DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2023.05.002

生姜对烘烤猪肉饼品质及杂环胺形成的影响

王可心[1],王华丽[2],单艳琴[3],许女[4],李静[1*],王浩[1*]
(1.天津科技大学 食品科学与工程学院,天津 300457;2.国家食品安全风险评估中心,北京 100024;3.江苏兴野食品有限公司,江苏 兴化 225700;4.山西农业大学 食品科学与工程学院,山西 晋中 030800)

摘 要:选取猪肉与生姜为研究对象,探究不同生姜浓度(0.5%、1.0%、1.5%)对烘烤猪肉饼品质及杂环胺(heterocyclic aromatic amines,HAAs)生成的影响。结果表明,生姜能够降低猪肉饼的质量损失率并且改善色泽。生姜对8种HAAs(MeIQ、MeIQx、4,8-DiMeIQx、PhIP、IQx、IQ、AαC、Trp-P-2)均具有很好的抑制效果。浓度为1.5%的生姜对烘烤猪肉饼的总HAAs含量抑制率为55.45%。随着生姜浓度的增加,对游离氨基酸的消耗减少。因此生姜对烘烤猪肉饼中的HAAs有很好的抑制活性。

关键词:烘烤猪肉饼;杂环胺(HAAs);生姜;抑制;游离氨基酸

Effects of Ginger on the Quality of Roasted Pork Patties and the Formation of Heterocyclic Aromatic Amines

WANG Ke-xin[1], WANG Hua-li[2], SHAN Yan-qin[3], XU Nü[4], LI Jing[1*], WANG Hao[1*]
(1. College of Food Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China; 2. China National Center for Food Safety Risk Assessment, Beijing 100024, China; 3. Jiangsu Xingye Food Co., Ltd., Xinghua 225700, Jiangsu, China; 4. College of Food Science and Engineering, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030800, Shanxi, China)

Abstract: The effects of ginger at different concentrations (0.5%, 1.0% and 1.5%) on the quality of roasted pork patties and production of heterocyclic aromatic amines (HAAs) in roasted pork patties were explored with pork and ginger as research objects. It was found that ginger could reduce the weight loss rate of pork patties and improve the color. Additionally, ginger showed a good inhibitory effect on eight HAAs (MeIQ, MeIQx, 4,8-DiMeIQx, PhIP, IQx, IQ, AαC and Trp-P-2). The inhibitory rate of the total content of HAAs of the roasted pork patties was 55.45% with the addition of 1.5% ginger. With the increase in ginger addition, the consumption of free amino acids decreased. So ginger had good inhibitory activity against HAAs in roasted pork patties.

Key words: roasted pork patties; heterocyclic aromatic amines (HAAs); ginger; inhibition; free amino acids

引文格式:
王可心,王华丽,单艳琴,等.生姜对烘烤猪肉饼品质及杂环胺形成的影响[J].食品研究与开发,2023,44(5):9-14.
WANG Kexin, WANG Huali, SHAN Yanqin, et al. Effects of Ginger on the Quality of Roasted Pork Patties and the Formation of Heterocyclic Aromatic Amines[J]. Food Research and Development, 2023, 44(5): 9-14.

烘烤是日常生活中常见的猪肉烹饪方式之一,其制作工艺简单、烹饪时间短并且设备成本低,在家庭和商业生产中均广泛使用。猪肉经过烘烤后会拥有独特的色泽和风味,但长时间处于高温加热环境中,肉饼的肌肉组织会发生一系列的物理化学变化,并且同时生成一类致癌的有机化合物——杂环胺(hetero-

基金项目:国家自然科学基金项目(32001818);泰州市"双创计划"企业创新人才类项目
作者简介:王可心(1997—),女(汉),硕士,研究方向:食品营养学。
*通信作者:李静(1975—),女(汉),副研究员,博士,研究方向:食品营养学;王浩(1979—),男(汉),教授,博士,研究方向:食品营养学。

cyclic aromatic amines，HAAs）。目前，已经分离和发现了 30 多种杂环胺。因其化学结构不同，杂环胺可分为两大类：氨基咪唑氮杂环芳烃和氨基咔啉[1]。氨基咪唑氮杂环芳烃由肌酸、葡萄糖和氨基酸的美拉德反应形成，称为极性杂环胺。氨基咔啉通常由氨基酸在 300 ℃下热降解形成，称为非极性杂环胺。大量摄入 HAAs 会增加各类癌症的患病风险[2]。因此，抑制肉制品加工中 HAAs 的形成受到了广泛关注。

