

邹汪桦^{1,2} 侯小艺^{1,2} 刘 妙^{1,2} 邓 娜^{1,2} 倪潘显志^{1,2}
李 慧^{1,2} 付浩华^{1,2} 王建辉^{1,2,3}

关键词: 鱼肉; 热加工; 风味变化; 呈味机制; 美拉德反应

Effects of thermal processing methods on flavor quality of fish meat and differential formation mechanisms: a review

ZOU Wanghua^{1,2} HOU Xiaoyi^{1,2} LIU Miao^{1,2} DENG Na^{1,2} NI Panxianzhi^{1,2}
LI Hui^{1,2} FU Haohua^{1,2} WANG Jianhui^{1,2,3}

Keywords: fish meat; thermal processing; flavor change; flavor formation mechanism; Maillard reaction

2023年中国水产品总产量为7 116.17万t,其中鱼类总产量为3 714.15万t^[1]。鱼肉加工方式多样,常见加工方式有热加工、冷藏、发酵、腌制等,其中热加工是鱼肉加工最常用的方式,而蒸制、水煮、烤制和油炸是鱼肉热加

Citation:ZOU Wanghua, HOU Xiaoyi, LIU Miao, et al. Effects of thermal processing methods on flavor quality of fish meat and differential formation mechanisms: a review[J]. Food & Machinery. 2026, 42(5): 222-232.

工的主要方式。热加工方式不同,鱼肉的风味差异较大,且风味物质的种类也会因原料差别而有所差异^[2]。热加工处理会加速鱼肉蛋白质和脂肪的氧化分解,促进美拉德反应,产生醛类、醇类、酮类、呋喃类、游离氨基酸、呈味核苷酸、有机酸等特征风味物质^[3-6],且热加工过程中各反应间的协同作用也会赋予鱼肉各种独特风味。目前,关于鱼肉热加工风味的研究普遍存在关注单一热加工方式的局限性。现有文献多聚焦于加热前后鱼肉风味的宏观变化,较少从蛋白质降解、脂质氧化以及美拉德反应之间协作的层面系统解析不同热加工方式对风味生成及感官感受的差异性影响,尤其是缺乏对比分析各加工方式下挥发性化合物的生成规律、氨基酸及核苷酸含量变化以及蛋白质结构变性过程的深入研究。因此,系统梳理不同热加工方式下鱼肉的特征风味变化规律并演绎其潜在机制,将有利于完善后续研究体系,优化鱼肉热加工条件,从而促进鱼肉特征风味的改善并提高产品的加工深度,满足市场特色需求。

1 鱼肉主要热加工方式及其特点

鱼肉的热加工方式多样,各种方式均能赋予鱼肉独特的风味和口感。不同热加工方式的区别主要在于传热介质、温度控制及水分保持程度的不同,这导致不同热加工方式下鱼肉的风味和品质各异^[7]。

1.1 鱼肉的不同热加工方式

蒸制利用水蒸气传热,具有温度稳定、湿度高、能最大程度保留鱼肉原味和营养等特点,是常见的鱼肉加工手段。蒸制时间是影响鱼肉风味和品质的重要因素。蒸制时间过短,鱼肉不能完全熟透,不仅影响鱼肉的风味和口感,还存在微生物危害等食品安全隐患;蒸制时间过长,不仅会使鱼肉的营养成分流失过多,还会影响鱼肉的风味和口感^[8]。水煮是利用液体的热传导和对流作用,在

接近或达到沸点的温度下使其成熟的热加工方式,能促进鱼肉营养成分的适度水解,提升其生物利用率,同时形成特有的色泽与风味,保留鱼肉的食用价值,契合健康饮食理念^[9]。油炸是将鱼肉浸没在大量热油中,利用油脂的高温进行加热,使其快速成熟并形成特定质地的热加工方式。油炸具有加热迅速、高油高热量等特点,能赋予鱼肉更好的质地、颜色和风味,但长时间的油炸处理会产生一些潜在危害物如丙烯酰胺和杂环胺等^[10]。烤制是一种利用干热空气或明火或其他热源产生的辐射热直接或间接对食品进行加热,使其成熟并发生褐变反应的热加工方式。烤制过程中,鱼肉蛋白质的热变性、脂肪氧化与美拉德反应共同作用,形成了烧烤鱼制品特有的口感和风味^[11]。

4种热加工方式的工艺流程如图1所示。

1.2 不同热加工方式的特点

不同热加工方式下鱼肉的特征差异主要体现在传热介质、加热时间以及加热温度的不同,导致鱼肉蛋白质降解、脂质氧化以及美拉德反应程度及各反应间的协同程度不同,从而生成风味物质的种类和含量各异。不同热加工方式间的特征差异见表1。

2 热加工方式对鱼肉风味特征的影响

风味是人类对食物感官的综合感受,也是评价食品品质最重要的指标之一^[12]。食品风味物质由挥发性化合物和非挥发性化合物组成,风味的形成取决于挥发性分子到达鼻子传感器引起的气味以及非挥发性分子与口腔味蕾相互作用引起的滋味^[13]。

2.1 不同热加工方式下特征香气物质的差异

鱼肉香气的形成归因于醛类、酸类、酯类、萜烯类、吡嗪类和呋喃类等多种化合物的共同作用^[14]。热加工方式不同导致鱼肉的香气物质组分不同。彭海川等^[15]研究发

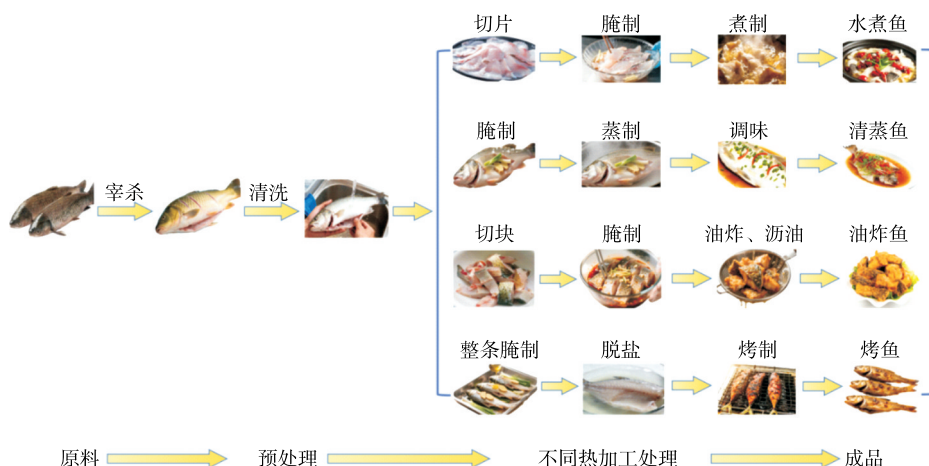


图1 4种热加工方式的工艺流程

Figure 1 Flowchart of four thermal processing methods

表 1 不同热加工方式的特征差异

Table 1 Characteristic differences among different thermal processing methods

加工方式	传热介质	加工温度/℃	风味特点	工艺缺陷
蒸制	水蒸气	100	鲜味、甜味为主导	呈色及风味单一
水煮	水/汤汁	100	可溶性风味物质流出	质构松散、风味流失严重
油炸	热油	160~200	油脂风味掩盖鱼肉风味	油脂氧化严重,可能生成潜在危害物
烤制	干热空气	150~250	有独特烤制风味	油脂热氧化过度,可能生成潜在危害物

