

烧鸡加工过程中杂环胺的影响因素及抑制措施研究进展

魏秋红¹, 李艳秋¹, 韩文凤², 王涛¹, 郭志芳¹

(1.漯河职业技术学院食品学院, 河南 漯河 462000; 2.浙江工业职业技术学院鉴湖学院, 浙江 绍兴 312000)

摘要: 鸡肉中蛋白质含量丰富, 蛋白质在高温加工过程中会产生一类致癌、致突变化合物杂环胺, 危害人体健康, 有效抑制杂环胺的产生已是食品安全领域关注热点。本文依照烧鸡加工的工艺流程主要阐述了原料、预处理、涂糖水、油炸、煮制等工序中影响杂环胺含量的因素, 总结了近年来国内外关于杂环胺抑制措施的研究进展。增加原料肉的体积和水分含量、对原料肉进行微波与腌制处理、适量涂糖水、适当降低烹饪温度和时间、合理添加一些香辛料、抗氧化剂等措施可以降低烧鸡制作过程中杂环胺的含量。

关键词: 烧鸡; 加工; 杂环胺含量; 影响因素; 抑制措施; 研究进展

Recent Progress in Research on Factors Affecting the Formation of Heterocyclic Amines and Approaches to Inhibit It during Roast Chicken Processing

WEI QiuHong¹, LI Yanqiu¹, HAN Wenfeng², WANG Tao¹, GUO Zhifang¹

(1.College of Food Science, Luohe Vocational Technology College, Luohe 462000, China;

2.Jianhu College of Zhejiang Industry Polytechnic College, Shaoxing 312000, China)

Abstract: Chicken meat is rich in protein, which can produce carcinogenic and mutagenic heterocyclic amines during high temperature processing, posing serious health hazards to consumers. Effective inhibition of heterocyclic amines production has become a major concern in the field of food safety. This paper discusses the factors affecting the content of heterocyclic amines at different steps of roast chicken production such as the raw material, pretreatment, sugar coating, deep frying and boiling, and it summarizes the existing approaches to inhibit heterocyclic amines including increasing carcass volume and water content of chicken meat, microwave treatment, marination, appropriate sugar coating, properly reducing cooking temperature and time, and adding spices and antioxidants.

Keywords: roast chicken; processing; heterocyclic amines content; factors; measures; progress

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201208-286

中图分类号: TS251.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2021) 02-0056-06

引文格式:

魏秋红, 李艳秋, 韩文凤, 等. 烧鸡加工过程中杂环胺抑制措施研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(2): 56-61. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201208-286. <http://www.rlyj.net.cn>

WEI QiuHong, LI Yanqiu, HAN Wenfeng, et al. Recent progress in research on factors affecting the formation of heterocyclic amines and approaches to inhibit it during roast chicken processing[J]. Meat Research, 2021, 35(2): 56-61.

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201208-286. <http://www.rlyj.net.cn>

烧鸡营养丰富, 口感独特, 深受消费者的喜爱。烧鸡加工一般经过原料预处理、造型、浸烫、涂糖水、油炸、煮制等工艺流程。鸡肉中含有高含量蛋白, 在油炸和煮制等加热过程中会产生大量杂环胺。杂环胺类化合物是富含蛋白质的食品在热加工过程中生成、由碳、氮、

氢原子组成、具有多环芳香族结构的一类化合物^[1-2]。大量研究表明, 杂环胺致癌, 高杂环胺摄入与非酒精性脂肪性肝病^[3]、神经元损伤^[4]等多种疾病存在关联, 且杂环胺的致突变能力极强, 是亚硝酸盐、黄曲霉毒素B₁和苯并芘的数十倍甚至数百倍, 对人体有极大危害^[5]。杂环

收稿日期: 2020-12-08

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (19B550005)

第一作者简介: 魏秋红 (1976—) (ORCID: 0000-1589-9022-6692), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为食品生物技术。

E-mail: dlwqh@163.com



胺的存在给烧鸡行业带来阴影,也对消费者的生理和心理健康构成威胁。本文拟依照烧鸡制作的工艺流程研究杂环胺含量的影响因素和抑制措施,为低杂环胺含量烧鸡的生产提供理论参考。

