

煎炸过程中食用油品质劣变及改善措施的研究进展

赵英男^{1,2}, 柴成梁¹, 朱莹丹¹, 刘妍妍², 薛雅琳¹, 段章群¹

(1. 国家粮食和物资储备局科学研究院 粮油加工研究所, 北京 100037;

2. 黑龙江八一农垦大学 食品学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要:煎炸是一种常用的食物烹饪方式,但在煎炸过程中食用油会发生品质劣变,危害人体健康。综述了食用油煎炸过程中影响油脂品质劣变的因素,包括煎炸油种类、煎炸时间、煎炸温度、煎炸食材,介绍了煎炸过程对油脂中总极性组分、反式脂肪酸、丙烯酰胺及3-氯丙醇酯和缩水甘油酯等有害物质生成的影响,提出可通过分类煎炸、不同种类食用油的调和及添加抗氧化剂等措施改善煎炸油品质。煎炸油的使用过程中应关注造成品质劣变的因素,并采用适当措施提升煎炸油的煎炸稳定性,以保障消费者的健康,促进煎炸食品行业的健康发展。

关键词:煎炸;食用油;品质;有害物质;改善措施

中图分类号:TS201.6;TS207.7 文献标识码:A 文章编号:1003-7969(2025)01-0078-06

Research progress on the deterioration of edible oil quality during frying and its improvement measures

ZHAO Yingnan^{1,2}, CHAI Chengliang¹, ZHU Yingdan¹,
LIU Yanyan², XUE Yalin¹, DUAN Zhangqun¹

(1. Institute of Cereal & Oil Science and Technology, Academy of National Food and strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China; 2. College of Food, Heilongjiang Bayi Agricultural Reclamation University, Daqing 163319, Heilongjiang, China)

Abstract: Frying is a common method of cooking food, but during the frying process, the quality of edible oil can deteriorate, posing a risk to human health. The factors affecting the deterioration of oil quality during the frying process were summarized, including the type of frying oil, frying time, frying temperature, and frying ingredients. The effects of the frying process on the generation of harmful substances in the oil, such as total polar compounds, *trans* fatty acids, acrylamide, 3-chloropropanol esters, and glycidyl esters were introduced. Measures such as categorized frying, blending of different types of edible oils, and the addition of antioxidants were proposed to improve the quality of frying oils. Attention should be paid to the factors causing quality deterioration during the use of frying oil, and appropriate measures should be adopted to enhance the frying stability of frying oil, thereby safeguarding consumer health and promoting the healthy development of frying food industry.

Key words: frying; edible oil; quality; harmful substances; improvement measures

煎炸是食品加工中常用的方法之一,煎炸食品

收稿日期:2023-04-12;修回日期:2024-09-06

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项课题(ZX2223)

作者简介:赵英男(1999),女,硕士研究生,研究方向为食品加工(E-mail)zyn3123@126.com。

通信作者:段章群,副研究员,博士(E-mail)dzq@ags.ac.cn。

在食品工业尤其是在快餐行业中占据了很重要的地位,比如薯条、薯片、油条、方便面等。据统计,我国餐饮行业中食用油的年消费总量有1/3用于煎炸^[1]。目前我国常用的煎炸用油有植物油、动物油、氢化植物油等。煎炸一方面会使食材的物理化学特性发生改变,赋予其独特的香气和酥脆口感,但另一方面,在高温煎炸过程中,在空气、水分存在的

条件下煎炸油会发生一系列复杂的化学反应,包括水解、氧化、异构化、热聚合和裂解等,产生氧化聚合物、过氧化物、游离脂肪酸等有害物质^[2],这些有害物质不仅降低油脂品质,还会影响煎炸食品的营养价值^[3]。随着消费者食品安全意识的增强,如何有效控制煎炸油中有害物质的产生,延长煎炸油的使用寿命,保证煎炸油的安全性已成为消费者、科技人员、煎炸食品生产商共同关注的问题^[4]。本文综述了煎炸过程中煎炸油种类、煎炸时间、煎炸温度与煎炸食材对煎炸油品质劣变及有害物质生成的影响,总结了改善煎炸油品质的措施,以期为我国煎炸油品质的提升提供参考。

