

食品加工过程中多环芳烃生成的影响因素及控制研究进展

胡高峰¹, 蔡克周^{1,*}, 李雨竹¹, 谢婷婷², 李沛军¹, 陈从贵¹, 徐宝才¹

(1. 合肥工业大学农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009; 2. 三只松鼠股份有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类广泛存在于环境中的有机污染物,具有致癌和致突变性。自20世纪70年代在肉制品中也被发现,食品中PAHs的研究就没停止过。早期研究主要涉及食品中PAHs的形成、检测技术和控制方法等,从而重点对食品加工过程中影响PAHs形成的外部因素、内部因素以及PAHs生成的抑制措施进行综述,以期对食品中PAHs的研究提供新思路。

关键词: 食品加工; 多环芳烃; 有害物质; 影响因素; 控制措施

Influencing Factors and Control of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation in Food Processing

HU Gao-feng¹, CAI Ke-zhou^{1,*}, LI Yu-zhu¹, XIE Ting-ting², LI Pei-jun¹, CHEN Cong-gui¹, XU Bao-cai¹

(1. Engineering Research Center of Agricultural Bio-Chemicals Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China; 2. Three Squirrels Co., Ltd., Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) are a class of organic pollutants that are widely present in the environment and are carcinogenic and mutagenic. It has also been found in meat products since the 1970s, and research on PAHs in food has never stopped. This paper focuses on the external factors, internal factors and inhibition measures of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food processing, in order to provide new ideas for the study of polycyclic aromatic hydrocarbons in food.

Key words: food processing; polycyclic aromatic hydrocarbons; hazardous substances; influencing factors; control measures

引文格式:

胡高峰, 蔡克周, 李雨竹, 等. 食品加工过程中多环芳烃生成的影响因素及控制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 196-201

HU Gaofeng, CAI Kezhou, LI Yuzhu, et al. Influencing Factors and Control of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Formation in Food Processing[J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 196-201

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是一类广泛分布于环境和食品中、并且稳定存在的有害物质,最初发现于木材和化石燃料的不完全燃烧烟雾^[1]。PAHs具有致癌和致突变性,其分子结构由两个

或两个以上苯环组成^[2-3]。根据结构中苯环的数量,可将PAHs分为两类:轻质PAHs(2~4个苯环)和重质PAHs(4个以上苯环)^[4]。在加工过程中,轻质PAHs不稳定,容易向重质PAHs转化^[5]。鼠伤寒沙门氏菌试验表明,细胞色素P450酶系能够催化PAHs氧化和代谢,从而形成具有遗传毒性和致突变性的代谢物^[6]。基于PAHs的遗传毒性和致突变性评估,美国环境保护署(The United States Environmental Protection Agency, USEPA)及国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)将其中16种列为优先控制

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(31501585);安徽省科技重大项目(18030701159)

作者简介:胡高峰(1995—),男(汉),硕士研究生,研究方向:食品现代加工理论与方法。

*通信作者:蔡克周(1980—),男(汉),副教授,博士,研究方向:肉品加工与质量控制。

污染物^[7],而欧盟选择 16 种优先 PAHs 中的 8 种作为食品中致癌多环芳烃的最适评价指标,并且规定了苯并[a]芘、苯并[a]蒽、苯并[b]荧蒹及蒽等 4 种 PAHs 在某些食品中的最大残留量^[8-9]。

食品摄入是造成人体 PAHs 暴露的主要途径之一,尤其是通过烟熏、油炸和烧烤等加工方式的高油脂食品^[10]。就 PAHs 的摄入量而言,不同国家、不同群体有所差异。我国对于 PAHs 的人均摄入量为 3.56 $\mu\text{g}/\text{d}$,比其它许多国家的人均摄入量要高^[11]。一般来讲,年轻人对 PAHs 等食品有害物的每日摄入水平高于年长者,因此导致的健康风险也更大,特别是高暴露水平下对年轻人(尤其是儿童)产生的致癌性健康风险较大^[12-13]。

近些年来,国外已有不少有关食品中 PAHs 的形成原理、分析方法及控制技术等方面的文献报道^[14],而国内对于 PAHs 的研究相对较少,多集中在 PAHs 的检测技术和健康风险评估等方面^[15-16],对食品中 PAHs 的产生、抑制等研究不多。因此,本文重点对近年国内外有关食品中 PAHs 形成的影响因素和控制措施进行综述,以期对食品中 PAHs 的后续研究提供新思路。

