

外源物质对杂环胺生成的影响研究进展

王童童, 王梓璇, 王 敏, 韩天龙*, 刘登勇*

(渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁省食品安全重点实验室, 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 锦州 121013)

摘 要: 杂环胺(heterocyclic amines, HCAs)是在高温长时间加工下形成的一种有害物质, 具有致癌性、致突变性、心肌毒性和神经毒性。在肉制品加工过程中, 杂环胺的有效抑制一直是一个被广泛关注的问题。本文重点介绍了近 3 年在肉制品加工过程中添加植物提取物、调味料、保水性物质、氨基酸、植物油及食品加工副产物等外源物质对杂环胺生成的影响, 并详细综述了这几种外源物质对肉制品中杂环胺生成的促进或抑制作用机制, 最后对杂环胺减控的未来前景进行展望, 为后续研究杂环胺的有效抑制提供参考。

关键词: 杂环胺; 抑制; 外源物质; 调味料

Research progress on the effects of exogenous substances on the formation of heterocyclic amines

WANG Tong-Tong, WANG Zi-Xuan, WANG Min, HAN Tian-Long*, LIU Deng-Yong*

(Bohai University College of Food Science and Engineering, Liaoning Province Food Safety Key Laboratory, National and Local Joint Engineering Research Center for Storage, Processing and Safety Control Technology of Fresh Agricultural Products, Jinzhou 121013, China)

ABSTRACT: Heterocyclic amines (HCAs) are harmful substances formed after long-term processing at high temperature, which are carcinogenic, mutagenic, cardiotoxic and neurotoxic. In the processing of meat products, the effective inhibition of heterocyclic amines has been a widespread concern. This paper introduced the effects of exogenous substances such as plant extracts, seasonings, water-retaining substances, amino acids, vegetable oils and by-products of food processing on the formation of heterocyclic amines in meat products in the last 3 years, and summarized in detail the mechanisms of promoting or inhibiting the formation of heterocyclic amines in meat products by these exogenous substances, finally, prospected the future prospect of heterocyclic amines reduction and control, which can provide reference for the follow-up study on the effective inhibition of heterocyclic amines.

KEY WORDS: heterocyclic amines; restrain; exogenous substances; seasoning

基金项目: 辽宁省重点实验室开放基金项目(LNKLFS202117)、渤海大学博士启动项目(0520BS046、0520BS047)

Fund: Supported by the Liaoning Province Food Safety Key Laboratory Open Foundation (LNKLFS202117), and the Bohai University Doctoral Program (0520BS046, 0520BS047)

***通信作者:** 韩天龙, 博士, 副教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。E-mail: hantian212@163.com

刘登勇, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。E-mail: jz_dyliu@126.com

***Corresponding author:** HAN Tian-Long, Ph.D, Associate Professor, Bohai University, No.19, Keji Road, New Songshan District, Jinzhou 121013, China. E-mail: hantian212@163.com

LIU Deng-Yong, Ph.D, Professor, Bohai University, No.19, Keji Road, New Songshan District, Jinzhou 121013, China.
E-mail: jz_dyliu@126.com

0 引言

在食品加工过程中,尤其是在高温长时间加工下,肉制品中会产生一类多环芳香族化合物,即杂环胺(heterocyclic amines, HCAs)。根据杂环胺的化学结构、极性以及肉制品加工温度的不同,可将杂环胺分为不同种类^[1]。经代谢活化后的杂环胺随血液到达结直肠^[2]、肝脏^[3]、肾脏、乳腺等部位,引起靶器官损伤或诱导相关代谢疾病^[2]。如 2-氨基-1-甲基-6 苯基咪唑-[4,5-b]吡啶(2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]-pyridine, PhIP)可破坏肠道菌群组成,影响甘油磷脂代谢和亚油酸代谢;还可抑制结肠中与类固醇激素生物合成、脂肪酸延伸、脂肪酸降解和甘油酯代谢通路相关基因集的表达,最终诱导结肠损伤^[4]。长期摄入含有高含量杂环胺的肉制品会增加多种癌症的患病风险^[5]。不同杂环胺引起的癌症不完全相同,同一种杂环胺也可以引起不同的癌症,如 PhIP 是结直肠癌和乳腺癌的致癌物^[6], 2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑-[4,5-f]喹啉

(2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline, DiMeIQx)和 2-氨基-3,8-二甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline, MeIQx)的摄入可增加结肠癌的发病率^[7]。

杂环胺还具有心肌毒性和神经毒性^[8]。杂环胺对心血管系统的损伤可能是通过 PhIP 和 2-氨基-3-甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3-methyl-imidazo[4,5-f]-quinoline, IQ)在心肌中形成高水平的 DNA 加合物途径实现^[9]。神经毒性可增加帕金森病、阿尔茨海默病等疾病的患病风险。有研究表明,PhIP 促进了 β -淀粉样蛋白的聚集^[10],而 β -淀粉样蛋白的积聚正是阿尔茨海默病的两种标志性病理之一^[11]。长期接触 IQ 会影响斑马鱼线粒体稳态、诱导氧化应激和炎症,从而增加罹患帕金森病的风险^[12]。

本文从外源物质的角度,综述了近几年植物提取物、调味料、保水性物质、氨基酸、植物油、食品加工副产物等对杂环胺的作用及机制(见图 1),为后续杂环胺的减控研究提供参考。

