

# 油炸肉制品风味的研究进展

周明珠<sup>1,2</sup>, 杜柳<sup>1,2</sup>, 邱文兴<sup>1,2</sup>, 熊光权<sup>1</sup>, 乔宇<sup>1\*</sup>, 汪兰<sup>1</sup>, 吴文锦<sup>1</sup>, 石柳<sup>1</sup>, 丁安子<sup>1</sup>, 邹开封<sup>3</sup>

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430064) (2. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430064) (3. 潜江市潜虾共享农业科技有限责任公司, 湖北潜江 433134)

**摘要:** 油炸风味的产生是油炸肉制品流行的一个重要原因。与其他传统的热加工方式相比, 油炸处理的传热传质机制较为复杂, 并且挥发性化合物种类丰富(如醛、醇、酮、碳氢化合物、呋喃、吡嗪等), 形成特有的油炸风味, 对消费者有较强的吸引力。该研究通过综合文献研究, 对脂肪氧化、美拉德反应以及两种反应产物之间的相互作用产生的油炸风味进行了论述, 着重讨论了脂肪氧化和美拉德反应的形成途径和在油炸过程中挥发性化合物的形成, 以及影响因素。除此之外, 关注到油炸过程中形成的有害成分以及不良风味物质, 例如杂环胺、多环芳烃等的形成及其控制措施。总体而言, 充分了解油炸挥发物的化学来源, 优化油炸风味以及开发不同的油炸方式来提高消费者对油炸肉制品的接受度以及提高食品质量和安全性具有重要意义。

**关键词:** 油炸; 肉制品; 风味; 脂质氧化; 美拉德反应

文章编号: 1673-9078(2023)05-367-375

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0499

## Research Progress on the Flavor of Fried Meat Products

ZHOU Mingzhu<sup>1,2</sup>, DU Liu<sup>1,2</sup>, QIU Wenxing<sup>1,2</sup>, XIONG Guangquan<sup>1</sup>, QIAO Yu<sup>1\*</sup>, WANG Lan<sup>1</sup>, WU Wenjin<sup>1</sup>, SHI Liu<sup>1</sup>, DING Anzi<sup>1</sup>, ZOU Kaifeng<sup>3</sup>

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China) (2. School of Bioengineering and Food, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China) (3. Qianjiang Diving Shrimp Sharing Agricultural Technology Co. Ltd., Qianjiang 433134, China)

**Abstract:** The formation of fried flavor is an important reason for the popularity of fried meat products. Compared with the mechanisms of the other conventional thermal processing methods, the heat and mass transfer mechanism of frying is more complex. Many types of volatile compounds (e.g., aldehydes, alcohols, ketones, hydrocarbons, furans, and pyrazines) are involved in the formation of the unique fried flavors that strongly appeal to consumers. Through comprehensive literature research, this article discusses the fried flavor produced via lipid oxidation, Maillard reaction, and the interaction between both reaction products, focusing on the occurrence pathways of lipid oxidation and Maillard reaction, synthesis of volatile compounds during frying, and factors affecting these processes. In addition, attention is paid to the formation of harmful components and undesirable flavor substances during frying, such as heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons, and measures for their control are explored. Overall, it is vital to thoroughly understand the chemical sources of volatile components in fried food, optimize the fried flavor, develop different frying methods to improve consumer acceptance of fried meat products, and improve food quality and safety.

**Key words:** frying; meat products; flavor; lipid oxidation; Maillard reaction

引文格式:

周明珠, 杜柳, 邱文兴, 等. 油炸肉制品风味的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 367-375.

ZHOU Mingzhu, DU Liu, QIU Wenxing, et al. Research progress on the flavor of fried meat products [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 367-375.

目前, 油炸食品诱人的风味和色泽以及可观的经

收稿日期: 2022-04-22

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2019ABA087)

作者简介: 周明珠(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1226601212@qq.com

通讯作者: 乔宇(1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: qiaoyu412@sina.com

济效益使油炸成为家庭厨房、快餐店和方便面行业最流行的食品烹饪方法之一<sup>[1]</sup>。油炸即食产品也受到西方国家的喜爱, 产品销售量不断增加, 比如炸薯条、炸鸡、汉堡等产品。油炸食品已经成为餐饮业的一条产业链。在适当的油炸温度和时间下, 油炸食品具有诱人的风味、金黄的色泽和酥脆的质地以及良好的口感, 深受广大消费者的喜爱<sup>[2]</sup>。肉类是人们在日常生

活膳食中不可或缺的组成部分,能为人体提供蛋白质、维生素和矿物质等营养素<sup>[3]</sup>。在中国传统肉制品的加工中,人们通常采用油炸、烟熏、炭烤和卤煮等工艺<sup>[4]</sup>。并且肉制品加工,特别是油炸肉制品具有的特征风味使其在市场上占据着重要地位。食品的风味特征关系到食品的整体可接受性并直接影响到消费者对产品的喜好度以及购买行为,因此肉制品风味的形成一直是相关研究的热点。

在油炸过程中,传热传质是影响油炸肉制品质量的主要因素,并且在此过程中会发生一系列的物理变化(如质地和口感)<sup>[5]</sup>和化学反应,从而产生挥发性与非挥发性以及可溶性与非可溶性物质,使油炸食品产生香气,并形成独特的色泽和质地。油炸过程中发生的化学反应涉及水解、氧化、异构化和聚合<sup>[6]</sup>,导致产生游离脂肪酸、小分子醇、醛、酮、酸、内酯和碳氢化合物、甘油三酯,环状化合物等<sup>[7]</sup>,影响最终肉制品的风味。油炸风味是油炸肉制品受欢迎的重要因素。一般来说,生肉除血腥味外是没有香味的,熟肉的香气是糖类,脂质和蛋白质的氧化降解、Strecker降解和美拉德反应,以及它们产物之间相互作用生成的产物,产物主要有烃类、酸类、酯类、醛类、含硫化合物和杂环化合物等。熟肉的香味物质生成途径主要有三条:一是美拉德反应产物;二是脂质氧化作用

