

张馨月, 耿文豪, 田苗苗, 等. 动物性、植物性蛋白与鱼糜混合凝胶品质研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 17–24. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030404

ZHANG Xinyue, GENG Wenhao, TIAN Miaomiao, et al. Progress on the Quality of Animal/Plant Protein and Fish Surimi Mixed Gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 17–24. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030404

·特邀主编专栏—生物大分子: 性质、结构、特性和功效机制 (客座主编: 于寒松、方亚鹏、刘回民)·

动物性、植物性蛋白与鱼糜混合凝胶 品质研究进展

张馨月¹, 耿文豪¹, 田苗苗¹, 梁欣¹, 李欣蓉¹, 范馨茹^{1,2,3,*}, 赵前程^{1,2,3}

(1.大连海洋大学食品科学与工程学院, 辽宁大连 116023;

2.大连市特色海洋功效成分开发与高值化利用重点实验室, 辽宁大连 116023;

3.辽宁省海洋健康食品工程研究中心, 辽宁大连 116023)

摘要: 凝胶特性是衡量鱼糜制品品质的重要指标。鱼糜制品因其营养价值高、味道鲜美、易储运等特点, 深受消费者喜爱。随着我国食品制造业的快速发展以及消费群体的多元化, 传统鱼糜制品已无法满足消费者对于均衡膳食以及感官特性的需求。因此, 新型鱼糜的开发逐渐受到关注, 如何利用其他动物性、植物性原料实现具有良好凝胶特性的混合鱼糜制品已成为鱼糜加工行业的研究热点。本文对动物、植物性蛋白与鱼糜凝胶形成机制的研究进展进行汇总, 对动物和植物蛋白分别通过促进蛋白间的交联和抑制鱼糜蛋白酶的活性有效地改良鱼糜凝胶性能、保水能力及微观结构等指标进行了阐述, 并提出了现阶段混合鱼糜制品品质改良过程中存在感官品质差、改性机制不明确等问题, 旨在为新型鱼糜开发及其凝胶特性改良方面的研究提供理论支撑, 为进一步开发新型鱼糜提供指导方向。

关键词: 鱼糜, 混合凝胶, 凝胶特性, 动物蛋白, 植物蛋白

中图分类号: TS254.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0017-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030404



本文网刊:

Progress on the Quality of Animal/Plant Protein and Fish Surimi Mixed Gel

ZHANG Xinyue¹, GENG Wenhao¹, TIAN Miaomiao¹, LIANG Xin¹, LI Xinrong¹, FAN Xinru^{1,2,3,*},
ZHAO Qiancheng^{1,2,3}

(1.College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;

2.Dalian Key Laboratory of Marine Bioactive Substances Development and High Value Utilization,
Dalian 116023, China;

3.Liaoning Provincial Marine Healthy Food Engineering Research Centre, Dalian 116023, China)

Abstract: Gel properties play a crucial role in evaluating the quality of surimi products, which are favored by consumers for their high nutritional value, delightful taste, and convenient storage and transportation. However, with the rapid development of China's food manufacturing industry and the diversification of consumer groups, traditional surimi products are unable to satisfy the demands for a balanced diet and sensory characteristics. As a result, there is growing interest in developing novel surimi products, particularly in exploring the use of alternative animal- and plant-based raw materials to produce mixed surimi gel with expected gel properties. In this review, the research progress of animal and plant proteins and surimi gel formation mechanism is summarized. The animal and plant proteins can effectively improve the gel properties, water holding capacity and microstructure of surimi by promoting the cross-linking between proteins and

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 大连海洋大学引进人才博士启动项目 (HDYJ202302); 辽宁省自然科学基金计划项目 (2022-BS-270)。

作者简介: 张馨月 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: zhangxyjys@126.com。

* 通信作者: 范馨茹 (1993-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: fanxinru@dou.edu.cn。

inhibiting the activity of surimi protease, respectively is expounded. The issues of suboptimal sensory attributes and an ambiguous modification mechanism during the enhancement of mixed surimi product quality are identified. The aim is to provide theoretical support for the development of novel surimi products with improved gel properties while offering guidance for further advancements.

