

蒸制烹饪对鱼肉品质影响的研究进展

程琨雅¹, 李彩云², 张明明², 郑健², 董士远^{1*}, 张浩¹, 杜怡鑫¹

(1. 中国海洋大学食品科学与工程学院, 海洋食品加工与安全控制全国重点实验室, 山东青岛 266003)

(2. 海尔数字化家电国家重点实验室, 青岛海尔智慧厨房电器有限公司, 山东青岛 266101)

摘要: 鱼肉富含蛋白质、脂肪酸等多种营养成分, 蒸制是国内普遍采用的鱼类烹饪方式。众多学者对鱼肉蒸制过程中风味、蛋白结构等方面的变化进行了研究, 仍缺乏系统性总结与归纳。蒸制过程中的传热传质导致鱼肉品质发生不同程度的改变, 且其成熟度是评价蒸制程度的关键指标。本文旨在概述鱼肉蒸制过程中传热传质机制及成熟度评价的研究进展, 并从感官品质、风味物质、蛋白质结构等角度详细阐述蒸制烹饪过程中鱼肉品质的具体变化, 以为鱼肉烹饪加工品质的研究及烹饪设备的参数调试提供理论依据。

关键词: 鱼; 烹饪; 传热传质; 蛋白; 品质特性

文章编号: 1673-9078(2026)2-341-350

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1567

Research Progress on the Effects of Steaming on Fish Meat Quality: A Review

CHENG Kunya¹, LI Caiyun², ZHANG Mingming², ZHENG Jian², DONG Shiyuan^{1*}, ZHANG Hao¹, DU Yixin¹

(1. State Key Laboratory of Marine Food Processing and Safety Control, College of Food Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266003, China) (2. State Key Laboratory of Haier Digital Home Appliances, Qingdao Haier Smart Kitchen Appliance Co. Ltd., Qingdao 266101, China)

Abstract: Fish is rich in various nutrients, such as proteins and fatty acids. Steaming is a commonly adopted method for cooking fish in China. Many researchers have investigated the changes in the flavor and protein structure of fish meat during steaming; however, systematic reviews and summaries of pertinent research are lacking. Heat and mass transfer during the steaming process alters fish meat quality to various degrees, and the doneness of fish meat is a key indicator for evaluating the degree of steaming. The present paper aimed to summarize research progress on heat and mass transfer mechanisms and doneness evaluation in the fish meat steaming process. Specific changes in fish meat quality during the steaming process were elucidated, including changes in sensory quality, flavor substances, and protein structure. This review provides a theoretical basis for future research on fish meat cooking, processing quality, and parameter tuning for cooking equipment.

Key words: fish; cooking; heat and mass transfer; protein; quality attributes

引文格式:

程琨雅, 李彩云, 张明明, 等. 蒸制烹饪对鱼肉品质影响的研究进展[J]. 现代食品科技, 2026, 42(2): 341-350.

CHENG Kunya, LI Caiyun, ZHANG Mingming, et al. Research progress on the effects of steaming on fish meat quality: a review [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 341-350.

收稿日期: 2024-10-20; 修回日期: 2025-01-09; 接受日期: 2025-01-16

基金项目: 国家重点研发计划“蓝色粮仓科技创新”重点专项(2018YFD0901005)

作者简介: 程琨雅(1998-), 女, 博士研究生, 研究方向: 食品加工, E-mail: 15840969561@163.com

通讯作者: 董士远(1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品加工, E-mail: dongshiyuan@ouc.edu.cn

鱼类的典型烹饪加工方式包括蒸制、煮制、油炸和烤制等, 其中蒸制烹饪加工在保留或改善其鲜味及口感等方面具有突出优势^[1]。蒸制程度对鱼肉食用品质具有重要影响, 如蒸制“过度”将导致其鲜味破坏或营养成分损失, 而蒸制“不充分”则可能引发潜在的食品安全隐患, 例如微生物污染等问题。目前, 蒸制烹饪条件对鱼肉主要组分、质构、风味等方面影响

已受到广泛关注。鱼肉在热加工过程中所引起的蛋白、脂肪和风味成分等结构或含量改变,是影响其感官品质的主要内因^[2,3]。另外,在蒸制加工过程中,醛类、醇类等挥发性物质是影响鱼肉风味的关键因子,对形成鱼肉的风味轮廓具有显著贡献。

目前,国内关于烹饪过程中传热传质等研究仍然较少,仍需借鉴国外已有成果深入探究烹饪过程中食材内部热量与水分传递的实时状态,通过蒸制过程中传热与传质过程的解析,有助于实现鱼肉“智能化”烹饪技术革新^[4]。另外,邓力^[5]基于成熟度理论,对烹饪程度与感官品质变化关系提出了新的动力学函数—成熟值(Maturity value, Mv),定量表征了食品的某些成熟品质因子(色、香、味)经受热输入能量后到达的成熟阶段以及对应的成熟值。将传热传质理论与成熟度理论相结合,能够精确描述食材在烹饪过程中所经历的热量传递、水分迁移以及感官品质的变化状态,进而实现对食材成熟程度的科学判断,从而减少对烹饪者主观经验的依赖。

本文概述了鱼肉蒸制过程的传热传质、熟度方面的理论及研究进展;从蛋白、脂肪、风味成分变化及安全危害物形成等角度,详述了蒸制烹饪加工对鱼肉品质影响的研究进展,以期对鱼肉烹饪加工品质的研究及烹饪设备的参数调试提供理论依据。

1 蒸制传热传质过程及熟度评价

1.1 传热传质过程

以水或水蒸气为介质的食品蒸制过程,主要涉及热量传递(温度-时间)与质量传递(食材水分-时间)两大方面^[6,7],其数值模拟一直是食品科学领域的研究热点。传热传质研究的基础是对烹饪进行基于传热学、动力学和成熟值的本质剖析,多采用多孔介质热/质传递数学模型进行建模^[8,9]。

目前,较多研究聚焦于牛排、西式火腿等肉类烹饪过程的传热传质^[10]。通过构建并验证冷点温度-加热时间预测模型,结合成熟度评估公式,能够精确地绘制出食品冷点成熟度随时间变化的曲线^[11],进而依据预设的终点成熟度值,通过插值法精确计算出食材达到理想成熟状态的烹饪条件^[12,13]。石宇等^[14]运用该方法预测了西式火腿达到成熟所需的确切烹饪时间(35 min),这一数值显著低于传统经验值,为西式火腿烹饪控制提供了科学依据。然而,关于鱼肉蒸制过程中的传热传质模型研究较少。

Blikra等^[15]采用多孔介质数学模型,研究鳕鱼块在蒸烤箱内的传热传质特性,将鳕鱼块模拟为颗粒状食品,并利用红外技术监测蒸制过程中鳕鱼块热负荷

及其各深度层的中心温度,通过对比冷点温度的实际测量值与模型预测值,验证了传热效果预测模型的可信度。同时,预测了鳕鱼块内部的水分含量变化,并验证了其与实际情况的高度一致性,从而揭示出蒸箱湿度对于维持鱼块含水量的关键作用。Bell等^[16]利用一维傅里叶模型预测金枪鱼中心温度的变化曲线,也验证了测量值与模拟值之间的高度一致性。因此,需要建立鱼肉主要组分变化的传热传质模型,为鱼类蒸制烹饪加工控制技术开发提供基础理论指导。