1 煎炸过程中油脂品质劣变影响因素

1.1 煎炸油种类

不同油脂的脂肪酸组成不同,其作为煎炸油的煎炸寿命及煎炸过程各阶段理化指标的变化也不同。吴晓静等^[5]分别用大豆油、棕榈油煎炸薯条、鸡块等食材,结果发现,煎炸过程中大豆油黏度比棕榈油黏度增加得快。张栩等^[6]以亚麻籽油和棕榈液油作为煎炸油煎炸油条,通过测定煎炸过程中煎炸油的理化指标发现,在煎炸4 h内亚麻籽油的极性化合物含量低于棕榈液油的,但亚麻籽油在煎炸13 h后极性化合物含量达到了27.78%,而棕榈液油在煎炸18 h后极性化合物含量为27.27%。魏学鼎等^[7]在180℃下分别使用稻米油、棕榈油、棉籽油、葵花籽油和大豆油煎炸土豆,通过对比煎炸过程中不同油脂的酸值、极性组分含量、脂肪酸组成等指标的变化发现,在相同煎炸条件下稻米油氧化稳定性最好,棕榈油脂肪酸组成最稳定,葵花籽油营养物质保留情况较好。

1.2 煎炸时间

随着煎炸时间的延长,煎炸油中极性组分含量、酸值等会持续升高,一定时间后可能会达到或超过国标限量值。厉玉婷等^[1]研究发现,在连续煎炸12 h时棕榈油的极性组分含量为24.1%,接近27%的国标限量值,且豆腐煎炸油的色泽变化最明显,由煎炸8 h的褐色变为煎炸20 h的深褐色。刘玉兰等^[8]研究发现,大豆油在煎炸油条32 h时极性组分含量超过国标限量值,为27.11%。张菁菁等^[9]通过亚麻籽油煎炸马铃薯的实验发现,煎炸时间超过30 h后亚麻籽油品质劣变严重,达到使用极限。张栩^[10]通过亚麻籽油和棕榈液油煎炸油条实验发现,随着煎炸时间的延长,2种油脂的酸值均明显升高,亚麻籽油煎炸13 h后酸值(KOH)从0.11 mg/g增加到0.34 mg/g,棕榈液油煎炸18 h后酸值(KOH)由

0.30 mg/g增加到0.80 mg/g。Xin等^[11]使用12种植物油煎炸薯条发现,12种植物油的酸值和极性组分含量均随着煎炸时间的延长而持续升高,其中花生油在煎炸5 d后酸值(KOH)超过国标限量,为8.96 mg/g。煎炸时间越长,甘油三酯在高温下水解产生的游离脂肪酸越多,油脂的酸值升高越多,另外,煎炸时间越长,油脂的氧化产物氢过氧化物会发生降解和聚合,产生大量的醛、酮和酸^[12-13],也会造成酸值升高。综上所述,煎炸时间越长,煎炸油稳定性越差。

