

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20241206005

引用格式: 袁怡, 赵瑞雪, 王珺瑜, 等. 鱼肉热加工中有害物的生成及抑制研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(8): 1-9.

YUAN Y, ZHAO RX, WANG JY, *et al.* Production and inhibition of harmful substances in hot processing of fish [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(8): 1-9. (in Chinese with English abstract).

鱼肉热加工中有害物的生成及抑制研究

袁怡¹, 赵瑞雪¹, 王珺瑜¹, 张天浩¹, 林松毅^{1,2,3}, 张思敏^{1,2,3*}

(1. 大连工业大学食品学院, 大连 116034; 2. 辽宁省特殊膳食食品工程研究中心, 辽宁省食品工程技术研究中心, 大连 116034; 3. 国家海洋食品工程技术研究中心, 大连 116034)

摘要: **目的** 研究姜黄素和维生素 C 添加对三文鱼烤制过程中有害物杂环胺(heterocyclic amines, HAAs)和晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)的抑制作用, 以及外源添加物对烤三文鱼风味的影响。**方法** 通过高效液相色谱-串联质谱法测定 HAAs 和 AGEs 浓度, 进一步测定还原糖、肌酸、肌酐、乙二醛等前体物以及脂质氧化水平解析其抑制机制, 运用气相色谱-离子迁移谱法分析三文鱼烤制中挥发性风味变化。**结果** 与对照组相比, 姜黄素和维生素 C 对 HAAs 和 AGEs 表现出显著抑制效果($P<0.05$), 总 HAAs 抑制率分别为 75.21%和 59.52%; AGEs 中 N^ε-羧甲基赖氨酸抑制率分别为 90.56%和 90.87%, N^ε-羧乙基赖氨酸抑制率为 94.57%和 94.80%。还原糖、肌酸、肌酐、乙二醛等前体物浓度与 HAAs 和 AGEs 含量呈现高度相关。此外, 通过挥发性风味分析表明添加姜黄素和维生素 C 对烤三文鱼风味有一定影响, 增加了香味物质 3-羟基-2-丁酮、2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇、薄荷醇等化合物浓度, 为三文鱼总体气味贡献重要作用。**结论** 姜黄素和维生素 C 影响了 HAAs 和 AGEs 形成的关键前体物、中间体, 具有显著抑制效果。本研究的开展为鱼肉制品热加工有害物控制提供了理论指导, 并为优化鱼肉制品加工工艺提供了参考。

关键词: 三文鱼; 杂环胺; 晚期糖基化终末产物; 姜黄素; 维生素 C

Production and inhibition of harmful substances in hot processing of fish

YUAN Yi¹, ZHAO Rui-Xue¹, WANG Jun-Yu¹, ZHANG Tian-Hao¹,
LIN Song-Yi^{1,2,3}, ZHANG Si-Min^{1,2,3*}

(1. School of Food Science and Technology, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China; 2. Engineering Research Center of Special Dietary Food of Liaoning Province, Food Engineering, Technology Research Center of Liaoning Province, Dalian 116034, China; 3. National Engineering Research Center of Seafood, Dalian 116034, China)

ABSTRACT: Objective To explore the effects of curcumin and vitamin C supplementation on harmful substances heterocyclic amines (HAAs) and advanced glycation end products advanced glycation end products (AGEs) in *Salmon salar* roasting process inhibition and the effect of exogenous additives on the flavor of grilled *Salmon salar*.

Methods The concentrations of HAAs and AGEs were determined by high performance liquid

收稿日期: 2024-12-06

基金项目: 大连市科技人才创新支持政策项目(2022RQ003); 国家重点研发计划项目(2023YFD2100200)

第一作者: 袁怡(2001—), 女, 硕士, 主要研究方向为水产品加工有害物控制。E-mail: q2817385877@163.com

*通信作者: 张思敏(1992—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品加工与品质控制。E-mail: zhangsm0701@163.com

chromatography-tandem mass spectrometry, and the inhibitory mechanism of reducing sugar, creatine, creatinine, glyoxal and other precursors and lipid oxidation levels were further determined. The changes of volatile flavor of *Salmon salar* during baking were analyzed by gas chromatography and ion migration spectrometry. **Results** Compared with the control group, curcumin and vitamin C showed significant inhibitory effects on HAAs and AGEs ($P < 0.05$), and the total HAAs inhibition rates were 75.21% and 59.52%, respectively. The inhibition rates of N^ε-carboxymethyl-lysine in AGEs were 90.56% and 90.87%, respectively. The inhibition rates of N^ε-carboxymethyl-lysine were 94.57% and 94.80%. The concentrations of precursors such as reducing sugar, creatine, creatinine and glyoxal were highly correlated with the content of HAAs and AGEs. In addition, volatile flavor analysis showed that the addition of curcumin and vitamin C had a certain effect on the flavor of grilled *Salmon salar*, and increased the concentration of aroma compounds such as 3-hydroxy-2-butanone, 2,6-dimethyl-7-octene-2-ol and menthol, which contributed to the overall smell of *Salmon salar*. **Conclusion** Curcumin and vitamin C affect the key precursors and intermediates in the formation of HAAs and AGEs, and have a significant inhibitory effect. The development of this study provides theoretical guidance for the control of harmful substances in hot processing of fish products, and provides reference for optimizing the processing technology of fish products.

KEY WORDS: *Salmon salar*; heterocyclic amines; advanced glycation end products; curcumin; vitamin C

0 引言

三文鱼(*Salmon salar*), 主要分布于大西洋与太平洋, 属冷水性洄游鱼类, 因其口感丰富、肉质鲜美, 深受消费者喜爱。中国三文鱼养殖规模不断扩大, 年产量超过 4.5 万 t, 但目前仍以进口为主, 2023 年 1 月至 7 月, 挪威三文鱼对中国出口总量达到了 2.4 万 t 左右^[1]。三文鱼加工主要包括冷冻原料初级加工和熟化加工两种, 其中熟化三文鱼主要以烤、煎、炸、炖等加工为主。三文鱼蛋白质含量高, 且富含甲硫氨酸、赖氨酸、亮氨酸等人体必需氨基酸, 以及维生素 A、B₁、B₂、B₁₂ 等多种营养物质, 对心、脑组织健康具有积极作用^[2]。鱼类热加工过程形成其特有风味, 但也伴随着有害物的产生, 主要的如杂环胺(heterocyclic amines, HAAs)^[3]、晚期糖基化终末产物(advanced glycation end products, AGEs)等^[4]。HAAs 是由 C、H、N 原子组成的具有 2~5 个(通常为 3 个)平面结构的含氮杂环、1 个环外氨基以及 1~4 个甲基取代基的多环芳香烃类化合物^[5], 根据化学结构差异可将其分为氨基咪唑氮杂芳烃(aminoimidazole-azaarenes, AIAs)和氨基吡啉(amino-carbolines, ACs)两大类^[6]。AIAs 主要由游离氨基酸和肌酸、肌酐、还原糖参与美拉德反应和 Strecker 降解形成。ACs 一般被认为是氨基酸和蛋白质热解形成, 如 Norharman, 由色氨酸的 Amadori 重排产物葡糖胺以咪唑的形式发生脱水, 在环氧孤对电子的作用下经过 β-消除反应形成中间体, 随后发生分子间亲和取代反应形成^[7]。AGEs 是由氨基酸、肽、蛋白质的游离氨基和还原糖的活性羰基发生非酶反应形成的有害化学物质, 其中 N^ε-羧甲基赖氨酸(N^ε-carboxymethyl-lysine, CML)和 N^ε-羧乙基赖氨酸(N^ε-carboxymethyl-lysine, CEL)常被视为 AGEs 标志物,