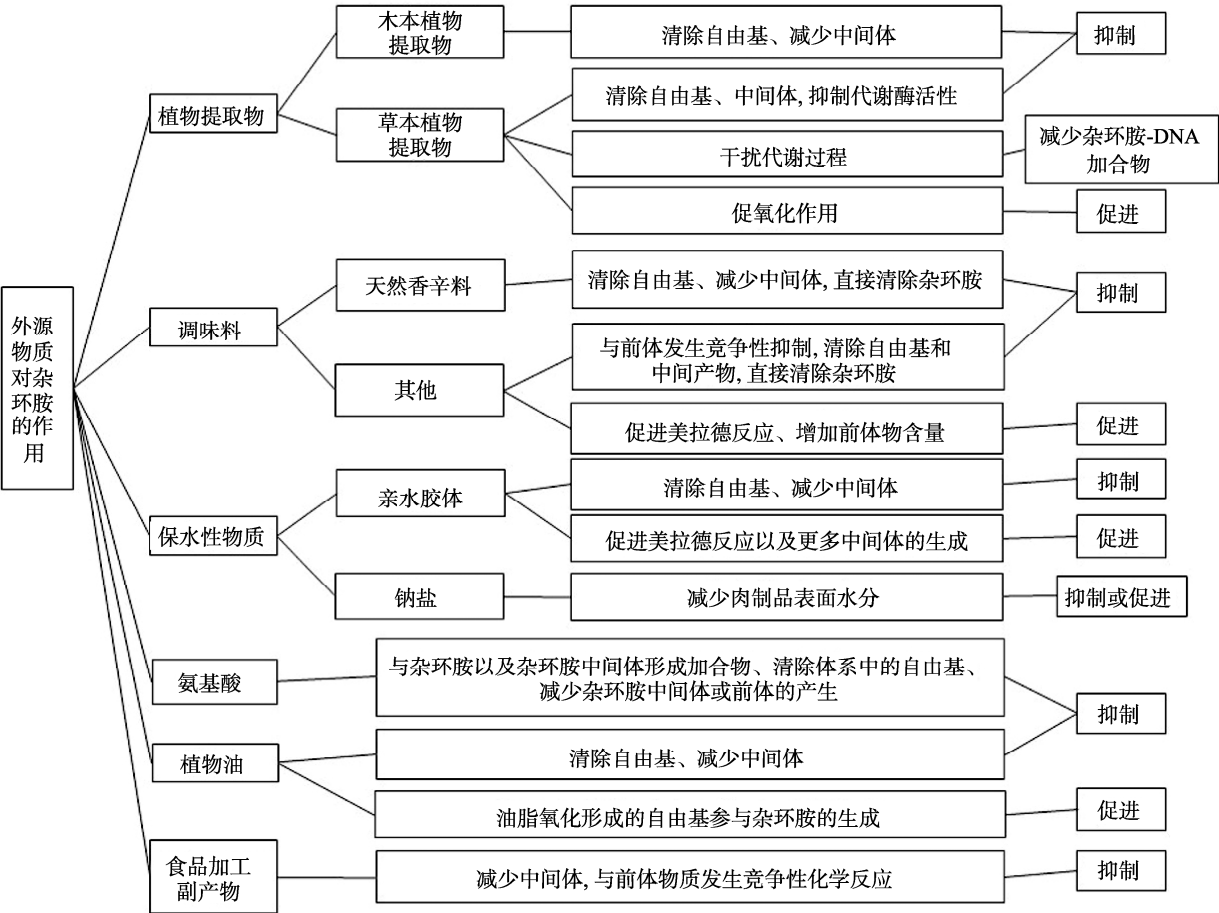


图 1 外源物质对杂环胺的作用

Fig.1 Effects of exogenous substances on heterocyclic amines

1 外源物质对杂环胺生成的作用

外源物质可以通过参与美拉德反应, 产生更多中间体; 促进氧化反应, 产生更多自由基, 增加最终杂环胺的生成量;

还可以通过抑制代谢酶活性和减少杂环胺-DNA 加合物生成等途径体内抑制杂环胺的生成, 通过清除中间体、与前体产生竞争性抑制以及直接清除最终生成的杂环胺等途径抑制肉制品加工过程中产生的杂环胺(具体见表 1)。

表 1 外源物质对杂环胺生成的作用机制
Table 1 Action mechanisms of exogenous substances on the formation of heterocyclic amines

