

肉类热加工过程中有害物质的形成与控制研究进展

李诗萌, 喻倩倩, 董展廷, 孙 林, 程 蓓, 孙承锋*
(烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264000)

摘 要: 肉类在煎炸、烧烤、蒸煮等加热过程中会产生令人愉悦的香气, 但同时也伴随着多种有害物质的产生, 如杂环胺、丙烯酰胺、反式脂肪酸、多环芳烃类等, 这些物质会对人体健康造成极大危害。因此, 探究肉类产品热加工过程中有害物质的成因及控制尤为重要。本文综述上述有害物质在肉类加热过程中的形成机理, 总结上述有害物质现有的检测方法与控制手段, 并讨论了风味物质生成和有害物质控制之间的关系, 为后期进一步研究提供参考。
关键词: 肉类产品; 热加工; 有害物质; 形成; 检测方法; 控制

A Review of the Formation and Control of Hazardous Substances in Meat during Thermal Processing

LI Shimeng, YU Qianqian, DONG Zhanting, SUN Lin, CHENG Bei, SUN Chengfeng*
(College of Life Sciences, Yantai University, Yantai 264000, China)

Abstract: Pleasant aroma will be generated in meat products during frying, roasting and other thermal processing operations, which is, however, accompanied by the formation of various harmful substances, such as heterocyclic amines, acrylamide, trans fatty acids, and polycyclic aromatic hydrocarbons. These substances will do great harm to human health. Therefore, it is particularly important to explore the cause of the formation of harmful substances in meat products during thermal processing and to control it. The formation mechanism of the harmful substances, as well as the existing detection methods and control measures are summarized in this review. Meanwhile, the relationship between flavor compounds generation and harmful substances reduction is discussed. We expect that this review will provide valuable reference for further research in the future.

Keywords: meat products; thermal processing; harmful substances; formation; detection methods; control

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-280

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 01-0092-06

引文格式:

李诗萌, 喻倩倩, 董展廷, 等. 肉类热加工过程中有害物质的形成与控制研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 92-97.
DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-280. <http://www.rlyj.net.cn>

LI Shimeng, YU Qianqian, DONG Zhanting, et al. A review of the formation and control of hazardous substances in meat during thermal processing[J]. Meat Research, 2021, 35(1): 92-97. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-280. <http://www.rlyj.net.cn>

肉类富含丰富的蛋白质和脂肪, 能供给人体所必需的氨基酸、脂肪酸、无机盐和维生素等主要营养物质。煎炸、烧烤、蒸煮为肉类产品的常见热加工方式, 肉类产品热加工过程中会发生美拉德反应、脂质氧化、蛋白质变性等多种化学反应, 产生特殊香气并形成独特的产品质地, 同时也伴随着如杂环胺、丙烯酰胺、反式脂肪酸及多环芳烃等有害物质的产生。

大量流行病学研究表明, 杂环胺的摄入会增加患结肠癌、胃癌、食道癌、胰腺癌等癌症的风险, 尤其是结肠癌与2-氨基-3,8-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline, MeIQx)、2-氨基-1-甲基-6-苯基-咪唑并[4,5-b]吡啶(2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine, PhIP)的高摄入量呈正相关^[1-3]。丙烯酰胺则通过抑制人类的成神经细胞瘤和成

收稿日期: 2020-11-23

第一作者简介: 李诗萌 (1995—) (ORCID: 0000-0002-2876-565X), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉制品质量安全。

E-mail: 616172906@qq.com

*通信作者简介: 孙承锋 (1971—) (ORCID: 0000-0001-5518-4917), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉制品质量安全。

E-mail: cfsun@ytu.edu.cn



胶质细胞瘤细胞分化而破坏神经系统^[4]。Alzahrani^[5]研究表明,对小鼠进行丙烯酰胺口服处理,可诱导DNA损伤,表现为小鼠骨髓细胞核和染色体畸变率升高。此外,丙烯酰胺还具有一定的生殖毒性和免疫毒性,大量动物实验表明饮食中摄入的丙烯酰胺对肝脏的氧化应激有很大影响,且丙烯酰胺可以通过胎盘传给胎儿^[6]。反式脂肪酸对人体的危害与人体每日摄入量有关,膳食中的反式脂肪酸每增加2%,人体患心脏病的风险增加25%^[7]。多种人类疾病,如心肌梗塞、动脉硬化、大脑功能衰退、妇女患II型糖尿病以及孕妇怀孕期间胎儿体质量过大都与反式脂肪酸的过量摄入有关^[8]。多环芳烃类物质中主要致癌物为重质多环芳烃中的五环多环芳烃,它的毒性最高^[9],可以通过呼吸道、皮肤黏膜、被污染的食物进入人体。在人体内通过芳烃羟化酶的作用,将其代谢活化为多环芳烃环氧化物,与DNA、RNA、蛋白质等大分子物质结合而诱发突变、肿瘤。研究表明,油炸烧烤食品中苯并芘的含量与胃癌等多种癌症的发生密切相关^[10]。