Key words: surimi; mixed gel; gel properties; animal protein; plant protein

近年来随着国内外市场需求的增加,鱼糜产业发展迅速,2023年我国鱼糜制品年产量高达134.37万吨^[1],已成为我国水产品加工业中增长最快的门类之一。鱼糜制品是将不同品种的原料鱼,通过采肉、漂洗、脱水等系列工序制得鱼糜后,进一步通过擂溃、调味、成型、熟制,得到的弹性凝胶状水产深加工制品。随着水产预制菜的兴起,鱼糜制品因营养价值高、味道鲜美、食用方便、耐储藏且无鱼刺等特点,已成为开发水产动物源预制菜的优质原料,其市场销售份额逐年增加^[2]。然而,随着水产食品精深加工业的快速转型以及消费者对水产品食用品质的需求增加,一些制约鱼糜产业发展的因素逐渐暴露,如现有的鱼糜制品原料单一、弹性较弱、风味有待提升、缺乏创新性等问题较为显著^[3]。不仅如此,由于过度捕捞和环境污染等问题,以海水鱼为主要原料的鱼糜制品正面临原料紧缺的问题,随后,一些淡水资源以及非鱼类的海水资源逐渐被用到新型鱼糜制品的开发中。因此,现阶段利用多种来源的动植物高蛋白原料制备复合鱼糜凝胶(图1)的相关研究逐渐受到重视,在此基础上辅助超声、超高压等原料处理方式并结合新型加热方式,实现混合鱼糜凝胶品质改良,以达到缓解海洋鱼类资源短缺、提升风味、丰富口感及新型鱼糜制品创制的目的。

水性、流变学特性、凝胶强度等品质性能评价指标均具有较大差异^[4]。海水鱼因其肌原纤维蛋白(Myofibrillar protein, MP)含量高,脂肪含量较低,与淡水鱼相比更易形成蛋白交联且具有较好的凝胶特性^[5-6]。此外,受鱼肌肉蛋白组成成分的影响,白肉鱼凝胶性能强于脂肪含量较高的红肉鱼^[7]。在适当比例下制备混合海水鱼-淡水鱼鱼糜,具有协同效应,可以在提高鱼糜凝胶品质的同时降低产品成本^[8]。以优质畜禽肉为代表的鸡胸肉与鱼糜适量混合后,能促进蛋白质间的交联,形成均匀致密的凝胶网络,提高持水性(Water-holding capacity, WHC),有利于高品质凝胶的形成^[9]。随着现阶段消费者对营养健康的需求增加,一些植物性的非肌肉蛋白的添加,如豆类蛋白(大豆蛋白、豌豆蛋白)、谷物蛋白(小麦蛋白、玉米蛋白)等均被应用于畜禽肉的肉糜制品和/或水产品的鱼糜制品加工,不仅缓解了养殖生产压力,同时丰富了多种来源蛋白质的摄入,符合现阶段“双蛋白”的营养需求理念^[10-11]。但是在混合鱼糜的加工过程中,动、植物性蛋白与鱼糜的混合比例以及适宜的加工方式等也尤为重要,直接影响了加工制品的凝胶特性,从而决定了市场供求关系。

基于此,本文以鱼糜为对象,重点讨论动物蛋白(水产动物性原料、畜禽肉)以及植物蛋白(豆类蛋白)的添加对鱼糜凝胶特性的影响,阐明不同来源蛋白在形成凝胶过程中的相互作用机制,并对其未来混合鱼糜发展趋势予以展望,旨在为鱼糜凝胶特性的改良提供理论支撑,为进一步新型鱼糜的开发提供指导方向。

1 动物性蛋白-鱼糜相互作用对混合凝胶品质的影响

目前用于鱼糜凝胶特性改良的蛋白添加物主要包括乳清蛋白、蛋清蛋白^[12]、各种动物的血浆蛋白^[13]及肌肉蛋白^[14]等。血浆蛋白会导致鱼糜白度值降低,存在异味,还受疯牛病和禽流感的影响,因此目前牛血浆蛋白和鸡血浆蛋白已被禁用。蛋清蛋白虽然在鱼糜加工过程中可以充当食品级蛋白酶抑制剂,但价格较高且具有难闻的臭鸡蛋味,会对鱼糜凝胶的风味产生不利影响^[15]。因此,一些动物性肌肉蛋白作为蛋白添加物逐渐兴起,主要包括低值和低脂的水产动物性肌肉原料以及畜禽肉等。动物性蛋白-鱼糜混合凝胶交互机制如图2所示。添加动物性肌肉蛋白可以提高混合鱼糜凝胶中蛋白含量,有效促进蛋白间的交联,使复合蛋白凝胶网络结构体系更加紧致有序,从而改善鱼糜的凝胶强度;另一方面,动物性肌