目前，香辛料作为天然抗氧化剂添加至烘烤肉制品中是抑制 HAAs 生成的途径之一。研究表明，抗氧化剂抑制 HAAs 的形成，这归因于它们在反应过程中具有清除自由基的能力。与近年来广泛研究的合成抗氧化剂相比，富含多酚的香辛料具有较低的毒性[3]。因此，香辛料是替代合成抗氧化剂以控制 HAAs 产生的理想选择。Ahn 等[4]将松树皮、迷迭香和葡萄籽提取物加入牛肉中，200 ℃下烹调 20 min，与对照组相比，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）的含量分别降低了 77%、75% 和 69%。Zeng 等[5]研究发现添加 0.5%胡椒粉可使肉饼中的 2-氨基-1-甲基-6-苯基咪唑[4,5-*f*]吡啶（2-amino-1-methyl-6-phenylimidazo[4,5-*f*]pyridine，PhIP）、2-氨基-3,4-二甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉（2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline，IQx）、2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline，4,8-DiMel-Qx）和 MeIQx 的生成率分别明显降低82%、61%、28% 和 79%。

生姜是一种常见的香辛料，其应用范围广泛，能够为加工肉制品增添风味。段斌等[6]发现浓度为 0.8 mg/mL 的生姜精油，其 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼（1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl，DPPH）自由基和 2,2′-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2，2′-azino-bis（3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid），ABTS]阳离子自由基的清除率均在 80%以上，有良好的抗氧化效果。此外，生姜富含酚类化合物，例如姜酚、姜黄素等[7]。有研究发现鸡用姜酚处理后血液中丙二醛（malondialdehyde，MDA）含量明显降低，还原谷胱甘肽/氧化谷胱甘肽值明显升高，抗氧化能力明显增强[8]。然而，关于生姜对肉制品加工过程中产生的有害物质 HAAs 的抑制能力的研究鲜有报道。基于此，本研究探究生姜对烘烤猪肉饼品质和理化性质变化的影响以及对 HAAs 生成的影响，为烘烤猪肉制品以更健康、更科学的形式生产加工提供新思路。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜猪肉、生姜：市售；HAAs 标品 IQx、MeIQx、4,8-DiMelQx、PhIP、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-amino-3,4-dimethylimidazo [4,5-*f*] quinoline，MeIQ）、2-氨基-3,7,8-三甲基咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3,7,8-trimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline，7,8-DiMelQx）、2-氨基-9H-吡啶并[2,3-*b*]吲哚（2-amino-9H-pyrido[2,3-*b*]indole，AαC）、2-氨基-3-甲基-9H-吡啶并[2,3-*b*]吲哚（2-amino-3-methyl-9H-pyrido[2,3-*b*]indole，MeAαC）、1-甲基-9H-吡啶并[3,4-*b*]吲哚（1-methyl-9Hpyrido[3,4-*b*]indole，Harman）、3-氨基-1-甲基-5H-吡啶并（4,3-*b*）吲哚（3-amino-1-methyl-5H-pyrido[4,3-*b*]indole，Trp-P-2）、2-氨基-3,4,7,8-四甲基-3H-咪唑并[4,5-*f*]喹喔啉（2-amino-3,4,7,8-tetramethylimidazo[4,5-*f*]qui-noxaline，4,7,8-TriMelQx）：加拿大 Toronto Rasearch Chemicals 公司；乙腈（色谱纯）：德国 Merck 公司；冰乙酸（色谱纯）：天津市北方天医化学试剂厂；乙酸铵（分析纯）：天津市化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

烤箱（TRTF32）：广东长帝有限公司；液质联用仪（AB4500）：美国 AB SCIEX 公司；固相萃取装置（DVB-PDMS）：美国 SUPELCO 公司；脂肪测定仪（2055）：福斯分析仪器（苏州）有限公司；质构分析仪（TMS-PRO）：美国 FTC 公司；色度仪（CR-400）：日本 Konica Minolta 公司；氨基酸分析仪（AAA-DirectTM）：美国 Thermo 公司；旋涡混合仪（VORTEX-5）：其林贝尔仪器制造有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

将生姜打碎，分别以 0.5%、1.0%、1.5%的浓度均匀搅拌入 20 g 猪肉馅中，并放入模具中制成大小均一的肉饼，4 ℃冷藏静置 12 h。每个样品 250 ℃、每面烘烤 10 min。待样品冷却，放置-20 ℃中保存备用。每组 3 个平行。

对照组：不添加生姜。其他条件与试验组相同。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 质量损失率测定

