

油炸食品中潜在的几类危害物及其消减技术

陈 龙^{1,2}, 王 谊¹, 程 昊¹, 李晓东³, 田耀旗², 金征宇^{1,2*}

(¹江南大学食品学院 江苏无锡 214122

²江南大学 食品科学与技术国家重点实验室 江苏无锡 214122

³石家庄得宝机械制造有限公司 石家庄 050000)

摘要 油炸是一种传统的食品加工方式,被广泛应用于家庭烹饪与食品工业。油炸过程复杂且剧烈,若控制不当则极易产生一些加工危害物,从而对消费者健康造成不利影响。本文主要介绍油炸食品中几类典型危害物,包括反式脂肪酸、丙烯酰胺、多环芳烃、杂环胺的生成途径、影响因素、潜在危害及减控措施,以期为消费者饮食结构的合理调整、油炸食品工业的转型升级提供科学指导。

关键词 油炸; 危害物; 生成途径; 消减技术

文章编号 1009-7848(2022)02-0376-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.02.040

油炸是一种传统的食品加工方式,以油脂为加热介质对食物进行快速脱水、熟化,具有操作简单、成本可控、加工快速等显著优势,被广泛地应用于家庭烹饪与食品工业生产中^[1]。无论在欧美还是东亚,人们利用油炸方式制做出种类繁多、风味独特、色泽金黄、质构酥脆且富有地域特色的美食小吃,如日本的天妇罗、美国的炸鸡翅、中国的油条等。随着人们生活水平的提高和生活节奏的加快,方便食品和快餐食品正逐渐成为普通百姓尤其是都市年轻人日常饮食的新常态。油炸加工因具有快速、便捷、廉价等优势,故成为大规模制作方便食品和快餐食品的主要方式。很多油炸食品借助现代食品工业化,成为一系列改变生活方式的方便快捷食品,如方便面、炸薯条、炸鸡翅、炸春卷等。此外,近几年来餐饮业快速发展,品牌企业针对不同餐饮类别场景开发油炸食品,不断推陈出新,实现了油炸食品在细分餐饮市场中的新增长,如部分企业针对火锅、麻辣烫、关东煮等特定餐饮场景所开发的风味小油条、小酥肉、炸肉串等网红油炸食品,一经问世便深受消费者的喜

爱。

油炸过程中,在食品与油脂之间剧烈的传热传质驱动下,食用油和食品基质中的多种成分发生一系列复杂的物理、化学变化,如图 1 所示。油炸过程中的传质主要包括水分的蒸发与油脂的吸收。水分的蒸发有利于形成酥脆的质构并延长食品保质期;而油脂的吸收增加了食品的风味和营养价值。然而,需要注意的是油炸过程中大量油脂的吸附也会带来脂类过量摄入的问题。显然,长期高脂饮食会对人体健康造成潜在的危害,如诱发肥胖、心脑血管疾病、癌症等。油炸过程中的传热主要包括热油-食品表面的热对流与食品表面-食品内部的热传导。在油炸过程中,油脂会发生氧化、聚合和水解等系列反应(图 1a),游离脂肪酸含量增加、起泡能力增加、颜色加深、黏度增大、极性化合物含量增加、聚合物增加和不饱和度降低(图 1b)。此外,如若控制不当,则油炸过程中还可能产生丙烯酰胺^[2]、环氧丙酰胺^[3]、多环芳烃^[4]、反式脂肪酸^[5]等有害物质。

了解油炸食品制作过程中潜在危害物的形成与控制对于科学评价油炸食品安全性,提升油炸食品品质,引导消费者理性消费等均有重要现实意义。基于此,本文主要介绍油炸食品中几类典型危害物,包括反式脂肪酸、丙烯酰胺、多环芳烃、杂环胺的生成机制、影响因素、潜在危害及减控措施,以期为消费者正确看待油炸食品安全性,合理调整饮食结构提供科学指导,同时也为油炸食品

收稿日期: 2021-02-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(32101990);江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20200617);中央高校基本科研业务费专项资金青年基金项目(JUSRP12002)

作者简介: 陈龙(1988—),男,博士,副研究员

通信作者: 金征宇 E-mail: fpcenter@jiangnan.edu.cn

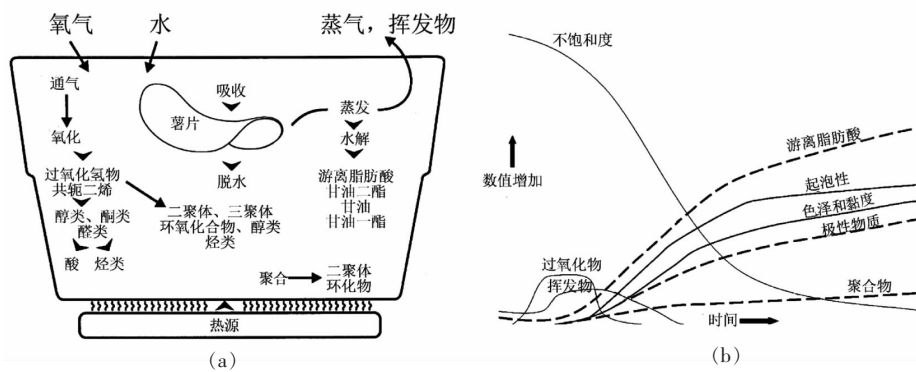


图 1 油炸食品中发生的复杂物理与化学变化^[6]

Fig.1 Complex physical and chemical reactions in fried foods^[6]

工业的转型升级提供一定的科学依据。

1 反式脂肪酸

反式脂肪酸(Trans fatty acids, TFA)是指具有反式构型双键(双键碳原子上的氢原子位于碳链两侧)的一类不饱和脂肪酸,为顺式不饱和脂肪酸的反式异构体。自然界中的不饱和脂肪酸大多为顺式脂肪酸,而反式脂肪酸主要来源于氢化植物油、精炼植物油、反刍动物脂肪以及不饱和植物油热加工烹饪过程中的脂肪酸反式异构化^[5-6]。典型的顺、反式脂肪酸的结构如图 2 所示。根据碳链碳原子数量,反式脂肪酸可以分为 16-、17-、18-碳反式脂肪酸等,但是自然界中主要以 18 碳反式脂肪酸为主。

1.1 反式脂肪酸的形成

植物油氢化和精炼过程中会产生一定量的反式脂肪酸。天然植物油不饱和脂肪酸含量高,常温下呈液态,易于氧化,性质不稳定,难以满足食品工业生产要求。因此,人们发明了氢化工艺,即在一定的温度和压力下加入氢催化液态植物油制备半固态或固态的氢化植物油,油脂的可塑性、融合性、乳化性等加工特性均得到明显改善。然而在氢化和精炼过程中植物油会发生热聚合反应,生成一定量的反式脂肪酸,如人造奶油中反式脂肪酸含量高达 7.1%~17.7%,起酥油中反式脂肪酸含量也达到了 10%左右^[7]。反刍动物肠道中的丁酸弧菌会对饲料中的不饱和脂肪酸进行生物发酵产生反式脂肪酸,并在反刍动物的脂肪组织中富集。此外,近年来人们越来越关注在热加工过程中油脂

