomitants and flavor quality in the refining process of *Camellia oleifera* seed oil

Liu Zhaofan¹ Liu Jiabao¹ Li Hang¹ Huang Zonghai¹ He Xinyi¹ Li Yun^{2,3}

(1. Department of Food Science and Biotechnology, Tianjin Agriculture University, Tianjin 300384, China;

2. College of Life Science, Shangrao Normal University, Shangrao, Jiangxi 334000, China;

3. Guizhou Buyiliji Oil Tea Industry Co., Ltd., Qianxinan Prefecture, Guizhou 562400, China)

Abstract: [Objective] To investigate the correlation between thermal characteristics, fat concomitants, and flavor quality during the refining process of *Camellia oleifera* seed oil, and to provide a theoretical basis for precise regulation of the refining process. [Methods] Oil samples were collected during the refining process (crude oil, alkali refining, decolorization, deodorization, and winterization). The dynamic changes in physicochemical indexes, thermal characteristics, fat concomitants, fatty acid composition, and volatile flavor substances were systematically determined, and their correlations were analyzed. [Results] The refining process reduced the acid value of *C. oleifera* seed oil from 1.79 mg/g to 0.26 mg/g and the peroxide value from 0.205 g/100 g to 0.025 g/100 g, and shifted the main melting peak temperature to the right by 1.4 °C, collectively confirming the enhancement of thermal stability. The refining process also resulted in the loss of functional components, with total loss rates of α -tocopherol, squalene, and polyphenols reaching 45.8%, 49.0%, and 76.3%, respectively, mainly occurring in the alkali refining and deodorization stages. The variation in fatty acid composition was less than 0.5%.

基金项目: 贵州省科技计划项目(编号:黔科合支撑[2023]一般 483); 天津市科技计划项目(编号:25ZYCGSN01030); 甘肃省平凉市科技计划项目(编号:PL-STK-2025A-012, PL-STK-2025A-021)

通信作者: 何新益(1974—), 男, 天津农学院教授, 博士。E-mail: hedevid@163.com

李云(1973—), 女, 上饶师范学院高级工程师, 硕士。E-mail: liyun@zkyjk.com

收稿日期: 2025-07-10 **改回日期:** 2026-06-24

引用格式: 刘兆凡, 刘佳保, 李航, 等. 油茶籽油精炼过程中热特性与脂肪伴随物、风味品质的关联性[J]. 食品与机械, 2026, 42(8): 33-42.

Citation: Liu Zhaofan, Liu Jiabao, Li Hang, et al. Correlation between thermal characteristics and fat concomitants and flavor quality in the refining process of *Camellia oleifera* seed oil[J]. Food & Machinery, 2026, 42(8): 33-42.

Meanwhile, the refining process promoted the generation of aldehydes and pyrazines contributing to nutty flavor. Correlation heatmap analysis showed that the characteristic peak temperature determined by differential scanning calorimetry (DSC) was significantly negatively correlated with fat concomitant content, physicochemical indexes, and flavor compound abundance. [Conclusion] The refining process enhanced the thermal stability and flavor quality of *C. oleifera* seed oil, while also leading to the loss of fat concomitants.

Keywords: *Camellia oleifera* seed oil; refining; thermal properties; fat concomitants; flavor quality

油茶籽油作为中国特色木本油脂,与橄榄油、棕榈油、椰子油并称为四大木本油料树种。其主要的脂肪酸为油酸、亚油酸、亚麻酸和少量饱和脂肪酸,其油酸的质量分数达 80% 以上^[1-2]。另外,油茶籽油还富含生育酚、角鲨烯、多酚等生物活性成分,具有较高的营养价值和市场潜力。由于植物毛油中通常含有游离脂肪酸、磷脂、色素、蜡质等杂质,这些杂质会影响油脂色泽、风味、稳定性和食用安全性^[3],需要进行精炼处理,但精炼也可能导致热特性、脂肪伴随物的损失及风味品质改变,进而影响油脂综合品质^[4]。

油茶籽油精炼过程多集中于单一工艺对品质的影响,如碱炼脱酸^[5]、脱色吸附^[6]等,但针对油茶籽油精炼过程中的系统性品质变化研究仍显不足。吴雪辉等^[7]分析了精炼各阶段油茶籽油挥发性化合物的变化规律,但对精炼过程中活性成分的变化研究较少。贾文聪等^[8]采用气相色谱—质谱联用技术对油茶籽油精炼及贮藏过程中甾醇的动态变化进行研究,并检测到 9 种甾醇。但只针对单一活性成分,对于油茶籽油的热特性、脂肪伴随物及风味品质缺乏系统性的研究。

热特性是衡量油脂物理稳定性和加工适用性的关键指标。目前,关于植物油热特性的研究多集中于大豆油、棕榈油等,而针对油茶籽油精炼过程中热特性的研究尚不系统。已有研究通过差示扫描量热法(DSC)表征其熔点、结晶行为等。韦承珊等^[9]利用 DSC 分析了野生核桃仁油脂的热特性,并测定脂肪酸组成,揭示了与熔融行为的关联性。王玫^[10]则研究了轻度精炼对油茶籽油热稳定性的影响。然而现有研究大多聚焦于单一工艺对个别品质指标的影响,仍缺乏将精炼过程中的热特性与脂肪伴随物及风味品质进行系统性关联分析。

研究拟以油茶籽油为研究对象,通过系统分析精炼过程对油茶籽油的理化指标、热特性、脂肪伴随物、脂肪酸组成及挥发性风味物质的影响,并结合相关性热图分析热特性与其品质指标的关联性,旨在为油茶籽油高附加值产品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

油茶籽油加工各阶段样品:贵州布依丽吉油茶实业有限公司;

三氯甲烷、乙醚:分析纯,科安隆博华(天津)医药化学有限公司;

冰乙酸、可溶性淀粉、异丙醇、石油醚、酚酞:分析纯,天津市大茂化学试剂厂;

无水硫酸钠、氢氧化钾、碘化钾、碳酸钠:分析纯,国药集团化学试剂有限公司;

0.009 9 mol/L 硫代硫酸钠、0.104 6 mol/L 氢氧化钾:分析纯,天津化学试剂三厂;