1 原料对杂环胺含量的影响

1.1 原料肉形态对杂环胺含量的影响

肉及肉制品中的杂环胺含量与原料肉的形态(肉泥、小肉块、大肉块)有关。Sun Li等^[6]发现,将不同形态的肉在250℃烤箱中烤制30 min后,大肉块中杂环胺含量最低,其次是小肉块,肉泥杂环胺含量最高。Lan等^[7]对羊肉进行杂环胺含量测定,发现绞碎的样品杂环胺含量高于整块的样品。此外,郭海涛等^[8]以羊肉饼为原料,分析不同体积的烤羊肉饼中杂环胺含量的区别,结果表明,羊肉饼中杂环胺的含量与羊肉饼体积呈负相关,极性与非极性杂环胺含量均随羊肉饼体积的增大而下降,只是下降程度略有不同。究其原因,可能是小肉块或绞碎的肉在加工过程中受热更加均匀,而且肉在切碎或绞制过程中内容物流出,这些内容物是杂环胺的前体物质,这些前体物质经高温加热后会增加肉中杂环胺的含量。而大肉块在加热时,不利于热量的传递,造成肉的内部温度较低,从而产生的杂环胺含量相对较低。

1.2 原料肉部位对杂环胺含量的影响

原料肉不同部位对杂环胺含量也有一定的影响。盖圣美等^[9]研究几家传统熏烤门店和工业化加工的鸡胗、鸡爪及鸡翅的杂环胺含量,研究发现,工业化熏烤产品中的2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉(2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoine, IQ)、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)、9*H*-吡啶并[4,3-*b*]吡啶(9*H*-pyrido[4,3-*b*]indole, Norharman)、1-甲基-9*H*-吡啶并[4,3-*b*]吡啶(1-methyl-9*H*-pyrido[4,3-*b*]indol, Harman)和2-氨基-9*H*-吡啶并[2,3-*b*]吡啶(2-amino-9*H*-pyrido[2,3-*b*]indole, Aac) 5种杂环胺含量均低于传统熏烤门店产品的含量,且在鸡胗、鸡爪及鸡翅3个部位中,鸡胗的杂环胺含量最高。Oz等^[10]研究鸡皮和鸡肉中杂环胺含量的差异,得出鸡皮中杂环胺含量是鸡肉的3倍。Liao Guozhou等^[11]研究油煎-酱卤肉制品中杂环胺的含量,在油煎4 min时Norharman含量在肉中为1.01 ng/g、皮中为4.02 ng/g, Harman含量在肉中为0.26 ng/g、皮中为0.87 ng/g。邵斌等^[12]研究发现,烧鸡鸡皮中杂环胺的含量比鸡肉中高,尤其是PhIP、Harman和Norharman。原因可能是鸡皮与加热表面直接接触,温度较高,并且鸡皮比鸡肉的组织疏松,内容物更易流出,这些内容物是杂环胺的前体物质,另外组织疏松更利于热量的传递,烧鸡鸡皮中杂环胺的含量比鸡肉中相对较高。

1.3 原料肉水分含量对杂环胺含量的影响

杂环胺的前体物质大部分都是可溶于水的,对含有杂环胺的肉及肉制品进行加热处理时,杂环胺的前体物质会伴随水分的流失而发生转移,因此保持肉及肉制品中的水分含量能够有效控制肉及肉制品中杂环胺的形成,从而间接降低肉及肉制品中杂环胺的含量。Wang等^[13]研究得出,水分含量与杂环胺含量有关,在油煎条件下,水分消耗较多,杂环胺含量较高。Borgen等^[14]将含有前体物(游离氨基酸、肌酸和葡萄糖)的样品(包括猪肉、鸡肉和牛肉)分别在潮湿和干燥条件下加热30 min,研究发现,在干燥条件下,2-氨基-1,6-二甲基-咪唑[3,2-*e*]咪唑[4,5-*b*]吡啶(2-amino-1,6-dimethyl-furo[3,2-*e*]-imidazo[4,5-*b*]pyridine, IFP)和PhIP生成量相对较多。

2 预处理对杂环胺含量的影响

对原料肉进行一定的预处理,原料肉中前体物的种类与含量都会发生很大变化,从而间接达到降低肉制品中杂环胺类化合物种类及含量的目的。原料肉预处理方法一般包括微波处理、腌制处理等。