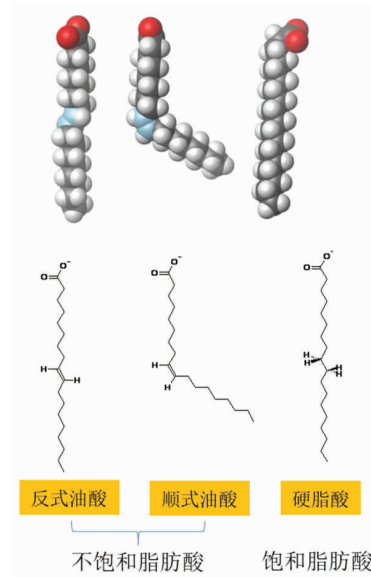


图 2 典型顺、反式脂肪酸结构图

Fig.2 Structure diagram of typical cis or trans fatty acids

转变生成反式脂肪酸的问题。

植物油中的不饱和脂肪酸在高温煎炸条件下会发生异构化生成反式脂肪酸,尤其是当植物油经过反复高温煎炸处理之后。油炸温度、反复油炸次数、食品中水分含量、油脂自身特性等都会影响反式脂肪酸的生成。杨明等^[8]对 7 种常见植物油在加热过程中的品质变化进行了研究,发现不同植物油中反式脂肪酸的含量在模拟油炸过程中均出现显著上升的趋势,其中增幅最大的是菜籽油,最低的是橄榄油。李安^[9]研究了大豆油中不饱和脂肪酸的异构化过程,发现反式脂肪酸的种类和含量

随着温度的增加而呈现指数增长趋势；充氮处理可以促进反式脂肪酸的形成；而TBHQ、茶多酚、迷迭香等抗氧化剂的添加可以有效降低大豆油中反式脂肪酸的含量，说明高温加工过程中不饱和脂肪酸的热诱导异构化反应与脂质的氧化过程有关。食用油在高温加工过程中产生的自由基可以通过自由基反应机制催化顺式脂肪酸的双键发生顺反异构化，具体反应过程包括自由基与双键加成 β 消除重新形成热稳定的反式脂肪酸^[10]。

1.2 反式脂肪酸的危害

由于自然界中脂肪酸主要以顺式结构存在，在经历漫长进化后人体内的酶在定向选择进化后更易酶解顺式脂肪酸，而对于结构发生变化的反式脂肪酸则不能加以有效利用。也就是说人体并不能直接代谢利用反式脂肪酸。

现有研究证明反式脂肪酸可以通过降低细胞膜透过性和流动性影响细胞对营养物质、信号分子以及胆固醇的识别与代谢，降低对人体有益的高密度脂蛋白(HDL)含量而升高对人体有害的低密度脂蛋白(LDL)浓度，加速动脉硬化进程，增加心脑血管疾病的发生^[11]。与顺式脂肪酸相比，反式脂肪酸中CH基团空间位阻更小、键角更小，且呈直线型结构，故反式脂肪酸分子结构更为稳定，理化性质接近于饱和脂肪酸。在相同条件下反式脂肪酸的黏度更大，流动性更低，因而更易沉积在血管壁周围；加之反式脂肪酸抑制血小板聚集的作用有限，导致血液黏度上升、血压升高，严重时还会造成血管的堵塞，形成血栓。

反式脂肪酸还会干扰婴幼儿的生长发育。反式脂肪酸可以通过胎盘或母乳进入胎儿和婴幼儿体内，干扰必需脂肪酸等营养物质的吸收和代谢，增加婴幼儿患上必需脂肪酸缺乏症的风险，进而影响胎儿和婴幼儿的正常发育。反式脂肪酸还可以与大脑中的正常脂质结合，抑制长链多不饱和脂肪酸的合成，影响婴幼儿中枢神经和大脑的正常发育。

反式脂肪酸对成人脑部功能也存在不利影响。长期摄入反式脂肪酸会明显增高血液中胆固醇含量，促进大脑动脉硬化进程，造成大脑功能衰退，严重时会导致老年痴呆症的发生^[9]。

此外，反式脂肪酸的摄入还与II型糖尿病^[12]、

儿童肥胖、人体代谢综合症、抑郁症、婴幼儿生长发育不良等疾病的诱发或加重有一定关联^[10]。因此，控制食品中反式脂肪酸含量已经成为了社会大众关心的饮食安全问题。

1.3 反式脂肪酸的消减

对于油脂氢化过程目前一般可以通过降低反应温度、提高反应压力、增加搅拌速率、使用贵金属催化剂等手段来减少反式脂肪酸的形成^[13-14]。对于油脂精炼，则是通过降低脱臭温度和脱臭时间来达到减少反式脂肪酸含量的目的^[14]。而对于油炸过程中生成的反式脂肪酸的抑制或消减主要有以下几类方法：

1) 油炸的工艺条件直接影响反式脂肪酸的生成，一般油炸温度越高、持续时间越长就会产生越多的反式脂肪酸，在保持产品特征风味和感官品质的前提下应该尽量降低油炸温度，缩短油炸时间。

2) 热加工过程中反式脂肪酸的形成与脂质氧化相关，热氧化过程中产生的中间物质可能为热诱导异构化反应提供了底物。抗氧化剂的添加可以在一定程度上抑制TFAs的形成。油炸过程中，不饱和脂肪在自由基的催化作用下可以通过自由基反应机制发生双键的顺-反异构化产生TFAs。抗氧化剂则能通过吸收氧化反应产生的自由基，来有效阻断自由基链式反应，进而抑制TFAs的形成^[10]。一般抗氧化剂清除自由基能力越强，其对反式脂肪酸抑制作用越大。食品工业中常用来消减热加工过程中反式脂肪酸生成的天然抗氧化剂主要有迷迭香提取物、茶多酚、叶黄素、鼠尾草酸、谷维素等。然而需要注意的是许多天然抗氧化剂不耐热，在传统油炸高温条件下易于降解，从而难以发挥抑制脂质氧化和异构化的作用。此外，部分天然抗氧化剂的添加还会对产品的风味和口感产生一定负面影响，并不适合在食品体系中大量添加。

3) 可以采用新型油炸技术，尽量降低油炸温度、缩短油炸时间，控制油炸过程中反式脂肪酸的生成^[15]。典型的真空油炸技术。在真空油炸过程中水的沸点显著降低，使得食物在较低的温度(90~120℃)下便可以实现快速脱水、熟化，较低的加热温度和近似真空的加工环境能够最大限度控

制脂质的氧化进程以及异构化反应,反式脂肪酸等危害物的生成也能得到有效控制。

2 丙烯酰胺

丙烯酰胺(Acrylamide, ACR)为无色无味、水溶性的 α,β -不饱和酰胺,其化学性质较为活泼,主要含有胺基和双键两个活性中心,易于发生羟甲基化反应、水解反应和 Michael 加成反应^[16]。在油炸条件下,食物中的碳水化合物和氨基酸易于通过美拉德反应形成丙烯酰胺^[17]。

2.1 丙烯酰胺的生成

英国和瑞士科学家发表在《Nature》上的文章证明了食品热加工过程中的美拉德反应为丙烯酰胺的生成提供了重要的前体物质,包括 Schiff 碱、亚甲胺叶立德、脱羧 Amadori 产物等^[18-19]。英国科学家已证实油炸食品为丙烯酰胺含量较高的食品之一。丙烯酰胺生成的途径较多,其中研究较为透

彻的是天冬酰胺途径,如图 3 所示。丙烯酰胺的生成主要涉及美拉德反应初期的羰氨缩合和分子重排。在热加工过程中天冬酰胺与还原糖发生缩合反应生成席夫碱,席夫碱则可以通过 2 种反应途径转化为丙烯酰胺。途径 1 是席夫碱通过分子内环化形成唑烷-5-酮中间产物,经脱羧后形成脱羧 Amadori 产物,最后在高温条件下 C-N 键断裂形成丙烯酰胺;途径 2 中席夫碱脱羧后形成亚甲胺叶立德 I、亚甲胺叶立德 II 等 Heyns 产物,最后 Heyns 中间产物通过水解脱氨反应形成丙烯酰胺。

除了美拉德反应外,油脂的热解也会形成丙烯酰胺。油炸食品制作过程中甘油三酯水解、氧化、热解等反应后形成丙烯醛,再经氧化后转化为丙烯酸,氨基化合物再和丙烯醛、丙烯酸反应便可生成丙烯酰胺^[20]。

