

鱼糜蛋白制品及其加工技术

张玉洁^{1,2}, 张金闯¹, 陈琼玲¹, 刘丽¹, 何宁², 王强^{1*}

(¹中国农业科学院农产品加工研究所 农业农村部农产品加工综合性重点实验室 北京 100193

²厦门大学化学化工学院化学工程与生物工程系 福建厦门 361005)

摘要 鱼糜是将原料鱼经加工处理得到的一种中间蛋白质制品,营养价值高,价格低廉,具有较高的开发应用潜力。鱼糜富含蛋白质(约 17%),在加工过程中受加工条件,如压力、温度、剪切力、超声波、微波等的影响,会使鱼糜蛋白的结构及凝胶特性等发生改变,进而制得各式各样的鱼糜制品,如鱼糕、鱼丸、鱼肠、鱼面、鱼豆腐和仿生制品等。其中仿生制品(如仿生蟹肉)等附加值较高,受到广泛关注。然而,目前鱼糜制品品质参差不齐,受原料种类、批次及凝胶特性差异的影响较大,且加工过程中鱼糜蛋白结构梯次性变化与鱼糜制品品质的构效关系不明晰,这严重制约了高附加值和高品质鱼糜制品的开发。本文调研了我国鱼糜制品市场概况,结合超高压、挤压、微波、超声波、电子束辐照、3D 打印等鱼糜制品加工技术,阐述加工过程中鱼糜蛋白凝胶特性变化特点及其与制品品质的关系,为改善鱼糜制品品质和“双蛋白”等新型营养健康鱼糜制品研发提供参考。

关键词 鱼糜蛋白; 鱼糜制品; 加工技术; 凝胶特性; 品质特性

文章编号 1009-7848(2022)01-0389-12 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2022.01.042

随着人们生活水平的不断提高,更加绿色健康的食品成为大多数人餐桌上的首选。鱼肉因蛋白质含量高(约为 16%~20%),蛋白质利用率高(约为 90%以上),脂肪含量低,富含多不饱和脂肪酸等优点而受到消费者的青睐^[1]。我国鱼类资源丰富,2019 年,全国鱼类资源总产量达到 3 530 万 t,其中制作成鱼糜是鱼类资源加工利用的重要途径之一^[2]。鱼糜被进一步加工成各类制品,如鱼丸、鱼肠、鱼面、鱼饼、仿生蟹肉等,由于口感独特、营养丰富、价格低廉,深受广大消费者的欢迎,产量呈逐渐增加的趋势^[3]。而近年来鱼糜制品产量有所减少,可能是由于鱼糜制品质量不能完全满足消费者的需求。近几年,“双蛋白工程”被列入《国民营养计划(2017-2030 年)》,明确要求着力发展以优质动物、植物蛋白为主要营养基料的“双蛋白食物”等新型营养健康食品。同时,鱼类蛋白作为优质蛋白质资源被列入《中国食物与营养发展纲要

(2014-2020)》和《中国居民膳食指南(2019)》等。大力开发鱼类蛋白资源,开发受消费者欢迎的鱼糜蛋白和植物蛋白“双蛋白”营养健康制品成为未来蛋白质食品发展的重要选择。

鱼糜制品的品质与鱼糜蛋白的结构特点及其在加工过程中的梯次性结构变化密不可分。鱼糜蛋白主要包括肌球蛋白、肌动蛋白和肌动球蛋白等,具有良好的凝胶性,可以制成各类具有较好弹性的食品。不同来源、种类鱼糜蛋白凝胶特性不同,直接决定鱼糜制品的品质。在加工过程中,受压力、温度、剪切力、超声波等的影响,鱼糜蛋白分子结构发生改变,分子链逐渐打开,鱼糜蛋白分子间通过氢键、二硫键、共价键和疏水作用等交联,形成凝胶结构^[4]。凝胶结构的形成速度以及强度等往往受鱼糜蛋白种类、加工方式、工艺参数等的影响,进而决定最终鱼糜制品的品质。

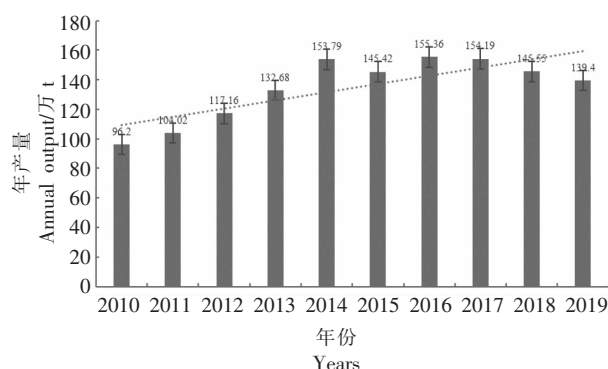
近年来,超高压、微波、超声波、电子辐照和欧姆加热等技术被广泛用于鱼糜蛋白的研究,然而受大型装备研发、生产成本、节能减排等诸多方面的限制,一些加工技术如超高压、超声波等仍未产业化^[5]。一些新的加工技术,如高水分挤压、超临界二氧化碳挤压联用技术、酶法改性技术、3D 打印技术等因能耗低、无污染、智能化和自动化程度高等特点而受到国内外学者广泛关注,然而,其在鱼

收稿日期: 2021-01-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901608); 中国农业科学院科技创新工程(CAAS-ASTIP-2020-IFST); 国家重点研发计划项目(2016YFD0400200)

作者简介: 张玉洁(1997—),女,硕士生

通信作者: 王强 E-mail: wangqiang06@caas.cn

图1 2010—2019年鱼糜制品年产量走势图^[3]Fig.1 2010—2019 annual output trend of surimi products^[3]

糜制品方面的应用目前仍处于研究阶段。

本文调研了我国鱼糜加工利用及其产品研发的市场情况,结合超高压、挤压、微波、超声波、电子束辐照、3D打印等鱼糜蛋白加工技术,阐述加工过程中鱼糜蛋白凝胶特性变化特点及其在鱼糜制品研究中的应用,旨在为改善鱼糜制品品质,促进新型营养健康鱼糜制品的研发提供参考。

1 我国鱼糜制品市场发展概况

鱼糜是将原料鱼经过采肉、漂洗、精滤、脱水、搅拌等步骤得到的一种中间蛋白质制品,可被进一步加工成各类鱼糜制品。鱼糜制品原料鱼主要为海鲈鱼、狭鳕鱼等海水鱼,及草鱼、白鲢鱼、罗非鱼等淡水鱼。优质海水鱼如鳕鱼、马鲛鱼等因肌肉色素和脂肪含量较少,一直是鱼糜的主要原料^[6]。近年来,随着海洋捕捞强度增加^[7],优质海水鱼资源不断减少,海洋幼鱼、杂鱼和淡水鱼等在鱼糜中的比例不断增加^[8],这些鱼类肌原纤维蛋白含量较低,肌肉色素和脂肪含量较高,制得的鱼糜凝胶形成能力较差^[9]。如表1所示,传统鱼糜制品如鱼糕、鱼豆腐、鱼面、鱼肉香肠等中鱼糜含量较少,往往低于60%,其中面粉、淀粉等辅料含量较多;仿生鱼糜制品如仿生虾仁、仿生牛肉、仿生鲍鱼/鲛鱼等中鱼糜含量较多,可高达80%以上。传统鱼糜制品常用蒸、煮、炸等加工方式制得^[10],主要质量要求是外观白度、口感弹性和细腻感。近些年,有学者将双螺杆挤压技术和3D打印技术等新型食品加工技术应用于鱼糜制品开发,探究了“双蛋白”