2.1 微波处理对杂环胺含量的影响

Felton等^[15]在牛肉馅饼加工前,微波处理2 min,经检测发现牛肉馅饼里的肌酸、氨基酸、葡萄糖含量共减少30%,杂环胺含量与未经预处理的对照组相比减少90%。陈妍方^[16]研究表明,微波处理可明显提高咖啡酸对PhIP的抑制率。猜测造成这种结果的原因可能是肉制品经微波处理后肉中部分水分损失,进而对剩余的小分子前体物质转移到肉表面进行反应起到一定的阻碍作用。

2.2 腌制处理对杂环胺含量的影响

对原料肉及肉制品进行腌制处理,不仅能明显改善肉及肉制品的口感和风味,而且对肉及肉制品中杂环胺的生成还有一定的抑制作用。Jinap等^[17]将牛肉在加工前先进行腌制处理,发现与未经腌制的牛肉相比,经过腌制处理的牛肉中杂环胺生成明显受到抑制。Sepahpour等^[18]发现,用含有52.4%姜黄和47.6%柠檬草的腌制料腌制牛肉,烤制后Norharman含量从45.6 ng/g降低至0.5 ng/g, Harman含量从87.4 ng/g降低至2.8 ng/g。Jinap等^[19]在炸羔羊肉之前先用火炬姜、柠檬草、姜黄等进行腌制处理,经检测发现经过腌制处理后的炸羔羊肉中各类杂环胺含量均有很大程度的降低。韩雪等^[20]通过腌制处理改变原料肉中的化学成分,例如通过注射食盐、磷酸盐溶液等增加原料肉的持水能力,进而影响生成杂环胺的种类与含量。

李利洁^[21]、Haskaraca^[22]等研究腌制处理降低杂环胺含量的作用机理,认为腌制过程中原料肉中的杂环胺前

体物质（肌酸）会逐渐扩散到腌制液中，并且腌制处理还能够防止肉中水分的损失，从而进一步抑制肉制品中杂环胺的生成，另外，腌制过程会加入一些香辛料、植物提取物、抗氧化剂等物质，可与肉及肉制品中的自由基发生结合，自由基是杂环胺生成过程中必不可少的物质，所以腌制处理能够降低食品中杂环胺的含量。

3 涂糖水对杂环胺含量的影响

烧鸡制作过程中需要在鸡的表皮涂抹一层糖水，以便油炸时发生美拉德反应，使鸡的表面产生良好的色泽。研究发现，涂层用糖种类不同，杂环胺的生成也有一定差异。Hasnol等^[23]用富含葡萄糖和果糖的蜂蜜代替甜卤汁中的蔗糖来涂抹鸡肉，检测发现，涂抹蜂蜜的鸡肉中杂环胺含量明显减少。烧鸡制作过程中常用的涂层是蜂蜜水。蜂蜜中含有非常丰富的糖类^[24]和游离氨基酸^[25]等物质，而这些物质正是杂环胺形成的前体物质，但蜂蜜主要存在于鸡皮上，难以通过鸡皮渗透到鸡肉内部，与杂环胺的前体物相互结合产生杂环胺。所以蜂蜜对鸡肉中杂环胺的种类和含量影响较小。刘彪^[26]研究表明，不同体积分数的蜂蜜水涂层对烧鸡鸡肉中的杂环胺种类和含量无明显影响，而当蜂蜜的体积分数分别为0%、25%、50%时，随着蜂蜜体积分数的增大，鸡皮中Norharman含量升高。

4 油炸对杂环胺含量的影响

传统烧鸡的制作一般采用油炸的方式进行上色，然而油炸在使烧鸡呈现诱人色泽的同时，也使烧鸡中产生了大量的杂环胺。

4.1 油炸用锅对杂环胺含量的影响

油炸用锅中金属离子的种类会影响杂环胺的生成。于迪等^[27]用 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 含量较多的锅进行油炸时，发现肉及肉制品中杂环胺的生成量高于普通锅，这些杂环胺主要是2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, IQx）、2-氨基-3,8-二甲基咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, MeIQx）和2-氨基-3,4,8-三甲咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, DiMeIQx），而利用 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量较多的锅进行油炸时，发现肉及肉制品中PhIP的生成量高于普通锅，由此可见，油炸过程中，应尽可能避免使用含铁、钙和镁离子较多的加工器具。

4.2 油炸用油对杂环胺含量的影响

Lu等^[28]研究发现，用橄榄油和葵花籽油炒制的肉类中几乎检测不到MeIQx，用葡萄籽油炒制时，肉类中MeIQx和PhIP的生成受到抑制。Oz等^[29]在肉团烧烤时加

