

酱卤肉制品风味形成机理及影响因素

陆 慧^{1,2} 李 慧^{1,2} 邓 娜^{1,2} 林 飞³ 王建辉^{1,2,3}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 湖南省预制菜工程技术研究中心, 湖南 长沙 410114; 3. 湖南省湘味餐调智造与质量安全工程技术研究中心, 湖南 长沙 410023)

摘要: 酱卤肉制品的独特风味来源于内源性前体物质的热诱导转化, 以及外源性香辛料的风味协同作用。其风味形成机制涵盖蛋白质和脂质的氧化与降解过程, 以及相关次级产物驱动的美拉德反应等多重路径。该综述系统探讨了酱卤肉制品风味化合物的组成特性与调控机制, 重点分析了挥发性和非挥发性物质如何共同构建风味基础, 风味成分的主要来源, 以及加工参数(如温度、时间、卤汤循环次数)如何通过调控反应速率影响风味的强度与稳定性, 并归纳总结了酱卤肉制品风味形成的潜在机理, 以期对酱卤肉制品风味优化与标准化生产提供理论参考。

关键词: 酱卤肉制品; 风味; 形成机理; 调控

Mechanism of flavor formation and its influencing factors in marinated meat products

LU Hui^{1,2} LI Hui^{1,2} DENG Na^{1,2} LIN Fei³ WANG Jianhui^{1,2,3}

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Prepared Dishes, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center of Intelligent Manufacturing and Quality Safety of Xiang Flavored Compound Seasoning for Chain Catering, Changsha, Hunan 410023, China)

Abstract: The distinctive flavor profile of marinated meat products originates from thermally induced transformations of endogenous precursor substances and the synergistic effects of exogenous spices. The flavor formation mechanisms encompass multiple pathways, including oxidation and degradation of proteins and lipids, as well as Maillard reactions driven by related secondary metabolites. This review systematically investigates the compositional characteristics and regulatory mechanisms of flavor compounds in marinated meat products, with a focus on how volatile and non-volatile substances collaboratively form the flavor basis, the main sources of flavor constituents, and how processing parameters (e.g., temperature, duration, and braising cycles) influence flavor intensity and stability by regulating reaction kinetics. The potential mechanisms of flavor formation in marinated meat products are summarized to provide a theoretical reference for flavor optimization and standardized production.

Keywords: marinated meat products; flavor; formation mechanism; regulation

卤制是一种传统的食品加工方法, 被广泛用于各类食品(尤其是肉类食品)的加工。在卤煮过程中, 原料逐渐熟化, 形态得以固定, 质地显著改善, 同时赋予独特的风味^[1]。卤制工艺不仅可有效杀灭微生物, 延长食品保质

期, 还能显著提升产品品质特性^[2]。酱卤肉制品是指以畜禽肉及其副产品为主要原料, 经预处理后加入食盐、酱油等调味料和香辛料一起煮制而成的加工制品^[3], 富含优质蛋白质、脂肪及矿物质(如铁、钙、锌)等营养成分。

基金项目: 国家重点研发计划项目(编号: 2024YFD2401601, 2024YFD2401602); 湖南省科技创新领军人才项目(编号: 2023RC1056); 湖南省重点领域研发计划项目(编号: 2024JK2154, 2024JK2156); 国家自然科学基金青年科学基金项目(编号: 32302188)

通信作者: 王建辉(1980—), 男, 长沙理工大学教授, 博士。E-mail: wangjh0909@163.com

收稿日期: 2025-03-08 **改回日期:** 2025-05-23

引用格式: 陆慧, 李慧, 邓娜, 等. 酱卤肉制品风味形成机理及影响因素[J]. 食品与机械, 2025, 41(9): 30-41.

Citation: LU Hui, LI Hui, DENG Na, et al. Mechanism of flavor formation and its influencing factors in marinated meat products[J]. Food & Machinery, 2025, 41(9): 30-41.

作为中华传统美食,酱卤肉制品相较于其他食品口感更丰富、色泽更加诱人。中国卤制品行业市场容量较大,2023 年行业市场规模达到 3 180 亿元,同比上涨 6.82%^[4]。如今,消费者的期望已从基本的营养需求,转变为在健康饮食的前提下,愈发注重对独特诱人风味的极致追求。这种感官体验源于酱卤肉制品在加工过程中发生的一系列反应,如风味前体物质的降解、脂质氧化和美拉德反应等,这些反应产生的醛类、醇类、萜类及杂环化合物等挥发性风味化合物赋予了酱卤肉制品独特的风味特征^[5]。然而,卤制过程容易导致酱卤肉制品产生异味和有害物质,同时热敏性风味化合物也会流失,因此卤制工艺是影响酱卤肉制品品质的关键因素^[6]。对于酱卤企业来说,配方和工艺已逐渐形成自身特色,但在循环卤制过程中的把控常依赖人工经验,这给酱卤肉制品的风味标准化带来了挑战。

目前,大多数研究已将目光集中于酱卤肉制品卤制过程中的风味解析和加工条件(香辛料配比、卤煮时间和温度等)对其品质的影响^[7-8]。挥发性风味化合物作为酱卤肉制品魅力的核心,其种类与含量会随着卤煮过程的进行不断变化。部分易挥发成分逐渐流失,导致风味逐渐减弱,甚至失去特有的香气。此外,风味是影响消费者偏好的关键因素,会影响其购买决策。因此,研究酱卤肉制品在卤制过程中风味成分的形成机制及调控,对于酱卤企业的标准化生产具有重大意义。

1 酱卤肉制品的特征风味

食品的风味主要由气味和滋味组成,是嗅觉和味觉的综合体验。气味物质具有挥发性,涵盖萜类、醛类、醇类、酮类和杂环类等成分。滋味物质通常为非挥发性物质,主要包含有机酸、糖类、游离氨基酸、氯化钠和呈味核苷酸等,这些物质共同赋予食品“酸”“咸”“鲜”“苦”和“涩”5 种基本味觉。卤汤和酱卤肉制品的特征风味是其最重要的品质特征之一,同时,也是影响酱卤肉制品质量

和消费者接受度的关键指标。酱卤肉制品的风味主要来源于卤汤中的多种成分,如香辛料、调味料和原料本身的特殊香气,再加上卤制过程中热诱导反应的贡献。因此,卤汤的配方和卤制工艺对酱卤肉制品的风味具有显著影响。近年来,随着分析技术的不断进步,越来越多的研究者开始聚焦于酱卤肉制品和卤汤中的风味成分。

1.1 酱卤肉制品风味物质的分析技术

酱卤肉制品的风味因原料来源和卤制工艺的不同而呈现出多样化的特点。在卤制过程中,香辛料的种类及其在卤制反应中的产物差异是造成酱卤肉制品风味多样性的关键因素。为了精准鉴定和分析酱卤肉制品中复杂多样的挥发性风味化合物和非挥发性滋味化合物,当前研究者普遍采用顶空法、蒸馏法、吸附法和溶剂萃取法等风味富集手段。通过这些方法有效提取酱卤肉制品中的风味成分后,再借助风味组学等分析技术进行鉴定和定量分析^[9],从而揭示酱卤肉制品独特风味的化学本质。如表 1 所示,为酱卤肉制品分析时常用到的风味成分分析技术,可以对酱卤肉制品中的风味成分进行精确的鉴定与分析。

1.2 酱卤肉制品的挥发性风味化合物及其风味贡献

酱卤肉制品的芳香化合物会因卤制原料、卤料种类以及卤制条件和次数的不同而有所差异,但卤制所带来的共性特征亦很明显。如表 2 所示,列举了一些常见酱卤肉制品中挥发性风味成分及其香气类型。许九红等^[10]通过 GC-MS 检测分析了三穗特色卤香鸭在卤制过程中的挥发性风味物质,在不同卤煮阶段分别检出 67,94,100 种挥发性风味化合物,包括萜烯类、醛类、醇类、酯类、醚类和含硫杂环等化合物。其中,芳樟醇、己醛、壬醛、辛醛、正庚醛、*D*-柠檬烯、 α -蒎烯、 γ -丁内酯、1-辛烯-3-醇为不同卤制阶段共有的特征风味物质。于恒和等^[19]通过 GC-MS 对酱卤鸭脖的特征气味和滋味进行了剖析,从酱卤鸭脖中共鉴定出 56 种挥发性风味物质,其中酚类、萜烯类和醇类化合物为主要挥发性风味化合物。肉桂酸乙酯、乙基

表 1 常见风味及滋味成分分析技术

Table 1 Common analysis techniques for flavor and taste components

分析技术	英文名称	分析对象
气相色谱—质谱联用	gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS	挥发性物质
全二维气相色谱—嗅闻—质谱	comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, GC $\times$ GC-O-MS	挥发性物质
全二维气相色谱串联飞行时间质谱技术	two-dimensional gas chromatography coupled with time-of-flight mass spectrometry, GC $\times$ GC-TOFMS	挥发性物质
气相色谱—离子迁移谱联用	gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS	挥发性物质
电子鼻	electronic nose, E-nose	挥发性物质
反向液相色谱	reverse phase high performance liquid chromatography, RP-HPLC	滋味物质
液相色谱—串联质谱	high performance liquid chromatography-mass spectrometry, LC-MS	滋味物质
核磁共振	nuclear magnetic resonance, NMR	滋味物质
电子舌	electronic tongue, E-tongue	滋味物质

