油脂化学

DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003－7969.240562

煎炸与加热过程中大豆油品质及组成变化规律的对比研究

丁宇飞[1],徐梦琪[1],刘书成[1],张　珂[1],张鑫宇[1],毕艳兰[1,2]

(1.河南工业大学 粮油食品学院,郑州 450001;2.中原食品实验室,河南 漯河 462300)

摘要:为探究煎炸与加热处理下油脂品质变化之间的关联性,采用大豆油分别进行煎炸与加热实验,分析煎炸和加热过程中大豆油的基本理化指标、脂肪酸组成、甘油酯组成、挥发性物质等的变化,结合正交偏最小二乘判别分析(OPLS－DA)比较不同处理方式下烟气和大豆油中挥发性成分的差异,根据变量投影重要性(VIP)值筛选出差异性特征挥发性成分,采用皮尔逊相关性分析探究两种处理方式下大豆油的基本理化指标、脂肪酸组成、甘油酯组成等之间的相关性。结果表明:两种处理方式下大豆油的极性组分含量、黏度、*p*－茴香胺值和维生素 E 损耗率随处理时间的变化速率一致,煎炸油酸值、色泽和全氧化值的变化速率高于加热油,但两种处理方式下大豆油的过氧化值变化无规律;煎炸油和加热油中的脂肪酸含量和甘油酯含量变化趋势一致,但煎炸油的氧化程度大于加热油;两种处理方式下烟气和油脂中挥发性物质种类一致,含量存在差异;经 OPLS－DA 建立的模型能够有效地区分不同处理方式的大豆油,在烟气和油脂中均筛选出了 9 种差异性特征挥发性成分,加热无法代替煎炸评估油脂中的挥发性物质;皮尔逊相关性分析表明,加热大豆油和煎炸大豆油的极性组分含量、黏度、酸值、色泽、维生素 E 损耗率、油酸含量、亚油酸含量、亚麻酸含量、游离脂肪酸含量、甘油二酯含量与甘油三酯含量均存在显著正相关。综上,通过加热评估煎炸油的品质变化具有一定可行性,但加热无法完全代替煎炸评价大豆油的煎炸性能。

关键词:大豆油;加热;煎炸;品质;挥发性物质

中图分类号: TS225.1;TS227　　**文献标识码:**A　　**文章编号:**1003－7969(2025)12－0049－10

Comparative study on quality and composition changes of soybean oil during frying and heating

DING Yufei[1], XU Mengqi[1], LIU Shucheng[1], ZHANG Ke[1], ZHANG Xinyu[1], BI Yanlan[1,2]

(1. College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Food Laboratory of Zhongyuan, Luohe 462300, Henan, China)

Abstract: In order to explore the correlation between the changes of oil quality under frying and heating treatment, soybean oil was used for frying and heating experiments respectively. The changes of basic physicochemical indexes, fatty acid composition, glyceride composition and volatile substances of soybean oil during frying and heating processes were analyzed. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS－DA) was used to compare the differences of volatile components in flue gas and soybean oil under different treatment methods, and differential characteristic volatile components were screened by variable importance in projection (VIP). Pearson correlation analysis was used to explore the correlation between basic physicochemical indexes, fatty acid composition and glyceride composition of soybean oil under two treatment methods. The results showed that the change rates of polar components content, viscosity, *p*－anisidine value and vitamin E loss rate of soybean oil with treatment time under the two treatment methods were consistent. The change rates of acid value,

收稿日期:2024－09－20;**修回日期:**2025－07－25

基金项目:国家自然科学基金项目(31671818)

作者简介:丁宇飞(2000),男,硕士研究生,研究方向为脂质化学与品质(E-mail)3062195026@qq.com。

通信作者:毕艳兰,教授(E-mail)bylzry@126.com。

color and total oxidation value of frying oil were higher than those of heating oil, but the peroxide value change of soybean oil under the two treatment methods had little regularity. The change trend of fatty acid content and glyceride content in frying oil and heating oil was consistent, but the oxidation degree of frying oil was greater than that of heating oil. The types of volatile substances in flue gas and oil under the two treatment methods were the same, but their contents were different. The model established by OPLS – DA could effectively distinguish different treatment methods of soybean oil. Nine characteristic volatile components were screened in the flue gas and oil. It was impossible to evaluate the volatile substances in the oil by heating instead of frying. Pearson correlation analysis showed that there was a significant positive correlation between polar components content, viscosity, acid value, color, vitamin E loss rate, oleic acid content, linoleic acid content, linolenic acid content, free fatty acid content, diglyceride content and triglyceride content of heating oil and frying oil. In summary, it is feasible to evaluate the quality change of frying oil by heating, but heating cannot completely replace frying to evaluate the frying performance of soybean oil.

Key words: soybean oil; heating; frying; quality; volatile substances

大豆油是我国消费量最大的食用油,被广泛应用于饭店、食堂、早餐店等餐饮行业中[1]。餐饮行业涉及煎炸操作较多,且存在煎炸频率高、煎炸时间长等特点,对大豆油的煎炸性能要求较高。然而,受到原料产地、加工工艺、生产批次、运输方式等因素影响,不同品牌或厂家所生产的大豆油煎炸性能存在显著差异[2-3]。煎炸性能差的大豆油在煎炸过程中更容易出现起泡、发黑、冒烟、呛眼、刺鼻等不良现象;煎炸性能优异的大豆油则使用寿命长、损耗少、更受消费者青睐[4]。因此,对于餐饮业经营者而言,大豆油的煎炸性能是其选购产品时的重要考量因素,同时消费者的倾向代表市场需求,这就使得对大豆油煎炸性能的品控成为油脂生产企业提高产品优势的关键步骤。

目前,评价油脂煎炸性能的传统方法是对食物进行煎炸操作,通过油脂的极性组分(TPC)含量、酸值、羰基值等理化指标以及感官指标来进行评价[5-8]。但由于煎炸操作耗时耗力、对食材和油脂的消耗量大、经济成本较高,该评价方法不适用于工厂大规模推广应用。

加热是一种代替煎炸评估油脂品质及其煎炸性能的理想方法,具有无需耗费食材、用油量可调控等优点。但煎炸涉及氧化、水解、聚合等多种化学反应,且受食材中促氧化剂或抗氧化剂、食材种类等的影响,而加热主要是热氧化反应,使得采用加热评估油脂煎炸性能是否可靠值得研究。因此,本文以鸡米花(高蛋白淀粉食品)作为煎炸食材,对加热和煎炸过程中大豆油理化指标及组成变化进行分析,通过对比加热与煎炸食材过程中大豆油基本理化指标、维生素 E 含量、脂肪酸组成、甘油酯组成和烟气及油脂中挥发性物质的差异,探究加热和煎炸油脂品质之间的相关性,以期评估加热用于替代煎炸评价油脂煎炸性能的可行性。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 原料与试剂