基于上述肉类产品热加工过程中产生的有害物质对人体的危害,本文主要从杂环胺、丙烯酰胺、反式脂肪酸、多环芳烃4种有害物质的形成机制、检测方法、控制手段展开综述,为进一步减少肉类产品热加工过程产生的有害物质积累和对食品安全性的影响以及保证人体健康饮食提供参考。

1 肉类热加工过程中产生的主要有害物质种类及形成机制

1.1 杂环胺

杂环胺类化合物是在食物高温加热过程中产生的一类致癌、致突变性的化合物,化学结构是带杂环的伯胺,在油炸、烧烤肉类制品中十分常见。目前,油炸过程中已发现的杂环胺近30种,按照其结构可以分为氨基咪唑氮杂芳烃类(极性杂环胺)和氨基喹啉类(非极性杂环胺)^[11]。肉类产品热加工过程中产生的最常见杂环胺为PhIP、MeIQx、2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑并[4,5-f]喹啉、2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-f]喹啉(2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline, IQ)、2-氨基-3,4-二甲基咪唑并[4,5-f]喹啉、2-氨基-9H-吡啶并[2,3-b]咪唑、1-9H-吡啶并-[2,3-b]咪唑和9H-吡啶并[2,3-b]咪唑^[12-14]。热加工温度100~250℃生成的杂环胺主要为氨基咪唑氮杂芳烃类;温度在250℃以上,蛋白质或氨基酸发生热解,生成热分解类杂环胺,主要为氨基喹啉类。

杂环胺由肌酸、游离氨基酸、己糖等前体物质在150~300℃的高温加热下形成^[15]。前体物的数量和种类对杂环胺形成有重要影响^[16]。研究表明,吡啶类杂环

胺可通过苯丙氨酸和肌酸(肌酐)反应生成^[17],但并不是所有前体物含量越多,生成的杂环胺含量越高。Skog等^[18]研究证实,128℃煮沸丙烯酰胺、肌酸酐和葡萄糖模拟体系2h后,随葡萄糖含量的升高,PhIP含量显著增加,但加入过量葡萄糖则会抑制PhIP的生成。蛋白质的强烈热解、脂降解产物也可以通过美拉德反应促进吡啶(美拉德反应中的Strecker降解)或吡嗪化合物的形成,进而导致杂环胺的形成^[19]。Jinap等^[20]研究表明,油炸羊肉过程中的低水分会促进杂环胺的形成。另外,长时间和高温加热更容易诱导杂环胺的生成,并且温度对杂环胺形成的影响比时间的影响更为显著。Balogh等^[21]建立模拟体系,加热到150℃时并未发现杂环胺的生成,随反应温度升高,在190~230℃加热温度区间时,杂环胺含量显著升高,也证实了高温条件对杂环胺的形成有显著影响。

1.2 丙烯酰胺

丙烯酰胺是食品热加工过程中通过美拉德反应生成的一种常见有毒有害物质。还原糖(葡萄糖和果糖)与氨基酸(主要是天冬氨酸)缩合产生N-糖苷, N-糖苷重组为葡糖胺重排产物,然后经过一系列反应产生黑色素,其中席夫碱的进一步脱羧导致丙烯酰胺的生成^[22]。热加工处理温度和时间对丙烯酰胺的形成影响较大,研究表明,加热温度120~140℃时丙烯酰胺生成量增加缓慢,当加热温度160℃以上时,丙烯酰胺生成量迅速增加;随着加热时间的继续延长,丙烯酰胺生成量增加趋势减缓^[23]。另外,丙烯酰胺的形成也与肉品体系的pH值和水分含量有关,降低pH值会减少席夫碱的形成,从而降低丙烯酰胺的生成量^[24];当肉类产品的水分活度处于0.4~0.8时更容易发生美拉德反应,生成丙烯酰胺^[25]。

1.3 反式脂肪酸

反式脂肪酸是一组含有1个或多个独立非共轭反式构型双键不饱和脂肪酸的总称^[26]。不饱和反式脂肪酸分为单不饱和反式脂肪酸和多不饱和反式脂肪酸。单不饱和反式脂肪酸通过自由基途径形成,自由基会使双键发生异构化,使得顺式结构转变为反式结构;多不饱和反式脂肪酸的形成途径主要包括分子内重排和自由基途径2种^[27]。天然的反式脂肪酸来源于反刍动物(牛、羊)的脂肪组织及牛、羊乳制品。在油脂高温加热过程中,顺式脂肪酸由于温度、金属离子等影响,发生异构化反应,生成多种反式脂肪酸^[28]。特别是深度油炸时,当油温达到169~250℃甚至更高、反复加热、C=C键的断裂、迁移、生成都会明显促进反式脂肪酸的形成^[29-30]。

