

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240708003

加热氧化对山茶油热力学及流变学特性的影响

李 阳^{1,2}, 张 峰³, 李家汶¹, 张 辉^{1,2*}

(1. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058; 2. 嘉兴未来食品研究院, 嘉兴 314050; 3. 中华人民共和国榕城海关, 福清 350301)

摘 要: **目的** 探究加热氧化对山茶油热力学及流变学特性的影响。**方法** 山茶油经加热氧化处理后, 运用差示扫描量热技术(differential scanning calorimetry, DSC)、旋转流变技术, 研究其 DSC 氧化稳定性, 熔融结晶特性及黏度随剪切速率、温度变化等特性。**结果** 山茶油加热时间越长, 其 DSC 热力学氧化稳定性越低, 当加热 120 min 后较初始山茶油的氧化起始温度降低了 8.3 °C, 加热氧化后它的熔融温度及熔融焓降低, 主要结晶峰消失。山茶油加热氧化后流动性变差, 表现为黏度升高, 加热 120 min 的山茶油较初始山茶油黏度提高了 2.8 倍, 山茶油氧化程度越高, 其黏度随温变化的速率越快。**结论** 加热氧化降低了山茶油的热力学稳定性及流变学稳定性, 本研究为山茶油精深加工的热力学性能及流变性能提供了一定的理论支撑。

关键词: 山茶油; 加热氧化; 差示扫描量热; 流变特性; 精深加工

Effects of heating oxidation on thermodynamic and rheological properties of *Camellia* oil

LI Yang^{1,2}, ZHANG Feng³, LI Jia-Wen¹, ZHANG Hui^{1,2*}

(1. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;
2. Jiaxing Institute of Future Food, Jiaxing 314050, China; 3. Rongcheng Customs District PRC,
Fuqing 350301, China)

ABSTRACT: Objective To study the thermodynamic and rheological properties of *Camellia* oil after heating oxidation. **Methods** *Camellia* oil was heated and oxidized at high temperature, then differential scanning calorimetry (DSC) and rotary rheology techniques were applied to study the oxidation stability, melting crystallization characteristics, and viscosity varies with shear rate and temperature of *Camellia* oil. **Results** The longer the heating time, the lower the DSC thermodynamic oxidation stability of *Camellia* oil. Compared to the raw *Camellia* oil, the oxidation initiation temperature of *Camellia* oil which heated for 120 min decreased by 8.3 °C. The melting temperature and melting enthalpy of *Camellia* oil decreased through heating, along with the main crystallization peak disappeared. After heating, the fluidity of *Camellia* oil became worse and the viscosity increased. The viscosity of *Camellia* oil heated for 120 min was 2.8 times higher than that of the raw *Camellia* oil. In addition, the higher the degree of oxidation of *Camellia* oil, the faster the viscosity changed with temperature.

基金项目: 浙江大学实验技术研究项目(SYBJS202315)、浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C02044)

Fund: Supported by the Experimental Technology Research Project of Zhejiang University (SYBJS202315), and the “Pioneer” and “Leading Goose” Research and Development Program of Zhejiang Province (2023C02044)

***通信作者:** 张辉, 博士, 教授, 主要研究方向为脂质化学与功能健康。E-mail: hubert0531@zju.edu.cn

***Corresponding author:** ZHANG Hui, Ph.D., Professor, College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Nong-Sheng-Huan Bldg, 866 Yuhangtang Road, Hangzhou 310058, China. E-mail: hubert0531@zju.edu.cn

Conclusion Deating oxidation decreases the thermodynamic and rheological stability of *Camellia* oil. This study can provide theoretical support for thermodynamic properties and rheological properties of *Camellia* oil for deep-processing.