一级大豆油,购于超市;黄金鸡米花,新和盛飨食(山东)集团有限公司。

正己烷、二氯甲烷均为色谱级;甲醇、异丙醇、乙醚、三氯甲烷、冰乙酸、淀粉、碘化钾、硫代硫酸钠、氢氧化钾、无水硫酸钠均为分析纯;邻二氯苯(纯度 > 99%),上海阿拉丁生化科技股份有限公司;三甲基氯硅烷(TMCS)、N,O – 双(三甲基硅)三氟乙酰胺(BSTFA,纯度 > 99%),上海麦克林生化科技股份有限公司。

1.1.2 仪器与设备

XJ – 09125 商用电炸锅,中山斯乐得电器有限公司;GR3030 空气采样器,青岛国瑞力恒环保有限公司;Agilent 8860 气相色谱仪、7890A – 5975C 气相色谱 – 质谱联用(GC – MS)仪,美国安捷伦科技公司;GC – 2010 Pro 气相色谱仪,日本岛津公司;2695 高效液相色谱仪,美国 Waters 公司;TU – 1810 紫外可见分光光度仪,北京普析通用仪器有限公司;Testo270 食用油品质检测仪,德图仪器国际贸易(上海)有限公司;哈克 MARS60 流变仪,梅特勒 – 托利多集团。

1.2 实验方法

1.2.1 大豆油的煎炸与加热实验

煎炸实验:取(2.2 ± 0.1)kg 大豆油于 2.5 L

的电炸锅中，当油温达到（180 ± 5）℃时加入鸡米花进行煎炸，每次煎炸 100 g 鸡米花，煎炸 7 min，煎炸结束后加热 13 min 后进行下一次煎炸，如此循环，每煎炸 4 h，取 30 g 油样于 0 ℃密封保存，待测。以 TPC 含量超过 27% 时停止煎炸，煎炸过程中不补充新油。

加热实验：除不添加食材外，其余条件同煎炸实验。

1.2.2　基本理化指标的测定

TPC 含量采用 Testo270 食用油品质检测仪进行测定，具体参照文献[9]；酸值参考 GB 5009.229—2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》中第一法冷溶剂指示剂滴定法测定；黏度参考杨春英等[10]的方法测定并稍作修改，温度恒定 25 ℃；过氧化值（PV）参考 GB 5009.227—2023《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》中第一法指示剂滴定法测定；p - 茴香胺值（p - AV）参考 GB/T 24304—2009《动植物油脂 茴香胺值的测定》测定；全氧化值（TV）参考 GB/T 24304—2024 中全氧化值计算公式（TV = 4PV + p - AV）进行计算；色泽采用分光光度法测定，具体参照文献[11]。

1.2.3　维生素 E 含量测定

参考 AOCS Official Method Ce 8 - 89 测定维生素 E 含量。

1.2.4　脂肪酸组成测定

参考 GB 5009.168—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪酸的测定》对油样进行甲酯化，使用气相色谱仪分析脂肪酸组成。

气相色谱条件：SGE HP - 88 色谱柱（100 m × 250 μm × 0.20 μm）；进样口温度 260 ℃；分流比 50∶1；氢火焰离子化检测器（FID）温度 260 ℃；氢气流量 32 mL/min；升温程序为初始温度 140 ℃，保持 5 min，以 4 ℃/min 升温至 240 ℃，保持 25 min；载气为氮气，流量 24 mL/min；空气流量 200 mL/min；进样量 1 μL。

1.2.5　甘油酯组成测定

参考 BS EN 14105:2020 并稍作改进对油脂进行衍生化。取约 0.02 g 待测样于气相小瓶中，然后加 100 μL 衍生化试剂（99% BSTFA + 1% TMCS），密封后置于 70 ℃烘箱中反应 20 min，反应结束并冷却后加 1.5 ~2.0 mL 正己烷溶解，摇匀后过滤膜注射入气相小瓶中，待气相色谱检测。

气相色谱条件：DB - 1ht 色谱柱（30.0 m × 0.25 mm × 0.10 μm）；进样口温度 350 ℃；分流比 20∶1；氢火焰离子化检测器（FID）温度 360 ℃；氢气流量 60 mL/min；空气流量 400 mL/min；升温程序为初始温度 100 ℃，以 50 ℃/min 升温至 220 ℃，以 15 ℃/min 升温至 290 ℃，以 40 ℃/min 升温至 320 ℃，保持 8 min，以 20 ℃/min 升温至 360 ℃，保持 10 min；载气为氮气，流量 4 mL/min；进样量 1 μL。

1.2.6　挥发性物质测定

1.2.6.1　煎炸与加热过程中烟气的收集与组分分析

烟气中挥发性物质的收集参考 Lu[12]、Peng[13]等的方法并稍作修改。当煎炸/加热开始时，将自制锅盖盖于电炸锅上方，并将空气采样器的采样管置于锅盖出气口处，随后启动仪器，先排气 3 min 以排除仪器内的空气及煎炸前期高含水分的烟气，之后使用活性炭吸附管吸附 8 min。完成后使用二氯甲烷超声萃取前 2/3 段吸附管活性炭（称质量，精确至 0.000 1 g）中挥发性物质，萃取前添加质量浓度为 1 115 μg/mL 的邻二氯苯内标溶液，萃取时间 35 min，萃取完成后离心并取上层清液，待 GC - MS 测定。

GC 条件：HP - 5MS 色谱柱（30 m × 250 μm × 0.25 μm）；不分流进样；载气（He）流量 1.8 mL/min；进样口温度 250 ℃；升温程序为 40 ℃保持 3.5 min，以 4 ℃/min 升至 230 ℃并保持 8 min，然后以 10 ℃/min 升至 280 ℃并保持 5 min。

MS 条件：EI 离子源；离子源温度 230 ℃；传输线温度 240 ℃；电离能量 70 eV；质量扫描范围（m/z）30 ~ 500 。

1.2.6.2　油脂中挥发性物质的测定与分析

参考 Xu 等[14]的方法，采用顶空固相微萃取法提取油脂中挥发性物质。内标溶液为邻二氯苯（质量浓度 1 115 μg/mL），溶剂为二氯甲烷[15]，每次加 30 μL 内标，65 ℃加热萃取 50 min 后解吸 5 min，待 GC - MS 分析。

GC 条件：HP - 5MS 色谱柱（30 m × 250 μm × 0.25 μm）；载气（He）流量 1 mL/min；进样口温度 250 ℃；升温程序为 50 ℃保持 2 min，以 3 ℃/min 升至 58 ℃并保持 1 min，再以 0.5 ℃/min 升至 60 ℃，再以 2 ℃/min 升至 90 ℃，最后以 4 ℃/min 升至 200 ℃；不分流进样。

