

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110150

ZHANG Jingjing, WANG Yan, LIU Xiaoxiao, et al. Quality Change of Flaxseed Oil during Frying Process[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(16): 50–58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110150

· 研究与探讨 ·

亚麻籽油在煎炸过程中的品质变化

张菁菁^{1,2}, 王 艳², 刘笑笑¹, 吴福祥¹, 潘建忠¹, 胡芳弟^{2,*}

(1. 兰州市食品药品检验检测研究院, 甘肃兰州 730050;

2. 兰州大学药学院, 甘肃兰州 730000)

摘要: 本文研究了常规煎炸条件下, 经过不同煎炸时间的亚麻籽油营养成分、理化指标及有害物质含量, 并通过主成分分析对其煎炸性能进行了综合评价。结果表明: 未经煎炸的亚麻籽油不饱和度达 81.77%, 其 α -亚麻酸的含量为 47.50%, 是一种富含多不饱和脂肪酸、高营养价值的食用油。亚麻籽油在 170 °C 连续煎炸 60 h (5 d) 过程中, 亚麻籽油的色泽、酸价、过氧化值、折光指数、羰基价、极性组分、生育酚含量、脂肪酸组成均有显著 ($P < 0.05$) 变化, 煎炸全程没有产生苯并 (α) 芘; 5 种主要脂肪酸 (α -亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸) 含量均呈下降趋势, C17:0 以下的五种饱和脂肪酸 (辛酸、癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸) 含量均呈逐渐升高的趋势, 其余脂肪酸呈下降趋势。通过煎炸性能分析, 煎炸 35 h 后的亚麻籽油的酸价超过国家限量, 其他项目均在国家限量范围以内, 经综合评估 30 h 基本到达亚麻籽的煎炸使用极限, 在 30 h 的煎炸时间内是一种健康良好的煎炸用油。

关键词: 亚麻籽油, 煎炸, 气相色谱-质谱法 (GC-MS), 脂肪酸, 品质变化

中图分类号: TS207.3; R155.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)

16-0050-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021110150



本文网刊:

Quality Change of Flaxseed Oil during Frying Process

ZHANG Jingjing^{1,2}, WANG Yan², LIU Xiaoxiao¹, WU Fuxiang¹, PAN Jianzhong¹, HU Fangdi^{2,*}

(1. Lanzhou Institute for Food and Drug Control, Lanzhou 730050, China;

2. College of Pharmacy, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: The nutritional composition, physicochemical indexes and harmful substance contents of flaxseed oil during frying process under conventional frying condition were studied in this paper, and its frying performance was comprehensively analyzed by principal component analysis. The results showed that the unsaturation of flaxseed oil without frying was 81.77%. The content of α -linolenic acid was 47.50%, which was a kind of high nutritional value edible oil. During the 60 h (5 d) 170 °C continuous frying, the color, acid value, peroxide value, refractive index, carbonyl value, polar components, tocopherol content and fatty acid composition of flaxseed oil changed significantly ($P < 0.05$), and there was no Benzo (α) pyrene produced in the whole frying process. The content of five main fatty acids (α -linolenic acid, oleic acid, linoleic acid, palmitic acid and stearic acid) all showed downward trend, and the content of five saturated fatty acids which were below C17:0 (octanoic acid, capric acid, lauric acid, myristic acid and palmitic acid) increased gradually with frying time extended, the content of other fatty acids decreased. The analysis of frying performance showed that the acid value of flaxseed oil after 35 h frying had exceeded the national limit, and other indexes were within the national limits. Frying for 30 h had basically reached the frying limit of flaxseed oil. It would not be recommended to use flaxseed oil for frying beyond the limit, it would be a healthy frying oil within 30 h.

Key words: flaxseed oil; frying; gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); fatty acid; quality change

收稿日期: 2021-11-15

基金项目: 甘肃省市场监督管理局科技计划项目 (SSCJG-SP-201906); 兰州市首席专家工作室基金项目 (2019LZFDC009); 兰州市食品药品检验检测研究院科技孵化项目 (LZFDC-2018-04)。

作者简介: 张菁菁 (1986-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 食品药品分析与检测, E-mail: 61034527@qq.com。

* 通信作者: 胡芳弟 (1971-), 女, 博士, 博士生导师, 研究方向: 中药成分分离分析及中药新药开发, E-mail: hufd@lzu.edu.cn。

亚麻(*Linum usitatissimum* L.), 属亚麻科, 一年生草本植物, 是一种重要的油料及纤维作物^[1]。其种子亚麻籽是最古老的油料作物之一, 种植国家超过五十多个, 主产区包括加拿大、印度、中国、美国和埃塞俄比亚, 在我国中西部地区有很悠久的种植历史^[2-4]。亚麻籽油, 是由亚麻种子提取加工制成, 富含必需脂肪酸和植物雌激素^[5]。亚麻籽油饱和脂肪酸通常在 60% 之上, 是 α -亚麻酸和亚油酸的重要植物来源^[6]。其中 α -亚麻酸可在体内转化为二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic acid, EPA) 和二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA)^[7]。亚麻籽油能提供多种潜在的保健功能, 如心血管保护、抗肿瘤、抗炎、保护肝脏、治疗糖尿病等, 被人们誉为“陆地上的鱼油”^[8-10]。在感官上, 亚麻籽油色泽黄亮, 气味芳香, 广受人们的喜爱, 特别是在我国西北部甘肃、青海、宁夏、内蒙等地, 亚麻籽油为市售、餐饮、百姓生活的常用油脂。

油脂在日常煎炸、烹饪时, 在持续的高温、氧气与水分的作用下会发生一系列的化学变化, 生成氧化产物、酶抑制剂、抗营养因子、致突变剂和致癌物质等^[11]。在煎炸过程中, 当食物未发生明显变化时, 煎炸油已经历多种期望和非期望的物理、化学变化。同时, 过度煎炸的油脂渗入食物成为其组成成分, 会影响食物的品质和营养价值, 进而对人体健康造成潜在的危害^[12]。目前有关于煎炸油脂的品质研究的文献报道, 主要集中在棕榈油、花生油、菜籽油、大豆油、调和油等的研究^[13-15]; 而亚麻籽油作为常见的食用油, 其相关研究主要集中于营养、理化等性质, 对亚麻籽油煎炸过程中的品质变化未见报道。本研究模拟常用煎炸条件, 在连续煎炸的进程中持续监测亚麻籽油的多项理化、营养指标, 探讨亚麻籽油质量随煎炸时间的动态变化, 为进一步研究稳定品质的方法、食品工业及日常膳食烹饪提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