入共轭亚油酸，发现共轭亚油酸对肉团中的杂环胺有明显的抑制效果。炸鸡炸制过程中经常采用复炸油，油的反复使用不仅能使反式脂肪酸在油中积累，而且还能加速油脂的氧化酸败，形成杂环胺，因此，为了保证人体的健康与饮食安全，在条件允许的情况下尽可能减少油的循环使用次数^[30-31]。

4.3 油炸温度对杂环胺含量的影响

Persson等^[32]研究发现，鸡腿在180℃油炸时鸡皮中杂环胺含量是160℃油炸时的2倍。刘彪^[26]研究发现，鸡肉油炸温度从160℃上升到180℃后能够检测到更多的3-氨基-1-甲基-5*H*-吡啶并[4,3-*b*]吡咯（3-amino-1-methyl-5*H*-pyrido[4,3-*b*]indole, Trp-P-2）和PhIP。Gibis^[33]、江黎雯^[34]等研究发现，当煎炸温度由150~170℃升高至200~220℃时，培根中MeIQx和PhIP含量增加0.5~2.5倍。一般情况下，油炸温度越高，生成的杂环胺种类和数量就越多。

4.4 油炸时间对杂环胺含量的影响

刘彪^[26]研究发现，180℃油炸后的鸡肉和鸡皮中均能检测到杂环胺类化合物，且总体上杂环胺的含量随油炸时间的增加而增加，油炸8 min的鸡肉和鸡皮中杂环胺总量比油炸1 min分别增加232.3%和758.6%。Yao Yao等^[35]以三黄鸡为原料，经过油炸上色后，检测发现总杂环胺含量与油炸时间呈正相关，油炸1 min时三黄鸡中总杂环胺含量为0.66 ng/g，油炸8 min时为2.01 ng/g，Solyakov等^[36]的研究结果与其相同。

5 煮制对杂环胺含量的影响

5.1 煮制调料对杂环胺含量的影响

目前，煮制烧鸡的调料主要包括蔬菜、水果、香辛料及抗氧化活性提取成分等。煮制调料对于肉制品中杂环胺的抑制机理主要是杂环胺生成需要自由基，而煮制调料可以清除自由基，抑制杂环胺的生成。

5.1.1 香辛料类

香辛料是一类用于增加食品风味和颜色等的天然芳香植物的器官或组织^[37]。邵斌^[38]将香叶、桂皮、良姜、花椒、丁香5种香辛料加入到烧鸡的卤水中，发现丁香可以显著抑制PhIP的形成，良姜能够显著抑制Norharman的形成，花椒对烧鸡鸡皮中的Harman抑制效果明显。李进^[39]研究干姜、八角、青花椒、红花椒、桂皮、陈皮、黑胡椒、香叶对卤肉中杂环胺的抑制效果，发现干姜、青花椒和桂皮的抑制效果最明显。李雨竹等^[40]研究发现，生姜和辣椒能显著降低卤牛肉中杂环胺的含量。

Murkovic等^[41]以煎烤牛肉为原料，在其中加入迷迭香、百里香、大蒜后检测到杂环胺含量明显降低。



Balogh等^[42]在牛肉中加入迷迭香,可以降低PhIP含量。Gibis^[43]发现,大蒜、洋葱、柠檬均可抑制煎炸牛肉中杂环胺的生成。Rounds等^[44]发现,橄榄、苹果皮、丁香和洋葱粉等物质均能显著抑制杂环胺的形成。

5.1.2 抗氧化剂类

杂环胺产生过程中不可避免会产生多种自由基,而抗氧化剂会通过抑制或淬灭自由基抑制杂环胺的生成^[45-46]。Johansson^[47]、Tai^[48]等研究表明,在肉制品加工时添加一些人工合成抗氧化剂(包括叔丁基羟基茴香醚(butyl hydroxy anisole, BHA)、2,6-二叔丁基对甲酚(2,6-di-tert-butyl-4-methylphenol, BHT)、没食子酸丙酯(propyl gallate, PG)等)可抑制杂环胺的形成,其抑制效果取决于抗氧化剂的种类及添加量。梅竞博^[49]研究发现,肉及肉制品加工时添加BHT可以降低其中杂环胺的含量。人工合成的抗氧化剂对人体有一定危害,所以目前研究重点主要是天然抗氧化剂^[50]。