MS 条件：EI 离子源；电离能量 70 eV；离子源温度 260 ℃；四极杆温度 150 ℃；传输线温度 280 ℃；质量扫描范围（m/z）33 ~ 500。

采用 NIST 库进行检索，按照匹配度大于 80% 对化合物进行定性。各化合物含量计算公式见式（1）。

$$X=\frac{C_{内}\times V_{内}}{m}\times\frac{A_1}{A_{内}} \quad (1)$$

式中:X 为挥发物含量,μg/kg;$C_{内}$为内标物质量浓度,μg/mL;$V_{内}$为内标物体积,μL;m 为样品质量(活性炭质量或油样质量),g;A_1为目标物峰面积;$A_{内}$为内标物峰面积。

1.2.7 数据处理

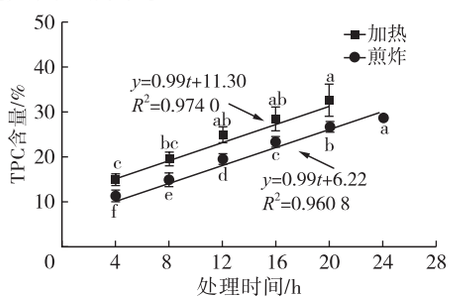
所有实验至少重复 2 次,采用 SPSS 26.0 软件中 Duncan 分析比较平均值之间的差异,$p<0.05$ 表示差异显著;采用 Origin 2024 软件进行绘图;采用 SIMCA14.1 进行正交偏最小二乘判别分析(OPLS-DA),提取变量投影重要性(VIP)值。

2 结果与讨论

2.1 油脂基本理化指标分析

2.1.1 煎炸与加热过程中油脂 TPC 的变化

GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》中规定,煎炸过程中食用植物油需满足 TPC 含量不大于27%,因此以 TPC 含量大于27%为实验终点。加热与煎炸过程中油脂 TPC 含量(y)随处理时间(t)的变化如图 1 所示。



注:不同字母表示同种处理方式下具有显著差异($p<0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences in the same treatment method ($p<0.05$). The same below

图 1 煎炸与加热过程中油脂 TPC 含量随处理时间变化趋势

Fig. 1 Change trend of TPC content of oil with treatment time during frying and heating

由图 1 可知,在 4~20 h 处理时间内,随着处理时间的延长,两种处理方式下油脂的 TPC 含量均显著增加($p<0.05$),相同处理时间下加热油的 TPC 含量比煎炸油更高。这可能是因为相同处理时间下,煎炸油中极性大的次级氧化产物(醛类、酮类、酯类等)随煎炸食材中的水分挥发而被大量排出,使得煎炸油中积累的极性物质的含量低于加热油的,导致相同处理时间下加热油的 TPC 含量高于煎炸油的。两种处理方式下油脂中 TPC 含量的增长速率相同,且 TPC 含量与处理时间均呈现良好的线性关系($R^2>0.96$)。由此可见,在 TPC 含量不大于27%时,加热处理与煎炸处理的 TPC 含量变化趋势高度一致,且在相同处理时间下两种处理方式油脂的 TPC 含量差值是相同的。为确保两者在相同时间下的可比性,后续两种方式的处理时间均选择 20 h。

2.1.2 煎炸与加热过程中油脂黏度的变化

煎炸与加热过程中油脂均发生聚合反应,主要产生氧化甘油三酯多聚物(oxTGO)、氧化甘油三酯二聚物(oxTGD)等聚合物,这些聚合物含量的增加导致油脂黏度(y)随处理时间(t)的增大。加热与煎炸过程中油脂黏度(y)随处理时间(t)的变化如图 2 所示。

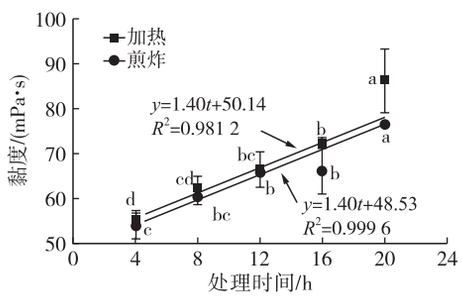


图 2 煎炸与加热过程中油脂黏度随处理时间变化趋势

Fig. 2 Change trend of viscosity of oil with treatment time during frying and heating

由图 2 可知,在 4~20 h 处理时间内,随着处理时间的延长,两种处理方式下油脂的黏度均显著增大($p<0.05$),且两种处理方式下油脂黏度与处理时间均存在良好的线性关系($R^2>0.98$)。相同处理时间下加热体系中大豆油的黏度高于煎炸体系,这可能是因为食材的添加使煎炸体系油脂的温度短暂下降,而加热体系油脂温度恒定,导致加热油的聚合程度大于煎炸油。此外,两种处理方式下油脂黏度增加速率高度一致。

2.1.3 煎炸与加热过程中油脂酸值的变化

煎炸与加热过程中油脂酸值(y)随处理时间(t)的变化如图 3 所示。

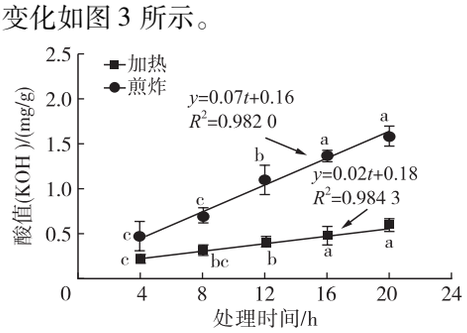


图 3 煎炸与加热过程中油脂酸值随处理时间变化趋势

Fig. 3 Change trend of acid value of oil with treatment time during frying and heating

由图 3 可知,在 4~20 h 处理时间内,随着处理

时间的延长，两种处理方式下油脂的酸值均显著增大（$p<0.05$），且油脂的酸值均与处理时间存在良好的线性关系（$R^2>0.98$），但煎炸油酸值的增长速率高于加热油。同一处理时间下，煎炸油的酸值高于加热油，这是由于煎炸过程中鸡米花引入的水分促进油脂的水解反应，导致煎炸大豆油水解程度高于加热油。在整个实验处理过程中，煎炸油及加热油的酸值（KOH）均未超出 GB 2716—2018 限定标准（≤5 mg/g），因此在评价油脂煎炸性能中酸值可被认为是非主要考察指标。