生成的产物;三是产物之间的相互作用<sup>[8]</sup>。由于食品基质和反应的复杂性,这3类反应往往还伴生了一些对人体健康有潜在风险的危害物,其中典型的危害物有杂环胺、多环芳烃和丙烯酰胺等,这些危害物会增加人们罹患癌症、心血管疾病和阿尔茨海默症等疾病的风险。因此,系统地阐明油炸挥发物的形成途径对于监控油炸方式、检测感知风味和评估油炸食品的感官特性具有重要的指导意义。本文综述了油炸过程中的风味物质种类、油炸风味的形成途径,以及影响因素,并讨论了油炸过程中有害成分的形成及控制措施,以及不良风味化合物的产生,从而为优化油炸工艺和促进健康美味油炸肉制品的发展提供有意义的指导,力求肉制品在获得良好品质的同时确保其安全性。

## 1 油炸肉制品风味物质种类

油炸过程涉及复杂的变化和反应,以及油炸材料和油炸介质之间的快速传热和传质。在高温下,由于水分损失、吸油、结壳、脂质氧化、淀粉糊化和美拉德反应等因素,油炸肉制品具有独特的风味、颜色和质地,因此对消费者具有吸引力<sup>[9]</sup>。油炸肉制品的风味物质主要包含醛类、酮类、醇类、烃类、呋喃、吡嗪和吡啶等(如图1<sup>[10]</sup>所示)。

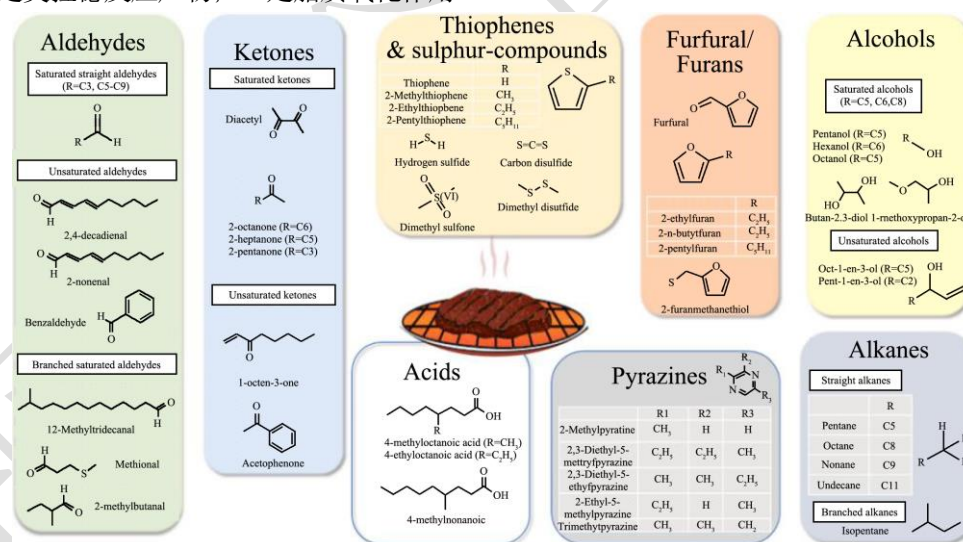


图1 油炸风味的主要香气化合物类别

Fig.1 Main aroma compounds of fried flavor

醛类是油炸过程中通过脂质氧化产生的最常见的挥发物,在油炸过程中发生的复杂反应会抑制醛类的生成。实际上,在50%以上的油炸产品中,3-甲硫基丙醛、2-甲基丁醛和3-甲基丁醛有助于形成油炸风味<sup>[11]</sup>。在传统油炸过程中,碳氢化合物、酮、醇会少量形成<sup>[12]</sup>。主要是饱和烃和不饱和烃通过不饱和脂肪酸的氧化分解、自由基反应和饱和脂肪酸的热脱羧产生。

油炸过程中的酮类物质,油的氧化降解产生的产物含有氢过氧化物、过氧基、羰基和羟基,这些基团倾向于与含氨基和酰胺的化合物反应,从而诱导共价键复合物<sup>[13]</sup>。醇是通过不饱和脂肪酸的氧化分解和碳链上双键的位置异构化形成的<sup>[14]</sup>。众所周知,呋喃、吡嗪和吡啶是煎炸油和油炸食品中微量存在的典型香气来源。在传统油炸过程中,呋喃可通过多种途径产生,

它们通常提供具有甜味、焦味和焦糖味等理想香味的油炸食品<sup>[15]</sup>。2-戊基呋喃是最常用的挥发性呋喃，由亚油酸氧化产生的亚油酸甲酯过氧化氢降解生成<sup>[16]</sup>。值得注意的是，吡嗪是一种结构气味活性挥发物，在极低浓度下具有很高的嗅觉影响。二乙基-3,5-二甲基吡嗪、2-乙基-3,5-二甲基吡嗪和 2,3-二乙基-5-甲基吡嗪具有烤土豆般的气味，最低人体气味阈值为 0.007~0.018  $\mu\text{g}/\text{kg}$ <sup>[17]</sup>。就吡啶而言，美拉德反应期间的 Strecker 降解中氨基酸与还原糖或脂质氧化产物之间的降解归因于它们在油炸条件下的产生。

## 2 油炸风味的形成途径

脂质氧化和美拉德反应是导致油炸风味形成的最主要的两种化学反应，其中脂质氧化会形成关键中间体氢过氧化物，而美拉德反应则会产生中间产物阿马多利重排产物，中间产物都会再分解、降解、环化和重排以生成挥发性化合物，赋予人们风味感官。除此之外，还有脂质氧化以及美拉德反应中间产物的相互作用，特别是脂肪氧化产物参与美拉德反应，产生例如吡嗪、吡啶和含硫化物等挥发性化合物，从而产生油炸风味，反应途径如图 2<sup>[18]</sup>所示。