1.3 煎炸温度

煎炸温度是影响油脂理化性质重要因素之一。张乐^[14]研究发现,棕榈油的酸值、过氧化值、茴香胺值随着煎炸温度的升高而增大。樊之雄^[15]研究了150、180℃和210℃下棕榈油煎炸过程中过氧化值的变化情况,结果表明,相同时间内,煎炸温度越高、油脂过氧化值越大,210℃下煎炸10 h时,棕榈油的过氧化值达到10.2 mmol/kg,而150℃和180℃下煎炸10 h,棕榈油的过氧化值分别为5.2 mmol/kg和5.7 mmol/kg。符海琰等^[16]以稻米油为煎炸油分别在170、200、230℃进行薯条煎炸实验,测定煎炸油极性组分含量和酸值变化,结果发现,随着煎炸温度的升高,煎炸油的极性组分含量和酸值升高越快,油脂品质越差。邵琳雅等^[17]分别在170℃和200℃下用亚麻籽油煎炸薯条发现,煎炸温度越高亚麻籽油品质劣变越严重,在煎炸温度为200℃时 α -亚麻酸反式异构体含量增加趋势更明显。郝乾有^[18]分别在170℃和190℃下用玉米油煎炸食材,发现在相同煎炸时间下煎炸温度较低的油脂酸值和羰基值升高较慢,这说明煎炸温度低时玉米油的品质劣变速度慢。由此可见,煎炸温度较高时,油脂品质劣变速率加快。

1.4 煎炸食材

煎炸食材对煎炸油的品质劣变周期也有不同程度的影响。我国最常见的煎炸食材主要有以油条为主的面粉基食材,以鸡翅、鸡柳为主的肉类食材,以薯条为主的植物淀粉基食材,以及豆腐类的高含水量食材^[19]。煎炸过程中,不同食材中的物质如脂肪、水、糖和盐等从食材中转移到煎炸油中,这些物质会影响煎炸油品质劣变的速率^[20]。侯利霞等^[21]以玉米油间歇煎炸薯条、豆腐、鸡翅和油条8 h,发现酸值(KOH)增大程度的顺序为豆腐煎炸油(1.23 mg/g) > 薯条煎炸油(1.06 mg/g) > 鸡翅煎炸油(1.00 mg/g) > 油条煎炸油(0.31 mg/g),羰基值增大程度的顺序为鸡翅煎炸油(32.00 meq/kg) > 薯条煎炸油(29.56 meq/kg) > 豆腐煎炸油(23.03 meq/kg) >

油条煎炸油(21.28 meq/kg)。刘玉兰等^[22]通过实验发现,间歇煎炸 15 h 后,鸡翅煎炸油的极性组分含量增幅最大,含量达到 26.27%,增幅最小的是豆腐煎炸油,极性组分含量为 14.67%。王星晔等^[23]通过实验发现,煎炸不同食材 18 h 时,食材对高油酸菜籽油的酸值、过氧化值、碘值、极性组分含量影响大小顺序均为土豆、鸡柳、豆腐。张家枫等^[24]使用花生油连续煎炸油条、薯条、鸡翅、豆腐 32 h,发现极性组分含量最大的为空白煎炸油(47.02%),最小的为豆腐煎炸油(15.50%)。王莹辉等^[25]用米糠油间歇煎炸薯条、鸡翅、豆腐、油条 8 h,通过测定油脂相应指标变化发现,豆腐煎炸油酸值(KOH)增加最大,由初始的 2.09 mg/g 增加到 2.66 mg/g,油条煎炸油的羰基值增加最大,从初始的 9.47 meq/kg 增加到 43.56 meq/kg。