2.1.4　煎炸与加热过程中油脂色泽的变化

以吸光度积分面积表征油脂色泽。煎炸与加热过程中油脂吸光度积分面积（y）随处理时间（t）的变化如图 4 所示。

由图 4 可看出，两种处理方式下油脂吸光度积分面积与处理时间均存在良好的线性关系（$R^2>0.96$），且加热油与煎炸油吸光度积分面积均随处理时间延长而增大（$p<0.05$）。煎炸油吸光度积分面积增加速率高于加热油，这是因为煎炸食材的添加使煎炸油体系额外发生美拉德反应，从而使煎炸油色泽更深，导致煎炸油与加热油色泽变化存在较大差别，这说明食材的添加对煎炸油色泽影响较大。

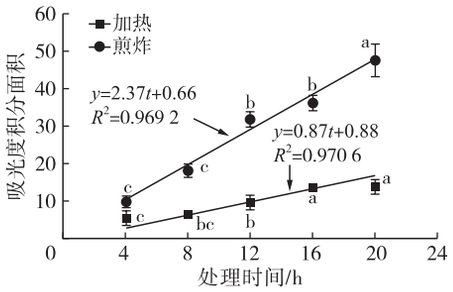


图 4　煎炸与加热过程中油脂吸光度积分面积随处理时间的变化趋势

Fig. 4　Change trend of oil absorbance integral area with treatment time during frying and heating

2.1.5　煎炸与加热过程中油脂的过氧化值、p－茴香胺值、全氧化值的变化

过氧化值是评价油脂氧化变质的重要指标之一。煎炸与加热过程中油脂的过氧化值、p－茴香胺值（y_1）、全氧化值（y_2）随处理时间（t）的变化如图 5 所示。

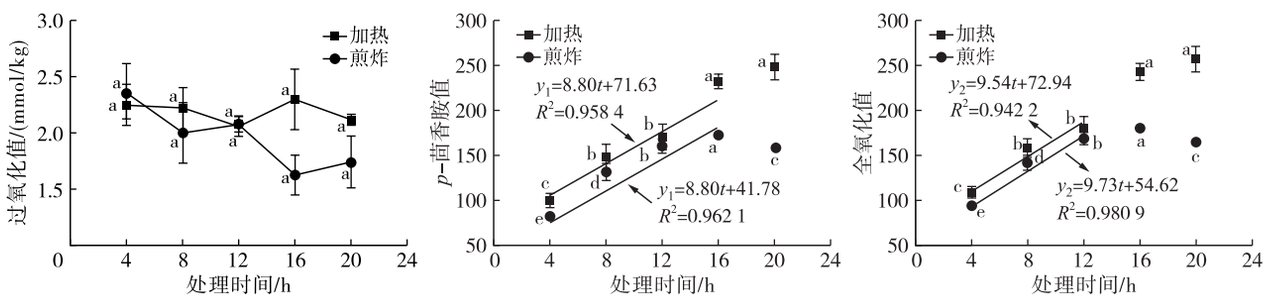


图 5　煎炸与加热过程中油脂过氧化值、p－茴香胺值、全氧化值随处理时间的变化趋势

Fig. 5　Change trends of peroxide value, p－anisidine value and total oxidation value of oil with treatment time during frying and heating

由图 5 可知，在 4～20 h 处理时间内，加热油和煎炸油的过氧化值随处理时间的延长均呈现上下波动趋势，且无显著差异（$p>0.05$），这与过氧化物容易分解有关，且相关文献研究表明单一的过氧化值不适合作为评价煎炸油品质的指标[16]。在 4～16 h 处理时间内，加热油和煎炸油的 p－茴香胺值和全氧化值均随处理时间的延长显著增大（$p<0.05$），且两种方式下油脂的 p－茴香胺值、全氧化值分别在 4～16 h 和 4～12 h 内与处理时间存在良好的线性关系（$R^2>0.94$）；且二者 p－茴香胺值的增加速率相同，这说明在加热和煎炸处理前中期（4～16 h），加热油和煎炸油 p－茴香胺值变化一致。此外，加热油的 p－茴香胺值和全氧化值高于煎炸油，这可能是由于煎炸过程中食材中的水分在高温状态下汽化，煎炸油中醛类、酮类等挥发性物质随水蒸气被大量排出，导致煎炸油中次级氧化产物含量低于加热油，而两种处理方式下，油脂的过氧化值无显著差异，使得加热油的 p－茴香胺值和全氧化值均高于煎炸油。处理后期（16～20 h），煎炸油的 p－茴香胺值和全氧化值下降，而加热油的 p－茴香胺值和全氧化值继续升高，这可能是由于煎炸后期油脂中参与反应的不饱和脂肪酸含量下降，挥发性物质生成量减少，而水蒸气排出速率不变，导致残留在油中的次级氧化产物含量下降，使得油脂 p－茴香胺值下降；而加热油中次级氧化产物较少排出，在加热过程中不断积累，使得其 p－茴香胺值和全氧化值持续升高。

2.2　煎炸与加热过程中油脂维生素 E 含量的变化

大豆油中的维生素 E 主要由生育酚组成，生育三烯酚则几乎没有[17]。根据抗氧化机制可知，可以通过油脂中维生素 E 的含量和损耗率变化来反映氧化

程度。煎炸与加热过程中油脂维生素 E 含量和损耗率(y)随处理时间(t)的变化趋势如图 6 所示。

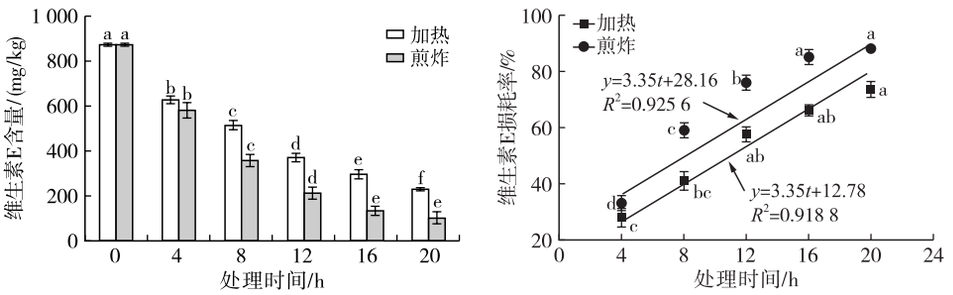


图 6 煎炸与加热过程中油脂维生素 E 含量和损耗率随处理时间的变化趋势

Fig. 6 Change trends of vitamin E content and loss rate with treatment time during frying and heating