麦芽酚、丁香酚、苯酚、芳樟醇、苯乙醇、糠醇、 α -松油醇、茴香脑和草蒿脑被鉴定为酱卤鸭脖中的特征风味化合物,整体对鸭脖的甜香、果香和脂香贡献显著。Zhou 等^[20]在酱卤鸭脖中共鉴定出 82 种风味化合物,分别属于醇类、酸类、酯类、酮类、醛类、芳香族化合物、杂环类、单萜类、含氧单萜类和倍半萜类等 45 类化学物质。这些主要挥发性物质来自香料添加、脂质氧化和美拉德反应等。

由此可见,酱卤肉制品的香味是多种挥发性风味物质共同作用的结果,主要包括醇类、醛类、酮类、酯类、萜烯类和酚类等。这些成分主要由卤制原料和卤汤中的香辛料在卤制过程中通过热分解、氧化和美拉德反应等生成,从而赋予酱卤肉制品独特的香气。例如,醇类如乙醇和苯乙醇等,能够增加酱卤肉制品的花香和酒香;醛类如己醛和苯甲醛等,能够增加酱卤肉制品的坚果香和花香;酯类如乙酸乙酯和己酸乙酯等,能够增加酱卤肉制品的甜香和果香。此外,萜烯类成分如芳樟醇和 α -蒎烯等,能够赋予酱卤肉制品特殊的花香、果香和木香;酚类成分如香豆素和丁香酚等,能够提供烟草香和辛香,同时有助于增加卤制品的层次感。这些成分在酱卤肉制品中并不是单独起作用,而是通过相互作用和协同作用共同构成了酱卤肉制品的独特风味。

1.3 酱卤肉制品的非挥发性风味化合物及其滋味贡献

酱卤肉制品的独特魅力很大程度上源于其非挥发性风味化合物,这些化合物赋予酱卤肉制品咸、鲜、辣、甜、酸等多种滋味,显著提升了其口感和风味层次。其中,咸味主要来自卤制过程中添加的食盐(氯化钠)。食盐不仅可以赋予酱卤肉制品咸味,还具有防腐、调节口感和维持食品品质的作用。适量的食盐可以增强酱卤肉制品的风味,同时抑制微生物的生长,确保产品的安全性和稳定性。鲜味主要来源于氨基酸、核苷酸和食盐的结合^[21]。氨基酸如谷氨酸、天冬氨酸等在酱卤肉制品中含量较高,能够显著提升鲜味。核苷酸如 5'-肌苷酸(IMP)和 5'-鸟苷

酸(GMP)也起到重要的增味作用,与其他成分协同作用,增强酱卤肉制品的鲜味。此外,卤制过程中添加的谷氨酸钠(MSG)和氯化钠也能进一步提升鲜味。甜味主要源于酱卤肉制品原料中的天然糖类、卤制过程中添加的糖类调味料以及微生物代谢产生的甜味氨基酸等。适度的甜味可以平衡酱卤肉制品中的咸味和辣味,增加口感层次。例如,卤汤中添加的蔗糖或葡萄糖在卤制过程中逐渐溶解,与肉类和其他原料中的成分相互作用,产生甜味,同时参与焦糖化反应,赋予酱卤肉制品独特的色泽和风味。辣味主要源于酱卤肉制品中使用的辣椒和其他辣味香辛料。辣椒中的辣椒素类物质,尤其是辣椒素和二氢辣椒素,是辣味的主要来源^[22]。这些物质约占辣椒素类物质总量的 90%,赋予酱卤肉制品独特的辣味特征。此外,其他香辛料如花椒、胡椒等也含有辣味成分,进一步丰富了酱卤肉制品的辣味层次。这些滋味物质相互作用,共同营造出酱卤肉制品独特的风味,得到了众多消费者的喜爱和青睐。

2 酱卤肉制品风味来源

2.1 内源性物质贡献

酱卤肉制品特征性风味的形成,其本质在于原料本体中潜在呈味前体物质的一系列复杂转化。这些前体物质,诸如原料基质中天然蕴藏的蛋白质、脂质及硫胺素等大分子物质,原本并不直接具备呈味特性。然而,在热力学的作用下,它们能够发生定向转化。具体来说,在热加工过程中,这些前体物质相互间会发生一系列化学反应。蛋白质因受热而变性,促使肽链断裂,从而释放出游离氨基酸;脂质则会经历水解和氧化,产生醛类、酮类等具有风味特性的物质;核苷酸在受热后会降解,生成如 IMP、GMP 等鲜味增强因子;而硫胺素则通过热分解,形成噻吩、呋喃等化合物,为酱卤肉制品贡献出独特的肉香风味。这些转化产物,包括游离氨基酸、小肽、不饱和脂肪

表 2 常见酱卤肉制品中的挥发性成分及香气类型
Table 2 Volatile organic compounds and their aroma types in common marinated meat products

类型	挥发性成分	香气类型	文献
卤牛肉	茴香醛、4-烯丙基苯甲醚、丁香酚、桉叶油素、茴香脑等	甜香、花香、辛香、草本香、薄荷、甘草香	[3]
卤鸭肉	芳樟醇、己醛、壬醛、 <i>D</i> -柠檬烯、 γ -丁内酯等	铃兰、百合、青草香、花香、奶油香、椰子香	[10]
卤鸭翅	香芹酚、 α -蒎烯、癸醛、(<i>E</i>)-2-壬醛和芳樟醇等	辛辣、木质、脂肪、水果、花香、甜味和坚果味	[11]
炖猪肉	正己醛、(2 <i>E</i> ,4 <i>E</i>)-癸二烯醛、1-辛烯-3-醇、3-羟基-2-丁酮和 2-正戊基呋喃等	青草、脂肪或油炸香、土腥、霉变或发酵香 气、乳脂甜香	[12]
卤鸡腿	肉桂醛、松油醇、桉树脑、丁子香酚、异戊醇等	辛香、木香及清凉感、刺激性辛香	[13]
炖鸡肉	戊醛、己醛、1-辛烯-3-醇、(<i>E</i>)-2-辛烯醛、壬醛等	青草、果香、花香、蜡质香、脂肪、土腥味	[14]
卤鹅肝	蒎烯、蒎烯、 <i>D</i> -柠檬烯、苯甲醛、桉树醇等	松木、柑橘、樟脑香、杏仁甜香、木质	[15]
卤小龙虾尾	异丁酸乙酯、正己酸乙酯、2-丁醇、叶醇、丁醛等	甜香、果香、青草香、绿叶香、脂肪	[16]
卤草鱼	戊醇、正丁醇、己醛、丙醛、环戊酮等	果香、酒精味、青草香、薄荷、木质	[17]
卤猪里脊	乙苯、桉叶醇、3,7-二甲基-1,6-辛二烯-3-醇、己醛、2,3-辛二酮等	甜香、薄荷、花香、木香、青草香、奶香	[18]

酸、核苷酸、硫胺素、还原糖以及其他代谢产物,共同构成了酱卤肉制品风味形成的核心前体库。这一丰富的风味前体库,为酱卤肉制品最终的气味与滋味协同形成,奠定了坚实的物质基础。

2.1.1 蛋白质降解 酱卤肉制品的风味形成体系中,蛋白质作为重要的内源性组分,在卤制加工过程中经历复杂的降解反应机制。蛋白质的降解主要通过酶解和热降解两条途径实现。在卤制初期(温度低于60℃),内源酶发挥主导作用。内源蛋白酶可分为内肽酶和外肽酶两类。内肽酶首先将蛋白质分解为多肽和低相对分子质量化合物,随后外肽酶进一步降解多肽,最终释放出大量游离氨基酸及各类小肽。这些降解产物直接参与酱卤肉制品质地和风味的形成^[23]。当温度超过80℃时,热降解成为主要阶段,蛋白质发生热变性,其三维结构首先发生解折叠,随后肽键断裂形成相对分子质量较小的多肽。在持续加热条件下,短链寡肽可进一步水解生成游离氨基酸。这些降解产物不仅能够直接呈现风味,还能作为风味前体物质参与化学反应。例如,谷氨酸、天冬氨酸和精氨酸等氨基酸既能贡献鲜味等基本滋味,还能通过美拉德反应和Strecker降解等途径,进一步生成挥发性与非挥发性风味物质^[24]。研究^[25]表明,葵花籽蛋白的酶解产物(如游离氨基酸和小肽)作为美拉德反应的前体物质,与还原糖发生反应,生成醛类、酮类、呋喃类、吡嗪类和噻吩类等挥发性风味化合物。此外,不同相对分子质量的肽段在风味形成中具有特定的作用^[26]。除作为风味前体外,蛋白质还是吸附风味物质的关键基质。通过物理吸附作用,蛋白质显著影响香气成分的释放与感知^[27]。例如,鸡胸肉中肌原纤维蛋白和血清蛋白对醛类、醇类等特征风味物质具有特异性保留能力^[28]。此外,蛋白质与脂质的构象互作会调节其吸附容量^[29]。值得注意的是,蛋白质的作用不仅限于调控风味,其水解程度和参与美拉德反应的程度还影响产品的色泽与质构。基于此,通过精准控制蛋白质水解与美拉德反应条件,可以优化加工工艺,从而显著提升酱卤肉制品的风味品质。