1.2 成熟度评价方法

目前,鱼肉烹饪加工的成熟度评价主要依靠主观经验。烹饪是食品经历一系列物理或化学反应的过程而影响食品品质及熟度变化的过程。有研究表明大多数食品加热品质变化呈现一级动力学规律^[17]。邓力等^[5]基于烹饪程度与感官品质变化的关系提出并定义成熟值,其为某一表征成熟的烹饪品质因子相对于参考温度的等效加热时间,定量表征了食品的成熟品质因子以及成熟值。成熟值模型融合了感官评价与量化分析,能够精确评估产品的真实成熟程度或烹饪成熟阶段^[18,19]。

目前,众多学者已将成熟值理论广泛应用于猪里脊肉、菠菜、米饭等烹饪研究中,深入探究了食材在烹饪过程中达到理想成熟度所需时间及其相关的成熟度参数^[20]。然而,关于成熟值理论在蒸煮鱼肉中应用的研究仍然不多。Wan等^[21]比较了水煮贵州酸汤鱼到达终点成熟值与感官最佳样品的风味与滋味差异,发现酸汤鱼到达终点成熟值的时间远小于最佳风味样品对应时间。因此,对于建立蒸制鱼肉成熟值的评价方法方面仍有待于继续研究。

2 蒸制对鱼肉品质的影响

鱼肉在蒸制烹饪加工的品质变化受其蒸制时间、方式、升温速率等因素的影响,且与蒸汽量等因素有关。烹饪设备的传热传质效率对于鱼肉的感官、营养、风味与安全品质均有重要影响^[22]。成熟度理论中的成熟值(Mv)与过热值(Optimal value, Ov)则是基于感官评价对鱼肉熟度进行判断的可靠依据^[10]。鱼肉蒸制传热传质过程中的感官、营养、风味及安全品质相互关系如图1所示。图中央聚焦于鱼体周围的是影响鱼肉品质的关键因素:蒸制温度、蒸制时间及蒸汽量。外围部分阐述的是在蒸制工艺中涉及的热量与质量传递机制,以及用于表征烹饪进程的关键参数——成熟值与过热值。最外层则详细列出了烹饪过程中鱼肉品质发生变化的几个方面,具体包括感官品质、风味特性、安全性以及营养性。蒸制烹饪条件对鱼肉理化特性及品质的影响如表1所示。

表 1 蒸制条件对鱼肉的理化特性及品质的影响

Table 1 Effects of steaming indices on the physical and chemical properties and quality of fish				
研究对象	烹饪设备及条件	测试主要指标	主要结论	文献
大口黑鲈	整鱼（打花刀）/ 蒸箱 / 蒸至鱼肉中心温度达 45~85 ℃	烹饪损失率、色泽、质构、感官评价；挥发性成分	当中心温度为 45~55 ℃ 时，鲈鱼熟度较低， <i>a</i> * 值与弹性值显著升高；65~75 ℃ 时，鱼肉熟度得到提升，感官上的滋味和气味得分均有所增加；85 ℃ 时鱼肉出现“过热化”，弹性值显著降低，汁液流失加剧。随蒸制进行，质量损失率逐渐上升。	[3]
	整鱼 / 蒸箱 / 高温蒸：100 ℃ 蒸至中心温度 70 ℃（下同）；低温蒸：75 ℃ 蒸至 70 ℃；先高温后低温蒸：100 ℃ 蒸至 55 ℃、75 ℃ 蒸至 70 ℃；先低温后高温蒸：75 ℃ 蒸至 55 ℃、100 ℃ 蒸至温度 70 ℃	烹饪损失率、过氧化值、硫代巴比妥酸值、羰基含量、体外消化率、微观结构、挥发性物质等	先高温后低温蒸减少脂质、蛋白氧化，降低过氧化值和硫代巴比妥酸活性物质水平；先低温后高温蒸与低温蒸则较好保持鱼皮的完整性；两种分步蒸制均降低了硬度，增加挥发性醛和醇的含量，提高气味接受度，减少鱼腥味。	[23]
海鲈鱼	鱼片 / 电磁炉及蒸锅 / 蒸制：4~12 min	烹饪损失率、色泽、质构、水分分布；游离氨基酸	随蒸制进行，海鲈鱼肉烹饪损失率显著上升，硬度和咀嚼度先下降后又显著增大； <i>L</i> * 值和 <i>b</i> * 值显著升高， <i>a</i> * 值显著降低。游离氨基酸的总量在蒸制 10 min 达到最高值；其中蒸制 8~10 min 鲈鱼片的品质及风味较好。	[24]
	鱼片 / 恒温水浴锅 / 40~100 ℃ 恒温水浴加热至鱼肉中心达水浴温度	感官、色泽、质构、水分；肌肉蛋白含量、总巯基、表面疏水性等	加热温度对鱼肉品质有较大影响；鱼肉色泽的 <i>L</i> * 值、 <i>a</i> * 值和 <i>b</i> * 值随着温度的升高而增加，硬度、内聚性、咀嚼度和蛋白质表面疏水性等呈先升高后下降趋势，大部分肌原纤维蛋白发生变性。70 ℃ 时鱼肉的品质最佳。	[25]
	鱼块 / 常规蒸锅 / 蒸制：4~12 min	挥发性风味成分	不同蒸制时间下海鲈鱼肉的风味物质组成存在明显差异，蒸制过程中共鉴定出 43 种挥发性物质，醛类物质相对含量最高，其中 3-甲基丁醇、1-庚醇、糠醇和 (E)-2-庚烯醛可作为生熟海鲈鱼肉的特征标志物。	[26]
	鱼片 / 常规蒸锅、炸锅 / 蒸制：100 ℃，4~12 min；油炸：180 ℃，2~4 min	水分分布、微观结构、游离氨基酸、呈味核苷酸、挥发性风味成分、蛋白体外消化率等	蒸制处理对海鲈鱼肌肉结构较完好；炸制鱼片脂肪氧化程度显著高于蒸制；蒸制鱼片消化液的 Fe ²⁺ 螯合能力显著高于炸制、新鲜鱼片。	[27]
	鱼片 / 恒温水浴锅 / 水浴加热、50~75 ℃、30 min	持水率、蒸煮损失率、质构、微观组织结构等	水浴加热温度从 50 ℃ 升至 75 ℃，鱼片硬度逐渐增大，鱼肉组织松散，肌纤维结构断裂，但温度过高会使肌纤维交联；加热温度为 50 ℃ 时河豚鱼有较好的嫩度且能保持很好的肉质。	[28]
红鳍东方鲀	鱼片 / 常规煮锅、常规蒸锅、微波炉、烤箱 / 水煮：沸水煮 10 min；蒸制：沸水蒸 25 min；微波烤制：700 W，3 min；烤制：200 ℃，20 min	感官、挥发性成分、水分含量、水分分布	鱼片中心温度升温速率：微波>蒸制>水煮>烤制；除烘烤外，其他烹饪方法未显著改变其原始水平的游离水比例；烘烤鱼片具有最高的亮度值及咸味，蒸制与煮制喷在保持鱼片的嫩度与口感方发挥了积极作用。	[29]
大西洋鲑鱼	鱼片 / 蒸汽烤箱 / 蒸汽烤：烤箱内注入蒸汽：65 ℃，20 min，RH=100%；低温慢烤（sous-vide）：真空包装鲑鱼片 65 ℃，20 min，RH=100%；烤制：65 ℃，20 min	过氧化值、硫代巴比妥酸反应物质、生育酚含量；脂肪酸含量、虾青素含量	蒸汽加热鱼片中心温度升高速率高于空气对流，避免了因表面温度过热造成的虾青素降解、脂质过氧化；采用蒸汽加热的鱼片品质优于传统对流加热。	[30]
	鱼块 / 蒸锅、烤箱 / 蒸制：120 ℃，6 min；烤制：180 ℃，8 min	质构、微观组织结构、水分分布；游离氨基酸含量、挥发性风味成分、脂肪酸组成	烤三文鱼的硬度、粘性和耐嚼性等显著较高，蒸三文鱼的硬度值、弹性值较低；烤箱烹饪与蒸三文鱼中的醛、酮和醇等挥发性物质显著较高。蒸制的三文鱼品质较好。	[31]