1 PAHs 生成的影响

食品加工就是在一定的工艺条件下,食品组分发生一系列复杂的化学和生物化学互作过程,并形成特定的食品品质,同时也伴随着生成化学危害物 PAHs。因此,食品加工过程中,PAHs 生成的影响因素众多,依据其影响特点,可以简单分成内部因素和外部因素,内部因素主要指食品本身组分及相关理化性质,如脂质、蛋白、氨基酸、碳水化合物、水分和 pH 值等,除此之外的其他因素均可成为外部因素,主要指加工温度、加工时间及加工方式等。

1.1 外部因素

1.1.1 加工温度

Hasyimah 等^[17]在 150、200、250、300、350 $^{\circ}\text{C}$ 的气烤条件下,检测沙爹牛肉中 PAHs 的含量。结果表明随着温度的上升,牛肉中 PAHs 的含量增加;且在 300 $^{\circ}\text{C}$ 和 350 $^{\circ}\text{C}$ 下,4 种 PAH 的含量甚至超过了欧盟允许的最高水平。Joon-Goo 等^[18]研究加工温度和时间对烤肉中 PAHs 的影响,将炭烤分为 4 个阶段:1)点火 2 h 后持续 12 min(127 $^{\circ}\text{C}$ ~320 $^{\circ}\text{C}$);2)第一阶段后持续 12 min(320 $^{\circ}\text{C}$ ~285 $^{\circ}\text{C}$);3)第二阶段后持续 12 min(285 $^{\circ}\text{C}$ ~250 $^{\circ}\text{C}$);4)第三阶段后持续 24 min(250 $^{\circ}\text{C}$ ~200 $^{\circ}\text{C}$)。结果发现第一阶段产生的 PAHs 最多,这说明相比于加工时间,温度对 PAHs 生成的影响更为显著,且高温有

助于 PAHs 的形成。聂文等^[19]总结出高温有助于食品成分的热解,然后经环化聚合等一系列反应生成 PAHs。

1.1.2 加工时间

Min 等^[20]研究加热时间对 PAHs 生成的影响,测定了不同时间(15、20、25、30 min)条件下肉的模型系统中 8 种 PAHs 的含量,结果表明随着加热时间的延长,模型体系中 PAHs 的含量增加。Viegas 等^[21]将鸡肉分为两个阶段烤制,第二阶段是在第一阶段烤制后间隔 1.5 h 继续烤制,发现相比于第一阶段,第二阶段中烤鸡肉表面重质 PAHs 的含量增加,而轻质 PAHs 由于其不稳定性,并未有所增加。总体来说,随着加工时间的延长,食品中 PAHs 含量呈现增加趋势。

1.1.3 加工方式

不同的加工方式,会显著影响食品中 PAHs 的含量。常见的加工方式主要包括:热源的选择(炭烤、气烤、电烤)、木材种类的选择、食品原料的预处理等。

1.1.3.1 热源的选择

Chung 等^[22]研究发现生牛肉、生猪肉中并不含有 PAHs,而将两种肉制品分别采用炭炉、气炉和炭架方式烤制,烤肉中均有 PAHs 生成,且经炭架烤制的肉制品中生成的苯并[a]芘及总 PAHs 含量最高。Rey-Salgueiro 等^[23]通过对烤面包进行直接烘烤(火焰烤、煤炭烤、煤气烤)与间接烘烤(电烤箱烤)处理,结果测得采用电烤箱烤制的面包样品中未检测到污染,但采用直接烤制的面包中存在 PAHs 的生成,尤以火焰烤和炭烤两种方式对 PAHs 形成的影响较显著。Terzi 等^[24]研究炭烤和气烤两种处理方式对土耳其烤肉串中苯并[a]芘生成的影响,结果显示炭烤、气烤处理的苯并[a]芘平均含量分别为 24.2、5.7 $\mu\text{g}/\text{kg}$,这说明前者对苯并[a]芘形成的影响更为显著。Badry 等^[25]研究表明相比其他家庭烹调方式,直接气烤肉制品中 PAHs 的含量更高。以上研究结果皆说明,在热源的选择中,采用炭火烤制对食品中 PAHs 生成的影响更显著;直接烤制比间接烤制的影响更明显。