能较好反映食品中 AGEs 的总量^[8]。研究表明, HAAs 和 AGEs 摄入后逐渐积累, 可能导致肿瘤、糖尿病、动脉粥样硬化、肾脏损害和阿尔茨海默症等多种疾病发生^[9-10]。影响 HAAs 与 AGEs 生成的影响因素包括热加工设备与方法、原料、温度、时间、水分、前体物、外源添加物等。除热加工工艺调整, 添加天然提取物或抗氧化剂可以通过清除自由基或反应中间体等途径干扰 HAAs 形成的不同阶段, 从而有效抑制 HAAs 和 AGEs 形成^[11]。XUE 等^[12]研究发现山奈酚通过清除烷基自由基、HOO·和 ¹O₂ 抑制了 HAAs 的生成。白藜芦醇通过干扰脂质氧化产生二甲基化合物而抑制 AGEs 的形成^[13]。

姜黄素为酸性多酚类植物提取物, 以不饱和脂肪族及芳香族基团为主链, 由 2 个相邻甲基化的酚、1 个 β-二酮组成, 含有多个双键、羟基等活性基团, 具有良好的抗氧化、促进自由基清除作用^[14]。维生素 C 作为水溶性的抗氧化物, 可以抑制美拉德反应产物的形成, 广泛应用于食品行业^[15]。因此, 这两种物质有望作为抑制 HAAs 和 AGEs 的可行手段。因此, 本研究以三文鱼为典型对象, 通过高效液相色谱-串联质谱法研究其烤制过程中有害物的种类与含量, 并探究姜黄素和维生素 C 对产生的 HAAs 和 AGEs 的抑制作用, 通过前体物的检测(肌酸、肌酐、还原糖、氨基酸)、脂质氧化水平揭示抑制机制, 旨在为鱼类热加工中危害物控制提供更多方法依据, 提高食品安全性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜三文鱼, 大连长兴市场。

维生素 C、姜黄素(纯度 ≥ 99.0%, 碧云天生物技术有限公司); 肌酐测定试剂盒(南京建成生物工程研究所);

CML 酶联免疫吸附测定(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒、CEL ELISA 试剂盒(酶联生物技术有限公司); 乙腈、乙酸、三氯乙酸、乙醚、甲醇、盐酸、丙酮(分析纯)。

1.2 仪器与设备

K9860 凯氏定氮仪(海能未来技术集团有限公司); Agilent1290-6470 液相色谱质谱仪、Agilent C₁₈ 柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm)(美国安捷伦科技有限公司); LA8080 高速氨基酸分析仪(日本 HITACHI 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品制备

将三文鱼去鱼鳞、皮以及内脏, 去除头、尾, 分离去除掉鱼骨, 最后将经分离的肉搅打至成糜。称取 4 份 50 g 鱼糜置于 4 个 Φ9 cm 表面皿中, 均滴入 2 g 食用油, 其中 2 个表面皿分别添加 0.05% 姜黄素和 0.05% 维生素 C, 搅拌均匀, 脱去膜具, 置于 250 °C 烤箱, 两面分别烤制 25 min, 待冷却后进行后续测定。

1.3.2 HAAs 的测定

参考王露露等^[16]的方法并稍作修改。前处理: 称取 2.0 g 样品, 加入 1 mL 去离子水和 9 mL 的乙腈溶液(含 1% 乙酸)后, 振荡混匀, 加入萃取包(4 g 无水硫酸镁、1 g 无水乙酸钠), 手动摇匀 1 min。然后在 6000 r/min、4 °C 的条件下离心 10 min, 取 6 mL 上清液, 重复操作合并提取液于离心管[内含 300 mg 的 N-丙基乙二胺(primary secondary amine, PSA)、900 mg 的无水硫酸镁、300 mg 的十八烷基键合硅胶(C₁₈)]。摇匀振荡 1 min, 然后在同样条件下离心 10 min, 取 1 mL 上清液用氮吹仪吹干后加入 1 mL 的甲醇, 涡旋混匀, 使其溶解至能通过 0.22 μm 滤膜, 上机测定。采用液相色谱质谱仪测定。仪器采集模式为电喷雾电离(electrospray ionization, ESI+), Agilent C₁₈ 柱(2.1 mm×100 mm, 1.8 μm)进行分析。条件: 流动相: A: 5 mmol/L 醋酸铵水溶液(含 0.1% 甲酸), B: 乙腈溶液; 流速 0.3 mL/min; 色谱柱柱温: 30 °C; 进样体积: 5 μL。分离梯度设为 0~1.5 min: 95% A 和 5% B; 1.5~10.0 min: 90% A 和 10% B; 10.0~15.0 min: 70% A 和 30% B; 15.0~20.0 min: 99% A 和 1% B, 保持 1 min; 21.1~22.0 min: 95% A 和 5% B。

1.3.3 AGEs 的测定

AGEs 采用 CML、CEL ELISA 试剂盒测定。

1.3.4 理化性质的测定

根据 GB 5009.237—2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》、GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》分别对样品中 pH、水分含量进行测定。

1.3.5 肌酸的测定

参考 CHU 等^[4]的方法并稍作修改。取 0.25 g 样品, 加入 100 mL 30 g/L 的三氯乙酸溶液, 摇晃均匀, 均质, 于 8000 r/min 离心 5 min。上清液滤纸过滤, 取 20 mL 滤液, 加

入提取剂乙醚 10 mL, 静置 10 min, 取 4 mL 下层溶液。加入 2 mL 0.2 g/L 丁二酮和 2 mL 25 g/L 的 1-萘酚, 在 40 °C 恒温水浴 5 min, 测定 520 nm 处吸光度。