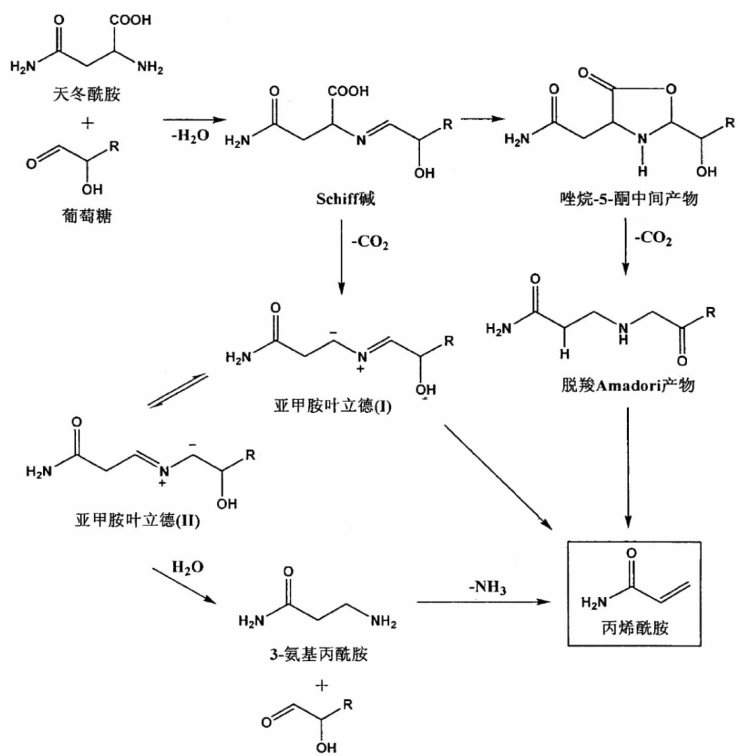


图 3 天冬酰胺途径下丙烯酰胺的形成机理^[21]

Fig.3 Formation mechanism of acrylamide by asparagine pathway^[21]

2.2 丙烯酰胺的危害

丙烯酰胺已被国际癌症研究机构确定为二类致癌物^[22],其分子小、活性高,且生物渗透性好,既

能主动吸收,又能被动扩散,易于通过皮肤、消化道等进入体内循环系统,并对人体产生危害。动物实验已表明丙烯酰胺可以对动物机体的生殖系

统、神经系统和遗传物质产生不可逆的破坏。

丙烯酰胺可诱导哺乳动物体细胞和生殖细胞的基因发生突变,并在多个器官如肺、子宫、乳腺、脑等引发肿瘤甚至是癌症的发生^[23]。然而在丙烯酰胺的靶器官包括肾脏、肝脏等并未发现明显致癌现象,人们对于丙烯酰胺致癌的方式及机制仍然存在较大争议,需要更多的科学研究加以验证和剖析。目前,主流观点一般认为丙烯酰胺体内氧化代谢产物(环氧丙烯酰胺,GA)是丙烯酰胺致癌的关键所在。丙烯酰胺(AA)和GA均可以抑制有丝或减数分裂,还可引起体内激素水平的异常;AA还可能通过消耗机体内的谷胱甘肽、打破氧化还原平衡、干扰基因的正常表达,最终导致细胞的癌变。

丙烯酰胺具有一定的生殖毒性,长期过量暴露会造成生殖系统的不可逆损伤,包括雄性动物睾丸重量的下降、精子质量的降低,雌性动物精母细胞的凋亡、卵巢黄体数量的减少,严重影响动物的生育能力。母体在妊娠期过量接触丙烯酰胺还会干扰受精卵的正常发育,胚胎肝、肾、心脏等脏器大概率呈现明显形态学改变,子代的流产率和畸形率也显著增加。余带男^[24]采用强制灌胃的方式给予妊娠小鼠不同剂量丙烯酰胺,以研究丙烯酰胺对妊娠期小鼠胎盘的影响及作用机制,研究结果表明丙烯酰胺主要可通过影响胎盘迷路层血管的形成、干扰胎盘发育关键基因(*Eome*、*Ascl2*)的表达、抑制胎盘细胞的增殖等途径影响小鼠胎盘的的生长发育。

丙烯酰胺对动物的神经系统也会产生严重影响,引起神经系统病变、认知功能衰退、肢体力量减弱等症状。现有研究已经证实丙烯酰胺可以造成外周神经末梢的萎缩、中枢神经系统末梢的退性,进而破坏神经传递,产生神经毒性^[25-26]。另外,丙烯酰胺作为良好的亲电试剂可以与生物体内的DNA和蛋白质发生反应,进而干扰机体正常的生理生化反应进程,如丙烯酰胺可以与342位的半胱氨酸(Cys342)作用来抑制突触前 Na^+ 依赖的多巴胺转运蛋白的正常生理功能,导致神经信号传输发生障碍^[27]。赵梦瑶^[28]以小鼠原代神经胶质细胞模型为研究对象,通过丙烯酰胺诱导的氧化应激与神经毒性之间的关系解析,进一步阐述了丙烯

酰胺致小鼠神经毒性分子机制,发现丙烯酰胺主要是通过胶质细胞中产生大量活性氧自由基(ROS)、消耗还原型谷胱甘肽(GSH)、激活氧化应激相关的Nrf2、NF- κ B通路及下游基因等方式,加速神经细胞的凋亡及诱导神经系统的紊乱。

2.3 丙烯酰胺的消减

丙烯酰胺的危害较大,因而对高温油炸食品中丙烯酰胺的有效控制已成为食品安全研究的热点。目前主要是从原料、加工、添加剂等角度着手解决该问题。

原料的组成成分直接影响美拉德反应底物的浓度,所以在原料选用上可以尽量选择还原糖含量、游离氨基酸含量和天门冬酰胺含量相对较低的品种^[29]。原料贮藏期间温湿度也很关键,特别对于马铃薯等根茎类植物,其储藏期间水解代谢酶系仍然具有活性,如果储藏温度不当马铃薯中相当多的淀粉会转变成还原糖,在后续热加工中便易于产生丙烯酰胺,所以为了控制油炸中丙烯酰胺的生成还需要实现原料的科学贮藏。对马铃薯而言,其储藏温度的选择需要综合考虑“低温糖化”和“高温发芽”的问题,一般4~8℃的长时低温储藏会发生明显的“低温糖化”,而当储藏温度超过8℃时又会缩短马铃薯的休眠期,促进马铃薯的发芽,所以实际生产中马铃薯的储藏温度宜控制在8℃左右^[30]。此外,储藏期间结合适度剂量的辐照处理可以干扰马铃薯内部的生化反应进程,抑制还原糖含量的增加,从而显著降低马铃薯在油炸过程中丙烯酰胺的生成量^[31]。

适当的原料预处理也可以有效控制热加工过程中丙烯酰胺的生成。热烫处理可以有效降低油炸薯片中丙烯酰胺的含量,这主要是因为热烫处理过程中原料表面大量还原糖被除去,从而抑制了美拉德反应^[32]。由于热烫操作工艺简单,且对产品品质影响较小,故而具有较好的实际应用价值。降低丙烯酰胺的另一个思路就是设法降低原料中丙烯酰胺前体物质——天冬酰胺的含量。一般可以采用L-天冬酰胺酶对原料进行预处理,通过消耗原料中天冬酰胺的含量来控制丙烯酰胺的生成量^[33]。天然活性成分复配是近年来研究较多的领域,植物提取物、香辛料等在丰富产品形式的同时也能对丙烯酰胺的抑制产生一定的贡献。其机理

主要是基于多酚、黄酮、叶绿素、巯基化合物等植物化合物与美拉德反应的中间体结合从而减少丙烯酰胺的生成^[21,34]。此外,人们还发现原料在盐溶液中的浸泡处理对丙烯酰胺的生成也有一定抑制效果,常见的有 CaCl_2 、 NaCl 、 MgCl_2 等盐溶液,然而抑制机制仍有待明确。