众所周知，脂质氧化包括三种氧化方式，自动氧化、光敏氧化和酶促氧化；而在油炸食品中，主要是发生了自动氧化，自动氧化包括三个步骤：引发、传递和终止。从不饱和脂肪酸中提取氢产生烷基自由基，自由基在其碳链上离域，并在分子重排后形成共轭双键<sup>[19]</sup>。最弱的碳氢 (C-H) 键首先被攻击以释放自由基。烷基自由基与三线态氧反应生成过氧自由基，它具有的高能量能使其从另一个不饱和脂肪酸上提取氢，并产生氢过氧化物。但氢过氧化物极不稳定，通过 -OOH 基团的均裂裂解分解成烷氧基，然后在 C-C 键上发生  $\beta$ -断裂反应，形成醛、烯炔、烷炔和醇等小分子化合物<sup>[20]</sup>。最后两个自由基的组合（例如过氧自由基和烷氧基的组合，以及烷基自由基之间的组合）形成醛、酮、醇、酸、酯和碳氢化合物等非自由基挥发性物质。在传统油炸过程中，油炸食品由于水分蒸发使其留下空隙，并且在外部环境和内部结构造成压差导致油炸产品从油中取出时吸收油<sup>[21]</sup>。因此，煎炸油中油脂氧化而产生的挥发性小分子也会通过油脂的吸收直接影响油炸食品的风味，但是其挥发性物质浓度较低，并且会通过与其他挥发性化合物以及食品成分发生反应，从而分解，但它们对油炸食品的风味仍然极其重要<sup>[22]</sup>。从大量文献中可以看出，肉制品挥发性风味物质如直链醛、醇、炔和酮类，主要是由脂质氧化产生的<sup>[23]</sup>。Khan 等<sup>[24]</sup>认为不同肉制品之间风味的差

异主要是由于脂质的不同引起气味的差异。其中脂肪酰基类 (FA)、甘油酯类 (GL) 和甘油磷脂类 (GP) 对风味影响最大。刘源<sup>[25]</sup>研究发现对鸭肉风味的影响中，甘油三酯 (TG) 影响不大，而磷脂有很大影响；这是由于磷脂中含有大量的不饱和脂肪酸链<sup>[26]</sup>，在加热条件下容易分解，分解产物可以和美拉德反应产物发生反应；并且这些不饱和脂肪酸也是游离脂肪酸的主要来源。有研究人员去除脂质后发现，脂肪醛和脂肪醇含量减少，而苯甲醛和吡嗪含量明显增加，说明脂质中磷脂可降低或抑制美拉德反应中杂环化合物的生成，同时赋予肉制品肉味<sup>[27]</sup>。而 Gandemer<sup>[28]</sup>则认为如果 TG 的含量足够高，而 TG 对游离脂肪酸的贡献达到 30%~50% 时，TG 对风味的形成也很重要。

美拉德反应是一种非酶化学反应，它被认为是在油炸过程中发生的另一个重要的化学反应，以确定油炸风味<sup>[29]</sup>。美拉德反应分为 3 个阶段<sup>[30]</sup>：一、初级阶段。氨基化合物（氨基酸、肽或蛋白质）中氨基和还原糖（如葡萄糖、果糖或乳糖）中的醛基通过羰氨缩合反应，生成 N-取代糖基胺。二、中级阶段。通过 Amadori 重排，将糖胺转化成了酮糖胺和其他产物。这些产物可以被环化生成例如吡咯和吡啶的含氮杂环化合物，也或者被分解成重排糖，重排糖可经过四种方式形成挥发性化合物。1、环化产生了例如糠醛和呋喃等含氧杂环化合物；2、经过酮-烯醇互变异构使得变为了原始氨基酸进行进一步的美拉德反应；3、裂解成二羰基片段与 Strecker 降解产生的胺基反应生成 3-甲基丁醛等醛类物质和 2,5-二甲基吡嗪等吡嗪类物质；4、重排糖中的二羰基和脯氨酸等氨基酸相互作用产生吡咯啉等<sup>[31,32]</sup>。美拉德反应产生的风味化合物主要由脂肪族物质（如醛、酮和脂肪酸）和杂环化合物（呋喃类、噻吩类、噻唑类、吡嗪类和其它杂环化合物）组成，各种气味的差异是由于阈值的不同<sup>[33]</sup>，在较高浓度下，气味阈值较低的杂环衍生物比脂肪族物质更能承载典型风味<sup>[34]</sup>。而脂肪氧化以及美拉德反应的产物之间的相互作用也就导致油炸风味的变化，目前已经有很多研究者为了研究脂肪氧化参与美拉德反应而建立起了油炸模型系统<sup>[35,36]</sup>。其中 Negroni 等<sup>[37]</sup>建立了己木糖和葡萄糖为底物与赖氨酸反应的美拉德模型系统，使用不同的煎炸油（如橄榄油、菜籽油和葵花籽油）来研究煎炸介质对油炸风味的影响。发现油的不饱和度对吡嗪有显著影响。以橄榄油为油炸介质时，吡嗪含量增高，但 2-甲基吡嗪、2,5-二甲基吡嗪等的生成对含有更多亚油酸的葵花籽油更敏感。由此可以说明，脂质氧化产物可与氨基酸的氨基或 Strecker 降解产物反应，生成含氮的杂环化合物。