由图 6 可知,两种处理方式下油脂中维生素 E 含量均随处理时间的延长而显著减少($p<0.05$),相同处理时间下,加热油中维生素 E 的含量明显高于煎炸油,这说明煎炸油中维生素 E 的损耗量高于加热油,由此可知煎炸油的氧化程度高于加热油。随着处理时间的延长,加热油和煎炸油中维生素 E 的损耗率增大,且相同处理时间下煎炸油中维生素 E 损耗率高于加热油,这是因为煎炸过程中食材中的脂肪、水、糖和盐等进入煎炸油中,改变了煎炸油中的反应类型和速率,促进了油脂的氧化[18],使得煎炸油中维生素 E 损耗率高于加热油。两种处理方式下油脂中维生素 E 耗损率与处理时间均存在较为良好的线性关系($R^2>0.91$),损耗率变化速率高度一致,并且在 4 ~ 20 h 处理时间内,不同处理时间间加热油和煎炸油的维生素 E 耗损率差值相同。

2.3 煎炸与加热过程中油脂的脂肪酸组成分析

不同处理时间下加热与煎炸大豆油的主要脂肪酸组成及相对含量如表 1 所示。

表 1 不同处理时间下加热与煎炸大豆油的主要脂肪酸组成及相对含量

Table 1 Main fatty acid composition and relative content of heating and frying soybean oil under different treatment time %

脂肪酸	加热						煎炸					
	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h
棕榈酸	10.57^{e}	10.89^{de}	11.15^{cd}	11.39^{c}	13.40^{a}	11.88^{b}	10.57^{f}	12.01^{e}	13.34^{d}	14.66^{c}	15.69^{b}	16.97^{a}
硬脂酸	3.91^{c}	4.01^{bc}	4.12^{bc}	4.16^{b}	4.08^{b}	4.36^{a}	3.91^{c}	4.06^{b}	4.11^{b}	4.34^{a}	4.38^{a}	4.38^{a}
油酸	26.90^{c}	27.29^{bc}	27.88^{b}	28.15^{ab}	28.95^{a}	28.97^{a}	26.90^{f}	27.98^{e}	28.94^{d}	30.02^{c}	30.73^{b}	31.61^{a}
亚油酸	50.95^{a}	50.31^{ab}	49.60^{bc}	48.94^{c}	46.70^{d}	47.66^{d}	50.95^{a}	48.68^{b}	46.78^{c}	44.51^{d}	42.91^{e}	41.09^{f}
亚麻酸	5.02^{a}	4.65^{ab}	4.56^{abc}	4.41^{bc}	4.14^{bc}	3.94^{c}	5.02^{a}	4.61^{b}	4.21^{c}	3.78^{d}	3.53^{de}	3.32^{e}
反油酸	0.02^{c}	0.03^{c}	0.05^{b}	0.07^{ab}	0.04^{b}	0.09^{a}	0.02^{f}	0.03^{e}	0.05^{d}	0.06^{bc}	0.07^{ab}	0.08^{a}
反亚油酸	0.61^{b}	0.63^{ab}	0.61^{b}	0.69^{ab}	0.64^{ab}	0.81^{a}	0.61^{a}	0.60^{a}	0.70^{a}	0.66^{a}	0.60^{a}	0.55^{a}
反亚麻酸	0.88^{a}	0.86^{a}	0.81^{a}	0.80^{a}	0.76^{a}	0.87^{a}	0.88^{a}	0.80^{a}	0.77^{a}	0.79^{a}	0.78^{a}	0.76^{a}

注:不同字母表示同一处理方式下不同处理时间间具有显著差异($p<0.05$)。下同

Note: Different letters indicate significant differences among different treatment time under same treatment method ($p<0.05$). The same below

由表 1 可知,在 4 ~ 20 h 处理时间内,随着处理时间的延长,大豆油中的棕榈酸、硬脂酸和油酸的相对含量总体显著增大($p<0.05$),亚油酸和亚麻酸相对含量显著减少($p<0.05$),由此可知,参与氧化反应的脂肪酸主要是亚油酸和亚麻酸。反亚麻酸、反亚油酸和反油酸含量变化较小,说明在该加热和煎炸温度下,脂肪酸异构化程度较小。相同处理时间下,煎炸油亚油酸和亚麻酸减少量大于加热油,这与 2.2 中“煎炸油氧化程度高于加热油”这一结论相符合。

2.4 煎炸与加热过程中油脂的游离脂肪酸及甘油酯组成变化

不同处理时间下加热油与煎炸油中游离脂肪酸(FFA)及甘油酯相对含量变化如表 2 所示。

由表 2 可知,在 4 ~ 20 h 处理时间内,随着处理时间的延长,大豆油中甘油三酯(TG)的相对含量降低,甘油一酯(MG)的相对含量几乎不变,甘油二酯(DG)和游离脂肪酸(FFA)的相对含量升高,这是由于大豆油在加热和煎炸过程中主要水解为甘油二酯,而甘油二酯极少参与下一步水解。另外,相同处理时间下,加热油中甘油二酯、游离脂肪酸的相对含量低于煎炸油,原因是食材的添加使煎炸油中水分含量高于加热油,煎炸油中甘油三酯的水解程度大于加热油,这解释了 2.1.3 煎炸油酸值增长速率高于加热油的原因。

表 2　不同处理时间下煎炸油与加热油中游离脂肪酸及甘油酯相对含量变化

Table 2　Changes of relative content of free fatty acids and glycerides in frying and heating oil under different treatment time　%

项目	加热						煎炸					
	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h	0 h	4 h	8 h	12 h	16 h	20 h
FFA	0.24^{c}	0.33^{bc}	0.44^{bc}	0.53^{ab}	0.74^{a}	0.69^{a}	0.24^{c}	0.68^{ab}	0.75^{ab}	0.86^{ab}	1.01^{a}	1.19^{a}
MG	0.35^{a}	0.39^{a}	0.38^{a}	0.38^{a}	0.42^{a}	0.38^{a}	0.35^{a}	0.41^{a}	0.39^{a}	0.36^{a}	0.31^{a}	0.45^{a}
DG	1.56^{d}	1.87^{cd}	2.30^{bc}	2.72^{ab}	2.86^{ab}	3.21^{a}	1.56^{e}	2.59^{d}	2.83^{d}	3.27^{c}	4.23^{b}	4.97^{a}
TG	97.80^{a}	97.38^{ab}	96.86^{bc}	96.36^{cd}	95.97^{d}	95.70^{d}	97.80^{a}	96.30^{a}	96.00^{a}	95.68^{b}	93.86^{c}	93.25^{c}