无水乙醇、正己烷、甲醇:色谱纯,天津市大茂化学试剂厂;

α -生育酚标准品:纯度 $\geq 98\%$,美国 MedChemExpress 公司;

没食子酸标准品:纯度 $\geq 98\%$,美仑生物有限公司;

角鲨烯标准品:纯度 $\geq 98\%$,上海源叶生物科技有限公司。

1.1.2 主要仪器设备

高效液相色谱仪:Agilent 1260 Infinity II 型,美国安捷伦科技公司;

差示扫描量热仪:DSC 200F3A01 型,瑞士梅特勒—托利多仪器有限公司;

台式低速离心机:TDZ5-WS 型,湖南湘仪实验室仪器开发有限公司;

分析电子天平:FA2204B 型,上海佑科仪器仪表有限公司;

气相色谱仪:7890B 型,美国安捷伦科技公司;

气相色谱—质谱联用仪:7010D 型,美国安捷伦科技公司;

电热恒温水浴锅:HH.S11-6 型,上海博讯医疗生物仪器股份有限公司;

紫外—可见光光度计:UV-3500 型,上海美谱达仪器有限公司;

氮吹仪:YGC-24S 型,郑州宝晶电子科技有限公司;

涡旋振荡器:XMNDG 型,奥克斯集团有限公司。

1.2 方法

1.2.1 油茶籽油精炼工艺流程 将毛油加热至 80℃,注入 85℃热水,采用机械搅拌 15 min,随后静置 30 min,得到水洗油。将水洗油以 60 r/min 转速搅拌,蒸汽加热至(0 $\pm$ 5)℃,持续 15 min,在 10 min 内匀速加入碱液,随后以 30 r/min 慢搅 10 min,最后升温至 90℃,恒温沉降 6 h,

分离得到碱炼油。加入油重2%的活性白土,100℃恒温处理,保持油温100℃,以150 r/min搅拌30 min,关闭加热蒸汽,开启循环冷却水系统降温至70℃以下后,通过叶片过滤器进行压滤,将前3 min滤液回滤,得到脱色油。将导热油加热至240℃,随后以四级蒸汽喷射泵维持0.40 kPa绝对压力保持120 min,冷却完成脱臭。后以0.5℃/h速率降至4℃,恒温保持48 h,最后通过袋式过滤器分离晶体,得到成品冬化油。取毛油、碱炼油、脱色油、脱臭油、冬化油样品进行后续分析。

1.2.2 酸价和过氧化值检测 称取油样10 g,加入50 mL 乙醚—异丙醇混合液溶解,按GB 5009.229—2016测定酸价;称取油样2 g,加入30 mL 三氯甲烷—冰乙酸混合液溶解,按GB 5009.227—2023测定过氧化值。

1.2.3 热特性测定 称取10 mg精炼加工各阶段油茶籽油置于差示扫描量热仪(DSC)中。设置温度程序区间为-40~50℃,速率为1℃/min,记录其熔融峰和结晶峰起始点和峰值。

1.2.4 脂肪伴随物检测

(1) 维生素E:按GB/T 26635—2011执行。

(2) 角鲨烯:按LS/T 6120—2017执行。

(3) 多酚:按LS/T 6119—2017执行。

1.2.5 脂肪酸组成测定 按GB 5009.168—2016中的归一化法执行。

1.2.6 挥发性风味物质测定 称取2 g样品置于顶空瓶中待测。150℃下平衡6 min,速率为100 r/min下萃取40 min。进样口温度250℃,进样方式不分流。高纯度氦气作为载气,流量1.5 mL/min。温度程序:初始温度35℃,保持10 min,以5℃/min的速度升至250℃,保持1 min。质谱离子源条件设置为电子能量70 eV的电子撞击源,传输线温度保持250℃,离子源温度保持230℃。质量扫描范围为50~500 (m/z)。

1.3 数据统计与分析

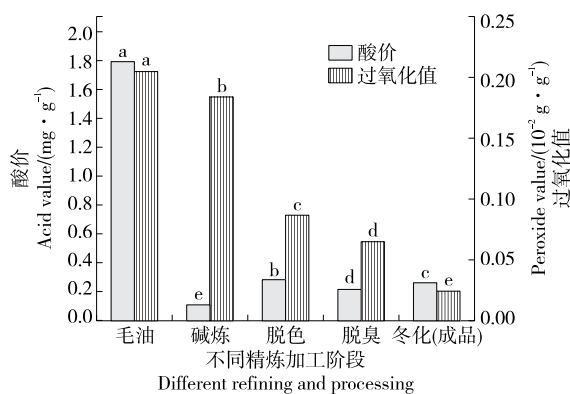
所有试验均重复3次以上。采用SPSS 17.0进行相关性分析及组间比较,数据处理使用Origin 2021软件。试验结果以平均值±标准差表示,组间差异采用ANOVA检验,显著性水平设定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 精炼过程对油茶籽油酸价和过氧化值的影响

精炼过程中酸价(AV)和过氧化值(POV)的变化如图1所示。毛油AV为1.79 mg/g,经碱炼后显著降至0.11 mg/g;脱色工序中略有回升至0.29 mg/g,脱臭后回调至0.22 mg/g,最终冬化油为0.26 mg/g。毛油POV为0.205 g/100 g,碱炼油降至0.184 g/100 g,脱色后大幅降低至0.087 g/100 g,脱臭油进一步降至0.065 g/100 g,冬化成品油达到最低值0.025 g/100 g。

碱炼使AV从1.79 mg/g降至0.11 mg/g,这是由于碱与游离脂肪酸(FFA)反应生成皂脚并将其去除。碱炼过程中,60~80℃加热促使氢过氧化物部分热分解,皂脚吸附氧化产物,实现POV初步降低^[11];脱色阶段因活性白土吸附残留皂脚引发分解,加之90~110℃高温导致甘油三酯水解生成新FFA^[12],使AV回升至0.29 mg/g,但POV因活性白土的强吸附作用使其大幅降低至0.087 g/100 g;脱臭工序在180~240℃真空条件下通过FFA挥发与热聚合使AV回落至0.22 mg/g,同时高温蒸汽使残留氢过氧化物热分解并抽提,POV再降25.3%;冬化阶段低温因甘油三酯水解导致AV升至0.26 mg/g,但通过去除部分含氧化产物的蜡质,实现POV的降低^[13]。整个精炼流程使AV和POV分别降低了85.5%和87.8%,符合GB/T 11765—2018中一级成品油的标准,提升了油脂的食用安全性。