现,在不同烹饪方式下,鲈鱼肉中挥发性成分的组成存在明显差异。清蒸时以醛类为主,相对含量为 62.28%,醇类次之,主要成分包括己醛、庚醛、辛醛、壬醛和 1-辛烯-3-醇;煎炸时以烃类为主,占比 20.19%,醛类和酮类次之,主要成分为己醛、壬醛、烯丙基丙酯和戊烷;烘烤时以醇类为主,相对含量为 22.02%,烃类次之,其中 3-辛酮、正己醇、1-辛烯-3-醇、4,5-二甲基辛烷和戊烷等含量较高。在蒸制的鲈鱼肉中共检出 62 种挥发性物质,包括 13 种醇类、12 种酯类、8 种醛类、8 种烷烃类、6 种酚类、6 种含氮类、4 种酸类、2 种硫类、2 种酮类和 1 种醚类;其中关键气味物质为 4-异丙基苯甲醇、 α -松油烯-7-醛、苯并噻唑、己醛和花柏烯^[16]。Ding 等^[17]研究表明,蒸制处理下鱼肉的主要挥发性化合物为烷烃、酯类、醛类和烯烃,而经油炸和水煮处理后,鱼肉的主要挥发性化合物为烷烃。虽然经热加工处理后鱼肉的烷烃含量均较高,但烷烃的阈值通常很高,因此它们对风味的贡献较低^[18]。综合各类研究结果,酯类和醛类化合物对蒸制鱼肉的香气贡献较大,如乙酸乙酯、己醛、庚醛和辛醛等,使蒸制鱼肉呈蘑菇香和花香^[19]。水煮过程中,汤汁会溶解鱼肉中的部分风味物质,导致水煮鱼肉的整體风味弱于其他热加工处理的^[20]。壬醛、1-庚醇等是水煮鱼肉的关键风味化合物,其浓度显著高于蒸制、烤制和油炸热加工组的^[5,20-21]。烤制鱼肉中酮类化合物含量显著高于其他热加工组的,其关键原因在于,相较于其他加热方式,烤制工艺会引发更剧烈的脂肪氧化、更彻底的氨基酸降解以及更充分的美拉德反应。烤制鱼肉的关键香气物质为醛酮类、醇类及吡嗪化合物,其中 2,3-辛二酮、苯甲醛、愈创木、1-辛烯-3-醇等物质是烤鱼的特征风味物质,主要为烤制过程中美拉德反应的产物,能赋予烤鱼独特的烟熏味以及烤香味,其中醇类大部分可带来愉快芬芳的气味^[22-23]。油炸能赋予鱼肉独特的油性风味,2-庚酮、反-2-庚烯醛、2-正戊基呋喃、2-己酮、2,4-癸二烯醛、苯甲醛和壬醛等醛酮类物质是油炸鱼肉的特征风味物质,其中壬醛作为油酸的氧化产物能为油炸鱼肉提供浓郁的油脂香气,而苯甲醛具有苦杏仁味,对鱼肉的风味会产生负面影响^[24-26]。

2.2 不同热加工方式下特征滋味物质的差异

食品的滋味,即酸、甜、苦、咸和鲜,也是影响消费者选择的最重要因素之一^[27]。鱼肉的特征滋味主要源于游

离氨基酸、呈味核苷酸、有机酸及无机盐等物质,这些滋味物质会影响鱼肉及其加工制品的品质与风味^[28]。

热加工鱼肉中的非挥发性化合物是构成其鲜味、甜味及苦味等基础味觉特征的主要成分。其中鲜味主要源自鱼肉本身存在的鲜味物质以及蛋白质降解产生的游离氨基酸等,如天冬氨酸、谷氨酸、肌苷酸、鸟苷酸等鲜味物质^[29-30];甜味主要由鱼肉热加工过程腺苷三磷酸分解产生的腺苷酸、鸟苷酸和肌苷酸以及谷氨酸、赖氨酸和丙氨酸等甜味氨基酸等物质所主导^[13,17];组氨酸、缬氨酸、异亮氨酸、酪氨酸和脯氨酸等苦味氨基酸以及肌苷和次黄嘌呤苦味核苷酸是鱼肉苦味的重要呈味物质。在蒸、煮、炸、烤 4 种不同的热加工方式中,蒸制和烤制处理的鱼肉呈现出更突出的鲜味与甜味强度。这一感官特征主要归因于甘氨酸、天冬氨酸、丝氨酸等游离氨基酸与肌苷酸、鸟苷酸、腺苷酸等核苷酸以及有机酸、无机盐之间的协同效应,共同塑造了其鲜明的滋味轮廓^[31-32]。油炸鱼肉的组氨酸、肌苷以及次黄嘌呤等苦味呈味物质含量较高,是油炸鱼肉苦味的主要来源^[6,33]。在高温油炸过程中,鱼肉蛋白质发生水解,产生大量的短肽链,其中,相对分子质量较小、疏水性较强的肽段容易与口腔中的苦味受体结合,从而产生强烈的苦味感知^[34-35]。相较于其他热加工方式,水煮方式处理的鱼肉非挥发性化合物总含量较低,主要是在水煮过程中呈鲜味的甘氨酸、天冬氨酸、肌苷酸、鸟苷酸等,部分水溶性挥发性物质会溶解在水中,造成风味物质的流失^[20,34]。鱼肉的呈味并非由呈味核苷酸、游离氨基酸或无机盐等物质单独起作用,而是各种非挥发性滋味物质相互作用的结果。不同热加工条件下鱼肉的特征风味物质见表 2。

3 鱼肉热加工过程中风味差异的形成机制

鱼肉的热加工过程涉及一系列的物理化学变化,如脂质氧化、蛋白质降解、美拉德反应以及其他相互作用等,不同加工方式通过控制温度、水分活度和传质过程,决定了这些反应与互作的相对强弱与走向,从而塑造出鱼肉在蒸、煮、炸、烤后各具特色、差异鲜明的整体风味轮廓^[10,37-39]。各类反应主要产物及代表产物见表 3。

表2 不同热加工条件下鱼肉的特征风味物质

Table 2 Characteristic flavor substances of fish meat under various thermal processing conditions				
加工方式	鱼肉种类	特征气味物质	特征滋味物质	参考文献
蒸制	白乌鱼	己醛、壬醛、2,7-辛二醇、1-辛烯-3-醇、正庚烷、正十五烷、己酸乙烯基酯	谷氨酸、天冬氨酸、赖氨酸、亮氨酸、精氨酸	[33]
	鲫鱼	壬醛、2,3-丁二醇、1-辛烯-3-醇、(E)-11,13-十四二烯-1-醇、姜油烯、D-柠檬烯、正十五烷、正十七烷、姥鲛烷、吡嗪	谷氨酸、组氨酸、苏氨酸、丙氨酸、赖氨酸、鸟苷酸、肌苷酸	[17,33]
	鲈鱼	己醛、庚醛、辛醛、壬醛、1-辛烯-3-醇	甘氨酸、脯氨酸、组氨酸、丙氨酸、赖氨酸、丝氨酸	[15,32]
	草鱼	丁香油酚、间二甲苯、2-甲基环戊酮、己醛、1-辛烯-3-醇	丙氨酸、赖氨酸、甘氨酸、组氨酸、肌苷酸、肌苷、腺苷二磷酸	[20]
水煮	罗非鱼	己醛、壬醛、辛醛、庚醛、戊醛、1-戊醛、2-庚酮、2-丁酮、丙酮、乙酸乙酯	甘氨酸、丙氨酸、色氨酸、赖氨酸肌苷酸、腺苷二磷酸、肌苷	[9]
	鲫鱼	乙酸乙酯、己醛、庚醛、辛醛、芳樟醇、1-辛烯-3-醇	甘氨酸、组氨酸、赖氨酸、丙氨酸、鸟苷酸、肌苷酸	[17]
	草鱼	丁香油酚、间二甲苯、乙基苯、2-甲基环戊酮、1-辛烯-3-醇		[20]
油炸	带鱼	己醛、庚醛、苯甲醛、三甲胺、3-甲基丁醛、2-甲基丁醛、壬醛	丝氨酸、甘氨酸、丙氨酸、赖氨酸	[36]
	鲫鱼	正己醛、壬醛、反,反-2,4-癸二烯醛、2,3-丁二醇、1-辛烯-3-醇、D-柠檬烯、正十五烷、1,2-二甲基丁炔酯、2-正戊基呋喃	组氨酸、甘氨酸、谷氨酸、赖氨酸、丙氨酸、鸟苷酸、肌苷酸	[17,33]
	白乌鱼	己醛、壬醛、2-辛炔-1-醇、1-辛烯-3-醇、D-柠檬烯、正十五烷、己酸乙烯基酯	谷氨酸、赖氨酸、亮氨酸、天冬氨酸、甘氨酸	[33]
	鲈鱼	己醛、壬醛、烯丙基丙酯、戊烷		[15]
	草鱼	丁香油酚、间二甲苯、2-甲基环戊酮、反式-2,4-癸二烯醛、1-二十一烷醇、棕榈酸	谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、组氨酸、赖氨酸、肌苷酸、肌苷、腺苷二磷酸	[20]
烤制	鲤鱼	己醛、壬醛、2,3-辛二酮、1-辛烯-3-醇、4-烯丙基-2-甲氧基苯酚、2-戊基呋喃	甘氨酸、丝氨酸、肌苷酸、鸟苷酸、腺苷酸	[22]
	鲈鱼	3-辛酮、正己醇、1-辛烯-3-醇、4,5-二甲基辛烷、戊烷		[15]
	草鱼	丁香油酚、间二甲苯、2-甲基环戊酮、己醛、1-辛烯-3-醇	丙氨酸、甘氨酸、赖氨酸、谷氨酸、组氨酸、肌苷酸、肌苷、腺苷二磷酸	[20]