Cheng等^[51]将苹果、接骨木、葡萄、菠萝4种植物提取物分别加入到原料肉锅内,检测PhIP、DiMeIQx、MeIQx含量,结果显示,4种植物提取物均可抑制杂环胺的生成,且苹果提取物和葡萄提取物的抑制效果强于接骨木提取物和菠萝提取物。Cheng等^[52-53]研究发现,柚皮素和儿茶素没食子酸酯均可抑制原料肉中杂环胺的生成。究其原因,抗氧化剂能与苯乙醛结合,生成特定的化合物,而苯乙醛是杂环胺的中间产物,所以能间接抑制杂环胺的形成。

不同调料对肉制品中杂环胺的作用效果如表1所示。

表1 不同调料对肉制品中杂环胺的作用效果

Table 1 Inhibitory effects of different spices on heterocyclic amines in heat-processed meat products

调料种类	抑制杂环胺的活性成分	作用效果	参考文献
丁香	酚类物质	抑制PhIP形成	[38,44]
良姜	黄酮类物质	抑制Norharman形成	[38]
花椒	酰胺类物质等	抑制Norharman形成	[38]
干姜、生姜	黄酮类、萜类化合物	抑制Norharman、Harman形成	[39-40]
桂皮	黄酮类、萜类化合物	抑制Norharman、Harman形成	[39]
辣椒	黄酮类、酰胺类物质等	抑制MeIQx、IQx、PhIP形成	[40]
迷迭香	萜类化合物	抑制PhIP形成	[41-42]
百里香	酚类物质	抑制PhIP形成	[41]
大蒜	含硫有机物、大蒜素、低聚糖等	抑制PhIP、MeIQx形成	[41,43]
洋葱	含硫有机物、大蒜素、低聚糖等	抑制PhIP、MeIQx形成	[43-44]
柠檬	含硫有机物、大蒜素、低聚糖等	抑制PhIP、MeIQx形成	[43]
橄榄	黄酮类、萜类化合物	抑制PhIP、MeIQx形成	[44]
苹果皮、苹果提取物	酚类物质	抑制PhIP、MeIQx形成	[44,51]
BHA	酚类物质	抑制IQx、MeIQx形成	[47-49]
BHT	酚类物质	抑制IQx、MeIQx形成	[47-48]
PG	酚类物质	抑制PhIP、MeIQx形成	[47-48]
接骨木提取物	花青素、酚类物质	抑制PhIP、MeIQx形成	[51]
葡萄提取物	酚类、黄酮类物质	抑制PhIP、MeIQx形成	[51]
菠萝提取物	菠萝蛋白酶、VC等	抑制PhIP、MeIQx形成	[51]
柚皮素	黄酮类	抑制PhIP形成	[52-53]
儿茶素没食子酸酯	酚类物质	抑制PhIP形成	[52-53]

5.2 卤汤的使用次数对杂环胺含量的影响

李可等^[54]研究发现,卤汤的使用次数对烧鸡鸡皮、鸡肉及卤汤中杂环胺的形成均有影响,随着卤汤使用次数的增加,烧鸡鸡皮、鸡肉和卤汤中的杂环胺含量均呈现显著上升趋势,并且在鸡皮、鸡肉及卤汤中均可检出Norharman、Harman、Trp-P-2和3-氨基-1,4-二甲基-5H-吡啶并[4,3-b]吡啶(3-amino-1,4-dimethyl-5H-pyrido[4,3-b]indole, Trp-P-1)。当卤煮次数小于15次时不能检出IQ和DiMeIQx,然而当卤煮次数达到20次以上时,卤汤、烧鸡鸡皮和鸡肉中均可检出IQ和DiMeIQx^[38]。值得注意的是,当老汤使用20次以上后,烧鸡鸡肉中的杂环胺总量高达60.64 ng/g,与卤煮1次的卤汤相比增加1 029.2%,因此建议在烧鸡加工中应科学、规范,并严格控制卤煮工艺,同时减少老汤使用次数^[55]。

5.3 煮制时间对杂环胺含量的影响

杨潇等^[56]对牛肉进行不同时间的卤煮,结果发现,牛肉中的杂环胺种类和含量均与卤煮时间呈正相关。李诗萌等^[57]对水煮鸭胸进行不同时间的卤煮,结果发现,水煮鸭胸中的杂环胺生成量随着卤煮时间的增加而增加。邵斌^[38]发现,随着卤煮时间的延长,卤煮烧鸡的鸡肉及鸡皮中Harman、Norharman、Trp-P-1、Trp-P-2含量均呈明显上升趋势。郭海涛^[58]、孟圆^[59]等研究卤制时间对酱卤羊肉中杂环胺的影响,研究发现,煮制时间越长,Harman和Norharman的生成量越多,并且当煮制时间由1 h延长至6 h时,成品中的总杂环胺含量升高2.35倍。