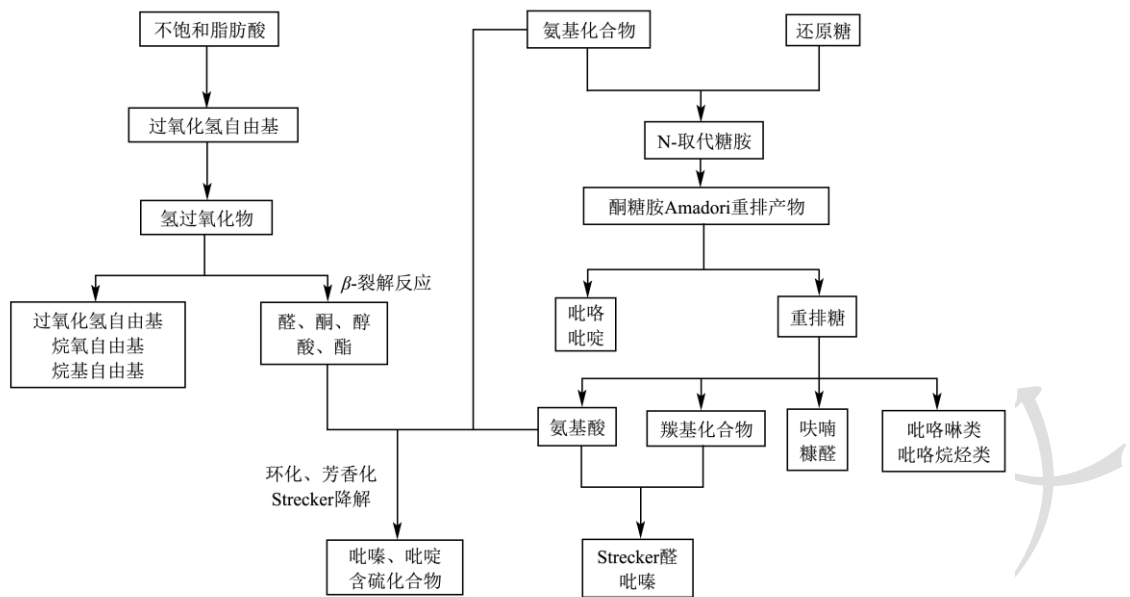


图2 油炸风味形成途径（脂肪氧化和美拉德反应）

Fig.2 Fried flavor formation pathway (fat oxidation and Maillard reaction)

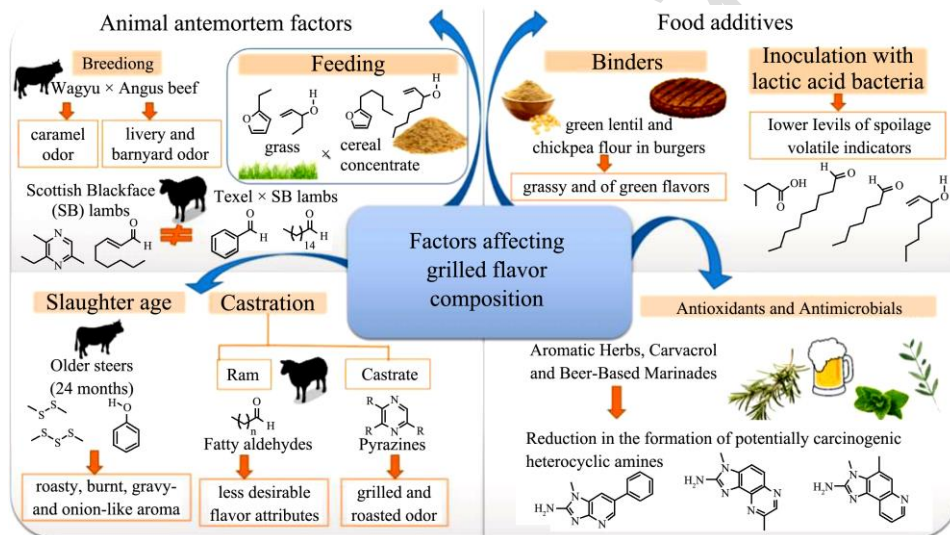


图3 影响油炸风味形成的影响因素

Fig.3 Factors affecting the formation of fried flavor

### 3 影响因素

根据对脂肪氧化和美拉德反应途径的介绍发现油炸风味主要由食品中的氨基酸和糖等引发，通过其他的研究发现油炸风味还与食品成分、油炸条件、油炸类型、油炸用油和抗氧化剂等有关（如图3<sup>[10]</sup>所示）。

#### 3.1 食品成分

油炸肉制品的风味主要取决于食品组分。Peng等<sup>[38]</sup>研究发现油炸猪腰肉中的乙醛、丁醛、己醛和2,4-癸二烯醛显著高于油炸土豆中的这些物质，说明食品组成的复杂性显著影响油炸风味的生成。比如与炸牛肉丸相比，炸鸡肉丸含有更少的杂环胺<sup>[39]</sup>，因为牛肉中

的高水平非血红素铁与羟基和过氧自由基反应，加速了脂质氧化和美拉德反应。虽然在美拉德反应中，脂质氧化产物上的羰基是被确定为取代还原糖，但葡萄糖比2-己烯醛在与赖氨酸反应生成挥发物方面更具竞争力<sup>[40]</sup>。在油炸过程中，游离氨基酸和蔗糖（分解为葡萄糖和果糖）含量分别降低了89%和25%<sup>[41]</sup>。此外，氨基酸能够提供显著的感官特性，但同时也会对风味也会产生一定的影响，在油炸条件下，谷氨酰胺发生更强的脱氨反应以提供氨。然而，从理论上讲，天冬酰胺在高温下更容易脱酰胺和脱氨生成氨<sup>[42]</sup>。这表明氨基酸的降解可以通过油炸交替进行，从而影响挥发物的产生。综上可得食品成分在油炸风味的形成中起着不可或缺的作用。