外源物质	作用机制	抑制/促进	参考文献
植物提取物	山楂	抗氧化能力及含有较高含量的类黄酮	抑制 [13-14]
	鳄梨皮	降低了脂肪和蛋白质的氧化, 从而减少体系中的自由基, 抑制杂环胺的生成	抑制 [15]
	藤茶	二氢杨梅素和杨梅素均可通过捕获苯乙醛抑制 PhIP 的生成	抑制 [16]
	木瓜	与原花青素的自由基清除能力及聚合度有关	抑制 [17]
	菊科植物	具有良好的抗氧化和清除自由基活性作用	抑制 [18-19]
	韭菜	芒果苷可能通过直接清除其关键中间体苯乙醛来抑制 PhIP 的形成	抑制 [20]
	芹菜	抑制细胞色素 P4501A2 (cytochrome P4501A2, CYP1A2)酶减少杂环胺的生成; 增加大鼠体内的甲基化 PhIP 代谢来减少结肠中 PhIP-DNA 加合物的生成	抑制 [21-22]
	胡萝卜	抑制 CYP1A2 酶减少杂环胺的生成	抑制 [22]
	罗勒	酚类化合物的抗氧化作用可抑制杂环胺的生成, 而罗勒的促氧化作用会促进杂环胺的生成	抑制或促进 [23]
	辣椒、川椒、黑胡椒	酰胺类成分可以与苯乙醛发生反应, 减少杂环胺的中间产物	抑制 [24-25]
调味料	多香果	清除自由基活性	抑制 [26]
	干姜、姜黄粉、姜黄	清除羟基自由基, 抗氧化, 可降低羰基化合物含量, 去除苯乙醛、甲醛和乙醛等中间体的形成以及直接清除 β -咔啉杂环胺	抑制 [27-29]
	酱油	酱油中的还原糖与鸡皮中的氨基酸发生美拉德反应或酱油和鸡皮中的色氨酸降解最终导致杂环胺的增加	促进 [30]
	黄芥末	异硫氰酸烯丙酯可通过竞争性抑制苯丙氨酸与肌酐前体、清除自由基、阻断中间产物苯乙醛、与 PhIP 直接反应去除最终产物等途径抑制 PhIP 的生成	抑制 [31]
	海藻酸、羧甲基纤维素钠、魔芋葡甘聚糖、黄原胶	通过本身具有的氨基、羰基以及亲水性减少杂环胺前体或关键中间体	抑制 [32]
保水性物质	壳聚糖	与肌酐竞争, 与苯乙醛反应, 抑制 PhIP 的形成	抑制 [32-33]
	κ -卡拉胶	通过捕获肌酐、苯乙醛以及羟醛缩合产物来抑制 PhIP 的形成	抑制 [32,34]
	大豆分离蛋白	加热的大豆分离蛋白会提供杂环胺前体和羰基, 从而显著促进 Strecker 降解并产生更多中间体, 促进杂环胺的生成	促进 [35]
	氯化钠、三聚磷酸钠、焦磷酸钠	保水剂的加入降低了肉制品在加工过程中的蒸煮损失, 使迁移到肉制品表面的水分减少, 影响杂环胺前体物的浓度或促进肉制品表面形成较高的温度, 影响杂环胺的生成	抑制或促进 [36-37]
氨基酸	组氨酸	对苯乙醛的清除作用、清除烷基自由基以及对 β -咔啉类杂环胺生成的高度竞争性抑制能力	抑制 [38-40]
	亮氨酸、甲硫氨酸	可与牛肉饼中的糖类结合, 生成的美拉德反应产物可以清除参与杂环胺生成的自由基	抑制 [40]
	色氨酸、赖氨酸	与苯乙醛形成苯乙醛-氨基酸加合物	抑制 [41]
	脯氨酸	与 PhIP 形成 PhIP-脯氨酸加合物、清除自由基、通过竞争性抑制减少杂环胺的生成	抑制 [39-40,42]
植物油	葡萄籽油、葵花籽油、核桃油、椰子油、大米胚芽油	清除自由基	抑制 [43]
	大豆油、花生油、菜籽油	加热使油脂发生氧化反应, 油脂氧化过程中形成的自由基可参与杂环胺中间体的形成, 最终增加杂环胺的形成	促进 [43]
	南瓜籽油、玫瑰籽油	含有总酚类化合物, 具有抗氧化活性	抑制 [44]
	甘蔗糖蜜	通过自由基途径和美拉德反应途径抑制杂环胺的生成	抑制 [45]
其他	马铃薯皮粉	吸附苯乙醛; 与前体物发生竞争性化学反应, 阻止关键前体参与杂环胺形成	抑制 [46-48]

1.1 植物提取物

1.1.1 木本植物提取物

山楂提取物中含有较高含量的类黄酮,具有强抗氧化能力,在 150、200 以及 250 °C 下煎或烤牛肉和鸡胸肉时,添加 0.5% 和 1.0% 浓度的山楂提取物可以减少牛肉和鸡胸肉中 MeIQx、2-氨基-3-甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3-methyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline, IQx)、IQ、1-甲基-9H-吡啶 [3,4-b] 吡啶 (1-methyl-9H-pyrido[3,4-b] indole, Harman)、9H-吡啶 [3,4-b] 吡啶 (9H-pyrido[3,4-b] indole, Norharman) 和 3-氨基-1-甲基-5H-吡啶-[4,3-b] 吡啶 (3-amino-1-methyl-5H-pyrido[4,3-b] indole, Trp-P-2) 的形成,还可以减少牛肉中 2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3,4,8-trimethyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline, 4,8-DiMeIQx) 以及鸡胸肉中 2-氨基-3,7,8-三甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3,7,8-trimethyl-imidazo[4,5-f]-quinoxaline, 7,8-DiMeIQx) 和 2-氨基-9H-吡啶 [2,3-b] 吡啶 (2-amino-9H-pyrido[2,3-b] indole, AaC) 的形成^[13-14]。TRUJILLO-MAYOL 等^[15]发现鳄梨皮提取物可抑制牛肉汉堡和大豆汉堡中 PhIP、AaC 和 2-氨基-3-甲基-9H-吡啶-[2,3-b] 吡啶 (2-amino-3-methyl-9H-pyrid [2,3-b] indole, MeAaC) 的生成,这是由于加入富含酚类的鳄梨皮提取物显著降低了脂肪和蛋白质的氧化,从而减少体系中的自由基,抑制了杂环胺的生成。ZHOU 等^[16]发现藤茶中的二氢杨梅素可以有效地抑制炸牛肉饼中 PhIP、MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 的形成;其中,对 PhIP 的影响机制是通过捕获苯乙醛,从而抑制其生成。另外, WANG 等^[17]研究从木瓜中提取出不同聚合度的原花青素对油炸肉中杂环胺的抑制作用,结果表明,低聚原花青素(平均聚合度为 8.0)具有较强的自由基清除能力,可显著抑制 Harman、Norharman 和 PhIP 的形成,抑制率分别为 37.2%、65.7% 和 72.9%。总体而言,木本植物对杂环胺的抑制作用主要是由于其果实中含有丰富的酚类化合物,这些酚类化合物不仅可以通过其自身具有的强抗氧化性,清除体系自由基、减少杂环胺的生成,还可以通过抑制中间体的途径减少杂环胺。

1.1.2 草本植物提取物

KHAN 等^[18]研究杭白菊提取物对煎、油炸、烤箱烘烤和木炭烘烤羊肉饼中杂环胺的抑制作用,结果表明,杭白菊提取物中的酚类化合物可通过清除自由基途径抑制杂环胺的生成。苦苣菜提取物对猪肉饼中 IQ、Harman、Norharman 和 PhIP 的抑制是由于苦苣菜中的总酚具有良好的抗氧化能力^[19]。除菊科植物外,芹菜不仅可以通过抑制 CYP1A2 酶减少杂环胺的生成^[22],还可以通过增加大鼠体内的甲基化 PhIP 代谢来减少结肠中 PhIP-DNA 加合物的生成^[21]。胡萝卜可以通过抑制代谢酶如 CYP1A2 酶的活性减少杂环胺的生成^[22]。WANG 等^[20]发现韭菜提取物中的芒果苷可能通过直接清除关键中间体苯乙醛来抑制 PhIP 的形