字母不同表示样品间具有差异显著($P<0.05$)

图1 油茶籽油精炼过程酸价、过氧化值变化

Figure 1 Changes of acid value and peroxide value during the refining process of *Camellia oleifera* seed oil

2.2 精炼过程对油茶籽油热特性的影响

精炼过程中油茶籽油的热特性变化通过DSC进行分析,结晶曲线见图2(a),熔融曲线见图2(b),特征峰值温度见表1。主结晶峰 T_{pc1} 受油酸结构稳定性影响,精炼前后波动 $<1^\circ\text{C}$ ^[14],次结晶峰 T_{pc2} 在碱炼阶段右移 3.1°C ,这可能与游离脂肪酸的脱除有关;脱色阶段次结晶峰 T_{pc2} 左移 3.7°C ,这可能与活性白土吸附作用减少晶核位点有关;脱臭高温引发的异构化使 T_{pc2} 回升 0.1°C ;冬化去除高熔点组分促使最终左移 1.2°C 至 -20.1°C ^[15]。

主熔融峰 T_{pm1} 从毛油的 -15.3°C 到冬化油的 -13.9°C ,右移 1.4°C ,可能因为油茶籽油精炼过程中脱除了游离脂肪酸、蜡质等,还可能源于油茶籽油晶体网络结构的改变,导致油茶籽油的热稳定性增强^[16]。次熔融峰 T_{pm2} 波动幅度较小从毛油的 -7.0°C 到冬化的 -7.3°C ,可能受各精炼工序对组分及结构的协同调控影响^[17],但对油脂整体热稳定性影响较小。

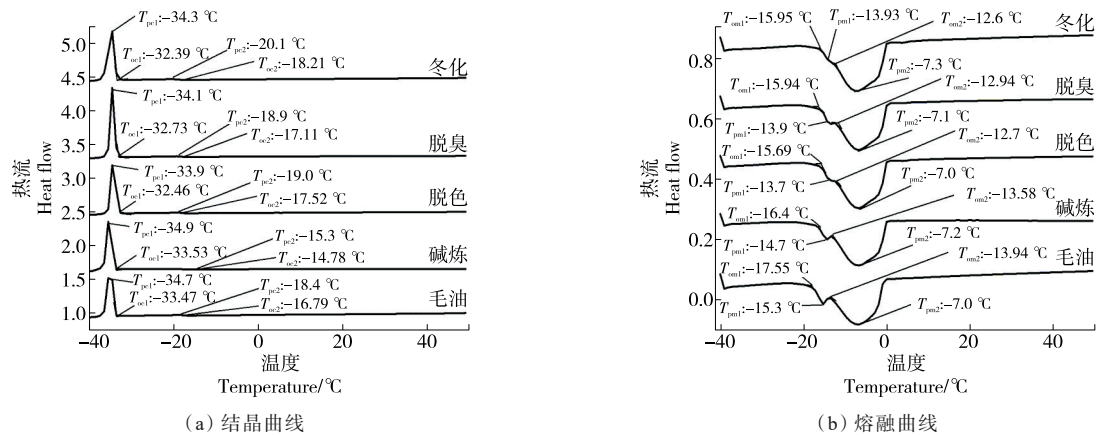


图 2 油茶籽油精炼过程热特性变化曲线

Figure 2 Change curve of thermal characteristics of *Camellia oleifera* seed oil refining process

表 1 油茶籽油精炼过程热特性 DSC 峰值[†]

Table 1 DSC peak of thermal characteristics of *Camellia oleifera* seed oil refining process

样品	结晶峰/℃				熔融峰/℃			
	T_{pc1}	T_{oc1}	T_{pc2}	T_{oc2}	T_{pm1}	T_{om1}	T_{pm2}	T_{om2}
毛油	-34.70 ± 0.13^d	-33.47 ± 0.16^c	-18.40 ± 0.04^b	-16.79 ± 0.13^b	-15.30 ± 0.26^d	-17.55 ± 0.11^d	-7.00 ± 0.02^a	-13.94 ± 0.17^d
碱炼	-34.90 ± 0.18^d	-33.53 ± 0.08^c	-15.30 ± 0.04^a	-14.78 ± 0.24^a	-14.70 ± 0.14^c	-16.40 ± 0.14^c	-7.20 ± 0.04^c	-13.58 ± 0.09^c
脱色	-33.90 ± 0.02^a	-32.46 ± 0.11^a	-19.00 ± 0.12^c	-17.52 ± 0.17^d	-13.70 ± 0.11^a	-15.69 ± 0.12^a	-7.00 ± 0.02^a	-12.70 ± 0.12^a
脱臭	-34.10 ± 0.09^b	-32.73 ± 0.07^b	-18.90 ± 0.08^c	-17.11 ± 0.11^c	-13.90 ± 0.08^b	-15.94 ± 0.06^b	-7.10 ± 0.03^b	-12.94 ± 0.13^b
冬化	-34.30 ± 0.06^c	-32.39 ± 0.05^a	-20.10 ± 0.08^d	-18.21 ± 0.15^c	-13.90 ± 0.09^b	-15.95 ± 0.05^b	-7.30 ± 0.04^d	-12.60 ± 0.15^a