图1 不同的动/植物蛋白-鱼糜混合凝胶

Fig.1 Different animal/plant protein-surimi mixed gels

凝胶特性是决定鱼糜制品品质的关键指标之一。受原料鱼种类、原料混合比例、加工方式及外源添加物等因素的影响,鱼糜制品的微观组织结构、保

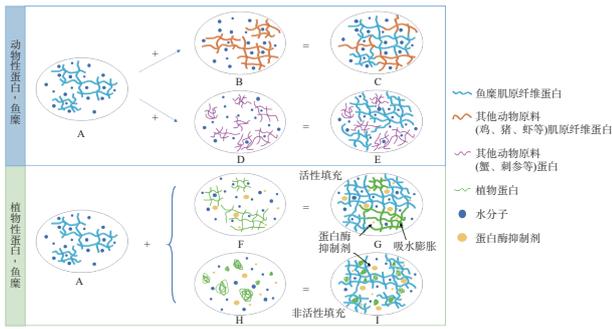


图 2 动/植物性蛋白-鱼糜混合凝胶作用机制

Fig.2 Mechanism of animal/plant protein-surimi mixed gels
注: A. 鱼糜凝胶; B. 鸡、猪、虾等肉糜凝胶; C. 动物蛋白(鸡、猪、虾等)-鱼糜凝胶; D. 刺参、蟹等肉糜凝胶; E. 动物蛋白(刺参、蟹等)-鱼糜凝胶; F. 植物蛋白凝胶(活性填充); G. 植物蛋白(活性填充)-鱼糜凝胶; H. 植物蛋白凝胶(非活性填充); I. 植物蛋白(非活性填充)-鱼糜凝胶。

肉蛋白也可以充当交联剂, 在混合鱼糜体系中通过氢键和疏水相互作用等非共价键, 加强多种来源肌原纤维蛋白相互作用, 促进凝胶网络的形成^[3]。

1.1 海水鱼-淡水鱼混合鱼糜

在鱼糜的工业化生产中, 海水鱼是生产鱼糜的主要原料, 而随着海水鱼类资源的减少和世界各地对海水鱼的捕捞限制, 导致其价格逐年升高。相反, 我国淡水鱼资源十分丰富, 且价格低廉, 但凝胶性能较差。因此, 将海水鱼与淡水鱼制备成混合鱼糜凝胶, 可以有效解决资源问题。

在海水鱼-淡水鱼混合凝胶制备过程中, 通常将鲢鱼、白姑鱼和金线鱼等高产、低经济价值的海水鱼与以鲑鱼为代表的大宗淡水鱼进行适当比例的混合。如表 1 所示, 通常淡水鱼添加量为 10%~40%, 可以有效降低生产成本, 提高淡水鱼资源利用率, 改良鱼糜制品的凝胶强度、WHC、微观结构等指标。不同来源鱼原料(鲢鱼与鲑鱼)混合后, 肌球蛋白间交联程度增加, 产生大分子聚集体, 使凝胶网络结构增强, 固定了更多的水分, 从而提高了混合鱼糜的凝胶特性^[16]。在适宜混合比例(鲑鱼和白姑鱼)制备基础上, 利用二段加热方式优化熟化条件(时间和温度), 促进白姑鱼中的谷氨酰胺转胺酶(Transglu-

taminase, TGase)与鲑鱼 MP 更好的交联, 从而实现混合鱼糜的凝胶强度提升^[17]。金线鱼和鲑鱼制成混合鱼糜, 其破断力和凝胶强度随着金线鱼含量的增加而逐渐增大并趋于平稳^[8], 一方面两种鱼糜之间的协同效应会增强蛋白-蛋白交联程度^[18]; 另一方面, 加热引起了不同来源蛋白质的构象发生改变, 在重新折叠过程中暴露出更多的活性巯基和疏水性基团, 增加了蛋白结合位点, 从而使其凝胶强度增强^[19]。

1.2 甲壳类蛋白-鱼糜

虾、蟹等甲壳类动物因其独特口感和风味深受消费者喜爱, 但受到市场供求需求不平衡和季节性捕捞等因素的影响, 其市售价格剧增, 难以满足消费者的日常需求。目前, 虾、蟹肉糜制品的开发已成为其精深加工的重要方向, 但是虾、蟹肉中水分含量较高, 不利于高品质凝胶制品的制备, 此外漂洗过程会使其营养成分和经济价值严重损失^[21-22]。因此, 在商业加工过程中, 通常利用不漂洗的甲壳类水产动物性原料与鱼糜进行混合, 以改良混合凝胶的凝胶特性(表 2)。南美白对虾与丁鱼/金线鱼混合鱼糜(20%~50%)混合后, 由于虾、鱼两种肌球蛋白交联, 使蛋白质内部结构更加致密, 从而导致凝胶强度和保水性的增加^[23]。此外, 在新型南极磷虾资源的开发过程中, 将其与阿拉斯加狭鳕鱼糜按照 1:4 混合后, 制得混合凝胶的 TPA 和凝胶强度显著提高, 这是由于鱼糜蛋白在凝胶网络中占据主导地位, 能够有效改良混合凝胶的质构特性, 弥补了虾糜在此方面的加工劣势^[24]。