亚麻籽油为市售压榨二级 宁夏优优食用油有限公司; 薯条(冷冻半成品) 市售; α -生育酚(99.5%)、 β -生育酚(97.8%)、 γ -生育酚(99.4%)、 δ -生育酚(98.6%)、甲醇、四氢呋喃(色谱纯) 德国 Dr.Ehrenstorfer GmbH 标准品有限责任公司; 乙醇(色谱纯) 德国默克科技有限公司; 乙醚、石油醚、丙酮、2,4-二硝基苯胂 中国医药集团有限公司; 实验用水 Milli-Q 超纯水机制备; 对照品: 37 种脂肪酸甲酯混标、十一碳酸甘油三酯 上海安谱实验科技股份有限公司。

DF80A 立式电炸锅 斯乐得电器有限公司; 气质联用仪(7890B-7000D EI 源) 美国安捷伦科技有限公司; LC-20A 液相色谱仪 日本岛津; Evolution 350 紫外可见分光光度计 赛默飞世尔科技公司; 极性组分测定仪(EOPC) 博纳艾吉尔科技有限公司;

十万分之一天平(METTLER-ML204T) 瑞士梅特勒-托利多有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 煎炸方法 食物种类会在不同程度上影响油炸介质的特性, 因为马铃薯在世界范围内广受欢迎, 为了评估煎炸油的质量, 选择马铃薯进行油炸实验^[16]。煎炸方式和过程参考 Raznim 等^[17]的方法设计如下: 5 L 亚麻籽油在(170 \pm 3) °C 条件下进行煎炸, 每 20 min 炸一批, 每批取 100 g 薯条放入煎炸锅中炸 3 min, 捞出沥油, 每天煎炸 12 h, 连续煎炸 5 d, 共煎炸 60 h。在 0、1、2、3、4、6、8、10、12、14、18、22、26、30、35、40、45、50、55、60 h 取油样, 煎炸过程中不再添加新油, 所取油样在 4 °C 冰箱中密封保存, 测定时, 取油样上层澄清部分测定。

1.2.2 理化指标的测定 色泽使用 Molecular Devices M2 平板阅读器测量油样的颜色, 将 200 μ L 油样加入 96 孔板中, 在 425 nm 处测定油样的吸光度^[18], 折光指数的测定参考《GB/T 5527-2010 动植物油脂折光指数的测定》^[19]; 酸值的测定参考《GB 5009.229-2016 食品安全国家标准食品中酸价的测定》^[20]; 过氧化值的测定参考《GB 5009.227-2016 食品安全国家标准食品中过氧化值的测定》^[21]; 羰基价的测定参考《GB 5009.230-2016 食品安全国家标准食品中羰基价的测定》^[22]; 极性组分的测定参考《GB 5009.202-2016 食品安全国家标准食用油中极性组分(PC)的测定(制备型快速柱层析法)》^[23]。

1.2.3 苯并(α)芘含量的测定 参考《GB 5009.27-2016 食品安全国家标准食品中苯并(α)芘的测定》^[24], 采用高效液相色谱法分析, 油脂样品的净化采用苯并(α)芘分子印迹柱, 流动相调整为乙腈:水(82:18)。

1.2.4 脂肪酸含量的测定 分析方法参考标准 BJS 201712^[25]: 准确称量 100 mg 于 250 mL 圆底烧瓶中, 加入 2% 氢氧化钠甲醇溶液, 混匀后于 80 °C 水浴回流至油滴消失, 从回流管上端加入 15% 三氟化硼甲醇溶液 7 mL, 再回流 5 min, 取下烧瓶冷却至室温, 准确加入 10 mL 正己烷, 振摇 2 min, 吸取上层正己烷, 通过无水硫酸钠吸水后过 0.22 μ m 有机相滤膜, 供 GC/MS 测定。定量采用外标法, 建立 37 种脂肪酸标准曲线, 每种脂肪酸的标准曲线相关系数均大于 0.995, 每个样品 3 个重复。

气相色谱条件: AgilentDB-23(60 m \times 0.25 mm, 0.25 μ m)强极性 50% 氰丙基甲基聚硅氧烷色谱柱; 温度程序: 60 °C 保持 3.0 min, 然后以 15 °C/min 升温至 160 °C, 再以 8 °C/min 升温至 210 °C, 再以 3.2 °C/min 升温至 230 °C 保持 10 min; 载气为高纯氦气, 流速 1.0 mL/min; 进样口温度 270 °C, 分流比为 5:1, 进样量 1 μ L。

质谱条件: 定量分析为选择离子扫描(SIM), 每种脂肪酸选择一个定量离子、2~3 个定性离子, 离子

源温度: 230 ℃; 电离能量: 70 eV; 四级杆温度 150 ℃, 接口温度 270 ℃。

1.2.5 生育酚含量的测定 分析方法参考文献 [26]: 准确称取 2.0 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 5 mL 纯水以及 10 mL 乙醇、0.5 g 抗坏血酸, 混合均匀后加入 5 mL 50% KOH 溶液。避光下于 80 ℃ 水浴中振荡皂化反应 30 min。皂化后立即放入冷水浴中冷却, 加入 20 mL 乙醚-石油醚(1:1)提取溶剂, 涡旋振荡 6 min, 转移混合提取液至 150 mL 分液漏斗中, 再次用 20 mL 提取溶剂提取下层皂化液, 合并提取溶液, 用纯水水洗提取溶液至中性。提取溶液过无水硫酸钠, 旋蒸至近干后用氮气吹干, 用流动相转移并定容至 5 mL 容量瓶中, 过 0.22 μm 滤膜, 注入液相色谱仪分析, 保留时间定性, 外标法定量。

色谱柱: Agilent ZORBAXRx-Sil(5 μm, 4.6 mm×250 mm); 流动相: 正己烷: 四氢呋喃体积比(98:2); 流速: 1.0 mL/min; 荧光检测器: 激发波长 294 nm, 发射波长 328 nm; 柱温 35 ℃。

1.3 数据处理

所有实验数据重复 3 次, 均以平均值±标准差表示。数据使用 SPSS Statistic 23 进行显著性方差分析, $P < 0.05$ 表示具有显著性差异; 采用 SIMCA14.0、Microsoft Office Excel 2013 进行绘图分析。