2.1.2 脂质水解和氧化 在酱卤肉制品风味形成体系中,脂质承担着双重功能角色:①作为溶剂和风味化合物的载体,承载着风味的传递;②作为风味物质的前身。鉴于多数风味成分具有疏水性,它们更倾向于溶解于同样疏水性的食品脂质之中。更进一步,脂质在加工历程中经由水解与氧化反应,能孕育出具有鲜明特色的风味成分^[30]。脂质水解是脂质转化为风味化合物的起始步骤,其中磷脂和甘油三酯的水解是关键环节。磷脂酶A2通过sn-2酯键特异性水解作用释放多不饱和脂肪酸,而脂肪酶则催化甘油三酯水解生成游离脂肪酸及单双甘酯。这些水解产物,作为风味的前驱物质,进一步参与氧化反应,生成醛类、酮类、酯类等挥发性风味化合物,共同塑造了酱卤肉制品别具一格的风味轮廓。与此同时,脂质水

解进程受到多种因素的共同影响与调控。①盐分,通过调节水分活度,既能抑制也能激活酶的活性,这一机制在干腌火腿的成熟过程中尤为显著,其中游离脂肪酸的累积便与盐分诱导的脱水作用紧密相关^[31]。②引入高脂解活性的微生物,可缩短发酵肉制品风味形成周期。③加工时间和温度亦对脂肪分解速率有着直接的影响。因此,在酱卤肉制品的加工实践中,精确调控脂质的水解程度,不仅能够优化产品的风味品质,还为生产工艺的标准化管理奠定了坚实的理论基础。

脂肪氧化是酱卤肉制品风味形成的主要途径之一,其核心机制是通过自由基介导的链式反应主导特征风味物质的生成途径。不饱和脂肪酸,因其所含的多个烯丙基,相较于饱和脂肪酸,更易遭受氧化,且氧化速率由快到慢依次为亚油酸、油酸和硬脂酸。在氧化历程中,脂肪酸逐步裂解为低相对分子质量化合物,进而产生香气物质。研究^[32]表明,脂质氧化所衍生的挥发性风味化合物,涵盖醛类、醇类、酮类和呋喃等,这些化合物凭借高挥发性和低气味阈值,成为构筑酱卤肉制品特征风味的关键成分。碳链长度为6~10个碳原子的直链醛,例如丙醛、己醛、壬醛和庚醛,是脂肪氧化的主要挥发性风味物质。己醛和壬醛等饱和醛,主要来源于亚油酸和花生四烯酸的氧化,而丙醛和庚醛则主要由 α -亚麻酸和油酸的氧化降解所生成。烯醛和二烯醛则由多不饱和脂肪酸的自氧化所形成,2-异丙基-2-丁烯醛和4-甲基-2-戊烯醛则通过醛醇缩合反应生成^[33]。此外,醇类和酮类也是脂质氧化的典型产物。1-辛烯-3-醇,被确认为鸭肉制品中的特征风味化合物,它主要在亚油酸和花生四烯酸氧化过程中形成,赋予产品浓郁的蘑菇香^[34-35]。而2-戊酮、2-庚酮和2-壬酮等,则带有独特的水果香气,在肉制品中含量颇丰,对酱卤肉制品整体气味影响显著^[36]。这些物质的种类和比例受脂肪酸结构影响,其中双键位置更是直接决定最终氧化产物的分子架构。适度的脂质氧化对于酱卤肉制品风味的稳定性至关重要。适度的氧化有助于典型风味的形成与保持,然而过度氧化则可能引发氧化酸败,产生不良气味。因此,合理控制脂质氧化程度是优化酱卤肉制品风味的关键。

2.1.3 RNA水解 5'-核糖核苷酸,作为肉类风味构成的核心组分,主要源自加工流程中RNA的酶促降解过程。其呈味机制可从两个维度进行阐述:①5'-核糖核苷酸(如IMP、GMP)本身就具备鲜味与肉汤味特征,并且能够通过掩盖硫化物的异味,从而提升食品的适口性^[37];②其与游离氨基酸(如谷氨酸、天冬氨酸)之间的协同效应,能够大幅度增强人们对鲜味的感知^[38],共同构筑起卤制风味的主要架构。相较于传统鲜味剂,核苷酸类物质,特别是IMP与GMP,展现出了更为突出的增味效果。其作用机制主要涉及协同通路:①IMP与GMP能够特异性地结合味觉受体T1R1的VFT结构域,进而触发T1R1/T1R3异源

二聚体受体的构象变化,使之激活。该过程诱导细胞内神经递质释放水平显著上升,并同步上调 T1R1/T1R3 mRNA 的表达量,由此形成一个正反馈调控环路^[39]。② 核苷酸类物质还能够通过调节胞内 Ca^{2+} 浓度的动态平衡,直接作用于味觉受体细胞中 Tar1r1/Tar1r3 基因的转录调控网络,从而进一步提升受体蛋白的合成效率^[40]。相关研究^[41]表明,相较于单独添加 MSG,复合添加低剂量 IMP 与 MSG 可显著增强鸡肉汤的鲜味感知强度。这种协同效应呈现出比例依赖性,当 IMP 与 MSG 质量比为 1:1 时,鲜味强度会攀升至峰值(提升幅度约为 120%),过量则增效衰减。此外,禽类肉制品(如鸭肉)中的 IMP 含量普遍高于畜类肉制品(如牛肉),这一差异直接影响着最终产品的鲜味强度。同时,当加工温度超过 90 °C 时,会导致 IMP 发生热降解,进而加速次黄嘌呤(苦味前体物质)的生成。因此,为了维持风味的稳定性,就需要对加工温度进行精准的调控。

2.1.4 其他呈味物质形成途径 硫胺素作为人体必需的营养物质,同时也是酱卤肉制品风味形成的关键前体物质,在高温卤制过程中通过热降解反应生成含硫、氮的挥发性双环化合物(如呋喃类、噻吩类及脂肪族硫化物),它们可赋予酱卤肉制品独特的肉香特征^[42]。周恒量等^[43]证实硫样香气主要源自硫胺素降解产物,而 Thomas 等^[44]在熟火腿中鉴定出 2-甲基-3-呋喃基二硫醚等 3 种硫胺素衍生成分,这些成分的浓度与硫胺素的富集程度呈正相关,能够显著提升熟肉的香气强度。此外,硫胺素代谢路径还存在性别差异性,这一差异对最终产品的风味轮廓产生显著影响。例如,Zhu 等^[45]发现,雄性南京盐水鸭的主要挥发性风味物质为呋喃醇,而雌性则以 2-乙基呋喃为主。

综上,酱卤肉制品风味的形成源于内源性前体物质在热加工过程中多途径的协同转化。蛋白质经酶解与热降解生成游离氨基酸,既直接贡献鲜味,又作为美拉德反应的关键底物,参与吡嗪类和呋喃类芳香化合物的生成;脂质经水解—氧化反应产生醛类、酮类及脂肪酸,赋予脂肪香与果香基调,其降解产物还可与美拉德反应中间体发生酯化、缩合等二次反应,形成层次丰富的香气特征;硫胺素等含硫前体则通过热解产生噻吩、呋喃等特征性肉香物质,构建了酱卤肉制品的核心香气框架。然而,当前对前体物质风味形成机制的研究仍存在局限,其复杂的反应网络易受原料差异(如物种特异性前体分布)和加工参数(温度、时间)等因素的调控,亟需进一步系统解析各反应路径的协同与竞争关系,并量化其对整体风味轮廓的贡献。

2.2 外源性风味输入

酱卤肉制品香气的形成高度依赖加工过程中香辛料的功能性介入。生鲜原料本身仅呈现基础气味特征(如血腥味),其香气的构建主要依赖卤制阶段香辛料挥发性风味物质的溶出与热反应产物的协同作用。作为天然风味增强剂,香辛料的核心功能体现在以下 3 个方面:① 释放