称量猪肉饼烘烤前后的质量，质量损失率公式如下。

$$质量损失率/\%=\frac{M_1-M_2}{M_1}\times 100$$

式中：M_1 为肉饼烹制前的质量，g；M_2 为肉饼烹制冷却后的质量，g。

1.3.2.2 色差值测定

每组烘烤猪肉饼的亮度值（L^* 值）、红度值（a^* 值）和黄度值（b^* 值）在烤制并冷却后使用色度仪测量。每

个肉饼测量 3 个位点。

1.3.2.3 质构测定

将各组样品切成大小均一的正方体(1 cm×1 cm×1 cm),并采用物性测试仪对其进行质构分析,选取硬度、弹性、黏聚性、胶着性、咀嚼性 5 个指标评价。参照李明杨等[9]的方法进行质构分析,分析条件:探头 P/50、测试前速率 3.0 mm/s、测试速率 2.0 mm/s、测试后速率 3.0 mm/s、压缩比为 50%,2 次压缩时间间隔为 5.0 s、触发类型为自动、触发力 1.0 g。

1.4 氨基酸检测

精确称量样品 0.2 g,溶解于 15 mL 6 mol/L HCl,抽真空,110 ℃反应 22 h,然后冷却至 25 ℃,过滤,定容至 50 mL 容量瓶中,吸取 1 mL 溶液移入新试管中,氮吹,用 0.02 mol/L HCl 复溶,振荡涡旋,待检测使用。

1.5 杂环胺提取及检测

根据邓鹏等[10]的研究,使用 Waters C_{18} 柱进行固相萃取制备杂环胺样品。将 2 g 肉饼样品溶解在 7 mL 乙腈、2.8 mL 水和 200 μL 内标溶液中,24 ℃下均质 1 min。将混合液以 10 000 r/min 离心 10 min,收集上清液。然后加入 5 mL 乙腈并将混合液萃取 2 次。将萃取剂装入含有 3 mL 甲醇和 3 mL 水的预处理 Waters C_{18} 柱中。收集流出液并用氮气干燥。在液相色谱-质谱(liquid chromatography-mass spectrometry,LC-MS)分析前,将提取物溶解在 1 mL、30 mol/L 乙酸铵缓冲液-乙腈(pH3.5)中,并用 0.22 μm 过滤膜过滤。

使用 30 mmol/L 乙酸铵(A)和乙腈(B)的二元流动相实现梯度洗脱。洗脱程序为 0~0.5 min,90%A;0.5 min~5.0 min,90%~40%A;5.0 min~6.0 min,40%~5%A;6.0 min~8.0 min,5%A;8.0 min~8.1 min,5%~90%A;8.1 min~9.0 min,90% A;流速 0.3 mL/min,进样量 2 μL。LC-MS 使用 Shimadzu Nexera HPLC 系统与 QTRAP 4500 三重四极杆线性离子阱质量分析仪以正离子模式进行。质谱操作条件为毛细管电压 3.0 kV、离子源温度 120 ℃。

1.6 数据处理与分析

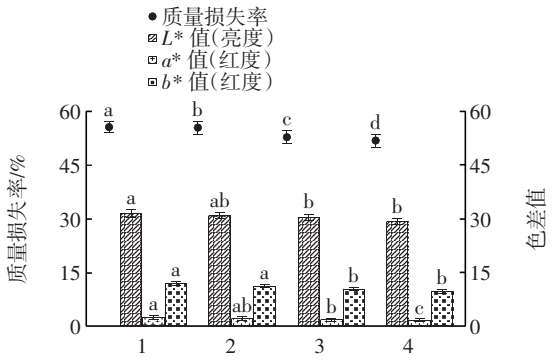
所有试验均重复 3 次,试验结果用平均值±标准差表示。数据分析采用 SPSS 19.0 进行,采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 生姜对烘烤猪肉理化指标的影响

生姜对烘烤猪肉饼的质量损失率和色泽的影响如图 1 所示。

质量损失率是评价肉制品的重要标准之一。由图1可知,经过烘烤的肉饼质量损失率均在 50%以上,然



1 为对照组;2 为 0.5%生姜;3 为 1.0%生姜;4 为 1.5%生姜。不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 1 不同生姜浓度对猪肉饼质量损失率和 L^*、a^*、b^* 值的变化

Fig.1 Changes in weight loss, and L^*, a^*, and b^*-values of pork patties affected by ginger at different concentrations