6 结 语

烧鸡是我国人民日常生活中食用较多的高蛋白传统肉类制品,蛋白质含量高的肉类制品在高温加工过程中易于产生对人体有害的杂环胺,随着人民健康意识的日益提高,降低烧鸡中杂环胺含量措施的研究也越来越受到关注。炸鸡制作工艺复杂,再加上杂环胺种类较多,很大程度上增加了抑制杂环胺的难度。首先,当前研究游离态杂环胺较多,结合态杂环胺的研究较少,对结合态杂环胺的稳定性和抑制措施的研究将是未来研究的方向。其次,从烧鸡的制作流程上看,原料、油炸、煮制3个工序对杂环胺的影响研究较多,预处理、涂糖水2个工序研究较少,后期需要进一步深入探索。再者,仅有PhIP等少数几种杂环胺有较明确的形成途径和形成机理,后期需加强其他杂环胺形成机理的研究,便于更好地控制杂环胺的产生途径。最后,烧鸡中杂环胺含量的国家、行业、企业标准有待建立。因此,应继续加强烧鸡制作工艺研究,找到更好地抑制杂环胺含量的措施,并且建立一套合理的烧鸡制作标准,提高烧鸡的产品质量。

参考文献:

- [1] 张玉霞, 周亚军, 李圣尧. 熟肉制品中杂环胺的形成与抑制研究进展[J]. 肉类研究, 2019, 33(8): 65-73. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190507-099.
- [2] 申霄婵, 李晓, 张羽灵, 等. 常见香辛料对酱猪肉中杂环胺生成的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(13): 243-247. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.13.044.
- [3] CRUZ-HERNANDEZ A, AGIM Z S, MONTENEGRO C, et al. Selective dopaminergic neurotoxicity of three heterocyclic amine subclasses in primary rat midbrain neurons[J]. Neuro Toxicology, 2018, 65: 68-84. DOI:10.1016/j.neuro.2018.01.009.
- [4] AGIM Z S, CANNON R. Alterations in the nigrostriatal dopamine system after acute systemic PhIP exposure[J]. Toxicology Letters, 2018, 287: 31-41. DOI:10.1016/j.toxlet.2018.01.017.
- [5] 章天婵, 王路瑶. 肉制品中杂环胺形成因素及抑制方法研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 94-99. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200220-051.
- [6] SUN Li, ZHANG Feng, WEI Yong, et al. Potential sources of carcinogenic heterocyclic amines in Chinese mutton shashlik[J]. Food Chemistry, 2010, 123(3): 647-652. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.05.019.
- [7] LAN C M, KAO T H, CHEN B H. Effect of heating time and antioxidants on the formation of heterocyclic amines in marinated foods[J]. Journal of Chromatography B, 2004, 802(1): 27-37. DOI:10.1016/j.jchromb.2003.09.025.
- [8] 郭海涛, 王振宇, 潘晗, 等. 脂肪含量及原料肉形态对烤羊肉饼中杂环胺形成的影响[J]. 核农学报, 2014, 28(1): 91-96. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2014.01.0091.
- [9] 盖圣美, 张雪娇, 王南, 等. 3种熏烤鸡肉制品中杂环胺含量的检测与比较[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(23): 6182-6187.
- [10] OZ F, KABAN G, KAYA M. Effects of cooking methods and levels on formation of heterocyclic aromatic amines in chicken and fish with Oasis extraction method[J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(9): 1345-1350. DOI:10.1016/j.lwt.2010.04.014.
- [11] LIAO Guozhou, WANG G Y, ZHANG Y J, et al. Formation of heterocyclic amines during cooking of duck meat[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2012, 29(11): 1668-1678. DOI:10.1080/19440049.2012.702928.
- [12] 邵斌, 彭增起, 杨洪生, 等. 固相萃取-高效液相法同时测定传统禽肉制品中的9种杂环胺类化合物[J]. 色谱, 2011, 29(8): 755-761. DOI:10.3724/SP.J.1123.2011.00755.
- [13] 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. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.06.109.
- [14] BORG 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. DOI:10.1016/S0308-8146(00)00333-2.
- [15] 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.
- [16] 陈妍方. 微波场下咖啡酸对杂环胺PhIP形成的抑制机制[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 16-17.
- [17] JINAP S, IQBAL S Z, SELVAM M P. Effect of selected local spices marinades on the reduction of heterocyclic amines in grilled beef[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(2): 919-926.