萜烯类、酚类及醛酮类特征挥发物,构建层次丰富的香气基底;② 修饰原料的固有不良风味(如膻味、腥味);③ 发挥天然抗氧化与抑菌作用,维持产品的品质稳定性^[46]。根据挥发性物质的特征差异,香辛料可分为芳香型(如丁香、八角茴香、桂皮等富含茴香脑、丁香酚的物质)、辛辣型(如辣椒、生姜、大蒜,含辣椒素、姜烯酚等刺激性组分)及清香型(如豆蔻、迷迭香等富含单萜类物质)三类^[47]。在中国传统卤制体系中,常以八角、桂皮和花椒组合作为基础香气,再辅以白芷、砂仁等形成特征香型。Qin 等^[48]在用八角炖煮的肉汤中鉴定出的主要化合物均源自八角本身,如茴香脑、桉树脑、芳樟醇、萜品烯-4-醇、 α -松油醇和雪松醇等。研究^[11]表明,添加八角有助于确保炖肉产品的风味一致性。同时,香辛料还能显著提升消费者对肉制品的接受度,如百里香可有效掩蔽山羊肉的膻味并赋予独特香气。此外,许多香辛料的抗氧化活性水平与合成防腐剂相当^[49],这也是传统卤汤能够长期稳定贮藏的原因之一。

酱卤肉制品风味特征的形成与香辛料主效成分的溶出及迁移规律紧密相连。这些成分的热稳定性差异,直接决定了香气的浓郁度及整个体系的稳定性。香辛料中的活性成分,例如辣椒碱、肉桂醛,因分子结构各异,展现出显著溶出异质性。具体而言,胡椒碱凭借其强热稳定性,在卤制过程中能够高效迁移;而肉桂醛则因对热敏感,其迁移率受到一定限制,这导致两者在卤汤中的浓度呈现动态变化^[50]。蒋莹等^[51]通过深入研究卤汤中辣椒碱、肉桂醛等 5 种关键成分的溶出动力学,揭示出溶出规律深受介质组成的影响,且这 5 种成分在葵花籽油中的溶出效果最为显著。同时,盐浓度也显著影响其溶出行为。林柔汐^[52]针对卤鸭制品的研究进一步表明,辣椒素与肉桂醛分别在卤制 15, 30 min 时达到最大迁移速率。其动态衰减特性要求加工过程中及时补充香辛料,以维持批次间风味的稳定性。这些溶出规律与加工条件(如温度、介质组成)及热稳定性(如耐热性、挥发性)之间的耦合作用,共同构成了香辛料主效成分定向释放的调控基础,为优化卤制工艺提供了理论依据。

此外,盐、糖等辅料在酱卤肉制品风味的形成中也起着重要作用。在高温卤制过程中,盐一方面有助于香辛料和调味料的味道更好地渗透到酱卤肉制品内部,使风味更加浓郁。适量的盐能够促进脂质氧化和蛋白质降解,生成更多的挥发性风味化合物。王子凌等^[16]研究发现,食盐可促进醛类物质生成,在一定范围内增加食盐含量有助于促进肌肉中脂肪的氧化,但若继续增加食盐含量,则会抑制脂肪氧化。另一方面,盐还可以增强肉制品的持水能力,减少水分流失,从而改善产品的口感和质地。糖类则通过双重作用优化感官品质:其甜味与盐的咸味形成味觉平衡,同时在热加工过程中参与美拉德反应和焦糖化反应,生成挥发性物质(如吡嗪类)和特征性色泽。因此,在实际应用中,应根据不同酱卤肉制品和加

工工艺合理控制盐、糖等辅料的添加量,以达到最佳的风味和品质。

3 酱卤肉制品风味形成机理

美拉德反应是肉制品加工与贮藏过程中普遍存在的一种复杂化学反应,其反应底物、中间产物及反应途径的多样性为肉制品带来丰富多变的风味物质,对酱卤肉制品独特风味的形成至关重要。

图1描绘了美拉德反应的机理过程。该反应发生在氨基化合物(如氨基酸、肽类)与还原糖之间,分为3个主要阶段:初期阶段通过羰基缩合与Amadori重排形成稳定中间体;中期阶段中间体经Strecker降解生成醛类(如缬氨酸转化为2-甲基丙醛、异亮氨酸生成2-甲基丁醛)或脱氨基形成1-脱氧酮等化合物,其中2-甲基-3-呋喃硫醇、3-甲基丁醛等物质是北京烤鸭特征风味的关键成分^[53];最终阶段活性羰基化合物通过环化、醇醛缩合等反应生成类黑精及吡嗪、呋喃等杂环化合物,其中含硫化物(如硫化氢)、吡嗪类(由丝氨酸、苏氨酸衍生)及糠醛等三类物质的协同作用构建了酱卤肉制品的复合香气与色泽^[54-55]。反应产物分布受氨基酸/还原糖组成、热加工条件(温度-时间组合)、pH值及水分活度等多参数调控^[56],这些因素通过影响反应路径选择、动力学行为及分子迁移速率,最终决定肉制品风味的特异性与品质稳定性。

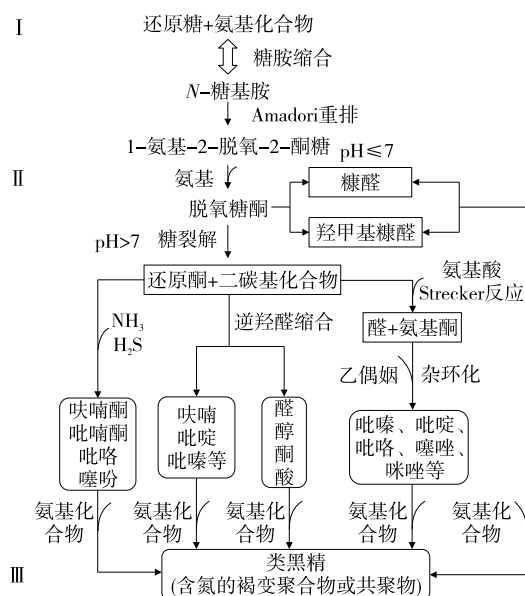


图1 美拉德反应机理图

Figure 1 Schematic illustration of the Maillard reaction mechanism

与此同时,蛋白质降解、脂质氧化和美拉德反应三者之间的相互作用,共同构筑了酱卤肉制品独特的“鲜—香—质”风味复合体系。它们通过底物竞争、自由基传递及中间产物互作形成动态耦合效应。图2展示了三者之

间的互作机理。在这一复杂的风味形成过程中,蛋白质降解起到了核心驱动力的作用,它在分子层面上串联并协同调控了美拉德反应与脂质氧化的路径。蛋白质降解所产生的氨基酸,作为美拉德反应的重要氮源底物,一方面,可以直接与还原糖的羰基发生羰基缩合反应,生成席夫碱中间体,这些中间体再经过一系列的重排、裂解等化学反应,最终形成吡嗪类、呋喃类等特征风味化合物^[57]。另一方面,在转氨酶的催化作用下,氨基酸的氨基会转移至脂质氧化所产生的 α -酮酸上,生成新的 α -氨基酸(这些氨基酸可以作为美拉德反应备用氮源底物)以及酮酸前体。酮酸前体则可以通过二次氧化或继续参与美拉德反应,生成含氮/硫杂环等特征性的风味化合物。Adams等^[58]通过构建赖氨酸或甘氨酸与脂质氧化产生的醛之间的反应模型,发现在加热的氨基酸/脂质氧化产物混合物中能够检测到醛醇缩合产物,而在单独加热的脂质氧化醛中则未能检测到该产物。除了氨基酸可能诱导脂质降解外,脂质氧化产物亦可引发氨基酸降解。在亚油酸氢过氧化物的作用下,脂质过氧化氢产生的自由基能够将羰基反应生成的苯丙酮酸和苯乙醛降解为苯乙酸和苯甲醛^[58]。这种脂质氧化与蛋白质降解之间的交叉反应,不仅极大地丰富了风味前体的种类,还通过自由基介导的次级反应增强了含氮/硫杂环等特征风味化合物的生成强度,从而使得整体风味的层次感与复杂度得到了显著提升。

另外,鉴于脂质氧化和美拉德反应过程中会产生众多物理化学性质相似的化合物,它们的中间体及最终产物会进一步发生相互作用,从而催生出新的风味化合物^[59]。这一系列相互作用的初始环节,是脂质氧化过程中产生的一系列活性自由基,这些自由基随后会释放出美拉德反应的前体物质,如氨、硫化氢等。在此基础上,脂质会进一步经历二次氧化反应,生成多种多样具有肉味的化合物^[36]。这些化合物的一个显著特征,是它们含有包含一个或多个氮、硫原子的杂环结构,以及由4个或更多碳原子组成的长链烷基,典型代表有吡啶、吡嗪、噻吩、噻唑等^[60]。同时,除了氨基酸作为美拉德反应的氮源底物外,美拉德反应过程中生成的活性羰基化合物(如丙二醛、丙酮醛)亦可反向调控蛋白质降解过程。它们通过与 ϵ -氨基赖氨酸形成席夫碱共价交联,不仅改变了蛋白质的空间构象,还暴露了酶切位点,进而加速了内源性蛋白酶(如组织蛋白酶)对蛋白质的定向水解作用。综上,蛋白质降解、脂质氧化和美拉德反应3条途径相互交织,共同作用,共同塑造了酱卤肉制品独特的风味特征。