续表1

研究对象	烹饪设备及条件	测试主要指标	主要结论	文献
白鲑鱼	鱼块 / 蒸锅 / 蒸制: 60 ℃, 3~20 min; 80 ℃, 1~12 min; 100 ℃, 1~6 min, RH=100%	肌原纤维含量、色度、 质构、持水能力、 微观结构	白鲑鱼 60 ℃下蒸煮 12 min, 蒸煮损失最小, 持水性好, 质构品质最佳。蒸煮过程中肌原纤维蛋白变性导致其相对提取率下降, 与颜色 (尤其是亮度 <i>L</i> *) 变化密切相关。肌原纤维和胶原蛋白的变化决定了鱼的食用品质, 包括质构属性及烹饪损失、持水性。	[22]
鳀鱼	鱼片 / 常规煮锅 / 蒸制: 沸水, 4~12 min	质量损失率、质构、肌原纤维蛋白含量、肌浆蛋白含量、水分分布、游离氨基酸、挥发性风味物质等	蒸制过程中质量损失率在 0~6 min 迅速上升后趋于稳定, 硬度减小, 肌原纤维蛋白、肌浆蛋白含量在 0~6 min 内显著下降后趋于稳定; 呈鲜甜味谷氨酸、游离氨基酸总量呈现先升高后降低趋势。蒸制 6~8 min 鳀鱼鱼块品质及风味最佳。	[31]
黄鱼鲞 (轻度腌制大黄鱼)	整鱼 / 煮锅、烤箱、常规炸锅 / 蒸制: 沸水, 10 min; 烤制: 80 ℃, 15 min; 煎炸: 220 ℃, 8 min; 深度油炸: 预热 220 ℃, 1.5 min	感官评定、滋味活性值、风味重构与遗漏试验、挥发性风味成分	在鲜、蒸、烘烤、煎炸、油炸样品中分别检测到 30、25、19、19、15 种挥发性物质; 茴香脑被确定为关键的气味活性化合物。	[33]
金头鲷、大西洋白姑鱼	鱼片 / 烤箱、蒸煮锅、平底锅 / 烤制: 180 ℃ / 烤制: 180 ℃ / 15 min; 蒸制: 100 ℃ / 20 min; 油炸: 预热; 4 min, 油炸 4~5 min	水分含量、灰分、蛋白质含量、脂质含量脂肪酸、甾醇、角鲨烯等	四种烹饪方式下的金头鲷中 n-6/n-3 和 SFA/PUFA 比率出现了上升。蒸制与烤制下的两种鱼产生了相似的感官特征, 而油炸鱼片则具有独特的特征。	[34]
鲟鱼	背部肉鱼片 / 常规电磁炉 / 蒸制: 100 ℃, 4~20 min	游离氨基酸、无机离子、感官; 风味核苷酸、有机酸、甜菜碱	在蒸制过程中, 鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量变化明显, 呈现先升高后降低趋势; 蒸制 12~16 min 时风味核苷酸总量最多, 随着蒸制时间的延长, 有机酸和无机离子总量在减; 蒸制时间为 12~16 min, 鱼肉中的鲜味氨基酸、甜味氨基酸和风味核苷酸含量较高, 滋味较好。	[35]
	鱼片 / 电磁炉、家用煮锅、电蒸箱、电烤箱 / 水煮: 沸水, 8 min; 蒸制: 100 ℃, 8 min; 微波加热: 800 W, 3 min; 烤制: 200 ℃, 20 min; 油炸: 180 ℃, 5 min	脂肪含量、蛋白质含量、水分含量、硫代巴比妥酸值、蛋白总羰基值、游离巯基值、席夫碱类物质、游离氨基	油炸、烤制方式造成鱼片氧化程度最大。在胃消化阶段, 烤制与油炸样品蛋白消化性较低; 经小肠消化后, 各类熟制样品的游离氨基值均低于原料肉。	[36]
	整鱼 / 杰冠电扒炉 / 加入盐、料酒等腌渍 0~60 min, 采用蒸箱蒸制至鱼肉中心温度达 75 ℃	pH 值、质构、持水力、失水率、感官评定等	带鱼经 30 min 腌制, 此时蒸带鱼硬度最低, 黏附性和胶黏性较小, 同时持水率较高, 口感较好。	[37]
带鱼	鱼块 / 常规蒸锅、炸锅 / 煮制: 98 ℃煮沸 5~15 min; 油炸: 160 ℃油炸 5~15 min; 烤制: 220 ℃; 烘焙 20~30 min	蒸煮损失率、色泽、水分含量、蛋白含量、脂质含量、脂质氧化程度; 游离氨基、巯基含量、羰基含量、体外消化率	煮制烹饪的带鱼中的早期、晚期美拉德反应来源的蛋白修饰产物糠氨酸、羧甲基赖氨酸要明显低于油炸与烘烤带鱼的, 表明煮制是烹饪带鱼的更健康方式; 煮制带鱼鱼片中的蛋白游离氨基损失较少, 且其蛋白消化性较高; 且煮制、烘烤时间对带鱼的消化性影响较小。	[38] [39]
草鱼	鱼片 / 电磁炉 / 微波: 400 W, 10 min; 蒸制: 沸腾, 15 min; 油炸: 170 ℃, 2 min	电子鼻、感官评定、挥发性风味物质	油炸、汽蒸、微波烹饪方式下的鱼肉气味均带有一定的腥味、青草味, 但油炸烹饪方式下的鱼肉风味主要表现在焦香味和油脂味。	[40]
鳊鱼	鱼块 / 蒸锅 / 蒸制: 5 min	肌肉组织形态、蛋白分子量、质构、传热曲线、蛋白变性程度、	蒸制鳊鱼鱼肉中肌联蛋白、肌动蛋白和结缔组织蛋白的降解主要影响其储存 1~3 d 鱼肉适口性, 肌球蛋白降解则影响储存 4~5 d 鱼肉的蛋白结构。	[41]
斑点叉尾鲷	鱼片 / 常规蒸锅、煮锅、烤锅 / 水煮: 中心温度达 70 ℃; 蒸制: 中心温度达 70 ℃; 烤制: 上火 200 ℃、下火 180 ℃至中心温度达 70 ℃	消化上清液水解度、肽含量、抗氧化活性、消化产物分子量、游离氨基酸	蒸制处理组的蛋白水解度、肽含量比生肉组高 15.98% 和 14.04%; 烹饪后鲷鱼肉消化终产物抗氧化能力强于生肉, 其中蒸制处理组的抗氧化能力最强	[42]