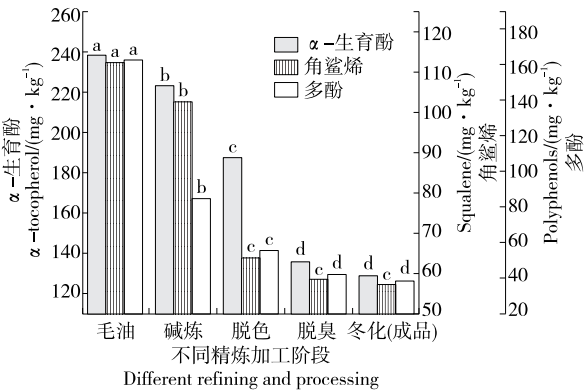
[†] 同列小写字母不同表示样品间具有差异显著($P < 0.05$)。

2.3 精炼过程对油茶籽油脂肪伴随物的影响

油茶籽油精炼过程中 α -生育酚、角鲨烯、多酚的变化如图 3 所示。精炼过程对油茶籽油中脂肪伴随物的含量影响显著,由图 3 可知,油茶籽油精炼过程中 α -生育酚、角鲨烯和多酚呈现阶梯式下降。碱炼阶段,皂脚吸附及水洗脱除导致多酚损失近半,碱性环境会促使生育酚发生皂化反应,而角鲨烯因皂脚吸附和热氧化损失 8.7%。脱色阶段,活性白土对角鲨烯和生育酚表现出强烈的吸附作用,导致角鲨烯损失 37.8%, α -生育酚损失 16.0%。脱臭阶段,在高温与蒸汽蒸馏协同作用下,生育酚因热分解和挥发而损失,角鲨烯可能因沸点接近脱臭温度而损失,多酚因挥发以及可能参与美拉德反应发生而损失^[18]。在冬化阶段低温虽抑制氧化,但结晶过滤会造成功能性成分略有损失^[19]。综上,碱炼、脱色和脱臭阶段是控制功能性成分保留率的关键工艺步骤。

2.4 精炼过程对油茶籽油脂肪酸组成的影响

油茶籽油精炼过程中脂肪酸组成的变化结果如表 2 所示。精炼过程对油茶籽油的脂肪酸的组成影响较小,表明研究所用样品的精炼工艺条件相对温和。油酸作为主要脂肪酸,其含量稳定在 77.53%~78.76%,波



字母不同表示样品间具有差异显著($P < 0.05$)

图 3 油茶籽油精炼过程功能性成分的变化

Figure 3 Changes in functional composition of *Camellia oleifera* seed oil during refining process

动幅度 $<0.2\%$,体现其结构的稳定性。多不饱和脂肪酸的总量从 9.87% 增至 10.17%,刘霜等^[20]指出可能因为在脱臭阶段,饱和脂肪酸更易挥发,导致多不饱和脂肪酸的相对比例上升。总体来说,油茶籽油精炼过程对脂肪酸组成的影响较小,如油酸、棕榈酸、硬脂酸在

表 2 油茶籽油精炼过程脂肪酸组成的变化[†]

脂肪酸	脂肪酸占总脂肪酸含量(脂肪酸的组成)/%				
	毛油	碱炼	脱色	脱臭	冬化(成品)
棕榈酸	9.55±0.12 ^a	9.36±0.10 ^b	9.40±0.08 ^{ab}	9.37±0.09 ^b	9.40±0.12 ^{ab}
棕榈烯酸	0.15±0.02 ^a	0.11±0.01 ^b	0.12±0.01 ^b	0.11±0.01 ^b	0.13±0.01 ^{ab}
硬脂酸	2.21±0.05 ^{ab}	2.18±0.04 ^b	2.24±0.05 ^a	2.16±0.04 ^b	2.22±0.04 ^{ab}
油酸	77.65±0.21 ^b	78.76±0.18 ^a	77.50±0.20 ^b	77.67±0.19 ^b	77.53±0.23 ^b
亚油酸	9.50±0.15 ^b	8.72±0.12 ^c	9.78±0.14 ^a	9.77±0.13 ^a	9.81±0.14 ^a
花生一烯酸	0.57±0.03	0.56±0.02	0.57±0.03	0.56±0.02	0.55±0.03
亚麻酸	0.37±0.02 ^{ab}	0.31±0.01 ^c	0.39±0.02 ^a	0.36±0.02 ^b	0.36±0.06 ^{ab}
饱和脂肪酸	11.76±0.15 ^a	11.54±0.12 ^b	11.64±0.11 ^{ab}	11.53±0.13 ^b	11.62±0.11 ^{ab}
单不饱和脂肪酸	78.37±0.22 ^b	79.43±0.19 ^a	78.19±0.21 ^b	78.34±0.21 ^b	78.21±0.21 ^b
多不饱和脂肪酸	9.87±0.16 ^b	9.03±0.13 ^c	10.17±0.15 ^a	10.13±0.14 ^a	10.17±0.15 ^a

† 同行小写字母不同表示样品间具有差异显著($P<0.05$)。

精炼过程中表现出较高的稳定性。精炼工艺对油茶籽油的脂肪酸组成影响有限^[21],可有效保留核心营养脂肪酸。

2.5 精炼过程对油茶籽油挥发性风味物质的影响

油茶籽油精炼过程挥发性风味物质定性分析如表 3 所示,挥发性风味数量变化如图 4 所示。由图 4 可知,醛类物质由毛油的 12 种减少至成品油的 9 种,碱炼阶段羟醛缩合反应及皂脚吸附使己醛等短链醛减少。脱色阶段活性白土选择性吸附极性醛,非极性醛(*E*)-2-癸烯醛保

留。脱臭阶段低沸点醛挥发,同时高温诱导酚类等前体物质热解生成苯甲醛等新的风味物质^[22];冬化阶段蜡质共结晶吸附了(*Z*)-13-十八碳烯醛。酸类物质从 17 种大幅减少至 5 种,特别是丁酸、丙酸等具有腐臭、酸败气味的脂肪酸被有效去除,改善了油脂风味。在脱臭阶段检测到了吡嗪和呋喃等物质的生成,可能由于发生美拉德反应和热降解反应^[23]。综上,油茶籽油精炼过程达到脱酸、脱醛的目的,选择性去除不良风味物质和促进有益风味物质的生成。

表 3 油茶籽油精炼过程挥发性风味物质定性分析[†]