而添加生姜的肉饼质量损失率随着生姜浓度的增加而显著降低(P<0.05)。肉饼在烹饪过程中的质量损失主要是由于水分的损失。肉制品中导致 HAAs 形成的前体包括水溶性肌苷酸、游离氨基酸和糖。在烹饪过程中,肉饼表面的前体含量可能会随着水从肉饼内部向表面运输而升高,这对 HAAs 的形成至关重要[11]。王未等[12]的研究发现,与对照组相比,不同浓度的花椒叶提取物可以明显减少烘烤牛肉饼的质量损失。此外,有研究证明,生姜具有良好的抗氧化性,能够抑制烘烤过程中蛋白质和脂质氧化程度,进而减少质量损失[13]。

无论是家庭饮食,还是商业生产,色泽是对肉制品最直观的评价方式。L^* 值代表亮度,a^* 值代表红绿轴上的颜色饱和度,b^* 值代表黄蓝轴上的颜色饱和度。0.5%的生姜浓度对猪肉饼的色泽没有显著影响(P>0.05)。1.0%和 1.5%的生姜浓度使烘烤猪肉饼的 L^*、a^* 和 b^* 值小范围下降。随着生姜浓度的增加,生姜对烘烤猪肉饼的色泽有一定影响。a^* 值下降的可能原因是,在烘烤过程中高铁肌红蛋白的氧化对肉的 a^* 值有不利的影响,而生姜的抗氧化作用,抑制了烘烤肉饼中亚铁血红素的降解和高铁肌红蛋白的生成,进而对色泽产生影响[14]。Jia 等[15]也发现具有高效抗氧化活性的黑加仑提取物能够降低烹饪对肉饼色泽的不良影响。

2.2 生姜对烘烤猪肉的质构影响

加工肉制品的质构特性是其品质的重要因素以及感官评价的重要依据[16]。烘烤猪肉饼的质构特性分析见表 1。

Yildiz 等[17]的研究表明外部加工会对肉的质构产生明显影响。由表 1 可知,与对照组相比,生姜对猪肉饼的弹性和黏聚性并没有显著影响(P>0.05)。然而,生姜的加入使猪肉饼的硬度、胶着度、咀嚼度下降。这可

表 1　不同浓度生姜对烘烤猪肉饼质构的影响

Table 1　Effect of ginger at different concentrations on the texture of roasted pork patties

组别	硬度/N	弹性/(mmol/L)	黏聚性/N	胶着度/N	咀嚼度/mJ
对照组	5 476.11±62.05^{a}	0.98±0.04^{a}	0.86±0.01^{a}	3 851.85±28.33^{a}	3 872.86±59.03^{a}
0.5%生姜	5 317.63±62.78^{b}	0.97±0.02^{a}	0.83±0.02^{a}	3 811.16±58.57^{b}	3 791.19±10.06^{b}
1.0%生姜	5 232.59±29.39^{c}	0.97±0.01^{a}	0.84±0.03^{a}	3 796.71±15.23^{b}	3 744.64±9.03^{c}
1.5%生姜	5 243.68±34.22^{c}	0.96±0.02^{a}	0.83±0.02^{a}	3 786.55±85.34^{b}	3 746.30±28.29^{c}

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

能是由于加入生姜后肉饼中的水分含量增加,对一些物理特性产生影响,导致硬度、胶着度、咀嚼度下降。Zeng 等[18]的研究发现花椒和山椒酰胺对烘烤牛肉的黏聚性、咀嚼性、弹性方面没有明显影响,且对硬度的增加并不明显。不同的试验结果可能与所选择的 HAAs 抑制剂的成分差异以及肉的种类等有关。

2.3　生姜对烘烤猪肉的杂环胺含量影响

本研究使用 LC-MS 分析了生姜对烘烤猪肉饼中 HAAs 的抑制作用。不同浓度生姜对烘烤猪肉饼中杂环胺含量的影响见表 2。

表 2　不同浓度生姜对烘烤猪肉饼中杂环胺含量的影响

Table 2　Effect of ginger at different concentrations on the content of HAAs in roast pork patties