- [18] SEPAHPOUR S, SELAMAT J, KHATIB A, et al. Inhibitory effect of mixture herbs/spices on formation of heterocyclic amines and mutagenic activity of grilled beef[J]. Food Additives and Contaminants: Part A, 2018, 35(10): 1911-1927. DOI:10.1080/19440049.2018.1488085.
- [19] 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, 2016, 53(3): 1411-1417. DOI:10.1007/s13197-015-2137-0.
- [20] 韩雪, 李可, 赵颖颖, 等. 肉制品加工中杂环胺的形成机制及检测控制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(10): 268-273. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201610043.
- [21] 李利洁. 微波加热中杂环胺PhIP的形成规律及抑制机制[D]. 无锡: 江南大学, 2018: 22-36.
- [22] HASKARACA G, DEMIROK E, KOLSARICI N, et al. Effect of green tea extract and microwave pre-cooking on the formation of heterocyclic aromatic amines in fried chicken meat products[J]. Food Research International, 2014, 63: 373-381. DOI:10.1016/j.foodres.2014.04.001.
- [23] HASNOL N D S, JINAP S, SANNY M. Effect of different types of sugars in a marinating formulation on the formation of heterocyclic amines in grilled chicken[J]. Food Chemistry, 2014, 145: 514-521. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.086.
- [24] 林雁飞, 何进, 操丽丽, 等. 高效毛细管电泳法测定蜂蜜中的多种糖[J]. 分析测试学报, 2005(4): 74-76; 79.
- [25] 童蕾, 王焰新, 赵中一, 等. 同步荧光光谱法测定蜂蜜中游离氨基酸[J]. 理化检验(化学分册), 2008(8): 757-759.
- [26] 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: 36-42.
- [27] 于迪, 于淑娟. 模型体系反应中杂环胺(PhIP)的形成及反应调控机理的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [28] LU F, KUHNLE G K, CHENG Q. Vegetable oil as fat replacer inhibits formation of heterocyclic amines and polycyclic aromatic hydrocarbons in reduced fat pork patties[J]. Food Control, 2017, 81: 113-125. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.05.043.
- [29] OZ F, CAKMAK I H. The effects of conjugated linoleic acid usage in meatball production on the formation of heterocyclic aromatic amines[J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 65: 1031-1037. DOI:10.1016/j.lwt.2015.09.040.
- [30] ZHANG Qing, WAN Chong, WANG Chenzhi, et al. Evaluation of the non-aldehyde volatile compounds formed during deep-fat frying process[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 151-161. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.09.121.
- [31] THIEBAUD H P, KNIZE M G, KUZMICKY P A, et al. Airborne mutagens produced by frying beef, pork and a soy-based food[J]. Food and Chemical Toxicology, 1995, 33(10): 821-828.
- [32] PERSSON E, SJOHOLM I, SKOG K. Heat and mass transfer in chicken breasts effect on PhIP formation[J]. European Food Research and Technology, 2002, 214(6): 455-459.
- [33] GIBIS M, KRUVINUS M, WEISS J. Impact of different panfrying conditions on the formation of heterocyclic aromatic amines and sensory quality in fried bacon[J]. Food Chemistry, 2015, 168(2): 383-389. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.07.074.
- [34] 江黎雯, 薛超轶, 何志勇, 等. 肉制品中3类有害物质的来源与控制方法研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 77-87. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200131-028.
- [35] YAO Yao, PENG Z Q, SHAO Bin, et al. Effects of frying and boiling on the formation of heterocyclic amines in braised chicken[J]. Poultry Science, 2013, 92(11): 3017-3025. DOI:10.3382/ps.2013-03216.