4 酱卤肉制品风味影响因素

4.1 原辅料种类

酱卤肉制品风味的差异性主要源于原料的化学组成与热加工反应的协同作用。不同种类的肉类,因其特征性成分的差异,主导了风味化合物的不同生成路径:牛肉富含核苷酸及不饱和脂肪酸(如亚油酸),其氧化过程会产生

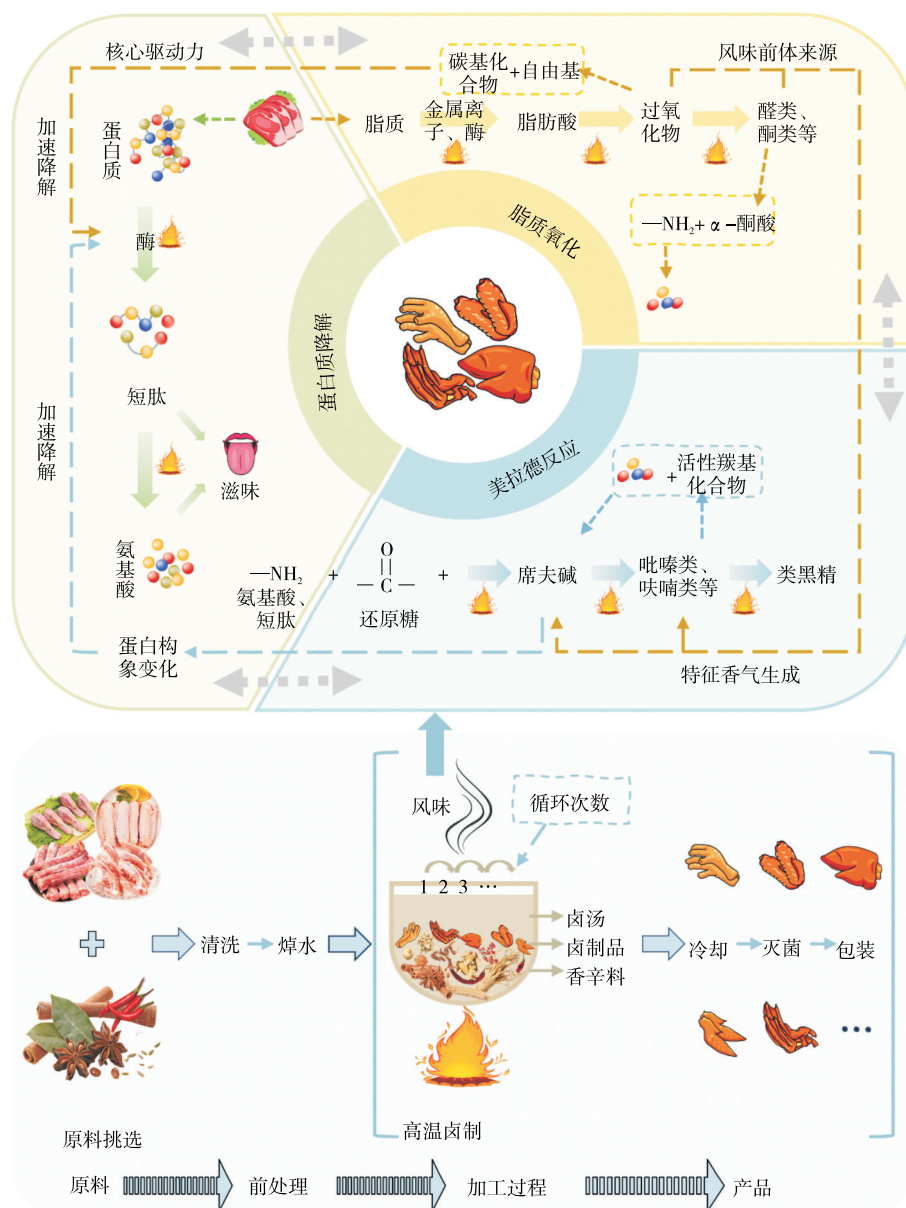


图2 酱卤肉制品卤制过程中蛋白质降解、脂质氧化和美拉德反应之间的互作机理

Figure 2 Schematic illustration of the interaction mechanisms among protein degradation, lipid oxidation, and the Maillard reaction during the stewing process of marinated meat products

醛类(如己醛)和酮类化合物,赋予肉品青草香与脂香基调;猪肉中丰富的支链氨基酸(亮氨酸、缬氨酸)经过 Strecker 降解,生成 2-甲基丙醇、3-甲基丁醇等醇类和酯类带来甜香和果香特征;禽类(如鸡肉和鸭肉)则依赖含硫氨基酸(如半胱氨酸、蛋氨酸)代谢生成短链醛类(如己醛)、硫化物(二甲基硫醚)及含氮杂环化合物(如吡嗪衍生物),呈现独特的刺激性香气。此外,原料部位的差异也通过脂肪分布与蛋白质组成影响风味特征。例如,牛肉里脊的糖代谢产物乙偶姻(奶油香)占比高达 65%,而腹部则因含有较多不饱和脂肪酸,氧化倾向产生青草香(如己醛)^[61]。

此外,辅料香辛料的选择是影响肉制品风味的重要因素。辣椒中的辣椒碱可带来辣味^[62],花椒中的花椒素则具有麻味,这些独特的口感丰富了肉制品的风味层次。同时,部分香辛料具有抗氧化作用,有助于抑制肉制品在加工和贮藏过程中的氧化反应,减少不良风味的生成^[63]。其他辅料的添加也对酱卤肉制品风味有显著影响。糖类在热加工中可发生焦糖化反应,并参与美拉德反应,生成如吡嗪类、呋喃类等特征风味化合物。适量的盐能增强酱卤肉制品的风味和口感,但过量则会压制原有风味,影响口感。适量的酒类在酱卤肉制品加工中能起到去腥和

增香的作用,例如黄酒中的乙醇能与肉中的脂肪酸反应生成酯类化合物,进一步提升酱卤肉制品的香气^[64]。

4.2 加工工艺

酱卤肉制品风味的形成依赖于加工工艺的动态优化,其核心在于通过温度、时间及pH等参数的协同作用,精准调控蛋白质降解、脂质氧化与美拉德反应的动态平衡,从而决定特征风味物质的生成路径。研究表明,高温会加速蛋白质的过度降解,导致质地软化,而低温则抑制风味前体的积累^[65]。当卤制条件为65℃、6 h和95℃、2 h时,草鱼的感官评分和可接受度达到最高,气味、色泽、咀嚼性和总体可接受度均较好^[17]。酱卤猪肉在95℃下酱制110 min,感官评分最高(如色泽、滋味、香气等),此时产品风味浓郁且质构适中。同时,温度升高(如80~100℃)会缩短质构指标(如剪切力、硬度和咀嚼性)达到峰值的时间^[66]。此外,简玉英^[67]发现,采用超声辅助腌制结合低温卤制工艺(腌制时间54 h、煮制温度63℃、煮制时间8 h),酱牛肉的感官评分为97.0分,达到最佳效果。Li等^[68]发现,超声辅助腌制能促进牛肉肌原纤维蛋白结构的展开,增加疏水性及氢键位点的数量;同时,通过电子鼻检测,超声辅助腌制能够有效提高香料的结合,从而增强风味。

4.3 香辛料复配

香辛料的复配在酱卤肉制品风味形成中具有至关重要的作用。不同香辛料的搭配能够赋予酱卤肉制品独特且丰富的风味特征,从而满足消费者对酱卤肉制品多样化风味的需求。研究^[69]表明,单一香料的风味提升效果有限,而合理搭配能够产生协同增效作用,显著提升整体风味品质。如八角、桂皮、小茴香等浓香型香辛料复配使用时,其挥发性风味化合物,如茴香脑、桂皮醛等,可以相互融合,形成更加浓郁的复合香气,使酱卤肉制品的风味更加醇厚^[70]。花椒的麻味成分与辣椒的辣味物质共同作用时,能通过激活不同的味觉受体,形成层次丰富的麻辣口感,这种组合在川卤鸭脖中的效果明显优于单独使用^[71]。同时,不同香料含有的抗菌化合物能够有效预防或减少肉类和家禽产品中的微生物腐败及致病菌生长,产生不同的效果^[72]。

此外,不同地区的卤味配方反映了香辛料组合的独特风味作用。江浙卤水常用八角、桂皮和丁香搭配,其中丁香酚与肉桂醛反应生成的酯类物质,能为猪肉类卤品带来温和的木质香气;潮汕卤水偏好南姜、香茅与沙姜的组合,这类香料中的萜烯类成分相互作用,形成清爽的药草香,特别适合去腥,尤其适用于禽类。某些特殊的香料组合还能创造出新奇的效果,例如云南卤水中草果的樟脑味与香叶的清香通过分子结合,能转化为清凉的余味,从而缓解浓重药香带来的刺激感。