表3 各类反应主要产物及代表产物

Table 3 Main products and representative products of each reaction		
反应过程	主要产物	代表产物
脂质氧化	醛类、酮类	己醛、辛醛、壬醛、脱氢癸醛、2-庚酮、二甲基酮、甲基酮
蛋白质降解	氨基酸、多肽、核苷酸	谷氨酸、苯丙氨酸、苯丙氨酸、肌苷酸、鸟苷酸
美拉德反应	吡嗪类、呋喃类、噻吩类、Strecker醛	2-甲基吡嗪、呋喃-2-甲醇、5-甲基呋喃、2-甲基丁醛
蛋白-脂质相互作用	氨基醛、氨基酮、羟基烷基吡咯	1-羟基庚基吡咯、N-乙酰-1-甲基吡咯、1-羟基辛基吡咯

3.1 脂质氧化降解

鱼肉虽属低脂肉类,但其富含不饱和脂肪酸,在热加工过程中易发生热氧化反应,主要通过两种途径影响最终风味。途径一:鱼肉中的不饱和脂肪酸氧化降解生成的各种挥发性羰基化合物经水解、脱水、环化后生成内酯化合物,最终产生良好的鱼肉香味^[40-41]。途径二:加热过程中,鱼肉中的游离脂肪酸等脂溶性风味物质在脂肪酶的催化作用下发生水解,生成醛、醇、饱和脂肪酸及不饱

和脂肪酸等物质。其中,不饱和脂肪酸在过氧化自由基的催化下氧化生成氢过氧化物;饱和脂肪酸经过 β -氧化生成乙酰辅酶A^[42],进而赋予鱼类特征风味物质。不同热加工方式下鱼肉脂肪氧化的程度及其作用路径存在显著差异。蒸制鱼肉的加工环境具有低温、饱和蒸汽、氧气受限的特征,该环境可显著降低脂质氧化反应速率,仅发生脂质的轻度氧化与水解,这也是其脂质氧化程度低于油炸、烧烤的核心原因。适度蒸制能促进磷脂

轻度水解生成游离脂肪酸,这类物质在酶催化下进一步转化为乳酸内酯等内酯化合物,促进了鱼肉特征风味的形成^[43]。蒸制对鱼肉脂质结构损伤最小,且能生成多样脂质水解产物,是兼顾脂质稳定性与鱼肉风味形成的优质加工方式^[44]。鱼肉煮制过程中,水溶性成分的溶出虽可去除部分氧化产物和金属离子,但也会导致脂溶性抗氧化剂流失,从而削弱其对脂质氧化的保护作用。该过程的核心机制涉及磷脂水解与游离脂肪酸释放,其中亚油酸等游离脂肪酸含量显著升高,进而更易发生热氧化反应生成过氧化物与醛类等挥发性物质,加剧鱼肉土腥味的形成^[45-46]。该加工方式能显著降低鱼肉硬度与酸度,但工艺控制不当会因游离脂肪酸增多导致风味劣变。油炸鱼肉是脂质氧化最剧烈的加工方式,高温可使脂肪酶失活,同时,外部油脂热氧化产物会渗透至鱼肉内部,且高温下脂肪自由基链式反应活跃,进而生成大量羰基化合物,显著增加了丙二醛、4-羟基-2-壬烯醛等二级氧化产物含量,其中4-羟基-2-壬烯醛会进一步与蛋白质反应,降低鱼肉营养价值并引发异味^[47]。油炸虽能提升鱼肉多汁感,但会显著加速脂质氧化、产生苦味物质^[48]。鱼肉烤制以干热、强氧化及表面直接暴露为特征,是脂质氧化最严重的加工方式之一。高温干热环境使鱼肉表面脂质直接接触氧气,脂肪氧化剧烈,进而导致共轭双键破坏,烯烃、吡嗪类及酚类等高活性氧化产物显著增加,这些产物不仅造成风味劣变,还可能危害健康。烤制方式虽能赋予鱼肉独特焦香味,但伴随脂质极度氧化,会导致鱼肉风味受损及营养价值下降^[48]。

除鱼肉本身的脂肪氧化降解外,外源的油脂也会对热加工鱼肉的风味产生一定的影响。油炸鱼肉的风味还与食用油的脂肪酸组成存在较大关联,食用油中不饱和脂肪酸占比越高,产生的油炸风味贡献物越多^[49]。

3.2 美拉德反应

美拉德反应是羰基化合物和氨基化合物经历一系列复杂的化学反应最终生成棕色或黑色色素的非酶褐变反应^[50],它不仅可赋予鱼肉诱人的色泽,同时可丰富鱼肉的口感和风味。美拉德反应可分为3个主要阶段^[51]:①前期阶段:还原糖与具有游离氨基的特定化合物缩合,得到不稳定的亚胺衍生物——希夫碱。随后希夫碱环化形成N-取代糖硅胺后,再经过异构化重排形成Amadori重排产物(ARP),即1-氨基-1-脱氧-2-酮糖。②中期阶段:ARP发生脱水,根据环境pH值的不同,ARP有两种不同的脱水方式:在 $\text{pH} \leq 7$ 时,经历1,2-烯醇酸化形成糠醛或羟甲基糠醛(HMF);在 $\text{pH} > 7$ 时,ARP的脱水主要涉及2,3-离子化形成还原酮。此外,ARP会发生裂解反应,形成二羰基化合物,并与游离氨基酸反应形成醛和 α -氨基酮。③晚期阶段:醛类和胺类化合物发生复杂的醛胺反应、异构化并进一步缩合后产生棕色含氮聚合物和共聚物。美