1.1.3.2 食品原料的预处理

Mahugija 等^[26]研究发现对烟熏鱼进行 60 $^{\circ}\text{C}$ 温水清洗处理,有助于减少鱼在烹饪过程中 PAHs 的含量。Farhadian 等^[27]将肉制品在炭烤之前进行预热(蒸汽预热、微波预热)处理,结果得知这种预处理对炭烤过程中苯并[a]芘、苯并[b]荧蒹、荧蒹等 PAHs 生成有较显著的影响,如对于牛肉样品,微波预热、蒸汽预热对荧蒹的抑制率分别达到 34%、46%。其原因可能是,对食品原料进行预处理能够缩短食品热加工的时间,或者减

少食品原料表面可形成 PAHs 的小分子物质的残留。

1.1.3.3 其他工艺因素

除了以上因素,其他外部因素如食品与热源的距离、氧气的供应等都可影响食品中 PAHs 的生成。如 Kendirci^[28]和 Rose^[29]等研究发现食品与热源间的距离对食品中 PAHs 的生成存在一定的影响。Min 等^[20]推测氧气的存在防止不完全燃烧,从而影响食品体系中 PAHs 的生成。

1.2 内部因素

1.2.1 pH 值

Wanwisa 等^[30]通过向烤肉腌制料中添加柠檬酸、双倍柠檬酸、碳酸氢钠、双倍碳酸氢钠,从而改变肉制品腌制料的 pH 值(分别为 5.35、4.38、3.62、7.13、7.51),研究发现高值 pH 值会促进 PAHs 的形成,而低 pH 值则起到抑制作用。Farhadian 等^[31]研究得出相同结论,并且作者推测原因可能是 pH 值影响了 Maillard 反应的进行。Martins 等^[32]和 Cécile 等^[33]指出 pH 值的大小影响 Maillard 反应过程中的 Amadori 重排,即 pH 值 ≤ 7 时,果糖基胺发生 1,2-烯醇化形成糠醛类化合物;pH 值 > 7 时,果糖基胺发生 2,3-烯醇化形成呋喃酮等还原性化合物(即 Srecker 降解反应)。Liu 等^[34]研究 Maillard 反应的动力学,得出 pH 值的上升会提高 Maillard 反应的速率。曾世通等^[35]和 Ajandouz 等^[36]研究得到一致的结论。Britt 等^[37]研究表明 Maillard 反应的热解产物会发生额外反应,从而生成 PAHs。但由于反应体系及过程的复杂性,两者之间联系的相关机理尚不明确,有待进一步研究。

1.2.2 食品组分

食品组分是影响 PAHs 生成的重要因素。食品组分复杂,既含有淀粉、蛋白和脂肪酸这样的大分子化合物,还有小分子糖、氨基酸等化合物,早前研究表明许多小分子前体物质在一定条件下能够经过一系列反应生成 PAHs,而脂质等大分子可以裂解形成这些小分子。

1.2.2.1 脂质

食品中脂质一直被认为是影响 PAHs 生成的重要因素。Gomes 等^[38]研究脂肪含量(20%、40%)对传统干发酵香肠中 PAHs 生成的影响,结果表明脂肪含量对苯并[a]蒽、蒽等轻质 PAHs 影响显著,且高脂肪对 PAHs 生成有着更为明显的影响。Joon-Goo 等^[18]对比发现,在相同工艺条件下,由牛排、猪颈瘦肉及猪肚肉中生成的 PAHs 的含量顺序为:猪肚肉(26.4%) $>$ 牛排(24.4%) $>$ 猪颈瘦肉(9.5%),这可能说明高脂肪含量促进食品中 PAHs 的生成。Chen 等^[39]通过建立热模型脂类,研究发

现由不同脂类生成 PAHs 的含量顺序为亚麻酸甲酯 $>$ 亚油酸甲酯 $>$ 油酸甲酯 $>$ 硬脂酸甲酯,说明脂肪酸的不饱和度影响 PAHs 的生成。Nie Wen 等^[40]探究模型体系中,脂肪酸的不饱和度(饱和、单不饱和、多不饱和)对 PAHs 生成的影响,结果表明,在相同条件下,PAHs 的含量随着脂肪酸不饱和度的增加而增加。