2 结果与分析

2.1 理化指标

2.1.1 色泽 随着煎炸时间的延长, 油脂色泽逐渐加深, 24 h 后油脂下层出现明显深色絮状沉淀, 在煎炸至 30 h 后, 亚麻籽油的色泽明显加深, 这与其他煎炸理化指标的显著劣变时间点较吻合, 如图 1 所示, 油脂色泽与时间呈良好的线性关系($y=0.1351x+0.2001$, $R^2=0.9935$)。

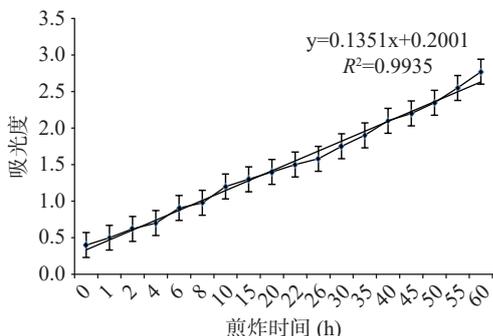


图 1 亚麻籽油煎炸过程中吸光度的变化
Fig.1 Change of absorbance of flaxseed oil during frying process

2.1.2 折光指数 折光指数与油脂的分子结构有密切关系, 是油脂的重要物理参数之一。由于脂肪酸组成和油脂的折光指数(包括链长和不饱和程度)之间有一定的关系[27], 因此不同的油脂所含脂肪酸不同, 其折射率也不相同, 测定折射率可迅速了解油脂组成的大概情况, 用来鉴别各种油脂的类型及质量[28]。

图 2 显示, 亚麻籽油在煎炸过程中, 折光指数随煎炸时间的延长从 1.4830 逐渐降低至 1.4805, 可能是由于在煎炸的过程中会混入水, 导致折光指数下降。

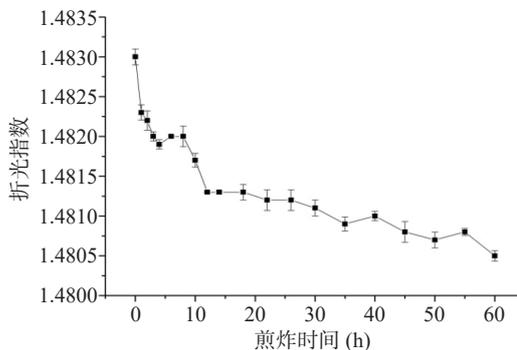


图 2 亚麻籽油煎炸过程中折光指数的变化
Fig.2 Change of refractive index in flaxseed oil during frying

2.1.3 酸价 酸价是测定油中游离脂肪酸的质量参数, 低酸价的油脂是优质油品的标志[29]。油脂加热过程中酸价的上升主要是由于油脂中游离脂肪酸的产生及氧化副产物的降解, 如醇类、醛类和酮类[30]。在理想情况下, 烹饪用油的酸价应当在 0.00~3.00 mg/g 的范围内[27], 酸值超过 3.00 mg/g 都可能导致人体胃肠道不适、腹泻和肝损伤[31], 在我国植物油食品安全国家标准中煎炸过程用油的酸价限量值为 5 mg/g[32]。图 3 可看出, 在亚麻油煎炸的过程中, 酸价呈逐步上升的趋势, 亚麻籽油煎炸至 20 h 时, 酸价达 3.1 mg/kg; 在 26 h 后酸价上升的速度明显提升, 煎炸至 35 h 时, 酸价达 5.22 mg/kg, 超过了国标限量值 5 mg/g; 在经过 60 h 的煎炸过程后, 亚麻籽油的酸价达 9.23 mg/g。由此说明在加工生产、生活烹饪过程中, 亚麻籽油在连续煎炸 20 h 内, 质量维持较为稳定, 煎炸 20 h 后, 油脂质量下降至不良状态, 35 h 左右后, 达到酸价的标准限量值, 达到了油脂的使用极限, 35 h 后油脂酸价上升速度同时加快。在本实验所测定的检验指标中, 酸价是最先到达国家标准限量值的指标。相较于王凤娟[33]、王云超等[34]对煎炸专用调和油、棕榈油、稻米油、葵花籽油、棉籽油、大豆油与亚麻籽油的煎炸性能比较, 亚麻籽油的酸价上升速度更快。可能是由于亚麻籽油的不饱和度较高, 在高温煎炸环境中更

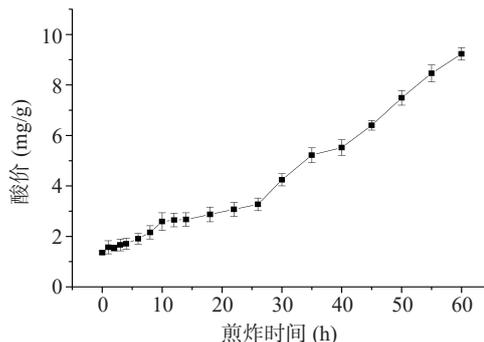


图 3 亚麻籽油煎炸过程中酸价的变化
Fig.3 Change of fatty acid in flaxseed oil during frying

容易氧化^[35],因此在煎炸过程中应当严格控制使用的时间。

2.1.4 过氧化值 过氧化值是指油脂在空气(氧气)、高温、光线等条件下发生氧化反应,生成过氧化物的含量^[36]。过氧化值是评价油脂初级氧化最常用的方法,但是初级氧化产物不稳定,随煎炸时间的延长,会将降解成挥发性或非挥发性的产物^[37]。图 4 显示,亚麻籽油在煎炸过程中,过氧化值随煎炸时间的延长而上升,在 45 h 后上升速度加快,直到 60 h 的煎炸后,过氧化值达到最高值 0.23 g/100 g。国家标准对成品植物油的过氧化值限量为 0.25 g/100 g,由此可见短时间内,亚麻籽油有一定的抗氧化能力,这与 Sun 等^[38]的研究相一致。但是长时间高温煎炸过程中易氧化酸败,从而影响油脂整体品质。