拉德反应能赋予鱼肉诱人色泽和独特香味。

鱼肉蒸制与水煮的美拉德反应程度较低,其主要原因在于蒸制和水煮的加工温度受水的沸点限制。蒸制加工形成的高水分活度环境能有效抑制美拉德反应的初期亲核步骤,从而抑制非酶促褐变反应^[52];水煮则借助大量水分吸收热量并带走反应生成的水分,阻碍还原糖形成高浓度水溶液,进而抑制反应进行。实际表现上,蒸制鱼肉维持淡白或淡黄色泽,香气主要源于自身甘氨酸、谷氨酸等氨基酸类物质;水煮鱼肉表现鲜白色泽,风味主要源自水溶性氨基酸及鸟苷酸等核苷酸,二者均无明显美拉德反应特征香气。鱼肉油炸与烤制的美拉德反应程度均较高,且烤制显著高于油炸。油炸以150~200℃高温为特征,鱼肉表面水分被油脂快速取代并形成干燥环境,同时,油脂的高导热性可加速氨基酸与还原糖的热裂解及脱水反应,且油脂氧化产物与氨基酸协同生成复杂醛胺化合物,赋予鱼肉独特酥脆香味,但油炸过程极易产生丙烯酰胺、杂环胺等致癌物,属于典型的热加工伴随危害物^[53-54];烤制温度可达200~250℃,干热环境使鱼肉表面极度干燥,氨基酸与还原糖浓度显著升高,反应速率最快,且高温推动ARP深度裂解,生成更多高级糖基化终产物与杂环胺。烤制鱼肉表现为鱼肉表面呈金黄或深棕色、具浓郁“烤肉味”,但生成杂环胺更多。

3.3 蛋白质的热降解

鱼肉热加工过程中的蛋白质变化是一个非常复杂的过程,主要涉及蛋白质的热变性、蛋白质—蛋白质之间的相互作用以及蛋白与风味物质的吸附作用^[55-56]。蛋白质的热变性只引起蛋白质构象变化而不涉及一级结构肽键断裂^[57],随着温度的升高,蛋白质的三级结构破坏、二级结构在一定程度上展开,埋藏在蛋白质内部的氨基酸疏水性残基逐渐暴露出来,随后自由基攻击氨基酸侧链和肽键产生羰基化合物及其衍生物,从而使羰基含量增加、鱼肉蛋白表面疏水性增加、蛋白质溶解度下降,此外巯基氧化为二硫键,使得总巯基含量下降^[58-60]。其中,过程产生的羰基类化合物会与氨基类化合物发生美拉德反应,产生各种风味物质。蛋白质—蛋白质之间相互作用主要影响蛋白质的溶解度、黏度和浊度等性质。热加工诱导蛋白质变性后,肌原纤维蛋白通过非共价作用发生聚集,形成不溶性超分子复合体;同时,肌浆蛋白与肌原纤维蛋白发生热变性并转化为碱溶性蛋白,该蛋白在高离子强度条件下溶解性显著降低,共同导致体系蛋白质溶解度下降^[61]。蛋白质热变性过程中,会发生蛋白质开链,导致其有效体积减小,随后肌原纤维蛋白再快速聚集变性,导致其黏度快速降低。此外,蛋白质在热变性过程中会形成并聚集为细小絮凝颗粒,该过程通过颗粒的生成与聚集双重作用,导致体系浊度逐渐升高^[62]。蛋白质在热变性过程中还会产生各种游离氨基酸,为鱼肉风味的重要

组成部分,同时蛋白质与蛋白质之间的相互作用会改变蛋白质与风味物质之间的作用节点,影响蛋白质和风味物质之间的吸附作用,从而影响其风味的形成。

蛋白质的热变性对蛋白质对风味物质的吸附作用有显著影响,主要原因是蛋白质构象的变化会使得更多的风味结合位点暴露出来,从而影响其对风味物质的吸附作用^[63],其中主要为鱼肉中的肌原纤维蛋白。酯类、醇类、醛类和酮类是鱼肉中4类常见的风味化合物,蛋白质的热变性的会导致肌原纤维蛋白的构象发生变化、蛋白质的二级结构改变、表面疏水性增加,其对4类化合物的吸附能力依次为酯类>醛类>酮类>醇类。此外,肌原纤维蛋白对风味化合物的吸附能力还与化合物种类、链长及相对分子质量等因素相关。对相同种类的不同化合物,其吸附能力也存在差异。对酮类化合物,蛋白质对其吸附能力随碳链长度增加逐渐增强;对酯类化合物,蛋白质对相对分子质量较大的己酸乙酯和乙酸辛酯的吸附能力强于相对分子质量较小的乙酸乙酯和丁酸乙酯。对1-辛烯-3-醇和辛醇,肌原纤维蛋白对其有较强的吸附作用,而对戊醇和己醇无吸附作用,主是因为醇和水相溶的特性,水和肌原纤维蛋白共同竞争与醇类化合物的作用位点;对于醛类化合物,肌原纤维蛋白对戊醛、己醛、辛醛的吸附能力强于癸醛和2-甲基丁醛^[56]。

鱼肉蒸制的蛋白质氧化水解程度较低,核心归因于蒸制的高水分活度水蒸气环境缺乏干热条件,显著抑制蛋白质氧化,其羰基生成量约为油炸或烤制的50%,游离氨基酸累积量亦较少。蒸制虽可引发肌原纤维蛋白热变性,但受水蒸气热传导限制,变性速率较慢,仅表现为三级结构部分展开,蛋白质疏水性与游离氨基酸释放量增加有限^[64]。因氧化生成的酯类、醛类、酮类等风味物质较少,蛋白质对风味的吸附作用较弱,鱼肉主要保留自身清鲜味。水煮鱼肉的蛋白质氧化水解程度较低,其氧化特征与蒸制相近,虽处于高温液态水环境,但蛋白质氧化受抑,羰基含量增加幅度约为蒸制处理的2倍,且远低于炸制或烤制^[65-66]。煮制会引发肌原纤维蛋白不可逆变性,部分碱溶性蛋白转化为难溶性蛋白,且游离氨基酸释放量适中,蛋白质疏水性增加有限。因煮制生成的醛类、酮类化合物较少,蛋白质以吸附酯类为主,整体风味物质的生成量与吸附量均低于炸制和烤制。鱼肉油炸与烤制的蛋白质氧化水解程度均较高,且烤制更为剧烈。油炸以高温油脂为介质,加速脂质氧化产物与蛋白质的相互作用,使羰基含量显著增加,氧化程度远超蒸制和煮制;油炸高温促使肌原纤维蛋白快速聚集重组,甜味与鲜味游离氨基酸释放量显著上升,但巯基严重氧化导致蛋白质溶解度下降,同时生成大量酯类、醛类和酮类风味物质,蛋白质对酯类吸附能力最强,可形成独特酥脆香气^[67]。此外,油炸的高温使鱼肉中的蛋白酶迅速失活,导致蛋白

质生成的氨基酸和小肽无法发生进一步的转化和代谢,进而与脂质氧化产生的醛类发生Schiff碱反应,生成具有苦味的氨基醛或硫醚化合物^[68]。烤制的高温干热环境使脂质与蛋白质氧化交叉反应最为激烈,羰基含量与炸制相当且显著高于煮制和蒸制;极高温导致肌原纤维蛋白快速变性、脱水并聚集为不溶性聚集体,游离氨基酸释放量极高但部分氨基酸侧链可能降解,其生成的大量杂环胺类和酚类化合物被蛋白质强烈吸附,虽酯类生成量较高但易挥发,最终以酚类和醛类的吸附与残留为主^[4]。

鱼肉在不同热加工方式下,其内源酶的失活动力学差异显著。这些酶直接参与蛋白质分解和核苷酸代谢,生成游离氨基酸、肽类和核苷酸等风味前体物质,通过调控美拉德反应及脂质氧化过程,影响鱼肉关键风味物质的生成^[69]。