KEY WORDS: *Camellia* oil; heating oxidation; differential scanning calorimetry; rheology properties; deep-processing

0 引言

油茶是 4 大木本油料之一, 广泛种植于中国南方亚热带地区的高山及丘陵地带。山茶油是从油茶种子中提取的植物油, 是中国特有的一种纯天然高级油料。据估计, 中国的山茶油产量每年超过 60 万 t, 约占世界总产量的 90%^[1]。山茶油含有丰富的不饱和脂肪酸、黄酮类、酚类、植物甾醇、角鲨烯等活性成分, 营养价值较高, 研究表明山茶油具有改善血液循环、调整心血管、调节免疫功能、护肝、抗衰老等功效^[2-3]。

油脂氧化, 俗称酸败, 主要由于油脂中不饱和脂肪酸发生氧化, 产生过氧化物, 进而降解成挥发性醛、酮、酸的复杂混合物^[4]。山茶油的氧化稳定性对其营养价值发挥着至关重要的作用, 目前关于山茶油氧化稳定性的研究侧重于研究其功效成分的变化, 但对于山茶油氧化后热力学及流变学特性变化的研究较少。

食品热力学是食品工程研究的重要领域。加热是食品加工的重要手段, 尤其在现代化食品工业中, 食品的热力学性质也成为食品生产管理、品质控制、加工和流通等的重要基础。常见的热力学性质指标和研究内容主要有: 熔融、结晶、比热容、相变规律、传热规律等^[5]。差示扫描量热(differential scanning calorimetry, DSC)分析技术是食品热力学研究的重要手段, 能测定食品的物理转变和化学反应, 并测量物质转变过程中吸收或放出的热量, 测量转变所发生的起始温度、最大反应时的温度及反应结束的温度等^[6-7]。山茶油及山茶油氧化的 DSC 热力学特性分析, 能为山茶油的热加工工艺研究奠定良好的理论支撑。

食品流变学是研究食品在力作用下变形或流动的科学, 以弹性力学和流体力学为基础, 主要应用黏弹性理论, 研究食品及食品原料在小变形范围内的黏弹性质及其变化规律, 测量食品在特定变形情况下具有明确物理意义的流变响应^[8-9]。山茶油及山茶油氧化的流变学特性研究, 将为山茶油加工特性、加工工艺及设备设计提供重要理论依据^[10-11]。

本研究基于热力学及流变学分析, 设计了山茶油氧化探究性实验, 以探索加热对山茶油氧化稳定性的影响, 并研究山茶油氧化稳定性与其热力学性能、流变性能之间的关系, 为山茶油的进一步深加工利用及山茶油高附加值

产品开发提供一定的理论支撑。

1 材料与方法

1.1 实验材料及仪器

山茶油(益海嘉里金龙鱼粮油股份有限公司); 高纯氮气、高纯氧气(杭州今工特种气体有限公司)。

Q200 差示扫描量热仪(美国 TA 公司); MCR 302 智能旋转流变仪(奥地利 Anton Paar 公司); DHG-9055A 烘箱(上海一恒科学仪器有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 油脂氧化样品制备

将山茶油于 180 °C 烘箱中加热 30、60、90、120 min, 记为 C₃₀、C₆₀、C₉₀、C₁₂₀; 以未经处理的山茶油作为对照组, 记为 C₀; 所有样品于 4 °C 冰箱保存待测。

1.2.2 过氧化值测定

按照 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中的指示剂滴定法对山茶油过氧化值进行测定, 使用过氧化物相当于碘的质量分数表示过氧化值(mmol/kg)。

1.2.3 DSC 氧化稳定性测定

称量 8~12 mg 的样品到 40 μL 铝锅, 盖子上扎 5 个孔。DSC 载气为 O₂, 50 mL/min, 以一定的升温速率(4.0、7.5、10.0、15.0 °C/min)从 100 °C 加热至 350 °C。

1.2.4 DSC 熔融结晶测定

以氮气为载气, 20 mL/min。称量 8~12 mg 的样品到 40 μL 铝锅并密封。样品以 10 °C/min 的升温速率从室温 25 °C 加热至 80 °C, 并保持 10 min, 破坏原有的晶体结构; 然后 10 °C/min 的降温速率从 80 °C 冷却至 -70 °C, 保持 15 min; 最后, 以 10 °C/min 的升温速率从 -70 °C 加热至 80 °C。