1.4 多环芳烃类

多环芳烃是指分子结构中只有碳、氢2种元素,由2个或2个以上苯环呈角状、线状、簇状稠合而成的一类芳香族化合物^[31]。根据苯环数量可以将多环芳烃分为

轻质多环芳烃(分子中含有2~4个苯环)和重质多环芳烃(分子中含有≥5个苯环)两大类^[32]。多种多环芳烃,如萘、苯并(a)芘、苯并(a)蒽、苯并(b)荧蒽、苯并(k)荧蒽、二苯并(a,h)蒽已被列为“中国环境优先污染物黑名单”^[33]。

目前认为肉类产品中多环芳烃的形成是由于肉制品在加热处理(烟熏、烧烤、油炸等)过程中,脂肪组织发生裂解、蛋白质高温分解以及糖等有机物的不完全燃烧或接触不完全燃烧物引起的^[34-36]。脂质中脂肪酸类物质在加热过程中可以环化成多环芳烃,另外脂肪酸类物质也可以和高度脂溶性多环芳烃类物质混溶,形成多环芳烃富集体^[37]。同时,烧烤过程中排放出的熏烟中含有大量多环芳烃类物质。Chen等^[38]研究烹调过程中排放的烟雾,在厨房油烟中检测出21种多环芳烃类物质。所以在肉类产品热加工过程中增加肉制品与熏烟源的距离,可有效降低肉制品中多环芳烃的含量^[37]。

2 肉类热加工过程中产生的主要有害物质检测

2.1 杂环胺的检测方法

常用的杂环胺检测方法主要有气相色谱-质谱联用法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、超高效液相色谱-串联质谱法(ultra-high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS/MS)、高效液相色谱-紫外检测法、高效液相色谱-荧光检测法、高效液相色谱-电化学检测法^[39]。其中UPLC-MS/MS可以在很短时间内实现更多杂环胺的同步检测^[40]。李青等^[41]采用固相萃取和液-液萃取结合UPLC-MS/MS,准确测定了鸡肉、牛肉、猪肉、草鱼中几类常见杂环胺,灵敏度较高,检测限低至0.000 6~0.001 0 ng/g。鄢嫣^[42]采用UPLC-MS/MS完成16种杂环胺的检测仅用了2 min,为肉制品中杂环胺的快速在线检测提供了可靠的技术支持。

2.2 丙烯酰胺的检测方法

丙烯酰胺检测的前处理是比较重要的环节,主要包括提取、净化和衍生三部分。常用的提取方法有液-液提取、超声波提取、加速溶剂提取、固相微萃取、基体分散固相萃取等^[43]。常用的净化方法有物理方法、化学方法、固相萃取柱净化法、分散固相萃取。常用的衍生方法有溴化衍生、2-巯基苯甲酸衍生^[44]、甲基硅烷化衍生、电泳法、生物传感器法等^[45]。

丙烯酰胺的分析方法主要有GC-MS、液相色谱-质谱联用法(liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS)、伏安生物传感器法、示差脉冲极谱法及化学发光酶联免疫分析方法^[46]。其中质谱检测方法最为成熟,灵敏度高、准确度高,可有效去除干扰成分^[46],是检测丙烯酰胺残留的常用方法^[42]。曾源等^[47]通过HPLC法研究牛干巴

中丙烯酰胺的含量与大豆油品质的关系,证实HPLC法是一种有效检测肉类油炸过程中丙烯酰胺的方法。MS法有一些缺点,因其设备昂贵,又需要专业人员操作,样品前处理复杂,难以进行大范围的样品检测。

免疫检测技术是目前应用于痕量和微量测定的快速检测技术之一,但由于丙烯酰胺的抗体难以获得,所以该技术尚未得到相关方面的应用^[48]。另外,可以进行在线检测的技术,如拉曼光谱、飞行时间质谱法也可尝试应用于丙烯酰胺的检测。随着国际上对肉类产品中有害物质残留问题的日趋重视,灵敏、便捷、可实现批量检测的新技术的研发越来越受到关注。

2.3 反式脂肪酸的检测方法

反式脂肪酸由于具有异构体结构,分析检测面临很大的挑战性和复杂性^[49]。目前反式脂肪酸的检测方法主要包括红外吸收光谱(infrared absorption spectroscopy, IRAS)法、Ag⁺离子薄层色谱(Ag⁺ thin layer chromatography, Ag⁺-TLC)法、毛细管电泳法、GC-MS、反相高效液相色谱法、拉曼光谱法、综合二维气相色谱法^[50]。对于反式脂肪酸的分析,IRAS法可以准确测定独立双键的数量,快速方便,但检测灵敏度和准确性不高。Ag⁺-TLC可以从顺式异构体中分离出反式异构体,与反式双键不发生作用,缺点是难以分析出反式脂肪酸的谱带,只能粗略分析。