2.5　煎炸与加热过程中烟气和油脂中挥发性物质分析

煎炸与加热过程中烟气和油脂中挥发性物质含量如图 7 所示。

由图 7a 可知，在 4 ~ 20 h 处理时间内，加热油和煎炸油烟气中总挥发性物质含量在较小范围内呈现上下波动的趋势。两种处理方式下，烟气中挥发性物质均由 14 种醛类、2 种呋喃类、4 种酚醇类、4 种酮类、2 种烯类、2 种酸类和 1 种唑类组成，共计 29 种挥发性物质，其中醛类和呋喃类含量占比较高。加热和煎炸过程中烟气的挥发性物质种类一致，但含量存在一定差异。由图 7b 可知，两种处理方式下油脂中总挥发性物质含量在一定范围内呈现下降趋势。两种处理方式下，油脂中挥发性物质由 22 种醛类、3 种呋喃类、8 种酚醇类、5 种酮类、3 种烯类、2 种酯类、4 种烷烃类和 3 种酸类组成，共计 50 种挥发性物质，其中醛类、呋喃类和烯类含量占比较高。在相同处理时间下，加热油中挥发性物质含量高于煎炸油，这可能是由于煎炸过程中食材中水分的蒸发带走大量挥发性物质，使残留在油中的挥发性物质含量低于加热油。

综上，加热与煎炸两种处理方式下，烟气和油脂中的挥发性物质种类一致，但含量存在差异。

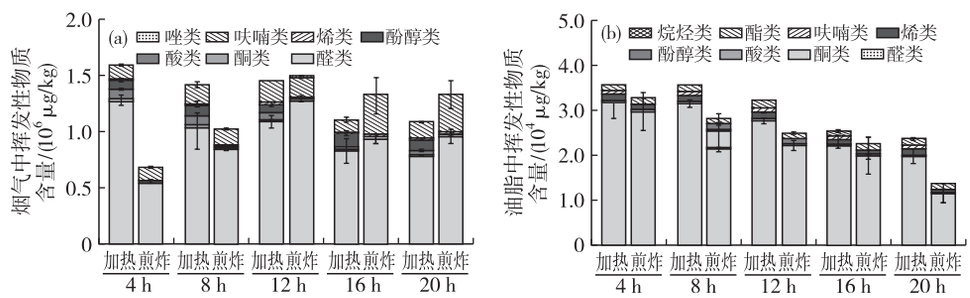


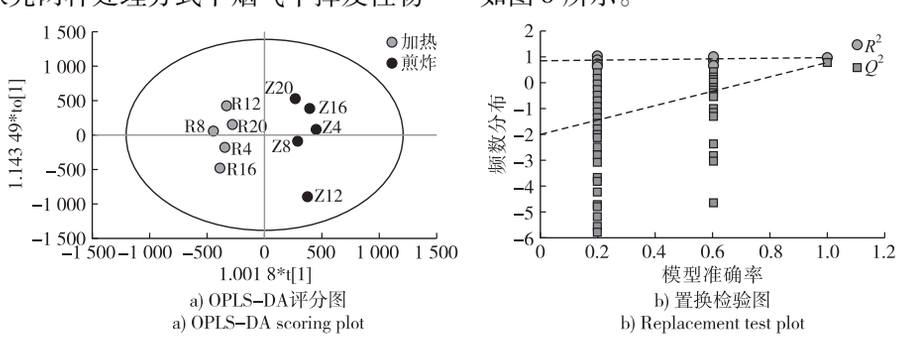
图 7　煎炸与加热过程中烟气和油脂中挥发性物质含量

Fig. 7　Volatile substance content in flue gas and oil during frying and heating

2.6　煎炸与加热过程中烟气和油脂中挥发性成分的 OPLS – DA

2.6.1　烟气中挥发性成分的 OPLS – DA

为进一步探究两种处理方式下烟气中挥发性物质差异，基于 OPLS – DA 的化学计量学方法对挥发性风味物质含量进行了分析。不同处理方式下烟气中挥发性成分的 OPLS – DA 评分图和置换检验图如图 8 所示。



注：R 表示加热处理，Z 表示煎炸处理。下同

Note：R denotes heating and Z denotes frying. The same below

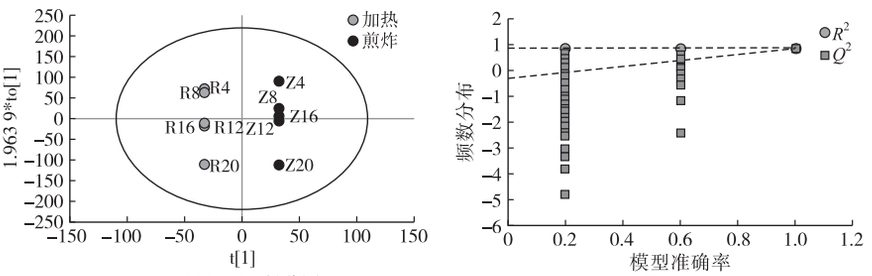
图 8　不同处理方式下烟气中挥发性成分的 OPLS – DA 评分图和置换检验图

Fig. 8　OPLS – DA scoring plot and replacement test plot of volatile components in flue gas under different treatment methods

由图8a可知,两种处理方式下烟气中的挥发性物质能够被明显区分,这说明加热与煎炸大豆油烟气中挥发性物质存在显著差异,其中 $R_X^2=0.937$,$R_Y^2=0.972$,$Q^2=0.822$,表明模型对烟气中挥发性物质分析具有很好的解释度和预测能力。为防止模型过度拟合,对模型进行置换检验,检验次数200次。由图8b可知,Q^2的回归线与垂直轴(左侧)截距为负数,OPLS-DA置换检验 p 值为0.012,小于0.05,表明模型稳定可靠,未出现过拟合。综上,两种处理方式下烟气中差异性挥发性物质被明显区分,模型能够较好地判别和区分不同处理的大豆油。

2.6.2 油脂中挥发性成分的OPLS-DA

不同处理方式下油脂中挥发性成分的OPLS-DA评分图和置换检验图如图9所示。



a) OPLS-DA得分图
a) OPLS-DA scoring plot

b) 置换检验图
b) Replacement test plot

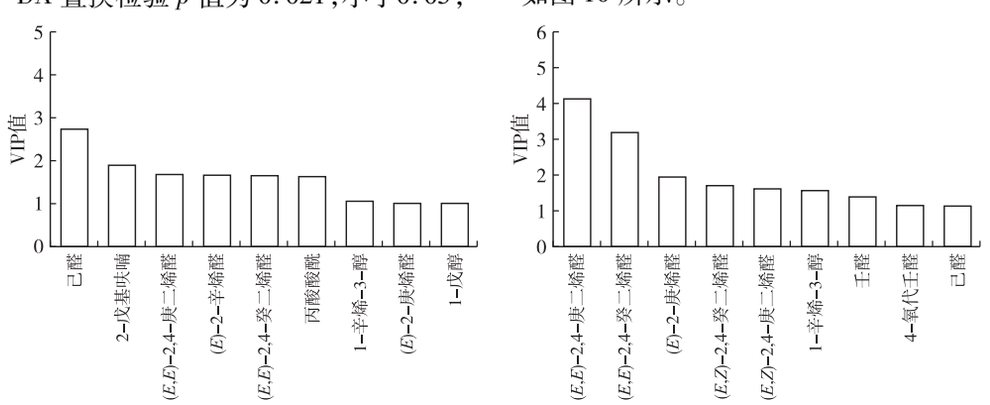
图9 不同处理方式下油脂中挥发性成分的OPLS-DA评分图和置换检验图

Fig. 9 OPLS-DA scoring plot and replacement test plot of volatile components in oil under different treatment methods