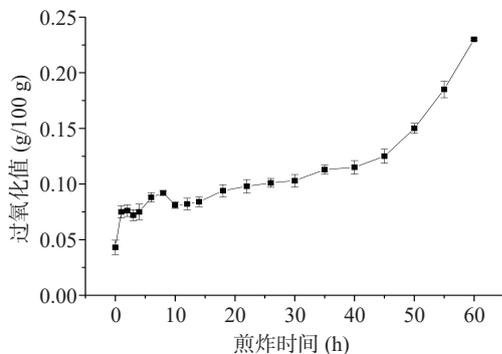


图 4 亚麻籽油煎炸过程中过氧化值的变化

Fig.4 Change of peroxide value in flaxseed oil during frying

2.1.5 羰基价 羰基类化合物是指油脂在高温下氧化酸败生成的酮、醛类等有害化合物和聚合物,它是煎炸油热劣变的灵敏指标^[39]。与其他指标不同,亚麻籽油的煎炸过程中,羰基价变化速度呈先快后慢的趋势,羰基价在 22 h 前呈较快速度增长,特别是 0~15 h 之间,到 22 h 后增长速度减缓(图 5)。经过 60 h 的长时间煎炸,亚麻籽油的羰基价最高值达到 26.0 meq/kg,与煎炸过程用油羰基价限量值 50 meq/kg 相差较远,表明亚麻籽油在 170 ℃ 的持续煎炸条件下,醛酮类等有害化合物的累计程度不高。

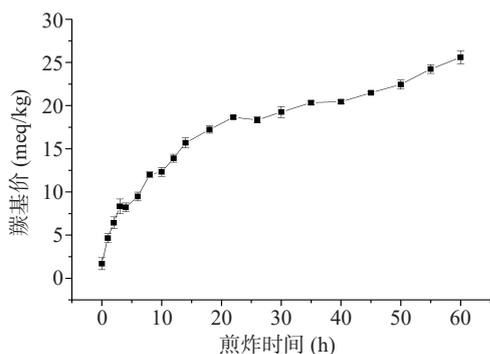


图 5 亚麻籽油煎炸过程中羰基价的变化

Fig.5 Change of carbonyl value in flaxseed oil during frying

2.1.6 极性组分 总极性物质(Total Polar Material)

是评价油炸过程中油脂变质程度最有效、最客观的指标^[40],这是由于油炸过程中产生的大多数分解产物(如游离脂肪酸、聚合物组分、醛和酮)是极性的。世界各国对极性组分的限量基本在 25%~27% 的范围内,如许多欧洲国家(西班牙、葡萄牙、法国、德国、比利时、瑞士、意大利和荷兰)规定煎炸油的极性组分监管限值为 25%,澳大利亚、奥地利及我国国标限制为 27%^[41]。在亚麻籽油煎炸过程中可明显看出(图 6),极性组分相比其他指标,与煎炸时间呈良好的线性关系($y=0.3865x+1.953$, $R^2=0.9909$)经过 60 h 的煎炸后总极性组分为 25.98%,接近但未超过国家标准限量标准。按国家标准限量值为最高值,根据极性组分标准曲线的预测计算,亚麻籽油在 170 ℃ 的煎炸极限为 64.8 h。

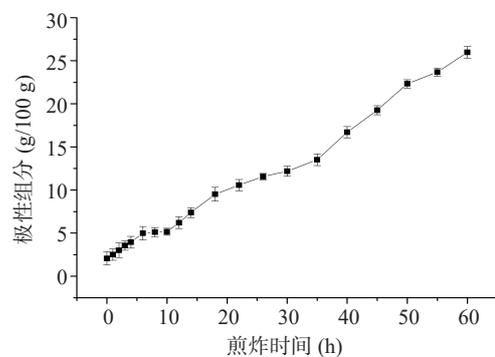


图 6 亚麻籽油煎炸过程中极性组分的变化

Fig.6 Change of polar component in flaxseed oil during frying

2.1.7 苯并(α)芘 世界卫生组织已经明确指出苯并(α)芘是一种致癌物质。苯并(α)芘属于多环芳烃类,是一种常见的高活性间接致癌物。油脂浸出溶剂中芳烃类物质在食用油的残留以及高温煎炸过程中热化学反应均能导致油脂苯并芘物质的出现^[42]。因此,需要测定煎炸过程中的苯并(α)芘含量,以反映煎炸油的品质,避免对人体造成危害^[43]。经过检测,经过 170 ℃ 下 60 h 的煎炸,煎炸不同时间的亚麻籽油样品均未检出苯并(α)芘。

2.2 营养指标

2.2.1 脂肪酸 本实验共检测出亚麻籽油含有的脂肪酸 17 种,含量高于 1 g/100 g 的脂肪酸 5 种,含量低于 1 g/100 g 的脂肪酸 12 种,图 7 为亚麻籽油特征脂肪酸总离子流色谱图。测定中亚麻籽油中主要的五种脂肪酸分别是: α -亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸,其中不饱和脂肪酸达 81.7%,单不饱和脂肪酸(MUFA)为油酸,其含量占总脂肪酸含量的 17.2%;多不饱和脂肪酸(PUFA)为 α -亚麻酸、亚油酸,其含量分别占总脂肪酸含量的 47.5%、16.5%。研究表明,PUFA 含量越高煎炸稳定性越低^[44],所以对亚麻籽油进行脂肪酸测定进而了解其煎炸性能具有重要的意义。

测定结果显示,经过 60 h 煎炸后,亚麻籽油总脂

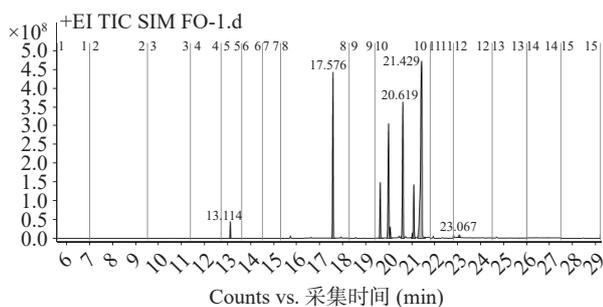


图7 亚麻籽油脂肪酸总离子流色谱

Fig.7 Total ion flow chromatogram of fatty acids of flaxseed oil

脂肪酸含量从 92.86% 下降至 60.84%；油脂脂肪酸不饱和程度由 81.77% 下降至 52.48%；辛酸(C8:0)、癸酸(C10:0)、月桂酸(C12:0)、肉豆蔻酸(C14:0)、棕榈酸(C16:0)五种十七碳以下的饱和脂肪酸含量均呈逐渐升高的趋势，链长越短上升趋势越显著；十七碳以上的脂肪酸含量均呈逐渐下降的趋势。不同煎炸时间亚麻籽油中 17 种脂肪酸的含量见表 1。