目前应用最多的是GC-MS法,其灵敏度高,可以准确分离反式脂肪酸的各种异构体,也是美国油脂化学家协会和美国食品药品监督管理局推荐使用的方法。我国很多检测机构多采用GC法检测油脂中的反式脂肪酸^[50]。拉曼光谱法的优点是能够实现对反式脂肪酸的快速定量分析。Gong等^[51]通过拉曼光谱法测定大豆油、花生油、菜籽油等13种食用油中的反式脂肪酸,结果表明,基于1 640~1 680 cm⁻¹区域的拉曼光谱特征可以快速、准确地预测不同食用油中反式脂肪酸的含量,具有较高的定量敏感性。将拉曼光谱应用到肉类产品反式脂肪酸的检测中具有广阔的前景。

2.4 多环芳烃类物质的检测方法

肉品中多环芳烃类物质在检测前需经过超声辅助萃取、固相萃取、固相微萃取、索氏提取、微波辅助萃取、加速溶剂萃取等方法进行前处理^[32]。其中超声辅助萃取可以在常温下进行,有效避免了高温对一些热敏性成分的影响。固相微萃取技术操作简便、可直接进样,可以对有机物进行萃取、富集和解析。目前多环芳烃类物质前处理方法还存在一些缺点,如耗时长、分离不彻底,所以有必要建立更高效、快捷的方法。

多环芳烃的检测方法主要有GC-MS、LC-MS、表面增强拉曼光谱法、毛细管电泳法、酶联免疫吸附法及二阶激光质谱法等^[32]。GC-MS具有选择性好、灵敏度高、



定性定量能力好、可最大程度排除基质干扰的优势。Lee等^[52]采用超声辅助浑浊萃取和气相色谱-质谱联用技术对蚌中35种多环芳烃同时检测,获得了较高的萃取率。表面增强拉曼光谱法能够测出检测物的结构信息,检测速度快、灵敏度高,在多环芳烃的分析检测领域已经得到越来越广泛的应用^[53]。

3 肉类热加工过程中产生的主要有害物质控制措施

3.1 杂环胺的控制

控制肉品热加工过程中杂环胺的生成可以主要从前体物质、加热条件、原料肉和油种类四方面着手。极性杂环胺前体物质主要是氨基酸、碳水化合物、肌酸(肌酐),苯丙氨酸通过Strecker降解产生苯乙醛,苯乙醛与肌酸酐反应生成羟醛加合物,这种加合物脱水生成羟醛缩合物,羟醛缩合物与苯乙醛反应生成甲醛,肌酸酐降解生成氨,甲醛与氨进一步反应生成PhIP^[54]。非极性杂环胺通过高温热解产生,其主要前体物质是氨基酸和蛋白质。Puangsombat等^[55]通过对不同肉样(牛肉、猪肉、鸡肉、鱼肉)进行检测发现,肌酸含量越少,肉类热加工后产生的杂环胺越少,证实了前体物质含量对杂环胺生成量的影响。而通过控制加热条件来抑制杂环胺的生成比控制前体物质更方便,在热加工处理前用微波进行预处理可以降低IQ和2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-f]喹恶啉(2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoxaline, IQx)的生成量^[56]。利用天然酚类抗氧化剂清除自由基、捕获中间体或加入一些含有含硫化合物的食物(洋葱、大蒜等),使其直接与葡萄糖反应,以抑制美拉德反应的进行,也可控制杂环胺的产生^[57]。此外,氨基酸与还原糖进行美拉德反应产生的含硫杂环化合物和羰基化合物不仅是有害物质形成的重要中间产物,也是形成肉类热加工过程中重要香味化合物的前体物质。Linghu等^[58]将色氨酸、赖氨酸、脯氨酸和亮氨酸4种氨基酸以0.05%、0.20%和0.50%(牛肉饼质量为基准)3种添加量直接撒在牛肉饼表面进行处理,发现12组不同含量、不同种类氨基酸处理均降低了杂环胺总含量,色氨酸添加量0.50%时对杂环胺的影响最大,赖氨酸添加量0.20%和0.50%可提高牛肉饼pH值和色泽。说明部分氨基酸类物质可有效抑制热加工过程中杂环胺的形成,同时这些物质又是肉类中重要呈味物质,含量较少,在反应过程中具有相互作用和协同效应。因此,分离鉴定出含量较少但对热加工过程中有害物质及风味物质形成有重要作用的前体和中间体,明确这些化合物的反应机理,对于促进肉类产品热加工过程中香气的形成和减少有害物质生成有重要意义^[59]。