Chen 等^[39]推测不饱和脂肪酸生成 PAHs 途径为:氧化生成氢过氧化物,然后发生分子内环化形成环己烯等,进一步氧化成苯;硬脂酸生成 PAHs 的途径为:1)降解生成低分子化合物;2)发生 Diels-Alder 反应再氧化。而 Llamas 等^[41]研究得出高温下饱和脂肪酸烷基酯生成 PAHs 的一种机理为:1)通过 β -消除反应然后持续裂解生成 $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ 和 $\text{CH}_2=\text{CH}_2$;2) $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ 和 $\text{CH}_2=\text{CH}_2$ 发生 Diels-Alder 反应形成环己烯,然后氧化成苯;3)环己烯与 $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}_2$ 发生 Diels-Alder 反应经氧化形成萘等轻质 PAHs;4)持续发生 Diels-Alder 反应形成各种重质 PAHs。

1.2.2.2 氨基酸(蛋白质)

齐颖^[42]研究油炸肉制品过程中 PAHs 的形成规律,推测出连续性油炸使得蛋白质等发生热解、热聚合环化生成萘、苊、菲等 PAHs。这表明蛋白质(或氨基酸)是导致 PAHs 形成的因素之一。早前有研究表明,脯氨酸及脯氨酸 Amadori 化合物在高温条件下反应生成 PAHs^[37]。Sharma 等^[43]也发现某些 α -氨基酸如天冬氨酸和脯氨酸经过高温热解后与其它不饱和和小分子反应生成菲等 PAHs。Nie Wen 等^[44]研究出 PAHs 的生成与氨基酸的酸碱特性相关,其中碱性氨基酸的影响更显著。但 Lu Fei 等^[45]通过 TBARS 值和蛋白质羰基值的测定,研究出肉制品中 PAHs 的生成与脂质氧化及蛋白质氧化有关,同时也发现相比于蛋白质氧化与杂环胺形成之间的相关性($r=0.768, p<0.05$),其与 PAHs 形成间的相关性更小($r=0.598, p<0.05$),这可能说明在食品加工过程中,蛋白质氧化并非 PAHs 生成的主要因素。

1.2.2.3 碳水化合物

作为食品主要组分,碳水化合物对食品加工过程 PAHs 生成的影响相对较少。在 20 世纪 70 年代,Higman 等^[46]研究出热解纤维素、葡萄糖等碳水化合物能够产生 PAHs。Zhou Hui 等^[47]等发现木聚糖、纤维素的热解导致 PAHs 的生成;Britt 等^[37]也表明 D-葡萄糖能够促进脯氨酸生成 PAHs。Nie Wen 等^[44]研究碳水化合物的分子特性(D-葡萄糖、D-果糖、4-(α -D-葡萄糖)-D-葡萄糖、纤维素)对烤猪肉香肠中 PAHs 含量的影响,发现小分子的醛糖对 PAHs 生成的影响更显著。以上研究表明,碳水化合物是影响 PAHs 生成的因素之

一,但糖类是否为主要因素,以及其生成 PAHs 的相关机理尚不清楚,还需后续进一步探究。

1.2.3 水分

Min 等^[16]通过建立模型系统,研究发现水分的存在能够抑制 PAHs 的生成,并且推测造成此现象的原因为水分在加热状态下提供了 O₂,防止了不完全燃烧。Park 等^[48]研究得出水分的存在减少了烤猪肚肉中苯并[a]芘的含量。目前,对于水分与 PAHs 形成直接关系的报道较少,这可能主要由于水分不能直接作为 PAHs 生成的前提物质,其更多通过影响其它分子或影响其他分子之间相互作用的途径来发挥作用。

2 PAHs 生成的控制措施

食品加工过程中多环芳烃生成的控制,近年研究逐渐增多,方法措施涉及较多,但基本上主要通过改变加工方式降低多环芳烃生成和添加外源活性成分阻断其生成。

2.1 改变加工方式

Farhadian 等^[27]将肉制品在炭烤之前进行预热(蒸汽预热、微波预热)和包装(铝箔、香蕉叶)处理,结果发现两种方式都不同程度地抑制了炭烤过程中苯并[a]芘、苯并[b]荧蒽、荧蒽等 PAHs 的含量。Chaemsai 等^[49]研究发现,在木炭烧烤之前进行高温预热炭化处理,能减少木炭在燃烧过程中烟气的 PAHs 的形成。Oz 等^[50]研究发现,与金属丝炭架相比,采用石板作为烧烤装置能够有效减少牛排中 PAHs 的生成,其原因可能是石板装置防止了脂肪肉滴与热源的直接接触。Joon-Goo 等^[18]采取脂肪肉滴收集和通风排烟处理,对传统烧烤装置进行改进,发现对烤制过程对脂肪油滴收集和通风排烟均能有效减少烤肉中 PAHs 的含量。Viegas 等^[21]和 Gomes 等^[38]研究都表明改变加工方式可抑制多种食品中 PAHs 的生成。