1.3.6 肌酐的测定

采用肌酐试剂盒(过氧化物酶法)测定样品肌酐含量。

1.3.7 还原糖的测定

参考李梦等^[17]的方法并稍作修改。取 5.0 g 样品, 加入 30 mL 蒸馏水、5 mL 219 g/L 乙酸锌溶液、5 mL 106 g/L 亚铁氰化钾溶液, 涡旋混匀。在 50 °C 水浴 20 min, 冷却。4000 r/min 离心 5 min, 取上清液, 加入 20 mL 蒸馏水, 再次离心(4000 r/min, 5 min), 收集合并上清液, 定容至 100 mL, 混合均匀。吸取 1 mL 溶液于比色管中, 加入 1.5 mL 的 3,5-二硝基水杨酸溶液(185 g 酒石酸钾钠溶于 500 mL 热水中, 然后加入 262 mL 2 mol/L NaOH 溶液和 6.5 g 3,5-二硝基水杨酸, 再加入 5 g 结晶酚和 5 g 亚硫酸钠, 定容至 1 L), 摇晃混匀后沸水浴加热 5 min, 待冷却至室温后加去离子水至 10 mL, 于 540 nm 下测吸光值。

1.3.8 乙二醛的测定

参考 HUANG 等^[18]的方法并稍作修改。取 1.0 g 样品, 用 9 mL pH 7.2 磷酸盐缓冲液, 均质, 于 8000 r/min, 4 °C 离心 10 min。取 0.5 mL 上清液与 1 mL 15 g/L 醋酸钠溶液和 2 mL 2 g/L 羟胺盐酸盐混合, 50 °C 恒温水浴 20 min。在 233 nm 处测定上清液的吸光度。

1.3.9 游离氨基酸的测定

参考 ZHANG 等^[19]的方法并稍作修改。称取 3.0 g 样品, 加入 15 mL 的 0.02 mol/L 盐酸溶液, 均质 1 min。10000 r/min 离心 10 min。取上清液 2 mL, 加入 8 mL 丙酮, 10000 r/min 再次离心 10 min。取上清液 1 mL 于 60 °C 旋蒸, 残余物加入 0.02 mol/L 盐酸 2 mL 再溶解, 通过 0.22 μm 过滤膜, 上机测试。

1.3.10 硫代巴比妥酸反应物的测定

参考 ZHANG 等^[20]的方法, 将 1.00 g 样品与 5 mL 硫代巴比妥酸反应物(thiobarbituric acid reactants, TBARS)溶液混合, 于沸水浴中浸泡 20 min。取上清液离心(4 °C, 8000 r/min, 15 min), 取上清液在 532 nm 处测量吸光度。

1.3.11 过氧化值的测定

参考 CHU 等^[4]的方法测定过氧化值(peroxide value, POV), 称取 0.10 g 样品与 3 mL 异辛烷涡旋混合。取 50 μL 溶液, 加入 1.45 mL 甲醇:正丁醇混合液(2:1, V:V)、10 μL 1 g/mL 硫氰酸铵溶液和 10 μL 氯化亚铁溶液(0.81 g 氯化钡和 1.00 g 硫酸亚铁在 0.5 mol/L 盐酸中暗反应, 取上清液), 暗反应 20 min, 在 510 nm 处测量吸光度值。

1.3.12 气相色谱-离子迁移谱分析

称取 1.00 g 样品于顶空瓶中, 孵化 15 min (80 °C) 后进样测试。进样针温度为 85 °C, 进样体积 200 μL, 孵化转速为 500 r/min。条件: 气相流速 E₁: 150 mL/min; 气相流速

E₂: 0.00~2.00 min: 2 mL/min, 反应步骤 Rec; 2.00~10.00 min: 10 mL/min; 10.00~20.00 min: 100 mL/min; 20.00~25.00 min: 150 mL/min, 反应步骤 Stop。

1.4 数据处理

本研究中所有实验均重复 3 次, 结果运用 SPSS 27 软件进行计算和显著性差异分析, $P < 0.05$ 表示差异显著; 使用 Vocal 0.4.0.3 软件处理气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility-mass spectrometry, GC-IMS)数据并绘图。

2 结果与分析

2.1 姜黄素和维生素 C 对 HAAs 和 AGEs 生成的影响

本研究中共检测出 7 种 HAAs: 2-氨基-3-甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉(2-amino-3-methylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, IQx)、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-3,8-二甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉(2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, 8-MeIQx)、2-氨基-3,4,8-三甲基咪唑并[4,5-*f*]喹啉(2-amino-3,4,8-trimethylimidazo[4,5-*f*]quinoxaline, 4,8-DiMeIQx)、9H-吡啶并[3,4-*b*]吲哚(9H-pyrido[2,3-*b*]indole, Norharman)、甲基-9H-吡啶并[3,4-*b*]吲哚(1-methyl-9H-pyrido[2,3-*b*]indole, Harman)、2-氨基-1-甲基-6-苯基-咪唑并[4,5-*b*]吡啶(2-amino-1-methyl-6-phenyl-imidazo[4,5-*b*]pyridine, PhIP)。对照组除 8-MeIQx, 其余 6 种 HAAs 均被检出, 共(21.08±0.05) μg/kg。姜黄素和维生素 C 分别将 HAAs 含量减少 75.21%和 59.52%。其中 IQx、MeIQ 水平降低至检出

限以下, 对 Norharman 和 PhIP 抑制率分别为 84.33%、61.43%和 81.71%、88.73%。对照组 CML、CEL 含量分别为(32.10±0.19) μg/kg 和(26.34±1.02) μg/kg。姜黄素显著减少了 CML 和 CEL 含量 90.56%和 94.57%, 维生素 C 则抑制了 CML 和 CEL 90.87%和 94.80%(表 1)。这些结果表明, 姜黄素和维生素 C 均能有效抑制三文鱼烤制中 HAAs 和 AGEs 的形成, 其中姜黄素对 HAAs 表现出更明显的抑制效果, 而维生素 C 对 AGEs 抑制作用更明显。姜黄素具有酚羟基和 β-二酮结构, 表现出显著抗氧化性, 能够通过氢原子转移或金属离子螯合等途径清除超氧阴离子(O₂⁻)、羟基自由基(·OH)等多种自由基^[21]。KILIC 等^[22]研究发现添加 0.5%姜黄粉对鸡肉丸 HAAs 抑制率为 72%, 其抑制作用主要与自由基猝灭有关。XUE 等^[23]研究表明姜黄素对牛肉饼中游离和结合 HAAs 的抑制能力达到 59.97%和 27.42%, 姜黄素可以通过猝灭烷基自由基和 ¹O₂ 等关键自由基抑制 HAAs 形成。WANG 等^[24]研究发现姜黄素可以通过自由基猝灭作用导致活性羰基中间体减少来抑制 Norharman 的形成; 维生素 C 具有强还原性, 可作为氢原子供体直接中和自由基并中断自由基链式反应, 抑制美拉德反应^[25]。维生素 C 可以通过抑制色氨酸等 HAAs 前体及其各自中间体的生成从而阻碍 HAAs 形成^[26]。WONG 等^[27]发现维生素 C 能与 HAAs 中间体苯乙醛反应, 对炸牛肉中 PhIP、MeIQx 表现出明显的抑制作用。此外, 值得注意的是加入姜黄素和维生素 C 后 8-MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 含量表现出明显上升, 这可能与姜黄素和维生素 C 在高温和长时间加热条件下分解, 产生新的中间产物有关, 如维生素 C 在高温下可能分解为脱氢抗坏血酸或其他活性羰基化合物, 可能参与 8-MeIQx 和 4,8-DiMeIQx 的形成^[25]。目前研究发现有部分外