### 3.2 油炸条件

适当的油炸条件(如油炸时间、油炸温度和水分含量)对于产生理想的油炸风味至关重要。随着煎炸时间的延长,挥发物的浓度呈现先升高后降低的趋势。当炸鸡胸肉时,由于挥发物之间的消除作用,2-壬烯醛的含量先增加后减少<sup>[35]</sup>。Adams等<sup>[40]</sup>还证明,在由脂质氧化产物(如己醛和2,4-癸二烯醛)和氨基酸(如赖氨酸和甘氨酸)加/不加葡萄糖建立的美拉德模型中,当加热时间延长到120 min时,挥发性浓度下降了两倍。油炸温度是确定油炸食品感官特性的另一个至关重要的方面,在这一点上,较高的温度大大促进了复杂的化学反应,以刺激挥发物的生成。由于不含吡嗪类、呋喃类、噻唑类和恶唑类,亚油酸、葡萄糖和蛋氨酸混合物中的烹调味非常清淡,因此反应温度较低(100~105℃),无论潜在的有毒化合物(如丙烯酰胺)如何,相对高温都可以改善油炸食品的气味。水分是一个不可避免的因素,它参与了一系列复杂的反应(如水解、氧化、异构化和美拉德反应),从而在油炸过程中形成风味。在大多数情况下,水分被认为是油炸产品和煎炸油中产生不良异味的一个不利因素,会导致煎炸油发生强烈的变质反应<sup>[43]</sup>。Mandin等<sup>[44]</sup>发现,由于美拉德反应的负面影响,在高水分条件下不存在吡嗪、吡啶和噻唑。在油炸过程中,水的存在减缓了油的变质速度,同时保持了理想的油炸感官特性。因此,水分的应用方式将对油炸风味的发展产生重大影响。

### 3.3 油炸类型

众所周知,传统油炸以油为介质进行传热传质,当油炸温度达到150~200℃范围内时,高温会促进蛋白质和碳水化合物等食物成分之间的反应,促进食品表面脱水和吸油。而食物在吸油的过程中会诱发剧烈反应。虽然传统油炸会产生特征性的挥发性化合物,比如己醛和2,4-癸二烯醛。Yang等<sup>[45]</sup>等研究表明猪肉在180℃油炸5 min会产生己醛、壬醛、苯甲醛、2-戊基呋喃、2,5-二甲基吡嗪,2,6-二甲基吡嗪等化合物。但由于油脂含量过高,导致一些疾病的产生,除此之外,高温油炸时产生的丙烯酰胺是一种可能的致癌物,它能够诱发实验动物的癌症和遗传突变,因此食品中丙烯酰胺的存在是一个主要威胁,而如今消费者对健康饮食越来越感兴趣。因此他们需要寻找其他油炸方式来代替传统油炸的同时使食品的外观、营养、安全性和感官特性尽可能不遭到破坏。

真空油炸因其温度较低、吸油率低而受到关注,

与传统油炸产品相比,真空油炸产品吸油量可减少25%至55%<sup>[46,47]</sup>并且这种油炸方式使食品的天然色素和风味的保留率比较高。与传统油炸相比,真空油炸在较低的温度下进行,以降低水的沸点。Aladedunye<sup>[48]</sup>证明,真空油炸对菜籽油、葵花籽油和高油酸葵花籽油的保护作用要优于传统油炸。尽管在水果和蔬菜上真空油炸这一方式已经越来越纯熟,但在肉制品上的应用却很少。Teruel等<sup>[49]</sup>使用150℃下油炸6 min的真空油炸工艺来制备更健康的炸鸡块,发现其颜色、脆度、油性和整体接受度等感官特性要优于比传统油炸炸鸡块。但在这项研究中,几乎没有关于风味的信息。Troncoso等<sup>[50]</sup>也发现真空油炸显著改善了油炸土豆片的感官属性(尤其使颜色、脆度)、风味品质,却没有对某些挥发性化合物进行评估以解释风味差异。因此,对挥发性成分的测定对判断真空油炸的可行性仍然是必要的。

空气油炸是另一种新的替代传统油炸的技术,它是一种通过在热空气流中含有油滴的乳化液和油炸室中的产品表面之间直接接触获得油炸产品的新方法。空气油炸几乎可以被视为一个脱水过程,其主要目的是去除水分,同时创造出特殊的油炸食品质地和感官特征<sup>[51]</sup>。与传统油炸相比,空气油炸的油脂含量减少了80%<sup>[52]</sup>。虽然空气油炸产品脂肪和水分含量较低,质地较好(如酥脆),但香气研究还较少。Yu等<sup>[53]</sup>通过HS-SPME GC/MS研究了空气煎炸条件对鱼糜风味的影响。比较了不同温度和时间下气炸鱼糜样品中各挥发性成分相对含量的差异。发现醛类,如3-甲基丁醛、己醛等,由于其较低的气味阈值,可对海洋产品的整体香气产生压倒性的影响,其来源于脂肪酸和甘油三酯的降解<sup>[54]</sup>。随着温度和时间的升高,一些挥发性化合物消失。例如,当温度上升到160℃时,1-戊烯-3-醇、1-己烯-3-醇、(Z)-4-庚烯醛、3-辛醇、1-己醇、2-乙基-11-十三炔-1-醇的化合物挥发。同时,还有一些新生成的风味化合物,如异辛醇、(Z)-4-庚烯醛和苯乙烯,由于美拉德反应和脂质氧化。Cao等<sup>[55]</sup>发现醛类、碳氢化合物和杂环化合物是影响炸鸡块风味的主要因素,在空气油炸样品中检测到的挥发性化合物总量远低于油炸样品,这一趋势与Yang等<sup>[45]</sup>的报告一致,在油炸猪肉里脊中检测到的挥发性化合物数量少于油炸样品中检测到的挥发性化合物数量。这种差异可能是由于油炸过程中脂质氧化程度更大<sup>[56]</sup>。