2 煎炸对有害物质生成的影响

2.1 总极性组分

总极性组分(TPC)是食用油在高温煎炸下形成的劣变产物之一,是评价油脂劣变的代表性指标。煎炸过程中影响油脂 TPC 含量的因素有很多,如煎炸时间与煎炸温度、煎炸食材与煎炸油的种类、煎炸过程中是否添加新油等。Farhoosh 等^[26]研究发现,葵花籽油的 TPC 含量随着煎炸时间的延长而增加,煎炸 32 h 后 TPC 含量由初始的 2.8% 增加到 28.9%。Houhoula 等^[27]通过实验发现,随着煎炸时间的延长和煎炸温度的升高,棉籽油的 TPC 形成速率常数也不断增加。卫星华等^[28]研究发现,不同类型的食用油在煎炸过程中,煎炸时间、煎炸量、油脂的单不饱和脂肪酸含量和煎炸食品的碳水化合物含量与煎炸油中极性组分含量呈正相关。冯红霞等^[29]研究发现,无论是煎炸油还是煎炸食品,TPC 含量均会随着煎炸次数的增加而增加。Xu 等^[30]用棕榈油、菜籽油和高油酸葵花籽油煎炸薯条、鸡块和鱼块,发现以 TPC 含量达到 27% 为煎炸终点时,薯条煎炸油的煎炸时间最长,为 199 h,这是由于薯条煎炸过程中淀粉-脂肪酸络合物的形成可以抑制脂类进一步氧化。TPC 分为氧化产物和水解产物两大类。其中氧化甘油三酯寡聚物(oxTGO)、氧化甘油三酯二聚物(oxTGD)和氧化甘油三酯单体(oxTGM)为甘油三酯的氧化产物,甘油二酯(DG)、甘油单酯(MG)和游离脂肪酸(FFA)为甘油三酯的水解产物。oxTGO 与 oxTGD 是通过甘油三酯自由基之间的聚合反应产生的,但由于聚合反应的复杂性,oxTGO 与 oxTGD 的结构和形成过程如今仍是研究难点。

Billek^[31]通过动物实验发现,所有极性组分中 oxTGM 在体内的毒性最强。Kmieciak 等^[32]在煎炸薯条实验中发现,棕榈油中产生的 oxTGO 和 oxTGD 相对于菜籽油要少。目前我国对煎炸油中 TPC 的研究主要集中在其总量上,而对其组分有待进一步深入研究。

2.2 反式脂肪酸

反式脂肪酸是由顺式不饱和脂肪酸在一定条件下异构化形成的,可在体内长期积累,不仅影响婴儿和儿童的生长发育,还会引发心脏病、血栓、2 型糖尿病、癌症等^[33]。李桂华等^[34]通过大豆油的煎炸实验表明,高温煎炸条件不仅使顺式不饱和脂肪酸转化为相应的反式脂肪酸,而且还降低了油脂中必需脂肪酸的含量。夏季亮等^[35]研究发现,随着煎炸温度的升高和煎炸时间的延长,花生油中的多不饱和脂肪酸含量减少,反式脂肪酸含量增加。杨雪莲等^[36]用葵花籽油、大豆油、菜籽油、棕榈油、花生油进行油条煎炸实验,发现食用油中反式脂肪酸含量随煎炸时间的延长而增加,其中葵花籽油中反式亚油酸最多,花生油中反式油酸含量最低,大豆油中反式脂肪酸含量无显著变化。

2.3 丙烯酰胺

煎炸富含淀粉和天冬酰胺的食材,如谷物、土豆时,容易生成丙烯酰胺。目前丙烯酰胺的形成途径主要分为与美拉德反应相关的天冬酰胺途径和丙烯醛或丙烯酸通过与氨反应的非天冬酰胺途径。煎炸过程中,食用油的种类、煎炸温度和煎炸时间对丙烯酰胺的形成均有一定的影响。Capuano 等^[37]在 180 °C 下进行的模拟煎炸实验表明,棕榈油体系形成的丙烯酰胺明显少于葵花籽油体系。李进伟等^[38]通过棕榈油煎炸马铃薯片实验发现,煎炸温度的升高和煎炸时间的延长均会导致棕榈油中丙烯酰胺含量升高,且其过氧化值、酸值、羰基值、茴香胺值均与丙烯酰胺存在相关性。

2.4 3-氯丙醇酯和缩水甘油酯

油脂在高温煎炸过程中可能会生成 3-氯丙醇酯(3-MCPDE)和缩水甘油酯(GE),3-MCPDE 和 GE 本身没有毒性,但是它们在体内代谢时分别转化为具有肾毒性和生殖毒性的 3-氯丙醇和具有遗传毒性和致癌性的缩水甘油,3-氯丙醇和缩水甘油分别被国际癌症研究机构明确为 2B 级和 2A 级致癌物。里南^[39]研究发现,煎炸油中的 3-MCPDE 和 GE 会迁移至煎炸食品中,从而危害消费者健康。张渊博等^[40]用高油酸葵花籽油作为煎炸油煎炸鱼排、鸡块和薯片,发现煎炸后高油酸葵花籽油中 3-