蛋白酶分解肌肉蛋白产生游离氨基酸和呈味肽,这些是风味的前体物质,通过转氨基、脱氢反应后生成苯甲醛、苯乙酮等各种芳香族化合物。脂肪酶能分解细胞膜中的不饱和脂肪酸,产生癩烯醛、正辛醛、己醛等醛、酮类物质,这些是鱼肉特有的鲜香气味。核苷酸代谢酶会影响IMP和AMP等ATP分解产物的积累,这些为鱼肉鲜味的核心物质^[70]。

在不同热加工过程中,酶活性随温度梯度呈现出显著差异:蒸制和烤制过程中鱼肉表面内源酶迅速失活,但由于鱼肉内部温度上升较慢,内源酶能保持一段时间的活性,促使蛋白质、脂肪等物质酶解生产各种呈味物质。而由于煮制和油炸工艺具有极高温度和传热速率,其鱼肉中内源酶被快速灭活,风味的形成由蛋白、脂质的热降解以及非酶促反应所主导^[71]。

3.4 脂质氧化与蛋白质氧化的相互作用

蛋白质氧化与脂质氧化均为自由基链式反应,且二者之间存在显著的交互作用。在氧化过程中生成的活性氧自由基等中间产物可在蛋白质与脂质之间传递并相互引发,介导并加速两者的交互氧化进程。蛋白质的氧化反应发生在脂质氧化之后,在蛋白质和脂质的交互氧化过程中,更多的是脂质氧化过程产生的氢过氧化物和自由基可促进蛋白质的氧化^[72]。脂质介导蛋白质氧化主要有两种方式^[73]:①脂质氧化过程会产生氢过氧化物或自由基等活性氧物质,这些物质会攻击蛋白质的氨基酸侧链,加速或诱导蛋白质的氧化,如脂肪氧化过程产生的过氧自由基可以作为诱导剂引起蛋白质氧化,从而生成1-辛醇、己醛、辛醛、2-辛烯-3-酮-1-醛和2-壬酮等各种鱼肉特征风味物质^[74]。②脂质的氧化产物直接与蛋白质类物质发生反应,从而介导蛋白质氧化,如脂质氧化产物会与蛋白质氨基酸残基发生反应,生成的物质可以导致蛋白质交联,脂肪氧化的产物可与蛋白质中的赖氨酸残基发生反应,生成吡咯类衍生物,进而诱导并促进蛋白质分子

间的交联作用,生成醛类衍生物、含硫化合物等风味物质。此外,在所有脂质氧化产物中,次级产物比初级产物更容易与氨基酸残基发生反应。在所有蛋白质氨基酸中,含硫的氨基酸,如甲硫氨酸、胱氨酸和半胱氨酸等对脂质氧化产物高度敏感,更易与脂肪氧化产物发生反应,生成二硫化物衍生物、砜和亚砜等含硫化合物。蛋白质中的甲硫氨酸和半胱氨酸等含硫氨基酸容易受到氧化,这也可以看作是鱼肉抗氧化的一种内源保护机制,一定程度上可以抑制蛋白质和脂质的氧化^[72]。但当氧化胁迫压力超过蛋白质的这种内源抗氧化能力后,蛋白质和脂质均将通过自由基链式反应发生氧化,且脂质的氧化速率快于蛋白质氧化,这可视作为蛋白质氧化来介导脂质氧化。

蛋白质氧化同样会促进脂质氧化,为蛋白降解和脂质氧化相互作用的次要。蛋白质氧化过程中生成的羰基化合物等酰胺化衍生物,其本身具有较强的亲电子性,能够与未氧化的脂肪酸分子发生亲核加成,形成新的自由基中心^[75]。此外,蛋白质聚集和降解均会破坏细胞膜的

完整性,使得细胞中的铁离子暴露出来,游离的铁离子会加速脂质的 Fenton 反应,加速脂质氧化^[76]。

不同热加工方式对鱼肉脂质与蛋白质氧化互作的影响差异显著。蒸制以低温高湿环境限制脂质氧化,游离脂肪酸与过氧化物生成较少,蛋白质以热变性为主,氧化程度低,主要通过蛋白质构象改变影响风味^[77];煮制虽温度略高于蒸制,但液态水环境抑制脂质氧化产物生成,蛋白质以热变性和水解为主,脂质氧化诱导的蛋白质氧化较弱,主要通过水解释放氨基酸改善鲜味;油炸高温使油脂作为介质快速氧化,生成大量过氧化物与羰基化合物,这些氧化产物会攻击蛋白质巯基和胱氨酸侧链,导致蛋白质羰基含量增加、巯基损失并交联聚集,显著影响鱼肉质地与营养价值^[78];烤制过程中的干热辐射与温度会引起剧烈的脂质过氧化,大量脂质氧化产物强效促进蛋白质氧化,使其变性、交联和聚集程度加剧,脂质—蛋白质交叉氧化作用增强,易导致品质劣化与潜在健康风险^[79]。热加工过程鱼肉风味形成机制如图 2 所示。

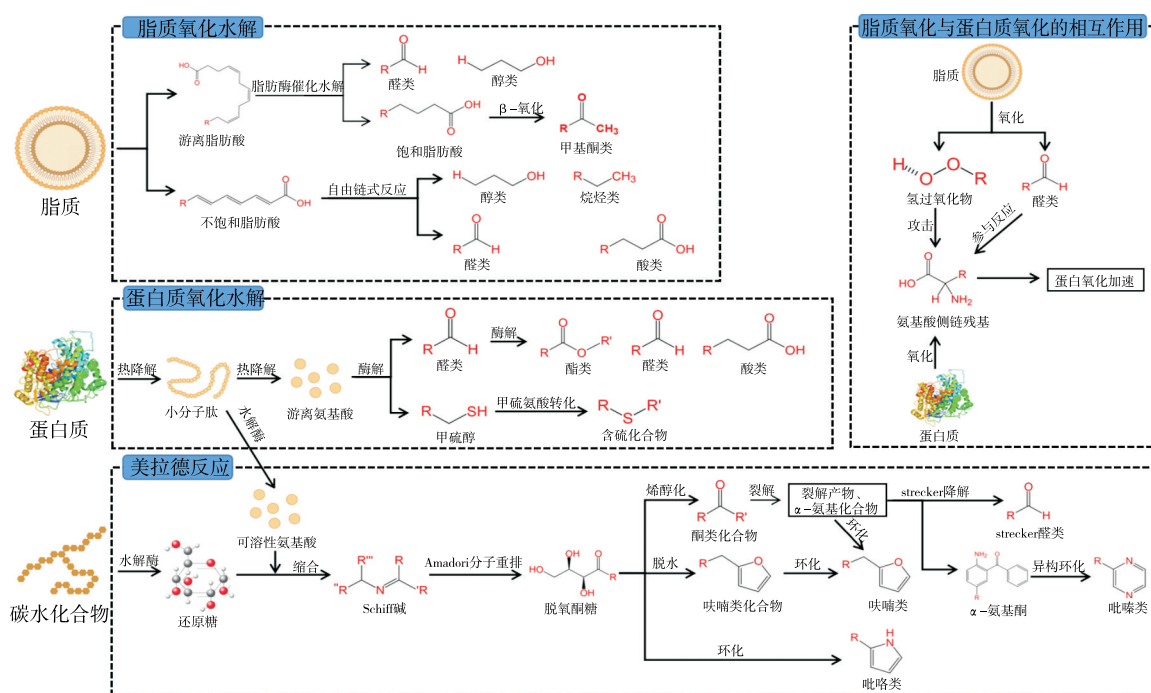


图 2 热加工过程中鱼肉风味形成的机制

Figure 2 Flavor formation mechanism of fish meat during thermal processing

4 结论

蒸、煮、炸、烤 4 种热加工方式下鱼肉风味差异显著,主要由酯类、醛类、酮类、醇类等挥发性化合物及游离氨基酸的组成与含量决定,且受控于各自加工条件:蒸制鱼肉以己醛、1-辛烯-3-醇及甘氨酸等为主导风味物质;水煮鱼肉因可溶性风味物质流失以醛类、酯类为主,壬醛、1-庚醇等是水煮鱼肉的关键风味化合物;油炸鱼肉具独特油