续表1				
研究对象	烹饪设备及条件	测试主要指标	主要结论	文献
鳊鱼	整鱼 / 电蒸箱 /60%~100% 腌渍液, 8~16 min/ 90~110 ℃蒸汽, 6~14 min+ 余温 “虚蒸” 5 min	感官评价、电子鼻	腌渍时间 10 min、蒸制时间 9.5 min、腔体蒸汽温度 105 ℃、腌渍液浓度 95% 时, 清蒸鳊鱼表现出较好的感官性状, 风味品质更好。	[43]
鲑鱼, 竹夹鱼	鱼片 / 电蒸锅、电烤箱、微波炉 / 蒸制: 25 min, 83.5 ℃; 烤制: 250 ℃, 20 min; 微波加热: 1 500 W, 12 min	水分含量、脂质含量、蛋白含量、灰分、脂肪酸组成、矿物质组成	蒸制鲑鱼的水分含量下降幅度最大; 烤制鲑鱼及微波处理竹夹鱼脂质下降显著。铁和钙含量在烤制与微波加热中显著下降, 而在蒸制过程中则下降较小。	[44]
鲑鱼	鱼片 / 对流蒸汽烤箱 / 传统蒸制: 95 ℃, 15 min; 过热蒸汽蒸制: 95 ℃, 蒸汽温度 320 ℃, 15 min	粗脂肪含量、粗蛋白含量、游离脂肪酸、脂肪酸氧化程度	过热蒸汽样品中二十碳五烯酸 (EPA) 和二十二碳六烯酸 (DHA) 含量较传统蒸制样品显著降低, 但过热蒸汽样品的 TBARS 值明显低于蒸制样品。	[45]
	鱼片 / 电烤架、电烤箱、蒸锅、高压灭菌锅 / 烧烤: 25~30 min; 烘烤: 200 ℃、25~30 min; 蒸制: 100 ℃、10~25 min; 高压蒸制: 1 atm, 10~25 min; 过热蒸汽蒸制: 200 ℃, 10~25 min	灰分、水分含量、水分活度、粗脂肪含量、粗蛋白含量、游离脂肪酸、脂肪酸氧化程度	在短时蒸制 (10~20 min) 时, 三种蒸制方式的鱼肉 PUFA 含量之间无显著差异, 但蒸至 25 min 时, 高压蒸制对 PUFA 稳定性有较好保持作用。	[46]
鲟鱼	鱼块 / 蒸锅 / 沸水蒸制 4~16 min	共轭二烯 (CD)、三烯 (CT) 和四烯 (CTr)、游离脂肪酸、非靶向脂质组学等	蒸制鲟鱼游离脂肪酸含量变化呈先增后减趋势; 蒸制 16 min 的鲟鱼背部肉的多不饱和脂肪酸含量最高; 蒸制鲟鱼与 C18:1、C18:2、C20:4 和 C22:6 结合的磷脂是关键风味前体物。	[47]
黑鱼	鱼块 / 蒸锅 / 沸水、3~21 min	挥发性物质、电子鼻、感官	醛类、醇类化合物的含量最高, 占主导地位, 其中醛类物质阈值低, 是蒸制黑鱼的主要呈味物质, 并于蒸制 12 min 时在所有挥发性风味物质中占比最高, 此时的挥发性风味最佳。	[48]
罗非鱼	鱼饼 / 油炸机、煮锅、烤箱 / 油炸: 150~200 ℃、4~12 min; 水煮: 沸水、10~20 min; 烤制: 180~240 ℃、10~30 min	色差、质构、杂环胺	水煮鱼饼的 L^* 和 a^* 随加热时间延长而降低, b^* 升高; 水煮鱼饼中未检出 HAAs, 而烤制和油炸鱼饼中 HAAs 含量较高。	[49]

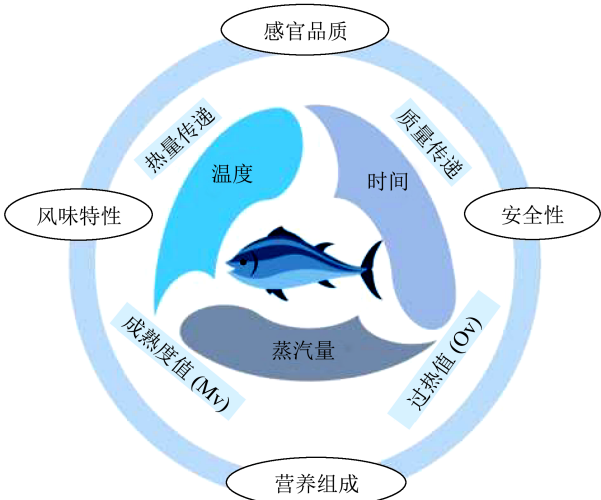


图 1 鱼肉蒸制传热传质过程与其品质的相互关系示意图

Fig.1 Schematic diagram of the relationship between heat and mass transfer process in fish steaming and its quality

2.1 感官品质

很多研究表明, 蒸制鱼肉的中心温度控制在 65~80 ℃能够获得较佳感官品质, 而较高中心温度所导致的过熟容易造成汁液损失及风味劣变, 从而降低其感官品质^[23]。

吴燕燕等^[24]在蒸制海鲈鱼的研究中发现, 当中心温度达到 70 ℃时, 鱼肉嫩度最佳并表现出多汁特性; 当中心温度达到 90 ℃, 其滋味评分下降, 与汁液流失造成的肌浆蛋白中鲜味氨基酸流失有关。王科瑜等^[26]在蒸制大口黑鲈 (中心温度 45~85 ℃) 时发现, 随中心温度上升, 鱼肉的感官品质逐渐提高, 中心温度为 65 和 75 ℃时鱼肉样品鲜味与肉香味显著上升, 但弹性略有下降。相比于 45、55 与 85 ℃得分较为均衡, 感官品质突出。钟明慧等^[35]通过电子舌结合感官评价探索鲟鱼背部肉蒸制时间 (8~20 min) 与品质变化关系发现, 沸水蒸制 16 min 样品感官品质达到最佳。张璇等^[40]发现汽蒸与微波方式下的草鱼鱼肉具有相似度

感官品质, 由于在烹饪过程中以水蒸气为主要的传热介质, 因此产生的突出感官风味为煮熟味, 且具有较高的青草味与腥味。然而, 吴炳存等^[28]采用低温慢煮河豚鱼肉发现, 50℃处理 30 min 其嫩度提高且能保持较好的口感。Wang 等^[27]对大口黑鲈阶段性蒸制时发现, 与 75℃低温蒸制相比, 由 75℃烹饪至中心温度 55℃再经 100℃烹饪至中心温度 70℃的程序提高鱼肉气味接受度, 减少了鱼腥味。