1.2.5 黏度-剪切速率曲线分析

运用流变仪进行山茶油黏度-剪切速率曲线分析。选择 50 mm 的 1°锥形板(CP50), 两板间隙设置为 1 mm, 剪切速率设置为 0.1~200.0 s⁻¹, 温度设置为 25 °C, 测定样品黏度变化。取样量为 0.8 mL, 在设定温度平衡 2 min 后开始测试。

1.2.6 黏度-温度曲线分析

运用流变仪进行黏度-温度曲线分析。选择 50 mm 的

平板(PP50), 两板间隙设置为 0.5 mm, 程序升温速率为 5 °C/min, 温度范围 10~70 °C, 剪切速率 100 s⁻¹。取样量为 1.5 mL, 在初始温度 10 °C 平衡 3 min 后开始测试。

1.3 数据处理

数据均为 3 次独立实验平均值, 结果以均数±标准偏差表示, 使用 SPSS 20.0 (SPSS Inc, Chicago, IL)进行单因素方差分析, $P<0.05$ 代表差异显著。

2 结果与分析

2.1 山茶油过氧化值

油脂的氧化稳定性通常可用植物油的过氧化值来表示, 过氧化值是指油脂中过氧化物的含量数值, 是检验油脂品质的重要指标, 过氧化值越高, 则油脂氧化变质程度越大, 品质越差^[12]。通过对油脂过氧化值的测定, 可以了解油脂的氧化程度, 进而了解油脂的品质情况。由表 1 可知, 随着加热时间的延长, 山茶油过氧化值不断增加, 但在本研究的加热温度和加热时间范围内, 其过氧化值仍符合 GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》对食用植物油过氧化值的规定(小于等于 9.85 mmol/kg), 这一结果与姚世勇等^[13]的研究一致。实验结果表明山茶油具有良好的抗氧化性能, 并能拥有较长的货架期, 这主要归因于山茶油所含有的抗氧化物质如角鲨烯、植物甾醇及生育酚等物质^[14]。

表 1 山茶油过氧化值					
Table 1 Peroxidation value of <i>Camellia</i> oil					
样品	C ₀	C ₃₀	C ₆₀	C ₉₀	C ₁₂₀
过氧化值/(mmol/kg)	0.51±0.14 ^c	3.22±0.23 ^d	4.89±0.16 ^c	6.28±0.35 ^b	7.86±0.19 ^a

注: 不同字母之间表示过氧化值具有显著性差异($P<0.05$)。

2.2 DSC 热力学分析

2.2.1 山茶油 DSC 氧化稳定性

在山茶油氧化过程中, 氧分子迁移到不饱和脂肪酸上发生氧化反应并释放热量, 基于 DSC 测量山茶油氧化反映释放的热量, 可测定山茶油的氧化稳定性^[15]。为探究升温速率对 DSC 氧化曲线分辨率的影响, 本研究以不同升温速率进行山茶油 DSC 氧化实验, 图 1 表明, 山茶油氧化峰值温度(T_{max})与升温速率存在正相关性, 这一结果与匡婷等^[16]的研究一致。同时, 从图 1 可以发现, 峰的大小随升温速率的加快而增大, 结果造成分辨率下降, 当升温速率为 7.5 °C/min 时, DSC 曲线峰宽(W)较小, DSC 峰型明显, 且较 4.0 °C/min 能缩短检测时间, 因此选取升温速率为 7.5 °C/min 进行后续实验。

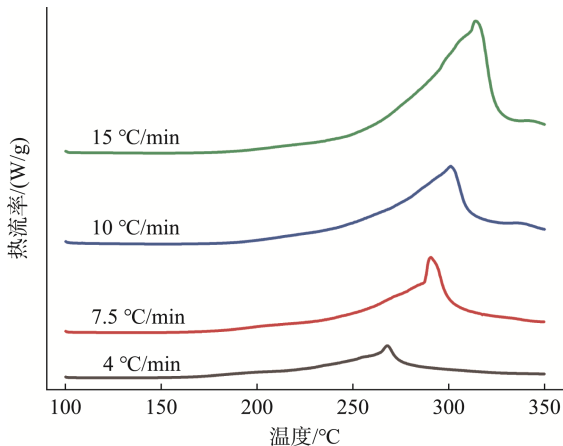


图1 升温速率对山茶油DSC氧化曲线分辨率的影响
Fig.1 Effects of heating rate on the resolution of DSC oxidation curve of *Camellia* oil