1.3 其他水产动物性蛋白-鱼糜

在混合凝胶的制备过程中, 通常添加 10%~30% 头足类(鱿鱼)或棘皮类(海参)动物性原料, 以达到改善混合凝胶口感及风味的目的(表 2)。利用海水鱼(金线鱼/鳕鱼)对鱿鱼鱼糜进行改性, 当混合鱼糜比例(鱿鱼:金线鱼)=2:3 和 1:4、混合鱼糜比例(鱿鱼:鳕鱼)=1:4 时, 凝胶性能最优越, 水分与凝胶结合更紧密, 更多水分被锁于网络结构中, 同时改善了海水鱼糜的风味特性, 增加鲜味和挥发性化合物种类, 有效地缓解了鱿鱼蛋白水解酶含量高、形成凝胶结构较差等问题^[25]。利用 3D 打印成型技术制备新型低

表 1 海水鱼-淡水鱼混合对凝胶品质的影响

Table 1 Effects of mixed marine fish and freshwater fish on gel quality

海水鱼	淡水鱼	添加比例 (w/w)	水分变化	凝胶特性	蛋白质结构	微观结构	参考文献
鳕鱼 (<i>Engraulis japonicus</i>)	鲑鱼 (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	0:10、1:9、2:8、3:7、4:6和10:0	WHC↑	破断力↑, 破断距离↑, 凝胶强度↑, 白度↑	MHC条带颜色变浅	混合鱼糜凝胶微观结构高度均匀且光滑	[20]
白姑鱼 (<i>Argyrosomus argentatus</i>)	鲑鱼	0:10、1:9、2:8、3:7、4:6和10:0	-	破断力↑, 破断距离↑, 凝胶强度↑, 白度↑	-	-	[17]
金线鱼 (<i>Nemipterus virgatus</i>)	鲑鱼	1:1、2:1、3:1、4:1、5:1、6:1和7:1	WHC↑	破断力和凝胶强度先↑后平稳, 破断距离变化不显著, 蒸煮损失先↑后↓, WHC变化不显著, 白度和亮度↑, 储能模量↑, tanδ↓	α-螺旋↓, β-折叠↑	混合比为3:1时微观结构表面较光滑, 网络结构均匀致密	[18]

注: “-”代表相关文献未进行说明; WHC为持水力; MHC为肌球蛋白重链; 表2、表3同。

表2 其他动物性蛋白-鱼糜混合对混合凝胶品质的影响
Table 2 Effects of other animal protein-surimi mixture on the quality of mixed gels

其他动物性蛋白	鱼糜来源	添加比例	水分变化	凝胶特性	蛋白质结构	微观结构	参考文献
中华绒螯蟹 (<i>Eriocheir sinensis</i>)	鲢鱼 (<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>)	0、5%、10%	WHC↑,水分含量变化不显著	破断力↓,破断距离↓,凝胶强度↓	蛋白质二级结构相对含量无显著变化;微波加热后,MHC条带变浅,蛋白聚集程度↑	凝胶表面变得粗糙且不规则	[22]
南美白对虾 (<i>Litopenaeus vannamei</i>)	丁鱼(<i>Saurida tumbil</i>)/ 金线鱼(<i>Nemipterus virgatus</i>)	10:0、8:2、 7:3、6:4和5:5	失水率↓	破断力先↑后↓,变形先↑后↓,凝胶强度↑,白度变化不显著	-	-	[23]
南极磷虾 (<i>Euphausia superba</i>)	阿拉斯加狭鳕鱼 (<i>Gadus chalcogrammus</i>)	1:0、1:1、 2:3、3:7和1:4	WHC↑	凝胶强度↑	-	-	[24]
秘鲁鲑鱼 (<i>Dosidicus gigas</i>)	金线鱼	5:0、4:1、 3:2、2:3、 1:4、0:5	WHC↑,弛豫时间T ₂₂ ↓,结合水、不易流动水、自由水均不显著	凝胶强度↑,白度↑	-	凝胶网络结构逐渐致密,表面平滑,内部空隙↓,孔洞↓	[25]
	阿拉斯加狭鳕鱼		WHC↑,弛豫时间T ₂₂ ↓,自由水↓,不易流动水↑,结合水不显著	凝胶强度↑,白度先无显著影响后↓	-		
刺参 (<i>Stichopus japonicus</i>)	鲢鱼	1:9、2:8、 3:7、4:6、5:5	-	凝胶强度↓,硬度↓,咀嚼性↓,弹性无显著变化	-	-	[26]
鸡胸肉	鲟鱼 (<i>Acipenseridae</i>)	10%~50%	WHC↑	硬度↑,弹性↑,咀嚼性↑,破断力↑,凝胶强度↑,白度变化不显著	表面疏水性↑,MHC和Actin条带强度↑	凝胶网络致密有序	[28]
鸡胸肉	金线鱼	1:1、3:1、 5:1和7:1	WHC先↓后平稳,不易流动水↑	白度↑,破断距离↑,凝胶强度先↑后↓	MHC条带先变浅再变深,蛋白聚集程度↑	凝胶表面孔洞↑	[29]
猪肉	鲢鱼	10:0、7:3、 5:5、3:7和 0:10	不易流动水↑	弹性↓,硬度↑,咀嚼性↑,白度↓,凝胶强度↑,破断力↑,形变↑	-	微观结构变得有序紧凑	[31]