ng/g

组别	MeIQ	4,8-DiMeIQx	MeIQx	PhIP	IQx	IQ	MeAαC	Harman	AαC	Trp-P-2	总量
对照组	5.09±0.04^{a}	1.67±0.05^{a}	4.27±0.04^{a}	5.59±0.05^{a}	0.71±0.02^{a}	0.83±0.01^{a}	–	1.47±0.01^{d}	0.30±0.04^{a}	1.98±0.03^{a}	21.91
0.5%生姜	2.78±0.02^{b}	0.76±0.03^{b}	1.64±0.02^{b}	1.43±0.01^{b}	0.60±0.01^{b}	0.42±0.05^{c}	–	1.69±0.01^{c}	0.18±0.01^{b}	1.11±0.04^{b}	10.61
1.0%生姜	2.70±0.01^{b}	0.52±0.02^{c}	1.48±0.03^{c}	1.29±0.04^{c}	0.56±0.03^{c}	0.36±0.02^{c}	–	2.15±0.01^{b}	0.14±0.02^{b}	1.08±0.02^{b}	10.28
1.5%生姜	2.42±0.02^{c}	0.41±0.01^{d}	1.27±0.04^{d}	0.76±0.05^{d}	0.50±0.04^{d}	0.52±0.01^{b}	–	2.84±0.01^{a}	0.09±0.04^{c}	0.95±0.03^{c}	9.76

注:同列不同字母表示差异显著(P<0.05);–表示未检出。

由表 2 可知,在烘烤猪肉饼中检测了 10 种HAAs 的生成量。在本研究中,随着生姜浓度的增加,Harman 含量明显升高。Harman 属于 β-咔啉类 HAAs,形成过程复杂,其重要形成前体为葡萄糖和色氨酸[19]。在肉类加工过程中,香辛料中广泛存在的一些酚酸已被证明会增加 Harman 含量[20]。因此,用香辛料处理肉饼中的 Harman 含量增多可能归因于前体含量较高或者所用香辛料中存在的其他成分。Zeng 等[21]研究发现花椒增加了牛肉饼中 Harman 的水平,这与本研究结论相同。除 Harman 外,生姜对其它 HAAs 均有抑制效果。PhIP 的含量在对照组中最高,它是日常烹饪中最常见的杂环胺[22]。生姜对 PhIP 的抑制效果最明显,其随着添加浓度的提升,抑制率分别为 74.42%、76.92%和 86.40%。Suleman 等[23]研究发现,在 450 ℃~500 ℃碳烤羊肉 10 min 的条件下,常见的香辛料(生姜、黑胡椒、红辣椒、花椒、茴香和桂皮)均对 PhIP 的抑制率达到 90%。

MeIQ、MeIQx、4,8-DiMeIQx、IQx 和 IQ 均属于 IQ 型 HAAs,生姜对其的抑制效果呈浓度依赖性。在生姜浓度为 1.5%的样品中,MeIQ、MeIQx、4,8-DiMeIQx、IQx 和 IQ 的抑制率分别为 52.46%、70.26%、75.45%、29.58%和 37.35%。Tengilimoglu-Metin 等[24]的研究表明,在 250 ℃的条件下,山楂提取物可以降低烘烤鸡肉中 MeIQ、MeIQx、IQx 和 IQ 的含量。与本文中的其他 HAAs 相比,MeAαC、AαC 和 Trp-P-2 的含量相对较少。MeAαC 在所有样品中均未检出,这与 Szterk 等[25]的研究结果相似,在 250 ℃的高温下 MeAαC 很难被检出。在对照组中,AαC 的含量在所有 HAAs 中最少。不同浓度生姜(0.5%、1.0%和 1.5%)对 AαC 的抑制率分别为 40.0%、53.33%和 70.0%。生姜对 Trp-P-2 也有很好的抑制作用。Jamali 等[26]的研究表明蔷薇茶提取物能够将牛肉饼中 Trp-P-2 的含量从 1.09 ng/g 降低到 0.27 ng/g。

香辛料对 HAAs 的形成有很大的抑制作用。对照组中 HAAs 的总量为 21.91 ng/g。不同生姜浓度对 HAAs 总量的抑制率分别为 51.57%、53.08%和 55.45%。此结果表明,生姜对于烘烤猪肉饼中的杂环胺有很好抑制效果,随着生姜浓度的增加,对杂环胺的抑制率也逐渐增加,呈浓度依赖性抑制。Tengili-moglu-Metin 等[24]的研究发现,在 250 ℃高温的条件下,不同浓度的山楂提取物(0.5%和 1.0%)对烘烤鸡胸肉中杂环胺总量的抑制率分别为 12.78%和 19.09%,对烘烤牛肉中杂环胺总量的抑制率分别为 42.53%和 35.57%。

自由基在 HAAs 的形成中起重要作用,香辛料中的天然抗氧化活性成分,尤其是酚类化合物,可以通过电子转移和氢原子转移来中和自由基[27]。Shan 等[28]发现来自 12 个植物科的 26 种常见香辛料提取物的总等效抗氧化能力和总酚含量之间存在高度正线性关系(R^2=0.95),表明香辛料中的酚类化合物对其抗氧化