表 1 姜黄素和维生素 C 对烤三文鱼中 HAAs 和 AGEs 的影响
Table 1 Effects of curcumin and vitamin C on HAAs and AGEs in grilled *Salmon salar*

有害物种类	浓度/(μg/kg)		
	对照组	姜黄素组	维生素 C 组
IQx	0.92±0.00	—	—
MeIQ	0.63±0.00	—	—
8-MeIQx	—	0.50±0.02	0.70±0.00
4,8-DiMeIQx	0.03±0.00 ^b	0.25±0.00 ^a	0.17±0.00 ^a
Norharman	14.65±0.00 ^a	2.30±0.03 ^c	5.65±0.03 ^b
Harman	0.70±0.00 ^b	1.41±0.00 ^a	1.54±0.02 ^a
PhIP	4.14±0.00 ^a	0.76±0.01 ^b	0.47±0.00 ^b
总 HAAs	21.08±0.05 ^a	5.22±0.04 ^c	8.53±0.05 ^b
CML	32.10±0.19 ^a	3.03±1.09 ^b	2.93±1.31 ^b
CEL	26.34±1.02 ^a	1.43±0.09 ^b	1.37±0.40 ^b

注: —表示未检出; 数值表示“平均值±标准偏差”(n=3), 同行不同上标字母表示差异显著($P < 0.05$), 表 3 同。

源添加物抑制某种 HAAs 时可能对其他某种 HAAs 存在促进作用, 对此仍存在部分机制不明确的问题^[28]。例如 HSU 等^[29]发现酱油会促进牛肉、羊肉和鸡肉中 HAAs 的含量。槲皮素和山柰酚显著提高了牛肉中 Harman 和 Norharman 的含量, 而香叶抑制 Harman 和 Norharman 生成时促进了 MeIQx 的形成^[30]。橙皮苷对烤猪肉中 MeIQx 抑制效果显著, 但会促进 Norharman 和 Harman 的形成^[31]。

2.2 烤制中理化指标的变化

表 2 为有无添加姜黄素和维生素 C 的 pH、水分含量、烹饪损失的变化。与烤前相比, 对照组 pH 增加。相应地, 添加姜黄素和维生素 C 后, pH 表现出明显下降, 这与李梦等^[17]的研究结果相一致。pH 降低会减缓美拉德反应速率, 从而减少中间产物的形成, 抑制 HAAs 生成^[32]。与烤前相比, 对照组含水量显著降低, 这是由于高温烤制过程中水分会大量流失。姜黄素和维生素 C 组水分含量与蒸煮损失与对照组相比均无明显差异。

表 2 烤三文鱼理化指标的变化

Table 2 Changes of physical and chemical indexes of grilled *Salmon salar*

样品	pH	水分含量/%	烹饪损失/%
生肉	7.00±0.01 ^b	53.95±0.69 ^a	—
对照组	7.30±0.00 ^a	41.70±0.45 ^b	67.93±0.83 ^a
姜黄素组	6.32±0.04 ^c	41.45±0.81 ^b	68.53±0.40 ^a
维生素 C 组	6.34±0.01 ^c	41.86±0.92 ^b	68.30±0.89 ^a

注: —表示无此项; 同列不同上标字母表示差异显著($P<0.05$), 表 4、5 同。

2.3 姜黄素和维生素 C 对 HAAs 和 AGEs 前体物的影响

不同类型的 HAAs 生成途径具有差异, 但主要前体物质包括蛋白质、还原糖、肌酸、肌酐和氨基酸等。AGEs 形成的主要前体包括还原糖、氨基酸等, 中间体包括乙二醛等二羰基化合物。为了探究前体物和中间体与 HAAs、AGEs 形成的关系, 测定还原糖、肌酸、肌酐、氨基酸、乙二醛含量, 结果如表 3、4 所示。主要 HAAs 的生成机制已有许多研究, 目前主要提出的假说如图 1 所示^[5,7,33]。添加姜黄素和维生素 C 后, 游离氨基酸水平下降, 其中丙氨酸和赖氨酸含量表现出显著减少。作为 MeIQ 的关键前体^[34], 这与观察到的 MeIQ 含量减少的结果相一致。还原糖、肌酸、肌酐等前体物浓度也与 HAAs 和 AGEs 含量呈现高度相关性, 与烤前相比, 还原糖、肌酸、肌酐含量显著增加, 而添加姜黄素和维生素 C 后, 还原糖和肌酸表现出显著减少的趋势($P<0.05$), 阻碍 HAAs、AGEs 形成。另外, ZHANG 等^[19]证实蔬菜提取物可以阻断肌酐向中间体的转化。表 4 中姜黄素和维生素

C 组肌酐含量表现出不同程度的增加, 由于抗氧化剂的添加阻断了肌酐向 PhIP 中间产物转化的醛醇反应(图 1c), 从而减少了 PhIP 的产生。乙二醛是 AGEs 形成的重要中间体^[35], 姜黄素和维生素 C 组乙二醛含量均表现出减少趋势, 可能是因为姜黄素和维生素 C 通过清除乙二醛而抑制了 AGEs 的生成。这与 RAMIS 等^[36]研究发现维生素可以清除二羰基化合物的结果相一致。因此, 这两种添加物通过影响关键前体物、中间体形成以及阻断前体和中间体的转化而抑制 HAAs 生成。

表 3 烤三文鱼中氨基酸组成(mg/g)

Table 3 Amino acids composition of grilled *Salmon salar* (mg/g)

氨基酸	生肉	对照组	姜黄素组	维生素 C 组
谷氨酸	1.23±0.04 ^a	1.29±0.06 ^a	0.46±0.00 ^b	0.51±0.00 ^b
脯氨酸	0.40±0.03 ^b	0.77±0.04 ^a	0.36±0.02 ^b	0.38±0.02 ^b
甘氨酸	2.11±0.07 ^a	2.10±0.10 ^a	1.38±0.00 ^b	0.65±0.85 ^c
丙氨酸	3.84±1.13 ^b	7.55±0.33 ^a	3.62±0.00 ^b	3.85±0.04 ^b
半胱氨酸	0.06±0.00 ^c	0.09±0.00 ^c	0.20±0.00 ^a	0.15±0.06 ^a
缬氨酸	1.01±0.04 ^b	1.78±0.07 ^a	0.93±0.00 ^b	0.99±0.02 ^b
蛋氨酸	0.34±0.01 ^a	0.10±0.00 ^c	0.08±0.00 ^c	0.15±0.08 ^b
异亮氨酸	0.33±0.01 ^b	0.65±0.03 ^a	0.28±0.00 ^b	0.27±0.00 ^b
亮氨酸	1.09±0.09 ^b	1.46±0.06 ^a	0.73±0.00 ^c	0.71±0.00 ^c
酪氨酸	0.53±0.07 ^b	0.73±0.03 ^a	0.41±0.00 ^c	0.42±0.00 ^c
苯丙氨酸	1.12±0.26 ^a	1.11±0.05 ^a	0.45±0.00 ^b	0.45±0.00 ^b
赖氨酸	0.95±0.17 ^b	1.02±0.03 ^a	0.07±0.00 ^c	0.08±0.00 ^c
组氨酸	1.31±0.19 ^a	0.95±0.03 ^b	0.38±0.00 ^c	0.43±0.03 ^c
精氨酸	0.18±0.01	0.15±0.01	—	—
总 HAAs	23.57±1.94 ^b	36.34±1.02 ^a	15.97±0.69 ^c	15.48±0.23 ^c