注: Actin为肌动蛋白;表3同。

值海参与鲢鱼混合凝胶过程中,随着海参比例的升高(鲢鱼/海参比例从9:1增加到5:5),混合凝胶的凝胶强度、硬度、咀嚼性和回复性均呈现显著降低趋势,这可能是因为加热过程中,海参胶原纤维结构被破坏,形成较弱的凝胶网络,此外随着海参比例的升高,体系中的MP浓度降低,导致凝胶网络的交联程度和均匀性减弱。当复配比例为7:3时,基本能够实现立体结构的3D打印,混合体系的凝胶强度和硬度较为适宜,营养较为均衡且具有较好的感官接受度[26]。

1.4 畜禽类蛋白-鱼糜

鸡、猪、牛[27]等畜禽类动物性原料是目前主要经济型食用肉类,所制备的肉糜制品具有良好的风味和质地,但因其WHC较差,导致其利用价值降低。而将其与WHC较好的鱼糜按一定比例混合后,可以有效改良其凝胶特性和微观结构(表2),有利于新型混合肉糜制品的开发。鸡胸肉(Chicken breast, CB)具有高蛋白、低脂肪、低售价的优点,同时受宗教信仰等原因,常被当作优质外源蛋白添加到鱼糜中。受鸡肉蛋白纤维特殊结构的影响,传统鸡肉糜制品的弹性较差、风味单一。当CB与未漂洗鲟鱼肉以2:3混合时,可以有效提升混合凝胶中的MP交联程度,蛋白内部隐藏的疏水基团暴露率达到最大,疏水相互作用得到增强,肌球蛋白聚集形成聚合物,使蛋

白凝胶三维网络更加致密有序,从而提高WHC并改善其质构特性[28]。在金线鱼-鸡肉香肠的制备中,适量添加CB可以提升混合凝胶的WHC、凝胶强度,但过量添加会导致其凝胶强度降低,这是因为加热过程中CB中磷脂的亲水头部可能与蛋白质的疏水基团相结合。此外,CB中较为致密的肌纤维蛋白束在加热中不易分离,不利于肌原纤维蛋白的交联,也会导致凝胶强度降低[29]。猪肉存在乳化性较好、硬度高和WHC差的特点,因此可以通过与WHC较好的鲢鱼复配,以提高其营养和质地。在最适比例7:3(猪肉:鱼)下,两种蛋白质间增加了疏水相互作用,有效地提高了混合凝胶的凝胶特性[30-31]。

利用动物性蛋白与鱼糜混合制备新型凝胶,可以有效地促进蛋白间的协同诱导,提高多种蛋白网络结构间的交联程度,改善混合凝胶的质构特性,丰富滋味以及风味、提高营养价值。但又受一些水产品动物性原料中复杂的内源酶体系的影响,对混合凝胶的制备产生的一些负面影响也不容忽视。

2 植物性蛋白-鱼糜相互作用对混合凝胶品质的影响

植物性蛋白对鱼糜制品品质影响的相关研究如表3所示。植物资源具有来源广、可持续性等优点,尤其植物蛋白中胆固醇和饱和脂肪酸含量较低,近年来受到食品加工行业关注,被应用于“植物素

表 3 植物蛋白的添加量对鱼糜凝胶品质的影响
Table 3 Effects of the amount of plant protein on the quality of surimi gels