3.2 丙烯酰胺的控制

通过控制加热温度、加热时间、改善加热方法等手段可以抑制肉类热加工过程中产生的丙烯酰胺类有害物质。戴炳业等^[60]通过建立模拟体系,分析得出短时高温条件下,丙烯酰胺含量随温度和天冬酰胺、葡萄糖等前体物的增加而增加,天冬酰胺添加量1.2 mmol/L、加热温度200℃、加热时间6.5 min条件下丙烯酰胺的生成量最大。Lee等^[61]通过改善油炸方式,发现空气油炸比普通油炸更能减少丙烯酰胺的生成。肉类产品加热前加入抗氧化剂、氨基酸或蛋白质、酵母、VC和VB₁以及NaCl、MgCl₂和CaCl₂等盐类都会减少加热过程中丙烯酰胺的生成。添加不同的抗氧化剂也会有不同的抑制效果,其中VC、阿魏酸对丙烯酰胺有抑制效果,特丁基对苯二酚反而会促进丙烯酰胺的生成^[62]。刘玲玲^[63]研究12种香辛料对红烧肉中丙烯酰胺的抑制作用,发现生姜、大蒜、八角、小茴香等对丙烯酰胺抑制作用明显,表明香辛料中一些酚类物质、有机酸等可有效抑制丙烯酰胺的生成。

3.3 反式脂肪酸的控制

控制油温可有效抑制反式脂肪酸的生成,刘彪^[64]在160、180、200℃连续油炸鸡腿,油脂使用时间最长达10 h,发现油温越高,棕榈油使用时间越长,油的品质越差,鸡腿中所含反式脂肪酸越多。Wang等^[65]研究油炸温度对草鱼中反式脂肪酸的影响,发现草鱼在170℃油炸产生的几种反式脂肪酸含量明显高于150℃油炸,同样也证实了油炸温度对反式脂肪酸的影响。在加热过程中也可以通过净化油脂、改善加工方式来控制反式脂肪酸的生成^[66]。张兰^[67]研究不同烹饪工艺对牛肉中反式脂肪酸的影响,发现从热加工工艺上来说,蒸制、煮制后生成的反式脂肪酸含量相对较少。此外,控制催化剂含量、搅拌速率、氢化压力等措施都可以减少反式双键的形成^[68]。肉品热加工过程中,减少煎炸油的反复使用,严格控制反式脂肪酸的产生,对肉品行业的发展及人类健康至关重要。

3.4 多环芳烃类的控制

目前国内外对于肉类产品中多环芳烃类的控制措施主要是改善加工工艺,如改善不合理的烧烤、油炸条件,寻找合适的加热温度、合理控制时间等措施都能降低多环芳烃生成量。Chiang等^[69]测定不同加热时间炭烤鸡腿中多环芳烃含量,结果表明,随着炭烤时间的不断延长,炭烤40 min处理组的鸡腿中8种多环芳烃的含量显著高于炭烤10、20 min处理组。一些天然抗氧化剂也能有效抑制多环芳烃的形成。齐颖^[32]用竹叶提取物和大蒜提取物腌制猪肉丸子,结果表明,在0.1~0.5 g/kg添加量范围内,2种提取物对油炸猪肉丸子中多环芳烃的生成均有抑制效果。Cordeiro等^[70]在炭烤猪肉里脊过程中加入5种不同的醋(接骨木醋、白葡萄酒醋、红酒醋、

苹果醋、覆盆子汁水果醋)作为调味料,结果表明,接骨木醋表现出对多环芳烃形成的抑制作用,抑制率高达82%,同样证实了醋中总酚和抗氧化活性物质可有效抑制多环芳烃的生成。此外,采用远红外热源、电加热、间接加热等新加工手段加热肉品,避免肉品与炭火直接接触等措施均能有效减少多环芳烃的产生。

4 结 语

肉类食品热加工过程中产生的一系列有害物质严重影响消费者身体健康,同时制约着肉制品行业的发展。杂环胺、丙烯酰胺、反式脂肪酸、多环芳烃类物质均有一定的致癌性,目前对肉类产品热加工过程中有害物质的研究和控制主要集中于热加工条件的改善、加工参数的优化以及新技术的开发与各类食品添加剂的使用。然而对于肉品加热过程中有害物质的生成机理、转化机制、迁移规律、新检测技术的研究还需要进一步深入研究。对肉类产品热加工过程中产生的有害物质控制方法的研究仍然是肉制品加工领域重要的研究方向之一。如何平衡肉类产品热加工过程中促进风味物质生成和控制有害物质产生之间的量效关系,最大程度保留风味物质的同时减少有害物质的产生,对于肉类产品食用安全性最大化具有重要意义和价值。

参考文献:

- [1] GIBIS M. Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: causes, formation, occurrence, and risk assessment[J]. *Comprehensive Review in Food Science and Food Safety*, 2016, 15(2): 269-302. DOI:10.1111/1541-4337.12186.
- [2] BARBIR A, LINSEISEN J, HERMANN S, et al. Effects of phenotypes in heterocyclic aromatic amine (HCA) metabolism-related genes on the association of HCA intake with the risk of colorectal adenomas[J]. *Cancer Causes Control*, 2012, 23(9): 1429-1442. DOI:10.1007/s10552-012-0017-8.
- [3] CHIANG S C, QUEK S Y. The relationship of red meat with cancer: effects of thermal processing and related physiological mechanisms[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2015, 57(6): 1153-1173. DOI:10.1080/10408398.2014.967833.
- [4] CHEN J H, CHOU C C. Acrylamide inhibits cellular differentiation of human neuroblastoma and glioblastoma cells[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, 82: 27-35. DOI:10.1016/j.fct.2015.04.030.
- [5] ALZAHIRANI H A S. Protective effect of *L*-carnitine against acrylamide-induced DNA damage in somatic and germ cells of mice[J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2011, 18(1): 29-36. DOI:10.1016/j.sjbs.2010.07.004.
- [6] ANNOLA K, KARTTUNEN V, KESKIRAHKONEN P, et al. Transplacental transfer of acrylamide and glycidamide are comparable to that of antipyrine in perfused human placenta[J]. *Toxicology Letters*, 2008, 182(1/3): 50-56. DOI:10.1016/j.toxlet.2008.08.006.
- [7] STENDER S, DYERBERG J. Influence of trans fatty acids on health[J]. *Annals of Nutrition Metabolism*, 2004, 48(2): 61-66. DOI:10.1159/000075591.
- [8] 莫欣欣. 食用植物油中反式脂肪酸含量的近红外及拉曼光谱快速检测研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2018: 1-5.
- [9] 谭顺中, 程燕, 阳文武, 等. 烤肉中多环芳烃的污染情况和健康风险评价[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(9): 213-217. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.037.
- [10] POIRIER M C, BELAND F A, DIVI K V, et al. *In vivo* localization and postmortem stability of benzo[a]pyrene-DNA adducts[J]. *Environmental and Molecular Mutagenesis*, 2020, 61(2): 216-223. DOI:10.1002/em.22337.
- [11] 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): 42-49. DOI:10.3969/j.issn.2095-0381.2019.02.006.
- [12] RAHMAN U, SAHAR A, KHAN M I, et al. Production of heterocyclic aromatic amines in meat: chemistry, health risks and inhibition: a review[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 229-233. DOI:10.1016/j.lwt.2014.06.005.
- [13] PLEVA D, LÁNYI K, MONORI K D, et al. Heterocyclic amine formation in grilled chicken depending on body parts and treatment conditions[J]. *Molecules*, 2020, 25(7): 1547. DOI:10.3390/molecules25071547.
- [14] LIAO G Z, WANG G Y, XU X L, et al. Effect of cooking methods on the formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and duck breast[J]. *Meat Science*, 2010, 85(1): 149-154. DOI:10.1016/j.meatsci.2009.12.018.
- [15] SABALLY K, SLENO L, JAUFFRIT J A, et al. Inhibitory effects of apple peel polyphenol extract on the formation of heterocyclic amines in pan fried beef patties[J]. *Meat Science*, 2016, 117(8): 57-62. DOI:10.1016/j.meatsci.2016.02.040.
- [16] 王园, 吴西芝, 彭增起, 等. 油炸条件对鱼肉中杂环胺与反式脂肪酸形成的影响[J]. *食品工业*, 2018, 39(7): 18-22.
- [17] PUANGSOMBAT K, GADGIL P, HOUSER T A, et al. Heterocyclic amine content in commercial ready to eat meat products[J]. *Meat Science*, 2011, 88(2): 227-233. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.12.025.
- [18] SKOG K, JÄGERSTAD M. Effects of glucose on the formation of PhIP in a model system[J]. *Carcinogenesis*, 1991, 12(12): 2297-2300. DOI:10.1093/carcin/12.12.2297.
- [19] COLL CARDENAS F J, OLIVERA D F. Texture changes in meat during storage[J]. *Reference Module in Food Science*, 2016, 8: 1-5. DOI:10.1016/b978-0-08-100596-5.03294-7.
- [20] JINAP S, IQBAL S Z, TALIB N H, et al. Heterocyclic aromatic amines in deep fried lamb meat: the influence of spices marination and sensory quality[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2016, 53(3): 1411-1417. DOI:10.1007/s13197-015-2137-0.
- [21] BALOGH Z, GRAY J, GOMAA E, et al. Formation and inhibition of heterocyclic aromatic amines in fried ground beef patties[J]. *Food Chemical Toxicology*, 2000, 38(5): 395-401. DOI:10.1016/S0278-6915(00)00010-7.
- [22] RIFAI L, SALEH F A. A review on acrylamide in food: occurrence, toxicity, and mitigation strategies[J]. *International Journal of Toxicology*, 2020, 39(2): 93-102. DOI:10.1177/1091581820902405.
- [23] 费永乐. 中式油炸面食中丙烯酰胺的检测和减控方法的探究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2015: 43-46.
- [24] MESTDAGH F, MAERTENS J, CUCU T, et al. Impact of additives to lower the formation of acrylamide in a potato model system through pH reduction and other mechanisms[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(1): 26-31. DOI:10.1016/j.foodchem.2007.07.013.
- [25] GÖKMEN V, PALAZOĞLU T K. Acrylamide formation in foods during thermal processing with a focus on frying[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2008, 1(1): 35-42. DOI:10.1007/s11947-007-0005-2.
- [26] 王邱. 国内外对膳食反式脂肪酸的研究概况[J]. *食品研究与开发*, 2017(9): 227-231. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.09.049.
- [27] FERRERI C, KRATZSCH S, BREDE O, et al. Trans lipid formation induced by thiols in human monocytic leukemia cells[J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 2005, 38(9): 1180-1187. DOI:10.1016/j.freeradbiomed.2004.12.026.
- [28] 高海军, 郭静, 李勇, 等. 我国主要食用植物油中反式脂肪酸的研究[J]. *中国油脂*, 2012, 37(3): 1-5. DOI:10.3969/j.issn.1003-7969.2012.03.001.
- [29] ZHANG Qing, SALEH A S M, SHEN Qun, et al. Monitoring of changes in composition of soybean oil during deep-fat frying with different food types[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2016, 93(1): 69-81. DOI:10.1007/s11746-015-2743-z.