表 4 HAAs 和 AGEs 各前体物含量

Table 4 Content of HAAs and AGEs precursors

样品	还原糖含量 (mg/mL)	肌酸含量 (μmol/L)	肌酐含量 (μmol/L)
生肉	0.65±0.03 ^b	720.20±9.87 ^d	0.06±0.00 ^c
对照组	2.84±0.05 ^a	1183.89±39.67 ^a	2.48±0.18 ^b
姜黄素组	0.43±0.01 ^c	1148.57±23.24 ^c	3.51±0.19 ^a
维生素 C 组	0.39±0.00 ^c	1174.12±26.46 ^b	3.78±0.17 ^a

2.4 姜黄素和维生素 C 对脂质氧化的影响

有研究证实, 脂质氧化产生的脂质过氧自由基会影响 HAAs 和 AGEs 的生成^[37]。为了探究脂质氧化与 HAAs、AGEs 形成的关系, 测定 TBARS 和 POV 值见表 5。如表 5 所示, 与烤制前相比, 对照组 TBARS 值表现出明显增加, 从(0.65±0.01) mg MDA/kg 增加至(0.87±0.01) mg MDA/kg,

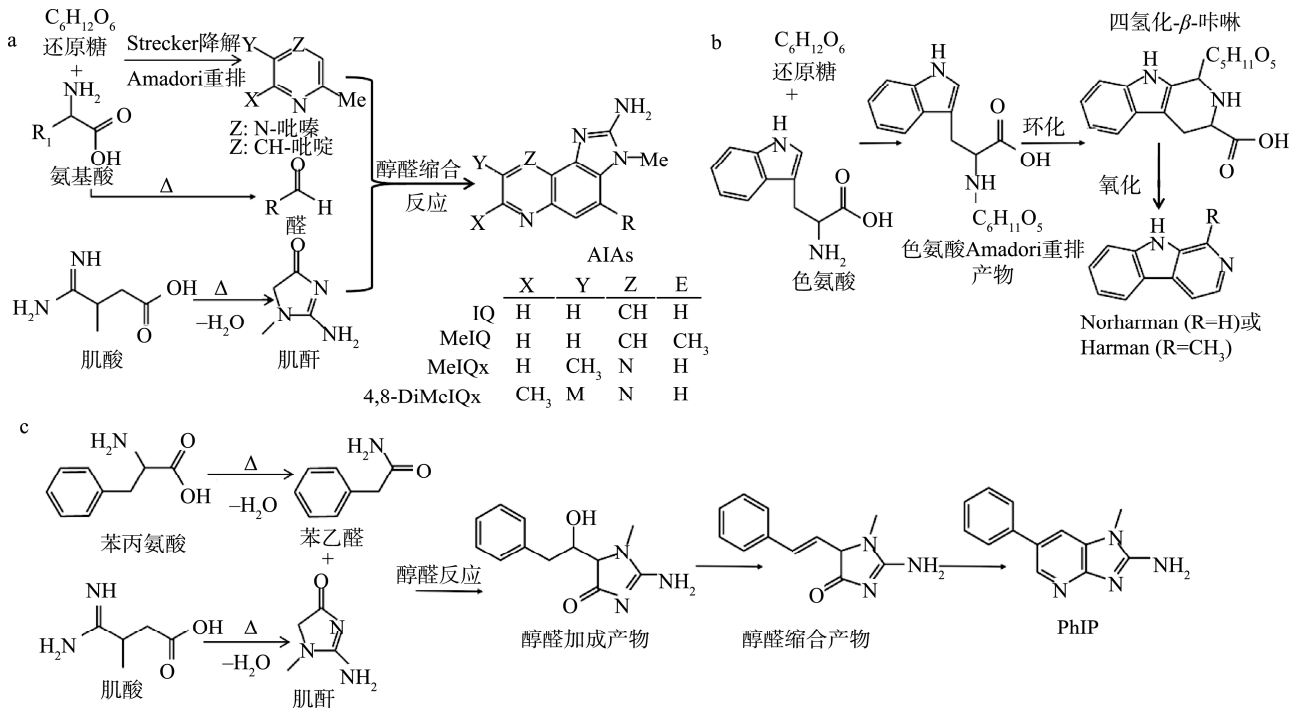


图 1 HAAs 生成机制

Fig.1 HAAs generation mechanisms

表 5 姜黄素和维生素 C 对烤三文鱼中脂质氧化影响

Table 5 Effects of curcumin and vitamin C on lipid oxidation in grilled *Salmon salar*

样品	TBARS (/mg MDA/kg)	POV/(mmol/kg)
生肉	0.65±0.01 ^c	7.96±0.04 ^c
对照组	0.87±0.01 ^b	10.70±0.31 ^b
姜黄素组	0.86±0.01 ^b	12.42±0.53 ^a
维生素 C 组	0.90±0.00 ^a	11.09±0.82 ^b

表明经过烤制后氧化程度显著增加($P<0.05$)。脂质氧化对保水性的不利影响使肌酸大量失水生成肌酐从而促进 HAAs 和 AGEs 形成^[38]。此外,AGEs 与脂质氧化醛类产物(如乙二醛和丙二醛)的诱导密切相关,烤制后丙二醛可作为前体物参与诱导 CML 与 CEL 的生成^[39]。添加姜黄素和维生素 C 后,TBARS 值无明显变化,维生素 C 组有小范围上升。MACIT 等^[40]研究中有类似的结果,添加了不同数量的橄榄叶提取物导致样品的 TBARS 值增加。POV 值也表

现出类似的趋势,添加姜黄素和维生素 C 后,POV 值增加。姜黄素和维生素 C 主要是通过清除脂质自氧化途径中氧自由基而发挥抗氧化活性,对脂质氧化最终阶段过氧化物的生成影响较小^[41-42],可以解释姜黄素和维生素 C 组 TBARS 和 POV 值的小幅度增加。

