

“煎炸食品品质调控及关键风险因子” 特约专栏文章之一

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2022.01.001

王兴国, 张晖, 吴港城. 煎炸食品的品质和风险因子研究最新进展[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(1): 1-9.

WANG X G, ZHANG H, WU G C. The current progress in research on the quality and new risk factors of fried foods[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2022, 30(1): 1-9.

# 煎炸食品的品质和风险因子 研究最新进展

王兴国, 张晖, 吴港城

(江南大学 食品学院, 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 如何让煎炸食品更美味、更健康是食品科学不断追求的目标。主要对影响煎炸食品风味、口感(质构)、吸油等品质和新风险因子等方面 2019—2022 的最新研究进展进行综述; 系统阐述其“宽钟罩”型的风味曲线的来源、演变及物质关系; 介绍口感(质构)的物理表征和影响机制, 以及煎炸食品的吸油机理和降低含油率的新技术; 并进一步对煎炸过程的甘油核心醛和单环氧脂肪酸两个风险因子的形成机制、检测分布、潜在毒性和影响因素的研究成果进行综述。为煎炸食品品质的改善和风险因子的控制提供参考。

**关键词:** 煎炸; 质构; 风味; 吸油; 甘油核心醛; 单环氧脂肪酸

中图分类号: TS221 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2022)01-0001-09

网络首发时间: 2022-01-07 15:42:24

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20220107.1328.023.html>

## The Current Progress in Research on the Quality and New Risk Factors of Fried Foods

WANG Xing-guo, ZHANG Hui, WU Gang-cheng

(School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

**Abstract:** How to make fried food more delicious and healthier is the goal that the field of food science is constantly pursuing. The Latest research progress(2019—2022) on the quality of fried food such as flavor, taste (texture), oil absorption and new risk factors was reviewed, and this article also systematically explained the origin, evolution and material relationships of the "wide bell" flavor curve. The physical characterization and influence mechanism of taste (texture) of fried foods were introduced, and the oil absorption mechanism of fried foods and new technologies to reduce oil content were also reviewed. The formation mechanism, detection distribution, potential toxicity and influencing factors of the two risk factors of glycerol core aldehydes and monoepoxy fatty acids during the frying process were also reviewed. This review could provide the reference for the improvement of fried food quality and the control of risk factors.

**Key words:** frying; texture; flavor; oil absorption; glycerol core aldehyde; monocycloxy fatty acid

收稿日期: 2021-11-09

作者简介: 王兴国, 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 研究方向为油脂加工与营养安全。E-mail: wxg1002@qq.com.

煎炸是家庭烹饪和餐饮业中一种非常普遍的食物加工方式,在食品工业中也有大规模的应用。煎炸食品一直深受全球消费者的喜爱,也是我国传统的食品之一。据初步统计,2016年我国食品年产值中煎炸食品超过2 500亿元。近年来,随着生活水平的提高,消费者对煎炸食品的质量和安全性提出了越来越高的要求,尤其是煎炸食品的安全性正日益受到消费者关注<sup>[1]</sup>。

煎炸食品的风味、口感(质构)和含油率是评价其品质的重要指标。风味是促成一种煎炸食品流行的重要因素,它是由不同阶段、不同物质反应形成的挥发性醛类、酮类、醇类及含氮含硫杂环化合物的累加、协同、融合和掩盖等共同作用形成的<sup>[2]</sup>。口感(质构)的形成主要分成两个阶段:第一阶段是组织软化阶段,第二阶段为外壳形成和硬化的阶段,表现为食品的硬度上升<sup>[3]</sup>,通常消费者喜欢酥脆的、嫩的和多汁的,不喜欢粗糙的、坚韧的质构。油脂在煎炸食物表面的吸附是一个复杂的过程,是煎炸过程食物与油脂之间的结构、化学和物理等变化的综合表现,随着煎炸的进行,油脂通过食物外壳孔隙向内部渗入或滞留在食物表面,引起食物中油脂含量增加油脂含量是煎炸食品的关键品质指标之一,它不仅影响煎炸食品的营养,还与煎炸食品的口感、风味等感官特征密切相关<sup>[4]</sup>。

油脂在高温煎炸过程中会发生聚合、氧化和水解等一系列复杂的化学反应,同时形成氧化、聚合和水解产物,这些物质的总和称为总极性化合物(Total polar compounds, TPC)<sup>[5-6]</sup>。跟茴香胺值、过氧化值、羰基值等其他理化指标相比,TPC值更能全面反应煎炸油的劣变情况,所以,TPC值被世界上大多数国家作为判断煎炸油劣变的关键指标<sup>[7-8]</sup>。根据我国GB 2716—2018《食品安全国家标准植物油》规定,TPC值达到27%是作为煎炸油的废弃标准之一。总极性化合物包括聚甘油酯、氧化甘油三酯、甘油二酯和甘油一酯等组分,研究发现总极性化合物各组分对人体的潜在危害性是有差异的<sup>[9-10]</sup>。如聚甘油酯的分子量大,人体摄入后难以消化吸收,最终容易直接排出体外;而氧化甘油三酯的消化和吸收率高,对人体的潜在毒性也比较大<sup>[11]</sup>。以外,深度煎炸

的后期还会产生丙烯酰胺、3-氯丙醇酯、缩水甘油酯和多环芳烃等危害因子,关于这些风险因子在煎炸过程中的变化已有报道<sup>[12-15]</sup>。因此,研究总极性化合物各组分在煎炸过程的变化、迁移显得尤为重要。