可根据氧化放热的起始点温度(T_{on})对不同加热时间的山茶油样品进行氧化稳定性分析^[17]。实验结果表明(图 2), 山茶油加热时间越长, 山茶油 T_{on} 越低其氧化稳定性也越差, 且相比于初始山茶油 C₀ (283.5 °C), C₁₂₀ 样品的 T_{on} (275.2 °C)降低了 8.3 °C, 这一结果说明 DSC 特征值能有效判定测山茶油的氧化程度, 在食用油氧化稳定性检测方法的选择中, 与传统的氧化稳定性分析法比较, DSC 法具有试样量小、使用温度范围宽、测定时间短、精度高等特点, 更适于食用油的快速氧化稳定性检测^[18-19]。同时也说明加热氧化缩短了山茶油的氧化诱导时间, 进而缩短了山茶油的货架期, 这一结果与 CHEN 等^[20]的研究结果一致。

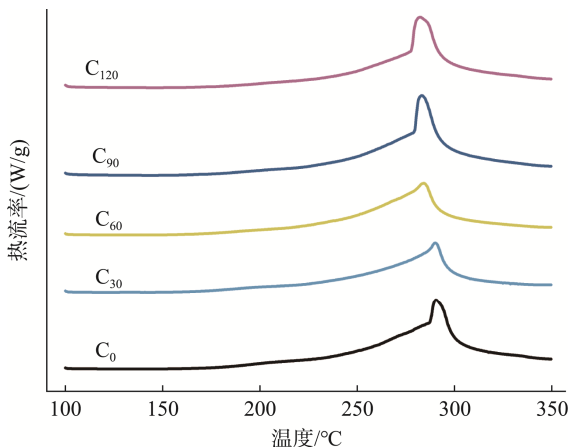


图2 山茶油氧化稳定性
Fig.2 Oxidation stability of *Camellia* oil

2.2.2 山茶油 DSC 熔融结晶特性

山茶油中植物甾醇(如 β -谷甾醇、豆甾醇等)、角鲨烯等抗氧化功效物质具有良好的熔融结晶特性, 通过对山茶油熔融结晶特性的测定, 能从热力学角度较好地表征山茶油氧化稳定性^[21-22]。由表 2 可知, 山茶油 C₀ 的熔融温度范

表 2 热力学特征值
Table 2 Thermodynamic eigenvalue

样品	熔融				结晶							
	$T_{on1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{P1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{end1}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_1/(\text{J/g})$	$T_{on1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{P1}/^{\circ}\text{C}$	$T_{end1}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_1/(\text{J/g})$	$T_{on2}/^{\circ}\text{C}$	$T_{P2}/^{\circ}\text{C}$	$T_{end2}/^{\circ}\text{C}$	$\Delta H_2/(\text{J/g})$
C ₀	-16.35	-4.58	2.37	-57.52	-14.15	-18.26	-21.65	1.57	-41.23	-47.12	-52.62	29.83
C ₃₀	-18.52	-9.41	0.28	-45.75	-14.02	-18.08	-21.04	1.31	\	\	\	\
C ₆₀	-24.65	-11.49	-4.25	-24.86	-11.95	-16.06	-19.01	1.29	\	\	\	\
C ₉₀	-26.95	-12.95	-4.59	-8.51	-11.56	-15.72	-18.45	1.66	\	\	\	\
C ₁₂₀	-26.93	-12.92	-4.58	-0.99	-10.91	-15.06	-17.89	2.07	\	\	\	\