2.5 姜黄素和维生素 C 对挥发性风味的影响

风味是衡量食品品质的重要指标,选择外源添加物时应将其变化列入考虑因素。表 6 展示了烤后的挥发性有机物,主要包括醛类、醇类、酯类和酮类等变化。图 2 为对照组与姜黄素、维生素 C 组挥发性有机物的 GC-IMS 谱图差异对比。图中的点代表某一种香气物质,颜色代表物质的峰强度,白色表示峰强度较低,红色表示峰强度较高,颜色越深表示峰强度越高。3 组样品的挥发性风味物质种类差异不大,部分物质含量存在明显差异。对这些化合物进行定性分析,样品挥发性有机物的指纹图谱如图 3 所示,

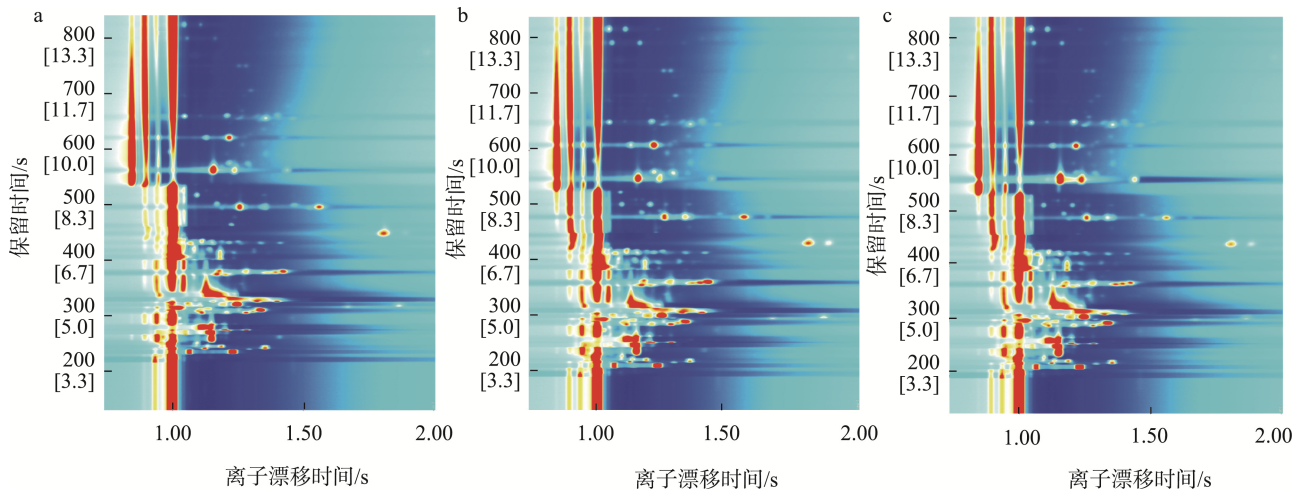
表 6 烤三文鱼中挥发性有机物

Table 6 Volatile organic compounds in grilled *Salmon salar*

化合物	分子式	相对分子量	保留时间指数	保留时间/s	扩散系数/a.u.	注释
3-戊醇	C ₅ H ₁₂ O	88.1	1146.9	1.43713	559.559	
正己醛	C ₆ H ₁₂ O	100.2	1114.4	1.25947	503.132	单体
正己醛	C ₆ H ₁₂ O	100.2	1114.4	1.25947	503.132	多聚体
2-甲基丙醇	C ₄ H ₁₀ O	74.1	1107.2	1.33837	491.387	
薄荷醇	C ₁₀ H ₂₀ O	156.3	1178.1	1.21195	619.882	
芳樟醇氧化物	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	170.3	1081.5	1.80208	455.236	

表 6(续)

化合物	分子式	相对分子量	保留时间指数	保留时间/s	扩散系数/a.u.	注释
丙醛	C ₃ H ₆ O	58.1	757.4	1.06573	218.488	单体
丙醛	C ₃ H ₆ O	58.1	757.4	1.06573	218.488	多聚体
2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇	C ₁₀ H ₂₀ O	156.3	1072.2	443.595	1.88478	
2-羟基苯甲醛	C ₇ H ₆ O ₂	122.1	1046.1	412.421	1.14418	
二甲基甲酰胺	C ₃ H ₇ NO	73.1	1310.9	828.78	1.04938	
邻二甲苯	C ₈ H ₁₀	106.2	1201.4	661.548	1.04251	
甲酸戊酯	C ₉ H ₁₀ O ₃	166.2	133 4.1	869.676	1.08667	
3-甲基-2-丁烯醛	C ₅ H ₈ O	84.1	1198.7	657.823	1.35476	
反式-2-戊烯醛	C ₅ H ₈ O	84.1	1121.0	514.058	1.09222	
乙酸甲酯	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	803.6	240.584	1.06541	
D-柠檬烯	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1152.8	570.501	1.22601	
3-羟基-2-丁酮	C ₄ H ₈ O ₂	88.0	1296.7	804.675	1.04595	
正丙醇	C ₃ H ₈ O	60.1	1059.3	427.899	1.11995	
3-甲氧基丁醛	C ₅ H ₁₀ O	86.1	903.5	296.2	1.20831	



注: a. 对照组; b. 姜黄素组; c. 维生素 C 组。

图 2 烤三文鱼中挥发性有机物的 GC-IMS 谱图

Fig.2 GC-IMS spectra of volatile organic compounds in grilled *Salmon salar*

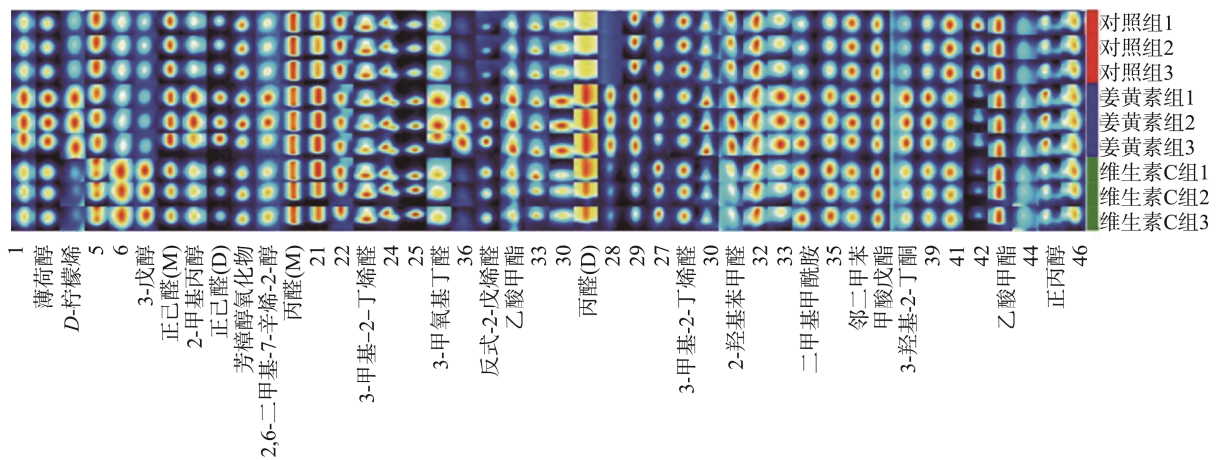


图 3 烤三文鱼中挥发性有机物的指纹谱图

Fig.3 Fingerprint spectra of volatile organic compounds of grilled *Salmon salar*