成。因此,草本植物提取物可通过清除自由基、直接清除中间体和抑制代谢酶活性的方式减少杂环胺的生成;还可通过干扰代谢过程,减少最终杂环胺-DNA 加合物的生成。

需要注意的是,在加工过程中,加工方式、草本植物的种类及添加量的不同对杂环胺的作用也会产生差异。如 UZUN 等^[23]发现罗勒既可以促进牛肉丸中杂环胺的形成,也可以抑制牛肉丸中杂环胺的形成,这种作用主要取决于罗勒的使用量和蒸煮温度;其中,罗勒中酚类化合物的抗氧化作用可抑制杂环胺的生成,而罗勒的促氧化作用会促进杂环胺的生成。MERYEM 等^[49]发现黄、白、紫洋葱水提取物均会增加 2-氨基-3,4-二甲基咪唑-[4,5-f]喹啉(2-amino-3,4-dimethyl-imidazo[4,5-f]-quinoline, MeIQ) 的形成,且随着洋葱水提率的增加,总杂环胺的含量也增加;当添加 0.25% 和 0.50% 的白洋葱水提取物时,可抑制肉丸中 IQx 和 IQ 的形成,但关于洋葱水提取物对杂环胺的作用机制还需要进一步的研究。

1.2 调味料

1.2.1 天然香辛料

根据香辛料的呈味特征,可将天然香辛料分为浓香型天然香辛料(如姜黄粉),淡香型天然香辛料(如多香果)以及辛辣型天然香辛料(如辣椒、川椒、黑胡椒)3 种。不同种类天然香辛料对杂环胺的作用机制也不完全相同。

辣椒、川椒和黑胡椒中抑制杂环胺形成的主要物质分别为辣椒素、山椒酰胺和胡椒碱这 3 种酰胺类物质, XUE 等^[25]发现这 3 种酰胺成分可以显著抑制烤牛肉饼中与蛋白质结合的 MeIQ、4,8-DiMeIQx、Harman、Norharman 和 MeAaC 的形成以及游离态的 2-氨基-1,6-二甲基咪唑-[4,5-b] 吡啶 (2-amino-1,6-dimethylimidazo[4,5-b]-pyridine, DMIP)、MeIQx、4,8-DiMeIQx 和 Harman 的形成;这是由于这些酰胺类成分可以与苯乙醛发生反应,减少杂环胺的中间产物,进而减少杂环胺的生成。HSU 等^[30]发现红辣椒和黑胡椒均会增加鸡肉中总杂环胺的含量,但具体机制尚不明确。

多香果和紫苏籽提取物可通过清除自由基活性来抑制杂环胺的生成,且自由基清除活性越高,杂环胺的抑制作用越大^[26]。KILIC 等^[27]发现使用 0.5% 的姜黄粉可以减少鸡肉丸中 MeIQx、7,8-DiMeIQx 和 MeIQ 的浓度,这主要是由于姜黄粉中的主要物质姜黄素具有清除自由基、抗氧化的作用。WANG 等^[29]发现姜黄可减少红烧鸡肉中 Norharman 和 Harman 的形成,这与姜黄素可降低羰基化合物含量,去除苯乙醛、甲醛和乙醛等中间体的形成以及直接清除 β -咔啉类杂环胺有关。

1.2.2 其他调味料

JIANG 等^[31]发现黄芥末中的刺激性物质异硫氰酸烯丙酯可通过竞争性抑制苯丙氨酸与肌酐前体、清除自由基途径、阻断中间产物苯乙醛、与 PhIP 直接反应去除最终产

物等途径抑制 PhIP 的生成, 且竞争性抑制苯丙氨酸和清除自由基是抑制 PhIP 生成的主要途径。有研究表明, 酱油会促进烤鸡、炸鸡以及卤猪肉、牛肉、羊肉和鸡肉中总杂环胺的含量, 但具体机制仍需进一步研究^[50-52]。虽然酱油导致肉中杂环胺增加的机制还不明确, 但 HSU 等^[30]发现酱油中的还原糖可与鸡皮中的氨基酸发生美拉德反应, 或酱油和鸡皮中的色氨酸发生降解最终导致 Norharman、Harman、Trp-P-2、3-氨基-1,4-二甲基-5h-吡啶并(4,3-b)吲哚[3-amino-1,4-dimethyl-5H-pyridino (4,3-B) indole, Trp-p-1]的增加, 这为研究酱油对杂环胺的促进作用提供了方向。综上, 虽然目前已明确部分调味料可以直接与杂环胺前体、中间体或杂环胺本身作用, 影响最终的生成, 但仍存在部分机制不明确的问题。

1.3 保水性物质

1.3.1 亲水胶体

亲水胶体可通过干扰杂环胺前体和关键中间体的方式抑制杂环胺的生成^[53]。ZHANG 等^[32]研究海藻酸、羧甲基纤维素钠、壳聚糖、卡拉胶、魔芋葡甘聚糖和黄原胶 6 种亲水胶体对烤牛肉饼中杂环胺的作用, 结果表明, 这 6 种胶体以粉末形式加入时, 在低剂量(5 和 10 mg)下可有效抑制 PhIP, 高剂量(30 mg)下可有效抑制 MeIQx; 以溶液形式加入时, 用 8%羧甲基纤维素钠溶液腌制的牛肉效果最好, 对 PhIP、MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 的抑制率在 70%~90%之间。壳聚糖可与肌酐竞争, 与苯乙醛反应, 抑制 PhIP 的形成^[33]。 κ -卡拉胶通过捕获肌酐、苯乙醛以及羟醛缩合产物来抑制 PhIP 的形成, 减少油炸牛肉饼中杂环胺的含量^[34]。