- [30] 贺凡. 玉米油热致异构产物分析及调控的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016: 3-6.
- [31] 阳文武, 谭顺中, 郭娅, 等. 多环芳烃分子印迹柱-高效液相色谱荧光检测法快速测定烤肉中15种多环芳烃[J]. 肉类研究, 2018, 32(11): 47-52. DOI:10.7506/rlyj.1001-8123-201811008.
- [32] 齐颖. 油炸肉制品加工过程中多环芳烃的形成及控制研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015: 2-4.
- [33] 张兰, 高天丽, 刘永峰, 等. 八种中式烹饪工艺对牛肉中多环芳烃、反式脂肪酸和亚硝酸盐的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(6): 1126-1138. DOI:10.3864/j.issn.0578-1752.2017.06.013.
- [34] 赵胜绪, 杨长江, 者文静, 等. 油炸食品中多环芳烃健康风险的定量评价[J]. 长江大学学报(自科版), 2014, 11(34): 28-31; 34.
- [35] CHEN S, KAO T H, CHEN C J, et al. Reduction of carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons in meat by sugar-smoking and dietary exposure assessment in Taiwan[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(31): 7645-7653. DOI:10.1021/jf402057s.
- [36] KARACA G, TASDEMIR Y. Migration of PAHs in food industry sludge to the air during removal by UV and TiO₂[J]. Science of the Total Environment, 2014, 488: 358-363. DOI:10.1016/j.scitotenv.2014.03.082.
- [37] 屠泽慧. 香料与照射处理对熏肠多环芳烃含量及品质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018: 4-6.
- [38] CHEN J, WANG S L, HSIEH D P H, et al. Carcinogenic potencies of polycyclic aromatic hydrocarbons for back-door neighbors of restaurants with cooking emissions[J]. Science of the Total Environment, 2012, 417(15): 68-75. DOI:10.1016/j.scitotenv.2011.12.012.
- [39] 李梦琪. 真空低温烹饪工艺对鸡腿肉品质及安全性的影响研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2019: 37-39.
- [40] CHENG K W, WONG C C, CHAO J, et al. Inhibition of mutagenic PhIP formation by epigallocatechin gallate via scavenging of phenylacetaldehyde[J]. Molecular Nutrition Food Research, 2009, 53(6): 716-725. DOI:10.1002/mnfr.200800206.
- [41] 李青, 王亚南, 秦之皓, 等. 高效液相色谱-质谱串联法检测中餐常见肉类中杂环胺含量[J]. 现代食品科技, 2020(8): 354-364. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2020.8.0103.
- [42] 鄢嫒. 烤肉中杂环胺的形成规律的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015: 46-50.
- [43] 张文玲. 油炸方便面中丙烯酰胺的检测及减控措施的研究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2013: 6-7.
- [44] LEVINE R A, SMITH R E. Sources of variability of acrylamide levels in a cracker model[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(11): 4410. DOI:10.1021/jf047887t.
- [45] ORACZ J, NEBESNY E, ZYŻELEWICZ D, et al. New trends in quantification of acrylamide in food products[J]. Talanta, 2011, 86(30): 23-34. DOI:10.1016/j.talanta.2011.08.066.
- [46] 王思维. 油炸食品丙烯酰胺生成及其感官评价方法研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2017: 2-5.
- [47] 曾源, 孙灿, 查保林, 等. 煎炸大豆油和云南牛干巴的品质变化与丙烯酰胺生成的关系及HPLC测定方法的建立[J]. 中国食物与营养, 2015, 21(7): 45-49. DOI:10.3969/j.issn.1006-9577.2015.07.012.
- [48] MUCCI L A, DICKMAN P M, TEINECK G, et al. Dietary acrylamide and cancer of the large bowel, kidney, and bladder: absence of an association in a population based study in Sweden[J]. British Journal of Cancer, 2003, 88(1): 84-89. DOI:10.1038/sj.bjc.6600726.
- [49] CHEN Yi, YANG Ying, NIE Shaoping, et al. The analysis of trans fatty acid profiles in deep frying palm oil and chicken fillets with an improved gas chromatography method[J]. Food Control, 2014, 44: 191-197. DOI:10.1016/j.foodcont.2014.04.010.
- [50] 魏丽芳. 反式脂肪酸检测方法的建立及应用[D]. 重庆: 西南大学, 2008: 5-11.
- [51] GONG W, SHI R, CHEN M, et al. Quantification and monitoring the heat-induced formation of trans fatty acids in edible oils by Raman spectroscopy[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2019, 13(3): 2203-2210. DOI:10.1007/s11694-019-00140-5.