类别		化合物	毛油	碱炼	脱色	脱臭	冬化	气味描述
醛类	(<i>E</i>)-2-壬烯醛		ND	ND	ND	ND	✓	青草、脂肪味
	(<i>E</i>)-2-庚烯醛		✓	✓	ND	✓	✓	青草、坚果味
	(<i>E</i>)-2-癸烯醛		✓	✓	✓	✓	✓	脂肪、青草味
	(<i>E</i>)-2-辛烯醛		✓	✓	ND	✓	ND	脂肪、青草味
	(<i>Z</i>)-13-十八碳烯醛		✓	✓	✓	✓	ND	脂肪、蜡质味
	2,4-癸二烯醛		✓	✓	✓	✓	✓	油炸、脂肪味
	2-十一碳烯醛		ND	ND	ND	ND	✓	脂肪、青草味
	3-羟基-4-甲氧基苯甲醛		✓	ND	ND	ND	ND	香草、甜香
	4-氧代壬醛		ND	ND	ND	✓	✓	酸味、脂肪味
	5-甲基-2-呋喃甲醛		ND	ND	✓	ND	ND	焦糖、烤香味
	9-十八碳烯醛		✓	ND	✓	ND	ND	脂肪、蜡质味
	壬醛		✓	✓	ND	✓	ND	柑橘、花香
	己醛		✓	ND	ND	ND	ND	青草、青苹果味
	庚醛		✓	ND	ND	✓	✓	脂肪、蜡质味
	癸醛		✓	ND	ND	ND	ND	柑橘、肥皂味
	苯甲醛		ND	ND	ND	✓	✓	杏仁、甜香

续表 3

类别	化合物	毛油	碱炼	脱色	脱臭	冬化	气味描述
酸类	辛醛	✓	✓	ND	✓	✓	柑橘、肥皂味
	顺式-13-十八碳烯酸	ND	✓	ND	ND	ND	微弱油脂味
	辛酸	✓	✓	✓	✓	✓	腐臭、汗味
	(Z)-2-甲基-2-丁烯酸	✓	ND	ND	ND	ND	酸味、果香
	2-壬烯酸	✓	ND	ND	✓	✓	酸味、脂肪味
	2-甲基丁酸	✓	ND	ND	ND	ND	腐臭、奶酪味
	2-辛烯酸	✓	ND	ND	ND	ND	酸味、脂肪味
	3-苯基丙烯酸	✓	ND	ND	ND	ND	微弱果香
	9-氧代壬酸	✓	ND	ND	ND	ND	酸味、蜡质味
	丁酸	✓	ND	ND	ND	ND	腐臭、酸味
	丙酸	✓	ND	ND	ND	ND	刺鼻酸味
	乙酸	✓	✓	✓	✓	ND	刺鼻酸味
	壬酸	✓	✓	✓	✓	ND	腐臭、奶酪味
	己酸	✓	✓	✓	ND	ND	腐臭、汗味
	庚酸	✓	✓	✓	✓	ND	腐臭、奶酪味
	戊酸	ND	ND	ND	ND	ND	腐臭、奶酪味
	棕榈酸(十六酸)	✓	✓	✓	✓	✓	蜡质、无显著气味
	油酸	✓	ND	✓	✓	✓	微弱油脂味
	癸酸	✓	ND	✓	✓	✓	腐臭、蜡质味
	苯乙酸	✓	ND	ND	ND	ND	蜂蜜、甜香
醇类	1-壬醇	✓	ND	ND	ND	ND	花香、柑橘味
	1-己醇	✓	ND	ND	ND	ND	草本、青草味
	1-庚醇	✓	✓	✓	✓	✓	甜香、草药味
	1-戊醇	✓	✓	ND	ND	✓	酒精、果香味
	1-辛烯-3-醇	✓	✓	ND	ND	✓	蘑菇、泥土味
	1-辛醇	✓	✓	✓	✓	✓	甜香、油脂味
	二甘醇	✓	ND	ND	ND	ND	微甜、无显著气味
	环十二烷甲醇	✓	ND	✓	ND	ND	微弱脂香
	甘油	ND	✓	ND	ND	✓	无味或微甜
	苯乙醇	ND	✓	✓	ND	ND	花香、玫瑰味
酯类	(E)-9-十八碳烯酸乙酯	✓	✓	✓	ND	✓	微弱果香
	(Z)-6-十八碳烯酸甲酯	✓	✓	✓	ND	✓	微弱油脂味
	1,2-苯二甲酸二(2-甲基丙基)酯	ND	ND	✓	ND	ND	无显著气味
	2-乙基己基异己基硫代酸酯	✓	✓	✓	ND	ND	硫磺、刺激性气味
	5-十二烷基二氢-2(3H)-呋喃酮	✓	ND	ND	ND	ND	奶油、焦糖味
	6-乙基辛-3-基异己基草酸酯	ND	✓	✓	ND	ND	无显著气味
	9,12-十八碳二烯酸甲酯	ND	ND	✓	ND	ND	微弱油脂味
	δ-壬内酯	ND	ND	ND	✓	ND	果香、甜味
	亚油酸乙酯	✓	ND	✓	ND	ND	微弱油脂味
	十七烷基七氟丁酸酯	✓	ND	✓	ND	ND	无显著气味
	十四烷基十五氟辛酸酯	ND	ND	ND	✓	ND	无显著气味
	庚基辛酸酯	✓	ND	ND	✓	ND	果香、甜味