在研究水胶体对杂环胺的作用时, 水胶体添加量的变化会对杂环胺的生成产生不同结果。添加低浓度的大豆分离蛋白(2.5%、5.0%和 7.5%)可在加热过程中产生更多的杂环胺前体和羰基, 从而显著促进 Strecker 降解并产生更多的杂环胺中间体, 最终增加杂环胺的含量; 而添加高浓度的大豆分离蛋白(10.0%)则可抑制 MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 的形成^[35]。在 170、190 和 210 °C 下烹饪时, XI 等^[54]研究以大豆分离蛋白为原料的 3 种植物基肉类替代品中杂环胺的变化时, 也得出了相同的结论。

1.3.2 钠盐

PERSSON 等^[36]发现氯化钠和三聚磷酸钠可使迁移到牛肉饼表面的水分减少, 从而降低肌酸和肌酸酐的浓度, 最终减少牛肉饼中 PhIP、MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 的生成。但 LI 等^[37]发现三聚磷酸钠和氯化钠组合或焦磷酸钠和氯化钠的组合使牛肉饼表面水分减少, 温度升高, 最终促进了 PhIP、MeIQx、Harman 和 Norharman 的生成。由此, 在肉制品加工过程中, 钠盐的加入是以减少肉制品表面水分的方式促进或抑制最终杂环胺的生成。

1.4 氨基酸

部分氨基酸可以与杂环胺形成加合物, 减少杂环胺

的生成; 也可以清除体系中的自由基以及与杂环胺中间体形成加合物, 阻断杂环胺的生成; 还可以减少杂环胺中间体或前体的产生, 抑制 β -吡啶类和氨基咪唑氮杂芳烃类杂环胺的生成。

CHEN 等^[42]发现脯氨酸可与 PhIP 形成 PhIP-脯氨酸加合物, 从而减少 PhIP 的形成; 而且, 随着脯氨酸添加量的增加, 肌酸和肌酐呈剂量依赖性下降, 这有利于 PhIP 的减少。对于氨基咪唑氮杂芳烃类杂环胺, 组氨酸可通过对苯乙醛的清除作用来抑制 PhIP 的形成^[38]。色氨酸和赖氨酸可与苯乙醛形成苯乙醛-氨基酸加合物, 减少最终生成的 PhIP^[41]。对于氨基咪唑类杂环胺, 组氨酸、亮氨酸、脯氨酸和甲硫氨酸对烘烤牛肉饼中的 β -吡啶类杂环胺存在较好的抑制作用; 这主要是由于这几种氨基酸可与牛肉饼中的糖类结合, 生成的美拉德反应产物可以清除参与杂环胺生成的自由基, 进而抑制杂环胺的生成^[40]。在烤牛肉饼和葡萄糖/肌酸/肌酸酐/色氨酸模型系统中, 组氨酸具有优异的烷基自由基清除能力和对 β -吡啶类杂环胺生成的高度竞争性抑制能力, 脯氨酸可通过竞争性抑制来减少 β -吡啶类杂环胺的生成; 亮氨酸和蛋氨酸的响应能力却不太显著^[39]。因此, 在肉制品中添加组氨酸、脯氨酸、亮氨酸、甲硫氨酸、蛋氨酸、色氨酸和赖氨酸有利于杂环胺的减少。

1.5 植物油

植物油对杂环胺的作用具有两重性, 一方面是因为植物油中含有的抗氧化剂可减少杂环胺的生成^[55]; 另一方面是由于在加热过程中, 油脂发生氧化形成的自由基参与杂环胺的生成, 最终增加杂环胺的含量^[50]。

南瓜籽油和玫瑰籽油含有丰富的总酚化合物, 在肉丸中添加 1%和 2%的南瓜籽油、玫瑰籽油可分别抑制 19.95%~83.14%和 22.21%~77.23%的总杂环胺; 且总杂环胺的生成量随着这两种油添加量的增加而减少^[44]。LI 等^[43]发现 1.25%的香榧籽油和葵花籽油分别降低了烤牛肉饼中 41%和 51%的总杂环胺; 1.25%的大豆油、3.75%的橄榄油和菜籽油分别促进了烤牛肉饼中 161%、98%和 100%的总杂环胺; 2.5%的大米胚芽油对总杂环胺的抑制作用为 19%, 但 1.25%的大米胚芽油却增加了 48%的总杂环胺; 1.25%~3.75%的核桃油和花生油可分别增加 12%~26%和 28%~38%的总杂环胺。由此, 在烹饪过程中可通过控制植物油的种类及用量来减少杂环胺的生成。

1.6 其他

将某些食品加工过程中产生的副产物添加到肉制品中, 既可以增加这些副产物的利用率, 又可以抑制肉制品中杂环胺的生成。如 CHENG 等^[45]发现甘蔗糖蜜提取物富含酚类化合物, 可通过自由基和美拉德反应途径抑制油炸鸡翅中杂环胺的合成。马铃薯淀粉含有的绿原酸、咖啡酸等黄酮类化合物以及酚酸有助于减少牛肉饼中杂环胺的形

成^[47]。其中,咖啡酸中的 4-乙烯基儿茶酚可吸附苯乙醛,抑制 PhIP 的形成^[48]。绿原酸能够与杂环胺的前体如葡萄糖、果糖、异亮氨酸、赖氨酸和缬氨酸发生竞争性化学反应,阻止这些关键前体参与杂环胺的形成,导致杂环胺的生成受到显著抑制^[46]。

另外,添加 0.0375%的虾青素对烤猪肉中 Norharman、Harman、PhIP 和 MeIQ 的抑制作用最好;添加量超过 0.0375%时,则抑制率下降;虾青素对杂环胺的抑制作用可能是由于其抗氧化、抗脂质过氧化作用,但虾青素影响杂环胺形成的具体机制仍需进一步研究^[56]。