甘油核心醛是甘油三酯在高温情况中氧化产生的一类非挥发性醛类物质。甘油核心醛的形成受煎炸温度、脂肪酸组成和食物种类等因素影响<sup>[16]</sup>。与挥发性非甘油醛类不同,甘油核心醛会留在煎炸油中而被食物吸附,最终随着煎炸食品一起被消费者摄入,摄入的甘油核心醛在肠道分解出游离醛,致使机体产生羰基应激反应,进而危害身体健康<sup>[17-18]</sup>。

环氧脂肪酸是甘油三酯在煎炸过程中不饱和脂肪酸的环氧化反应形成的氧化产物,根据环氧的数量,环氧化合物可以分为单环氧、双环氧和三环氧化合物,油脂在高温煎炸条件下主要以单环氧化合物为主,但双环氧化合物和三环氧化合物的报道较少。前期研究表明,单环氧化合物在煎炸油中分布广泛,且具有吸收率高和潜在毒性大的特点,经常摄入含单环氧脂肪酸高的食品对人体健康产生一定的威胁<sup>[19-20]</sup>。

因此,本文从风味、质构、吸油、甘油核心醛和单环氧脂肪酸的角度对影响煎炸食品品质和风险因子进行综述,为保障煎炸食品的品质与控制关键风险因子提供理论指导和科学依据。

## 1 煎炸食品的风味

煎炸风味是由煎炸油中的脂肪酸与食物中的蛋白质、多糖、脂质经过脂质氧化、美拉德反应、焦糖化反应、氨基酸降解等一系列复杂的化学反应而形成的。呋喃、吡嗪和吡啶是煎炸油和煎炸食品中微量存在的典型香气化合物,而醛类是煎炸过程中最常见的挥发物<sup>[21]</sup>。此外,醇类和酸性物质也是煎炸食品中常见的风味物质,羧酸一般有油哈味、汗臭味,给煎炸食品带来不好的风味<sup>[1]</sup>。

前期研究表明油脂的种类对煎炸食品的风味有很大的影响,Ramirez等<sup>[22]</sup>发现,橄榄油煎炸的里脊肉产生较多的醛类物质,葵花籽油煎炸的样品以己醛为主,而黄油煎炸的样品以酮类物质为主。为了研究脂肪酸饱和度与煎炸关键风味物

质之间的关系, Xu 等<sup>[23]</sup>选择棕榈油、高油酸菜籽油和大豆油三种食用油, 用气相色谱-嗅觉仪测定了煎炸薯条的挥发性物质, 共鉴定出 26 种芳香化合物, 不饱和度较高的大豆油煎炸的薯条测定出较高含量的(E,E)-2,4-癸二烯醛, 有更强烈的油炸香味。

上世纪九十年代初, Blumenthal<sup>[24]</sup>提出了“煎炸质量曲线”表明煎炸过程煎炸食品的感官品质变化规律。他将煎炸分为三个阶段, 起始阶段煎炸食品的颜色和气味都很淡, 随着油的进一步降解, 进入了“最佳”阶段, 煎炸食品出现了诱人的金黄色和理想的风味, 再继续煎炸, 进入“废弃”阶段, 煎炸食品的色泽和风味也发生了很大的变化。煎炸质量曲线是根据煎炸食品的感官评价结果得到的, 但没有解释是什么化合物在三个阶段起决定作用, 香气化合物的定性定量信息也是缺失的。Xu 等<sup>[25]</sup>研究了不同煎炸油在长期煎炸过程中对薯条挥发性物质的影响, 结果显示不同油脂煎炸薯条的挥发性物质有较明显的差别。除亚麻籽油外, 随煎炸的进行, 其他油脂煎炸的薯条中, 来自油脂氧化的醛类化合物是呈增加趋势的, 而来自于美拉德反应的吡嗪类化合物则没有明显的变化规律。葵花籽油煎炸的薯条显示了最高的风味评分, 其中的醛类化合物以不饱和醛为主, 具有明显油炸香的反, 反-2,4-癸二烯醛在 18 h 时, 含量达到最大; 而棕榈油煎炸的薯条则含有较丰富的饱和醛, 己醛含量随煎炸时间而增加, 并呈现出不良的青香味。这些结果表明, 煎炸食品的风味有一个形成的过程, 并且与选择的煎炸油种类相关。

为了进一步验证上述结果, 我们又选取大豆油和高油酸菜籽油两种油脂煎炸薯条, 同时对煎炸薯条的风味特性进行了测定。结果表明, 大豆油和高油酸菜籽油煎炸的薯条的风味品质曲线呈现“宽钟罩”型, 有诱导期、相对较宽的最佳期以及劣变的降解期, 这与香味特征物质(E,E)-2,4-癸二烯醛的含量变化规律一致, 在煎炸前期, (E,E)-2,4-癸二烯醛含量慢慢上升, 进入诱导期, 再增加进入最佳期, 风味曲线延伸, 出现最佳风味稳定期, 在煎炸后期, 其含量逐渐下降, 而呈现不良风味的己醛、辛醛等饱和醛, 己酸、庚酸、

壬酸等低碳酸以及(E)-2-癸烯醛、(E)-2-十一烯醛和苯乙醛等含量却慢慢升高, 使煎炸薯条逐步有油脂味、青草味、酸败味和陈腐味等风味, 使煎炸食品的风味曲线迅速进入降解期, 当煎炸油的 TPC 值超过 22%时, 氧化作用引起的酸败味应加以控制<sup>[26-27]</sup>。