表1 鱼糜制品及其市场质量要求

Table 1 Surimi products and their market quality requirements

鱼糜制品	原料鱼种类	鱼糜含量/%	主要加工工艺	市场质量要求	参考文献	
传统鱼糜制品	鱼丸	海鲈鱼、草鱼	84	鱼糜制作、擂溃、成型、加热	有光泽,弹性好,咀嚼细腻	[13]
	鱼糕	白鲢鱼	53	鱼糜制作、成型、蒸煮	色泽均匀,光泽感明显,切面密实,有弹性,咀嚼性一般	[14]
	鱼豆腐	-	30	鱼糜制作、成型、蒸煮、油炸	口感细腻,有韧性,切片面平整,组织紧密	[15]
	鱼面	草鱼	35	鱼糜制作、加辅料、和面、揉面团、压面、定型	色泽均一,结构紧实,成条均匀,弹性好,有嚼劲	[16]
	鱼肉香肠	罗非鱼	60	鱼糜制作、加辅料、灌肠、凝胶化	无腥味,弹性足,口感良好	[17]
仿生鱼糜制品	仿生虾仁	-	85	螺杆挤压喷丝、加热凝胶、鱼丝鱼糜糊混合	外形完整,表面光滑,有纤维感,咀嚼性强	[12]
	仿生蟹肉	狭鳕鱼	66	配料斩拌、涂片、定型、轧条纹、成卷涂色	表面有蟹红色,肉洁白,具有蟹肉风味,组织均匀,弹性佳	[18]
	仿生牛肉	白鲢鱼	80	调整pH、加入食盐搅拌、成型、乙醇萃取、干燥	-	[19]
	仿生鲍鱼/鲛鱼	-	95	3D打印	-	[11]

注:-. 文献中未报道。

新型鱼糜制品,赋予了鱼糜制品独特的纤维咀嚼感^[11-12],可制成系列仿生鱼糜制品,如仿生蟹肉、仿生虾仁、仿生鲑鱼等,从而使仿生鱼糜制品价值得到提升。

然而,受鱼糜原料品质、加工条件和加工装备等的影响,我国鱼糜制品市场存在优质原料资源紧缺,鱼糜制品质量不易控制,部分高附加值制品如仿生虾仁、仿生牛肉和仿生鲑鱼尚未产业化等问题,制约了鱼糜制品品质的改善和新型鱼糜制品的研发。

2 鱼糜蛋白加工技术

目前鱼糜蛋白加工技术以蒸、煮或炸等为主,加工过程中热量由外部逐渐向内部传递,存在加热速度慢,物料温度梯度大及加工时间长等问题^[20]。近几年,随着超高压技术、微波加热技术、食品挤压技术、3D 打印技术、超声波技术、电子辐照技术和欧姆加热技术等快速发展,其在鱼糜蛋白中的应用研究也逐渐成为热点。其中,食品挤压技术^[21]和 3D 打印技术^[22]作为新型的鱼糜蛋白加工技术,在制备新型鱼糜制品尤其是包含鱼糜蛋白和植物蛋白的“双蛋白”营养健康新产品方面展现出巨大潜力。

2.1 超高压技术

超高压技术是一种非热加工技术,是指在室温或温和加热条件下利用 100~1 000 MPa 的压力处理食品,以达到杀菌、钝酶和加工食品的目的,能在较大程度上保留食品的风味及营养,是目前国际上最热门的食品加工技术之一^[23]。在鱼糜蛋白加工过程中,超高压可促使肌原纤维蛋白尤其是肌球蛋白分子链展开,使鱼糜肌原纤维蛋白中的 α -螺旋结构转变为 β -折叠结构和无规卷曲结构^[24-25],同时增加肌球蛋白中活性巯基和疏水氨基酸的含量,从而促进鱼糜蛋白凝胶网络的形成。陈燕婷等^[26]用超高压处理带鱼鱼糜,发现 350 MPa, 8 min 的超高压处理会使带鱼肌原纤维蛋白中 α -螺旋结构减少,无规卷曲结构和 β -折叠结构增加,使鱼糜蛋白紧密的螺旋结构转变为无规则状态,且在此处理条件下,带鱼鱼糜蛋白凝胶强度和质构特性得到优化。王建一^[25]也发现,当压力增加到 600 MPa 时,低盐浓度环境的鱼糜肌球蛋白中

α -螺旋结构减少了 4.07%, β -折叠结构增加了 5.07%,肌球蛋白中活性巯基与疏水氨基酸含量也随压强增加而增加,在 600 MPa 时达到最大值。

此外,超高压与适量酚类化合物、微生物谷氨酰胺转氨酶和卡拉胶等凝胶增强剂协同处理鱼糜,可促进鱼糜蛋白分子间的交联,从而改善鱼糜蛋白凝胶特性^[27-29]。Guo 等^[30]将 0.8% 微生物谷氨酰胺转氨酶添加到鱼糜中,再进行超高压处理,发现鱼糜蛋白凝胶强度显著提高。Buamard 等^[27]也发现,超高压条件下,在鱼糜中添加 0.075 g/100 g 的椰子壳中提取的酚类化合物,可促进鱼糜蛋白的交联,减缓鱼糜蛋白的降解,显著提高了鱼糜蛋白凝胶的破断力,然而当酚类化合物添加量超过 0.1 g/100 g 时,鱼糜蛋白凝胶的破断力下降,这主要是由于鱼糜蛋白过度聚集形成强度较低的块型凝胶,同时,过多的酚类化合物与内源性谷氨酰胺转氨酶结合,导致其失活,不利于鱼糜蛋白分子交联和凝胶的形成。