1.7 混合物

玫瑰茄提取物具有很强的清除自由基能力^[57]。马铃薯皮具有较高的抗氧化能力,但对肉制品风味有一定影响^[58]。脂肪在烹饪过程中的氧化会产生与杂环胺形成有关的自由基^[50]。PÉREZ-BÁEZ 等^[47]在牛肉饼中添加了 0.63%的玫瑰茄提取物、0.99%的马铃薯皮粉和 11.96%的牛肉脂肪时,发现牛肉饼的风味、质地和多汁度的得分分别为 7.3、7.5 和 7.5 分,IQx 含量为 0 ng/g、IQ 含量为 2.49 ng/g、MeIQx 含量为 0.64 ng/g、MeIQ 含量为 0.13 ng/g、4,8-DiMeIQx 含量为 1.15 ng/g、PhIP 含量为 1.87 ng/g,获得了杂环胺含量低且不影响感官性能的牛肉饼。ZHANG 等^[59]研究添加不同质量比例的蔗糖与绿茶对熏制鸡腿中杂环胺的影响,结果表明,与蔗糖和绿茶的比例为 39.0:1.0、38.5:1.5 和 40.0:0.0 相比,当蔗糖与绿茶的比例为 39.5:0.5 时,可得到感官特征较好且总杂环胺的含量较低的熏制鸡腿。因此,将多种外源物质相互组合是获得感官评价高且杂环胺含量低的肉制品的一种方式。

2 结束语

本文综述了植物提取物、调味料、保水性物质、氨基酸、植物油以及食品加工副产物等外源物质对杂环胺的促进、抑制作用。目前,这几种外源物质对杂环胺的抑制作用主要是通过强抗氧化性、清除自由基活性、清除中间体、抑制代谢酶活性、直接清除杂环胺、与前体产生竞争性抑制以及减少杂环胺-DNA 加合物的生成等途径;对杂环胺的促进作用则是通过增加中间体和自由基的产生。

未来,在外源物质对杂环胺的减控研究中,对于已明确对杂环胺有抑制或促进作用的物质,应在体外研究的基础上,进一步研究这些物质对体内相应的酶、细胞、器官的影响,对杂环胺的生成影响机制进行更加深入、全面的研究。反之,则应在明确对杂环胺作用的基础上,对其相应的机制进行研究。

参考文献

- [1] 温荣欣,陈倩,秦泽宇,等.煎炸肉制品中杂环胺的控制技术及体内代谢调控研究进展[J].食品工业科技,2019,40(1):292-298.

- WEN RX, CHEN Q, QIN ZY, *et al.* Research progress of control technology of heterocyclic amines in fried meat products and its metabolic control in human [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(1): 292-298.
- [2] ZHAO XL, SHAO ZP, ZHOU XF, *et al.* Sub-chronic exposure to PhIP induces oxidative damage and DNA damage, and disrupts the amino acid metabolism in the colons of wistar rats [J]. *Food Chem Toxicol*, 2021, 153: 112249.
- [3] LI D, LI Z, QIU CY, *et al.* 2-Amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline induced oxidative stress and inflammation via TLR4/MAPK and TLR4/NF- κ B signaling pathway in Zebrafish (*Danio rerio*) livers [J]. *Food Chem Toxicol*, 2021, 157: 112583.
- [4] ZHAO XL, LIU HC, ZHOU XF, *et al.* 2 amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine induced colon injury by disrupting the intestinal bacterial composition and lipid metabolic pathways in rats [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(1): 437-446.
- [5] 钟宇,吴金涛,黄俊源,等.天然抗氧化物质对肉制品中杂环胺生成的影响[J].食品安全质量检测学报,2020,11(19):6804-6813.
ZHONG Y, WU JT, HUANG JY, *et al.* Effect of natural antioxidants on the formation of heterocyclic aromatic amines in meat products [J]. *J Food Saf Qual*, 2020, 11(19): 6804-6813.
- [6] YANG X, PENG HX, LUO ZY, *et al.* The dietary carcinogen PhIP activates p53-dependent DNA damage response in the colon of CYP1A-humanized mice [J]. *Biofactors*, 2021, 47(4): 612-626.
- [7] 郑蒙,林雪,谢华兵,等.杂环胺摄入与结直肠癌关系的剂量-反应 meta 分析[J].胃肠病学,2020,25(6):348-357.
ZHENG M, LIN X, XIE HB, *et al.* Association between heterocyclic amines intake and colorectal cancer: A dose-response meta-analysis [J]. *Chin J Gastroenterol*, 2020, 25(6): 348-357.
- [8] 阿丽雅,温荣欣,刘馨屿,等.肉制品中杂环胺的形成机制及植物提取物对其抑制作用的研究进展[J].肉类研究,2021,35(5):70-77.
A LY, WEN RX, LIU XY, *et al.* Formation mechanism of heterocyclic amines in meat products and inhibition by plant extracts: A review [J]. *Meat Res*, 2021, 35(5): 70-77.
- [9] 田俊,平学仁.食品中致癌物质杂环胺分析[J].新疆职业大学学报,2011,19(5):76-78.
TIAN J, PING XR. Analysis of heterocyclic amines as carcinogen in food [J]. *J Xinjiang Vocat Univ*, 2011, 19(5): 76-78.
- [10] SYEDA T, FOGUTH RM, LLEWELLYN E, *et al.* PhIP exposure in rodents produces neuropathology potentially relevant to Alzheimer's disease [J]. *Toxicology*, 2020, 437: 152436.
- [11] AGIM ZS, CANNON JR. Alterations in the nigrostriatal dopamine system after acute systemic PhIP exposure [J]. *Toxicol Lett*, 2018, 287: 31-41.
- [12] LI Z, CAO PP, MENG HL, *et al.* Long-term exposure to 2-amino-3-methylimidazo[4,5-f]quinoline can trigger a potential risk of Parkinson's disease [J]. *J Hazad Mater*, 2021, 412: 125230.
- [13] TENGILIMOGLU-METIN MM, HAMZALIOGLU A, GOKMEN V, *et al.* Inhibitory effect of hawthorn extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat [J]. *Food Res Int*, 2017, 99: 586-595.
- [14] YE LH, YANG J, LIU FM, *et al.* Ultrahigh-performance liquid chromatography coupled with ion mobility quadrupole time-of-flight mass spectrometry for separation and identification of hawthorn fruits by multivariate analysis [J]. *Microchem J*, 2021, 171: 106832.