## 2 煎炸食品的质构

煎炸食品的质构与煎炸过程的传热与传质有关, 是非常复杂的过程。对流传热和传导传热是煎炸过程两种主要的热传递方式, 而失水和吸油是两种主要的传质类型<sup>[28]</sup>。

煎炸食品的制作通常涉及漂烫、预炸、冷冻和复炸等加工工序。可以看出, 煎炸食品的制作是多阶段的加工过程, 前一阶段的加工可能会导致最终产品的品质发生显著变化。先前的研究主要集中在漂烫、预干燥和冷冻对半成品和成品的质构、色泽和油含量影响, 而对加工过程每一道工序引起的品质变化缺乏系统研究。Li 等<sup>[29]</sup>研究了多阶段加工对马铃薯薯条的水分和油脂含量、色泽、质构、收缩率、微观结构的影响。结果表明, 冷冻处理对预炸薯条的水分含量、色泽和体积收缩率影响不大, 核磁共振成像显示复炸工序比其它加工工序使薯条的外壳更厚。

煎炸油是重要的传热介质, 不同煎炸油对煎炸食品品质的影响仍有争议。Kita 等<sup>[30]</sup>报道了薯片的质构和油含量受煎炸介质和油温的影响, 并发现薯片的质构主要依赖于煎炸油中的油酸含量。然而, Kim<sup>[31]</sup>等发现煎炸油种类对薯条的含油量没有显著影响。我们选取 10 种市售食用油, 研究了它们对薯条质构、体积收缩率、感官特性和微观结构的影响, 结果表明, 花生油煎炸的薯条, 体积收缩率较高, 棕榈油煎炸的薯条, 硬度和正峰面积都较高, 体积收缩率却低, 葵花油煎炸的薯条, 硬度值小<sup>[32]</sup>。为了探究煎炸油的饱和度对煎炸薯条的质构影响, 我们将精练菜籽油和完全氢化菜籽油按不同的比例进行调配, 得到 6 种不同饱和度煎炸油, 结果表明, 随着饱和度增加, 煎炸薯条的硬度、焓值和相对结晶度也显著增加。体视显微镜的结果也显示随着饱和度增加, 煎炸薯条的外壳厚度也略有增加。相关性分析结

果进一步证实煎炸薯条的硬度与油的饱和度呈显著的正相关<sup>[33]</sup>。

测定煎炸薯条质构主要有穿刺测试、压缩测试、三点弯曲以及折断测试等方法,关于这些方法与质构感官评定的结果有什么相关性的报道不多。我们分别选择10种商品煎炸薯条,比较了感官评定和5种仪器测试的有关质构数据的相关性,结果表明三点弯曲测试测得的质构数据变异系数最大且精密度不高,不适合用于评价煎炸薯条的质构;感官质构评定结果与压缩测试和穿刺测试测得的质构参数有强线性相关性,尤其是感官硬度、感官酥脆性与穿刺测试法测得总面积的相关性最强,而与配备HDP/VB探头的剪切测试没有显著相关性。因此,煎炸薯条质构的最适测试方法为穿刺测试<sup>[34]</sup>。

### 3 煎炸食品的吸油

煎炸过程中,油脂通过食物表面的孔隙向内部渗入或滞留在食物表面引起食物中油脂含量增加的现象称为油脂吸附现象。前期研究表明,油脂吸附的通道主要是食物中的水分蒸发使食物表面和内部形成的孔隙,其大小与水分损失有一定的相关性<sup>[35]</sup>。但是,也有研究结果表明,不能仅用水分损失来衡量油脂的吸附,水分替换作用、毛细管渗透作用、冷凝效应和表面活性剂理论是4种认可度较高油脂吸附机制,也反映了油脂吸附的不同原因<sup>[36-37]</sup>。

漂烫熟化和冷冻处理是煎炸食品常用的预处理方法,已经有多篇文献对漂烫熟化处理对煎炸食品吸油进行了报道,但是冷冻处理对煎炸食品吸油的影响报道却较少。Yang<sup>[38]</sup>等研究了常规冷冻预处理对煎炸薯条油脂吸附的影响,结果表明,与未冷冻预处理薯条相比,常规冷冻预处理的总油、表面油和结构油含量分别提高了10.05%、0.24%和10.29%,核磁共振实时成像发现,煎炸150s时,冷冻处理薯条中心部位出现了油信号,而未冷冻薯条中心部位出现油信号的时间推迟了210s,扫描电子显微镜观察发现,常规冷冻预处理使得煎炸薯条的表面变粗糙,内部结构破损严重,从而导致更多的油被吸附。

最近,微波、脉冲电场及真空干燥等新型技

术也越来越多的被用作煎炸食品的预处理。Yang<sup>[39]</sup>等研究了微波和真空干燥预处理对煎炸薯条的油脂吸附,结果表明,微波熟化和真空干燥都能降低煎炸薯条的油含量,并分析了可能原因,微波处理后薯条的水分无明显变化,但X衍射分析发现生成了高含量的V型淀粉脂质复合物,并且其含量随微波处理的时间而增加,形成的淀粉脂质复合物分布在煎炸薯条的表面,从而阻止了油脂的进一步渗入;而真空干燥处理后薯条的水分降低,并以减少自由水为主,扫描电子显微镜分析表明微波处理后薯条的结构更加致密,表面孔洞更少,因此,油炸后形成的外壳更致密厚实,薯条体积皱缩、孔隙变小,油脂含量降低。