2.2 微波加热技术

微波是一种快速加热技术,可使食物中的极性溶剂发生偶极相互作用,使食物整体快速加热,并使食物中的热量分布更均匀^[31]。在鱼糜蛋白加工过程中,微波可加速肌球蛋白分子的展开和进一步聚集,使肌球蛋白分子形成更致密的凝胶网络,显著优化鱼糜蛋白凝胶特性^[32]。Liu 等^[33]用微波处理阿拉斯加鳕鱼鱼糜,研究发现经 300 W 微波处理 10 min 后,阿拉斯加鳕鱼鱼糜蛋白凝胶强度约为水浴加热鱼糜蛋白的 2 倍,其持水性也显著提高,并形成了更致密统一的凝胶网络。曹洪伟^[32]发现微波减少了肌球蛋白中的 α -螺旋结构,促使肌球蛋白分子链展开,在温度 60~90 °C 范围内,微波加快了肌球蛋白分子聚集速度。在鱼糜蛋白加工过程中,微波还可通过抑制或改变鱼糜中酶的活性,从而进一步影响鱼糜凝胶特性。Cao 等^[34]研究了微波对鱼糜中组织蛋白酶 L 的影响,发现微波可引起组织蛋白酶 L 分子极性基团剧烈震动,使其总巯基数和 α -螺旋结构显著减少,而新生成的二硫键可能对其活性中心有屏蔽作用,或与其活性中心的游离巯基结合,从而抑制其酶活,缓解鱼糜蛋白凝胶劣化。微波也可显著增加内源性谷氨酰胺转氨酶的酶活,促进鱼糜蛋白分子链交联^[35]。

Cao 等^[35]还发现,5 W/g 微波处理鱼糜 20 s 可使鱼糜内源性谷氨酰胺转氨酶中 α -螺旋结构减少, β -折叠结构和 β -转角结构增加,进而使其有序的蛋白质结构无序化,便于其活性中心与底物的结合,从而增加其酶活。

此外,微波和凝胶增强剂如魔芋葡甘露聚糖协同处理鱼糜,可促进凝胶增强剂与蛋白质之间的相互作用,从而显著优化鱼糜蛋白凝胶特性^[36]。Ji 等^[36]用 300 W,10 min 的微波条件与 2%魔芋葡甘露聚糖协同处理鱼糜,发现微波处理加固了多糖-蛋白质凝胶网络,使鱼糜蛋白凝胶持水性和凝胶强度显著提升。

2.3 食品挤压技术

食品挤压技术是一种集混合、搅拌、破碎、加热、蒸煮和膨化及成型为一体的加工技术,具有高效率、低成本、低排放、低能耗、高温短时、营养损失小等特点^[21,37]。挤压过程中,温度场、压力场和剪切场的综合作用可使食品原料发生蛋白质变性、美拉德反应和淀粉糊化等反应,也使食品原料的分子结构如分子质量、化学键等发生变化,进而形成具有新的结构和质地的产品^[38-39]。

王净等^[40]用双螺杆挤压加工鲤鱼鱼糜和大豆蛋白混合物,用响应面法得到最佳挤压条件为:物料含水率 30%、进料速度 35 r/min、螺杆转速 175 r/min、挤压温度 145 °C,在这种条件下得到的挤出物组织化度可达到 2.12。赵贵兴等^[41]以淡水鱼糜与大豆蛋白为原料,以挤出物组织化度和质构特性为指标,得到双螺杆挤压最佳条件为:物料含水率 30%~40%,四区温度 125~135 °C,喂料速度 35~40 r/min,螺杆转速 165~170 r/min,同时他还发现挤出物组织化程度会受到螺杆转速和挤压机第四区温度的显著影响,而受喂料速度的影响不显著。He 等^[42]用共转双螺杆挤压机加工带鱼鱼糜和大豆分离蛋白混合物,研究发现挤出物的持水性和组织化度分别受到挤压温度和物料含水率的显著影响,挤压工艺也提高了挤出物的消化特性。Rajesh 等^[43]则以大米和海鲈鱼鱼糜为原料进行双螺杆挤压,研究发现,鱼糜添加量和物料含水率显著影响挤出物的硬度和水溶性指数。乔明锋等^[44]用单螺杆挤压机加工鱼糜、青稞粉、高筋粉和谷朊粉的混合物,制得了感官品质优良,营养价值高的速冻青

稞鱼面。

目前,对于挤压过程中鱼糜蛋白结构变化以及鱼糜营养成分变化研究较少,且挤压法制备的鱼糜蛋白产品研发尚少。一些新型挤压技术如高水分挤压^[45]、超临界二氧化碳挤压联用技术^[21]等在鱼糜制品中的应用研究尚未见报道。

2.4 3D 打印技术

3D 打印是一种可以根据不同需求快速成型的个性化加工技术^[46],可以根据需求在短时间内利用特殊的材料来制造具有复杂形状的新型食品,因而受到广泛关注^[47]。鱼糜蛋白凝胶体系具有一定的凝胶强度、黏度和流变特性,在作为 3D 打印原材料方面具有巨大的潜力。王明伟等^[48]利用 3D 打印机,以鱼糜为原料加工出了仿生鲍鱼和仿生鲑鱼。将适量辅料添加到鱼糜中可改善鱼糜蛋白凝胶体系的持水性、凝胶强度、动态流变学特性、表观黏度、松弛应力及蠕变特性等 3D 打印特性,以获得品质更高的 3D 打印产品^[48-49]。Dong 等^[50]发现在 3D 打印过程中,添加 0.2%和 0.3%微生物谷氨酰胺转氨酶能使马鲛鱼鱼糜蛋白的黏度适宜,有利于 3D 打印产品形状和外观的维持,且当微生物谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.3%时,马鲛鱼鱼糜蛋白凝胶强度达到最大值 2 517.89 g·mm,并形成了更紧密的凝胶网络。Dong 等^[51]也将适量甘薯淀粉添加到 3D 打印原料马鲛鱼鱼糜中,研究发现随着甘薯淀粉含量的增加,鱼糜蛋白黏度逐渐降低,有利于鱼糜从 3D 打印机喷嘴流出,且当甘薯淀粉添加量为 8%时,鱼糜蛋白凝胶强度可达到 2 021.70 g·mm,具有良好的持水性、微观结构特征和较低的蒸煮损失。Wang 等^[52]研究发现添加 1.5%氯化钠制成的鲢鱼鱼糜蛋白凝胶也具有合适的黏性,可以用于 3D 打印。

研究人员也分析了 3D 打印参数与产品品质之间的关系,并以产品品质为参考,优化了出料速度、填充密度、分层高度、喷嘴直径、喷嘴高度、打印速度等 3D 打印参数^[49,52]。金立明等^[49]研究了填充密度、分层高度、打印速度以及喷嘴孔径对鲢鱼鱼糜蛋白凝胶 3D 打印成型效果的影响,结果表明能够打印出品质较好的产品的最佳打印条件为:填充密度大于 60%,分层高度 0.8 mm,打印速度 35 mm/s,喷嘴孔径 1.2 mm。Wang 等^[52]研究发现,

当喷嘴直径为 2.0 mm, 喷嘴高度为 5.0 mm, 喷嘴移动速度为 28 mm/s, 挤出速度为 0.003 cm³/s 时, 获得的产品分辨率高, 与目标几何形状匹配好, 点缺陷少, 不产生压缩变形, 其还建立了数学模型分析螺杆转速与打印速度之间的关系, 有效提高打印的精度。