- [15] TRUJILLO-MAYOL I, SOBRAL MMC, VIEGAS O, *et al.* Incorporation of avocado peel extract to reduce cooking-induced hazards in beef and soy burgers: A clean label ingredient [J]. *Food Res Int*, 2021, 147: 110434.
- [16] ZHOU B, ZHAO YL, WANG XC, *et al.* Unravelling the inhibitory effect of dihydromyricetin on heterocyclic aromatic amines formation [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 98(5): 1988–1994.
- [17] WANG ST, ZHUO WL, DAN YQ, *et al.* Inhibitory effects of Chinese quince fruit proanthocyanidins with different polymerisation degrees on the formation of heterocyclic aromatic amines in chemical model systems [J]. *Int J Food Sci Technol*, 2022, 57(1): 330–341.
- [18] KHAN IA, LIU DM, YAO MJ, *et al.* Inhibitory effect of chrysanthemum morifolium flower extract on the formation of heterocyclic amines in goat meat patties cooked by various cooking methods and temperatures [J]. *Meat Sci*, 2019, 147: 70–81.
- [19] TENG H, CHEN Y, LIN XJ, *et al.* Inhibitory effect of the extract from *Sonchus oleraleu* on the formation of carcinogenic heterocyclic aromatic amines during the pork cooking [J]. *Food Chem Toxicol*, 2019, 129: 138–143.
- [20] WANG Q, CHENG WW, ZHANG YF, *et al.* A novel potent inhibitor of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) formation from Chinese chive: Identification, inhibitory effect and action mechanism [J]. *Food Chem*, 2021, 345: 128753.
- [21] KIM JK, GALLAHER DD, TRUDO SP. Apiaceous vegetable intake modulates expression of DNA damage response genes and microRNA in the rat colon [J]. *J Funct Foods*, 2018, 45: 138–145.
- [22] PETERSON S, LAMPE JW, BAMMLER TK, *et al.* Apiaceous vegetable constituents inhibit human cytochrome P-450 1A2 (hCYP1A2) activity and hCYP1A2-mediated mutagenicity of aflatoxin B₁ [J]. *Food Chem Toxicol*, 2006, 44(9): 1474–1484.
- [23] UZUN I, OZ F. Effect of basil use in meatball production on heterocyclic aromatic amine formation [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 58: 3001–3009.
- [24] CHEN J, HE ZY, QIN F, *et al.* Inhibitory profiles of spices against free and protein-bound heterocyclic amines of roast beef patties as revealed by ultra-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and principal component analysis [J]. *Food Funct*, 2017, 8(11): 3938–3950.
- [25] XUE CY, HE ZY, QIN F, *et al.* Effects of amides from pungent spices on the free and protein-bound heterocyclic amine profiles of roast beef patties by UPLC-MS/MS and multivariate statistical analysis [J]. *Food Res Int*, 2020, 135: 109299.
- [26] KHAN IA, LUO J, SHI HB, *et al.* Mitigation of heterocyclic amines by phenolic compounds in allspice and *Perilla frutescens* seed extract: The correlation between antioxidant capacities and mitigating activities [J]. *Food Chem*, 2022, 368: 130845.
- [27] KILIC S, OZ E, OZ F. Effect of turmeric on the reduction of heterocyclic aromatic amines and quality of chicken meatballs [J]. *Food Control*, 2021, 128: 108189.
- [28] 李进, 李凯凯, 高悦, 等. 固相萃取-高效液相色谱法分析香辛料对酱卤肉中 β -咔啉类杂环胺形成的影响[J]. *现代食品科技*, 2019, 35(3): 234–240.
- LI J, LI KK, GAO Y, *et al.* Effect of spices on the formation of β -carboline heterocyclic aromatic amines in sauce braised meat by solid phase extraction-high performance liquid chromatography [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2019, 35(3): 234–240.
- [29] WANG Q, LI J, LI KK, *et al.* Effects of turmeric on reducing heterocyclic aromatic amines in Chinese tradition braised meat products and the underlying mechanism [J]. *Food Sci Nutr*, 2021, 9(10): 5575–5582.
- [30] HSU KY, CHEN BH. Analysis and reduction of heterocyclic amines and cholesterol oxidation products in chicken by controlling flavorings and roasting condition [J]. *Food Res Int*, 2020, 131: 109004.
- [31] JIANG LW, LI Y, XUE CY, *et al.* The inhibitory effects of yellow mustard (*Brassica juncea*) and its characteristic pungent ingredient allyl isothiocyanate (AITC) on PhIP formation: Focused on the inhibitory pathways of AITC [J]. *Food Chem*, 2022, 373: 131398.
- [32] ZHANG NN, ZHAO YL, FAN DM, *et al.* Inhibitory effects of some hydrocolloids on the formation of heterocyclic amines in roast beef [J]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 108: 106073.
- [33] ZHAO YL, YANG HM, ZHANG NN, *et al.* Effects of the deacetylation degree of chitosan on 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) formation in chemical models and beef patties [J]. *J Agric Food Chem*, 2021, 69(46): 13933–13941.
- [34] YANG HM, JI ZW, WANG R, *et al.* Inhibitory effect of selected hydrocolloids on 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) formation in chemical models and beef patties [J]. *J Hazard Mater*, 2021, 402: 123486.
- [35] YAN Y, ZHOU YQ, HUANG JJ, *et al.* Influence of soybean isolate on the formation of heterocyclic aromatic amines in roasted pork and its possible mechanism [J]. *Food Chem*, 2022, 369: 130978.
- [36] PERSSON E, SJÖHOLM I, SKOG K. Effect of high water-holding capacity on the formation of heterocyclic amines in fried beefburgers [J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(15): 4472–4477.
- [37] LI Y, HE JL, QUAN W, *et al.* Effects of polyphosphates and sodium chloride on heterocyclic amines in roasted beef patties as revealed by UPLC-MS/MS [J]. *Food Chem*, 2020, 326(C): 127016.
- [38] ZADEH RG, YAYLAYAN V. Interaction pattern of histidine, carnosine and histamine with methylglyoxal and other carbonyl compounds [J]. *Food Chem*, 2021, 358: 129884.
- [39] XUE CY, CHEN QC, HE ZY, *et al.* Non-precursors amino acids can inhibit β -carbolines through free radical scavenging pathways and competitive inhibition in roast beef patties and model food systems [J]. *Meat Sci*, 2020, 169: 108203.
- [40] 薛超轶, 梁玉桑, 吴家丽, 等. 氨基酸对烘烤牛肉饼中杂环胺的抑制作用[J]. *中国食品学报*, 2021, 21(5): 203–211.
- XUE CY, LIANG YS, WU JL, *et al.* Inhibitory effect of amino acids on heterocyclic amines in roast beef patties [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2021, 21(5): 203–211.
- [41] LINGHU ZY, KARIM F, SMITH JS. Amino acids inhibitory effects and mechanism on 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) formation in the Maillard reaction model systems [J]. *J Food Sci*, 2017, 82(12): 3037–3045.
- [42] CHEN QC, XUE CY, CHEN J, *et al.* Simultaneous determination of the PhIP-proline adduct and related precursors by UPLC-MS/MS for confirmation of direct elimination of PhIP by proline [J]. *Food Chem*, 2021, 365: 130484.
- [43] LI Y, QUAN W, WANG JH, *et al.* Effects of ten vegetable oils on heterocyclic amine profiles in roasted beef patties using UPLC-MS/MS combined with principal component analysis [J]. *Food Chem*, 2021, 347:

- 128996.
- [44] ERDOĞAN B, ÖZDESTAN-OCAK Ö. Determination the effects of pumpkin and rosehip seed oils on heterocyclic aromatic amine formation in meatballs by high-performance liquid chromatography [J]. J Food Process Pres, 2022, 46(2): e16299.
- [45] CHENG YQ, YU YJ, WANG C, *et al.* Inhibitory effect of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) molasses extract on the formation of heterocyclic amines in deep-fried chicken wings [J]. Food Control, 2021, 119: 107490.
- [46] DING XQ, ZHANG DQ, LIU H, *et al.* Chlorogenic acid and epicatechin: An efficient inhibitor of heterocyclic amines in charcoal roasted lamb meats [J]. Food Chem, 2022, 368: 130865.
- [47] PÉREZ-BÁEZ AJ, VALENZUELA-MELENDRÉS M, CAMOU JP, *et al.* Modelling the effects of roselle extract, potato peel flour, and beef fat on the sensory properties and heterocyclic amines formation of beef patties studied by using response surface methodology [J]. Foods, 2021, 10: 1184.
- [48] ZHANG NN, CHEN YF, ZHAO YL, *et al.* Caffeic acid assists microwave heating to inhibit the formation of mutagenic and carcinogenic PhIP [J]. Food Chem, 2020, 317: 126447.
- [49] MERYEM N, OZ F. The effect of using different types and rates of onion-water extract in meatball production on the formation of heterocyclic aromatic amines [J]. J Sci Food Agric, 2019, 99(7): 3538–3547.
- [50] HSU KY, CHEN BH. A comparative study on the formation of heterocyclic amines and cholesterol oxidation products in fried chicken fiber processed under different traditional conditions [J]. LWT-Food Sci Technol, 2020, 126: 109300.
- [51] SHAN SA, SELAMAT J, AKANDA MJH, *et al.* Effects of different types of soy sauce on the formation of heterocyclic amines in roasted chicken [J]. Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess, 2018, 35(5): 870–881.
- [52] WANG P, HONG Y, KE W, *et al.* Formation of heterocyclic amines in Chinese marinated meat: Effects of animal species and ingredients (rock candy, soy sauce and rice wine) [J]. J Sci Food Agric, 2017, 97(12): 3967–3978.
- [53] YU D, YU SJ. Effects of waxy rice starch and short chain amylose (SCA) on the formation of 2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-b]pyridine (PhIP) in a model system [J]. Food Funct, 2016, 7(3): 1339–1344.
- [54] XI J, CHEN Y. Analysis of the relationship between heterocyclic amines and the oxidation and thermal decomposition of protein using the dry heated soy protein isolate system [J]. LWT-Food Sci Technol, 2021, 148: 111738.
- [55] LU F, KUHNLE GK, 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.
- [56] YAN XT, ZHANG Y, YANG ML, *et al.* An accurate, rapid, and sensitive method for simultaneous determination of four typical heterocyclic amines in roasted pork patties: Application in the study of inhibitory effects of astaxanthin [J]. J Sep Sci, 2021, 44(9): 1833–1842.
- [57] ABIDOYE AO, OJEDOKUM FO, FASOGBON BM, *et al.* Effects of sweet basil leaves (*Ocimum basilicum* L.) addition on the chemical, antioxidant, and storage stability of roselle calyces (*Hibiscus sabdariffa*) drink [J]. Food Chem, 2022, 371: 131170.
- [58] ALBISHI T, JOHN JYA, AL-KHALIFA AAS, *et al.* Phenolic content and antioxidant activities of selected potato varieties and their processing by-products [J]. J Funct Foods, 2013, 5: 590–600.
- [59] ZHANG L, WANG Q, WANG Z, *et al.* Influence of different ratios of sucrose and green tea leaves on heterocyclic aromatic amine formation and quality characteristics of smoked chicken drumsticks [J]. Food Control, 2022, 133: 108613.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

作者简介



王童童, 硕士研究生, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制。
E-mail: wtt17861902153@163.com



韩天龙, 博士, 副教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。
E-mail: hantian212@163.com



刘登勇, 博士, 教授, 主要研究方向为肉品加工与质量安全控制、食品风味与感知科学。
E-mail: jz_dyliu@126.com