- [36] SOLYAKOV A, SKOG K. Screening for heterocyclic amines in chicken cooked in various ways[J]. Food and Chemical Toxicology, 2002, 40(8): 1205-1211. DOI:10.1016/S0278-6915(02)00054-6.
- [37] ZENG Maomao, WANG Junhui, ZHANG Mengru, et al. Inhibitory effects of Sichuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum*) and sanshoamide extract on heterocyclic amine formation in grilled ground beef patties[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 111-118. DOI:10.1016/j.foodchem.2017.06.097.
- [38] 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.
- [39] 李进. 香辛料抑制卤肉中 β -咔啉类杂环胺形成的物质基础及机理初步研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2019: 33-45.
- [40] 李雨竹, 汪永, 谢婷婷, 等. 生姜和辣椒及其活性组分对卤煮牛肉中杂环胺生成的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(6): 45-51. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200427-106.
- [41] MURKOVIC M, STEINBERGER D, PFANNHAUSER W. Antioxidant spices reduce the formation of heterocyclic amines in fried meat[J]. European Food Research and Technology, 1998, 207(6): 477-480. DOI:10.1007/s002170050364.
- [42] BALOGH Z, GRAY J I, GOMMA E A, et al. Formation and inhibition of heterocyclic aromatic amines in fried ground beef patties[J]. Food and Chemical Toxicology, 2000, 38(5): 395-401. DOI:10.1016/S0278-6915(00)00010-7.
- [43] GIBIS M. Effect of oil marinades with garlic, onion, and lemon juice on the formation of heterocyclic aromatic amines in fried beef patties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(25): 10240-10247.
- [44] ROUNDS L, HAVENS C, FEINSTEIN Y, et al. Plant extracts, spices, and essential oils inactivate *Escherichia coli* O157:H7 and reduce formation of potentially carcinogenic heterocyclic amines in cooked beef patties[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(14): 3792-3799. DOI:10.1021/jf204062p.
- [45] OZ F, KAYA M. The inhibitory effect of red pepper on heterocyclic aromatic amines in fried beef *Longissimus dorsi* muscle[J]. Journal of Food Process and Preservation, 2011, 35(6): 806-812. DOI:10.1111/j.1745-4549.2011.00532.x.
- [46] 吕美. 香辛料的抗氧化性及其对煎烤牛肉饼中杂环胺形成的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2011.
- [47] JOHANSSON M, JAGERSTAD M. Influence of pro-and antioxidants on the formation of mutagenic-carcinogenic heterocyclic amines in a model system[J]. Food Chemistry, 1996, 56(1): 69-75. DOI:10.1016/0308-8146(95)00160-3.
- [48] TAI C Y, LEE K H, CHEN B H. Effects of various additives on the formation of heterocyclic amines in fried fish fibre[J]. Food Chemistry, 2001, 75(3): 309-316. DOI:10.1016/S0308-8146(01)00200-X.
- [49] 梅竞博. 肉加工中杂环胺形成规律及控制技术的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2011: 10-26.
- [50] OGURI A, SUDA M, TOTSUKA Y, et al. Inhibitory effects of antioxidants on formation of heterocyclic amines[J]. Mutation Research-Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis, 1998, 402(1/2): 237-245. DOI:10.1016/S0027-5107(97)00303-5.
- [51] CHENG K W, WU Q, ZHENG Z P, et al. Inhibitory effect of fruit extracts on the formation of heterocyclic amines[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(25): 10359-10365. DOI:10.1021/jf071820z.
- [52] CHENG K W, CHEN F, WANG M. Inhibitory activities of dietary phenolic compounds on heterocyclic amine formation in both chemical model systems and beef patties[J]. Molecular Nutrition and Food Research, 2007, 51(8): 969-976. DOI:10.1002/mnfr.200700032.
- [53] 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 and Food Research, 2009, 53(6): 716-725. DOI:10.1002/mnfr.200800206.
- [54] 李可, 韩雪, 谢美娟, 等. HPLC法检测市售传统肉制品中的杂环胺含量[J]. 现代食品科技, 2017, 33(10): 294-301. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.10.041.
- [55] 白艳红, 韩雪, 李可, 等. 市售酱卤鸡腿老汤中杂环胺含量的检测与分析[J]. 轻工学报, 2017, 32(3): 8-13. DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.3.002.
- [56] 杨潇, 蔡克周, 卢进峰, 等. 烟熏液对卤煮牛肉中9种杂环胺含量的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 68-72. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201421014.
- [57] 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.
- [58] 郭海涛. 加工条件对羊肉制品中杂环胺含量的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013: 21-37.
- [59] 孟圆, 孟醒, 夏秀芳. 酱卤肉制品中杂环胺的生成及分离检测技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(8): 91-101. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200422-099.