中强度电场是指强度介于1~1000V/m之间的电场,中强度电场在食品领域主要用来提高活性物质的提取效率<sup>[40]</sup>。我们研究了在中强度电场条件下的虾仁和薯条煎炸,结果表明,中强度电场可以显著降低虾仁和薯条的含油量。扫描电子显微镜观察发现,与常规煎炸相比,中强度电场可以让煎炸食品的内部结构排布得更加整齐,内部结构也破损较少,其可能原因是电场的穿孔效应降低了水分从食品中蒸发所需的能量,从而使水分更容易从食品表面迁移出来,加速了淀粉糊化和蛋白变性,在食品表面形成一层致密且牢固的外壳,达到了减少吸油的效果<sup>[41-42]</sup>。

油脂的脂肪酸组成如何影响煎炸食品的吸油量仍然存在争议。Kita等<sup>[43]</sup>研究发现油脂吸附量随不饱和脂肪酸增加而增加,而Vitrac等<sup>[44]</sup>却提出在冷却过程粘度较大的油脂更易于吸附。此外,也有学者认为,煎炸食品油脂吸附量与油脂脂肪酸组成没有相关性<sup>[45]</sup>。因此,我们分析了10种植物油理化性质与煎炸薯条油脂吸附量的关系,结果显示,表面油、表面渗透油和总油量与油脂种类有显著性差异,而结构油含量却差异不显著,其中葵花籽油、玉米油煎炸薯条的总油含量较低,高油酸葵花籽油、高油酸菜籽油和菜籽油煎炸薯条的总油量较高,油脂的粘度是影响油脂吸附的最重要因素,而粘度与油酸含量是呈显著正相关,与亚油酸含量呈显著负相关<sup>[46]</sup>。

### 4 煎炸食品中甘油核心醛

上世纪九十年代,日本科学家 Kuki 首先提出核心醛概念,核心醛被认为是一种重要的、被忽视的脂质氧化产物<sup>[47]</sup>。核心醛是在不饱和脂肪酸氧化过程中形成的一类非挥发性高级醛,它们通常包括甘油酯核心醛、磷脂核心醛和甾醇酯核心醛。

甘油核心醛的形成也是遵循自由基链式反应,首先不饱和脂肪酸发生氧化,双键打开形成氢过氧化物,氢过氧化物的 O—O 键会发生均裂,产生羟自由基和烷氧自由基,烷氧自由基通过  $\beta$ -剪切,使相邻两侧的 C—C 键发生断裂,经两种途径形成不同的醛类化,其中 A 途径是形成与甘油骨架相分离的烷氧自由基碎片,它在后续氧化中形成不同碳链长度的游离脂肪醛,即挥发性的醛类化合物,而 B 途径形成仍然连接在甘油骨架上的烷氧自由基碎片,这一部分继续氧化,最终形成甘油核心醛。具体的反应途径如图 1 所示。

由图 1 可知,含有 9,10-不饱和和双键的油酸在高温下容易氧化产生 8-氢过氧基-顺-9-十八碳烯酸、9-氢过氧基-反-10-十八碳烯酸、10-氢过氧基

-反-8-十八碳烯酸和 11-氢过氧基-顺-9-十八碳烯酸等 4 种常见的氢过氧化物,它们经  $\beta$ -剪切后形成相应的 8-氧代辛酸、9-氧代壬酸、10-氧代-反-8-癸烯酸和 11-氧代-顺-9-十一碳烯酸的甘油核心醛。

Marmesat<sup>[48-49]</sup>等用二十一烷酸作内标通过甲酯化衍生对煎炸油中的羟基、酮基和环氧基脂肪酸进行定量,结果表明这些物质的含量约占总极性化合物的 6.7%~25.7%之间。也有研究者对氧化葵花籽油和氢化菜籽油进行甲酯化处理,再用 GC-MS 对处理过的样品进行分析和鉴定,结果表明 8-氧代辛酸(甲酯)、9-氧代壬酸(甲酯)、10-氧代-8-癸烯酸(甲酯)等甘油核心醛能被很好地鉴定出来,但精确定量仍需要对应的标品<sup>[50]</sup>。Berdeaux<sup>[51-52]</sup>等利用 GC-MS 从 180 °C 加热 15 h 的油酸甲酯和亚油酸甲酯中检测出 8-氧代辛酸(甲酯)和 9-氧代壬酸(甲酯)等甘油核心醛,并以十五烷酸甲酯作标样对其中的甘油核心醛进行了定量,结果显示有较好的准确性和精确性。