2.2 色泽

目前, 围绕蒸制温度(或经包装处理的煮制)对鱼肉的色差变化开展了较多研究^[50]。研究发现, 多数鱼肉色泽在中心温度达到 60~65℃, 烹饪时间达到 8 min 后不再发生显著的改变。王科瑜等^[26]发现在蒸制大口黑鲈的过程中, 鱼肉新鲜样品的亮度值低, 随中心温度的上升至 45℃时, 鱼肉亮度值、红度值和黄度值均显著升高。随着中心温度的继续升高至 65℃, 其 L^* 值和 b^* 值仍有所增加, 但 a^* 值则呈现了下降趋势, 75~85℃鱼肉色泽有所改善, 但差异相对较小。因此, 中心温度达到 65℃鱼肉内部色泽基本稳定。赵洪雷等^[23]则在蒸制海鲈鱼时发现了相似的现象, 在蒸制时间达到 8 min 后鱼肉的色泽不再发生显著的改变, 但是在此研究中海鲈鱼鱼肉的亮度值 L^* 和黄蓝值 b^* 一直保持上升的趋势, 而红绿值 a^* 值则保持着下降的趋势。吴燕燕等^[24]使用水浴锅控制海鲈鱼中心温度则发现当水浴温度超过 60℃, 色泽的变化就已经非常缓慢, 这与 Schubring 及冯雨薇^[51,52]的研究结果相一致。Schubring 等^[51]发现, 虹鳟鱼肉 L^* 值随水煮温度(35~60℃)升高而增大, 而水煮温度高于 60℃其 L^* 值变化较小。冯雨薇^[52]发现沙丁鱼、鲭鱼和鲱鱼等的 L^* 值在水煮温度由 40℃升至 50℃时呈现上升趋势, 而在水浴温度由 60℃升至 80℃过程中则变化较小; 而其 a^* 值随水煮温度的升高呈下降趋势; b^* 值则呈现无规律变化。

2.3 质构

肌肉的水分、胶原蛋白、弹性蛋白和肌纤维本身及其相互作用决定了食品的质构特性^[53]。鲜鱼的肉质特征在于其肌纤维的柔软性与细胞结构的完整性, 这就使其具有较低弹性与较高剪切力^[54]。蒸制处理后, 鱼肉中的结缔组织与肌纤维细胞均出现了不同程度的热变性, 同时也有研究认为此时发生了肌原纤维蛋白的解折叠, 进而使得鱼肉组织在高温(>75℃)状态下变得松散^[55]。王科瑜等^[26]研究了大口黑鲈在蒸制过程中的鱼肉质构特性, 发现当蒸制中心温度低于 85℃时, 其鱼肉弹性变化较小, 而当中心温度达到 85℃时,

其弹性值相比明显降低; 赵洪雷等^[23]发现, 在蒸制海鲈鱼鱼片过程中, 短时间(0~6 min)内蒸制的鱼肉硬度变化较小, 当加热达到 8 min 及更长时间时其鱼肉的硬度明显增大。吴炳存等^[28]对比了水浴温度对红鳍东方鲀鱼肉质构特性的影响, 发现其硬度、咀嚼性等均在较高水浴(60、75℃)下达到最高值。

因此就质构而言, 低温(中心温度低于 85℃)短时(烹饪时间 0~6 min)时, 鱼肉的硬度、弹性等变化较小, 当中心温度升至 85℃或烹饪至 8 min 及更长时间时, 鱼肉的质构特性会发生显著性改变。目前, 对于蒸制温度对不同种类鱼肉的质构特性开展了较多研究, 而关于蒸汽量等参数对于鱼肉质构影响仍需进一步阐明。

2.4 风味物质

鱼肉烹饪蒸制过程引起其挥发性成分(醛、醇、酯、酮等)和非挥发性成分(游离氨基酸、呈味核苷酸、有机酸等)的显著变化, 这与其脂质水解和氧化、含氮化合物的降解和美拉德(Maillard)反应等密切相关。蒸制条件影响鱼类风味和滋味形成轮廓, 且受其脂质及氨基酸含量改变的影响。

冯媛^[25]在蒸制海鲈鱼过程(4~12 min)中发现, 谷氨酸在蒸制 10 min 样品中含量最高。且在蒸制 10 min 时的总氨基酸含量与炸制 4 min 时达到了相同较高水平。王科瑜等^[26]对大口黑鲈在蒸制过程中的风味变化研究发现, 当中心温度由 45℃升至 85℃, 其醛类、醇类物质呈现先上升(45~65℃)后下降(65~85℃)趋势; 己醛、辛醛、壬醛等良好风味物质含量升高; 2,3-戊二酮和(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮等腥味物质的降低。徐永霞等^[3]发现随蒸制时间(2~12 min)延长, 鱼肉中醛类、酮类和醇类物质的含量逐渐增加, 其中醛类物质相对含量最高, 3-甲基丁醇、1-庚醇、糠醇和(E)-2-庚烯醛可作为生熟海鲈鱼肉的标志物。戴振庭等^[32]发现, 鲢鱼背部肉在沸水蒸制 4~12 min 过程中, 其呈鲜甜味的谷氨酸含量、游离氨基酸总量随蒸制时间延长呈现先升高后降低趋势, 并分别在 6、8 min 时达到最高值; 此时, 呈腥味的庚醛和壬醛的相对含量最低, 具有较低的腥味。另外, Wang 等^[27]对比了分段式烹饪对大口黑鲈的挥发性风味影响发现, 相对于高温蒸与低温蒸, 两种分步蒸制(先高温后低温、先低温后高温)均增加挥发性醛和醇的含量, 提高气味接受度, 减少鱼腥味。

因此, 鱼肉的风味物质含量在烹饪过程中大都呈现先升高后降低趋势, 在蒸制进行到后期(时间≥10 min, 中心温度≥65℃)出现最高值。

2.5 蛋白结构

蒸制所引起的鱼肉蛋白结构变化影响其持水性、凝胶网络结构的变化,从而影响嫩度、口感和营养价值等感官品质。随着烹饪熟度的增加,鱼肉构象经历了由展开向聚集形态的转变。在展开过程中与风味物质结合,聚集过程中则进一步影响了鱼肉的持水性等物理特性,从而导致风味与质构发生了显著变化(如图2)。孙丽等^[56]研究蒸煮对金枪鱼蛋白的影响时发现,当中心温度 60 °C 时其水溶性蛋白含量已不能被检出,而在 80 °C 时其盐溶性蛋白含量降至生肉的 1/4。在蛋白变性方面,Zhang 等^[57]采用对流蒸烤箱蒸制(121 °C)大西洋鲑鱼过程中,发现当中心温度达 40 °C 时,其肌球蛋白和胶原蛋白变性,70 °C 时肌动蛋白变性,出现此现象的原因可能是肌动蛋白相比于其它类蛋白具有较高耐热性;Zhang 等^[29]研究发现,提高传热效率能够显著影响红鳍东方鲀食用品质,微波短时蒸制其蛋白变性程度低,导致固定水 T_{22} 和游离水 T_{23} 的横向弛豫时间值较高,嫩度得到大幅提升。因此,鱼肉蒸煮过程中蛋白的适度变性有助于保持其较佳的品质。此外,有关加热鱼肉肌原纤维蛋白在凝胶强度、聚集以及降解等方面的研究已引起广泛关注。袁丽等^[58]发现,鲑鱼肌原纤维蛋白的形态受温度影响,当温度处于其变形温度点时,分子的展开与聚集呈较好的平衡状态,形成颗粒大且不沉降的聚集体。盖静^[59]发现,加热温度低时(<50 °C),鱼糜凝胶能有序地交联形成三维网络结构。然而当加热温度升高至>90 °C 时,蛋白质分子发生聚集,凝胶的网状结构骨架变得脆弱,孔隙变大。桂萍等^[60]发现,随水煮温度由 40 °C 升至 50 °C,鲑鱼肉、鸡胸肉混合肉肌原纤维蛋白质含量降低并发生构象变化, α 螺旋含量减少,SDS-PAGE 电泳图谱显示肌球蛋白重链条带变浅。