烹饪过程的科学管理是降低油炸食品丙烯酰胺含量的有效方法。张云焕等^[35]系统优化了油炸加工工艺条件、食品配料成分对油炸麻花中丙烯酰胺生成的影响,发现适当降低油炸温度、缩短油炸时间、选用合适的煎炸油、添加特定的抗氧化剂等均能显著抑制丙烯酰胺的生成量。美拉德反应依赖于 pH 值,其中丙烯酰胺生成的最适 pH 值范围在 7~8,通过添加柠檬酸、醋酸等酸味剂降低体系 pH 值也可以有效减少丙烯酰胺的生成量。真空低温油炸由于较好隔绝氧气及降低油炸温度,

其制品中危害物含量也能够得到有效控制,然而制品的感官品质与传统油炸工艺相比仍存在一定差距。

3 多环芳烃

多环芳烃(Polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一大类由两个以上苯环稠和在一起形成的碳氢化合物。根据芳香环数量,多环芳烃一般可以分为 2 大类:轻质多环芳烃,分子中包含 4 个及 4 个以下芳香环;重质多环芳烃,分子中包含的芳香环超过 4 个。值得注意的是 4 环以下的轻质多环芳烃主要呈现气态,5 环及以上的多环芳烃则主要呈现固态,而 4 环的多环芳烃则以气、固两种形式存在^[36]。常见的多环芳烃结构如图 4 所示,其中最受人们关注的当属苯并[a]芘。

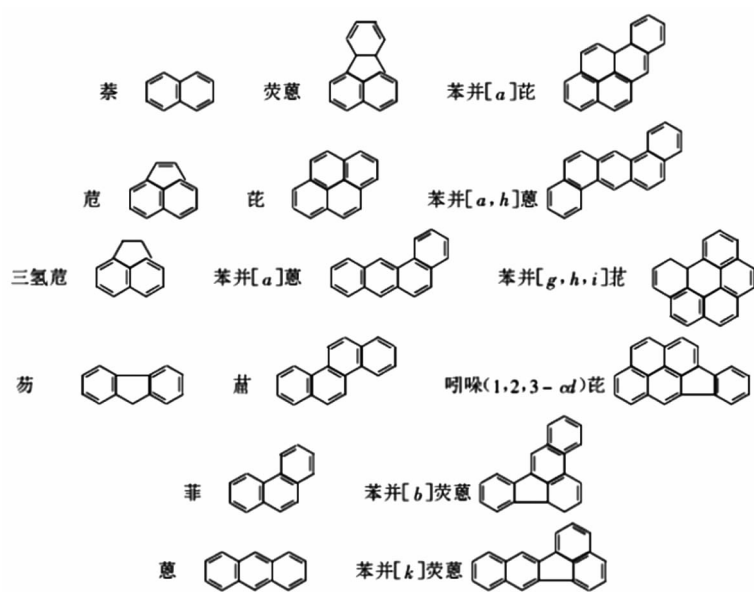


图 4 常见多环芳烃的分子结构

Fig.4 Molecular structure diagram of common polycyclic aromatic hydrocarbons

3.1 多环芳烃的形成

油炸食品中的多环芳烃主要来源于原料生长阶段的生物富集^[37]、热加工过程的燃烧裂解^[38]以及包装材料中多环芳烃的迁移污染等^[39]。

油炸过程中多环芳烃的形成主要归因于食品中碳水化合物、脂肪及蛋白质的不完全燃烧和热解,这些剧烈的反应诱导产生一系列具有较高化

学反应活性的自由基,再由自由基与不饱和烃反应生成多环芳烃。目前涉及的反应机理主要有 Badger-Howard 机理、Frenklach 机理和 C2HX 分子生长氧化-HACA 机理^[38,40]。Badger-Howard 机理认为有机物在不完全燃烧后发生裂解产生碳氢自由基、苯基等,中间产物苯基、甲醛与乙烯等通过取代、聚合、环化等反应生成多环芳烃。Badger-

Howard 机理主要发生在反应温度较低的情况,而在较高温度下多环芳烃的生成主要受 Frenklach 机理控制。Frenklach 机理指出,有机物在燃烧等高温条件下苯环先脱氢形成苯基,然后苯基与炔烃类发生加合、环化等反应形成多环芳烃。 C_2H_x 分子生长氧化-HACA 机理则认为高温过程中苯环脱氢形成的苯基及衍生自由基通过与乙炔不断发生 HACA 反应(氢原子脱除-乙炔分子添加)实现芳香烃分子的生长与环化,该机理较好地解释了多环芳烃类化合物苯环数量的增加过程。

3.2 多环芳烃的危害

多环芳烃是广泛存在于自然界中的一类难以降解的有机污染物,已被研究确认具有致癌性、致畸性、致突变性和免疫毒性。目前,多环芳烃已经成为全球众多国家环境监测与食品安全领域重点关注的对象,越来越多的科学家开始重视来源于环境(主要是大气和水体)及食品的多环芳烃暴露问题。

大量动物实验和流行病学调查均发现多环芳烃的摄入与动物的肿瘤和癌症的发生有较大的相关性。现有研究发现多环芳烃可以诱发的癌症包括皮肤癌、肺癌、胃癌、膀胱癌、消化系统癌症等多种^[36]。值得重视的是多环芳烃可以通过胎盘屏障进入胎儿体内,改变胎儿中癌症相关基因的表达,并增加癌症发病的风险^[41]。目前普遍认为多环芳烃的致癌机制有两种:机制 1 中多环芳烃通过氧化途径生成二元醇环氧化物等亲电反应物,该亲电物易于与 DNA 或蛋白质共价反应形成稳定的加合物,进而引发癌症;机制 2 中多环芳烃则是通过单电子氧化途径生成自由基阳离子,该自由基阳离子再与 DNA 或蛋白质结合形成加合物,诱发 DNA 碱基突变及癌症的发生^[38]。

多环芳烃可以通过胎盘由母体进入胎儿体内,干扰胚胎的正常发育,导致畸形。雌性小鼠在妊娠期摄入高水平的多环芳烃,其子代被发现出现了身体缺陷和体重下降的问题^[42];此外,多环芳烃还与母体不良分娩、子代发育障碍、子代智力发育不良等问题有关^[43-44]。

多环芳烃本身并没有毒性,然而在动物体内会转化为醇环氧化物,该化合物反应活性极高,易于与 DNA 中鸟嘌呤和腺嘌呤结合形成加合物,增

加 DNA 在复制过程中出错的概率,引起细胞的突变^[36];多环芳烃在紫外光诱导下形成反应能力极强的单线态氧,会对 DNA 等遗传物质造成损害,并引起细胞的突变;多环芳烃还可以与空气中的 O_2 、 NO_x 、X(卤素)或溶液中的 $-OH$ 、 $-NO_x$ 、 $-NH_2$ 等发生亲核取代反应,生成具有致突变效应的硝基、羟基及卤素衍生物^[45]。

3.3 多环芳烃的消减

食品中多环芳烃的控制需要从原料源头、生产、包装等多个环节入手。

原料的质量不仅影响到产品的品质,也直接牵涉到最终食品的安全。多环芳烃易于在动植物组织中富集,所以在作物种植或动物养殖的过程中需要有效阻断环境中多环芳烃的污染。首先需要选择无污染或污染小的区域来进行种植或养殖,以减少土壤、水体等环境中多环芳烃在动植物组织中的迁移和富集;采用现代农业生产技术,农作物采收后剩余的秸秆采用机械还田、堆沤还田或利用生物技术发酵生产生物菌肥,或是加工成动物的饲料等,杜绝秸秆焚烧等行为;动物饲养过程中需要严格检验饲料的质量,杜绝投喂多环芳烃含量超标的饲料。