续表 3

类别	化合物	毛油	碱炼	脱色	脱臭	冬化	气味描述
酯类	异戊基惕各酸酯	✓	ND	ND	ND	ND	果香、甜味
	棕榈酸甲酯	ND	✓	ND	ND	✓	微弱蜡质味
	棕榈酸甲酯	✓	ND	✓	ND	ND	微弱蜡质味
	甲酸己酯	ND	✓	ND	ND	ND	果香、甜味
	癸基-2-乙基己基硫代酸酯	ND	ND	✓	ND	ND	硫磺、刺激性气味
酮类	1-(1H-吡咯-2-基)乙酮	ND	✓	ND	ND	ND	微弱果香
	2-癸酮	✓	✓	✓	✓	✓	奶酪、蜡质味
	2-十五烷酮	✓	✓	✓	✓	✓	麝香、蜡质味
	3,5-辛二烯-2-酮	✓	ND	✓	ND	ND	微弱果香
	4,4,4-三氯-3-羟基-1-苯基-1-丁酮	ND	ND	ND	✓	ND	无显著气味
	5-十二烷基二氢-2(3H)-呋喃酮	ND	ND	✓	ND	ND	奶油、焦糖味
	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	ND	ND	✓	ND	ND	香、蜡质味
	四氢-6-壬基-2H-吡喃-2-酮	✓	ND	ND	ND	ND	奶油、椰子味
	苯乙酮	ND	ND	✓	ND	ND	花香、甜香
	(E)-3-二十碳烯	ND	✓	ND	ND	ND	无显著气味
炔类	1-二十碳炔	ND	ND	✓	ND	ND	无显著气味
	1-十七碳烯	ND	ND	ND	ND	✓	微弱脂香
	2,6,11,15-四甲基十六烷	ND	ND	ND	✓	ND	微弱蜡质味
	3-甲基癸烷	ND	✓	ND	ND	ND	微弱蜡质味
	4,6-二甲基十二烷	ND	ND	ND	✓	✓	微弱蜡质味
	4-乙基-2,2,6,6-四甲基庚烷	ND	ND	ND	ND	✓	微弱石油味
	5-二十碳炔	ND	ND	ND	✓	ND	无显著气味
	前马烯螺旋二烯	✓	ND	ND	ND	ND	松木、树脂味
	十一烷	ND	ND	ND	✓	ND	微弱蜡质味
	十七烷	ND	ND	ND	✓	ND	微弱蜡质味
	十三烷	ND	✓	ND	ND	ND	微弱蜡质味
	十二甲基环六硅氧烷	ND	ND	ND	ND	✓	无味(硅油类物质)
	十五烷	ND	✓	✓	ND	ND	微弱蜡质味
	十八烷	ND	✓	✓	ND	ND	微弱蜡质味
	十四烷	ND	ND	ND	ND	✓	微弱蜡质味
	十四甲基环七硅氧烷	ND	ND	✓	✓	ND	无味(硅油类物质)
	十甲基环五硅氧烷	✓	ND	ND	ND	✓	无味(硅油类物质)
	辛烷	✓	ND	ND	ND	ND	无味或微弱石油味
其他	2,5-二甲基吡嗪	ND	✓	ND	ND	ND	坚果、烤香味
	2-乙基-6-甲基吡嗪	ND	✓	ND	ND	ND	坚果、烤香味
	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪	ND	✓	ND	ND	ND	坚果、烤香味
	2-庚基呋喃	ND	✓	ND	ND	✓	坚果、焦糖味
	(E)-2-(1-戊烯基)呋喃	ND	✓	ND	✓	ND	焦糖、烤香味
	2-辛基呋喃	ND	ND	ND	✓	✓	坚果、焦糖味
	己基辛醚	ND	✓	ND	ND	ND	微弱脂香
	十二烷基庚基醚	ND	ND	ND	✓	ND	微弱脂香
	N-氰基苯甲酰胺	✓	✓	✓	ND	ND	无显著气味

† ✓为检出,ND为未检出。

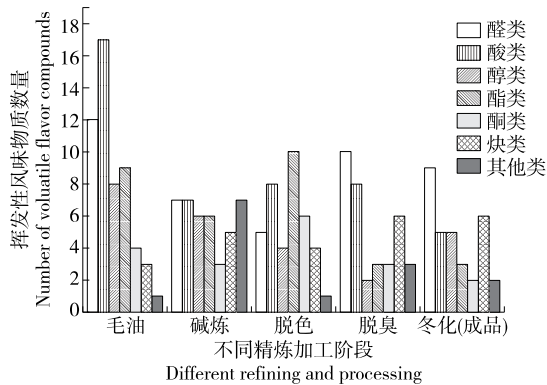


图 4 油茶籽油精炼过程挥发性风味数量

Figure 4 Volatile flavor quantities in *Camellia oleifera* seed oil refining process

2.6 热特性与脂肪伴随物、理化指标及风味数量的关联性分析

油茶籽油精炼过程中热特性与脂肪伴随物、理化指标及风味数量的相关性热图如图 5 所示。代表结晶与熔融特征的 T_{pe1} 和 T_{pm1} 与 AV 和 POV 呈显著负相关,表明游离脂肪酸的脱除改变了甘油三酯的结晶与熔融行为^[24],形成更稳定、更高熔点的晶体结构,表现为 T_{pm1} 右移。杨梦等^[25]研究发现,盾叶木籽油的理化指标越低,低温结

晶的熔融温度越高,同样说明理化指标与热特性密切相关。

T_{pe1} 和 T_{pm1} 与所有关键脂肪伴随物(α -生育酚、角鲨烯、多酚)及风味数量均呈显著负相关,说明精炼过程在去除杂质、优化油脂晶体网络结构与热稳定的同时会造成营养和风味物质的损失^[26-27]。脂肪伴随物因其极性和分子结构可作为晶体干扰物,阻碍甘油三酯分子在结晶过程中紧密堆积,降低晶体完善度和熔点。随着精炼进行,这些组分被去除,甘油三酯形成更完善、更稳定的晶体网络,从而表现为熔融峰温度升高。孟校宇等^[28]研究表明,*L*-抗坏血酸棕榈酸酯作为脂肪伴随物的加入会影响椰子油的结晶与熔融行为,使椰子油的熔融峰温度升高,与试验结果类似。

此外,脂肪伴随物与风味数量及 AV 与 POV 指标之间呈显著正相关。这归因于这些组分在油茶籽油体系中共同的抗氧化功能,其含量的协同变化共同影响油脂氧化进程,而氧化衍生物是许多风味物质的前体物^[29]。Zhao 等^[30]研究表明,在冷榨虎坚果油的精炼过程中,随着理化指标的降低,挥发性风味物质数量减少,同样也出现了醛类、醇类等特征风味物质,与试验结果类似。相关性热图显示,DSC 主特征峰的移动与脂肪伴随物损失、风味物质数量的变化存在显著统计学关联。