脂氧化风味,含反式-2,4-癸二烯醛等物质;烤制鱼肉则以 2,3-辛二酮、苯甲醛等为特征风味成分,其中油炸与烤制还可能产生苯甲醛、丙烯酰胺等有害副产物。这类风味差异的核心机制在于加工条件对脂质氧化、蛋白质降解、美拉德反应及三者协同作用的差异化调控。蒸制与水煮过程中,低氧高湿或液态水环境可能对自由基链式反应及美拉德反应产生抑制作用,鱼肉的脂质氧化程度低,只

发生轻度水解和游离脂肪酸的热氧化、蛋白质羰基化水平低;油炸与烤制因高温油介质或干热辐射激活脂质自由基爆链反应及美拉德褐变,脂质过氧化产物攻击蛋白质巯基,诱发羰基化、交联聚集及风味配体吸附,其中油炸中外源油脂直接参与风味构建并增强酯类吸附,烤制因界面极度干燥且在高氧分压环境,引发脂质过氧化级联反应,推动 Amadori 重排产物深度裂解,蛋白质脱水聚集后对酚类、醛类呈不可逆吸附。未来研究需深入解析蛋白、脂质氧化与美拉德反应的分子交互作用机制,并聚焦风味物质间的协同规律与机制,构建“加工条件—风味品质—安全风险”的定量构效关系;同时开发基于过程控制的减害提质技术,以实现鱼肉制品的精准定向风味调控与绿色清洁生产。

参考文献

- [1] 王丹,高宏泉. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2024: 1-159.
WANG D, GAO H Q. 2024 China fishery statistical yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 1-159.
- [2] ZHANG Y, ZHANG P C, PENG H C, et al. Effects of cooking processes on protein nutritional values and volatile flavor substances of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Foods, 2023, 12(17): 3 169.
- [3] YANG X B, CHEN Q H, LIU S C, et al. Characterization of the effect of different cooking methods on volatile compounds in fish cakes using a combination of GC-MS and GC-IMS[J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101291.
- [4] 张璇,莫皓然,赵会,等. 不同烹饪方式对草鱼肉挥发性风味成分的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 263-272.
ZHANG X, MO H, ZHAO H, et al. Effects of different cooking methods on volatile components of ctenopharyngodon idella meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45 (10): 263-272.
- [5] GAO Z Q, HE S Q, ZHU W H, et al. Impact of thermal processing methods on physicochemical properties and flavor-related compounds of Pearl gentian grouper with waterless preservation[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 38: 101049.
- [6] ZHAO T F, BENJAKUL S, SANMARTIN C, et al. Changes of volatile flavor compounds in large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) during storage, as evaluated by headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry and principal component analysis[J]. Foods, 2021, 10(12): 2 917.
- [7] 夏超,于小番,崔丹丹,等. 不同烹饪方式对黄颡鱼肉质特性影响[J]. 中国调味品, 2020, 45(7): 96-100, 107.
XIA C, YU X F, CUI D D, et al. Effects of different cooking methods on the quality characteristics of pelteobagrus fulvidraco [J]. China Condiment, 2020, 45(7): 96-100, 107.
- [8] 张展琪,刘梦遥,余欣芮,等. 蒸制过程中大黄鱼理化性质及品质的变化[J]. 广东海洋大学学报, 2024, 44(4): 113-120.
ZHANG Z Q, LIU M Y, YU X R, et al. Changes of physicochemical properties and quality of *Larimichthys crocea* during steaming[J]. Journal of Guangdong Ocean University, 2024, 44(4): 113-120.
- [9] 陈佳奇,刘天毅,贾逾泽,等. 水煮鱼微波烹饪过程中鱼肉水分及组织变化对嫩度的影响[J]. 食品与机械, 2020, 36(4): 51-55.
CHEN J Q, LIU T Y, JIA Y Z, et al. Effects of moisture and tissue changes on tenderness of boiled fish during microwave cooking[J]. Food & Machinery, 2020, 36(4): 51-55.
- [10] ZHANG C Y, SHI R L, MI S, et al. Effect of different thermal processing methods on flavor characteristics of *Penaeus vannamei*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 191: 115652.
- [11] MARCOTTE M, TAHERIAN A R, KARIMI Y. Thermophysical properties of processed meat and poultry products[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 88(3): 315-322.
- [12] ZENG X Q, LI H, JIANG W B, et al. Phytochemical compositions, health-promoting properties and food applications of crabapples: a review[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132789.
- [13] LUO X Y, XIAO S T, RUAN Q F, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying[J]. Food Chemistry, 2022, 372: 131260.
- [14] 袁丽萍,彭斌,钟比真,等. 紫外减菌联合低温对草鱼肉品质及挥发性风味的影响[J]. 食品与机械, 2023, 39(12): 117-125.
YUAN L P, PENG B, ZHONG B Z, et al. Effect of UV sterilization on the quality of grass carp meat during the chilling storage[J]. Food & Machinery, 2023, 39(12): 117-125.
- [15] 彭海川,张鹏程,白婷,等. 烹饪处理对鲈鱼肉中挥发性风味物质的影响[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 272-279.
PENG H C, ZHANG P C, BAI T, et al. Effects of cooking treatments on volatile flavor compounds in sea bass meat[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science Edition), 2022, 41(3): 272-279.
- [16] LI X F, XIE W, BAI F, et al. Influence of thermal processing on flavor and sensory profile of sturgeon meat[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131689.
- [17] DING J, CHEN Y, ZHENG Y H, et al. Evaluation of physicochemical and flavor characteristics and primary on lipid oxidation of crucian carp under different cooking methods [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106775.
- [18] SHEN Y Y, WU Y Y, WANG Y Q, et al. Contribution of autochthonous microbiota succession to flavor formation during Chinese fermented mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) [J]. Food Chemistry, 2021, 348: 129107.