目前, 关于 3D 打印鱼糜蛋白凝胶的研究尚在起步阶段, 存在设备成本较高, 产品研发尚少, 产品质地单一, 3D 打印参数与产品品质功能特性关系尚不明确, 批量生产较困难等问题, 阻碍了 3D 打印鱼糜蛋白产业化, 需要深入研究。

2.5 其它加工技术

欧姆加热也是一种可以实现快速加热的技术, 在鱼糜蛋白加工过程中, 欧姆加热一方面可缓解肌球蛋白水解, 一方面也可促进肌球蛋白分子链聚集, 对鱼糜蛋白凝胶特性有优化作用^[53]。Tadpitchayangkoon 等^[53]用欧姆加热处理马鲛鱼、鲷鱼、山羊鱼和狗母鱼, 研究发现与水浴加热相比, 经过欧姆加热的马鲛鱼和鲷鱼鱼糜蛋白凝胶的破断力和形变分别增加了约 1.3 倍和 1.6 倍。同时, 他发现欧姆加热可显著减少狗母鱼鱼糜中的蛋白水解, 保留肌球蛋白重链, 也可使肌球蛋白二硫键的数量增加, 促进鱼糜蛋白分子链的相互聚集。

电子束辐照是一种以电能为能源的冷加工方法, 在鱼糜蛋白加工过程中, 电子束辐照可引起鱼糜蛋白分子中 α -螺旋结构向 β -折叠结构转变, 促使鱼糜蛋白分子链展开, 同时也可降低鱼糜内源性蛋白酶活性, 缓解凝胶劣化, 从而具有优化鱼糜蛋白凝胶特性的作用^[54-55]。吕梁玉等^[56]研究发现, 辐照剂量为 5 kGy 时, 梅鱼鱼糜蛋白凝胶白度、持水性得到显著优化。Deng 等^[54]用 5 kGy 的电子辐照剂量处理的狮头鱼糜蛋白凝胶强度、持水性和白度显著增加, 他还发现电子束辐照条件下, 狮头鱼鱼糜蛋白中 α -螺旋结构减少了 10.72%, β -折叠结构增加了 8.22%, 表明电子束辐照促进了鱼糜蛋白分子链展开。罗华彬等^[55]用电子束辐照处理带鱼鱼糜, 发现辐照剂量超过 1 kGy 时, 带鱼鱼糜内源性肌原纤维结合型丝氨酸蛋白酶和组织蛋白酶 L 的活性显著降低, 表明电子辐照可缓解鱼糜蛋白的水解。

超声波通过空穴效应和机械效应来产生强大

的压力、热量和湍流^[57], 在鱼糜蛋白加工过程中, 超声波可促使鱼糜肌原纤维蛋白尤其是肌球蛋白分子链展开, 暴露更多活性基团, 有助于分子进一步交联形成鱼糜蛋白凝胶网络^[58]。Jiménez-Muñoz 等^[59]用功率 150 W、频率 37 kHz 的超声波处理鱼糜, 发现鱼糜蛋白持水性显著增加。Fan 等^[60]和李斌等^[61]研究了超声辅助对鱼糜肌原纤维蛋白的影响, 发现随着声强从 0.35 W/cm² 增加到 0.82 W/cm², 肌原纤维蛋白中 α -螺旋结构从 35.4% 减少到 29.8%, β -折叠结构从 12.4% 增加到 18.0%, 表明超声辅助促进了肌原纤维蛋白分子链的展开。然而, 谢亚如等^[58]发现超声强度超过 200 W 会降低鱼糜肌球蛋白的凝胶形成能力, 这可能是由于超声强度过大导致部分肌球蛋白降解导致。

3 鱼糜蛋白凝胶特性及其与制品品质关系

3.1 鱼糜蛋白凝胶化机理

鱼糜蛋白的功能特性有乳化性、保水性、黏着性和凝胶特性等, 其中最主要的功能特性是凝胶特性, 包括凝胶强度、持水性、白度和质构特性等。鱼糜蛋白的凝胶化主要分为热凝胶和酸致凝胶, 与鱼糜蛋白中的肌球蛋白、肌动蛋白和肌动球蛋白有关^[62]。

鱼糜蛋白的热凝胶化分为 3 个步骤即凝胶化、凝胶劣化和鱼糕化, 主要与肌球蛋白有关^[63]。如图 2 所示, 在 40~50 °C 条件下, 肌球蛋白分子内部发生裂解, 相邻分子间相互靠近和聚集, 形成蛋白质聚集体, 进而形成有一定弹性的网络状凝胶。此时肌动蛋白分子与肌球蛋白分子结合形成肌动球蛋白, 往往会使得网络状凝胶结构变得松散^[64]。在 50~70 °C 条件下, 鱼糜中的内源性组织蛋白酶活性较强, 大量肌球蛋白重链被降解, 网状结构也随之发生断裂^[65]。在 70 °C 以上时, 鱼糜蛋白形成有序稳定的网状结构。如图 3 所示, 在凝胶形成的过程中, 肌球蛋白分子链展开使 α -螺旋结构转化为 β -折叠结构 β -转角结构和无规卷曲结构^[66], 其中 β -折叠结构对鱼糜蛋白凝胶强度的贡献最大^[67]。同时, 肌球蛋白分子链展开使得大量氢键被破坏, 大量巯基被氧化形成二硫键, 大量疏水基团暴露增加了鱼糜蛋白分子间的疏水相互作用, 另外, 内