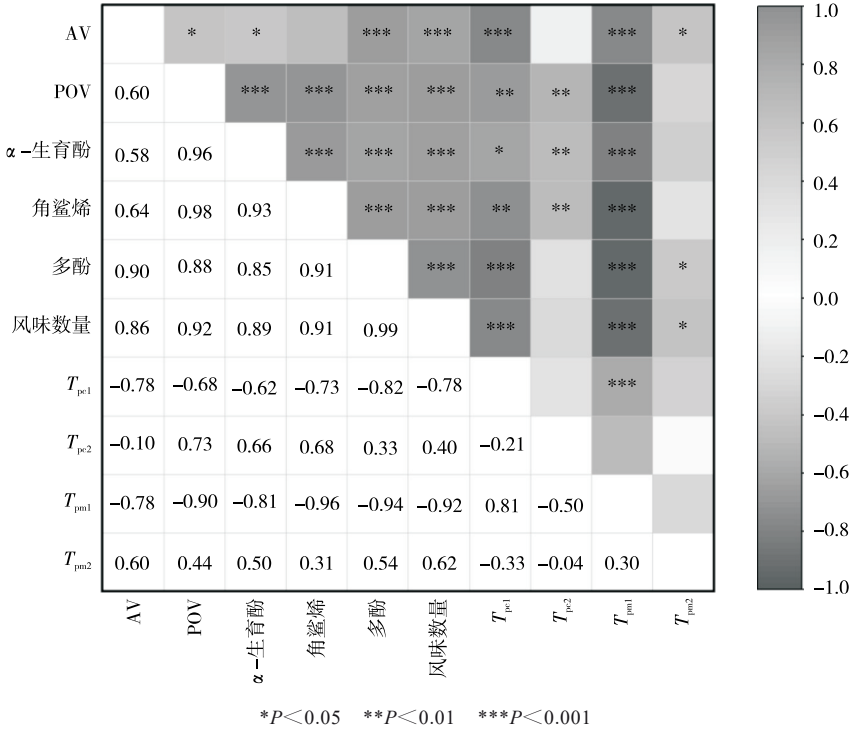


图 5 油茶籽油精炼过程热特性与脂肪伴随物、理化指标及风味数量相关性热图

Figure 5 Heat map of thermal characteristics of *Camellia oleifera* seed oil refining process correlating with fat concomitants, physicochemical indexes, and flavor quantities

3 结论

该研究系统解析了油茶籽油精炼过程中理化指标、热特性、脂肪伴随物与风味品质的变化及相关性分析。精炼过程使油茶籽油的酸价和过氧化值显著降低85.5%与87.8% ($P < 0.05$),符合一级油的标准,从而达到食用安全性。并通过热分析表明,精炼过程通过游离脂肪酸、蜡质及杂质的脱除,使主熔融峰(油体峰)右移1.4℃,表明油茶籽油熔点升高,热稳定性增强;次结晶峰(蜡质峰)左移4.8℃,说明高熔点蜡质被有效去除,因此需要更低的温度才能达到其结晶所需的过饱和度。但功能性成分呈阶梯式损失, α -生育酚、角鲨烯和多酚总损失率分别达到45.8%,49.0%,76.3%,其中碱炼、脱色和脱臭阶段是关键损失环节。研究进一步揭示,精炼对脂肪酸组成影响微弱,其总变化幅度 $< 0.5\%$ 。但通过选择性去除不良风味的短链酸、醛,并促进了吡嗪、呋喃等坚果香味的生成,使最终冬化成品油风味趋于纯净。相关性热图分析进一步揭示,差示扫描量热法测定的主特征峰温度 T_{pc1} 和 T_{pm1} 与脂肪伴随物、理化指标及风味物质数量呈显著负相关,表明精炼过程中热特性的变化与营养组分和风味特征之间存在关联性。

但该研究也存在一些不足,如尚未对油茶籽油精炼过程中具体组分的变化与油茶籽油晶体网络结构关联性机制进行深入的研究,未能充分评估关键脂肪伴随物的损失对成品油货架期潜在的影响。后续需进一步结合X射线衍射、偏振光显微镜等技术深入探究其油脂晶体网络结构与热特性的关联性机制,以及开展货架期试验,从而开发精准适度精炼工艺。

参考文献

- [1] 陈焱, 尤梦圆, 王满意, 等. 不同加工方式对油茶籽油品质的影响[J]. 食品科技, 2020, 45(5): 180-184.
Chen Y, You M Y, Wang M Y, et al. Effects of different processing methods on the quality of camellia seed oil[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(5): 180-184.
- [2] 叶展, 徐勇将, 刘元法. 食用植物油脂制取与精炼技术研究进展[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(6): 1-12.
Ye Z, Xu Y G, Liu Y F. Research progresses on technologies for edible vegetable oil's preparation and refining[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(6): 1-12.
- [3] 段彦, 黄丹, 周炎辉, 等. 精炼工艺对浸出油茶籽油化学成分及抑菌活性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(7): 45-51.
Duan Y, Huang D, Zhou Y H, et al. Effect of refining process on chemical components and antibacterial activity of solvent extracted oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(7): 45-51.
- [4] Luo F, Fei X, Li K, et al. Effect of refining process on phenolic compounds and oxidation stabilities in oil-tea camellia seed oil[J]. Editorial Office of Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(14): 293-299.
- [5] 陈志香. 风味营养油茶籽油的加工工艺的选择与优化[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015: 2-6.
Chen Z X. Selection and optimization of processing technology of flavorful and nutritional camellia oil[D]. Changsha: Central South Forestry University of Science and Technology, 2015: 2-6.
- [6] 邓龙, 邓泽元, 胡蒋宁, 等. 油茶籽油加工过程中理化性质和营养品质的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(23): 111-115.
Deng L, Deng Z Y, Hu J N, et al. Physical-chemical properties and nutrients of oil-tea camellia seed oil in different refining stages[J]. Food Science, 2015, 36(23): 111-115.
- [7] 吴雪辉, 何俊华, 翁依洵, 等. 油茶籽油精炼过程中品质指标的变化规律研究[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(4): 135-140.
Wu X H, He J H, Weng Y X, et al. The changing law of the quality indexes of camellia seed oil during refining[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(4): 135-140.
- [8] 贾文聪, 方恩华, 吴易峰, 等. 油茶籽油甾醇存在形态及其在精炼和贮藏过程中动态变化分析[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 39-45.
Jia W C, Fang E H, Wu Y F, et al. Speciation analysis of phytosterols in camellia seed oil and their dynamic changes during refining and storage[J]. Food Science, 2021, 42(16): 39-45.
- [9] 韦承珊, 毕佳俊, 李云仙, 等. 野生核桃仁营养成分及其油脂脂肪酸组成、热特性分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(2): 137-141.
Wei C S, Bi J J, Li Y X, et al. Nutritional components of wild walnut kernel and fatty acid composition, thermal characteristics of its oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49(2): 137-141.
- [10] 王玫. 轻度精炼加工对油茶籽油品质和热稳定性的影响研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 53-84.
Wang M. Study on the effect of light refining process on the quality and thermal stability of camellia oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 53-84.
- [11] 白雪, 刘元法, 胥多, 等. 精炼工艺对可可脂品质的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(7): 22-26, 34.
Bai X, Liu Y F, Xu D, et al. Effect of refining process on the quality of cocoa butter[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(7): 22-26, 34.
- [12] 常明, 朱晋萱, 刘睿杰, 等. 油脂精炼对茶叶籽油品质变化的影响[J]. 中国油脂, 2014, 39(6): 31-34.
Chang M, Zhu J X, Liu R J, et al. Impact of refining process on quality of tea seed oil[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(6): 31-34.
- [13] Du M H, Fang X Z, Luo F, et al. Physicochemical properties and lipid composition of camellia seed oil (*Camellia oleifera* Abel.) extracted using different methods[J]. Food Science and Technology Research, 2015, 21(6): 779-785.