MCPDE 和 2-MCPDE 有明显的生成,且 3-MCPDE 的生成与降解的动态变化与煎炸食材的种类有关。刘玉兰等^[22]用花生油以连续煎炸和间歇煎炸 2 种方式对油条、薯条、鸡翅、豆腐进行煎炸,结果表明,连续煎炸 16 h 的花生油中 3-MCPDE、GE 含量的增加值普遍低于间歇煎炸 15 h 的花生油。Zhang 等^[41]在不同的煎炸温度下用棕榈油煎炸鸡胸肉发现,高温在一定程度上促进了棕榈油中 3-MCPDE 的形成,在较高的煎炸温度下,棕榈油中的 GE 降解更快。综上,煎炸食材、煎炸方式及煎炸温度对食用油煎炸过程中 3-MCPDE 的生成都具有一定的影响。

3 改善煎炸过程中食用油品质的措施

3.1 分类煎炸

在实际煎炸过程中,大部分人都是将不同种类的食材放到一起煎炸,这会使煎炸油色泽加深,煎炸寿命缩短。于燕等^[42]将荤素食材分别在两口锅中进行煎炸,考察荤素分类煎炸对油脂品质的影响,结果表明,肉类和蔬菜原料分类煎炸可以更好地抑制油脂色泽、酸值、茴香胺值和极性组分等的增加,并延长了油脂的使用寿命。这是因为分类煎炸的炸锅中食材单一,发生的化学反应较为简单,如素锅中主要是碳水化合物与油脂发生反应,荤锅中主要是蛋白质与油脂发生反应,相对于不分类煎炸,分类煎炸发生的美拉德反应少,从而产生较少的黑色大分子物质类黑精,延缓煎炸油色泽加深及极性组分上升等品质劣变^[43]。但分类煎炸方式较为烦琐,成本比较高,商业应用受限。

3.2 不同种类食用油的调和

饱和脂肪酸含量高的油脂具有较好的起酥性,但熔点高、可操作性差,而且过量摄入会对心血管健康产生不良影响;不饱和脂肪酸含量高的油脂在高温煎炸过程中更容易氧化变质,进而产生有害物质。不同油脂的脂肪酸组成各异,在煎炸过程中的表现也不尽相同,因此将几种油脂按一定比例调配,制成脂肪酸组成平衡、起酥性能好的煎炸调和油是一种延缓煎炸油品质劣变有效途径。王云超等^[44]使用大豆油、菜籽油、葵花籽油和棕榈油配制煎炸专用调和油,对煎炸油煎炸过程中品质指标进行测定发现,此煎炸专用调和油煎炸稳定性好,使用寿命长,煎炸食品的感官品质好。杨佳宁等^[45]将棉籽油、大豆油、菜籽油和棕榈油按 10:5:3:2 的比例调和后煎炸薯条,发现调和油的煎炸寿命比棉籽油长 18 h,煎炸稳定性提高了 37%,煎炸薯条的平均含油率为 18%,煎炸食品感官品质好。