4.4 卤煮次数

酱卤肉制品风味的形成,实则是一个深受多次循环卤煮工艺影响的复杂过程。在传统工艺中,卤汤历经反复的

卤煮,原料肉中的蛋白质和脂肪在持续加热的条件下逐渐分解,并与香辛料成分相互作用,共同推动着风味物质在积累与转化中逐步迈向稳定状态。大量研究表明,随着卤汤循环次数的不断增加,风味性化合物的种类和含量呈现“初期累积(生成>消耗)→中期消耗(生成<消耗)→后期动态平衡(生成≈消耗)”的演变规律。彭婷婷等^[13]研究发现,扒鸡腿中风味化合物种类和含量随着卤制次数的增加,先增加后降低,在煮制4次时达到最大值。而对于一些挥发性较强的化合物(如醇类和醛类)的种类和含量,常与卤煮次数呈显著负相关^[73]。杜超^[14]研究发现,当炖煮次数超过15次时,鸡肉和鸡汤中挥发性风味物质的含量基本稳定,感官评分也趋于平稳,说明卤汤风味已达到相对稳定的状态,进一步增加卤煮次数不会显著提升风味。

相较于挥发性物质,非挥发性物质的种类和含量随着循环次数的增加,则主要呈现出“累积→平衡”演变的趋势。在卤煮过程中,原料肉中的蛋白质、氨基酸和核苷酸等物质会逐渐溶解到卤汤中,从而导致非挥发性物质的种类和含量不断增加。现有研究^[14]表明,鸡汤中的核苷酸含量会随着炖煮次数的增加而显著增加,尤其是IMP等呈味核苷酸的含量增加,这将使得鸡汤的鲜味变得更加浓郁。因此,随着卤制液使用次数的增加,扒鸡腿中游离氨基酸和核苷酸含量也会呈现出增加趋势^[13]。此外,在卤豆干的研究中还发现,卤煮次数对产品的口感和色泽也有着显著的影响。随着卤汁循环次数的增加,卤豆干的硬度和咀嚼性会逐渐增大,而亮度值和黄度值则会显著降低,红度值则会先经历一个减小的阶段,而后又会有所增大。综合来看,卤豆干的整体风味和口感在卤煮9~12次时会达到一个最佳的状态^[74]。

4.5 贮藏条件

贮藏条件通过调控化学变化和微生物活动,直接影响酱卤肉制品风味物质的保留与变化。在贮藏过程中,酱卤肉制品的风味损失主要来自脂肪氧化、香味物质挥发以及不良气味生成,这些过程受到温度、湿度、氧气和光照等因素的影响。研究^[75]表明,低温能有效抑制熟肉制品中微生物和酶的活性,一定程度减缓脂质氧化,保持风味;而高温则会加速肉制品的腐败和氧化,产生不良风味。从贮藏时间的角度来看,短时间的贮藏通常不会对酱卤肉制品的风味产生显著影响。然而,随着贮藏时间的延长,微生物和酶的作用开始逐渐分解酱卤肉制品中的营养成分,脂质氧化现象加剧,从而导致风味逐渐变差。当贮藏时间达到一定程度时,酱卤肉制品甚至会发生腐败变质,产生恶臭等不良风味^[76]。为了延长酱卤肉制品的保质期并保持其优良风味,研究者们采用了多种技术手段。例如,张顺君等^[77]发现,使用超高压杀菌处理的酱卤肉制品在贮藏90 d后,菌落总数仍保持较低水平,表明其具有良好的杀菌效果。余文志^[78]则通过制备植物精油固体保鲜剂,有效抑制酱卤鸭脖中微生物的生长,延

缓脂肪和蛋白质的氧化,进而延长了货架期。

5 展望

当前,酱卤肉制品风味形成机制及调控研究已取得了阶段性的进展。这些成果主要体现在对风味物质的深入解析、加工工艺的不断优化以及香辛料协同作用机制的探索等关键方向上。借助现代分析技术,研究者们已系统鉴定出了酱卤肉制品中挥发性与非挥发性风味物质的组成,明确了内源性前体(如蛋白质、脂质、核苷酸)的热转化路径,以及外源性香辛料的协同增效机制。同时,加工参数(如温度、时间、循环次数)对风味物质生成与稳定性的影响也逐步明晰,为原料筛选、复合香辛料调配及智能化工艺控制的提升提供了理论依据。然而,现有研究仍存在以下局限:循环卤制过程中风味物质的动态平衡机制尚缺乏系统解析;美拉德反应与脂质氧化等多途径协同作用的具体机制也尚未完全清晰;智能化调控技术尚未形成标准化的体系;贮藏期风味衰减规律与保鲜技术的研究也相对薄弱等。因此,未来的相关研究应聚焦以下几个方向:① 深入解析卤制过程中风味前体转化路径及关键中间产物的动态变化规律;② 构建循环卤汤的风味物质数据库,开发卤汤品质实时监测技术与补料调控策略;③ 结合新型抗氧化剂与绿色保鲜技术,抑制贮藏期氧化酸败与特征风味流失;④ 建立消费者感官偏好与风味物质组群的关联模型,指导个性化产品设计。通过跨学科技术融合(如组学技术、智能传感)与标准化评价体系的协同创新,有望实现酱卤肉制品风味品质的精准调控与产业升级。

参考文献

- [1] 王浩明,郑海波,李景军,等. 酱卤肉制品关键加工技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(8): 102-107.
WANG H M, ZHENG H B, LI J J, et al. Recent progress in key processing technologies for soy sauce and pot-roast meat products[J]. Meat Research, 2020, 34(8): 102-107.
- [2] YANG X D, ZHANG S S, LEI Y H, et al. Preservation of stewed beef chunks by using calcium propionate and tea polyphenols[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 176: 114491.
- [3] 屠明亮. 循环卤煮对卤牛肉、卤汤品质特性及风味物质变化规律的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021: 8-13.
TU M L. Effects of circular stewing on quality characteristics and flavor components of stewed beef and stewed soup[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021: 8-13.
- [4] 中国产业研究院. 2024—2029年卤制食品行业市场调查分析及发展前景展望报告[EB/OL]. (2024-10-15) [2025-02-28]. <https://www.chinairn.com/report/20241015/102355524.html>.
The Chinese Academy of Industry Economy Research. 2024—2029 marinated food industry market research analysis and development prospect report[EB/OL]. (2024-10-15) [2025-02-28]. <https://www.chinairn.com/report/20241015/102355524>.

html.

- [5] 周琪,张佳敏,王博,等. 肉制品风味形成机制及加工方式对风味影响的研究进展[J]. 西华大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 74-84.
ZHOU Q, ZHANG J, WANG B, et al. Research progress on the formation mechanism of meat flavor and the influence of processing methods on it[J]. Journal of Xihua University (Natural Science Edition), 2024, 43(4): 74-84.
- [6] 郭慧,张宝雪,孔玲,等. 超声波辅助定量卤制对茶香味卤煮牛肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 107-115.
GUO H, ZHANG B X, KONG L, et al. Effect of ultrasonic-assisted quantitative cooking on the quality of tea-flavored stewed beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 107-115.
- [7] 谢美娟,何向丽,李可,等. 卤煮时间对酱卤鸡腿品质的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 26-30.
XIE M J, HE X L, LI K, et al. Effect of cooking time on quality of sauce stewed chicken leg[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21): 26-30.
- [8] 毕姗姗,赵改名,柳艳霞,等. 煮制条件对卤鸡肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(8): 240-244.
BI S S, ZHAO G M, LIU Y X, et al. Effect of cooking conditions on quality of stewed chicken[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(8): 240-244.
- [9] 李林,邓娜,张博,等. 多组学技术及其在食品研究中的应用[J]. 食品与机械, 2023, 39(2): 17-24.
LI L, DENG N, ZHANG B, et al. Advances of multi-omics and its research progress in food[J]. Food & Machinery, 2023, 39(2): 17-24.
- [10] 许九红,王修俊,杨丽平,等. 三穗特色卤香鸭卤制过程中挥发性风味物质的变化[J]. 中国食品学报, 2023, 23(12): 289-301.
XU J H, WANG X J, YANG L P, et al. The changes of volatile flavor compounds of Sansui characteristic marinated duck during marination[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(12): 289-301.
- [11] 王霏霏. 循环卤制加工过程中卤汤理化特性和风味变化研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 87-90, 13.
WANG F F. Study on the physicochemical properties and flavor changes of braised soup during the cyclic stewing processing[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 87-90, 13.
- [12] 刘芮嘉,田子龙,孙杰,等. 不同组合香辛料对猪肉汤挥发性风味物质的影响[J]. 精细化工, 2023, 40(7): 1488-1496.
LIU R J, TIAN Z L, SUN J, et al. Effect of different spice combinations on volatile flavor compounds in pork broth[J]. Fine Chemicals, 2023, 40(7): 1488-1496.
- [13] 彭婷婷,张春江,黄峰,等. 卤制液循环使用对扒鸡腿非挥发性和挥发性风味成分变化规律的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 255-266.
PENG T T, ZHANG C J, HUANG F, et al. Changes of non-volatile and volatile flavor compounds in braised chicken legs during the reuse of marinating liquid[J]. Modern Food Science