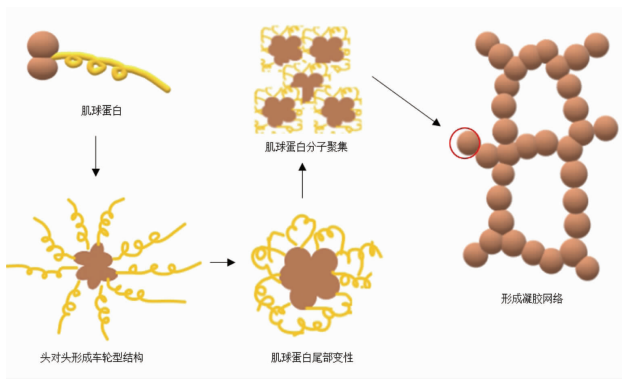


图2 鱼糜蛋白热凝胶机理

Fig.2 Mechanism of surimi protein thermal gel

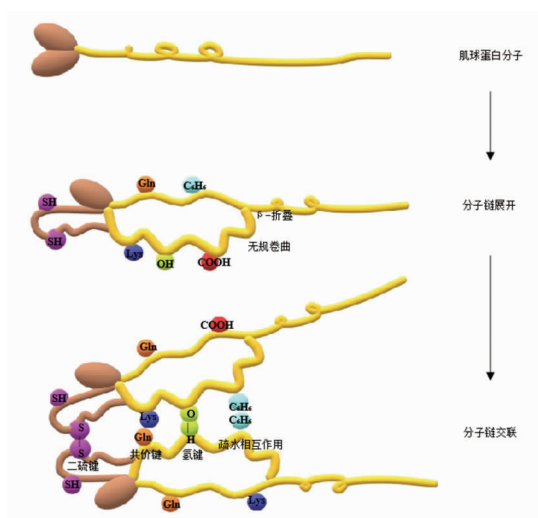


图3 肌球蛋白在凝胶过程中的结构变化

Fig.3 Myosin structure changes in the gel process

源性谷氨酰胺转胺酶也催化了大量非二硫共价键的生成,加固了凝胶网络^[68]。此外,在酸性条件下,鱼糜肌球蛋白头部先发生相互作用,接着肌球蛋白尾部展开相互交联形成大分子蛋白质,同时头部之间进一步链接形成凝胶网络。在鱼糜蛋白凝胶形成过程中,鱼糜蛋白尾部 α -螺旋结构逐渐展开,疏水性氨基酸残基和巯基暴露,鱼糜蛋白之间主要通过疏水相互作用形成交联^[69-70]。然而,目前仍然缺乏关于鱼糜蛋白凝胶化过程中肌动球蛋白和肌动蛋白变化的研究,鱼糜蛋白凝胶化过程中加工参数、鱼糜蛋白结构变化及凝胶特性变化之间的影响规律尚未确定。

3.2 鱼糜蛋白凝胶特性与鱼糜制品品质的关系

受加工条件的影响,鱼糜蛋白凝胶特性(包括凝胶强度、持水性、白度和质构特性等)发生改变,从而直接影响鱼糜制品的品质,如色泽、形状和口感等(见表2)。董志俭等^[13]研究了海鲈鱼/草鱼鱼丸加工工艺,发现当海鲈鱼/草鱼的质量比从1:3增加到1:0时,凝胶强度从3 500 g/cm²增加到4 500 g/cm²,此时鱼丸的感官评分反而下降。王文勇等^[71]优化了白鲢鱼饼的工艺参数,发现当玉米淀粉添加量为40 g时,鱼饼凝胶强度增加到约550 g·cm,此时鱼饼肉感较强,较脆弹。曹洪伟^[32]用微波与蒸汽联用加工鱼豆腐,发现当处理条件从35 kW增加到45 kW时,鱼豆腐凝胶强度增加了约30 g·cm,然而此时鱼豆腐的亮度降低,感官评分下降。仪淑敏等^[72]研究了超高压对金线鱼鱼肉肠的品质的影响,发现随着超高压处理条件由200 MPa增加到300 MPa,凝胶强度增加了约

表2 鱼糜凝胶特性对鱼糜制品品质的影响

Table 2 Effects of surimi gel properties on the quality of surimi products

鱼糜制品	工艺条件	凝胶特性变化	品质变化	参考文献
鱼丸	海鲈鱼/草鱼质量比从1:3增加到1:0	凝胶强度从约3 500 g/cm ² 增加到约4 500 g/cm ²	鱼丸感官评分下降	[13]
鱼饼	玉米淀粉添加量增加到40 g	凝胶强度增加到约550 g·cm	鱼饼肉感较强,较脆弹	[71]
鱼豆腐	微波与蒸汽协同处理条件从35 kW增加到45 kW	凝胶强度增加了约30 g·cm	鱼豆腐亮度降低,感官评分下降	[32]
鱼肉肠	保压时间为15 min时,超高压从200 MPa增加到300 MPa	凝胶强度增加了约2 000 g·mm	鱼肉肠弹性、亮度都增加	[72]
鱼糕	蛋清添加量从10%增加到20%	其凝胶强增加到约原来的2倍	鱼糕感官评分逐渐下降	[73]

2 000 g·mm, 鱼肉肠的弹性、亮度均增加, 整体品质较好。陈卫明等^[73]研究了贻贝鱼糕的制作工艺, 发现当蛋清添加量从 10% 增加到 20% 时, 其凝胶强度增加到约原来的 2 倍, 而鱼糕的感官评分逐渐下降。

在加工过程中, 通过调整原料比例^[13]、淀粉添加量^[71]、蛋清^[73]等凝胶增强剂, 或利用微波^[32]、超高压^[72]等加工技术来优化鱼糜蛋白凝胶特性, 可显著改善鱼糜制品品质。然而, 目前鱼糜蛋白加工过程中鱼糜蛋白结构变化及凝胶特性变化与鱼糜制品品质之间的构效关系尚不明晰, 这制约了鱼糜制品品质的精准调控。

4 展望

我国鱼糜制品种类丰富, 包括鱼丸、鱼肠、鱼面、鱼饼、仿生蟹肉等, 其市场质量要求受到鱼糜原料来源、含量及加工技术等的影响。海洋杂鱼、幼鱼和淡水鱼在鱼糜原料中的比例不断增加, 导致鱼糜制品品质参差不齐。蒸、煮或炸等传统鱼糜加工方式加热速度慢, 物料温度梯度大, 加工时间长, 易引起鱼糜营养成分流失和鱼糜蛋白凝胶劣化, 导致加工过程中鱼糜制品品质下降。超高压技术、微波技术、欧姆加热技术、电子束辐照技术和超声波技术等常用鱼糜蛋白加工技术可显著改善鱼糜蛋白的凝胶特性, 而加工过程中鱼糜蛋白梯次性结构变化, 鱼糜蛋白凝胶关键结构域形成及其与鱼糜制品品质的关联机制尚不明晰。食品挤压技术和 3D 打印技术是新型鱼糜蛋白加工技术, 可利用植物蛋白和鱼糜蛋白为原料研发出新型鱼糜制品, 目前仍存在设备成本较高, 加工参数与产品品质功能特性关系不明确等问题。另外, “双蛋白”新型高值化鱼糜产品研发尚少, 制约了低值鱼糜原料的高值化利用。因此, 未来研究方向聚焦在以下几个方面:

1) 构建鱼糜制品原料物质基础。以鱼糜制品原料种类、组分、构象等为基础, 深入挖掘不同原料如舌头鱼、黄花鱼等海洋杂鱼鱼糜, 青鱼、鲤鱼、罗非鱼等淡水鱼鱼糜, 或其与植物蛋白结合的“双蛋白”的加工适应性, 以满足不同鱼糜制品质量需求。构建基于鱼糜蛋白凝胶特性、质构特性、感官品质等的加工适宜性评价体系, 以促进新型营养

健康鱼糜产品的研发与品质调控。

2) 探究加工过程中鱼糜蛋白梯次性结构变化, 关键结构域形成, 及其与鱼糜制品品质关系。深入探究不同加工技术对鱼糜肌球蛋白、肌动蛋白、肌动球蛋白等肌原纤维蛋白结构展开、交联、聚集等的影响规律, 考察加工过程中鱼糜蛋白凝胶化机制及其对鱼糜制品品质包括感官品质如色、香、味、形和营养价值如消化特性等的关联机制, 为实现鱼糜制品品质的精准调控及进一步改善和新型营养健康鱼糜制品研发奠定理论基础。