食品油炸过程中各环节的严格控制也是消减多环芳烃的重要途径。首先是煎炸油的选用,由于油脂制备工艺的差异,有无高温炒籽工艺、有无精炼处理等都会显著影响到油脂中多环芳烃的含量^[46],需要选用多环芳烃含量低的油进行油炸;其次是煎炸过程的科学管理,主要涉及油炸温度、时间和煎炸油的过滤等,一般较高的温度、较长的时间和煎炸次数较多的油脂都是形成多环芳烃的关键因素,在食品烹饪过程中必须严格控制油炸加工条件,尽量避免食物表面碳化和食用油发烟的情况发生,最大限度降低多环芳烃生成的风险,即需要通过适当降低油炸温度、缩短油炸时间、对煎炸油进行过滤和及时添补新油等方式来控制油炸食品中多环芳烃的生成和积累;油炸过程中向体系中添加抗氧化剂也可以抑制多环芳烃的生成,其作用机制在于抗氧化剂可以有效捕获和稳定多环芳烃化合物形成所涉及的关键自由基,从而阻断多环芳烃的生成;新型煎炸设备的使用如真空油炸,可以有效降低多环芳烃的产生^[47],一般真空

油炸时的温度可以低至 100 °C 以下, 远低于常规油炸中所使用的油炸温度 (150~200 °C), 所以真空油炸过程中食物表面的温度远低于其燃烧温度, 可以避免有机物的不完全燃烧, 进而有效阻断多环芳烃等有害物质的生成^[48]。

包装环节需要注意避免多环芳烃的迁移和二次污染。首先, 用于油炸食品包装的材料在制作过程中应该严禁添加回收塑料, 回收料会造成包材中多环芳烃等有害物的积累和放大^[39]; 其次, 应该通过材料改性、装备改造等途径增强包材对于多环芳烃等有害物的阻隔性, 有效阻断食品在储运期间外界环境或包材中的多环芳烃向食品基质中迁移; 还应该在兼顾成本、品质和安全的基础上科学合理选用油炸食品的储藏方式。

4 杂环胺

杂环胺 (Heterocyclic aromatic amines, HAAs) 是一类由碳、氢、氮原子构成的杂环芳香烃类化合物的总称, 主要来源于富含蛋白质的高温加工食品。目前已经从高温烹饪肉制品中分离鉴定出超过 30 种杂环胺。杂环胺在化学结构上主要分为氨基咪唑氮杂芳烃类 (Amino-imidazo-azaarenes, AIAs) 和氨基咔啉类 (Amino-carbolines) 两大类, 其中 AIAs 类杂环胺一般在 100~

300 °C 之间形成, 被称为“热致型杂环胺”; 氨基咔啉类则是在温度高于 300 °C 时才会通过热降解反应生成, 被称为“热解型杂环胺”^[49]。

4.1 杂环胺的形成

氨基咔啉类杂环胺主要是在 300 °C 以上的高温下由游离氨基酸或特定蛋白质 (大豆球蛋白、酪蛋白等) 通过热解反应形成。油炸过程的温度通常不会超过 200 °C, 因此氨基咔啉类杂环胺一般不会出现于油炸食品中。实际上, 油炸食品中的杂环胺主要是通过美拉德反应生成的, 反应温度介于 150~250 °C, 即主要属于热致型氨基咪唑氮杂环胺^[50]。以食品中一种含量相对较高、且在高温肉制品中尤为常见的 2-氨基-1-甲基-6-苯基-咪唑 [4,5-b]吡啶 (PhIP) 为例, 其由美拉德反应产生的大致途径如下 (图 5)。首先, 食品中的苯丙氨酸通过 Strecker 反应转化为苯乙醛, 苯乙醛与肌酸酐发生醇醛缩合, 再经脱水、环化等反应生成 PhIP。喹啉类 (IQ)、喹啉啉类 (IQx) 杂环胺是另外两类较为常见的热致型杂环胺, 主要是由还原糖和氨基酸通过美拉德反应生成, 美拉德反应的 Strecker 途径生成了乙炔基-吡啶或乙炔基-吡啶, 肌酸酐则通过环化形成肌酸酐, 肌苷酸再与吡啶或吡啶通过环化、脱水、去饱和作用等产生咪唑喹啉和咪唑喹啉^[51]。杂环胺的生成受到诸多因素的影响, 包

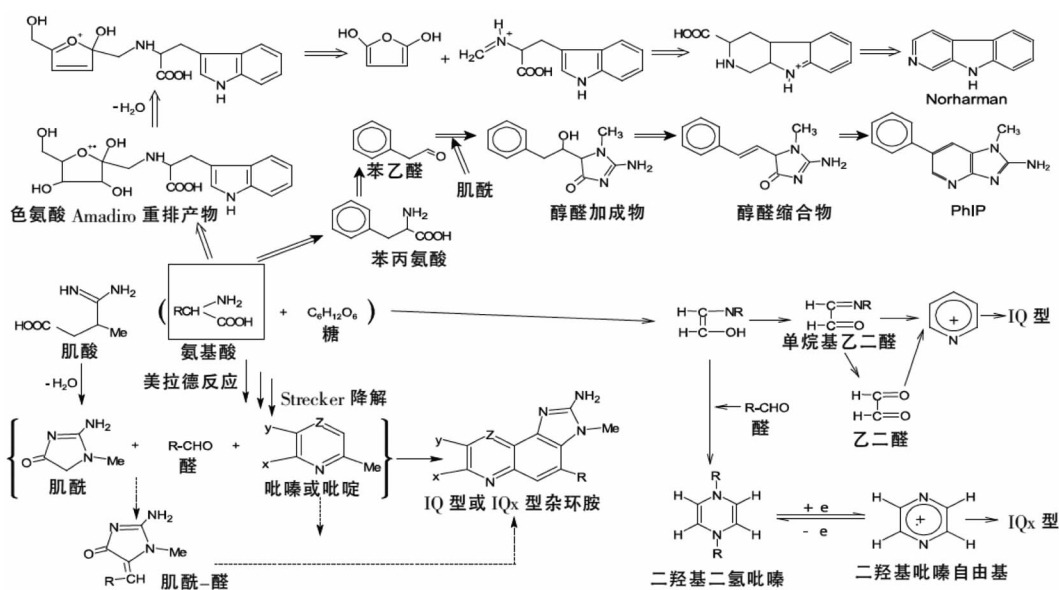


图 5 杂环胺的形成途径^[55]

Fig.5 Formation pathway of heterocyclic aromatic amine^[55]

括烹饪过程、加热时间、肉的组成、pH值、油脂含量、游离氨基酸含量、抗氧化剂等^[52]。例如,现有研究发现家禽中的 IFP 和 PhIP 的含量通常较高,而在鱼、牛肉和猪肉中则会出现较多的 MeIQx^[53-54]。原料中还原糖、游离氨基酸等作为美拉德反应的重要反应底物,因此能够促进热加工中杂环胺的形成。

4.2 杂环胺的危害

杂环胺可与有机体内遗传物质 DNA 形成加合物,因而呈现出较强的致癌和致突变性,它们的致癌性比亚硝胺、黄曲霉毒素 B₁ 和苯并(α)芘高 10 倍^[56]。杂环胺也与丙烯酰胺、多环芳烃等一起成为热加工肉制品中广受人们关注的几类重要有害物质。目前普遍认为,杂环胺在细胞色素氧化酶 P450IA2 作用下形成 N-羟基衍生物,N-羟基衍生物在靶器官中经过 N-乙酰转移酶催化下转化为芳胺基-DNA 加合物,引起基因突变、染色体畸变、癌基因活化等 DNA 损伤,并诱发相应部位肿瘤的发生^[57-58]。通过致细菌突变试验(Ames 试验)发现 IQ 类化合物如 MeIQ、IQ、4,8-DiMeIQx 和 MeIQx 等都属于较强的诱变剂^[59]。欧洲规定杂环胺每日的摄入量应低于 1 μg^[52]。