由图9a可知,两种处理方式下油脂中的挥发性物质能够被明显区分,这说明加热与煎炸大豆油中挥发性物质存在显著差异,其中 $R_X^2=0.998$,$R_Y^2=0.999$,$Q^2=0.99$,表明模型对油脂中挥发性物质分析具有很好的解释度和预测能力。为防止模型过度拟合,对模型进行置换检验,检验次数200次。由图9b可知,Q^2的回归线与垂直轴(左侧)截距为负数,OPLS-DA置换检验 p 值为0.021,小于0.05,表明模型稳定可靠,未出现过拟合。综上,模型能够较好地判别和区分不同处理方式的大豆油。

2.7 煎炸与加热过程中烟气和油脂中差异性挥发性成分

VIP值可以反映风味物质对模型分类的贡献程度。以VIP值大于1为指标筛选特征挥发性成分,煎炸与加热过程中烟气和油脂中差异性挥发性成分如图10所示。



a) 烟气中挥发性物质VIP分析图
a) VIP analysis of volatile components in flue gas

b) 油脂中挥发性物质VIP分析图
b) VIP analysis of volatile components in oil

图10 不同处理方式下烟气及油脂中差异性特征挥发性成分

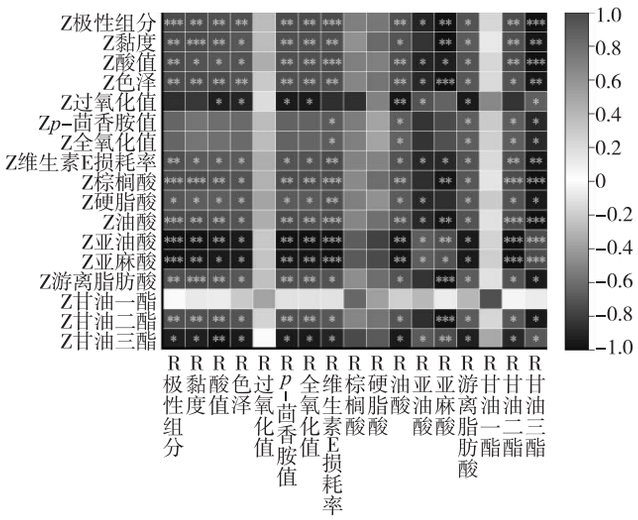
Fig. 10 Differential characteristic volatile components in flue gas and oil under different treatment methods

由图10a可知,两种处理方式下,烟气中VIP值大于1的差异性挥发物质共有9种,分别为己醛、2-戊基呋喃、(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛、(*E*)-2-辛烯醛、(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛、丙酸酸酰、1-辛烯-3-醇、(*E*)-2-庚烯醛、1-戊醇。由图10b可知,两种处理方式下,油脂中VIP值大于1的差异性挥发性物质共有9种,分别为(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛、(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛、(*E*)-2-庚烯醛、(*E*,*Z*)-2,4-癸二烯醛、(*E*,*Z*)-2,4-庚二烯醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、4-氧代壬醛、己醛。可见,煎炸与加热过程中烟气和油脂中均存在多种差异性挥发性物质,加热无法代替煎炸评估油脂中的挥发

性物质。

2.8　加热与煎炸大豆油的理化指标与组成的相关性分析

为探究两种处理方式下大豆油的理化指标与组成的相关性，对其进行皮尔逊相关性分析，结果如图 11 所示。



注：*. $p<0.05$，**. $p<0.01$，***. $p<0.001$

Note：*. $p<0.05$，**. $p<0.01$，***. $p<0.001$

图 11　两种处理方式下大豆油相关指标相关性分析

Fig. 11　Pearson correlation analysis of related indicators of soybean oil under two treatment methods

由图 11 可知，加热大豆油与煎炸大豆油的极性组分含量、黏度、酸值、色泽、维生素 E 损耗率、油酸含量、亚油酸含量、亚麻酸含量、游离脂肪酸含量、甘油二酯含量与甘油三酯含量存在显著正相关，这表明通过加热评估煎炸过程中油脂品质变化具有一定可行性。

3　结　论

本文通过对大豆油进行加热和煎炸处理，对比分析了加热油与煎炸油品质变化的差异及相关性。结果表明：两种处理方式下大豆油的 TPC 含量、黏度、*p*－茴香胺值和维生素 E 损耗率随处理时间的变化速率一致，煎炸油酸值、色泽、全氧化值的变化速率高于加热油，但两种处理方式下大豆油的过氧化值变化无规律；煎炸油和加热油中脂肪酸含量和甘油酯含量变化趋势一致，但煎炸油的氧化程度大于加热油；两种处理方式下烟气和油脂中挥发性物质种类一致，但含量存在差异；经 OPLS－DA 建立的模型能够有效地区分不同处理方式大豆油，并根据 VIP 值大于 1 在烟气和油脂中均筛选出了 9 种差异性特征挥发性成分，表明加热无法代替煎炸评估油脂中的挥发性物质；皮尔逊相关性分析表明，加热大豆油和煎炸大豆油的 TPC 含量、黏度、酸值、色泽、维生素 E 损耗率、油酸含量、亚油酸含量、亚麻酸含量、游离脂肪酸含量、甘油二酯含量与甘油三酯含量存在显著正相关，表明通过加热评估煎炸油的品质变化具有一定可行性。油脂风味是评估煎炸性能的关键指标，因此加热难以完全代替煎炸评价油脂的煎炸性能。

参考文献：

[1] 冯国霞. 西式快餐用高油酸型煎炸油的研究与应用[D]. 江苏 无锡：江南大学，2015.

[2] LIU H，GISHINI M F S，POPE M，et al. Comparison of the quality of soybean meal and oil by soybean production origin[J]. J Am Oil Chem Soc，2024，101(9)：817－826.

[3] TAVAKOLI A，ALI SAHARI M，BARZEGAR M，et al. The effect of refining process on the volatile compounds，oxidation stability and fatty acids profile of soybean oil using an electrostatic field[J/OL]. Food Process Preserv，2022，46(1)：16160[2024－09－20]. https://doi.org/10.1111/jfpp.16160.

[4] 陈康明. 油炸公干鱼品质变化规律及其煎炸油的复配研究[D]. 江苏 无锡：江南大学，2020.