与对照组相比,姜黄素和维生素 C 组对醛、醇类物质影响较明显,3-羟基-2-丁酮、2,6-二甲基-7-辛烯-2-醇、薄荷醇等化合物浓度显著增加。这些物质均可作为香料,广泛应用于食品、医药、化工、生物燃料等行业^[43-45]。此外,脂质氧化作为水产品风味的重要来源之一,产生的 ROOH 分解生成醛、酮、醇类物质,对水产品特征性风味贡献较大^[46]。添加姜黄素和维生素 C 后,正己醛浓度有不同程度的增加,己醛作为脂质氧化产物,是水产品脂肪香气的来源之一^[47]。这与上述两种添加物对脂质氧化产物影响结果相一致。

3 讨论与结论

本研究探究了烤三文鱼中 HAAs 和 AGEs 的形成并评价了姜黄素和维生素 C 对其形成的抑制作用。结果表明烤三文鱼中 HAAs 以 Norharman 和 PhIP 为主,姜黄素和维生素 C 显著抑制了烤三文鱼中 HAAs 和 AGEs 形成,其中总 HAAs 抑制率分别为 75.21% 和 59.52%; CML 和 CEL 抑制率均达 90% 以上。通过前体物浓度变化分析,表明姜黄素和维生素 C 通过抑制还原糖、肌酸、氨基酸和乙二醛等前体物和中间体形成以及肌酐向 PhIP 中间产物转化的醇醛反应而减少 HAAs 和 AGEs 生成。脂质氧化与 HAAs 和 AGEs 形成具有一定相关性,可以通过影响保水性而影响有害物形成。此外,脂质氧化对烤三文鱼总体风味起到重要作用,如正己醛等氧化产物为鱼类脂肪香气贡献较大。本研究为抗氧化剂在烤鱼制品中合理应用以控制危害物生成提供参考和借鉴,有助于提高鱼肉热加工制品食用安全性。

参考文献

- [1] 王芳. 2023—2028 年中国三文鱼行业竞争格局分析及发展前景预测报告[Z]. 2023.
WANG F. China salmon industry competitive landscape analysis and development prospect forecast report, 2023—2028 [Z]. 2023
- [2] 王进芳, 钟洪亮, 刘颖琳, 等. 高体鲷、三文鱼和金枪鱼背部营养成分分析[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(7): 278–285.
WANG JF, ZHONG HL, LIU YL, *et al.* Analysis of nutritional components in back and abdomen of *Seriola dumerili*, *Oncorhynchus*, and *Thunnus albacares* [J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(7): 278–285.
- [3] LARSSON K, TULLBERG C, ALMINGER M, *et al.* Malondialdehyde and 4-hydroxy-2-hexenal are formed during dynamic gastrointestinal *in vitro* digestion of cod liver oils [J]. Food & Function, 2016, 7(8): 3458–3467.
- [4] CHU JB, LIN SY, YUAN Y, *et al.* Effects of quercetin and L-ascorbic acid on heterocyclic amines and advanced glycation end products production in roasted eel and lipid-mediated inhibition mechanism analysis [J]. Food Chemistry, 2024, 441: 138394.
- [5] 程轶群, 雷阳, 周兴虎, 等. 传统肉制品中 HAAs 研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 316–327.
CHENG YQ, LEI Y, ZHOU XH, *et al.* Research progress of HAAs in traditional meat products [J]. Food Science, 2022, 43(5): 316–327.
- [6] JING J, HE Y, WANG Y, *et al.* Inhibitory effects of *Portulaca oleracea* L. and selected flavonoid ingredients on heterocyclic amines in roast beef patties and density function theory calculation of binding between heterocyclic amines intermediates and flavonoids [J]. Food Chemistry, 2021, 336: 127551.
- [7] CAO H, CHEN BH, INBARAJ BS, *et al.* Preventive potential and mechanism of dietary polyphenols on the formation of heterocyclic aromatic amines [J]. Food Frontiers, 2020, 1(2): 134–151.
- [8] POULSEN M, HEDEGAAR R, ANDERSEN J. Advanced glycation endproducts in food and their effects on health [J]. Food & Chemical Toxicology, 2013, 60: 10–37.
- [9] GIBIS M. Heterocyclic aromatic amines in cooked meat products: Causes, formation, occurrence, and risk assessment [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2016, 15(2): 269–302.
- [10] KHALID M, PETROIANU G, ADEM A. Advanced glycation end products and diabetes mellitus: Mechanisms and perspectives [J]. Biomolecules, 2022, 12(4): 542.
- [11] MEURILON M, ENGEL E. Mitigation strategies to reduce the impact of heterocyclic aromatic amines in proteinaceous foods [J]. Trends in Food Science & Technology, 2016, 50: 70–84.
- [12] XUE CY, QUAN W, LI Y, *et al.* Mitigative capacity of *Kaempferia galanga* L. and kaempferol on heterocyclic amines and advanced glycation end products in roasted beef patties and related mechanistic analysis by density functional theory [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132660.
- [13] YU H, ZHONG QL, GUO YH, *et al.* Potential of resveratrol in mitigating advanced glycation end products formed in baked milk and baked yogurt [J]. Food Research International, 2020, 133: 109191.
- [14] SHARM RA, GESCHER AJ, STEWARD WP. Curcumin: The story so far [J]. European Journal of Cancer, 2005, 41(13): 1955–1968.
- [15] 梁浩辉, 蔡佳, 陈晓瑛, 等. 维生素 C 对鱼类应激与抗氧化能力影响的研究进展[J]. 饲料工业, 2024, 45(18): 71–76.
LIANG HH, CAI J, CHEN XY, *et al.* Research progress on effects of vitamin C on anti-stress and antioxidant capacity of fish [J]. Feed Industry, 2024, 45(18): 71–76.
- [16] 王露露, 罗娇依, 冯赛赛, 等. 超高效液相色谱-串联质谱法快速检测预制调理羊肉串中 15 种杂环胺[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(4): 49–58.
WANG LL, LUO JY, FENG SS, *et al.* Rapid determination of 15 kinds of heterocyclic amines in prefabricated mutton kebabs by ultra performance liquid chromatogram-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(4): 49–58.
- [17] 李梦, 林松毅, 王睿纯, 等. 山药提取物对烤马友鱼中 HAAs 的抑制作用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 194–203.
LI M, LIN SY, WANG RC, *et al.* Inhibitory effect of yam extract on heterocyclic amines in roasted *Eleutheronema tetradactylum* [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(1): 194–203.
- [18] HUANG SH, DONG XL, ZHANG YL, *et al.* Effects of oxidation and precursors (lysine, glyoxal and schiff base) on the formation of N^ε-carboxymethyl-lysine in aged, stored and thermally treated chicken meat [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(5): 1252–1258.
- [19] ZHANG SM, WANG RC, CHU JB, *et al.* Vegetable extracts: Effective inhibitors of heterocyclic aromatic amines and advanced glycation end products in roasted Mackerel [J]. Food Chemistry, 2023, 412: 135559.
- [20] ZHANG SM, WANG RC, WANG XY, *et al.* Evaluating the effects of essential oils on heterocyclic amines production and lipid and protein