### 3.4 油炸用油

油炸一般在165~190℃的温度下进行,高温、水分以及空气中的氧气使得油炸过程中的油发生一系列

复杂的剧烈变化, 主要涉及水解反应、氧化反应和聚合反应三大反应。普通葵花籽油和高油酸葵花籽油经过加速贮藏发现己醛、反-2-庚烯醛、反-2-癸烯醛和反, 反-2,4-壬二烯醛的含量变化可以用来区分普通葵花籽油和高油酸葵花籽油, 及不同氧化程度的葵花籽油的有效指标。花生油在 50、100、150、200 °C 条件下加热发现共鉴定出 99 种挥发性成分, 并且随着加热温度的增大, 一些挥发性成分的数量和相对含量都逐渐增大。有研究对比了椰子油、红花籽油、卡罗拉油和初榨橄榄油分别在 180、210、240、270 °C 下直接加热 6 h 后的挥发性成分生成情况。结果显示, 在这些不同的植物油中, 相同温度处理后, 都含有烃类、醇类和醛类, 但是挥发性含量不同, 如红花籽油、卡罗拉油、椰子油和初榨橄榄油在 180 °C 条件下产生的丙烯醛含量分别为 57.3、53.5、10.4、12.1 mg(h L), 这主要是由于多不饱和脂肪酸的含量不同。另外, 随着加热温度的升高, 挥发性成分的含量也逐渐增大, 如红花籽油在各温度处理下丙烯醛含量分别为 57.3、95.5、122、343 mg(h L)。

#### 4 油炸过程中产生的有害成分以及不良风味化合物

油炸食品在加工过程中有产生有毒成分的风险, 主要表现在产生杂环胺和多环芳烃以及丙烯酰胺, 产品种类、加工方式以及加热温度和时间都会导致产生有毒成分的风险几率。水产制品中含有较高的蛋白质, 在热加工过程中形成杂环胺, 会导致致突变、致癌等生理毒性作用, 其中煎、炸、烤由于加热温度较高时间较长更容易生成杂环胺。Wang 等<sup>[57]</sup>研究不同的煎炸条件对草鱼中杂环胺生成的影响, 发现随着煎炸次数的增加, 杂环胺的种类不断增加。有报道说明在油炸肉制品中添加一些外源抗氧化剂是有效改善肉制品品质的有效措施之一, 同时也能够控制杂环胺的形成<sup>[58]</sup>。目前根据 GB 2760-2014《食品添加剂使用标准》<sup>[59]</sup>中规定允许添加至油炸肉制品的抗氧化剂共有 8 种, 常用的有 3 种, 分别为茶多酚(以儿茶素计)、甘草提取物(以甘草酸计)、迷迭香提取物(包括迷迭香酸和鼠尾草酸), 不同种类的抗氧化剂对油炸肉制品品质及杂环胺形成的影响有一定差异, 例如鼠尾草酚、鼠尾草酸、迷迭香酚和迷迭香酸等能够有效清除阳离子自由基, 进而能够有效的抑制杂环胺的活性<sup>[60]</sup>。抗氧化剂对油炸肉制品品质及杂环胺形成的影响。除此之外, 油炸肉制品中多环芳烃和丙烯酰胺的生成与抑制也尤为重要, 它主要是由于肉制品种的油

脂、蛋白质以及碳水化合物等, 在高温条件下降解为自由基, 再经整合环化而成。目前, 我们一般使用其他油炸方式替代传统油炸来解决多环芳烃和丙烯酰胺生成的问题, Lee 等<sup>[61]</sup>研究发现由于油炸过程中使用的油含量较低, 空气油炸样品的丙烯酰胺和多环芳烃含量低于传统油炸样品, 有助于确定鸡肉的最佳油炸方法, 以尽量减少潜在危险物质的形成。

油炸食品在贮藏过程中也会发生由于脂肪氧化以及水解而导致的劣变<sup>[62]</sup>, 使其产生不良的风味。在模拟脂肪氧化在美拉德反应体系中的实验中, Mottram 等<sup>[63]</sup>采用半胱氨酸-核糖系统, 发现在这个体系中生成的挥发性化合物主要是呋喃和含硫化合物, 这些化合物具有很强的硫味儿和烧焦的气味, 是一种令人不太愉快的味道。除此之外, 油脂劣变产生的产物中有有毒物质, 这些物质可能会对机体产生损害<sup>[64,65]</sup>, 比如影响食欲、导致缺乏必需脂肪酸、造成人体维生素缺乏以及导致癌症的发生; 并且近期的分子生物学研究表明, 机体发生衰老、癌症的机率与过氧化脂质的摄入量密切相关; 脂肪氧化产生的自由基与食品中的维生素作用会导致食品营养价值下降; 自由基与食品中的一些色素类物质作用就会导致食品颜色变差<sup>[66]</sup>。

如今, 消费者对健康饮食越来越重视, 他们正在寻找既能够保留良好风味和感官品质, 又能改善产生有毒成分的风险。而空气油炸开发的目的是满足消费者对制备低脂肪含量和类似于传统油炸的感官特征的油炸食品的要求。与传统油炸食品相比, 空气油炸食品能够使脂肪含量降低 90%<sup>[67]</sup>。Yang 等<sup>[45]</sup>发现, 与油炸猪里脊相比, 气炸猪里脊的风味化合物种类和含量降低, 其中空气油炸样品中不含三甲基吡嗪。这可能是由于这种油炸方式使得初始还原糖含量增加, 而油脂含量降低, 从而使美拉德反应和脂质氧化速率降低。虽然气炸产品脂肪和水分含量较低, 质地较好(如酥脆), 但香气较弱的特点阻碍了气炸在快餐和制造业的推广。总的来说, 与其他油炸类型相比, 传统油炸仍然是一种优越的热处理方式, 能够提供优良的感官特性, 以及诱人的油炸风味; 但空气油炸能够降低脂肪含量, 减少患病风险, 并且能够提供更好的酥脆性, 满足消费者的需求, 但风味方面更待加强。

#### 5 结语

油炸风味的形成是一个复杂的过程, 其中脂质氧化产物与美拉德反应的相互作用说明了在模拟食品系统中风味产生的复杂性。事实上, 风味感知极其复杂, 不仅依赖于单个挥发性化合物的感觉, 而且还整合了挥发性物质之间的添加剂、协同作用和掩蔽作用。因