不难看出,在食品加工过程中,减少 PAHs 生成的措施方法主要有优选炭源、改进原料包装、改善加工装置等,从具体机制上看,这些方式产生抑制效果的原因主要还是改变了加工温度、减少了烟雾的产生、防止了食品特别是油脂与热源的直接接触等。

2.2 添加外源成分

向食品中添加外源活性组分降低化学危害物的生成是一种常见方法。Min 等^[20]发现天然抗氧化剂(生育酚、表儿茶素和芝麻酚)与合成抗氧化剂(2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚、丁基羟基茴香醚)都能对 PAHs 的生成起到抑制作用,且通过电子自旋共振(electron spin resonance, ESR)研究表明这种抑制作用与抗氧化

剂的自由基清除作用有关。Badry^[25]和 Lu Fei 等^[45]研究发现添加蒜蓉、生姜粉等香辛料可有效减少肉制品中 PAHs 的含量。Viegas 等^[51]采用啤酒作为肉制品的腌制剂,可有效抑制烤鸡肉中 PAHs 的生成,抑制效果直接取决于啤酒成分的自由基清除活性(抗氧化活性)。Wang 等^[52]发现不同茶水浸泡对烤鸡翅中 PAHs 的抑制效果顺序为:绿茶>白茶>黄茶>乌龙茶>黑茶>红茶,这一顺序与茶水中总酚类物质含量及自由基清除能力也一一对应。杨潇^[53]和齐颖^[42]等研究得出与此类似的结论。

以上研究都表明,具有抗氧化活性的香辛料和添加剂,在食品加工过程添加这些成分,可有效抑制 PAHs 的生成,其机制可能是这些抗氧化剂干扰或阻断了 PAHs 生成过程中自由基反应。

3 结论

综上所述,目前国内外许多学者都致力于有关食品中 PAHs 形成的研究,笔者基于这诸多研究,总结出在食品加工过程中,温度、时间、加工方式等外部因素以及食品本身性质(pH 值、组分、水分等)等都会影响其中 PAHs 的生成;并且总结控制食品中 PAHs 生成的措施主要有改变加工方式(对于外部因素)和添加外源成分(对于内部因素)。

迄今为止,PAHs 在食品中生成的机制尚不十分明确。所以在以后的研究中,需要更加深入地探索 PAHs 在食品中的形成机理及外源成分对 PAHs 的抑制机理。综合近些年来国内外的研究成果,笔者认为可从以下两个方面探究:

1)截至目前,对于 Maillard 反应与 PAHs 形成之间的关系尚不明确,可从 Maillard 反应的前体物质出发,深入探究经 Maillard 反应生成 PAHs 的机制,为 PAHs 的生成机制和控制措施研究开辟新途径。

2)从分子结构-活性关系角度分析外源成分对食品加工过程中 PAHs 抑制的分子机理,以充分开发和利用基于香辛料等活性成分的 PAHs 定向阻断技术。

参考文献:

- [1] Edwards N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH's) in the terrestrial environment—A review[J]. Journal of Environmental Quality, 1983, 12(4): 427-441
- [2] Vaneet Kumar A, Kothiyal N C, Kumari S, et al. Determination of some carcinogenic PAHs with toxic equivalency factor along roadside soil within a fast developing northern City of India[J]. Journal of Earth System Science, 2014, 123(3): 479-489
- [3] Mirsadeghi S A, Zakaria M P, Yap C K, et al. Risk assessment for