能力有较大贡献。生姜中的主要活性成分包括姜酚和姜烯酚，有研究证明生姜中的酚类物质具有很好的抗氧化活性，对DPPH自由基和ABTS阳离子自由基的清除能力随着浓度的增加逐渐提高[29]。Sabally等[30]研究发现0.3%添加量的富含多酚的苹果皮提取物在牛肉饼煎炸过程中对MeIQx的抑制率为68%，对4,8-DiMeIQx的抑制率为56%，对PhIP的抑制率为60%。Weisburger等[31]发现使用含有0.5%~7.0%茶多酚的溶液处理牛肉饼15 min可以明显降低其致突变性，抑制效果随着茶多酚浓度的增加而增加。此外，除了多酚类抗氧化剂，色素、蛋白质、糖类和维生素等其他化合物也可能影响杂环胺的形成。

2.4 生姜对烘烤猪肉的游离氨基酸影响

氨基酸是杂环胺形成的关键前体，生姜对烘烤猪肉饼中的游离氨基酸影响见表3。

表3 不同浓度生姜对烘烤猪肉饼中的氨基酸含量影响

Table 3 Effect of ginger at different concentrations on amino acid content of roasted pork patties

mg/g

氨基酸		生肉	对照组	生姜浓度/%		
				0.5	1.0	1.5
天冬氨酸	Asp	3.90±0.22	2.09±0.18	2.13±0.10	2.21±0.06	2.21±0.09
苏氨酸	Thr	1.95±0.18	0.64±0.02	0.65±0.12	0.69±0.01	0.73±0.11
丝氨酸	Ser	1.68±0.04	1.37±0.06	1.46±0.50	1.55±0.12	1.64±0.07
谷氨酸	Glu	6.45±0.21	4.58±0.25	4.78±0.58	4.77±0.37	4.75±0.61
甘氨酸	Gly	1.92±0.05	0.93±0.03	0.96±0.04	1.06±0.01	1.08±0.09
丙氨酸	Ala	2.40±0.12	1.89±0.08	1.97±0.10	2.26±0.13	2.34±0.11
胱氨酸	Cys	0.36±0.05	0.25±0.02	0.25±0.01	0.26±0.01	0.26±0.05
缬氨酸	Val	2.40±0.10	1.56±0.03	1.65±0.09	1.87±0.10	1.88±0.21
蛋氨酸	Met	0.78±0.12	0.41±0.05	0.42±0.06	0.57±0.05	0.64±0.06
异亮氨酸	Ile	1.83±0.06	1.41±0.05	1.45±0.03	1.54±0.11	1.66±0.09
亮氨酸	Leu	3.57±0.08	2.35±0.13	2.53±0.21	2.68±0.32	2.89±0.30
酪氨酸	Tyr	1.20±0.12	1.06±0.05	1.08±0.02	1.10±0.08	1.18±0.04
苯丙氨酸	Phe	1.89±0.07	1.02±0.02	1.17±0.04	1.30±0.22	1.42±0.11
赖氨酸	Lys	3.69±0.11	2.13±0.10	2.36±0.11	2.45±0.12	2.60±0.21
组氨酸	His	1.59±0.06	1.16±0.06	1.21±0.05	1.27±0.07	1.35±0.04
精氨酸	Arg	2.73±0.22	1.91±0.12	2.04±0.13	2.18±0.07	2.25±0.05
脯氨酸	Pro	1.02±0.07	0.76±0.02	0.80±0.09	0.84±0.11	0.90±0.03

如表3所示，与生猪肉饼相比，经过烘烤后的猪肉饼中，所有的氨基酸含量均明显下降。薛超轶等[32]的研究表明添加氨基酸可以降低烘烤牛肉饼中总HAAs的含量。并且在某些情况下，氨基酸是形成杂环胺的氮源和碳源[33]。与对照组相比，生姜可以提高游离氨基酸的含量，但对Asp、Glu和Leu的增加并不明显。此外，研究证实，酚类可以与不同的氨基酸发生化学反应[34]。综上所述，推测生姜与氨基酸的竞争性化学反应会阻止它们参与杂环胺的形成过程，从而产生明显的抑制作用。

3 结论

生姜的添加对烘烤猪肉饼中MeIQ、MeIQx、4,8-DiMeIQx、PhIP、IQx、IQ、AαC和Trp-P-2的生成有明显的抑制效果，并且，随着生姜浓度的升高，这些杂环胺的含量呈浓度依赖性降低。当生姜浓度为1.5%时，生姜对总杂环胺的抑制率高达55.45%。游离氨基酸是杂环胺形成的重要前体，生姜可以有效减少游离氨基酸的消耗，从而达到抑制杂环胺生成的效果。综上所述，生姜作为一种常见的天然香辛料可以抑制烤猪肉饼中杂环胺的形成，为肉制品的安全加工提供新思路。

参考文献：

[1] 薛桂中, 黄现青, 宋莲军, 等. 高温肉制品杂环胺防控及体内代谢调控研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(13): 256-266.
XUE Guizhong, HUANG Xianqing, SONG Lianjun, et al. Progress in the prevention of the formation of heterocyclic amines in high-temperature meat products and the regulation of their metabolism in the human body[J]. Food Science, 2022, 43(13): 256-266.