植物蛋白	鱼糜来源	添加量	水分变化	凝胶特性	蛋白质结构	微观结构	参考文献
大豆分离蛋白	印度马鲛鱼 (<i>Rastrelliger kanagurta</i>)	0、1%、3%和5%	加压析水率↓	储能模量↑, 损耗模量↑, 破断力↑, 变形↑, 凝胶强度↑, 弹性↑, 硬度↑, 白度不显著	TCA-可溶性肽含量↑, 离子键↓, 二硫键↓, 氢键↑, 疏水相互作用↑, 存在 MHC 的高强度条带	微观结构变得更加光滑、致密	[10]
大豆分离蛋白	南极磷虾(<i>Euphausia superba</i>)-阿拉斯加狭鳕鱼(<i>Gadus chalcogrammus</i>) (3:7)	6%、9%、12%和15%	-	凝胶强度↑	-	-	[24]
大豆分离蛋白	阿根廷鲈鱼(<i>Illex argentines</i>)-鲢鱼(<i>Hypophthalmichthys molitrix</i>) (1:6、2:5、3:4、4:3、5:2)	0%、2%、4%、6%、8%、10%	WHC先↑后↓	凝胶强度先↑后↓	-	-	[40]
大豆拉丝蛋白(小球状拉丝蛋白)	金线鱼 (<i>Nemipterus virgatus</i>)	10%	WHC↑	硬度、弹性、胶着性、内聚性、咀嚼性和回复性↑, 破断力、破断距离和凝胶强度↑, 白度↑	-	-	[42]
豌豆分离蛋白	阿拉斯加狭鳕鱼	0、8%、10%和15%	-	破断力↓, 破断距离↓, 凝胶强度↓, L^* ↓, a^* 和 b^* ↑, 储能模量↓, 损耗模量↓	MHC条带↓	凝胶结构孔隙率降低, 形成结构均匀	[36]
马铃薯分离蛋白	太平洋鲱鱼 (<i>Merluccius productus</i>)	0、0.5%、1%、2%和3%	保水能力↑	破断力↑, 破断距离↑, 凝胶强度↑, 白度↑	添加2%时, 凝胶在 20 kDa左右的条带消失	添加2%时, 凝胶结构看起来致密有序	[37]
班巴拉豆分离蛋白	金线鱼	0、0.25%、0.5%、1%、2%和3%	加压析水率↓	破断力↓, 变形↓, 凝胶强度↓, 白度↓	TCA可溶性肽含量↓, 在 0~0.5%水平下 MHC 条带强度无差异	添加0.25%时, 凝胶网络更致密	[35]
鹰嘴豆分离蛋白	黄河鲤鱼 (<i>Cyprinus carpio</i>)	0、2%、4%和6%	离心损失↓, 结合水、不易流动水↓	凝胶强度↑, 白度↓, 储能模量↑	-	凝胶网络结构变得更紧凑、连续, 较为光滑	[49]
鹰嘴豆蛋白	鲢鱼	0、25%和50%; 基于总蛋白含量	WHC↑, 自由水↓, 不易流动水↑	白度↓, 破断力、凝胶强度↓, 破断距离变化不显著, 硬度、胶粘性、咀嚼性↓, 粘性、回复性、内聚性↑, 弹性变化不显著, 松弛时间↑, 储能模量↓, 损耗模量↑	非特异性交联↑, 离子键、氢键和二硫键↑, 疏水作用↓, MHC和Actin条带变浅	凝胶表明光滑, 网络网络变粗, 孔隙更小	[50]

肉”等植物基食品的开发中, 同时也为鱼糜行业新产品的开发提供了新的发展模式^[32]。鱼糜制品中常添加植物性蛋白包括大豆蛋白、豌豆分离蛋白、马铃薯分离蛋白、班巴拉豆分离蛋白等, 但是过量添加会产生豆腥味, 对鱼糜制品的风味有一定的影响。非肌肉蛋白的形状一般为球状, 而鱼肉蛋白多为纤维状, 因此适量的非肌肉蛋白可以作为粘合剂或填充剂改善鱼糜制品的品质^[33]。目前对于植物蛋白类改良鱼糜凝胶特性的机制(图 2)主要如下: 非肌肉蛋白作为活性填充剂, 在蛋白基吸水膨胀时促进与肌肉蛋白的交联, 从而形成致密均匀的网络结构, 使得混合凝胶的性能增强^[10,34]。而作为非活性填充剂时, 非肌肉蛋白与鱼肉蛋白发生相分离, 可能会导致成胶性能下降, 但经加工处理后非肌肉蛋白能够填充在鱼肉蛋白网络结构的空隙之中, 进而改善鱼糜凝胶的性能^[33]; 豆类等植物蛋白中较高浓度的内源性蛋白酶抑制剂通常可以抑制丝氨酸蛋白酶^[35]、胰蛋白酶^[36]、组织蛋白酶(B 和 H)^[37]的活性, 从而有效阻止低温长时加热过程中由于凝胶劣化而产生的鱼糜质地软化的现象^[35,38]。

2.1 大豆蛋白

大豆分离蛋白(Soy protein isolate, SPI)具有较

好的吸水性、吸油性、保水性和凝胶性等^[39], 在印度马鲛鱼鱼糜中加入 SPI 后, 鱼糜的凝胶性能得到提升, 这是因为加热促进 SPI 形态展开和非极性基团暴露, 蛋白质间的疏水相互作用得到加强, 形成了更加坚固有弹性的凝胶结构^[10]。在阿根廷鲈鱼/白鲢鱼混合凝胶中, 当 SPI 添加量为 6% 时, 凝胶强度和 WHC 最优, SPI 通过抑制内源蛋白酶活性, 降低 MP 的降解程度来改善鱼糜凝胶的质量^[40]。此外, 将 SPI 与南极磷虾/阿拉斯加狭鳕(3:7)混合后, SPI 起到交联和填充作用, 增强了混合凝胶体系的质构特性^[24]。