3) 注重新技术如食品挤压技术与 3D 打印在鱼糜制品品质调控与新产品研发方面的应用。高水分挤压、酶法改性、超临界二氧化碳-挤压联用、挤压-3D 打印联用等技术具有能量利用率高、成型速度快、智能化和自动化程度高等优点, 可获得品质形状各异的产品, 在“双蛋白”等新型营养健康鱼糜制品应用研究中具有巨大潜力。

参 考 文 献

- [1] 周礼敬, 沈东霞, 詹会祥. 鱼类肌肉营养成分与人体健康研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2013, 34(5): 69-71.
ZHOU L J, SHEN D X, ZHAN H X. Studies on the nutritional components of fish muscles and human health[J]. Animal Husbandry and Feed Science, 2013, 34(5): 69-71.
- [2] 刘聪, 李春岭, 刘龙腾, 等. 基于供给侧视角分析我国水产品加工发展现状[J]. 水产科技情报, 2017, 44(4): 187-192.
LIU C, LI C L, LIU L T, et al. Research progress on surimi products and their gel properties: The present situation of aquatic product processing in China was analyzed from the perspective of supply side[J]. Fisheries Science and Technology Information, 2017, 44(4): 187-192.
- [3] 董金和. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 89-90.
DONG J H. China fishery statistics yearbook [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 89-90.
- [4] 刘芳芳, 林婉玲, 李来好, 等. 鱼糜凝胶形成方法及其凝胶特性影响因素的研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 292-296.

- LIU F F, LIN W L, LI L H, et al. Research progress on the formation method of surimi gel and the affecting factors of gel properties[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(8): 292–296.
- [5] 周琳, 李轶, 赵建新, 等. 物理场新技术在鱼糜制品加工中的应用[J]. *食品科学*, 2013, 34(19): 346–350.
- ZHOU L, LI Y, ZHAO J X, et al. Applications of new physical field technologies in surimi products[J]. *Food Science*, 2013, 34(19): 346–350.
- [6] 陈竟豪, 苏晗, 马冰迪, 等. 鱼糜制品品质控制技术研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(6): 200–206.
- CHEN J H, SU H, MA B D, et al. Research progress on quality control technology of surimi products[J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(6): 200–206.
- [7] COSTELLO C, CAO L, GELCICH S, et al. The future of food from the sea[J]. *Nature*, 2020, 588: 95–100.
- [8] 陈汉勇. 冷冻鱼糜新评价方法的建立及混合鱼糜品质改良的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- CHEN H Y. Establishment a new evaluation method of frozen surimi and blended surimi quality research [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [9] 王丽丽, 杨文鸽, 徐大伦, 等. 外源添加剂对鱼糜及其制品凝胶性能影响的研究[J]. *核农学报*, 2015, 29(10): 1985–1990.
- WANG L L, YANG W G, XU D L, et al. Effects of exogenous additives on gel properties of surimi and its products[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(10): 1985–1990.
- [10] 张婷, 李茜雅, 唐欢, 等. 鱼糜及鱼糜制品加工工艺研究进展[J]. *中国调味品*, 2018, 43(3): 185–191.
- ZHANG T, LI Q Y, TANG H, et al. Recent investigations on processing of surimi and surimi products[J]. *China Condiment*, 2018, 43(3): 185–191.
- [11] 王明伟, 王德强, 吕凯, 等. 3D鱼糜打印机结构设计及样机研制[J]. *轻工机械*, 2017, 35(6): 22–26.
- WANG M W, WANG D Q, LV K, et al. Structural design and prototype development of 3D surimi printer[J]. *Light Industry Machinery*, 2017, 35(6): 22–26.
- [12] 何阳春. 鱼肉仿真工程食品生产工艺及设备研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2002.
- HE Y C. Studies on the processing technology and equipment of fish imitation engineering food [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.
- [13] 董志俭, 孙丽平, 祁兴普, 等. 海鲈鱼/草鱼鱼丸的加工工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2019, 40(2): 111–115.
- DONG Z J, SUN L P, QI X P, et al. Study on processing technology of sea bass/grass carp fish ball [J]. *Food Research and Development*, 2019, 40(2): 111–115.
- [14] 乔冬, 刘铁玲. 乌龙茶鱼糕的加工工艺研究[J]. *食品工程*, 2018, 148(3): 22–25.
- DONG Q, LIU T L. Study on processing technology of oolong tea fish cake[J]. *Food Engineering*, 2018, 148(3): 22–25.
- [15] 陈兴, 盛本国, 李海龙, 等. 休闲鱼豆腐的加工工艺研究[J]. *肉类工业*, 2015(10): 21–22.
- CHEN X, SHENG B G, LI H L, et al. Study on processing technology of leisure fish tofu [J]. *Meat Industry*, 2015(10): 21–22.
- [16] 袁美兰, 赵利, 苏伟, 等. 鱼面的制作[J]. *食品科技*, 2015, 40(1): 187–190.
- YUAN M L, ZHAO L, SU W, et al. Production of fish noodle[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(1): 187–190.
- [17] 杨志娟, 胡雪琼, 杨锡红, 等. 响应面优化玉米鱼肉香肠工艺的研究[J]. *食品研究与开发*, 2015, 36(1): 52–56.
- YANG Z J, HU X Q, YANG X H, et al. Study on the sausage preparation process with maize and fish by response surface methodology[J]. *Food Research and Development*, 2015, 36(1): 52–56.
- [18] 杨贤庆, 李来好, 徐泽智. 冻模拟蟹肉加工技术[J]. *中小企业科技*, 2003, 21(6): 19–20.
- YANG X Q, LI L H, XU Z Z. Technology for making frozen simulated crab meat[J]. *Refrigeration*, 2003, 21(6): 19–20.
- [19] 光翠娥, 陈清明, 张大海. 白鲢鱼生产模拟牛肉中乙醇处理工艺的研究[J]. *食品工业科技*, 2005, 26(3): 100–101.
- GUANG C E, CHEN Q M, ZHANG D H. Study on the alcohol treatment in the production of imitation beef made from silver carp[J]. *Science and Technol-*