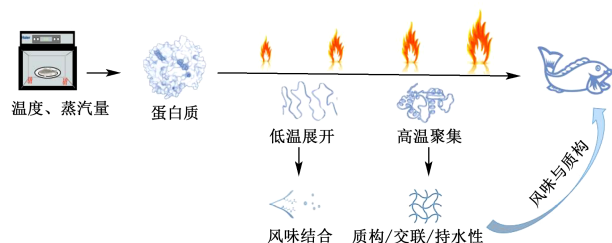


图2 鱼肉蛋白在蒸制过程中的结构变化

及对品质的影响

Fig.2 Structural changes in fish proteins during steaming and effect on quality

当前,鱼肉蛋白的消化特性受蒸制条件影响的问题已日益受到学术界的关注。蒸制烹饪方式导致鱼类蛋白发生不同程度的变性,从而影响其消化特性。

Tavares 等^[38]发现与烘烤、油炸相比,蒸煮带鱼鱼片中的蛋白游离氨基损失较少,且其蛋白消化率较高。胡吕霖等^[36]发现,在胃消化阶段,与烤制与油炸相比,煮制、蒸制处理鲑鱼鱼片的蛋白消化性较高。冯媛^[25]发现蒸制、炸制处理均显著提高了海鲈鱼肉蛋白体外消化率和体外模拟消化后蛋白水解度;但蒸制样品消化液的 Fe^{2+} 螯合能力显著高于炸制样品和新鲜样品,这表明其抗氧化性较强。

2.6 汁液流失

随着烹饪过程的进行,鱼肉中的水分及其他物质会流出,形成渗出液。蒸制时间对汁液流失情况有显著影响。总结发现,大多鱼类的汁液流失率会随着蒸制时间的增加而升。这是由于在加热过程中,蛋白质发生收缩,导致其持水性降低,同时疏水基团暴露。这些变化使得鱼肉的滋味与质构特性发生改变。然而,适度的汁液流失能够提升鱼肉的感官品质,但过度流失则会对鱼肉口感产生不利影响。赵洪雷等^[23]的研究发现,随着蒸制过程的进行,海鲈鱼肉的烹饪损失率显著上升,其硬度和咀嚼度先下降后显著增大,游离氨基酸总量在蒸制 10 min 时达到最高值,此时海鲈鱼的感官品质较优。然而王科瑜等^[26]研究发现,当蒸制大口黑鲈中心温度到达 85 °C 时,汁液流失加剧,导致其口感上湿润性的显著降低及肉质渣感的增强。此外,汁液流失与蛋白质含量在加热过程中也密切相关。戴振廷^[32]在蒸制鲤鱼时发现,质量损失率在 0~6 min 迅速上升后趋于稳定,与此同时,肌原纤维蛋白、肌浆蛋白含量也在该段时间内显著下降后趋于稳定。另外,与其他烹饪方式相比,蒸汽的加入能够更有效地保留营养物质,如脂肪酸。Aydin^[45]发现,随着蒸制鲑鱼的进行,25 min 时鱼肉中的多不饱和脂肪酸(Polyunsaturated Fatty Acid, PUFA)得以更好的保留。Sara 等^[46]也在研究中证实,过热蒸汽的加入有利于鲑鱼 EPA 与 DHA 的保留。

2.7 脂肪酸

鱼肉中不饱和脂肪酸(Unsaturated Fatty Acid, UFA)含量较高,是鱼肉中的主要营养物质。且脂肪酸作为风味前体物质,对风味的形成也具有显著影响。

目前研究发现,脂肪酸含量在蒸制过程中出现先增后减的趋势,过热蒸气不利于脂肪酸的保留,但高压的处理方式一定程度上可以降低蒸汽对脂肪酸的不利影响。Sara 等^[46]对比了传统蒸制(95 °C /15 min)与过热蒸汽蒸制(95 °C /15 min, 蒸汽温度: 320 °C)对鲑鱼中脂肪酸组成与含量的影响,发现过热蒸汽样品中二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)

含量较传统蒸制样品显著降低,推测是因过热蒸汽促进了 EPA、DHA 的水解。Aydin 等^[45]探究了传统蒸制(100 °C /10~25 min)、高压蒸制(1 atm/10~25 min)与过热蒸汽蒸制(200 °C /10~25 min)对鲑鱼脂肪酸的影响,发现在短时(10~20 min)蒸制时,三种蒸制方法鱼肉的 PUFA 含量的下降幅度无显著差异,但蒸至 25 min 时,高压蒸制组 PUFA 含量下降幅度显著低于其他组,这表明高压蒸制对 PUFA 具有较好保持作用。李珂等^[47]研究发现,在鲟鱼蒸制(100 °C /4~16 min)过程中,其游离脂肪酸含量变化呈先增后减趋势,蒸制 16 min 样品中各种 UFA 含量均有不同程度的增加。然而, Sardenne 等^[61]则发现,蒸制对大西洋鲭鱼的 ω -3 脂肪酸保持具有负面影响,蒸制鱼片中的脂肪酸含量低于烤制样品,推测原因为烤制改变鱼片质地,利于从组织中提取脂肪酸。

另外,脂肪酸作为挥发性化合物的前体物质和脂质的组成成分,其在蒸制过程中总量的增加有利于风味的形成。栗紫慧等^[48]在研究黑鱼蒸制过程中的风味变化时也指出,蒸制处理会促进脂肪氧化裂解,增加游离脂肪酸含量,进而促进相关游离脂肪酸和醇类的酯化反应与美拉德反应等,促进杂环类化合物含量升高,为蒸制黑鱼贡献独特的熟鱼风味。

2.8 安全危害物

近年来,关于蒸制程度对鱼肉的晚期糖基化终末产物(AGEs)、杂环胺等内源性安全危害物质形成的研究也受到关注。研究表明,相比于油炸、烘烤等其他烹饪方式,鱼肉蒸制形成的 AGEs、杂环胺含量相对较低。