[5] ABDULKARIM S M，LONG K，LAI O M，et al. Frying quality and stability of high－oleic *Moringa oleifera* seed oil in comparison with other vegetable oils[J]. Food Chem，2007，105(4)：1382－1389.

[6] LIU X，WANG S，MASUI E，et al. Model for prediction of the carbonyl value of frying oil from the initial composition[J/OL]. LWT－Food Sci Technol，2020，117：108660[2024－09－20]. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108660.

[7] 张菁菁，王艳，刘笑笑，等. 亚麻籽油在煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业科技，2022，43(16)：50－58.

[8] LIU Y，SUN L，LI Y，et al. Quality evaluation of fried soybean oil base on near infrared spectroscopy[J/OL]. J Food Process Eng，2018，41(7)：e12887[2024－09－20]. https://doi.org/10.1111/jfpe.12887.

[9] 李徐. 加热和煎炸过程油脂极性物质组成的变化规律及应用研究[D]. 江苏 无锡：江南大学，2021.

[10] 杨春英，刘学铭，陈智毅，等. 食用植物油流变学特性研究[J]. 中国粮油学报，2013，28(8)：24－27.

[11] 付元元，毕艳兰，彭丹，等. 分光光度法测定一级大豆油色泽的研究[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2014，35(4)：32－38.

[12] LU F，SHEN B，LI S，et al. Exposure characteristics and risk assessment of VOCs from Chinese residential cooking[J/OL]. J Environ Manage，2021，289：112535[2024－09－20]. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112535.

（下转第 82 页）

triterpene α, β – amyrin ameliorates dextran sulfate sodium – induced colitis in mice: The relevance of cannabinoid system[J]. Mol Immunol, 2013, 54(3/4): 482 – 492.

[45] CHICCA A, MARAZZI J, GERTSCH J. The antinociceptive triterpene β – amyrin inhibits 2 – arachidonoylglycerol (2 – AG) hydrolysis without directly targeting cannabinoid receptors [J]. Br J Pharmacol, 2012, 167(8): 1596 – 1608.

[46] MERALI Z, CAYER C, KENT P, et al. Sacred Maya incense, copal (*Protium copal* – Burseraceae), has antianxiety effects in animal models [J]. J Ethnopharmacol, 2018, 216: 63 – 70.

[47] MANNOWETZ N, MILLER M R, LISHKO P V. Regulation of the sperm calcium channel CatSper by endogenous steroids and plant triterpenoids[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2017, 114(22): 5743 – 5748.

[48] BERTÉ T E, DALMAGRO A P, ZIMATH P L, et al. Taraxerol as a possible therapeutic agent on memory impairments and Alzheimer′s disease: Effects against scopolamine and streptozotocin – induced cognitive dysfunctions[J]. Steroids, 2018, 132: 5 – 11.

[49] SCHWARZ S, LOESCHE A, LUCAS S D, et al. Converting maslinic acid into an effective inhibitor of acylcholinesterases[J]. Eur J Med Chem, 2015, 103: 438 – 445.

[50] PARK S J, AHN Y J, OH S R, et al. Amyrin attenuates scopolamine – induced cognitive impairment in mice[J]. Biol Pharm Bull, 2014, 37(7): 1207 – 1213.

[51] WEI C C, CHANG C H, LIAO V H. Anti – Parkinsonian effects of β – amyrin are regulated via LGG – 1 involved autophagy pathway in *Caenorhabditis elegans* [J]. Phytomedicine, 2017, 36: 118 – 125.

[52] BRAAK H, DEL TREDICI K. Invited article: Nervous system pathology in sporadic Parkinson disease [J]. Neurology, 2008, 70(20): 1916 – 1925.

[53] KOIRALA P, SEONG S H, JUNG H A, et al. Comparative molecular docking studies of lupeol and lupenone isolated from *Pueraria lobata* that inhibits BACE1: Probable remedies for Alzheimer′s disease[J]. Asian Pac J Trop Med, 2017, 10(12): 1117 – 1122.

[54] HASHMIW J, ISMAIL H, MEHMOOD F, et al. Neuroprotective, antidiabetic and antioxidant effect of *Hedera nepalensis* and lupeol against STZ + $AlCl_3$ induced rats model[J]. DARU J Pharm Sci, 2018, 26(2): 179 – 190.

[55] LIM L, JACKSON – LEWIS V, WONG L C, et al. Lanosterol induces mitochondrial uncoupling and protects dopaminergic neurons from cell death in a model for Parkinson′s disease[J]. Cell Death Differ, 2012, 19(3): 416 – 427.

[56] ASHA R, GAYATHRI DEVI V, ABRAHAM A. Lupeol, a pentacyclic triterpenoid isolated from *Vernonia cinerea* attenuate selenite induced cataract formation in Sprague Dawley rat pups[J]. Chem Biol Interact, 2016, 245: 20 – 29.

[57] ZHAO L, CHEN X J, ZHU J, et al. Lanosterol reverses protein aggregation in cataracts[J]. Nature, 2015, 523(7562): 607 – 611.

[58] DARNET S, SCHALLER H. Metabolism and biological activities of 4 – methyl – sterols [J/OL]. Molecules, 2019, 24(3): E451[2025 – 03 – 21]. https://doi.org/10.3390/molecules24030451.

[59] BOTELHO P B, GALASSO M, DIAS V, et al. Oxidative stability of functional phytosterol – enriched dark chocolate [J]. LWT – Food Sci Technol, 2014, 55(2): 444 – 451.

[60] SINGH A. Sitosterol as an antioxidant in frying oils[J]. Food Chem, 2013,137:62 – 67.

(上接第 57 页)

[13] PENG C Y, LAN C H, LIN P C, et al. Effects of cooking method, cooking oil, and food type on aldehyde emissions in cooking oil fumes [J]. J Hazard Mater, 2017, 324: 160 – 167.

[14] XU L, MEI X, CHANG J, et al. Comparative characterization of key odorants of French fries and oils at the break – in, optimum, and degrading frying stages [J/OL]. Food Chem, 2022, 368: 130581[2024 – 09 – 20]. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130581.

[15] 刘玉兰, 孙国昊, 王小磊, 等. 浓香菜籽油和精炼菜籽油氧化稳定性及挥发性成分的差异[J]. 中国油脂, 2022, 47(6): 35 – 45.

[16] 袁方博. 煎炸方便面过程中茶多酚对棕榈油及方便面氧化稳定性的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.

[17] 温运启, 刘玉兰, 王璐阳, 等. 不同食用植物油中维生素 E 组分及含量研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(3): 35 – 39.

[18] JUÁREZ M D, OSAWA C C, ACUÑA M E, et al. Degradation in soybean oil, sunflower oil and partially hydrogenated fats after food frying, monitored by conventional and unconventional methods [J]. Food Contr, 2011, 22(12): 1920 – 1927.