[2] 陈龙, 王谊, 程昊, 等. 油炸食品中潜在的几类危害物及其消减技术[J]. 中国食品学报, 2022, 22(2): 376-389.
CHEN Long, WANG Yi, CHENG Hao, et al. Several potential hazardous substances in fried foods and their control techniques[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(2): 376-389.

[3] MIZOBUCHI M, ISHIDOHK, KAMEMURAN. A comparison of cell death mechanisms of antioxidants, butylated hydroxyanisole and butylated hydroxytoluene[J]. Drug and Chemical Toxicology, 2022, 45(4): 1899-1906.

[4] AHN J, GRÜN I U. Heterocyclic amines: 2. inhibitory effects of natural extracts on the formation of polar and nonpolar heterocyclic amines in cooked beef[J]. Journal of Food Science, 2006, 70(4): C263-C268.

[5] ZENG M M, HE Z Y, ZHENG Z P, et al. Effect of six Chinese spices on heterocyclic amine profiles in roast beef patties by ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry and principal component analysis[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(40): 9908-9915.

[6] 段斌, 葛永红, 李灿婴, 等. 生姜精油的提取及体外抗氧化性研究[J]. 包装与食品机械, 2018, 36(6): 25-30.
DUAN Bin, GE Yonghong, LI Canying, et al. Extraction and antioxidant activity *in vitro* of ginger essential oil[J]. Packaging and Food Machinery, 2018, 36(6): 25-30.

[7] 李雪凤. 低温等离子体处理对鲜姜切片和姜粉品质及抗氧化活性的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
LI Xuefeng. Effects of low temperature plasma treatment on quality and antioxidant activity of fresh-cut ginger slices and ginger powder[D]. Changchun: Jilin University, 2022.

[8] 范秋丽, 李辉, 蒋守群, 等. 姜辣素和大蒜素及其组合对817肉鸡生长性能、抗氧化和免疫功能的影响[J]. 动物营养学报, 2020, 32(9): 4132-4139.
FAN Qiuli, LI Hui, JIANG Shouqun, et al. Effects of gingerol, allicin and their combination on growth performance, antioxidant and immune function of 817 broilers[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(9): 4132-4139.

[9] 李明杨, 陈胜慧子, 牛希跃, 等. 抗氧化剂对油炸肉制品品质及杂环胺形成的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(16): 29-38.

LI Mingyang, CHEN Shenghuizi, NIU Xiyue, et al. Effects of different antioxidants on the quality of and heterocyclic amine formation in deep-fat fried meat products[J]. Food Science, 2021, 42(16): 29-38.

[10] 邓鹏, 胡璐曼, 凌菁, 等. 煎香肠中杂环胺的生成规律研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(11): 3423-3430.
DENG Peng, HU Luman, LING Jing, et al. Study on the formation regularity of heterocyclic amines in fried sausages[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(11): 3423-3430.

[11] BORGEN 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.

[12] 王未, 任晓镁, 鲍英杰, 等. 花椒叶提取物对烤牛肉饼杂环胺形成的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 40-47.
WANG Wei, REN Xiaopu, BAO Yingjie, et al. Effect of *Zanthoxylum bungeanum* maxim. leaf extract on the formation of heterocyclic amines in roast beef patties[J]. Food Science, 2021, 42(24): 40-47.

[13] 刘怡妙, 凌悦, 徐旭, 等. 生姜的研究进展及其质量标志物的预测分析[J]. 中草药, 2022, 53(9): 2912-2928.
LIU Yimiao, LING Yue, XU Xu, et al. Research progress on ginger and predictive analysis on its Q-Marker[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(9): 2912-2928.

[14] 李君珂, 孙雪梅, 柳全文, 等. 绿原酸对不同加热方式的草鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 80-85.
LI Junke, SUN Xuemei, LIU Quanwen, et al. Effect of chlorogenic acid on qualities of grass carp processed by different cooking methods[J]. Food Science, 2020, 41(4): 80-85.