杂环胺的致癌性则主要是通过动物实验进行研究。人们在老鼠和非人灵长类动物身上均发现杂环胺的摄入可以明显增加肿瘤的发生率,且癌症主要集中在动物的肝脏和肠道等部位^[52]。Wolk^[60]通过前瞻性群组研究发现加工类红肉的摄入可以明显增加几类癌症的发病率,其中前列腺癌增加 4%、乳腺癌增加 9%、结肠癌增加 18%、胰腺癌增加 19%,而红肉在热加工过程中生成的杂环胺、多环芳烃等有害物是诱导上述癌症发病的关键因素。根据动物实验数据,国际癌症研究组织已经将 IQ 列为可能致癌物质(2A 类),其余 8 种常见杂环胺(MeIQ、MeIQx、PhIP、AαAC、MeAαAC、Trp-P-1、Trp-P-2 和 Glu-P-2)列为可能致癌物质(2b 类)。然而致癌是一个长期且异常复杂的过程,其不仅受到致癌物种类、致癌能力、暴露浓度、暴露时间、暴露方式、其它致癌物存在等因素的影响,还会受到个体饮食习惯(如是否吸烟饮酒等)、身心状态(如是否肥胖、失眠、精神紧张等)、外部自然环境等不可控因素的影响,目前还难以精准定量研究

杂环胺等特定致癌物与人体癌症之间的关系^[61]。现有研究主要基于流行病学调研和样本相关性分析,只能得知杂环胺与某一类癌症发生之间存在一定的相关性,而不同结构杂环胺在不同部位的致癌机制仍然不明朗,有待深入研究。

4.3 杂环胺的消减

工厂生产或日常烹饪中可以通过以下措施有效降低食物中杂环胺的生成。

首先,合理添加一些香辛料、抗氧化剂、植物提取物等可以有效抑制杂环胺的产生。外源成分抑制杂环胺形成主要是基于外源成分对自由基的清除能力或是与杂环胺前体化合物形成稳定加合物,从而阻断加工中杂环胺的生成与累积。Bao 等^[62]研究发现黑胡椒粉可以有效降低油炸罗非鱼片中杂环胺的含量,添加 1% 黑胡椒粉后炸鱼片(油炸 8 min)中 PhIP 和 MeIQx 抑制率达到 100%,黑胡椒粉中的胡椒碱、硫胺素等天然抗氧化物质被认为可以通过与自由基结合、清除美拉德反应重要中间体等方式来阻碍杂环胺的生成。天然植物提取物由于安全、无毒、环保,且对部分产品还有一定增色、增香、增味的独特功效,使得天然植物提取物基抑制剂的开发利用成为了近年来的研究热点。

由于杂环胺主要由美拉德反应诱导产生,所以适当控制美拉德反应的进程也可以有效抑制杂环胺类化合物的生成。例如,可以通过添加亲水胶体来调节食品的水分活度,影响美拉德反应的速率和程度,进而干扰杂环胺的形成;含有羧基和富含氨基的亲水胶体还可以与杂环胺前体物质发生反应进而降低杂环胺的生成量^[63]。油炸时在食物表面覆上一层由淀粉、植物蛋白、亲水胶体等组成的裹粉也可以有效控制油炸过程中杂环胺的产生,这主要是因为外裹层能够有效增加食品的含水量和保水性,防止肉中前体物质随着水分的迁移而在食物表面浓缩并形成大量杂环胺^[64]。油炸前先用啤酒或葡萄酒对肉组织进行腌制,除了增加风味、改善质构、提高保水性外,也可以起到抑制杂环胺生成的目的,其机理则主要基于啤酒中的超氧化物歧化酶和葡萄酒中的酚类物质均可以有效降低体系中活性氧自由基含量,从而抑制美拉德反应生成杂环胺^[64]。

新型食品加工技术的利用是控制食品中杂环胺生成的另一重要途径。油炸前微波预处理可以显著降低牛肉饼中肌酐、葡萄糖和游离氨基酸等杂环胺重要前体物质含量,进而抑制油炸过程牛肉饼中杂环胺的大量生成^[65-66];Yang等^[67]对比了电炉加热、热空气油炸和深层油炸3种方式对猪肉中杂环胺生成量的影响,发现热空气油炸的猪肉中杂环胺的含量最低。此外,真空油炸技术也可以有效抑制杂环胺的生成,这是由于在负压条件下水的沸点显著降低,可以大幅降低油炸温度、缩短油炸时间,进而有利于减弱美拉德反应并降低杂环胺等有害物质的生成^[1,48,68]。

5 结语与展望

油炸过程剧烈、复杂,易于产生诸多有害物质,其中值得关注的主要有反式脂肪酸、丙烯酰胺、多环芳烃和杂环胺等。上述有害物质对消费者的身体健康产生潜在危害,它们的生成机制、影响因素、抑制原理都是食品安全领域的重要议题,受到人们的普遍关注。由于真实食品体系的复杂性,使得目前相关研究主要局限于化学模拟体系,所得结论未必完全适用于真实食品;其次,由于一些疾病的复杂性、长期性和多因性,造成当前毒理学病理学的研究主要依赖于细胞、动物实验和流行病学调查的现状,油炸过程所产生的危害物在人体不同部位中的致病机制、构效关系等仍有待深入探索;再次,油炸过程中危害物形成机制,包括危害物累积、分布与转化规律,危害物与食品组分作用机制,不同危害物之间的交互作用等仍需深入研究,以期加工环节减少危害物的形成提供科学依据;最后,在着力抑制危害物生成量、降低食品安全风险的同时,也不能忽视食品的感官品质和营养价值的保留,换言之,需要通过科学研究在食品感官属性与营养安全品质之间寻找到合理的平衡点。

总之,随着危害物生成机制的深入研究、加工工艺的调整优化、新技术的开发应用,能够有效消减油炸食品中的典型危害物,提升油炸食品品质与安全性。当然,行业协会的积极引导、政府职能部门的监督管理与新闻媒体的科普宣传等对于油炸食品工业的健康发展也是不可或缺的。

参 考 文 献

- [1] 陈龙. 油炸过程中淀粉结构变化与吸油特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
CHEN L. Investigation on the structural changes and oil absorption of starch during frying [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [2] HSU H T, CHEN M J, TSENG T P, et al. Kinetics for the distribution of acrylamide in French fries, fried oil and vapour during frying of potatoes [J]. Food Chemistry, 2016, 211: 669-678.
- [3] THÜRER A, GRANVOGL M. Generation of desired aroma-active as well as undesired toxicologically relevant compounds during deep-frying of potatoes with different edible vegetable fats and oils[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64 (47): 9107-9115.
- [4] LI G, WU S M, ZENG J X, et al. Effect of frying and aluminium on the levels and migration of parent and oxygenated PAHs in a popular Chinese fried bread youtiao[J]. Food Chemistry, 2016, 209: 123-130.
- [5] BANSAL G, ZHOU W, TAN T W, et al. Analysis of trans fatty acids in deep frying oils by three different approaches [J]. Food Chemistry, 2009, 116 (2): 535-541.
- [6] SERPIL S, SUMNU S G. Advances in deep-fat frying of foods [M]. Boca Raton: CRC Press, 2009: 57-75.
- [7] 王少振, 孙淑华. 油脂精炼过程中反式脂肪酸控制的研究进展[J]. 粮食与食品工业, 2014, 21(2): 18-21.
WANG S Z, SUN S H. Research progress of trans-fatty acids quality control in maize oil[J]. Cereal & Food Industry, 2014, 21(2): 18-21.
- [8] 杨明, 邵鹏, 沈甘霓, 等. 加热过程中植物油品质变化规律的研究[J]. 分析仪器, 2018, 2: 138-146.
YANG M, SHAO P, SHEN G N, et al. Study on quality variation of plant oils in heating process[J]. Analytical Instrumentation, 2018, 2: 138-146.
- [9] 李安. 大豆油不饱和脂肪酸热致异构化机理及产物安全性分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
LI A. Mechanism of thermally induced isomerization of unsaturated fatty acids in soybean oil and safety analysis of the products [D]. Beijing: China Agricultural Academy, 2013.