2.2.2 生育酚 生育酚是油脂中的天然抗氧化物，有研究表明生育酚可以延缓油脂在煎炸过程中的劣变^[45]。在煎炸过程中，温度较高，并且与氧气接触，必然导致生育酚因抗氧化作用发生转化而损耗。经研究如表 2 所示，未经煎炸的亚麻籽油 4 种生育酚的含量分别是 α -生育酚 2.95 mg/kg； β -生育酚未检出， γ -生育酚 497.02 mg/kg； δ -生育酚 1.69 mg/kg，其中 γ -生育酚为主要成分(99.1%)，测定结果与 Oleg 等^[46]的测定结果相符。在煎炸过程中， α -生育酚、 δ -生育酚分别在 40、18 h 消耗至检出限以下， γ -生育酚经过 60 h 的煎炸过程剩余量为 208.40 mg/kg，最终总生育酚的损耗量为 58.46%。

2.3 亚麻籽油质量讨论

2.3.1 煎炸性能分析 由于亚麻籽油中不饱和脂肪酸含量较其他油脂高，且含有比较丰富的生物活性成分，包括生育酚、类胡萝卜素、辅酶 Q、植物甾醇、磷脂和许多其他化合物，因此较大程度保证了亚麻籽油的抗氧化稳定性^[4]。因此在家庭煎炸条件(170 ℃)下，经过 5 d(60 h)的连续煎炸后，过氧化值未超过国家限量标准，也并未检出苯并(α)芘；极性组分、羰基价两项针对煎炸用油的国家标准限量均未超过，比较充分证明了亚麻籽油在煎炸过程中的良好的抗氧化、抗劣变能力，说明亚麻籽油是一种比较理想、健康的家庭煎炸用油。

2.3.2 相互关系 不同参数的评估与煎炸时间的相互关系通过线性相关性和皮尔逊相关性进行表示，如表 3 所示。由相关性可知，煎炸时间对亚麻籽油的各项理化指标、营养指标都有显著的影响，都具有一定的线性相关性，色泽、酸价、过氧化值、羰基价、极性组分随煎炸时间的延长而增大，折光指数及生育酚、脂肪酸等营养指标随煎炸时间的延长而减小，说明煎炸时间对亚麻籽油的质量有较大的影响。其中极性组分与煎炸时间具有较好的线性相关性，可以作为分析煎炸时间的良好参数，同时色泽也具有较好的线性相关性，可以作为煎炸食用油快速检测的技术手段。

2.3.3 主成分分析 将各煎炸时间下不同油脂质量参数数据导入 SPSS 23.0 及 SIMCA 14.0 中进行主成分分析，通过标准化数据、降维及分析将质量指标降为三个主成分，结果表明，前三个主成分的贡献率分别占 89.7%、5.4%、2.8%，累计贡献率达 97.9%，其特征值均大于 1，能反应所有原始数据的变化趋

表 1 不同煎炸时间亚麻籽油中 17 种脂肪酸的含量(g/100 g)

Table 1 Contents of 17 fatty acids in flaxseed oil at different frying times (g/100 g)

脂肪酸种类	煎炸时长(h)																	
	0	2	3	4	6	8	10	12	14	18	22	26	30	35	40	45	50	60
C8:0	0.0015	0.0044	0.0089	0.0094	0.0090	0.0185	0.0211	0.0247	0.0256	0.0389	0.0426	0.0518	0.0540	0.0626	0.0622	0.0753	0.0743	0.0698
C10:0	0.0002	0.0000	0.0003	0.0003	0.0002	0.0007	0.0009	0.0012	0.0012	0.0017	0.0020	0.0022	0.0027	0.0030	0.0030	0.0033	0.0030	0.0031
C12:0	0.0034	0.0040	0.0052	0.0056	0.0066	0.0108	0.0128	0.0156	0.0164	0.0211	0.0242	0.0255	0.0301	0.0327	0.0325	0.0350	0.0349	0.0315
C14:0	0.0643	0.0625	0.0672	0.0714	0.0697	0.0863	0.0929	0.1062	0.1049	0.1260	0.1357	0.1318	0.1688	0.1654	0.1644	0.1706	0.1705	0.1461
C15:0	0.0278	0.0266	0.0255	0.0251	0.0250	0.0250	0.0247	0.0247	0.0246	0.0246	0.0242	0.0237	0.0235	0.0232	0.0230	0.0225	0.0223	0.0169
C16:0	5.3507	5.4765	5.5331	5.6141	5.6486	5.7121	5.7439	5.8572	5.8792	5.9240	6.0467	6.0692	6.0835	6.1060	6.1649	6.2014	6.2333	6.7792
C17:0	0.0836	0.0806	0.0760	0.0758	0.0739	0.0728	0.0721	0.0713	0.0708	0.0704	0.0698	0.0698	0.0694	0.0693	0.0671	0.0663	0.0651	0.0472
C17:1n7	0.0510	0.0444	0.0446	0.0474	0.0410	0.0409	0.0397	0.0419	0.0376	0.0401	0.0399	0.0359	0.0385	0.0389	0.0386	0.0357	0.0351	0.0284
C18:0	5.2495	4.8682	4.7911	5.0909	4.4676	4.4501	4.4328	4.5886	4.2939	4.5202	4.3937	3.9889	4.4126	4.2618	4.2368	4.0581	4.0238	3.1173
C18:1n9t	0.0426	0.0396	0.0405	0.0430	0.0400	0.0428	0.0437	0.0465	0.0429	0.0496	0.0518	0.0498	0.0574	0.0581	0.0577	0.0580	0.0616	0.0506
C18:1n9c	17.227	16.126	15.566	16.540	14.803	14.696	14.797	15.250	14.455	15.216	15.013	14.164	14.772	14.682	14.596	14.263	14.301	10.935
C18:2n6c	16.528	15.781	14.972	15.909	14.295	13.811	14.018	14.346	13.483	14.018	13.753	12.913	13.262	13.358	13.279	12.596	12.560	9.532
C18:3n3	47.503	45.981	44.748	46.609	43.548	42.731	42.878	43.415	42.159	42.724	42.287	40.379	40.899	40.986	40.833	39.368	39.190	29.745
C20:1n9	0.2263	0.2060	0.2028	0.2155	0.1907	0.1888	0.1862	0.1939	0.1768	0.1890	0.1897	0.1690	0.1832	0.1846	0.1836	0.1728	0.1762	0.1380
C20:2n6	0.1928	0.1730	0.0667	0.0709	0.0634	0.0678	0.0701	0.0720	0.0675	0.0709	0.0699	0.0617	0.0662	0.0654	0.0650	0.0584	0.0571	0.0455
C22:0	0.1815	0.1704	0.1604	0.1583	0.1505	0.1463	0.1449	0.1404	0.1393	0.1386	0.1379	0.1357	0.1334	0.1326	0.1300	0.1226	0.1213	0.0870
C24:0	0.1239	0.1121	0.1122	0.1192	0.1042	0.1031	0.1005	0.1038	0.0934	0.1012	0.0961	0.0836	0.0996	0.0920	0.0915	0.0883	0.0886	0.0684
UFA	81.77	78.35	75.64	79.43	72.98	71.58	72.03	73.366	70.42	72.31	71.40	67.77	69.28	69.37	69.05	66.55	66.38	52.48
TFA	92.86	89.16	86.42	90.6	83.54	82.20	82.68	84.30	81.07	83.27	82.38	78.36	80.36	80.326	80.03	77.40	77.22	60.84