有研究报道,带醛基、羟基和氢过氧基的过

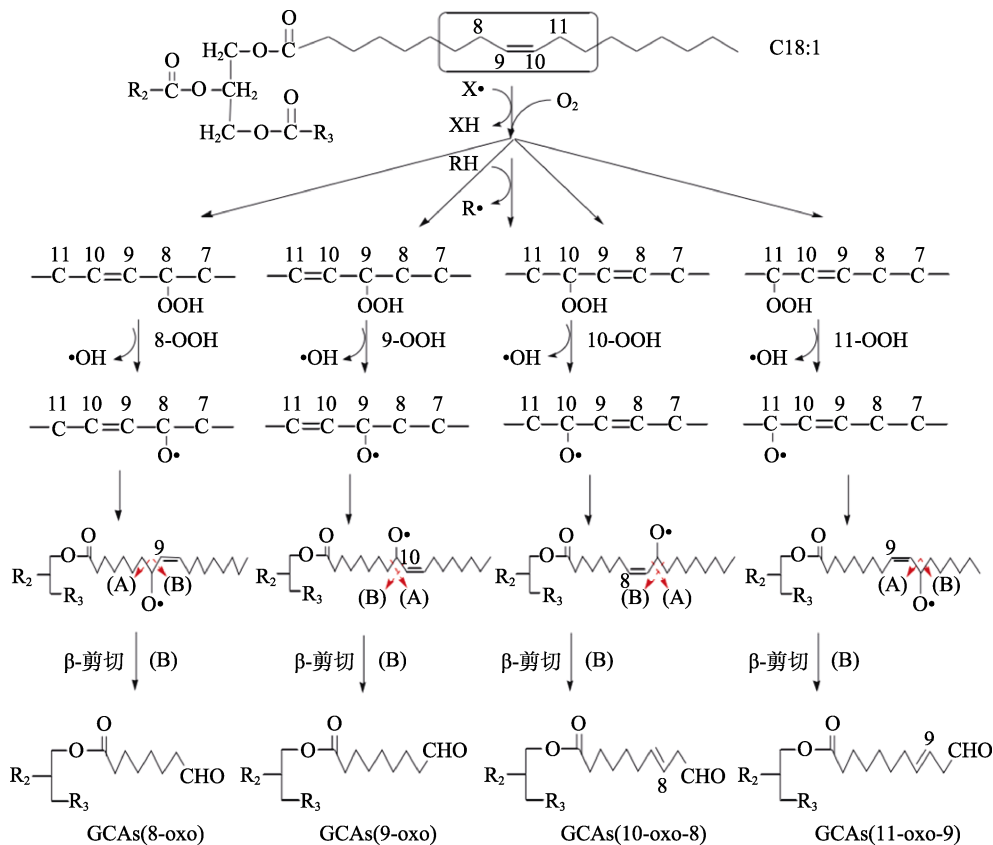


图 1 甘油核心醛的可能形成途径  
Fig.1 Formation mechanism of glycerol core aldehydes

氧化物有潜在的毒性,过氧化物在胃中被分解成醛类化合物被吸收,进而累积到肝脏,危害人体健康<sup>[53]</sup>。也有学者研究表明某些醛类物质在消化过程中是生物可接受的,并能进入体内循环<sup>[54]</sup>。与挥发性醛不同,甘油核心醛几乎全部残留在煎炸油中,或附着于煎炸食物上,并随食物摄入进入体内,再经消化系统酶解作用分解出游离脂肪醛,从而对机体产生伤害的风险。

有关煎炸过程甘油核心醛的研究大多针对煎炸油中甘油核心醛的定性和定量分析。Xu 等<sup>[55]</sup>分析了煎炸鸡块、鱼块和薯条 3 种食材,分别用菜籽油、高油酸葵花籽油和棉籽油 3 种煎炸油煎炸后的甘油核心醛含量,共检测出 8-氧代辛酸、9-氧代壬酸、10-氧代-反-8-癸烯酸 3 种核心醛,其中 9-氧代壬酸甘油核心醛约占甘油核心醛总量的 60%,3 种食材产生甘油核心醛总量的次序分别是鱼排>鸡块>薯条,这可能与食材的含水量有关;3 种油脂产生甘油核心醛总量的次序分别是高油酸葵花籽油≈菜籽油>棉籽油,这可能与油酸含量有关。王俏君<sup>[56]</sup>的研究也证实甘油核心醛含量与煎炸油的单不饱和脂肪酸含量呈极强正相关,而与多不饱和脂肪酸含量呈极强负相关。

## 5 煎炸食品中单环氧脂肪酸

单环氧脂肪酸是指脂肪酸不饱和双键氧化形成带有单环氧基团的脂肪酸,主要包括亚油酸环氧化生成的反-12,13-单环氧油酸(*trans*-12,13-EO)、顺-12,13-单环氧油酸(*cis*-12,13-EO)、反-9,10-单环氧油酸(*trans*-9,10-EO)和顺-9,10-单环氧油酸(*cis*-9,10-EO)4 种单环氧油酸,以及油酸环氧化生成的反-9,10-单环氧硬脂酸(*trans*-9,10-ES)和顺-9,10-单环氧硬脂酸(*cis*-9,10-ES)2 种单环氧硬脂酸。

对于煎炸过程单环氧脂肪酸的形成机制也是基于自由基链式反应理论来推测。高温下,不饱和脂肪酸的双键被氧化形成氢过氧化自由基,氢过氧化自由基将带有的单电子转移给邻近碳的氢原子上形成环氧基团和羟自由基,当邻近碳的氢原子是反式时,就形成了反-9,10-单环氧硬脂酸,顺式时,就形成了顺-9,10-单环氧硬脂酸;对于亚

油酸来说,原理是一致的,分别形成顺-9,10-单环氧油酸、反-9,10-单环氧油酸、顺-12,13-单环氧油酸和反-12,13-单环氧油酸<sup>[57-58]</sup>。

气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)常用来测定煎炸油中单环氧脂肪酸的含量。Berdeaux<sup>[57]</sup>等发现油酸甲酯经过高温氧化以后会形成顺-9,10-单环氧硬脂酸和反-9,10-单环氧硬脂酸,他们还从加热氧化的亚油酸甲酯样品的 GC-MS 图谱中发现比亚油酸甲酯分子量大 16 的 4 个峰,从而推测亚油酸甲酯样品可能含环氧基团,为了进一步验证上述结果,他们对样品进行了氢化处理,发现氢化后 4 个峰的出峰时间均发生了变化,最终通过 GC-MS 鉴定出 4 种单环氧脂肪酸。Velasco<sup>[59]</sup>等将葵花籽油在 180 °C 条件下加热 15 h,再进行氢化处理,氢化前后的谱图,从 6 个峰减少为 4 个峰,是因为顺-12,13-单环氧油酸和反-12,13-单环氧油酸经氢化后,分别转变为顺-12,13-单环氧硬脂酸和反-12,13-单环氧硬脂酸。环氧脂肪酸的定量通常选用奇数碳的烷酸甲酯(十三烷酸甲酯、十五烷酸甲酯、十九烷酸甲酯和二十一烷酸甲酯)作内标,这是因为天然植物油中主要存在偶数碳的脂肪酸。