注:\为未有此数值。

围为-16.35 °C至 2.37 °C, 并在-4.58 °C具有一个熔融峰, 山茶油加热后, 其熔融温度范围及熔融峰发生变化; 从表 2 可以看出, 随着加热时间的延长, 山茶油熔融峰温度 T_1 逐渐降低(C₉₀到 C₁₂₀略微升高), 且熔融焓 ΔH_1 绝对值也逐渐降低。这一结果的主要原因是随着山茶油加热时间的延长, 山茶油中植物甾醇及角鲨烯等抗氧化物质遭到破坏程度逐渐加深, 这些物质所表现的熔融特性也逐渐消失^[23]。对于结晶特性, 山茶油 C₀ 的结晶温度范围为-14.15 °C至 -52.62°C, 并在-47.12 °C及-18.26 °C具有两个结晶峰, 且 -47.12 °C为主要结晶峰(结晶焓 $\Delta H_1=29.83$), 但山茶油加热后, 低温结晶峰消失, 仅保留-18 °C左右的结晶峰。该现象可能是由于山茶油中所含具有结晶特性的功效物质具有热敏感性, 经短时间加热处理, 其主要结晶特性便消失。因此, 加热氧化使得山茶油熔融温度降低、结晶温度升高, 并缩小了山茶油结晶温度范围, 这使得山茶油的储存条件更为苛刻, 导致山茶油精深加工利用中原料的有效存储难度提升^[24]。

2.3 流变特性分析

2.3.1 剪切速率对山茶油黏度的影响

黏度是流体流动特性的直观体现, 是表征流体受外力的作用致其质点间做相对运动时产生阻力的性质^[25]。图 3 是同一温度下(25 °C)山茶油的黏度随剪切速率变化曲线, 由图 3 可知, 0.1~20.0 s⁻¹区间时, 各山茶油样品黏度随剪切速率的增加而降低并逐渐趋于稳定, 并在 20.0~200.0 s⁻¹区间内均保持稳定状态, 表现为牛顿流体, 且加热氧化并不会改变山茶油的牛顿流体行为。同时, 图 3 显示, 山茶油经加热处理, 其黏度随加热时间不断增加, 表明山茶油加热氧化后黏性增强, C₁₂₀比 C₀的黏度提高了 2.8 倍, 说明山茶油加热氧化后流动性会变差, 因此在山茶油加工时需考虑氧化对其黏度变化的影响。

2.3.2 温度对山茶油黏度的影响

图 4 为不同氧化程度山茶油在剪切速率 100 s⁻¹下黏度随温度的变化曲线。从图 4 可以看出, 在一定测量温度范围(10~70 °C)内, 山茶油样品黏度随温度的升高呈指数型下降, 这与 STANCIU^[26]和 CEDENO-SANCHEZ 等^[27]的研究结果报道一致。测量温度的升高, 会造成山茶油分子

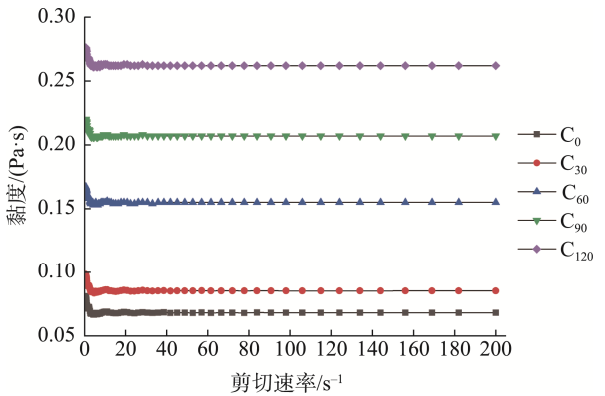


图3 同一温度下山茶油黏度随剪切速率变化曲线
Fig.3 Curves of viscosity of *Camellia* oil with shear rate at the same temperature