表 2 不同煎炸时间亚麻籽油中生育酚的含量(mg/kg)

Table 2 Content of tocopherol in flaxseed oil after deep-frying in different time (mg/kg)

煎炸时长(h)	α -生育酚	β -生育酚	γ -生育酚	δ -生育酚	总生育酚	损失率(%)
0	2.95±0.01	ND	497.02±8.61	1.69±0.15	501.64±7.93	0.00
1	2.88±0.07	ND	487.93±7.90	1.67±0.04	492.45±3.23	1.83
2	2.62±0.10	ND	477.04±8.02	1.32±0.11	480.94±4.04	4.13
3	2.19±0.12	ND	456.17±7.04	1.33±0.09	459.62±6.34	8.38
4	2.16±0.10	ND	420.82±7.23	1.04±0.08	424.00±2.03	15.48
6	1.87±0.18	ND	405.30±6.80	0.98±0.04	408.15±6.61	18.64
8	1.52±0.20	ND	388.58±5.64	0.70±0.02	390.72±4.33	22.11
10	1.26±0.15	ND	376.75±8.85	0.63±0.01	378.59±5.55	24.53
12	1.20±0.10	ND	372.96±9.60	0.47±0.01	374.57±5.54	25.33
14	0.85±0.12	ND	366.95±5.51	0.36±0.07	368.11±2.09	26.62
18	0.79±0.14	ND	350.20±7.62	ND	350.99±4.00	30.03
22	0.71±0.04	ND	345.41±9.10	ND	346.11±1.09	31.00
26	0.52±0.01	ND	340.33±4.63	ND	340.82±4.90	32.06
30	0.46±0.11	ND	335.55±8.70	ND	335.96±4.28	33.03
35	0.22±0.19	ND	295.70±9.64	ND	295.92±3.47	41.01
40	ND	ND	275.95±8.85	ND	275.90±6.25	45.00
45	ND	ND	273.96±7.63	ND	273.90±7.00	45.40
50	ND	ND	244.32±5.67	ND	244.30±6.86	51.30
55	ND	ND	214.43±8.84	ND	214.40±3.06	57.26
60	ND	ND	208.48±8.90	ND	208.40±9.33	58.46

注: 数据以平均值±标准差表示, 代表三个独立重复的平均值; ND表示未检测到。

表 3 煎炸时间与质量参数的相关性

Table 3 Correlation between frying time and quality parameters

指标	<i>r</i>
色泽(425 nm)	0.989**
折光指数	-0.9667**
酸值(mg/g)	0.979**
过氧化值Value(%)	0.912**
羰基价(meq/kg)	0.835**
极性组分(%)	0.996***
生育酚(mg/kg)	-0.954**
不饱和脂肪酸(%)	-0.882**
总脂肪酸(%)	-0.867**
苯并(α)苣(μ g/kg)	/

注: * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

势, 且各组分之间相互独立, 完全可以解释总数据的变异值。

由图 8 可知, 基于亚麻籽油多项质量指标差异可以得到, 亚麻籽油在 60 h 的煎炸过程中大致经过了三个阶段, 第一阶段(0~4 h)聚为一类: 此阶段亚麻籽油的质量指标与初始值差异不大, 油脂的外观状态基本维持不变, 各项理化、营养指标处于初始水平左右, 是比较理想的煎炸阶段; 第二阶段(6~35 h)聚为一类: 此阶段亚麻籽油的品质开始发生较大变化, 絮状沉淀物出现并逐步积累, 在 30 h 左右油脂基本到达油脂的使用极限; 第三阶段(40~60 h)聚为一类, 此阶段亚麻籽油基本成浑浊褐色, 油脂各项指标劣变速度迅速增加, 酸价指标已超过国家标准限量, 不建议亚麻籽油煎炸使用时长在此范围内。通过 PCA 分析, 能够将不同使用时长的亚麻籽油通过多项质量指标良好综合评价并区分, 对食用油的煎炸时间, 质量

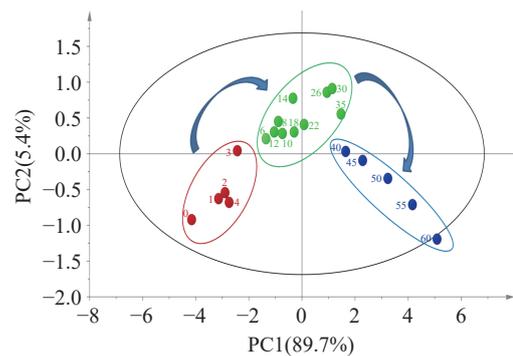


图 8 煎炸不同时长亚麻籽油脂肪酸主成分分析

Fig.8 Cluster analysis of fatty acids of flaxseed oil during frying process

控制、使用极限预测及使用方式的指导具有重要意义。

3 结论

本文对模拟不同煎炸时长的亚麻籽油进行理化指标及营养成分的分析, 对亚麻籽油的营养价值、煎炸性能进行了综合分析。结果表明: 未经煎炸的亚麻籽油色泽金黄, 不饱和度达 81.77%, 其中 α -亚麻酸含量高达 47.50%, 是一种高营养价值的食用油。亚麻籽油在连续煎炸 60 h(5 d)过程中, 随着煎炸时间的延长, 亚麻籽油的色泽、酸价、过氧化值、羰基价、极性组分随煎炸时间的延长而增大; 折光指数、生育酚呈下降趋势; 煎炸全程没有产生苯并(α)苣; 5 种主要脂肪酸(α -亚麻酸、油酸、亚油酸、棕榈酸、硬脂酸)均呈下降趋势, C17:0 以下的 5 种十七碳以下脂肪酸(辛酸、癸酸、月桂酸、肉豆蔻酸、棕榈酸)含量呈逐渐升高的趋势, 其他脂肪酸均呈下降趋势。通过煎炸性能分析, 煎炸 60 h 后的亚麻籽油的酸价超过国家限量, 其他项目均在国家限量范围以内; 通过指标之间的相关性分析, 极性组分、色泽与煎炸时间具