大豆拉丝蛋白作为一种新型的组织化大豆蛋白, 具有类似肌肉的纤维结构, 能够在不影响鱼糜制品口感风味的基础上, 进一步提高鱼糜制品的组织化程度^[41]。将不同形态的大豆拉丝蛋白(大球状、小球状和片状, 10%)添加到金线鱼鱼糜中, 小球状拉丝蛋白因其组织纤维更细腻、组织化程度高, 能够更好地与鱼糜结合并填充到鱼肉肠中, 使其结构组织更紧致; 另一方面, 小球状拉丝蛋白可以增加动植物蛋白质间的共价交联作用, 提高凝胶结构束缚的水分^[42]。

2.2 豌豆分离蛋白

豌豆分离蛋白(Pea protein isolate, PPI)具有类似于大豆分离蛋白的功能特性, 致敏性较低, 可作为

大豆分离蛋白替代物来改良鱼糜凝胶特性^[43-44]。在阿拉斯加狭鳕中添加适量 PPI 以获得更强凝胶强度的混合鱼糜,结果表明 PPI 添加量过高,受豌豆中的植酸含量影响,胰蛋白酶抑制作用较弱,导致鱼糜凝胶性能变差。同时,PPI(低分子量,球状)和 MP(高分子量,纤维状)形态差异较大,混合凝胶中三维网状结构交联点减少,也会导致混合凝胶性能变差。当 PPI 添加量较低时,对于肌原纤维蛋白保护作用无法显现,因此无法显著改变鱼糜的凝胶品质^[36]。

2.3 马铃薯分离蛋白

马铃薯分离蛋白(Potato protein isolate, POPI)不属于常见的过敏原,具有较高的营养价值和蛋白酶抑制作用,可以添加到鱼糜制品中显著提高鱼糜凝胶的品质。利用一段式快速欧姆加热法(90 °C, 约 30 s)熟化 POPI-北太平洋无须鳕鱼糜,随着 POPI 含量增加(0~3%),混合凝胶的破断力和破断距离均呈上升趋势^[37],可能是在快速加热条件下 POPI 作为增强剂,增强了两种蛋白的相互作用,从而提高了鱼糜的凝胶强度^[45-46]。

2.4 班巴拉豆分离蛋白

班巴拉豆富含班巴拉豆分离蛋白(Bambara groundnut protein isolate, BGPI),具有良好的内源酶抑制作用,可以有效地缓解鱼糜加热过程中凝胶劣化现象。低添加量 BGPI 可以提高鱼糕的破断力,然而高添加量 BGPI 对金线鱼糜凝胶化产生了不利影响,这可能与肌球蛋白重链(Myosin heavy chain, MHC)的稀释作用有关。BGPI 还能与水结合,将更多的水束缚在凝胶网络结构中,以降低加压析水率^[35]。BGPI 在沙丁鱼鱼糜中存在同样的效果,这可能是由于 BGPI 对蛋白水解具有抑制作用,从而抑制了鱼糜蛋白的降解^[47]。

2.5 鹰嘴豆蛋白

鹰嘴豆蛋白作为蛋白质补充剂或营养载体在食品加工中越来越受欢迎。鹰嘴豆蛋白(Chickpea protein, CPP)的功能特性丰富、豆腥味较轻、致敏性低以及市场对替代蛋白质需求量的增加,因此鹰嘴豆蛋白具有良好的应用前景^[48]。鹰嘴豆分离蛋白(Chickpea protein isolate, CPI)本身具有亲水性,可以在与蛋白质相互作用后将水分子锁在凝胶网状结构内,加强对水的吸附能力,有效提高了黄河鲤鱼丸的保水性。CPI 的添加量越大,鱼丸凝胶网络结构变得越紧凑、连续,这是由于植物蛋白和 MP 混合后,将双蛋白结构交织并形成了一个致密而均匀的空间结构,进而稳固了鱼丸微观结构^[49]。此外,在鲢鱼鱼糜中添加 25% 和 50% 的 CPP, CPP 经高速斩拌均匀地分布在鱼糜间,加热后 CPP 附着在凝胶网丝上,增强了蛋白质与蛋白质之间的相互作用,同时填补凝胶网络空隙,提高了 WHC,使凝胶网格中的网丝变粗,孔隙变小,凝胶表面更光滑^[50]。

3 结论与展望

本文主要论述了动物/植物性蛋白与鱼糜的相互作用及其对混合鱼糜凝胶特性的影响。在适宜的混合比例条件下,动物性蛋白-鱼糜混合凝胶中,两种原料蛋白间的相互作用提高了鱼糜肌原纤维蛋白的交联程度,诱导了协同增效作用,从而形成更致密稳定的三维网格结构,以提高凝胶品质。而植物性蛋白在混合鱼糜凝胶网格中充当填充物或交联剂,加强了与肌肉蛋白的交联能力,从而导致凝胶网格变得更致密牢固,最终起到改善凝胶特性的作用。