- ogy of Food Industry, 2005, 26(3): 100-101.
- [20] 郭梦, 武瑞赟, 马俪珍, 等. 鱼糜制品及其凝胶特性研究进展[J]. 中国水产, 2020, 2020(2): 83-85.
GUO M, WU R Z, MA L Z, et al. Research progress of surimi products and their gel properties [J]. China Fisheries, 2020, 2020(2): 83-85.
- [21] 张金闯, 刘丽, 刘红芝, 等. 食品挤压技术装备及工艺机理研究进展[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 275-283.
ZHANG J C, LIU L, LIU H Z, et al. Research advances on food extrusion equipment, technology and its mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 275-283.
- [22] PALLOTTINO F, HAKOLA L, COSTA C, et al. Printing on food or food printing: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 725-733.
- [23] YANG Y J, XIA Y J, WANG G Q, et al. Effects of boiling, ultra-high temperature and high hydrostatic pressure on free amino acids, flavor characteristics and sensory profiles in Chinese rice wine[J]. Food Chemistry, 2019, 275: 407-416.
- [24] CHEN Y T, XU A Q, YANG R, et al. Myofibrillar protein structure and gel properties of *Trichiurus haumela* surimi subjected to high pressure or high pressure synergistic heat [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(4): 589-598.
- [25] 王健一. 超高压处理对低盐鱼糜制品品质特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
WANG J Y. Effect of ultra-high pressure treatment on the qualities of low salt surimi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2018.
- [26] 陈燕婷, 林露, 高星, 等. 超高压对带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(21): 115-120.
CHEN Y T, LIN L, GAO X, et al. Effect of ultra-high pressure on the myofibrillar protein structure and gel properties of hairtail surimi [J]. Food Science, 2019, 40(21): 115-120.
- [27] BUAMARD N, BENJAKUL S. Combination effect of high pressure treatment and ethanolic extract from coconut husk on gel properties of sardine surimi [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 91: 361-367.
- [28] YE T, DAI H M, LIN L, et al. Employment of κ -arrageenan and high pressure processing for quality improvement of reduced NaCl surimi gels [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): e14074.
- [29] CANDO D, BORDERIAS A J, MORENO H M, et al. Combined effect of amino acids and microbial transglutaminase on gelation of low salt surimi content under high pressure processing [J]. Innovative Food Science Emerging Technologies, 2016(36): 10-17.
- [30] GUO B Y, ZHOU A M, LIU G, et al. Changes of physicochemical properties of greater lizardfish (*Saurida tumbil*) surimi gels treated with high pressure combined with microbial transglutaminase [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(10): 41-50.
- [31] 范大明, 焦熙栋. 电磁场和电场改善鱼糜制品凝胶特性的机制及应用[J]. 中国食品学报, 2019, 19(1): 1-11.
FAN D M, JIAO X D. The mechanism of electromagnetic and electric fields to improve the gel properties of surimi products and their application [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 1-11.
- [32] 曹洪伟. 微波对鱼糜加工过程中肌球蛋白和关键酶结构的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
CAO H W. Effect of microwave on the structure of myosin and key enzymes in surimi processing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [33] LIU X Y, FENG D D, JI L, et al. Effects of microwave heating on the gelation properties of heat-induced Alaska Pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi [J]. Food Science and Technology International, 2018, 24(6): 497-506.
- [34] CAO H W, ZHU H P, WANG Q, et al. Intervention on activity and structure of cathepsin L during surimi gel degradation under microwave irradiation [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 103: 105-705.
- [35] CAO H W, FAN D M, JIAO X D, et al. Intervention of transglutaminase in surimi gel under microwave irradiation [J]. Food Chemistry, 2018, 268: 378-385.
- [36] JI L, XUE Y, ZHANG T, et al. The effects of microwave processing on the structure and various quality parameters of Alaska pollock surimi protein-polysaccharide gels [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 77-84.

- [37] ALAM M S, KAUR J, KHAIRA H, et al. Extrusion and extruded products: Changes in quality attributes as affected by extrusion process parameters: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2016, 56(3): 445-473.
- [38] ZHANG W, LI S J, ZHANG B, et al. Relationships between the gelatinization of starches and the textural properties of extruded texturized soybean protein-starch systems[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 174: 29-36.
- [39] OSEN R, TOELSTEDE S, EISNER P, et al. Effect of high moisture extrusion cooking on protein-protein interactions of pea (*Pisum sativum* L.) protein isolates[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2015, 50(6): 1390-1396.
- [40] 王净, 张光, KALENIK T K, 等. 鱼肉与大豆蛋白复合挤压组织化特性研究[J]. *大豆科技*, 2015, 2015(3): 35-43.
- WANG J, ZHANG G, KALENIK T K, et al. Organizational characteristics of the combined fish and soybean protein extrusion[J]. *Soybean Science and Technology*, 2015, 2015(3): 35-43.
- [41] 赵贵兴, 陈霞, 刘丽君, 等. 大豆蛋白和鱼肉复合挤压工艺参数的优化[J]. *粮食与饲料工业*, 2017(1): 19-23.
- ZHAO G X, CHEN X, LIU L J, et al. Optimization of extrusion process parameters of soybean protein and fish[J]. *Cereal and Feed Industry*, 2017(1): 19-23.
- [42] HE T Q, MO B H, HUANG J L, et al. Twin-screw extrusion of hairtail surimi and soy protein isolate blends[J]. *Food Science and Technology Research*, 2014, 20(3): 517-527.
- [43] RAJESH G K, THIRUPATHI G K, NAMBI V, et al. Optimization of extrusion cooking process for rice-fish extrudates[J]. *Agricultural Engineering*, 2014, 2014(2): 9-21.
- [44] 乔明锋, 彭毅秦, 丁捷, 等. 速冻青稞鱼面的研发及配方优化[J]. *食品科技*, 2017, 42(3): 162-168.
- QIAO M F, PENG Y Q, DING J, et al. Optimization on the process of quick-frozen highland barley fish noodle[J]. *Food Science and Technology*, 2017, 42(3): 162-168.
- [45] 王强, 张金闯. 高水分挤压技术的研究现状、机遇及挑战[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(7): 1-9.
- WANG Q, ZHANG J C. Research status, opportunities and challenges of high moisture extrusion technology[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(7): 1-9.
- [46] 吕凯. 仿形海珍品3D打印装备研发[D]. 大连: 大连工业大学, 2017.
- LV K. Research and development of 3D printing equipment for sea treasures[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2017.
- [47] GODOI F C, PRAKASH S, BHANDARI B R, et al. 3D printing technologies applied for food design: Status and prospects[J]. *Journal of Food Engineering*, 2016, 179: 44-54.
- [48] 王琳. 鲢鱼鱼糜凝胶体系的挤压式三维打印研究[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- WANG L. Research on extrusion-based 3D printing surimi gel system[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [49] 金立明, 赵子龙, 焦熙栋, 等. 不同打印条件的鱼糜3D打印成型效果分析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(5): 214-222.
- JIN L M, ZHAO Z L, JIAO X D, et al. Effect of printing conditions on 3D printing of surimi[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(5): 214-222.
- [50] DONG X P, PAN Y X, ZHAO W Y, et al. Impact of microbial transglutaminase on 3D printing quality of *Scorpaenopsis nipponius* surimi[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 124: 109-123.
- [51] DONG X P, HUANG Y, PAN Y X, et al. Investigation of sweet potato starch as a structural enhancer for three-dimensional printing of *Scorpaenopsis nipponius* surimi[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(4): 316-324.
- [52] WANG L, ZHANG M, BHANDARI B, et al. Investigation on fish surimi gel as promising food material for 3D printing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 220: 101-108.
- [53] TADPITCHAYANGKON P, PARK J W, YONGSAWATDIGUL J, et al. Gelation characteristics of tropical surimi under water bath and ohmic heating[J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2012, 46(1): 97-103.
- [54] DENG S Y, LV L Y, YANG W G, et al. Effect of electron irradiation on the gel properties of *Collichthys lucidus* surimi[J]. *Radiation Physics and*