此,对挥发性成分的简单分析不足以理解复杂的风味模式,煎炸过程中的反复煎炸和对挥发性相互作用组合组的研究是很有必要的。但在油炸过程中,脂肪氧化产物和还原糖之间的相互作用还研究的较少,但其相互作用可能有利于解释油炸风味。综上所述,平衡油炸条件以及油炸方式,来降低脂肪含量以及最大限度地减少有毒相关物质的产生,同时保持理想的油炸风味是一项非常大的挑战,但是,为了提高消费者对油炸食品的接受度和未来的经济效益,大幅度提高食品质量和安全性至关重要。

### 参考文献

- [1] Zhang Q, Saleh A, Chen J, et al. Chemical alterations taken place during deep-fat frying based on certain reaction products: A review-Science Direct [J]. *Chemistry and Physics of Lipids*, 2012, 165(6): 662-681.
- [2] Warner K. *Chemistry of Frying Oils* [M]. Florida: CRC Press, 2008.
- [3] 朱建军.肉类的营养价值及宜食用量[J].*肉类工业*,2015,3: 54-56.
- [4] 任晓璞,朱玉霞,鲍英杰,等.绿色制造技术在传统肉制品现代化加工中的应用及发展前景[J].*肉类研究*,2017,31(11): 60-64.
- [5] Dobarganes C, Marquez-Ruiz G, Velasco J. Interactions between fat and food during deep-frying [J]. *European Journal of Lipid Science & Technology*, 2015, 102(8-9): 521-528.
- [6] Choe E, Min D B. Chemistry of deep-fat frying oils [J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(5): 77-86.
- [7] Rojo J A, Perkins E G. Cyclic fatty acid monomer formation in frying fats. I. Determination and structural study [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1987, 64(3): 414-421.
- [8] 李聪.磷脂分子及加工工艺对盐水鸭特征风味形成影响研究[D].无锡:江南大学,2020.
- [9] Perkins E G. *Deep Frying: Chemistry, Nutrition and Practical Application*, 2nd Edn [M]. Urbana IL: AOCS Press, 2007.
- [10] Bassam S M, Noleto-Dias C, Farag Mohamed A. Dissecting grilled red and white meat flavor: Its characteristics, production mechanisms, influencing factors and chemical hazards [J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131139.
- [11] Dunkel A, Steinhaus M, Kotthoff M, et al. Nature's chemical signatures in human olfaction: a foodborne perspective for future biotechnology [J]. *Angewandte Chemie (International ed. in English)*, 2014, 53(28): 7124-7143.
- [12] Molina-Garcia L, Santos C S P, Cunha S C, et al. Comparative fingerprint changes of toxic volatiles in low PUFA vegetable oils under deep-frying [J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2017, 94(2): 271-284.
- [13] Pokorny J, Kolakowska A. *Lipid-protein and Lipid-saccharide Interactions*. 2nd Ed [M]. Florida: CRC Press, 2011.
- [14] Zhang Q, Chong W, Wang C Z, et al. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process [J]. *Food Chemistry*, 2018, 243: 151-161.
- [15] Ba H V, Hwang I, Jeong D, et al. *Principle of Meat Aroma Flavors and Future Prospect* [M]. Rijeka: Intech Open, 2012: 145-176.
- [16] Stefania V, Lorena P, Lanfranco S C, et al. Solid-phase microextraction in the analysis of virgin olive oil volatile fraction: modifications induced by oxidation and suitable markers of oxidative status [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(22): 6564-6571.
- [17] Wagner R, Czerny M, Bielohradsky J, et al. Structure-odour-activity relationships of alkylypyrazines [J]. *Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und -Forschung A*, 1999, 208(5-6): 308-316.
- [18] Parker J K. Thermal generation or aroma. In *Flavour development, analysis and perception in food and beverages* [M]. Woodhead Publishing, 2015.
- [19] McClements D J, Decker E A. 2007. Lipids. In *Food Chemistry*, Ed [M]. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [20] HO C, CHEN Q. Lipids in food flavors-An overview [R]. ACS Symposium Series American Chemical Society: Washington, DC, 199.
- [21] Mehta U, Swinburn B. A review of factors affecting fat absorption in hot chips [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2001, 41(2): 133-154.
- [22] Nawar W W. *Chemistry of Thermal Oxidation* [M]. Champaign: AOCS Press, 1985.
- [23] Jin G, Zhang J, Yu X, et al. Lipolysis and lipid oxidation in bacon during curing and drying-ripening [J]. *Food Chem*, 2010, 123(2): 465-471.
- [24] Khan M I, Jo C, Taiq M R. Meat flavor precursors and factors influencing flavor precursors - A systematic review [J]. *Meat Sci*, 2015, 110: 278-284.
- [25] 刘源.鸭肉风味及其在加工过程中的变化研究[D].南京:南京农业大学,2006.
- [26] Fisher A V, Enser M, Richardson R I, et al. Fatty acid composition and eating quality of lambtypes derived from