迄今报道,含有顺-12,13-单环氧硬脂酸、顺-9,10-单环氧油酸和顺-9,10-单环氧硬脂酸等单环氧脂肪酸都存在潜在的生理学毒性。Jia 等<sup>[60]</sup>用顺-9,10-单环氧油酸对大鼠进行毒理实验,结果表明摄食顺-9,10-单环氧油酸后的大鼠会出现凝血、水肿出血、血管内充血、肺泡渗出、肺气肿等较严重的组织学恶变现象,并且与人类患急性呼吸窘迫综合症的症状类似。除动物试验外,Liu<sup>[61]</sup>等还利用细胞模型对顺-9,10-单环氧硬脂酸的潜在毒性进行了研究,结果发现它可以降低细胞活性并诱导细胞凋亡。

因为单环氧脂肪酸存在的潜在毒性,使人们对煎炸油的安全性提出了怀疑。Brühl<sup>[62]</sup>等在煎炸油、高温加热油和常温储藏食用油等 192 种油样中检测出单环氧脂肪酸。Velasco<sup>[59]</sup>等对 10 种从餐厅中收集的煎炸油的单环氧脂肪酸含量进行了测定,结果范围为 3.37~14.42 mg/g,同时发现单不饱和脂肪酸含量高的油脂形成单环氧脂肪酸的量要高于多不饱和脂肪酸含量高的油脂。周佳一等<sup>[63]</sup>

研究了不同油酸和亚油酸比例的油通过煎炸后单环氧脂肪酸的形成, 结果发现, 当油酸: 亚油酸=2: 1时, 单环氧脂肪酸总量和单环氧硬脂酸含量都最高, 煎炸 24 h 后, 分别达到 7.20、5.92 mg/g, 当油酸: 亚油酸=1: 2 时, 煎炸 24 h 后, 单环氧油酸含量达到 1.68 mg/g。

## 6 结论

综上所述, 目前国内外学者虽然对改善煎炸食品的风味、质构和吸油等方面做了大量工作, 但是主要集中在某一个品质的变化, 并没有综合考虑风味、质构和吸油三者之间的关系; 煎炸食品中甘油核心醛和单环氧脂肪酸的研究虽然取得了一些成果, 但煎炸温度、批次和煎炸量等因素如何影响以及如何控制这些关键风险因子的形成仍然欠缺。因此, 品质与安全兼顾的煎炸食品才能更好的满足消费者的诉求。

## 参考文献:

- [1] WU G, CHANG C, HONG 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.
- [2] CHANG C, WU G, ZHANG H, et al. Deep-fried flavor: characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2019, 1-19.
- [3] MOYANO P C, TRONCOSO E, PDDRESCHI F. Modeling texture kinetics during thermal processing of potato products[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(2): E102-E107.
- [4] GHIDURUS M, TURTOI M, BOSKOU G, et al. Nutritional and health aspects related to frying (I) [J]. *Romanian Biotechnological Letters*, 2010, 15(6): 5675-82.
- [5] LI X, WU G, HUANG J, et al. Kinetic models to understand the coexistence of formation and decomposition of hydroperoxide during lipid oxidation[J]. *Food Research International*, 2020, 136: 109314.
- [6] LI X, CHENG X, WU G, et al. Individual and combined effects of frying load and deteriorated polar compounds on the foaming of edible oil[J]. *Food Research International*, 2020, 134: 109206.
- [7] XU L, YANG F, LI X, et al. Kinetics of forming polar compounds in frying oils under frying practice of fast food restaurants[J]. *Lwt*, 2019, 115: 108307.
- [8] LI X, WU G, YANG F, et al. Influence of fried food and oil type on the distribution of polar compounds in discarded oil during restaurant deep frying[J]. *Food chemistry*, 2019, 272: 12-17.
- [9] LI X, WU G, WU Y, et al. Effectiveness of the rapid test of polar compounds in frying oils as a function of environmental and compositional variables under restaurant conditions[J]. *Food chemistry*, 2020, 312: 126041.
- [10] LI X, CHENG X, WU G, et al. Individual and combined effects of frying load and deteriorated polar compounds on the foaming of edible oil[J]. *Food Research International*, 2020, 134: 109206.
- [11] LI X, WU G, YANG F, et al. Influence of fried food and oil type on the distribution of polar compounds in discarded oil during restaurant deep frying[J]. *Food chemistry*, 2019, 272: 12-17.
- [12] ZHOU H, JIN Q, WANG X, et al. Effects of temperature and water content on the formation of 3-chloropropane-1, 2-diol fatty acid esters in palm oil under conditions simulating deep fat frying[J]. *European Food Research and Technology*, 2014, 238(3): 495-501.
- [13] ZHU Y, LI X, HUANG J, et al. Correlations between polycyclic aromatic hydrocarbons and polar components in edible oils during deep frying of peanuts[J]. *Food Control*, 2018, 87: 109-116.
- [14] XU L, ZHANG Y, GONG M, et al. Change of fatty acid esters of MCPD and glycidol during restaurant deep frying of fish nuggets and their correlations with total polar compounds[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2020, 55(7): 2794-2801.
- [15] QI Y, ZHANG H, WU G, et al. Reduction of 5-hydroxymethyl-furfural formation by flavan-3-ols in Maillard reaction models and fried potato chips[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(14): 5294-5301.
- [16] 王俏君, 赵晨伟, 吴港城, 等. 煎炸油中核心醛的 GC-MS 分析及变化趋势研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(10): 90-94.  
WANG Q, ZHAO C, WU G, et al. GC-MS analysis and change trend of core aldehydes in frying oil[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(10): 90-94.
- [17] YAO L. Development of new methods for analyzing lipid oxidation: Accelerated solvent extraction and HPLC-DNPH analyses of carbonyl oxidation products[D]. Rutgers University-Graduate School-New Brunswick, 2015.
- [18] WU G, HAN S, ZHANG Y, et al. Effect of phenolic extracts from *Camellia oleifera* seed cake on the formation of polar compounds, core aldehydes, and monoepoxy oleic acids during deep-fat frying[J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131143.
- [19] 周佳一, 赵晨伟, 金青哲, 等. 油酸与亚油酸比例对煎炸油中单环氧脂肪酸单体含量的影响[J]. *中国油脂*, 2020, 44(10): 80-84.  
ZhOU J, ZHAO C, JIN Q, et al. Effect of ratio of oleic acid to linoleic acid on the content of monoepoxy fatty acid in frying oil[J]. *China Oils and Fats*, 2020, 44(10): 80-84.
- [20] SAKAI T, ISHIZAKI T, OHNISHI T, et al. Leukotoxin, 9, 10-epoxy-12-octadecenoate inhibits mitochondrial respiration of isolated perfused rat lung[J]. *The American journal of physiology*, 1995, 269 (3 Pt 1): L326-31.
- [21] SGAHIDI F. *Bailey's industrial oil and fat products, edible oil and fat products: processing technologies* [M]. John Wiley &