- [52] LEE J, LEE S Y, PARK K W, et al. Simultaneous determination of PCBs, OCPs and PAHs in mussel by ultrasound-assisted cloudy extraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry[J]. Food Additives and Contaminants: Part A-Chemistry Analysis Control Exposure Risk Assessment, 2020, 18(8): 1-14. DOI:10.1080/19440049.2020.1798029.
- [53] DROGHETTI E, NICOLETTI F P, GUANDALINI L, et al. SERS detection of benzophenones on viologen functionalized Ag nanoparticles: application to breakfast cereals[J]. Journal of Raman Spectroscopy, 2013, 44(10): 1428-1434. DOI:10.1002/jrs.4273.
- [54] ZAMORA R, ALCÓN E, HIDALGO F J. Ammonia and formaldehyde participate in the formation of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) in addition to creatine and phenylacetaldehyde[J]. Food Chemistry, 2014, 155: 74-80. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.01.039.
- [55] PUANGSOMBAT K, GADGIL P, HOUSER T A, et al. Occurrence of heterocyclic amines in cooked meat products[J]. Meat Science, 2012, 90(3): 739-746. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.11.005.
- [56] FAN Daming, LI Jie, ZHANG Nana, et al. A comparison of mutagenic PhIP and beneficial 8-C-(E-phenylethenyl)quercetin and 6-C-(E-phenylethenyl)quercetin formation under microwave and conventional heating[J]. Food Function, 2018, 9(7): 3853-3859. DOI:10.1039/c8fo00542g.
- [57] QUELHAS I, PETISCA C, VIEGAS O, et al. Effect of green tea marinades on the formation of heterocyclic aromatic amines and sensory quality of pan-fried beef[J]. Food Chemistry, 2010, 122(1): 98-104. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.02.022.
- [58] LINGHU Z, KARIM F, TAGHVAEI M, et al. Amino acids effects on heterocyclic amines formation and physicochemical properties in pan-fried beef patties[J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1361-1370. DOI:10.1111/1750-3841.15078.
- [59] KOCADAĞLI T, METHVEN L, KANT A, et al. Targeted precursor addition to increase baked flavour in a low-acrylamide potato-based matrix[J]. Food Chemistry, 2021, 339: 128024. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.128024.
- [60] 戴炳业, 左洁, 张永菊, 等. 葡萄糖/天冬酰胺低湿模拟体系中丙烯酰胺产生机理研究[J]. 粮油食品科技, 2014, 22(3): 45-49. DOI:10.3969/j.issn.1007-7561.2014.03.011.
- [61] LEE J S, HAN J W, JUNG M, 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. DOI:10.3390/foods9050573.
- [62] 吴璟, 雷红涛, 沈玉栋, 等. 食品中痕量丙烯酰胺检测方法研究进展[J]. 食品工业科技, 2013(23): 380-385.
- [63] 刘玲玲. 红烧肉加工过程中营养成分变化及丙烯酰胺抑制研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2016: 58-61.
- [64] 刘彪. 油炸鸡腿中反式脂肪酸和杂环胺形成规律及棕榈油品质变化研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015: 66-68.
- [65] 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(15): 251-257. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.109.
- [66] 王婵, 张戎, 徐静, 等. 反式脂肪酸的研究及检测技术进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(6): 1661-1672.
- [67] 张兰. 传统中式烹饪工艺对牛肉品质影响的研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2017: 54-57.
- [68] 左丹, 汪妮妮. 食品中反式脂肪酸的危害及减控技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2020(18): 40-43. DOI:10.16043/j.cnki.cfs.2020.18.036.
- [69] CHIANG C F, HSU K C, CHO C Y, et al. Comparison and establishment of appropriate methods to determine EU priority PAHs in charcoal-grilled chicken drumsticks with different treatments and their dietary risk assessments[J]. Food and Chemical Toxicology, 2020, 142(8): 111400. DOI:10.1016/j.fct.2020.111400.
- [70] CORDEIRO T, VIEGAS O, SILVA M, et al. Inhibitory effect of vinegars on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork[J]. Meat Science, 2020, 167: 108083. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108083.