- [14] Piasecka I, Ligeza O E, Wiktor A, et al. Ultrasound and pulsed electric field treatment effect on the thermal properties, oxidative stability and fatty acid profile of oils extracted from berry seeds[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2025, 150(2): 1-15.
- [15] Pardauil R J J, Molfetta A F, Braga M, et al. Characterization, thermal properties and phase transitions of amazonian vegetable oils[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2017, 127(2): 1 221-1 229.
- [16] 王崇昊. 基于结晶调控机制的油凝胶起酥油制备、表征及其应用[D]. 郑州: 河南工业大学, 2025: 51-57.
- WANG C H. Preparation, characterization, and application of oleogel shortening based on crystalline regulatory mechanism [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2025: 51-57.
- [17] Yu D Y, Qi X F, Ren Y, et al. Thermal and crystal characteristics of enzymatically interesterified fats of fatty acid-balanced oil and fully hydrogenated soybean oil in supercritical CO₂ system[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(11): 2 675-2 685.
- [18] Gong E S, Luo S J, Li T, et al. Phytochemical profiles and antioxidant activity of processed brown rice products[J]. Food Chemistry, 2017, 232: 67-78.
- [19] 张东生, 薛雅琳, 金青哲, 等. 精炼过程对油茶籽油品质影响的研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(9): 18-22.
- Zhang D S, Xue Y L, Jin Q Z, et al. Effect of refining process on the quality of oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2014, 39(9): 18-22.
- [20] 刘霜, 彭思敏, 廖卢艳, 等. 茶油精炼过程中脂肪酸与风味物质变化研究[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(7): 69-72.
- Liu S, Peng S M, Liao L Y, et al. Study on the changes of fatty acids and flavor substances in the refining process of camellia oil[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(7): 69-72.
- [21] 李东, 张琼, 何新益, 等. 花椒风味油茶籽油制备及挥发性物质分析[J]. 食品与机械, 2023, 39(5): 166-172.
- Li D, Zhang Q, He X Y, et al. Preparation and volatile compounds analysis of *Camellia* seed oil with *Zanthoxylum* flavor[J]. Food & Machinery, 2023, 39(5): 166-172.
- [22] Emad K, Mohamed A I A, Wei W, et al. Characterization of volatile flavor compounds in supercritical fluid separated and identified in gurum (*Citrulluslanatus* Var. *colocynthoide*) seed oil using HSME and GC-MS[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2022, 27(12): 3 905.
- [23] 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 H, Wang J, Xu J, et al. Review on volatile flavor components of oil-tea camellia seed oil[J]. China Oils and Fats, 2023, 48(1): 42-47.
- [24] Zhang Z S, Wei Y Y, Guan N, et al. Changes in chemical composition of flaxseed oil during thermal-induced oxidation and resultant effect on DSC thermal properties[J]. Molecules, 2022, 27(20): 7 135.
- [25] 杨梦, 毕荣璐, 张平, 等. 盾叶木籽油的理化性质、热特性及抗氧化性能[J]. 中国油脂, 2024, 49(6): 53-57, 81.
- Yang M, Bi R L, Zhang P, et al. Physicochemical property, thermal characteristics and antioxidant activity of *Macaranga adenantha* Gagnep. seed oil[J]. China Oils and Fats, 2024, 49 (6): 53-57, 81.
- [26] Li H K, Han J J, Zhao Z K, et al. Roasting treatments affect oil extraction rate, fatty acids, oxidative stability, antioxidant activity, and flavor of walnut oil[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 9: 1077081.
- [27] 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]. Foods, 2020, 10 (1): 50.
- [28] 孟校宇, 刘春环, 曹晨, 等. *L*-抗坏血酸棕榈酸酯对椰子油结晶行为的影响[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 40-45.
- Meng X Y, Liu C H, Cao C, et al. Effect of *L*-ascorbyl palmitate on the crystallization behavior of coconut oil[J]. China Oils and Fats, 2020, 45(11): 40-45.
- [29] Xu S, Huang D, Liu C Y, et al. Development of nutrition-flavor dual process of rapeseed oil based on resource utilization of rapeseed cake[J]. Food Chemistry, 2025, 492: 145576.
- [30] Zhao Y, Sun Y, Sun H Y, et al. Changes in the flavor of cold-pressed tiger nut oil (*Cyperus esculentus* L.) during refining processes and evaluation of its thermal properties[J]. Foods, 2025, 14(2): 301.