- Sons, 2005.
- [22] RAMIREZ M R, ESTEVEZ M, MORCUENDE D, et al. Effect of the type of frying culinary fat on volatile compounds isolated in fried pork loin chops by using SPME-GC-MS [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2004, 52(25): 7637-7643.
- [23] XU L, WU G, JI X, et al. Influence of prolonged deep-frying using various oils on volatile compounds formation of French Fries using GC - MS, GC - O, and sensory evaluation[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2021, 98(6): 657-671.
- [24] BLUMENTHAL M M, STIER R F. Optimization of deep-fat frying operations [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1991, 2: 144-148.
- [25] XU L, JI X, WU G, et al. Influence of oil types and prolonged frying time on the volatile compounds and sensory properties of French Fries[J]. *Journal of Oleo Science*, 2021: ess20360.
- [26] 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]. *Food Chemistry*, 2022, 368: 130581.
- [27] XU, L, WU, G, HUANG, J, et al. Sensory-directed flavor analysis of key odorants compounds development of French Fries and oils in the break-in, optimum and degrading frying stage[J]. *Food Science and Human Wellness*, 2022,(accept).
- [28] ALVIS A, VELEV C, RADA-MENDOZA M, et al. Heat transfer coefficient during deep-fat frying[J]. *Food Control*, 2009, 20(4): 321-325.
- [29] LI P, WU G, YANG D, et al. Effect of multistage process on the quality, water and oil distribution and microstructure of French fries[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109229.
- [30] KITA A, LISINSKA G Y. The influence of oil type and frying temperatures on the texture and oil content of French fries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2005, 85(15): 2600-2604.
- [31] KIM J, KIM D N, LEE S H, et al. Correlation of fatty acid composition of vegetable oils with rheological behaviour and oil uptake [J]. *Food Chemistry*, 2010, 118(2): 398-402.
- [32] LI P, WU G, YANG D, et al. Analysis of quality and microstructure of freshly potato strips fried with different oils[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 133: 110038.
- [33] LI P, ZHU L, LI X, et al. Insight into the effect of fatty acid composition on the texture of French fries[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2022, Accept.
- [34] LI P, WU G, YANG D, et al. Applying sensory and instrumental techniques to evaluate the texture of French Fries from fast food restaurant[J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 51: 521-531.
- [35] CHEN Y, MOREIRA R G. Modelling of a batch deep-fat frying process for tortilla chips [J]. *Food and Bioproducts Processing*, 1997, 75(C3): 181-90.
- [36] LOBERTY J T, DEGHANNYA J, NGADI M O. Effective strategies for reduction of oil content in deep-fat fried foods: A review [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 92(172-83).
- [37] GAMBLE M H, RICE P, SELMAN J D. Relationship between oil uptake and moisture loss during frying of potato slices from c.v. Record U.K. tubers [J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 1987, 22(3): 233-41.
- [38] YANG D, WU G, LI P, et al. Comparative analysis of the oil absorption behavior and microstructural changes of fresh and pre-frozen potato strips during frying via MRI, SEM, and XRD [J]. *Food Res Int*, 2019, 122(295-302).
- [39] YANG D, WU G, LI P, et al. Effect of microwave heating and vacuum oven drying of potato strips on oil uptake during deep-fat frying[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109338.
- [40] KULSHRESTHA S, SASTRY S. Frequency and voltage effects on enhanced diffusion during moderate electric field (MEF) treatment[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2003, 4(2): 189-194.
- [41] HUANG X, ZHANG Y, KARRAR E, et al. Effect of moderate electric field on the quality, microstructure and oil absorption behavior of potato strips during deep-fat frying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 313: 110751.
- [42] YANG D, WU G, LU Y, et al. Comparative analysis of the effects of novel electric field frying and conventional frying on the quality of frying oil and oil absorption of fried shrimps[J]. *Food Control*, 2021, 128: 108195.
- [43] KITA A, LISINSKA G, GOULBOWSKA G. The effects of oils and frying temperatures on the texture and fat content of potato crisps [J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(1): 1-5.
- [44] VITRAC O, TRYSTRAM G, RAOULT-WACK A L. Deep-fat frying of food: heat and mass transfer, transformations and reactions inside the frying material [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2000, 102(8-9): 529-38.
- [45] RIMAC-BRNCIC S, LELAS V, RADE D, et al. Decreasing of oil absorption in potato strips during deep fat frying [J]. *Journal of Food Engineering*, 2004, 64(2): 237-41.
- [46] YANG D, WU G, LI P, et al. The effect of fatty acid composition on the oil absorption behavior and surface morphology of fried potato sticks via LF-NMR, MRI, and SEM[J]. *Food Chemistry: X*, 2020, 7: 100095.
- [47] KIKIS A. Core aldehydes-neglected products of lipid peroxidation[J]. *Inform*, 1990, 1: 1055-1060.
- [48] MARMESAT S, VELASCO J, DOBARGANES M. Quantitative determination of epoxy acids, keto acids and hydroxy acids formed in fats and oils at frying temperatures[J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1211 (1-2): 129-134.
- [49] MORALES A, MATMESAT S, DOBARGANES M, et al. Quantitative analysis of hydroperoxy-, keto-and hydroxy-dienes in refined vegetable oils[J]. *Journal of Chromatography A*, 2012, 1229: 190-197.
- [50] MORALES A, DOBARGANES C, MARQUEZ-RUIZ G, et al. Quantitation of hydroperoxy-, keto-and hydroxy-dienes during