食品中 AGEs 是还原糖及其衍生物的醛基或酮基与蛋白、氨基酸等氨基经美拉德反应形成的一系列有机物总称^[62]。煮制带鱼中的代表性 AGEs 的羧甲基赖氨酸(CML)明显低于油炸与烘烤带鱼^[39]。Niu 等^[63]分析来自不同个体的鲢鱼、鳊鱼肉蒸制过程中(100 °C /5~30 min)蛋白结合型 CML 水平变化,发现 5 min 蒸煮引起其 CML 水平升高约 1~3 倍,而 10 min 蒸煮(与 5 min 蒸煮相比)的多数个体 CML 仅增加 5%~20%,这表明蒸制鱼肉 AGEs 形成于其早期蒸制阶段。进一步研究发现^[64],蒸煮鱼肉的肌原纤维蛋白展开或聚集行为的影响其 Lys 和 Arg 残基暴露,进而影响其 AGEs 形成水平。因此,蒸制过程中鱼肉蛋白结构变化对于其 AGEs 形成水平具有重要影响。

杂环胺(HAAs)是蛋白类食品在热加工过程中形成的致癌化合物,其中加热方式、加热温度和加热时间是影响其形成的关键因素。目前,对于烘烤类食

品中 HAAs 形成已开展较多研究,而关于鱼类蒸制过程中 HAAs 的研究仍然较少。Fatih 等^[65]研究了不同 Sous-Vide 烹饪温度(65、75 和 85 °C)下不同烹饪程度(五分熟、全熟)鲑鱼片中的 HAAs 含量变化,发现对于总 HAAs 含量而言,各组间不存在显著性差异。总体来说,相比于油炸、烘烤等其他烹饪方式,鱼肉蒸制形成的杂环胺相对较少,但对于蒸烤箱等新型烹饪加工设备对于其 AGEs 形成的影响仍需深入研究。

3 总结与展望

蒸制烹饪加工条件对于鱼肉的品质具有重要影响。目前,围绕传统蒸制、新型蒸(烤)箱等烹饪设备对鱼类的感官品质、质构、风味、蛋白、脂质等的影响受到越来越多关注,对于蒸制温度等参数与鱼肉品质的相互关系已具备初步认识。众多研究表明,蒸制时将鱼肉中心温度控制在 65 °C 至 80 °C 范围内,能够获得优异感官品质;在该烹饪阶段,鱼肉色泽趋于稳定,风味物质与脂肪酸的含量达到峰值;鱼肉的质构特性则发生了显著变化。但目前对与鱼肉烹饪加工的传热传质过程、熟度评价等方面的研究仍需深入,这对蒸制烹饪加工控制及智能化蒸制烹饪设备的开发具有重要支撑作用。

建议未来相关研究围绕以下两个方面:1)丰富鱼类及预制食品蒸制烹饪传热传质理论,弥补目前鱼类传热传质模型局限于小尺寸这一现状,建立相关整鱼数学模型,为整鱼烹饪提供参考;2)分析蒸制设备参数与鱼肉蒸制品质的相互作用,建立全面评价体系,填补目前国内外研究对于鱼类品质系统研究的空白。揭示鱼肉成熟度的关键标志物及机理,及蒸制烹饪加工对鱼肉组分、质构、风味品质影响机制。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 杨欣怡,刘源,许长华,等.水产品中挥发性风味物质提取和分析研究进展[J].食品科学,2015,36(5):289-295.
- [3] 徐永霞,白旭婷,冯媛,等.基于GC-IMS和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化[J].食品科学,2021,42(22):270-275.
- [4] 王福田,杨冰,鲁玉凤,等.不同蒸煮方式青蟹肌肉感官品质分析和比较研究[J].肉类研究,2021,35(6):28-36.
- [5] 邓力.中式烹饪热/质传递过程数学模型的构建[J].农业工程学报,2013,29(3):285-292.
- [6] YU Y, TANG M, DAI H, et al. Dominating roles of protein conformation and water migration in fish muscle quality: The effect of freshness and heating process [J]. Food Chemistry, 2022, 388: 132881.

- [7] HALDER A, DHALL A, DATTA A K. An improved, easily implementable, porous media based model for deep-fat frying: part I: model development and input parameters [J]. Food & Bioproducts Processing, 2007, 85(3): 209-219.
- [8] 余冰妍.油传热烹饪过程的数值模拟及实验研究[D].贵阳:贵州大学,2019.
- [9] 邓力.炒的烹饪过程数值模拟与优化及其技术特征和参数的分析[J].农业工程学报,2013,29(5):282-292.
- [10] 邓力.烹饪过程动力学函数、优化模型及火候定义[J].农业工程学报,2013,29(4):278-284.
- [11] 胡宏海,张泓,张雪.过热蒸汽在肉类调理食品加工中的应用研究[J].肉类研究,2013,27(7):48-52.
- [12] 周根明,程颖.过热蒸汽饱和器的多种方案设计研究[J].流体机械,2011,39(1):4.
- [13] KADOMA T, KISHIMOTO T, TANAKA M, et al. Development of healthy cooking technology with superheated steam [J]. Journal of Cookery Ence of Japan, 2006, 39: 163.
- [14] 石宇.基于成熟值理论的各类食品成熟规律研究[D].贵阳:贵州大学,2020.
- [15] BLIKRA M J, SKIPENS D, FEYYISSA A H. Model for heat and mass transport during cooking of cod loin in a convection oven[J]. Food Control, 2019, 102:29-37.
- [16] BELL J W, FARKAS B E, HALE S A, et al. Effect of thermal treatment on moisture transport during steam cooking of skipjack tuna (*Katsuwonus pelamis*) [J]. Journal of Food Science, 2010, 66(2): 307-313.
- [17] 崔俊,余冰妍.基于CFD的焖爆烹饪过程模拟及试验验证[J].食品安全导刊,2018(12):144-146.
- [18] WANG Y, BU X, YANG D, et al. Effect of cooking method and doneness degree on volatile compounds and taste substance of pingliang red beef [J]. Foods, 2023, 12(3): 446-446.
- [19] 赵庭霞,邓力,李静鹏,等.基于成熟值理论的炒制烹后蒜薹及猪肉品质变化研究[J].食品与发酵科技,2021,57(4):32-38.
- [20] LI J, DENG L, JIN Z, et al. Modelling the cooking doneness via integrating sensory evaluation and kinetics [J]. Food Research International, 2017, 92(FEB.): 1-8.
- [21] WAN W, MENG J, YANG Q, et al. Determination of cooking state of a Chinese traditional fish dish (Suantangyu) and flavor characterization by modeling, sensory evaluation, and instrumental analysis [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e16953.
- [22] WANH K, LIN X, ZHAO W, et al. Low-temperature steaming improves eating quality of whitefish [J]. Journal of Texture Studies, 2020, 51(5): 830-840.
- [23] 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.
- [24] 吴燕燕,李金星,王悦齐,等.加热温度对海鲈鱼肌肉品质的影响[J].渔业现代化,2020,47(6):49-57.
- [25] 冯媛.蒸制和炸制对海鲈鱼肌肉品质及体外消化特性的影响[D].锦州:渤海大学,2020.
- [26] 王科瑜,杨宏旭,包玉龙,等.不同中心温度对蒸制大口黑鲈品质的影响[J].食品工业科技,2019,40(15):20-27.
- [27] WANG K, BAO Y, WANG Y, et al. Effects of stepwise steaming treatments at different temperatures on the eating quality of fish: A case study of large-mouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 132: 108944.
- [28] 吴炳存,尚珊,傅宝尚,等.热处理对红鳍东方鲀鱼肉嫩化效果的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(21):202-209.
- [29] ZHANG D, YANG N, FISK I D, et al. Impact of cooking on the sensory perception and volatile compounds of *Takifugu rubripes* [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131165.
- [30] FOMENA T, SUN Z, OKOYE C, et al. Fatty acid profile, physicochemical composition, and sensory properties of atlantic salmon fish (*Salmo Salar*) during different culinary treatments [J]. Journal of Food Quality, 2022, 2022: 1-16.
- [31] ORLANDO P, GIARDINIERI A, LUCCI P, et al. Impact of traditional and mild oven cooking treatments on antioxidant compounds levels and oxidative status of Atlantic salmon (*Salmo salar*) fillets [J]. LWT-Food Science & Technology, 2020, 134: 110011.
- [32] 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.
- [33] WEI H, WEI Y, QIU X, et al. Comparison of potent odorants in raw and cooked mildly salted large yellow croaker using odor-active value calculation and omission test: Understanding the role of cooking method [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134015.
- [34] ALEXI N, KOBIANNOU D, OIKONOMOPOULOU I, et al. Culinary preparation effects on lipid and sensory quality of farmed gilthead seabream (*Sparus aurata*) and meagre (*Argyrosomus regius*): An inter-species comparison [J]. Food Chemistry, 2019, 301(C): 125263.
- [35] 钟明慧,徐新星,刘康,等.不同蒸制时间下鲟鱼背部肉质的滋味特征差异分析[J].食品工业科技,2021,42(14):55-60.
- [36] 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.
- [37] 沈晖,吴鹏.腌制时间对清蒸刀鱼食用品质及组织结构的影响[J].肉类研究,2020,34(3):34-38.
- [38] TAVARES S P W, DONG S Y, YANG Y, et al. Influence of cooking methods on protein modification and *in vitro* digestibility of hairtail (*Thichiurus lepturus*) fillets [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 476-481.
- [39] TAVARES S P W, DONG S, JIN W, et al. Effect of different cooking conditions on the profiles of Maillard reaction products and nutrient composition of hairtail (*Thichiurus lepturus*) fillets [J]. Food Research International, 2018, 103: 390-397.
- [40] 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.
- [41] TANG M, DAI H, MA L, et al. Degradation of structural proteins and their relationship with the quality of Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) during post-mortem storage and cooking [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1617-1628.
- [42] 张芷芸,姜启兴,高沛,等.热加工方式对斑点叉尾鲟鱼肉体外消化产物抗氧化活性的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(11):163-169.
- [43] 董芝杰.清蒸鳊鱼的工艺参数优化及其风味强度分析[J].美食研