- nese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [10] 杨美艳. 食用油热加工过程中反式脂肪酸的形成与控制[D]. 南昌: 南昌大学, 2012.
YANG M Y. Formation and control of trans fatty acids in edible oils during heat treatment[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [11] 陈永芳, 魏祯倩, 刘政. 如何降低反式脂肪酸对人体健康的危害[J]. 肉类工业, 2020, 5: 49-53.
CHEN Y F, WEI Z Q, LIU Z. How to reduce risks of trans fatty acids to human health[J]. Meat Industry, 2020, 5: 49-53.
- [12] 孙艳艳. 反式脂肪酸对人体健康的影响[J]. 食品安全导刊, 2016, 36: 85.
SUN Y Y. Effects of trans fatty acids on human health[J]. China Food Safety Magazine, 2016, 36: 85.
- [13] 王立琦, 李中宾, 刘芳, 等. 纳米镍的制备及氢化大豆油的分析[J]. 食品科学, 2018, 39(2): 8-13.
WANG L Q, LI Z B, LIU F, et al. Preparation and application of nano nickel catalyst for hydrogenation of soybean oil[J]. Food Science, 2018, 39(2): 8-13.
- [14] 赵国志, 刘喜亮, 刘智锋. 反式脂肪酸的控制技术[J]. 粮油食品科技, 2006, 14(3): 14-16.
ZHAO G Z, LIU X L, LIU Z F. Control techniques of trans fatty acids[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2006, 14(3): 14-16.
- [15] 罗诗棋. 植物油高温加热过程中有害物产生变化规律研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2015.
LUO S Q. Study on variation of harmful substances generated in the process of heating vegetable oils[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2015.
- [16] 左洁. 大蒜粉对高温加工食品中丙烯酰胺抑制作用研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
ZUO J. The research of acrylamide inhibition by garlic powders in high-temperature processed foods[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2014.
- [17] 李军, 邓洁红, 谭兴和, 等. 丙烯酰胺毒性及油炸食品丙烯酰胺抑制方法研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2010(9): 31-33.
LI J, DENG J H, TAN X H, et al. Research progress in acrylamide toxicity and acrylamide inhibition methods in fried food[J]. Cereal & Feed Industry, 2010(9): 31-33.
- [18] STADLER R H, BLANK I, VARGA N, et al. Food chemistry: Acrylamide from Maillard reaction products[J]. Nature, 2002, 419(6906): 449-450.
- [19] MOTTRAM D S, WEDZICHA B L, DODSON A T. Food chemistry: Acrylamide is formed in the Maillard reaction[J]. Nature, 2002, 419 (6906): 448-449.
- [20] 韦铮, 黄先智, 丁晓雯. 食品中丙烯酰胺的控制措施研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(14): 250-255.
WEI Z, HUANG X Z, DING X W. Measures for controlling acrylamides in foods: A review[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(14): 250-255.
- [21] 章宇. 生物黄酮抑制食品中丙烯酰胺形成的机理及其构效关系研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
ZHANG Y. Studies on reduction mechanism and structure-activity relationship of acrylamide in foods by bio-flavonoids[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [22] 郭红英, 阚旭辉, 谭兴和, 等. 食品中丙烯酰胺的研究进展[J]. 粮食与油脂, 2017, 30(3): 33-36.
GUO H Y, KAN X H, TAN X H, et al. Research progress on acrylamide in food[J]. Cereals & Oils, 2017, 30(3): 33-36.
- [23] RICE J M. The carcinogenicity of acrylamide [J]. Mutation Research-Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2005, 580(1/2): 3-20.
- [24] 余带男. 妊娠期丙烯酰胺暴露对小鼠胎盘生长与发育的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
YU D N. The effect of acrylamide exposure on the placental growth and development during mice pregnancy[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [25] LEHNING E J, BALABAN C D, ROSS J F, et al. Acrylamide neuropathy II. Spatiotemporal characteristics of nerve cell damage in brainstem and spinal cord[J]. Neurotoxicology, 2003, 24(1): 109-123.
- [26] LEHNING E J, BALABAN C D, ROSS J F, et al. Acrylamide neuropathy III. Spatiotemporal characteristics of nerve cell damage in forebrain[J]. Neurotoxicology, 2003, 24(1): 125-136.
- [27] BARBER D S, STEVENS S, LOPACHIN R M. Proteomic analysis of rat striatal synaptosomes during acrylamide intoxication at a low dose rate[J]. Toxicological Sciences, 2007, 100(1): 156-167.
- [28] 赵梦瑶. 丙烯酰胺致小鼠神经毒性分子机制及蓝莓花色苷提取物对其解毒作用的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
ZHAO M Y. Molecular mechanism of acrylamide-in-

- duced neurotoxicity and intervention of blueberry anthocyanins extract against acrylamide-induced toxicity *in vivo*[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [29] 王敏, 杨雅利, 沈海亮, 等. 油炸马铃薯中丙烯酰胺形成的影响因素及控制措施的研究进展[J]. 农产品加工, 2019(1): 66-71.
- WANG M, YANG Y L, SHEN H L, et al. Research on the influence factors and control methods of acrylamide in fired potatoes [J]. Farm Products Processing, 2019(1): 66-71.
- [30] MATTHAUS B, HAASE N U, VOSMANN K. Factors affecting the concentration of acrylamide during deep-fat frying of potatoes[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2004, 106 (11): 793-801.
- [31] REZAEI M, ALMASSI M, MINAEI S, et al. Impact of post-harvest radiation treatment timing on shelf life and quality characteristics of potatoes [J]. Journal of Food Science and Technology -Mysore, 2013, 50(2): 339-345.
- [32] 王薇, 杨松, 程江华, 等. 不同热烫处理对马铃薯片中还原糖浓度的影响研究[J]. 食品工业科技, 2011, 32(9): 123-127.
- WANG W, YANG S, CHENG J H, et al. Effect of different blanching treatments on reducing sugar concentration of potato piece[J]. Science and Technology of Food Industry, 2011, 32(9): 123-127.
- [33] 闫巧娟, 黄林华, 张斌, 等. 食品中丙烯酰胺去除方法的研究进展[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(3): 98-100.
- YAN Q J, HUANG L H, ZHANG B, et al. Research progress on removing acrylamide from foods [J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2016, 24(3): 98-100.
- [34] 龚积霞. 九头狮子草提取物在模拟体系中对丙烯酰胺的抑制研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2019.
- GONG J X. Inhibition of acrylamide by herba *Peristrophe japonica* extracts in simulated system[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2019.
- [35] 张云焕, 冯亚净, 李书国. 减控油炸麻花中丙烯酰胺生成方法[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 113-118.
- ZHANG Y H, FENG Y J, LI S G. Strategies to reduce acrylamide formation in fried dough twists[J]. Food Science, 2018, 39(7): 113-118.
- [36] 朱叶. 煎炸油中多环芳烃含量分析及其与油脂劣变指标的相关性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2018.
- ZHU Y. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in frying oils and correlation analysis with oil deterioration [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.
- [37] 曾健雄, 吴时敏, 王琳, 等. 高脂食品中多环芳烃研究[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(10): 6-9.
- ZENG J X, WU S M, WANG L, et al. Research on polycyclic aromatic hydrocarbons in fatty foods[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(10): 6-9.
- [38] 张浪, 杜洪振, 田兴垒, 等. 煎炸食品中多环芳烃的生成及其控制技术研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(3): 272-280.
- ZHANG L, DU H Z, TIAN X L, et al. Formation and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in fried foods: A review[J]. Food Science, 2020, 41 (3): 272-280.
- [39] 毛明英, 刘守琼, 宋磊, 等. 塑料食品包装制品中多环芳烃的分析及检测[J]. 包装工程, 2009, 30 (1): 43-45.
- MAO M Y, LIU S Q, SONG L, et al. Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in plastic food packaging [J]. Packaging Engineering, 2009, 30(1): 43-45.
- [40] 聂文, 屠泽慧, 占剑峰, 等. 食品加工过程中多环芳烃生成机理的研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39 (15): 269-274.
- NIE W, TU Z H, ZHAN J F, et al. Mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbon formation in food processing: A review[J]. Food Science, 2018, 39 (15): 269-274.
- [41] 李永红. 宫内多环芳烃暴露对胎儿全基因组基因表达的影响[D]. 北京: 中国疾病预防控制中心, 2011.
- LI Y H. Impacts of PAHs exposure in gestation period on genome-wide mRNA expression of fetus[D]. Beijing: Chinese Center for Disease Control and Prevention, 2011.
- [42] NG S P, CONKLIN D J, BHATNAGAR A, et al. Prenatal exposure to cigarette smoke induces diet- and sex-dependent dyslipidemia and weight gain in adult murine offspring[J]. Environmental Health Perspectives, 2009, 117(7): 1042-1048.
- [43] PERERA F, TANG D L, WHYATT R, et al. DNA damage from polycyclic aromatic hydrocarbons measured by benzo a pyrene-DNA adducts in mothers and newborns from Northern manhattan, the World