- the daily intake of polycyclic aromatic hydrocarbons from the ingestion of cockle (*Anadara granosa*) and exposure to contaminated water and sediments along the west Coast of Peninsular Malaysia[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(2): 336–345
- [4] Ali, Samet, Babaoglu. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and lamb kokorec: Effects of different animal fats[J]. *International Journal of Food Properties*, 2017, 20(9): 1960–1970
 - [5] Wang C, Xie Y T, Wang H Y, et al. Phenolic compounds in beer inhibit formation of polycyclic aromatic hydrocarbons from charcoal-grilled chicken wings[J]. *Food Chemistry*, 2019, 294: 578–586
 - [6] Shimada T, Murayama N, Yamazaki H, et al. Metabolic activation of polycyclic aromatic hydrocarbons and aryl and heterocyclic amines by human cytochromes P450 2A13 and 2A6[J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2013, 26(4): 529–537
 - [7] Yan J, Wang L, Fu P P, et al. Photomutagenicity of 16 polycyclic aromatic hydrocarbons from the US EPA priority pollutant list[J]. *Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2004, 557(1): 99–108
 - [8] Wenzl T, Simon R, Anklam E, et al. Analytical methods for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in food and the environment needed for new food legislation in the European Union[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2006, 25(7): 716–725
 - [9] European Union. No 835/2011 of 19 August 2011 amending Regulation (EC) No 1831/2006 as regards maximum levels for polycyclic aromatic hydrocarbons in foodstuffs[S]. *Official Journal of the European Union*, 2011
 - [10] Singh L, Varshney J G, Agarwal T. Polycyclic aromatic hydrocarbons' formation and occurrence in processed food[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 768–781
 - [11] Diggs D L, Huderson A C, Harris K L, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons and digestive tract cancers: a perspective[J]. *Journal of Environmental Science and Health: Part C*, 2011, 29(4): 324–357
 - [12] Lu F, Kuhnle G K, Cheng Q F. Heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in commercial ready-to-eat meat products on UK market[J]. *Food Control*, 2017, 73: 306–315
 - [13] 曹梦思, 王君, 张立实, 等. 中国居民膳食油脂多环芳烃暴露的定量风险评估[J]. *中华预防医学杂志*, 2016, 50(2): 163–167
 - [14] Ledesma E, Rendueles M, Díaz M. Contamination of meat products during smoking by polycyclic aromatic hydrocarbons: Processes and prevention[J]. *Food Control*, 2016, 60: 64–87
 - [15] 周娜, 骆和东, 李响, 等. 食品中苯并(α)芘的微波辅助萃取方法的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(3): 787–790
 - [16] 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
 - [17] Ahmad Kamal N H, Selamat J, Sanny M. Simultaneous formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and heterocyclic aromatic amines (HCAs) in gas-grilled beef satay at different temperatures[J]. *Food Additives & Contaminants: Part A*, 2018, 35(5): 848–869
 - [18] Lee J G, Kim S Y, Moon J S, et al. Effects of grilling procedures on levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats[J]. *Food Chemistry*, 2016, 199: 632–638
 - [19] 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
 - [20] Min S, Patra J K, Shin H S. Factors influencing inhibition of eight polycyclic aromatic hydrocarbons in heated meat model system[J]. *Food Chemistry*, 2018, 239: 993–1000
 - [21] Viegas O, Novo P, Pinto E, et al. Effect of charcoal types and grilling conditions on formation of heterocyclic aromatic amines (HAs) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled muscle foods[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(6): 2128–2134
 - [22] Chung S Y, Yettella R R, Kim J S, et al. Effects of grilling and roasting on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in beef and pork[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(4): 1420–1426
 - [23] Rey Salgueiro L, García Falcón M S, Martínez Carballo E, et al. Effects of toasting procedures on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in toasted bread[J]. *Food Chemistry*, 2008, 108(2): 607–615
 - [24] TERZI G, ÇELİK T H, NISBET C. Determination of Benzo[a]pyrene in Turkish döner Kebab Samples Cooked with Charcoal or Gas Fire[J]. *Irish Journal of Agricultural and Food Research*, 2008, 47(2): 187–193
 - [25] BADRY N E. Effect of household cooking methods and some food additives on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation in chicken meat[J]. *World Applied Sciences Journal*, 2010, 9(9): 963–974
 - [26] Mahugija J A M, Njale E. Effects of washing on the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contents in smoked fish[J]. *Food Control*, 2018, 93: 139–143
 - [27] Farhadian A, Jinap S, Hanifah H N, et al. Effects of meat preheating and wrapping on the levels of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled meat[J]. *Food Chemistry*, 2011, 124(1): 141–146
 - [28] Kendirci P, Icier F, Kor G, et al. Influence of infrared final cooking on polycyclic aromatic hydrocarbon formation in ohmically pre-cooked beef meatballs[J]. *Meat Science*, 2014, 97(2): 123–129
 - [29] Rose M, Holland J, Dowding A, et al. Investigation into the formation of PAHs in foods prepared in the home to determine the effects of frying, grilling, barbecuing, toasting and roasting[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2015, 78: 1–9
 - [30] Wongmaneepratip W, Vangnai K. Effects of oil types and pH on carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled chicken[J]. *Food Control*, 2017, 79: 119–125
 - [31] Farhadian A, Jinap S, Faridah A, et al. Effects of marinating on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (benzo[a]Pyrene, benzo[b]fluoranthene and fluoranthene) in grilled beef meat [J]. *Food Control*, 2012, 28(2): 420–425
 - [32] Martins S I F S, Jongen W M F, van Boekel M A J S. A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2000, 11(9/10): 364–373
 - [33] 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