3.3 添加抗氧化剂

抗氧化剂通过捕获自由基、螯合金属离子、还原作用等达到延缓或抑制油脂氧化的目的^[46]。目前添加到煎炸油中的抗氧化剂根据来源分为人工合成抗氧化剂和天然抗氧化剂两大类,常用的人工合成抗氧化剂有特丁基对苯二酚(TBHQ)、丁基羟基茴香醚(BHA)和丁基羟基甲苯(BHT)等,天然抗氧化剂包括迷迭香提取物、茶多酚、维生素 E(V_E)等。于梦丹等^[47]在棕榈油中分别添加 1 000、4 000、8 000 mg/kg 的 V_E ,在 $(180 \pm 5)^\circ\text{C}$ 下间歇煎炸薯条实验,发现添加 4 000 mg/kg 和 8 000 mg/kg V_E 的棕榈油的煎炸寿命较空白煎炸油延长了 6.2 h 和 9.3 h,且 V_E 的添加可有效抑制煎炸油酸值的升高。弓玉红等^[48]将 BHA、维生素 C 和没食子酸丙酯(PG)3 种抗氧化剂分别添加到胡麻油中,然后在 180°C 下煎炸马铃薯,结果发现,BHA 对胡麻油酸值和过氧化值升高的抑制效果最好,通过响应面优化实验得出了效果最好的抗氧化剂配方为 BHA 添加量 0.015%、维生素 C 添加量 0.009%。亢敏等^[49]对 V_E 、迷迭香提取物和 TBHQ 3 种抗氧化剂在煎炸过程中抑制亚麻籽油品质劣变的效果进行了研究,结果表明,迷迭香提取物和 V_E 对亚麻籽油酸值和过氧化值升高有明显的抑制作用,可提高亚麻籽油煎炸稳定性。Alizadeh 等^[50]以迷迭香提取物为抗氧化剂,葵花籽油和棕榈油调和油(2 种油脂的质量比为 1:1)为煎炸油煎炸土豆片,结果发现,煎炸结束后,添加迷迭香提取物的调和油过氧化值(0.6 mmol/kg)、TPC 含量(12.2%)显著低于添加 TBHQ 的调和油(分别为 0.62 mmol/kg、12.6%),可见,迷迭香提取物可以显著延缓氢过氧化物的形成,且在延缓极性组分形成方面比 TBHQ 更有效。樊之雄等^[51]在 $(190 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下加热棕榈油,比较部分人工合成抗氧化剂和天然抗氧化剂的抗氧化效果,发现人工合成抗氧化剂和天然抗氧化剂中抗氧化效果最好的分别为 TBHQ 和 V_E ,最差的为 BHA 和植酸。Augustin 等^[52]将 TBHQ、BHT 和 BHA 分别添加到棕榈油中,在 200°C 下煎炸木薯薯片,发现 TBHQ 的抗氧化效果最好。Akhtar 等^[53]也发现相比于 BHT 和 BHA, TBHQ 可以更好地提高葵花籽油的热稳定性。综上,无论是添加合成抗氧化剂还是天然抗氧化剂均对煎炸油的稳定性和品质具有积极作用,但合成抗氧化剂潜在的毒性和安全问题使得消费者更倾向于天然抗氧化剂。

4 结 语

油脂煎炸过程中会发生品质劣变,产生的有害物质也会进入煎炸食品中,给消费者的健康带来一定的风险,因此建立煎炸油规范体系,寻找提升食用油煎炸稳定性的方法是十分重要的。控制食用油煎炸温度和煎炸时间,使用合适的食用油进行煎炸,在食用油中加入抗氧化剂等都是比较合适的方法。另外,我国应积极开展相关研究,规范和完善煎炸油的使用标准,以保障消费者的健康,促进煎炸食品行业的健康发展。

参考文献:

- [1] 厉玉婷,于艳艳,杨振东,等. 食用植物油煎炸过程中的品质变化[J]. 中国油脂, 2022, 47(2): 47-50.
- [2] 杨铭铎,邓云,石长波,等. 油炸过程与油炸食品品质的动态关系研究[J]. 中国粮油学报, 2006, 21(5): 93-97.
- [3] ZHANG Q, SALEH A S, CHEN J, et al. Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: A review [J]. Chem Phys Lipids, 2012, 165(6): 662-681.
- [4] 吴时敏. 煎炸过程中油脂质量评定[J]. 粮食与油脂, 2000(5): 33-35.
- [5] 吴晓静,李徐,杨培金,等. 大豆油和棕榈油在高温煎炸过程中流变特性研究[J]. 中国油脂, 2015, 40(12): 44-47.
- [6] 张栩,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): 41-47,68.
- [7] 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): 50-55,65.
- [8] 刘玉兰,安柯静,马宇翔,等. 煎炸油中极性组分与多环芳烃相关性研究[J]. 中国油脂, 2017, 42(6): 81-85.
- [9] 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.
- [10] 张栩. 亚麻籽油和棕榈液油在油条煎炸过程中的品质变化及其对肠道健康的影响研究[D]. 广州:暨南大学, 2021.
- [11] XIN L, HU M, MA X, et al. Selection of 12 vegetable oils influences the prevalence of polycyclic aromatic hydrocarbons, fatty acids, tocol homologs and total polar components during deep frying [J/OL]. J Food Compos Anal, 2022, 114: 104840 [2023-04-12]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2022.104840>.
- [12] 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.
- [13] TEKIN L, ADAY M S, YILMAZ E. Physicochemical changes in hazelnut, olive pomace, grapeseed and sunflower oils heated at frying temperatures [J]. Food Sci Technol Res, 2009, 15(5): 519-524.
- [14] 张乐. 棕榈油煎炸过程中品质变化研究[J]. 现代农业科技, 2018(12): 245, 252.
- [15] 樊之雄. 煎炸棕榈油品质变化及其对丙烯酰胺生成的影响[D]. 江苏 无锡:江南大学, 2012.
- [16] 符海琰,陈云波,秦飞,等. 煎炸过程中油脂劣变的影响因素研究[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 72-75.
- [17] 邵琳雅,耿聪,黄健花,等. 不同煎炸温度下亚麻籽油中 α -亚麻酸的反式异构化及其分布情况[J]. 中国油脂, 2020, 45(11): 84-87.
- [18] 郝乾有. 煎炸对玉米油品质及功能性成分影响的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2016.
- [19] 刘玉兰,安柯静,马宇翔,等. 不同食材煎炸过程极性组分与聚甘油酯变化的研究[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(3): 53-57.
- [20] JUAREZ 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 Control, 2011, 22(12): 1920-1927.
- [21] 侯利霞,马玉婷,刘玉兰,等. 煎炸不同食材对玉米油品质的影响[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2015, 36(5): 26-30.
- [22] 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.
- [23] 王星晔,高盼,王澍,等. 不同煎炸食材对高油酸菜籽油煎炸稳定性的影响[J]. 中国油脂, 2022, 47(5): 82-87.
- [24] 张家枫,刘玉兰,安柯静,等. 煎炸不同食材的花生油中极性组分与氧化甘油酯聚合物含量的相关性研究[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(7): 79-84.
- [25] 王莹辉,刘玉兰,田瑜,等. 不同煎炸食材对米糠油煎炸品质影响的研究[J]. 中国油脂, 2014, 39(11): 48-51.
- [26] FARHOOSH R, TAVASSOLI-KAFRANI M H. Polar compounds distribution of sunflower oil as affected by unsaponifiable matters of Bene hull oil (BHO) and tertiary-butylhydroquinone (TBHQ) during deep-frying [J]. Food Chem, 2010, 122(1): 381-385.
- [27] HOUHOULA D P, OREOPOULOU V, TZIA C. The effect of process time and temperature on the accumulation of polar compounds in cottonseed oil during deep-fat frying [J]. J Sci Food Agric, 2003, 83(4): 314-319.
- [28] 卫星华,董曼曼,李涛,等. 影响煎炸油中极性组分含