- [19] LIU J Y, SHEN S Y, XIAO N Y, et al. Effect of glycation on physicochemical properties and volatile flavor characteristics of silver carp mince[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132741.
- [20] TAN C M, LI X F, YU Y Q, et al. Effects of five thermal processing methods on the physicochemical properties and flavor characteristics of grass carp meat[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 206: 116599.
- [21] WU N, GU S Q, TAO N P, et al. Characterization of important odorants in steamed male Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) using gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry[J]. Journal of Food Science, 2014, 79(7): C1 250-C1 259.
- [22] 章传奇, 杨艺, 张良, 等. 不同复热方式对预制烤鱼风味及多环芳烃形成的影响[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(6): 105-113.
- ZHANG C Q, YANG Y, ZHANG L, et al. The effects of different reheating methods on the flavor and polycyclic aromatic hydrocarbon formation of preprepared grilled fish[J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(6): 105-113.
- [23] 张艳, 王圣开, 付勋, 等. 预制烤鱼水分分布及关键挥发性风味物质分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(2): 75-83.
- ZHANG Y, WANG S K, FU X, et al. Analysis of moisture distribution and key volatile flavor compounds in prepared grilled fish[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(2): 75-83.
- [24] 王恒鹏, 吴鹏, 陈胜姝, 等. 排酸时间与熟制程度对牛肉挥发性风味物质的影响[J]. 食品与机械, 2018, 34(12): 16-21.
- WANG H P, WU P, CHEN S S, et al. Effects of aging time and cooking degree on volatile flavors of beef[J]. Food & Machinery, 2018, 34(12): 16-21.
- [25] REFSGAARD H H F, HAAHR A M, JENSEN B. Isolation and quantification of volatiles in fish by dynamic headspace sampling and mass spectrometry[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(3): 1 114-1 118.
- [26] YU X N, LI L Q, XUE J, et al. Effect of air-frying conditions on the quality attributes and lipidomic characteristics of surimi during processing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60: 102305.
- [27] 冯润芳, 孟凤华, 安晓雯, 等. 小尾寒羊不同部位挥发性风味物质和脂肪酸分析[J]. 食品工业科技, 2021, 42(21): 285-293.
- FENG R F, MENG F H, AN X W, et al. Analysis of volatile flavor substances and fatty acids in different parts of small-tailed Han lambs[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(21): 285-293.
- [28] OHLHAUSEN P, LANGEN N, GOTTSCHLICH D, et al. A long night of sciences: explore your senses-color, shape and flavors[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 33: 100752.
- [29] 段茹碧, 何燕富, 邱丹, 等. 模拟物流运输条件下冻半干金鲷鱼品质和风味变化[J]. 食品与机械, 2023, 39(11): 143-151.
- DUAN R B, HE Y F, QIU D, et al. Changes in quality and flavor of frozen semi-dried pomfret under simulated logistics and transportation conditions[J]. Food & Machinery, 2023, 39(11): 143-151.
- [30] 陈惠, 刘焱, 李志鹏, 等. 热加工对草鱼鱼肉品质及风味成分的影响[J]. 食品与机械, 2017, 33(9): 53-58, 68.
- CHEN H, LIU Y, LI Z P, et al. The influence of thermal treatment on grass carp quality and volatile flavor compounds[J]. Food & Machinery, 2017, 33(9): 53-58, 68.
- [31] 曾婷婷, 巴乐, 张立彦, 等. 复热方式对粤式特色预制烤鱼品质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2026, 37(3): 104-112.
- ZENG T T, BA L, ZHANG L Y, et al. Effects of reheating methods on the quality of Guangdong-style ready-to-cook grilled fish[J]. China Food Additives, 2026, 37(3): 104-112.
- [32] 赵洪雷, 冯媛, 徐永霞, 等. 海鲈鱼肉蒸制过程中品质及风味特性的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 145-151.
- ZHAO H L, FENG Y, XU Y X, et al. Changes in quality and flavor characteristics of sea bass muscle during steaming[J]. Food Science, 2021, 42(20): 145-151.
- [33] 韩旭, 彭海川, 白婷, 等. 蒸煮和油炸对鱼肉蛋白质营养和风味的影响[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2021, 40(3): 247-255.
- HAN X, PENG H C, BAI T, et al. Effect of steaming and frying on fish protein nutrition and flavor[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2021, 40(3): 247-255.
- [34] 林怡秦, 陈秉彦, 王榕, 等. 鱼贝类水产鲜味肽的呈味特性、制备、筛选及加工过程呈味变化的研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 464-474.
- LIN Y Q, CHEN B Y, WANG R, et al. Research progress on the taste characteristics, preparation, screening, and taste changes during processing of marine fish and shellfish umami peptides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 464-474.
- [35] 谭碧霞, 高艳蕾, 熊青, 等. 不同熟化方式下武昌鱼预制烤鱼的品质特征形成研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 346-356.
- TAN B X, GAO Y L, XIONG Q, et al. Formation of quality characteristics of prefabricated grilled Wuchang fish under different cooking methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 346-356.
- [36] 丁怡萱, 周婷, 廖月琴, 等. 两种炸制方式对带鱼品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(24): 244-253.
- DING Y X, ZHOU T, LIAO Y Q, et al. Influence of two frying methods on the quality and flavor of hairtail[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(24): 244-253.
- [37] LI H L, CHEN Y N, LI M J, et al. Effects of temporary rearing with organic selenium on the muscle flavor and texture properties of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133747.
- [38] LI Q, YI S M, WANG W, et al. Different thermal treatment methods and TGase addition affect gel quality and flavour characteristics of decapod maruadsu surimi products[J].

- Foods, 2022, 11(1): 66.
- [39] YIN Y T, ZHOU L, PEREIRA J, et al. Insights into digestibility and peptide profiling of beef muscle proteins with different cooking methods[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(48): 14 243-14 251.
- [40] 周洁, 王立, 周惠明. 肉品风味研究综述[J]. 肉类研究, 2003, 17(2): 16-18.
- ZHOU J, WANG L, ZHOU H M. Study summary of the meat flavor[J]. Meat Research, 2003, 17(2): 16-18.
- [41] 柯海瑞, 康怀彬, 蔡超奇. 脂肪氧化对肉品风味影响的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(6): 58-62, 71.
- KE H R, KANG H B, CAI C Q. Advances in research on the effects of fat oxidation on meat flavor[J]. Agricultural Products Processing, 2020(6): 58-62, 71.
- [42] CHANG C, WU G C, ZHANG H, et al. Deep-fried flavor: characteristics, formation mechanisms, and influencing factors [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2020, 60 (9): 1 496-1 514.
- [43] 李珂, 谢伟, 徐新星, 等. 蒸制鲟鱼背部肉脂质氧化特性及风味品质评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 13-24.
- LI K, XIE W, XU X X, et al. Lipid oxidation characteristics and flavor quality evaluation of steamed sturgeon dorsal meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 13-24.
- [44] 卜俊芝, 徐迅, 王玉宝, 等. 真空低温慢煮对三文鱼品质及脂质组成的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(4): 318-330.
- BU J Z, XU X, WANG Y B, et al. Effects of sous-vide cooking on the quality and lipid composition of salmon[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41 (4): 318-330.
- [45] CHEW S C, HOW Y H, CHANG L S, et al. The impact of cooking methods on the physical, sensory, and nutritional quality of fish[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2024, 38: 101061.
- [46] 黄卉, 熊雅雯, 李来好, 等. 鱼肉热煮过程中质构保持技术研究进展[J]. 南方水产科学, 2021, 17(3): 122-128.
- HUANG H, XIONG Y W, LI L H, et al. Research progress on texture preservation technology of fish meat during hot boiling [J]. South China Fisheries Science, 2021, 17(3): 122-128.
- [47] 赵洪雷, 冯媛, 白旭婷, 等. 蒸制和炸制对海鲈鱼肉体外消化特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(24): 109-114.
- ZHAO H L, FENG Y, BAI X T, et al. Effects of steaming and frying on digestive characteristics of *Perca fluviatilis* muscle in vitro[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(24): 109-114.
- [48] 胡吕霖, 任思婕, 沈清, 等. 不同烹饪方式及体外模拟消化环境对鲟鱼蛋白质氧化及消化性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 63-70.
- HU L L, REN S J, SHEN Q, et al. Effect of different cooking treatments and *in vitro* digestion on protein oxidation and digestibility of sturgeon fillets[J]. Food Science, 2018, 39(20): 63-70.
- [49] 陈丽丽, 张树峰, 袁美兰, 等. 不同烹饪方式对脆肉鲩鱼肉营养品质的影响[J]. 中国调味品, 2019, 44(10): 40-45.
- CHEN L L, ZHANG S F, YUAN M L, et al. Effects of different cooking methods on the nutritional quality of ctenopharyngodonidellus[J]. China Condiment, 2019, 44(10): 40-45.
- [50] STAROWICZ M, ZIELIŃSKI H. How Maillard reaction influences sensorial properties (color, flavor and texture) of food products? [J]. Food Reviews International, 2019, 35(8): 707-725.
- [51] WANG X C, MCCLEMENTS D J, XU Z L, et al. Recent advances in the optimization of the sensory attributes of fried foods: appearance, flavor, and texture[J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 297-309.
- [52] LIU Z L, CHAO Z M, LIU Y Y, et al. Maillard reaction involved in the steaming process of the root of *Polygonum multiflorum*[J]. Planta Medica, 2009, 75(1): 84-88.
- [53] HU X F, JIANG Q N, WANG H, et al. Insight into the effect of traditional frying techniques on glycosylated hazardous products, quality attributes and flavor characteristics of grass carp fillets[J]. Food Chemistry, 2023, 421: 136111.
- [54] KUSUMAWATI E, CANDRIASIH P, ASTATI A. The effect of deep-frying and pan-frying methods on the organoleptic properties, protein, and calcium content of presto milkfish floss (*Chanos chanos*)[J]. Italian Journal of Food Safety, 2024, 14(1): 13085.
- [55] 胡亚芹, 葛雨珺, 白妍, 等. 热处理对肉类蛋白质构的影响[J]. 渔业科学进展, 2019, 40(5): 175-184.
- HU Y Q, GE Y J, BAI Y, et al. Effect of heat treatments on the protein structures and meat textural properties[J]. Progress in Fishery Sciences, 2019, 40(5): 175-184.
- [56] 周昌瑜, 蒋娅婷, 曹锦轩, 等. 热处理时间对鸭肉肌原纤维蛋白凝胶的风味吸附能力影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 218-224.
- ZHOU C Y, JIANG Y T, CAO J X, et al. The effects of heat treatment time on the absorption capacity of duck myofibrillar protein gels on flavor compounds[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 218-224.
- [57] 刘珊, 刘晓艳. 热变性对蛋白质理化性质的影响[J]. 中国食品添加剂, 2006, 17(6): 108-112.
- LIU S, LIU X Y. The thermal denaturation of protein[J]. China Food Additives, 2006, 17(6): 108-112.
- [58] 王耀耀, 朱蓓薇, 董秀萍, 等. 鲍鱼腹足肌原纤维蛋白的组成及其性质[J]. 大连工业大学学报, 2011, 30(3): 183-186.
- WANG Y Y, ZHU B W, DONG X P, et al. Constituent and characterization of myofibrillar protein from abalone[J]. Journal of Dalian Polytechnic University, 2011, 30(3): 183-186.
- [59] KO W C, YU C C, HSU K C. Changes in conformation and sulfhydryl groups of tilapia actomyosin by thermal treatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1 316-1 320.