- [34] Liu S C, Yang D J, Jin S Y, et al. Kinetics of color development, pH decreasing, and anti-oxidative activity reduction of Maillard reaction in galactose/*Glycine* model systems[J]. Food Chemistry, 2008, 108(2): 533–541
- [35] 曾世通, 卢斌斌, 李鹏, 等. 丙氨酸与葡萄糖美拉德反应体系中 HMF 的形成分析[J]. 中国食品学报, 2017, 17(4): 289–293
- [36] Ajandouz E H, Tchiakpe L S, Ore F D, et al. Effects of pH on caramelization and Maillard reaction kinetics in fructose–lysine model systems[J]. Journal of Food Science, 2001, 66(7): 926–931
- [37] Britt P F, Buchanan A C, Owens C V Jr, et al. Does glucose enhance the formation of nitrogen containing polycyclic aromatic compounds and polycyclic aromatic hydrocarbons in the pyrolysis of proline?[J]. Fuel, 2004, 83(11/12): 1417–1432
- [38] Gomes A, Santos C, Almeida J, et al. Effect of fat content, casing type and smoking procedures on PAHs contents of Portuguese traditional dry fermented sausages [J]. Food and Chemical Toxicology, 2013, 58: 369–374
- [39] Chen B H, Chen Y C. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the smoke from heated model lipids and food lipids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49(11): 5238–5243
- [40] Nie W, Cai K Z, Li Y Z, et al. Study of polycyclic aromatic hydrocarbons generated from fatty acids by a model system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(7): 3548–3554
- [41] Llamas A, Al-Lal A M, García-Martínez M J, et al. Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) produced in the combustion of fatty acid alkyl esters from different feedstocks: Quantification, statistical analysis and mechanisms of formation[J]. Science of the Total Environment, 2017, 586: 446–456
- [42] 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: 20–30
- [43] Sharma R K, Chan W, Seeman J I, et al. Formation of low molecular weight heterocycles and polycyclic aromatic compounds (PACs) in the pyrolysis of α -amino acids[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2003, 66(1/2): 97–121
- [44] Nie W, Cai K Z, Li Y Z, et al. Small molecular weight aldose (d-glucose) and basic amino acids (l-lysine, l-arginine) increase the occurrence of PAHs in grilled pork sausages[J]. Molecules, 2018, 23(12): 3377
- [45] 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
- [46] Higman E B, Schmeltz I, Schlotzhauer W S. Products from the thermal degradation of some naturally occurring materials[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1970, 18(4): 636–639
- [47] Zhou H, Wu C F, Meng A H, et al. Effect of interactions of biomass constituents on polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) formation during fast pyrolysis[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2014, 110: 264–269
- [48] Park K C, Pyo H, Kim W, et al. Effects of cooking methods and tea marinades on the formation of benzo[a]Pyrene in grilled pork belly (Samgyeopsal)[J]. Meat Science, 2017, 129: 1–8
- [49] Chaemsai S, Kunanopparat T, Srichumpuang J, et al. Reduction of the polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) content of charcoal smoke during grilling by charcoal preparation using high carbonisation and a preheating step[J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2016, 33(3): 385–390
- [50] Oz F, Yuzer M O. The effects of cooking on wire and stone barbecue at different cooking levels on the formation of heterocyclic aromatic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in beef steak[J]. Food Chemistry, 2016, 203: 59–66
- [51] Viegas O, Yebra-Pimentel I, Martínez-Carballo E, et al. Effect of beer marinades on formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled pork [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(12): 2638–2643
- [52] Wang C, Xie Y T, Qi J, et al. Effect of Tea Marinades on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in charcoal-grilled chicken wings[J]. Food Control, 2018, 93: 325–333
- [53] 杨潇. 烟熏液对卤煮牛肉中杂环胺和多环芳烃含量的影响研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2016

收稿日期: 2019-08-30