- and Technology, 2016, 32(11): 255-266.
- [14] 杜超. 反复炖煮对鸡肉和鸡汤风味品质的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020: 4-5.
- DU C. Effect of repeated stewing on the flavor formation of chicken and chicken broth[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020: 4-5.
- [15] 林婉玲, 曾姣, 郑秋纯, 等. 不同卤料处理方式对卤味鹅肝挥发性风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(6): 243-251.
- LIN W L, ZENG J, ZHENG Q C, et al. Effect of different spice processing treatments on the volatile flavor components of pot-stewed goose liver[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(6): 243-251.
- [16] 王子凌, 张子豪, 曾璐瑶, 等. 不同卤制加工阶段中食盐添加量对小龙虾尾品质及挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 52-60.
- WANG Z L, ZHANG Z H, ZENG L Y, et al. Effect of salt addition at different processing stages on the quality and volatile flavor components of marinated crayfish tails[J]. Food Science, 2024, 45(11): 52-60.
- [17] 余亚琴, 谭春明, 聂诗, 等. 不同卤制条件对酱卤草鱼肉感官品质、理化特性和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 261-272.
- YU Y Q, TAN C M, NIE S, et al. Effects of different marinade conditions on sensory quality, physicochemical properties and flavor of sauced grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) meat [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 261-272.
- [18] 马非, 邹延军, 刁欣悦. 酱制时间对传统酱卤猪肉制品风味及质构变化规律的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 55-63.
- MA F, HUAN Y J, DIAO X Y. Effect of sauce time on the flavor and texture change of traditional sauce and braised pork products[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 55-63.
- [19] 于恒和, 马一凡, 韩东, 等. 酱卤鸭脖的特征风味物质剖面解析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 259-271.
- YU H H, MA Y F, HAN D, et al. Profile analysis of the characteristic flavor substances of soy-marinated duck neck[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(3): 259-271.
- [20] ZHOU J J, HAN Y Q, ZHUANG H N, et al. Influence of the type of extraction conditions and fiber coating on the meat of sauced duck neck volatile compounds extracted by solid-phase microextraction (SPME) [J]. Food Analytical Methods, 2015, 8(7): 1 661-1 672.
- [21] 侯小艺, 王建辉, 邓娜, 等. 乳酸菌对发酵蔬菜风味影响研究进展[J]. 食品与机械, 2023, 39(4): 232-240.
- HOU X Y, WANG J H, DENG N, et al. Research progress on the effect of lactic acid bacteria on the flavor of fermented vegetables[J]. Food & Machinery, 2023, 39(4): 232-240.
- [22] LIU M, DENG N, LI H, et al. Characterization and comparison of flavors in fresh and aged fermented peppers: impact of different varieties[J]. Food Research International, 2024, 182: 114187.
- [23] 郑云, 郑爽, 周天硕, 等. 肌肉蛋白质降解对发酵肉制品品质影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 476-483.
- ZHENG Y, ZHENG S, ZHOU T S, et al. Research progress on the effect of muscle protein degradation on the quality of fermented meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 476-483.
- [24] 于梓涵, 吴冬蕊, 孔佑梦, 等. 美拉德反应对肉类风味物质形成影响的研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(12): 209-214.
- YU Z Y, WU D R, KONG Y M, et al. Research progress of effect of maillard reaction on formation of meat flavor substances[J]. China Condiment, 2024, 49(12): 209-214.
- [25] 刘秀梅, 王媛, 李梦雨, 等. 葵花籽蛋白美拉德肽的制备及其呈味研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 213-223.
- LIU X M, WANG Y, LI M Y, et al. Preparation and flavor characteristics of maillard peptides from sunflower seed protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 213-223.
- [26] KARANGWA E, MUREKATETE N, HABIMANA J D D, et al. Contribution of crosslinking products in the flavour enhancer processing: the new concept of Maillard peptide in sensory characteristics of Maillard reaction systems[J]. Journal of Food Science and Technology, 2016, 53(6): 2 863-2 875.
- [27] OGASAWARA M, KATSUMATA T, EGI M. Taste properties of Maillard-reaction products prepared from 1 000 to 5 000 Da peptide[J]. Food Chemistry, 2006, 99(3): 600-604.
- [28] CHEN X, XU X L, LIU D M, et al. Rheological behavior, conformational changes and interactions of water-soluble myofibrillar protein during heating[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 524-533.
- [29] 聂若彤, 魏相茹, 张德权, 等. 肉制品中蛋白质、脂质及其相互作用吸附挥发性风味物质机理研究进展[J]. 肉类研究, 2023, 37(4): 41-47.
- NIE R T, WEI X R, ZHANG D Q, et al. Mechanism of adsorption of volatile flavor compounds by proteins, lipids and their interaction in meat products: a review[J]. Meat Research, 2023, 37(4): 41-47.
- [30] 王建辉, 王秀, 陈奇, 等. 氧化分解过程中亚油酸组成成分及挥发性物质的变化[J]. 食品与机械, 2016, 32(5): 5-10.
- WANG J H, WANG X, CHEN Q, et al. Study on oxidation degradation products of linoleic acid[J]. Food & Machinery, 2016, 32(5): 5-10.
- [31] LIU X, PIAO C X, JU M, et al. Effects of low salt on lipid oxidation and hydrolysis, fatty acids composition and volatiles flavor compounds of dry-cured ham during ripening[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115347.
- [32] LI H, DENG N, CAI Y J, et al. Dynamic changes in postmortem quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) muscle: from the perspectives of muscle degradation and flavor evolution[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101751.
- [33] TATIYABORWORNTHAM N, OZ F, RICHARDS M P, et al. Paradoxical effects of lipolysis on the lipid oxidation in meat and meat products[J]. Food Chemistry: X, 2022, 14: 100317.
- [34] XIA C L, HE Y X, CHENG S, et al. Free fatty acids