- four diverse breed x production systems [J]. *Meat Sci*, 2000, 55(2): 141-147.
- [27] Farmer L J, Mottram D S. Interaction of lipid in the Maillard reaction between cysteine and ribose: The effect of a triglyceride and three phospholipids on the volatile products [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 1990, 53: 505-525.
- [28] Gandemer G. Lipids in muscles and adipose tissues, changes during processing and sensory properties of meat products [J]. *Meat Sci*, 2002, 62: 309-321.
- [29] Zamora R, Hidalgo F J. Coordinate contribution of lipid oxidation and Maillard reaction to the nonenzymatic food browning [J]. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition*, 2005, 45(1): 49.
- [30] Hodge J E. Dehydrated foods, chemistry of browning reactions in model systems [J]. *J Agric Food Chem*, 1953, 1(15): 928-943.
- [31] Hodge J E. Dehydrated foods, chemistry of browning reactions in model systems [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 1953, 1(15): 625-651.
- [32] Jousse F, Jongen T, Agterof W, et al. Simplified kinetic scheme of flavor formation by the Maillard reaction [J]. *Journal of Food Science*, 2010, 67(7): 2534-2542.
- [33] Ramalingam V, Song Z, Hwang I. The potential role of secondary metabolites in modulating the flavor and taste of the meat [J]. *Food Research International*, 2019, 122: 174-182.
- [34] Pokorny J. Effect of browning reactions on the formation of flavour substances [J]. *Die Nahrung*, 1980, 24 (2): 115-27.
- [35] 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]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 324(Pt B): 160.
- [36] Zhang Q, Qin W, Lin D, et al. The changes in the volatile aldehydes formed during the deep-fat frying process [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(12): 7683-7696.
- [37] Negroni M, D'Agostin A, Arnoldi A. Effects of olive, canola, and sunflower oils on the formation of volatiles from the Maillard reaction of lysine with xylose and glucose [J]. *J Agric Food Chem*, 2001, 49(1): 439-445.
- [38] Peng C, 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]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 324(Pt B): 160-167.
- [39] Lu F, Kuhnle G K, Cheng Q F. The effect of common spices and meat type on the formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in deep-fried meatballs [J]. *Food Control*, 2018, 92: 399-411.
- [40] Adams A, Kitryte V, Venskutonis R, et al. Model studies on the pattern of volatiles generated in mixtures of amino acids, lipid-oxidation-derived aldehydes, and glucose [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(4): 1449-1456.
- [41] Miyagi A, Ogaki Y. Chemical processes in peanut under thermal treatment [J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2014, 8(4): 305-315.
- [42] Sohn M, Ho C T. Ammonia generation during thermal degradation of amino acids [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995, 43(12): 3001-3003.
- [43] Bazina N, He J B. Analysis of fatty acid profiles of free fatty acids generated in deep-frying process [J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2018, 55(8): 3085-3092.
- [44] Mandin O, Duckham S C, Ames J M. Volatile compounds from potato-like model systems [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(6): 2355-2359.
- [45] Yang Z M, Lu R, Song H, et al. Effect of different cooking methods on the formation of aroma components and heterocyclic amines in pork loin [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(3): 1-8.
- [46] Dueik V, Bouchon P. Vacuum frying as a route to produce novel snacks with desired quality attributes according to new health trends [J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(2): E188-195.
- [47] Garayo J, Moreira R. Vacuum frying of potato chips [J]. *Journal of Food Engineering*, 2002, 55(2): 181-191.
- [48] Aladedunye F A, Przybylski R. Protecting oil during frying: A comparative study [J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2009, 111(9): 893-901.
- [49] Teruel M R, Garcia-Segovia P, Martinez-Monzo J, et al. Use of vacuum-frying in chicken nugget processing [J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2014, 26: 482-489.
- [50] Troncoso E, Pedreschi F, Zuniga R N. Comparative study of physical and sensory properties of pre-treated potato slices during vacuum and atmospheric frying [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2008, 42(1): 187-195.
- [51] Andres A, Arguelles A, Castello M L, et al. Mass transfer and volume changes in French fries during air frying [J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(8): 1917-1924.
- [52] Warning A, Dhall A, Mitrea D, et al. Porous media based



- model for deep-fat vacuum frying potato chips [J]. Journal of Food Engineering, 2012, 110(3): 428-440.
- [53] Yu X N, Li L Q, Xue J, et al. Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2020, 60(C): 102305.
- [54] Hammer M, Schieberle P. Model studies on the key aroma compounds formed by an oxidative degradation of  $\omega$ -3 fatty acids initiated by either copper (II) ions or lipoxygenase [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(46): 10891-10900.
- [55] Cao Y, Wu G C, Zhang F, et al. A comparative study of physicochemical and flavor characteristics of chicken nuggets during air frying and deep frying [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 2020, 97(8): 901-913.
- [56] Santos C S P, Cunha S C, Casal S. Deep or air frying? A comparative study with different vegetable oils [J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(6): 1600375.
- [57] Wang Y, Hui T, Zhang Y W, et al. Effects of frying conditions on the formation of heterocyclic amines and trans fatty acids in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [J]. Food Chemistry, 2015, 167: 251-257.
- [58] 温荣欣,陈倩,秦泽宇,等.煎炸肉制品中杂环胺的控制技术及体内代谢调控研究进展[J].食品工业科技,2019,40(1): 292-298.
- [59] GB 2760-2014,食品添加剂使用标准[S]
- [60] Puangsombat K, Jirapakkul W, Smith J S, et al. Inhibitory activity of Asian spices on heterocyclic amines formation in cooked beef patties [J]. Journal of Food Science, 2011, 76(8): T174-T180.
- [61] Lee J S, Han J W, Jung M H, et al. Effects of thawing and frying methods on the formation of acrylamide and polycyclic aromatic hydrocarbons in chicken meat [J]. Foods, 2020, 9(5): 573.
- [62] Guillen M D, Goicoechea E. Oxidation of corn oil at room temperature: Primary and secondary oxidation products and determination of their concentration in the oil liquid matrix from  $^1\text{H}$  nuclear magnetic resonance data [J]. Food Chemistry, 2009, 116(1): 183-192.
- [63] Mottram D S, Edwards R A. The role of triglycerides and phospholipids in the aroma of cooked beef [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1983, 34: 511-522.
- [64] 莫宝庆,胡春艳,孙启东,等.不同存放条件对油炸食品酸价和过氧化值的影响[J].中国卫生检验杂志,2010,20(11): 2809-2814.
- [65] 吴雪辉,周薇,李昌宝,等.茶油的氧化稳定性研究[J].中国粮油学报,2009,23(3):96-99.
- [66] Muik B, Lendl B, Molina-Diaz A. Direct monitoring of lipid oxidation in edible oils by Fourier transform Raman spectroscopy [J]. Chem Phys Lipids, 2005, 134 (2): 173-182.
- [67] Sansano M, Juan-Borras M, Escriche I, et al. Effect of pretreatments and air-frying, a novel technology, on acrylamide generation in fried potatoes [J]. Journal of Food Science, 2015, 80(5): T1120-1128.