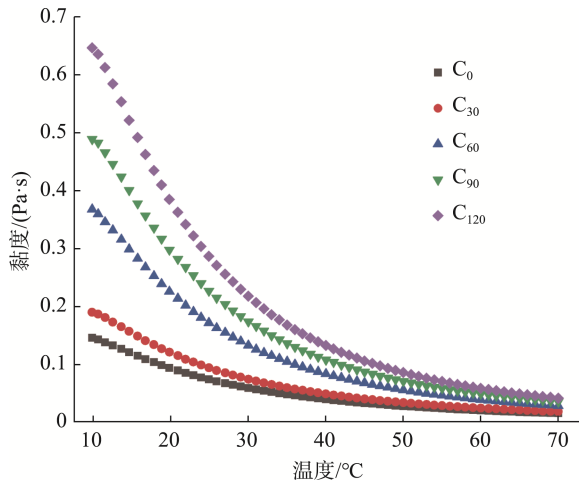


图4 同一剪切速率下山茶油黏度随温度变化曲线
Fig.4 Curves of viscosity of *Camellia* oil with temperature at the same shear rate

热运动加剧和分子间作用力减小, 而在液体中, 分子间作用力减小显著多于分子热运动加剧, 造成黏度随温度升高而降低^[28]。同时, 山茶油氧化程度越高, 山茶油黏度随温度变化速率(曲线斜率)也越快, 造成此现象的主要原因是由于山茶油氧化后所含极性组分尤其是聚合物含量的升高^[29]。

在 10~40 °C 内, 不同氧化程度(180 °C 加热 120 min 内)的山茶油黏度差异较大, 而当温度高于 40 °C 时黏度差异较小, 这为不同温度条件下山茶油精深加工的工艺选择及其产品的应用提供了理论指导^[30-31]。

3 结 论

山茶油在 180 °C 下加热 120 min, 加热时间内山茶油过氧化值逐渐升高, 但并未超过相关国标规定, 表明山茶油具有良好的抗氧化性能。山茶油 DSC 热力学氧化稳定性分析显示, 随着山茶油加热氧化时间延长, 其氧化稳定性受到破坏, DSC 氧化 T_{on} 逐渐降低, 加热 120 min 的山茶油较初始山茶油 T_{on} 降低了 8.3 °C。山茶油氧化后熔融结晶特性发生了变化, 熔融焓的绝对值及熔融温度降低, 且结晶峰由两个变为一个, 主要结晶峰消失。基于流变学的黏度随剪切速率变化曲线分析显示, 山茶油加热氧化后黏性增强, 加热 120 min 的山茶油较初始山茶油黏度提高了 2.8 倍; 黏度随温度变化曲线分析显示, 氧化程度越高, 山茶油黏度随温度变化的速率越快。总体而言, 山茶油加热氧化后, 其 DSC 热力学特征变弱, 熔融温度降低、结晶温度升高、结晶温度范围缩小, 且流动性变弱, 这说明对于加热氧化后的山茶油, 选择相对较高温度条件下进行加工及产品应用, 能有效避免山茶油因加热氧化而带来的性质变化^[32]。同时, 本研究结果为加热氧化对山茶油基产品的品质影响探究及抗氧化策略选择提供了一定的理论依据^[33]。