- responsible for characteristic aroma in various sauced-ducks [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128493.
- [35] LI C, AL-DALALI S, WANG Z P, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC-MS-O, GC-IMS, and E-nose[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.
- [36] FU Y H, CAO S Y, YANG L, et al. Flavor formation based on lipid in meat and meat products: a review[J]. Journal of Food Biochemistry, 2022, 46(12): e14439.
- [37] ZHANG Y, ZHANG Y J, LI H, et al. Effect of 4 °C and ice temperature on umami-enhancing nucleotides of conditioned pork[J]. Food Chemistry, 2023, 401: 134146.
- [38] MOERDIJK-POORTVLIET T C W, DE JONG D L C, FREMOUW R, et al. Extraction and analysis of free amino acids and 5'-nucleotides, the key contributors to the umami taste of seaweed[J]. Food Chemistry, 2022, 370: 131352.
- [39] 余炎阳. 基于 TIR1-VFT 的传感器构建及鲜味物质相互作用评价研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2023: 36-52.
- YU Y Y. TIR1-VFT-based sensor construction and evaluation of umami substance interactions[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2023: 36-52.
- [40] 王晶, 张勇, 黄铁军. 动物鲜味受体的研究进展及其基因表达调控[J]. 动物营养学报, 2016, 28(9): 2 702-2 708.
- WANG J, ZHANG Y, HUANG T J. Umami receptors: research progress and gene expression regulation[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2016, 28(9): 2 702-2 708.
- [41] MA F, LI Y, ZHANG Y L, et al. Effects of umami substances as taste enhancers on salt reduction in meat products: a review [J]. Food Research International, 2024, 185: 114248.
- [42] 宋长坤, 徐世明, 杨建荣, 等. 酱牛肉加工过程中硫胺素的含量变化研究[J]. 农产品加工(学刊), 2012(11): 27-29, 33.
- SONG C K, XU S M, YANG J R, et al. Changes of thiamine of spiced beef during processing[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2012(11): 27-29, 33.
- [43] 周恒量, 胡玉娇, 李诚, 等. 风味泡鹅肉挥发性风味物质 GC-MS 检测中的 HS-SPME 萃取工艺优化[J]. 食品与机械, 2016, 32(3): 82-87, 112.
- ZHOU H L, HU Y J, LI C, et al. Optimization of extraction process for HS-SPME in GC-MS of volatile compounds in flavor pickle goose[J]. Food & Machinery, 2016, 32(3): 82-87, 112.
- [44] THOMAS C, MERCIER F, TOURNAYRE P, et al. Effect of added thiamine on the key odorant compounds and aroma of cooked ham[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 790-795.
- [45] ZHU Z S, PIUS BASSEY A, CAO Y Q, et al. Meat quality and flavor evaluation of Nanjing water boiled salted duck (NWS D) produced by different Muscovy duck (*Cairina moschata*) ingredients[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133833.
- [46] BAO Y J, REN X P, ZHU Y X, et al. Comparison of lipid radical scavenging capacity of spice extract in situ in roast beef with DPPH and peroxy radical scavenging capacities in vitro models[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 130: 109626.
- [47] 张根生, 徐桂杨, 苏文文, 等. 天然香辛料在肉制品加工中应用进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(1): 203-208.
- ZHANG G S, XU G Y, SU W W, et al. Application progress of natural spices in processing of meat products[J]. China Condiment, 2024, 49(1): 203-208.
- [48] QIN Y X, CAI D D, ZHANG D N, et al. Characteristics of volatile flavor components in stewed meat and meat broths prepared with repeatedly used broths containing star anise[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14 (1): 557-572.
- [49] SHI J R, XU J H, LIU X, et al. Evaluation of some artificial food preservatives and natural plant extracts as antimicrobial agents for safety[J]. Discover Food, 2024, 4(1): 89.
- [50] 艾有伟, 蔡玉洁, 王宏勋, 等. 酱卤鸭脖制品加工过程中胡椒、桂皮主效成分的迁移特性[J]. 食品工业, 2021, 42(4): 103-107.
- AI Y W, CAI Y J, WANG H X, et al. The migration characteristics of main components in pepper and cinnamon during the processing of stewed duck neck[J]. Food Industry, 2021, 42(4): 103-107.
- [51] 蒋莹, 邢政, 吴婷, 等. 卤汤中 5 种香辛料主效成分的提取检测和溶出规律研究[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 1-6, 14.
- JIANG Y, XING Z, WU T, et al. Study on extraction, detection and dissolution rule of five main effective components of spices in marinade[J]. China Condiment, 2022, 47(9): 1-6, 14.
- [52] 林柔汐. 卤鸭制品卤制过程香辛料主要成分迁移规律及品质保持研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 56-64.
- LIN R X. Study on the migration law of main components and quality maintenance of spices in marinated duck products[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 56-64.
- [53] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Generation of key aroma compounds in Beijing roasted duck induced via Maillard reaction and lipid pyrolysis reaction[J]. Food Research International, 2020, 136: 109328.
- [54] ZHAO J, WANG M, XIE J C, et al. Volatile flavor constituents in the pork broth of black-pig[J]. Food Chemistry, 2017, 226: 51-60.
- [55] SUN A, WU W, SOLADOYE O P, et al. Maillard reaction of food-derived peptides as a potential route to generate meat flavor compounds: a review[J]. Food Research International, 2022, 151: 110823.
- [56] KERTH C R, MILLER R K. Beef flavor: a review from chemistry to consumer[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2015, 95(14): 2 783-2 798.
- [57] 毛涵涛, 李慧, 尹世鲜, 等. 黑蒜加工过程中风味物质变化研究进展[J]. 食品与机械, 2024, 40(5): 227-233.
- MAO H T, LI H, YIN S X, et al. Research progress on the changes in flavor substances during black garlic processing[J]. Food & Machinery, 2024, 40(5): 227-233.
- [58] ADAMS A, KITRYTĖ V, VENS KUTONIS R, et al. Model studies on the pattern of volatiles generated in mixtures of amino acids, lipid-oxidation-derived aldehydes, and glucose[J].

- Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(4): 1 449-1 456.
- [59] SHAHIDI F, HOSSAIN A. Role of lipids in food flavor generation[J]. Molecules, 2022, 27(15): 5 014.
- [60] AHN J, CHOI E, LEE K-G. Analysis of volatiles and α -dicarbonyl compounds in Maillard reaction products derived from 2'-fucosyllactose and amino acids[J]. Food Research International, 2025, 205: 115975.
- [61] PARK M K, KIM B G, KANG M C, et al. Distinctive volatile compound profile of different raw meats, including beef, pork, chicken, and duck, based on flavor map[J]. Applied Food Research, 2025, 5(1): 100655.
- [62] LIU M, DENG N, HOU X Y, et al. Characterisation of flavour profiles and microbial communities of fermented peppers with different fermentation years by combining flavouromics and metagenomics[J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138550.
- [63] 程志敏, 陈彦荣, 王建辉, 等. 青花椒精油对致龋菌的体外抑菌活性[J]. 食品科学, 2022, 43(21): 70-77.
- CHENG Z M, CHEN Y R, WANG J H, et al. Antibacterial activity of essential oils from *Zanthoxylum schinifolium* siebold & zucc. against cariogenic bacteria[J]. Food Science, 2022, 43(21): 70-77.
- [64] 朱斌, 骆佳琪, 关斌, 等. 传统黄酒的风味成分及品质控制研究进展[J]. 中国酿造, 2024, 43(9): 9-13.
- ZHU B, LUO J Q, GUAN B, et al. Research progress on flavor components and quality control of traditional Huangjiu[J]. China Brewing, 2024, 43(9): 9-13.
- [65] ZHAO D D, FANG Y Z, WEI Z X, et al. Proteomics reveals the mechanism of protein degradation and its relationship to sensorial and texture characteristics in dry-cured squid during processing[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101409.
- [66] 黄艳梅. 酱卤肉制品的工艺改进及综合保鲜技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016: 25-28.
- HUANG Y M. Study on the process improvement and the synthetic preservation technology of spiced-meat[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016: 25-28.
- [67] 简玉英. 低温酱卤猪肉加工工艺优化及涂膜保鲜对其品质的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2023: 32-55.
- JIAN Y Y. Optimization of processing technology of low temperature sauced meat and the effect of coating preservation on its quality abstract[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2023: 32-55.
- [68] LI C K, SUN Y Y, PAN D D, et al. Contribution of ultrasound-assisted protein structural changes in marinated beef to the improved binding ability of spices and flavor enhancement[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2025, 105(2): 1 239-1 250.
- [69] ESCHEVINS A, GIBOREAU A, ALLARD T, et al. The role of aromatic similarity in food and beverage pairing[J]. Food Quality and Preference, 2018, 65: 18-27.
- [70] 邹浩, 李正杰, 杨艺, 等. 浓香型天然香辛料风味特征及对肉制品风味形成影响的研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(18): 355-365.
- ZOU H, LI Z J, YANG Y, et al. Research progress on flavor characteristics of strong fragrance spices and their effects on flavor formation of meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(18): 355-365.
- [71] 程杰, 罗洲, 肖书剑, 等. 辣椒、花椒及其制品辣度和麻度检测研究现状[J]. 中国调味品, 2023, 48(6): 209-215.
- CHENG J, LUO Z, XIAO S J, et al. Research status of pungency degree and numb-taste intensity detection of chili, *Zanthoxylum bungeanum* and their products[J]. China Condiment, 2023, 48(6): 209-215.
- [72] ANGGITA G, SETIA BUDI F, KUSUMANINGRUM H D. Meta-analysis on effect of essential oils and extracts of spices on the microbiological quality of meat and poultry products[J]. Sains Malaysiana, 2023, 52(3): 783-794.
- [73] 秦艳秀. 香辛料反复使用对猪肉汤挥发性风味成分的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019: 4-36.
- QIN Y X. Effects of reused spices on volatile flavor compounds of pork broth[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019: 4-36.
- [74] 吴国庆, 黄展锐, 郑奕柔, 等. 不同卤汁循环次数下卤豆干及卤汁品质特性变化规律研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(16): 228-234, 241.
- WU G Q, HUANG Z R, ZHENG Y R, et al. Study on change rule of quality characteristics of leisure-dried tofu and marinade under different marinade recycling cycles[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(16): 228-234, 241.
- [75] 张慢, 熊晓筱, 刘俊, 等. 真空低温烹调技术对肉制品品质的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(11): 333-340.
- ZHANG M, XIONG X X, LIU J, et al. Recent process on the effect of sous vide cooking technology on the quality of meat product[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(11): 333-340.
- [76] 赵鸾, 章杰. 贮藏温度、时间和加工工艺对熟肉制品品质的影响[J]. 南方农业, 2017, 11(24): 121-123.
- ZHAO L, ZHANG J. Effect of storage temperature, time and processing on the quality of cooked meat products[J]. South China Agriculture, 2017, 11(24): 121-123.
- [77] 张顺君, 王东亮, 陈宏柱, 等. 超高压杀菌对酱卤肉制品贮藏期品质的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(12): 54-60.
- ZHANG S J, WANG D L, CHEN H Z, et al. Effect of ultra-high-pressure sterilization on the quality of marinated meat products during storage[J]. Meat Research, 2023, 37(12): 54-60.
- [78] 余文志. 酱卤鸭脖优势腐败菌初步鉴定及植物精油固体保鲜剂对其贮藏品质的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2024: 55-62.
- YU W Z. Preliminary identification of dominant spoilage bacteria in pot-stewed duck neck and study on the storage quality of plant essential oils solid preservative[D]. Nanchang: Nanchang University, 2024: 55-62.