- [60] 范三红, 刘晓华, 胡雅楠, 等. 加热处理对鱼肉蛋白质理化特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(12): 104-107, 112.
- FAN S H, LIU X H, HU Y N, et al. Effect of heat treatment on protein in physical and chemical properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(12): 104-107, 112.
- [61] WANG X, XIA M Q, ZHOU Y H, et al. Gel properties of myofibrillar proteins heated at different heating rates under a low-frequency magnetic field[J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126728.
- [62] LIU S Y, CAI X Y, HUANG J Y, et al. Effects of environmental pH on protein properties and flavor factors of hairtail (*Trichiurus haumela*) in thermal processing[J]. Food Chemistry, 2023, 413: 135615.
- [63] ZHOU F B, ZHAO M M, SU G W, et al. Binding of aroma compounds with myofibrillar proteins modified by a hydroxyl-radical-induced oxidative system[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(39): 9 544-9 552.
- [64] 彭海川, 钱琴, 母运龙, 等. 不同烹饪方式处理的鲟鱼肉营养成分和风味比较[J]. 现代食品科技, 2022, 38(2): 236-244.
- PENG H C, QIAN Q, MU Y L, et al. Comparison of nutritional composition and flavor of sturgeon meat (*Acipenser sturio linnaeus*) treated by different cooking methods[J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(2): 236-244.
- [65] 戴振庭, 周惠敏, 殷泽生, 等. 蒸制过程中鲢鱼背肉的品质及风味变化[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 301-309.
- DAI Z T, ZHOU H M, YIN Z S, et al. Quality and flavor changes of bonito back meat during steaming[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 301-309.
- [66] HU L L, REN S J, SHEN Q, et al. Proteomic study of the effect of different cooking methods on protein oxidation in fish fillets[J]. RSC Advances, 2017, 7(44): 27 496-27 505.
- [67] 吴晓龙, 涂宗财, 胡月明, 等. 不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 84-93.
- WU X L, TU Z C, HU Y M, et al. Effects of different high-temperature treatments on physicochemical properties and taste quality of grass carp meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 84-93.
- [68] MIYASHITA K, UEMURA M, HOSOKAWA M. Effective prevention of oxidative deterioration of fish oil: focus on flavor deterioration[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9: 209-226.
- [69] 李芳浩, 朱广琪, 郭小旬, 等. 风味蛋白酶酶解制备中国对虾调味料风味前体物质工艺优化[J]. 食品工业科技, 2018, 39(24): 164-169, 176.
- LI F H, ZHU G Q, GUO X X, et al. Optimization on the preparation of flavor precursor of *penaeus chinensis* seasoning by flavour protease hydrolysis technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(24): 164-169, 176.
- [70] 刘丽萍, 郝丹妮, 张新笑, 等. 内源蛋白酶对肉品风味的影响研究进展[J]. 肉类研究, 2025, 39(11): 72-81.
- LIU L P, HAO D N, ZHANG X X, et al. Effects of endogenous proteases on meat flavor: a review[J]. Meat Research, 2025, 39(11): 72-81.
- [71] 刘夏磊, 刘芯如, 王雨恬, 等. 鲈鱼干加工过程中热处理及内源酶对风味形成的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 220-226.
- LIU X L, LIU X R, WANG Y T, et al. Effects of heat treatment and endogenous enzymes on flavor formation during the processing of dried sea bass[J]. Food Science, 2022, 43(8): 220-226.
- [72] ESTÉVEZ M. Protein carbonyls in meat systems: a review[J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279.
- [73] 王兆明, 贺稚非, 李洪军. 脂质和蛋白质氧化对肉品品质影响及交互氧化机制研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(11): 295-301.
- WANG Z M, HE Z F, LI H J. A review of the effect of lipid and protein oxidation on meat quality and their interrelationship[J]. Food Science, 2018, 39(11): 295-301.
- [74] 张建友, 赵瑜亮, 丁玉庭, 等. 脂质和蛋白质氧化与肉制品风味特征相关性研究进展[J]. 核农学报, 2018, 32(7): 1 417-1 424.
- ZHANG J Y, ZHAO Y L, DING Y T, et al. Relationships of lipid oxidation and protein oxidation with flavor characteristics of meat products[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(7): 1 417-1 424.
- [75] ESTERBAUER H, SCHAUR R J, ZOLLNER H. Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes[J]. Free Radical Biology and Medicine, 1991, 11(1): 81-128.
- [76] HUANG Y X, SARKHEL S, ROY A, et al. Interrelationship of lipid aldehydes (MDA, 4-HNE, and 4-ONE) mediated protein oxidation in muscle foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(32): 11 809-11 825.
- [77] 胡春林, 谢晶. 蛋白质氧化对肉食用品质影响的研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(17): 275-281.
- HU C L, XIE J. Progress in understanding the effect of protein oxidation on the eating quality of meat[J]. Food Science, 2021, 42(17): 275-281.
- [78] TOKARCZYK G, BIENKIEWICZ G, BIERNACKA P, et al. Effect of frying temperature on lipid binding, fatty acid composition, and nutritional quality of fish crackers prepared from carp (*Ciprinus carpio* L.) and tapioca starch (*Manihot esculentus*) [J]. Molecules, 2025, 30(5): 1 139.
- [79] 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 Y M J, LIN X, LI Y X, et al. Research progress on the interaction between lipid and protein oxidation in aquatic products and its impact on their quality: a review[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2024, 39(2): 360-368.