有较好的线性相关性,可以作为预测煎炸时间的良好参数及快速检测的技术手段;通过主成分分析,得出亚麻籽油在60 h的煎炸过程中大致经过了三个阶段,第一阶段(0~4 h):此阶段亚麻籽油的质量变化与初始值不大,为较理想的煎炸阶段;第二阶段(6~35 h):此阶段亚麻籽油的品质发生较大变化,30 h左右油脂基本到达油脂的使用极限;第三阶段(40~60 h):此阶段亚麻籽油各项指标劣变速度上升,酸价指标已超过国家标准限量,不建议亚麻籽油煎炸使用时长在此范围内。

参考文献

- [1] YOUNG Y, BO G, ARNISON P G, et al. Flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) bioactive compounds and peptide nomenclature: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2014, 38(1): 5–20.
- [2] KOUR J, SINGH S, CHANDRA S D. Nutraceuticals from barley flour, flaxseed and rice bran oil—extraction, chromatographic analysis, microbiological analysis and pesticide estimation[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2018, 42(11): e13777.
- [3] SURI K, SINGH B, KAUR A, et al. Influence of microwave roasting on chemical composition, oxidative stability and fatty acid composition of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) oil[J]. *Food Chemistry*, 2020, 326: 126974.
- [4] 马岩, 王滨立. 发展胡麻纺织工业积极推动我国西部大开发[J]. *黑龙江纺织*, 2003(1): 1–2. [MA Y, WANG B L. Developing the textile industry of oil used flax to actively advance the large scale development in the west of China[J]. *Heilongjiang Textiles*, 2003(1): 1–2.]
- [5] GOYAL A, SHARMA V, UPADHYAY N, et al. Flax and flaxseed oil: An ancient medicine & modern functional food[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51(9): 1633–1653.
- [6] XU J, YANG W, DENG Q, et al. Flaxseed oil and α -lipoic acid combination reduces atherosclerosis risk factors in rats fed a high-fat diet[J]. *Lipids in Health and Disease*, 2012, 11(1): 1–7.
- [7] 高颀雄, 张坚. α -亚麻酸体内转化为二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸的研究进展[J]. *中国油脂*, 2015, 40(9): 27–31. [GAO Y X, ZHANG J. Review on endogenous conversion of α -linolenic acid to EPA and DHA[J]. *China Oils and Fats*, 2015, 40(9): 27–31.]
- [8] MORSHEDZADEH N, SHAHROKH S, AGHDAEI H A, et al. Effects of flaxseed and flaxseed oil supplement on serum levels of inflammatory markers, metabolic parameters and severity of disease in patients with ulcerative colitis[J]. *Complementary Therapies in Medicine*, 2019, 46: 36–43.
- [9] 周颖, 潘海坤, 范志红, 等. 坚果油籽浆的抗氧化性与餐后血糖平缓作用[J]. *食品科学*, 2020, 41(9): 113–118. [ZHOU Y, PAN H K, FAN Z H, et al. Antioxidant activity and postprandial glycemic response mitigating effect of homogenized seed/nut milk[J]. *Food Science*, 2020, 41(9): 113–118.]
- [10] 赖玉萍, 梁结桦, 黄思苑, 等. 亚麻籽油的营养成分及功效机制研究进展[J]. *中国油脂*: 1–22[2021-12-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210389>. [LAI Y P, LIANG J H, HUANG S Y, et al. The progress of research on nutritional components and efficacy mechanism of flaxseed oil[J]. *China Oils and Fats*: 1–22[2021-12-21]. <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.210389>.]
- [11] 王莉蓉, 金青哲, 冯国霞, 等. 我国及欧美煎炸食用油法律法规与标准概述[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(9): 3774–3779. [WANG L R, JIN Q Z, FENG G X, et al. Review of laws, regulations and standards of frying oil in China, European countries and America[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 6(9): 3774–3779.]
- [12] 穆昭. 煎炸油加热过程品质变化与评价[D]. 无锡: 江南大学, 2008. [MU Z. Quality changes and evaluations of frying oil during heated[D]. Wuxi: Jiang Nan University, 2008.]
- [13] PAUNOVIĆ D M, DEMIN M A, PETROVIĆ T S, et al. Quality parameters of sunflower oil and palm olein during multiple frying[J]. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 2020, 65(1): 61–68.
- [14] 刘玉兰, 刘海兰, 黄会娜, 等. 煎炸方式和煎炸食材对花生煎炸油中3-氯丙醇酯和缩水甘油酯含量的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(11): 42–48. [LIU Y L, LIU H L, HUANG H N, et al. Effects of deep-fat frying methods and foodstuffs on contents of 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters in frying peanut oil[J]. *Food Science*, 2019, 40(11): 42–48.]
- [15] WU G C, CHANG C, HONG C C, et al. Phenolic compounds as stabilizers of oils and antioxidative mechanisms under frying conditions: A comprehensive review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 92: 33–45.
- [16] MULTARI S, MARSOL-VALL A, HEPONIEMI P, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and other markers of lipid oxidation of six different vegetable oils during short-term deep-frying[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 318–329.
- [17] RAZNIM A A R, AZMIL H A T, AINIE K, et al. Intermitent frying effect on French fries in palm olein, sunflower and canola oils on quality indices, 3-monochloropropane-1,2-diol esters (3-MCPDE), glycidyl esters (GE) and acrylamide contents[J]. *Food Control*, 2021, 124: 107887.
- [18] SEBASTIAN A, GHAZANI S M, MARANGONI A G. Quality and safety of frying oils used in restaurants[J]. *Food Research International*, 2014, 64: 420–423.
- [19] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB/T 5527-2010 动植物油脂折光指数的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB/T 5527-2010 Animal and vegetable fats and oils-Determination of refractive index[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
- [20] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.229-2016 食品安全国家标准 食品中酸价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.229-2016 National food safety standard. Determination of acid value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]