- 量的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(7): 1660-1664.
- [29] 冯红霞, 李杨, 隋晓楠, 等. 煎炸次数对大豆油及薯条脂质中极性组分的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 309-314.
- [30] XU L, YANG F, LI X, et al. Evaluation of polar compound distribution in edible oils under restaurant deep frying[J/OL]. J Food Compos Anal, 2022, 106: 104297 [2023-04-12]. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2021.104297>.
- [31] BILLEK G. Health aspects of thermoxidized oils and fats [J]. Eur J Lipid Sci Technol, 2000, 102(8/9): 587-593.
- [32] KMIECIK D, KOBUS - CISOWSKA J, KORCZAK J. The content of anti-nutritional components in frozen fried-potato products [J]. Food Sci Technol, 2017, 85: 275-282.
- [33] 赵元元, 胡本伦, 贾才华, 等. 煎炸油中反式脂肪酸和极性化合物检测方法及防控措施研究进展[J]. 中国油脂, 2021, 46(4): 84-91.
- [34] 李桂华, 韦利革, 李海龙. 煎炸条件对大豆油品质裂变的影响研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(4): 28-31.
- [35] 夏季亮, 陈玘玘, 吴晶. 煎炸时间与煎炸温度对花生油脂肪酸组成的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(7): 76-81.
- [36] 杨雪莲, 张翔宇, 谢建春, 等. 部分食品煎炸用油的反式脂肪酸比较[J]. 中国食品学报, 2021, 21(1): 327-333.
- [37] CAPUANO E, OLIVIERO T, ACAR O C, et al. Lipid oxidation promotes acrylamide formation in fat-rich model systems [J]. Food Res Int, 2010, 43(4): 1021-1026.
- [38] 李进伟, 樊之雄, 范柳萍, 等. 煎炸棕榈油质量指标的变化及其对丙烯酰胺形成的影响[J]. 中国油脂, 2013, 38(12): 33-35.
- [39] 里南. 食品中脂肪酸氯丙醇酯的污染调查与暴露评估[D]. 福州: 福建农林大学, 2012.
- [40] 张渊博, 王小三, 刘睿杰, 等. 高油酸葵花籽油煎炸过程中 MCPD 酯及缩水甘油酯的变化[J]. 中国油脂, 2018, 43(7): 87-91.
- [41] ZHANG J, ZHANG W, ZHANG Y, et al. Effects of food types, frying frequency, and frying temperature on 3-monochloropropane-1,2-diol esters and glycidyl esters content in palm oil during frying[J/OL]. Foods, 2021, 10(10): 2266 [2023-04-12]. <https://doi.org/10.3390/foods10102266>.
- [42] 于燕, 金周永, 卞海霞, 等. 荤素分类煎炸对油脂品质的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(2): 25-28.
- [43] 朱姝. 重复使用煎炸油的质量监控研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [44] 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, 158.
- [45] 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.
- [46] SHARMA S, CHENG S F, BHATTACHARY B, et al. Efficacy of free and encapsulated natural antioxidants in oxidative stability of edible oil; Special emphasis on nano emulsion-based encapsulation [J]. Trends Food Sci Technol, 2019, 91: 305-318.
- [47] 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.
- [48] 弓玉红, 王沛娟, 李俊, 等. 抗氧化剂对胡麻油煎炸品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(7): 49-52, 61.
- [49] 亢敏, 党玲. 不同抗氧化剂对亚麻籽油煎炸品质的影响[J]. 粮食科技与经济, 2019, 44(12): 59-60.
- [50] ALIZADEH L, NAYEBZADEH K, MOHAMMADI A. A comparative study on the *in vitro* antioxidant activity of tocopherol and extracts from rosemary and *Ferulago angulata* on oil oxidation during deep frying of potato slices[J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(1): 611-620.
- [51] 樊之雄, 刘元法, 陶涛, 等. 几种抗氧化剂控制煎炸棕榈油劣变的比较研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(4): 357-359.
- [52] AUGUSTIN M A, BERRY S K. Stability of tapioca chips fried in RBD palm olein treated with antioxidants[J]. J Am Oil Chem Soc, 1984, 61(5): 873-877.
- [53] AKHTAR H, TARIQ I, MAHMOOD S, et al. Effect of antioxidants on stability, nutritional values of refined sunflower oil during accelerated storage and thermal oxidation in frying [J]. Sci Ind Res, 2012, 47(2): 223-230.