[15] JIA N, KONG B H, LIU Q, et al. Antioxidant activity of black currant (*Ribes nigrum* L.) extract and its inhibitory effect on lipid and protein oxidation of pork patties during chilled storage[J]. Meat Science, 2012, 91(4): 533-539.

[16] 李明杨, 牛希跃, 许倩, 等. 新疆传统腌制对烤羊肉食用品质及杂环胺含量的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 115-123.
LI Mingyang, NIU Xiyue, XU Qian, et al. Effects of traditional Xinjiang-style marination on eating quality and heterocyclic amines formation in roast lamb[J]. Food Science, 2021, 42(1): 115-123.

[17] YILDIZ TURP G, ICIER F, KOR G. Influence of infrared final cooking on color, texture and cooking characteristics of ohmically precooked meatball[J]. Meat Science, 2016, 114: 46-53.

[18] ZENG M M, WANG J H, ZHANG M R, 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.

[19] 赵天培. 模型体系与油炸鸡肉中 PhIP、Norharman、Harman 3 种杂环胺的形成及控制研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2021.
ZHAO Tianpei. Formation and inhibition of three heterocyclic amines, PhIP, Norharman, and Harman in model systems and deep-fat fried chicken[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2021.

[20] PFAU W, SKOG K. Exposure to beta-carbolines norharman and harman[J]. Journal of Chromatography B, Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences, 2004, 802(1): 115-126.

[21] ZENG M M, LI Y, HE Z Y, et al. Effect of phenolic compounds from spices consumed in China on heterocyclic amine profiles in roast beef patties by UPLC-MS/MS and multivariate analysis[J]. Meat Science, 2016, 116: 50-57.

[22] 李艳秋, 韩文凤, 魏秋红, 等. 食品中 PhIP 的危害和检测方法的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(14): 201-207.
LI Yanqiu, HAN Wenfeng, WEI Qiuhong, et al. Progress on the hazards and detection methods for PhIP in foods[J]. Food Research and Development, 2021, 42(14): 201-207.

[23] SULEMAN R, WANG Z Y, HUI T, et al. Utilization of Asian spices as a mitigation strategy to control heterocyclic aromatic amines in charcoal grilled lamb patties[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11):e14182.

[24] TENGILIMOGLU-METIN M M, HAMZALIOGLU A, GOKMEN V, et al. Inhibitory effect of hawthorn extract on heterocyclic aromatic amine formation in beef and chicken breast meat[J]. Food Research International, 2017, 99: 586-595.

[25] SZTERK A, WASZKIEWICZ-ROBAK B. Influence of selected quality factors of beef on the profile and the quantity of heterocyclic aromatic amines during processing at high temperature[J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1177-1184.

[26] JAMALI M A, ZHANG Y W, TENG H, et al. Inhibitory effect of *Rosa rugosa* tea extract on the formation of heterocyclic amines in meat patties at different temperatures[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2016, 21(2): 173.

[27] SHAHIDI F, AMBIGAIPALAN P. Phenolics and polyphenolics in foods, beverages and spices: Antioxidant activity and health effects-A review[J]. Journal of Functional Foods, 2015, 18: 820-897.

[28] SHAN B, CAI Y Z, SUN M, et al. Antioxidant capacity of 26 spice extracts and characterization of their phenolic constituents[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(20): 7749-7759.

[29] 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.
LI Yuzhu, WANG Yong, XIE Tingting, et al. Effects of ginger and chili pepper as well as their bioactive components on the formation of heterocyclic amines in stewed beef[J]. Meat Research, 2020, 34(6): 45-51.

[30] 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: 57-62.

[31] WEISBURGER J H, VELIATH E, LARIOS E, et al. Tea polyphenols inhibit the formation of mutagens during the cooking of meat[J]. Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis, 2002, 516(1/2): 19-22.

[32] 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 Chaoyi, LIANG Yushen, WU Jiali, et al. Inhibitory effect of amino acids on heterocyclic amines in roast beef patties[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(5): 203-211.

[33] DING X Q, ZHANG D Q, LIU H, et al. Chlorogenic acid and epicatechin: An efficient inhibitor of heterocyclic amines in charcoal roasted lamb meats[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130865.

[34] 王童童, 王梓璇, 王敏, 等. 外源物质对杂环胺生成的影响研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(8): 2535-2542.
WANG Tongtong, WANG Zixuan, WANG Min, et al. Research progress on the effects of exogenous substances on the formation of heterocyclic amines[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(8): 2535-2542.

加工编辑:刘艳美
收稿日期:2022-09-19