- [21] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.227-2016 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.227-2016 National food safety standard. Determination of peroxide value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [22] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.230-2016 食品安全国家标准 食品中羰基价的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.230-2016 National food safety standard. Determination of carbonyl value in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [23] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. GB 5009.202-2016 食品安全国家标准 食用油中极性组分(PC)的测定(制备型快速柱层析法)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. GB 5009.202-2016 National food safety standard. Determination of polar component(PC) in food (preparative rapid column chromatography)[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [24] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.27-2016 食品安全国家标准 食品中苯并(a)芘的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016. [State Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China, China Food and Drug Administration. GB 5009.27-2016 National food safety standard. Determination of benzo(a) pyrene in food[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.]
- [25] 中国检验检疫科学研究院, 浙江九安检测科技有限公司. BJS 201712 食用油脂中脂肪酸的综合检测法[S]. [Chinese Academy of Inspection and Quarantine, Zhejiang Jiuan Testing Technology Co., Ltd. BJS 201712 Comprehensive determination of fatty acids in edible oils[S].]
- [26] 郑熠斌, 黄百芬, 任一平. 正相高效液相色谱法测定食物中 8 种维生素 E 异构体及维生素 A[J]. 色谱, 2016, 34(7): 692-696. [ZHENG Y B, HUANG B F, REN Y P. Simultaneous determination of eight vitamin E isomers and vitamin A in foods by normal-phase high performance liquid chromatography[J]. *Chinese Journal of Chromatography*, 2016, 34(7): 692-696.]
- [27] WAGHMARE A, PATIL S, LEBLANC J G, et al. Comparative assessment of algal oil with other vegetable oils for deep frying[J]. *Algal Research*, 2018, 31: 99-106.
- [28] 辛莉, 施江. 食用油品种及含量与油脂折射率关系的探究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(15): 317-321. [XIN L, SHI J. Analysis of edible oil species using the grease refractive index[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(15): 317-321.]
- [29] NAYAK P K, DASH U M A, RAYAGURU K, et al. Physicochemical changes during repeated frying of cooked oil: A review[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2016, 40(3): 371-390.
- [30] CASAL S, MALHEIRO R, SENDAS A, et al. Olive oil stability under deep-frying conditions[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2010, 48(10): 2972-2979.
- [31] HASSANIEN M F R, SHAROBA A M. Rheological characteristics of vegetable oils as affected by deep frying of French fries[J]. *Journal of Food Measurement & Characterization*, 2014, 8(3): 171-179.
- [32] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. GB 2716-2018 食品安全国家标准 植物油[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018. [National Health Commission of the People's Republic of China, State Administration for Market Regulation. GB 2716-2018 National food safety standard. Vegetable oil[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.]
- [33] 王凤娟, 童新雨, 夏晓雨, 等. 模拟不同烹饪温度对红松籽油品质的影响及主成分分析[J]. 北京林业大学学报, 2019, 41(11): 116-124. [WANG F J, TONG X Y, XIA X Y, et al. Effects of simulated different cooking temperatures on the quality of Korean pine seed oil and principal component analysis[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2019, 41(11): 116-124.]
- [34] 王云超, 董华, 高健, 等. 煎炸专用调和油稳定性研究[J]. 现代食品, 2021(9): 139-140. [WANG Y C, DONG H, GAO J, et al. Study on the stability of special blend oil for frying[J]. *Modern Food*, 2021(9): 139-140.]
- [35] 魏学鼎, 陈玉, 高盼, 等. 稻米油与其他 4 种常见煎炸油的煎炸性能比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(12): 50-55. [WEI X D, CHEN Y, GAO P, et al. Comparison of frying performance between rice oil and other four common frying oils[J]. *Cereals & Oils*, 2021, 34(12): 50-55.]
- [36] 张棚, 李颖, 汪勇, 等. 亚麻籽油和棕榈液油煎炸油条过程中的品质变化[J]. 中国油脂, 2021, 46(7): 41-47. [ZHANG X, LI Y, WANG Y, et al. Quality changes in frying of deep-fried dough sticks using flaxseed oil and palm olein[J]. *China Oils and Fats*, 2021, 46(7): 41-47.]
- [37] 翟金玲, 陈季旺, 夏文水, 等. 加热温度及时间对食用煎炸油品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, 6(8): 3247-3254. [ZHAI J L, CHEN J W, XIA W S, et al. Quality changes in frying of deep-fried dough sticks using flaxseed oil and palm olein[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2015, 6(8): 3247-3254.]
- [38] SUN X, WANG Y, LI H, et al. Changes in the volatile profile, fatty acid composition and oxidative stability of flaxseed oil during heating at different temperatures[J]. *LWT*, 2021, 151: 112137.
- [39] 宋丽娟, 于修焯, 张建新, 等. 煎炸油在薯片煎炸过程中的品质变化[J]. 食品科学, 2011, 32(5): 70-74. [SONG L J, YU X Z, ZHANG J X, et al. Quality changes of frying oil during potato chips frying[J]. *Food Science*, 2011, 32(5): 70-74.]
- [40] DEBNATH S, RASTOGI N K, KRISHNA A G G, et al. Effect of frying cycles on physical, chemical and heat transfer quality of rice bran oil during deep-fat frying of poori: An Indian traditional fried food[J]. *Food & Bioproducts Processing*, 2012, 90(2): 249-256.
- [41] 解久莹, 张翔宇, 吴永强, 等. 煎炸油使用安全及有害成分控制研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(15): 333-338. [XIE J Y, ZHANG X Y, WU Y Q, et al. Research progress of safety and harmful component control in frying oil[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(15): 333-338.]
- [42] 杨佳宁, 陈海涛, 田文秀, 等. 以棉籽油为基料油的煎炸专

- 用调和油煎炸品质的研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(16): 71-75. [YANG J N, CHEN H T, TIAN W X, et al. Quality changes of special frying blend oil based on cottonseed oil[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(16): 71-75.]
- [43] 冯亚净, 王瑞鑫, 李书国. 食品中苯并芘的来源及减控方法的研究[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(2): 72-75. [FENG Y J, WANG R X, LI S G. Review on the sources and reducing strategies of benzo (a) pyrene in foods[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(2): 72-75.]
- [44] 宿时, 杨雅新, 钱志伟, 等. 冷榨花生油在煎炸过程中的品质变化[J]. 食品科技, 2020, 45(6): 239-243. [SU S, YANG Y X, QIAN Z W, et al. Quality change of cold-pressed peanut oil during frying[J]. Food Science and Technology, 2020, 45(6): 239-243.]
- [45] 于梦丹, 祝婷婷, 苏沛, 等. V_E 在棕榈油煎炸过程中的损耗及其对煎炸油品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(18): 21-26. [YU M D, ZHU T T, SU P, et al. V_E loss and its effect on the quality and stability of palm oil during frying[J]. Food Science, 2020, 41(18): 21-26.]
- [46] OLEG S, ANNA S, IRINA E. Effect of biologically active substances on oxidative stability of flaxseed oil[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(1): 243-252.