参考文献

- [1] SHI T, WU G, JIN Q, *et al.* Camellia oil authentication: A comparative analysis and recent analytical techniques developed for its assessment. A review [J]. Trends Food Sci Tech, 2020, 97: 88–99.
- [2] 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]. Food Res Int, 2022, 156: 111159.
- [3] 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]. Food Res Int, 2022, 156: 111159.
- [4] KHOA AN, MARIE H, JOHN P, *et al.* Mechanistic kinetic modelling of lipid oxidation in vegetable oils to estimate shelf-life [J]. Food Chem, 2024, 433: 137266.
- [5] MISRA MN, MARTYNENKO A, CHEMAT F, *et al.* Thermodynamics, transport phenomena, and electrochemistry of external field-assisted nonthermal food technologies [J]. Crit Rev Food Sci, 2018, 58(11): 1832–1863.
- [6] GONZALEZ-ORTEGA R, RAJAGUKGUK YV, FERRENTINO G, *et al.* Detection of butter adulteration with palm stearin and coconut oil by differential scanning calorimetry coupled with chemometric data analysis [J]. Food Control, 2024, 157: 110165.
- [7] ISLAM M, RAJAGUKGUK YV, SIGER A, *et al.* Assessment of hemp seed oil quality pressed from fresh and stored seeds of *Henola* cultivar using differential scanning calorimetry [J]. Foods, 2023, 12(1): 2010135.
- [8] YONG W, SELOMULYA C. Food rheology applications of large amplitude oscillation shear (LAOS) [J]. Trends Food Sci Technol, 2022, 127: 221–244.
- [9] 李月, 赵江丽, 张笑莹, 等. 梨膏的流变学特性及其影响因素[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 259–267.
LI Y, ZHAO JL, ZHANG XY, *et al.* Rheological properties of pear paste and its influencing factors [J]. J Food Saf Qual, 2023, 14(16): 259–267.
- [10] SONG F, LI Y, WANG B, *et al.* Effect of drying method and wall material composition on the characteristics of camellia seed oil microcapsule powder [J]. J Am Oil Chem Soc, 2022, 99(4): 353–364.
- [11] ZHANG Y, LIU C, WANG B. Effect of *Camellia* oil gel on rheology, water distribution and microstructure of flour dough for crispy biscuits [J]. J Cereal Sci, 2024. DOI: 10.1016/j.jcs.2024.103912
- [12] ZHANG N, LI Y, WEN S, *et al.* Analytical methods for determining the peroxide value of edible oils: A mini-review [J]. Food Chem, 2021, 358: 129834.
- [13] 姚世勇, 王斐, 史闯, 等. 花椒籽仁油在加热过程中反式脂肪酸组成、酸值及过氧化值的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 186–191.
YAO SY, WANG F, SHI C, *et al.* Changes in trans fatty acids composition, acid value and peroxide value in *zanthoxylum bungeanum* seed kerneoil during heating process [J]. Food Sci, 2015, 36(16): 186–191.
- [14] JIANG L, WU J, LIU S, *et al.* Effect of alkaline microcrystalline cellulose deacidification on chemical composition, antioxidant activity and volatile compounds of camellia oil [J]. LWT-Food Sci Technol, 2023, 186: 115214.
- [15] ISLAM M, KACZMAREK A, TOMASZEWSKA-GRAS J. Differential scanning calorimetry as a tool to assess the oxidation state of cold-pressed oils during shelf-life [J]. J Food Meas Charact, 2023, 17: 6639–6651.
- [16] 匡婷, 姬彦羽, 姚梦莹, 等. 棕榈油的热氧化稳定性[J]. 食品工业, 2019, 40(11): 186–191.
KUANG T, JI YY, YAO MY, *et al.* The thermal oxidation stability of palm oil [J]. Food Ind, 2019, 40(11): 186–191.
- [17] ISLAM M, KACZMAREK A, TOMASZEWSKA-GRAS J. Differential scanning calorimetry as a tool to assess the oxidation state of cold-pressed oils during shelf-life [J]. J Food Meas Charact, 2023, 17(6): 6639–6651.
- [18] 杨国燕. DSC 和 Rancimat 法测定亚麻籽油氧化稳定性研究[J]. 粮食与油脂, 2014, 27(8): 29–32.
YANG GY. Study on oxidation stability of flax seed oil by DSC and Rancimat method [J]. Cereals Oils, 2014, 27(8): 29–32.
- [19] SYMONIUK E, RATUSZ K, KRYGIER K. Evaluation of the oxidative stability of cold-pressed rapeseed oil by rancimat and pressure differential scanning calorimetry measurements [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2019, 121(2): 1800017.
- [20] CHEN Y, TAN H, YIN H, *et al.* Comparative investigation of low temperature oxidized and pyrolyzed cokes from the inferior heavy oil: Structural feather, thermo-oxidation behavior, and kinetics [J]. J Ind Eng Chem, 2024, 136: 368–377.
- [21] LI Y, WU M, ZHAI L, *et al.* Qualitative and quantitative analysis of β -sitosterol marker in virgin camellia oil and virgin olive oil [J]. Food Qual Saf-Oxford, 2023, 7: fyad034.
- [22] MINGYUE S, SHANSHAN Z, FAN Z, *et al.* Characterization and authentication of olive, camellia and other vegetable oils by combination of chromatographic and chemometric techniques: Role of fatty acids,