- Trade Center area, Poland, And china[J]. *Cancer Epidemiology Biomarkers & Prevention*, 2005, 14(3): 709–714.
- [44] VISHNEVETSKY J, TANG D, CHANG H W, et al. Combined effects of prenatal polycyclic aromatic hydrocarbons and material hardship on child IQ[J]. *Neurotoxicology and Teratology*, 2015, 49: 74–80.
- [45] 王丽, 金芬, 张雪莲, 等. 食品中多环芳烃及卤代多环芳烃的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(10): 369–373.
- WANG L, JIN F, ZHANG X L, et al. Review on advance of polycyclic aromatic hydrocarbons and halogenated polycyclic aromatic hydrocarbons in food[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(10): 369–373.
- [46] SHI L K, ZHANG D D, LIU Y L. Incidence and survey of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oils in China[J]. *Food Control*, 2016, 62: 165–170.
- [47] ANDRÉS -BELLO A, GARCÍA -SEGOVIA P, MARTÍNEZ-MONZÓ J. Vacuum frying: An alternative to obtain high-quality dried products[J]. *Food Engineering Reviews*, 2011, 3(2): 63–78.
- [48] BELKOVA B, HRADECKY J, HURKOVA K, et al. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 51–59.
- [49] 薛超轶, 何志勇, 高大明, 等. 加工肉制品中杂环胺的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2018, 9(14): 3590–3597.
- XUE C Y, HE Z Y, GAO D M, et al. Research progress on heterocyclic amines in processed meat products[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2018, 9(14): 3590–3597.
- [50] 詹春怡, 李圣鑫, 步梓瑞, 等. 肉制品加工中杂环胺形成与抑制研究进展[J]. *农产品加工*, 2019(2): 68–74.
- ZHAN C Y, LI S X, BU Z R, et al. Research progress on the formation and inhibition of heterocyclic amine in processed meat products[J]. *Farm Products Processing*, 2019(2): 68–74.
- [51] 李永, 何志勇, 高大明, 等. 热加工食品中杂环胺形成及抑制机制[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(2): 312–319.
- LI Y, HE Z Y, GAO D M, et al. Formation and inhibition mechanism of heterocyclic amines in heat processed foods[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(2): 312–319.
- [52] BARZEGAR F, KAMANKESH M, MOHAMMADI A. Heterocyclic aromatic amines in cooked food: A review on formation, health risk-toxicology and their analytical techniques [J]. *Food Chemistry*, 2019, 280: 240–254.
- [53] BORGES E, SOLYAKOV A, SKOG K. Effects of precursor composition and water on the formation of heterocyclic amines in meat model systems[J]. *Food Chemistry*, 2001, 74(1): 11–19.
- [54] SOLYAKOV A, SKOG K. Screening for heterocyclic amines in chicken cooked in various ways[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2002, 40(8): 1205–1211.
- [55] 洪燕婷, 王盼, 朱雨辰, 等. 肉制品中杂环胺形成与控制的研究进展[J]. *中国食品学报*, 2014, 14(11): 149–156.
- HONG Y T, WANG P, ZHU Y C, et al. Development in controlling and formation of heterocyclic amines in meat[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2014, 14(11): 149–156.
- [56] PUESSA T. Toxicological issues associated with production and processing of meat[J]. *Meat Science*, 2013, 95(4): 844–853.
- [57] 邵斌. 传统烧鸡中9种杂环胺类化合物形成规律研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- SHAO B. Study on the formation discipline of 9 heterocyclic aromatic amines in Chinese traditional braised chicken [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [58] TURESKY R J, LE MARCHAND L. Metabolism and biomarkers of heterocyclic aromatic amines in molecular epidemiology studies: Lessons learned from aromatic amines[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2011, 24(8): 1169–1214.
- [59] GIBIS M. Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: Causes, formation, occurrence, and risk assessment[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(2): 269–302.
- [60] WOLK A. Potential health hazards of eating red meat[J]. *Journal of Internal Medicine*, 2017, 281(2): 106–122.
- [61] HUR S J, YOON Y, JO C, et al. Effect of dietary rRed meat on colorectal cancer risk – A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food*

- Safety, 2019, 18(6): 1812–1824.
- [62] BAO X X, MIAO J J, FAN Y X, et al. The effective inhibition of the formation of heterocyclic aromatic amines via adding black pepper in fried tilapia fillets [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2020, 44(5): e14435.
- [63] ZHANG N N, ZHAO Y L, FAN D M, et al. Inhibitory effects of some hydrocolloids on the formation of heterocyclic amines in roast beef [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106073.
- [64] 董依迪, 邓思杨, 石硕, 等. 肉制品中杂环胺类物质的形成机制及控制技术的研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(8): 278–284.
- DONG Y D, DENG S Y, SHI S, et al. Research progress of formation mechanism and control technology of heterocyclic aromatic amines in meat products [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(8): 278–284.
- [65] FELTON J S, FULTZ E, DOLBEARE F A, et al. Effect of microwave pretreatment on heterocyclic aromatic amine mutagens/carcinogens in fried beef patties [J]. *Food and Chemical Toxicology*, 1994, 32(10): 897–903.
- [66] ZHANG N N, CHEN Y F, ZHAO Y L, et al. Caffeic acid assists microwave heating to inhibit the formation of mutagenic and carcinogenic PhIP [J]. *Food Chemistry*, 2020, 317: 126447.
- [67] YANG Z M, LU R, SONG H L, 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): e12981.
- [68] RANNOU C, LAROQUE D, RENAULT E, et al. Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods [J]. *Food Research International*, 2016, 90: 154–176.

Several Potential Hazardous Substances in Fried Foods and Their Control Techniques

Chen Long^{1,2}, Wang Yi¹, Cheng Hao¹, Li Xiaodong³, Tian Yaoqi², Jin Zhengyu^{1,2*}

¹*School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

²*State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu*

³*Debao Machinery Manufacturing Co. Ltd., Shijiazhuang 050000*

Abstract Frying is a traditional food processing method, which is widely used in home cooking and food industry. The process of frying is complicated and violent. If not properly controlled, it is easy to generate some processing hazards, thus adversely affecting the health of consumers. This paper mainly introduced the latest research progress of several typical hazardous substances in fried food, including the formation pathways, influencing factors, potential hazards and control measures of trans-fatty acids, acrylamide, polycyclic aromatic hydrocarbons and heterocyclic amines, in order to provide scientific guidance for the reasonable adjustment of consumer's diet structure and the transformation and promotion of fried food industry.

Keywords frying; hazardous substances; formation pathway; control techniques