- oxidation in roasted large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e16975.
- [21] MENON VP, SUDHEER AR. Antioxidant and anti-inflammatory properties of curcumin [J]. Advances in Experimental Medicine and Biology, 2007, 595: 105–125.
- [22] 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.
- [23] XUE C, DENG P, QUAN W, *et al.* Ginger and curcumin can inhibit heterocyclic amines and advanced glycation end products in roast beef patties by quenching free radicals as revealed by electron paramagnetic resonance [J]. Food Control, 2022, 138: 109038.
- [24] 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 Science & Nutrition, 2021, 9(10): 5575–5582.
- [25] PADAYATTY SJ, KATZ A, WANG Y, *et al.* Vitamin C as an antioxidant: Evaluation of its role in disease prevention [J]. Journal of the American College of Nutrition, 2003, 22(1): 18–35.
- [26] XU Y, CHENG Y, ZHU Z, *et al.* Inhibitory effect of mulberry leaf (*Morus alba* L.) extract on the formation of free and bound heterocyclic amines in pan-fried muscovy duck (*Cairina moschata*) patties [J]. Food Control, 2023, 144: 109359.
- [27] WONG D, CHENG KW, WANG M. Inhibition of heterocyclic amine formation by water-soluble vitamins in Maillard reaction model systems and beef patties [J]. Food Chemistry, 2012, 133(3): 760–766.
- [28] 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 TT, WANG ZX, WANG M, *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.
- [29] HSU KY, CHEN BH. Analysis and reduction of heterocyclic amines and cholesterol oxidation products in chicken by controlling flavorings and roasting condition [J]. Food Research International, 2020, 131: 109004.
- [30] 姚瑶. 酱牛肉中常见杂环胺化合物的形成与控制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- YAO Y. Effects of the formation and control of common heterocyclic amines in braised sauce beef [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [31] 鄢嫣. 烤肉中杂环胺的形成规律的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- YAN Y. Study on the formation regularities of heterocyclic aromatic amines in the roasted meat [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [32] 张漫漫. 山黑猪叉烧肉工艺配方优化及产品加工中 HAAs 抑制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.
- ZHANG MM. Study on the formation and inhibition of heterocyclic aromatic amines in the processing of hill-black pig roast [D]. Changchun: Jilin University, 2023.
- [33] PEARSON AM, CHEN C, GRAY JI, *et al.* Mechanism(s) involved in meat mutagen formation and inhibition [J]. Free Radical Biology & Medicine, 1992, 13(2): 161–167.
- [34] ZAMORA R, HIDALGO FJ. Formation of heterocyclic aromatic amines with the structure of aminoimidazoarenes in food products [J]. Food Chemistry, 2020, 313: 126128.
- [35] HUANG SH, HUANG M, DONG XL. Advanced glycation end products in meat during processing and storage: A review [J]. Food Reviews International, 2021, 39(3): 1716–1732.
- [36] RAMIS R, ORTEGA-CASTRO J, CABALLERO C, *et al.* How does pyridoxamine inhibit the formation of advanced glycation end products? the role of its primary antioxidant activity [J]. Antioxidants, 2019, 8(9): 344.
- [37] ZHU Z, YANG J, ZHOU X, *et al.* Comparison of two kinds of peroxy radical pretreatment at chicken myofibrillar proteins glycation on the formation of N^ε-carboxymethyllysine and N^ε-carboxyethyllysine [J]. Food Chemistry, 2021, 353: 129487.
- [38] SOLADOYE P, SHAN P, DUGAN M, *et al.* Influence of cooking methods and storage time on lipid and protein oxidation and heterocyclic aromatic amines production in bacon [J]. Food Research International, 2017, 99(1): 660–669.
- [39] FANG R, ZHU Z, BASSEY AP, *et al.* Glyoxal induced advanced glycation end products formation in chicken meat emulsion instead of oxidation [J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 828–836.
- [40] MACIT A, KIZIL M. Effect of olive leaf extract marination on heterocyclic aromatic amines formation in pan-fried salmon [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102: 3908–3915.
- [41] 赵阳美瑾, 林徐, 李雨羲, 等. 水产品脂质与蛋白质氧化的相互作用及其品质影响的研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(2): 360–368.
- ZHAO YMJ, LIN X, LI YX, *et al.* Research progress on the interaction between lipid and protein oxidation and its effect on quality of aquatic products [J]. Journal of Dalian Ocean University, 2019, 39(2): 360–368.
- [42] 姜浩, 张沐棠, 吴柳清, 等. 姜黄素药食特性及应用综述[J/OL]. 食品与发酵工业, 2024, 1–13. [2025-02-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039522>
- JIANG H, ZHANG MT, WU LQ, *et al.* Review on the medicinal and edible characteristics and application of curcumin [J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2024, 1–13. [2025-02-05]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.039522>
- [43] 陈元元, 吴岩, 刘晓光. 乙偶姻生物合成代谢调控及其应用[J]. 生物学杂志, 2014, 31(5): 76–80, 84.
- CHEN YY, WU Y, LIU XG. Regulation and application of bioanabolic metabolism of ethoin [J]. Journal of Biology, 2014, 31(5): 76–80, 84.
- [44] 俞忠华, 周作良, 陶建华. 二氢月桂烯水合制备二氢月桂烯醇的研究进展[J]. 江西科学, 2011, 29(5): 568–571, 578.
- YU ZH, ZHOU ZL, TAO JH. Research progress in preparation of dihydrolaurenol by hydration of dihydrolaurenol [J]. Jiangxi Science, 2011, 29(5): 568–571, 578.
- [45] 戈光琼, 付延明, 沈昊, 等. 光学活性薄荷醇异构体的合成、衍生及分离[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2023, 46(11): 1542–1548.
- GE GQ, FU YM, SHEN H, *et al.* Synthesis, derivations and separation of optically active menthol isomers [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 46(11): 1542–1548.
- [46] 解万翠, 卢宽, 于靖, 等. 水产品香气研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 11–21.
- XIE WC, LU K, YU J, *et al.* Research progress of aquatic product aroma [J]. Research Progress on Aroma of Aquatic Products, 2022, 40(1): 11–21.
- [47] WANG HX, QIN L, WANG Y, *et al.* Effects of heating conditions on fatty acids and volatile compounds in foot muscle of abalone *Haliotis discus hannai* ino [J]. Fisheries Science, 2014, 80: 1097–1107.

(责任编辑: 于梦娇 蔡世佳)