- oxidation of FAMES from high-linoleic and high-oleic sunflower oils[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2010, 87 (11): 1271-1279.
- [51] BERDEAUX O, MARQUEZ-RUIZ G, DOBARGANES C. Selection of methylation procedures for quantitation of short-chain glycerol-bound compounds formed during thermoxidation[J]. *Journal of Chromatography A*, 1999, 863 (2): 171-181.
- [52] BERDEAUX O, VELASCO J, MARQUEZ-RUIZ G, et al. Evolution of short-chain glycerol-bound compounds during thermoxidation of FAME and monoacid TAG[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2002, 79 (3): 279-285.
- [53] KANAZAWA K, ASHIDA H. Dietary hydroperoxides of linoleic acid decompose to aldehydes in stomach before being absorbed into the body[J]. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Lipids and Lipid Metabolism*, 1998, 1393 (2-3): 349-361.
- [54] GOICOECHEA E, BRANDON E F, BLOKLAND M H, et al. Fate in digestion in vitro of several food components, including some toxic compounds coming from omega-3 and omega-6 lipids[J]. *Food and chemical toxicology*, 2011, 49 (1): 115-124.
- [55] XU L, WU G, ZHANG Y, et al. Evaluation of glycerol core aldehydes formation in edible oils under restaurant deep frying[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109696.
- [56] 王俏君. 煎炸过程甘油酯核心醛的变化规律及其影响因素 [D]. 江南大学, 2019.
- WANG Q. The changes of glyceryl ester core aldehydes and their influencing factors during deep-frying [D]. Jiangnan University, 2019.
- [57] BERDEAUX O, MARQUEZ-RUIZ G, DOBARGANES M C. Characterization, quantitation and evolution of monoepoxy compounds formed in model systems of fatty acid methyl esters and monoacid triglycerides heated at high temperature[J]. *Grasas y Aceites*, 1999, 50 (1): 53-59.
- [58] GIUFFRIDA F, DESTAILLATS F, ROBERT F, et al. Formation and hydrolysis of triacylglycerol and sterols epoxides: role of unsaturated triacylglycerol peroxy radicals[J]. *Free Radical Biol Med*, 2004, 37 (1): 104-114.
- [59] VELASCO J, BERDEAU O, MARQUEZ-RUIZ G, et al. Sensitive and accurate quantitation of monoepoxy fatty acids in thermoxidized oils by gas-liquid chromatography[J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, 982 (1): 145-152.
- [60] JIA H, TAKI F, SUGIYAMA S, et al. Neutrophil-derived epoxide, 9, 10-epoxy-12-octadecenoate, induces pulmonary edema[J]. *Lung*, 1988, 166 (1): 327-337.
- [61] LIU Y, CHENG Y, LI J, et al. Epoxy stearic acid, an oxidative product derived from oleic acid, induces cytotoxicity, oxidative stress, and apoptosis in HepG2 cells[J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2018, 66 (20): 5237-5246.
- [62] BRUHL L, WEISSHAAR R, MATTHAUS B. Epoxy fatty acids in used frying fats and oils, edible oils and chocolate and their formation in oils during heating[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2016, 118 (3): 425-434.
- [63] 周佳一. 煎炸过程单环氧脂肪酸的形成规律及其影响因素 [D]. 江南大学, 2019.
- ZHOU J. Regularity and factors of monoepoxy fatty acids formation during deep-frying [D]. Jiangnan University, 2019. 完