- tocopherols, sterols and squalene [J]. *Eur Food Res Technol*, 2021, 247(2): 411–426.
- [23] FAROOQ S, AHMAD MI, ALI U, *et al*. A review of advanced techniques for detecting the authenticity and adulteration of camellia oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2023, 21: 12796.
- [24] YOSHII H, ADACHI S, FURUTA T. Oxidative stability of physiologically functional oil microencapsulated by spray drying [J]. *Dry Technol*, 2023, 41(6): 859–867.
- [25] 贺殷媛, 陈凤莲, 李欣洋, 等. 稻米-高筋小麦混合粉面团的静态和动态流变学特性[J]. *食品科学*, 2022, 43(9): 30–38.
- HE YY, CHEN FL, LI XY, *et al*. Static and dynamic rheological properties of dough made from rice and high-gluten wheat flour blends [J]. *Food Sci*, 2022, 43(9): 30–38.
- [26] STANCIU I. Effect of temperature on rheology of corn (*Zea mays*) oil [J]. *Orient J Chem*, 2023, 39(4): 1068–1070.
- [27] CEDENO-SANCHEZ V, PEREZ-SANTANA M, MEHTA D, *et al*. Thermomechanical properties of high oleic palm oil assessed using differential scanning calorimetry, texture analysis, microscopy, and shear rheology [J]. *Gels*, 2023, 9(10): 9100798.
- [28] TAMBORRINO A, ROMANIELLO R, PERONE C, *et al*. Development of a pressure control system according to paste rheology for ultrasound processing in industrial olive oil extraction [J]. *Food Bioprocess Technol*, 2021, 14(10): 1897–1908.
- [29] KALOGIANNI EP, KARAPANTSIOS TD, MILLER R. Effect of repeated frying on the viscosity, density and dynamic interfacial tension of palm and olive oil [J]. *J Food Eng*, 2011, 105(1): 169–179.
- [30] 姬恒慧, 陈季旺, 翟嘉豪, 等. 深度油炸过程煎炸油的氧化及其对油炸外裹糊鱼块品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(4): 97–104.
- JI HH, CHEN JW, ZHAI JH, *et al*. Oxidation of frying oil during deep-fat frying and the effects of frying oil oxidation on the quality attributes of fried batter-breaded fish nuggets [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(4): 97–104.
- [31] 赵海军, 魏芳, 傅茂润, 等. 加工工艺对牡丹籽油脂肪酸成分、理化性质及抗氧化能力的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(24): 8377–8381.
- ZHAO HJ, WEI F, FU MR, *et al*. Effect of processing technology on fatty acid composition, quality index and antioxidant activity of peony seed oil [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(24): 8377–8381.
- [32] ABEYRATHNE EDNS, NAM K, AHN DU. Analytical methods for lipid oxidation and antioxidant capacity in food systems [J]. *Antioxidants*, 2021, 10(10): 1587.
- [33] 段泊安, 李倩文, 王晓楠, 等. 山茶花低糖酸奶工艺优化及其抗氧化活性分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2024, 15(9): 271–277.
- DUAN BAN, LI QW, WANG XN, *et al*. Process optimization and antioxidant activity analysis of camellia low-sugar yogurt [J]. *J Food Saf Qual*, 2024, 15(9): 271–277.

(责任编辑: 于梦娇 韩晓红)

作者简介



李 阳, 硕士, 实验师, 主要研究方向为功能脂质开发及检测分析。
E-mail: Ly3143@zju.edu.cn



张 辉, 博士, 教授, 主要研究方向为脂质化学与功能健康。
E-mail: hubert0531@zju.edu.cn