- Chemistry, 2017, 130: 316–320.
- [55] 罗华彬, 林露, 高星, 等. 电子束辐照对带鱼鱼糜内源性蛋白酶活性及其构象单元的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 31–36.
- LUO H B, LIN L, GAO X, et al. Effect of electron beam irradiation on the activity and conformational unit of endogenous proteases from hairtail surimi[J]. Food Science, 2019, 40(9): 31–36.
- [56] 吕梁玉, 罗华彬, 吕鸣春, 等. 电子束辐照对梅鱼鱼糜化学作用力、流变及其凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(19): 14–19.
- LV L Y, LUO H B, LV M C, et al. Effect of electron beam irradiation on chemical interactions, rheological and gel properties of *Collichthys lucidus* surimi[J]. Food Science, 2018, 39(19): 14–19.
- [57] BRNČIĆ M, ŠIĆ Ž J. Impact of ultrasound on food constituents[M]. Switzerland: Effect of Emerging Processing Methods on the Food Quality, 2019: 69–94.
- [58] 谢亚如, 刘庆, 熊善柏, 等. 高强度超声作用下鲢鱼肌球蛋白的结构及流变学特性变化[J]. 食品科学, 2019, 40(5): 85–92.
- XIE Y R, LIU Q, XIONG S B, et al. Effect of high intensity ultrasound on structural and rheological properties of myosin from silver carp[J]. Food Science, 2019, 40(5): 85–92.
- [59] JIMÉNEZ-MUÑOZ L, QUINTANILLA M, FILOMENA A, et al. Managing the lionfish: Influence of high intensity ultrasound and binders on textural and sensory properties of lionfish (*Pterois volitans*) surimi patties[J]. Journal of Food Science and Technology, 2019, 56(4): 2167–2174.
- [60] FAN D M, HUANG L L, LI B, et al. Acoustic intensity in ultrasound field and ultrasound-assisted gelling of surimi[J]. LWT – Food Science and Technology, 2017, 75(1): 497–504.
- [61] 李斌. 超声波场强的干预因素及对鱼糜凝胶特性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2015.
- LI B. Factors acting on the acoustic field and the effects of ultrasound on the gel properties of surimi [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.
- [62] LANIER T C, CARVAJAL P, YONGSAWATDIGUL J, et al. Surimi gelation chemistry[J]. Food Science and Technology, 2005, 142: 435–489.
- [63] 王崑, 仪淑敏, 李学鹏, 等. 鱼糜凝胶的形成机制及混合鱼糜研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2016, 7(1): 231–237.
- WANG W, YI S M, LI X P, et al. Formation mechanism of surimi gelation and research progress on blend surimi[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2016, 7(1): 231–237.
- [64] 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): 1316–1320.
- [65] HAEJUNG A N, WEERASINGHE V, SEYMOUR T A, et al. Cathepsin degradation of Pacific whiting surimi proteins[J]. Journal of Food Science, 2010, 59(5): 1013–1017.
- [66] DING H C, LI X P, LI R Z, et al. Changes of water state and gel characteristics of Hairtail (*Trichiurus lepturus*) surimi during thermal processing[J]. Journal of Texture Studies, 2019, 50(4): 332–340.
- [67] WEI W, HU W, ZHANG X Y, et al. Analysis of protein structure changes and quality regulation of surimi during gelation based on infrared spectroscopy and microscopic imaging [J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 55–66.
- [68] LIU H M, GAO L L, REN Y X, et al. Chemical interactions and protein conformation changes during silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel formation[J]. International Journal of Food Properties, 2014, 17(7): 1702–1713.
- [69] 吴雪微, 姜启兴, 许艳顺, 等. 酸诱导鱼糜凝胶的酸化条件研究及凝胶特性分析[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 17–21.
- WU X W, JIANG Q X, XU Y S, et al. Study on acidizing conditions of acid-induced surimi gel and analysis of gel properties[J]. Food and Machinery, 2016, 32(12): 17–21.
- [70] 杨方. 鱼肉内源酶对发酵鱼糜凝胶和抗氧化特性影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
- YANG F. Study on gelation and antioxidant properties of fermented fish surimi influenced by fish endogenous muscle enzymes[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [71] 王文勇, 鲁素珍. 响应面法优化即食白鲢鱼饼的工艺研究[J]. 肉类工业, 2016(4): 17–21.
- WANG W Y, LU S Z. Study on optimizing instant fish cake processing technology by response surface method[J]. Meat Industry, 2016(4): 17–21.

- [72] 仪淑敏, 马兴胜, 励建荣, 等. 超高压对金线鱼鱼肉肠凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2014, 35(10): 129-133.
YI S M, MA X S, LI J R, et al. Effect of ultra-high pressure on gel properties of fish (*Nemipterus virgatus*) sausage[J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(10): 129-133.
- [73] 陈卫明, 陈丽娇, 程文健, 等. 混合正交法优化贻贝鱼糕的制作工艺[J]. 食品科技, 2016, 41(6): 142-149.
CHEN W M, CHEN L J, CHENG W J, et al. Preparation of mussel Kamaboko gel optimized by orthogonal design[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(6): 142-149.

Surimi Protein Products and Its Processing Technology

Zhang Yujie^{1,2}, Zhang Jinchuang¹, Chen Qiongling¹, Liu Li¹, He Ning², Wang Qiang^{1*}

¹*Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193*

²*Department of Chemical and Biochemical Engineering, College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian*

Abstract Surimi is an intermediate protein product gained from the raw fish, having high nutritional value, low price and high developing and utilization potential. Surimi is rich in protein (about 17%), and during processing the structure and gel properties of surimi protein are changed by the processing conditions such as pressure, temperature, shear force, ultrasound, microwave, etc. Then various surimi products such as fish cakes, fish balls, fish sausages, fish noodles, fish tofu and bionic products are manufactured. The bionic crab meat is high value-added and gains widespread concern. However, affected by the difference in the types, batches and gel characteristics of the raw material, the quality of surimi products is uneven, and during processing the structure-activity relationship between the gradual changes of surimi protein structure and the quality of surimi products is still unclear, which restricts the development of high value-added and high-quality surimi products. This study firstly investigated the market overview of the surimi products in China, and then described the characteristics of surimi protein gel change during processing and its relationship with product quality combined with ultra high pressure, extrusion, microwave, ultrasonic, electron beam irradiation and 3D printing, providing reference for the improvement of the quality of surimi products and the development of the "double protein" surimi products and other new nutritional and healthy surimi products.

Keywords surimi protein; surimi products; processing technologies; gel properties; quality characteristics