- 究,2021,38(3):45-50.
- [44] BASTIAS M J, BALLADARES P, SERGIO A, et al. Determining the effect of different cooking methods on the nutritional composition of salmon (*Salmo salar*) and chilean jack mackerel (*Trachurus murphyi*) fillets [J]. PLoS ONE, 2017, 12(7): e0180993.
- [45] AYDIN K .Experimental identification of thermal steam pressure sensitivity of ω -3 fatty acids in fish [J]. Journal of Culinary Science & Technology, 2024, 22(3): 386-401.
- [46] SARA T, ELENA R A, GIUSEPPE C, et al. Effect of cooking with superheated (SHS) vs. standard steam oven on the fatty acids profile of different kinds of meat and fish [J]. Foods, 2023, 12(4): 718.
- [47] 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.
- [48] 栗紫慧,曲映红,施文正,等.利用顶空-气相色谱-离子迁移谱结合电子鼻分析黑鱼蒸制过程中挥发性风味的变化[J].食品与发酵工业,2025,51(1):322-329.
- [49] LI J, WU, HUANG Y, et al. Revealing inhibitory mechanism of thiamine on the formation of 2-amino-3,8-dimethylimidazo[4,5-f]quinoxaline based on quantum chemistry calculations and experimental verification [J]. LWT-Food Science & Technology, 2022,163: 113552.
- [50] 朱彤,王宇,杨君娜,等.肉色研究的概况及最新进展[J].肉类研究,2008,2:11-18.
- [51] REINHARD S. Comparative study of the DSC pattern, color, texture and water-binding capacity of rainbow trout muscle during heating [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2008, 32(2): 190-218.
- [52] 冯雨薇.3种海水小杂鱼及其罐头制品的营养特性和热加工对鱼肉品质的影响[D].太原:山西大学,2013.
- [53] 计红芳,张令文,王方,等.加热温度对鹅肉理化性质、质构与微观结构的影响[J].食品与发酵工业,2017,43(3):89-93.
- [54] EGELANDSDAL B, FRETHEIM K, SAMEJIMA K. Dynamic rheological measurements on heat-induced myosin gels: Effect of ionic strength, protein concentration and addition of adenosine triphosphate or pyrophosphate [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 37(9): 915-926.
- [55] LI C, WANG D, XU WE, et al. Effect of final cooked temperature on tenderness, protein solubility and microstructure of duck breast muscle [J]. LWT-Food Science and Technology, 2013, 51(1): 266-274.
- [56] 孙丽,夏文水.蒸煮对金枪鱼肉及其蛋白质热变性的影响[J].食品与机械,2010,26(1):22-25.
- [57] ZHANG Z, HUANG P, TAN Y, et al. Investigation of protein denaturation and textural changes of atlantic salmon (*Salmo salar*) during simulated cooking [J]. Food Biophysics, 2021, 16: 512-519.
- [58] 袁丽,孙楚楚,石彤,等.热诱导对鳕鱼肌球蛋白特性的影响[J].中国食品学报,2017,17(11):28-35.
- [59] 盖静.不同加热温度对鳕鱼肌球蛋白聚集行为的影响及其机理研究[D].镇江:江苏大学,2016.
- [60] 桂萍,罗永康,冯力更.加热温度对混合肉肌原纤维蛋白质结构的影响[J].中国农业大学学报,2018,23(5):93-101.
- [61] SARDENNE F, PUCCINELLI E, VAGNER M, et al. Post-mortem storage conditions and cooking methods affect long-chain omega-3 fatty acid content in Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) [J]. Food Chemistry, 2021, 395(15): 129828.
- [62] DELGADO A C, FOGLIANO V. Dietary Advanced Glycosylation End-Products (dAGEs) and melanoidins formed through the maillard reaction: physiological consequences of their intake [J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2018, 9(1): 271-291.
- [63] NIU L, SUN X, TAN J, et al. Formation of advanced glycation end-products in fish muscle during heating: Relationship with fish freshness [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2017, 63: 133-138.
- [64] ZHANG S, ZHOU P, HAN P. Formation of N-epsilon-Carboxymethyl-Lysine and N-epsilon-Carboxyethyl-Lysine in heated fish myofibrillar proteins with glucose: relationship with its protein structural characterization [J]. Foods, 2023, 12(5): 1039.
- [65] OZ F, SEYYAE E. Formation of heterocyclic aromatic amines and migration level of bisphenol-A in sous-vide-cooked trout fillets at different cooking temperatures and cooking levels [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2016, 64(15): 3070-3082.