虽然现阶段对于混合鱼糜凝胶特性的改良方式及新型添加物的开发进行了相关研究,但是混合凝胶的感官品质调控和改性作用机制等仍需进一步探索。例如:在使用植物蛋白添加时,鱼糜制品中易产生异味及口感变差的问题;热处理导致蛋白质水解与凝胶劣化的关系尚不明确;添加剂和热处理方式的选择,需要针对原料鱼种类进行深入探索。随着消费群体和消费方式的多元化发展,有效地推动了新型鱼糜制品的革新,越来越多的食品复配的添加剂及加工副产物原料将被应用到混合鱼糜中,以期能够更好的改善鱼糜制品的凝胶特性。此外,根据不同鱼糜的原料特性,利用新型原料预处理技术,优化新型加热方式并复配添加剂实现多技术联合,从而促进新型凝胶改良剂研制,加速混合鱼糜制品产业技术升级,助力鱼糜产业健康高速发展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 2024 中国渔业统计年鉴[M]. 北京:中国农业出版社, 2024. [Bureau of Fisheries and Fisheries Administration, Department of agriculture and rural China. 2024 China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2024.]
- [2] 李满雄,李水红,熊巍,等. 淡水鱼预制菜加工技术研究进展[J]. 食品安全导刊, 2021(34): 128-130. [LI M X, LI S H, XIONG W, et al. Research progress in the processing technology of freshwater fish pre-prepared vegetables[J]. China Food Safety Magazine, 2021(34): 128-130.]
- [3] 王卉楠,励建荣,李学鹏,等. 鱼糜组分间相互作用对其凝胶特性影响的研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(9): 365-375. [WANG H N, LI J R, LI X P, et al. Research progress on the effect of component interactions on the gel properties of surimi[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(9): 365-375.]
- [4] 韦芳,窦容容,孙纪录,等. 鱼糜制品凝胶特性影响因素的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(19): 208-215. [WEI F, DOU R R, SUN J L, et al. Research progress in the factors affecting the gel properties of surimi products[J]. Food Research and Development, 2023, 44(19): 208-215.]
- [5] 王玉林. 淡水鱼鱼糜凝胶特性及凝胶形成过程中肌原纤维蛋白变化的研究[D]. 广州:广东药科大学, 2019. [WANG Y L.

- The gel properties of freshwater fish surimi gel and the changes of myofibrillar protein during gel formation[D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2019.]
- [6] KOBAYASHI Y, PARK J W. Biochemical and physical characterizations of fish protein isolate and surimi prepared from fresh and frozen whole fish[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 77: 200–207.
- [7] 常珂欣, 范馨茹, 于双, 等. 水产肌原纤维蛋白功能特性与改性机制研究进展[J/OL]. 大连海洋大学学报: 1–13[2024-03-24]. <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2023-212>. [CHANG K X, FAN X R, YU S, et al. Progress in research on functional properties and modification mechanisms of aquatic myofibrillar proteins: A review[J/OL]. *Journal of Dalian Ocean University*: 1–13[2024-03-24]. <https://doi.org/10.16535/j.cnki.dlhyxb.2023-212>.]
- [8] YI S M, HUO Y, QIAO C P, et al. Synergistic gelation effects in surimi mixtures composed of *Nemipterus virgatus* and *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 84(12): 3634–3641.
- [9] JIANG Q X, WANG L S, GAO P, et al. Study on the effect and mechanism of chicken breast on the gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2023, 104(2): 1132–1142.
- [10] SOMJID P, PANPIPAT W, CHEONG L Z, et al. Comparative effect of cricket protein powder and soy protein isolate on gel properties of Indian Mackerel surimi[J]. *Foods*, 2022, 11(21): 3445.
- [11] LIU Z Y, YUAN Y Q, QIN Y G, et al. Sweet potato starch addition together with partial substitution of tilapia flesh effectively improved the golden pompano (*Trachinotus blochii*) surimi quality [J]. *Journal of Texture Studies*, 2020, 52(2): 197–206.
- [12] 张斌. 鸡蛋清蛋白对秘鲁鱿鱼鱼糜凝胶过程的影响及其作用机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023. [ZHANG B. Effect of egg white on the gel process of Peruvian squid surimi and its mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023.]
- [13] 李志杰, 闫睿思, 汪秀娟, 等. 蛋白添加剂增强肉制品凝胶性研究进展[J]. *食品科学*, 2024, 45(7): 348–357. [LI L J, YAN R S, WANG X J, et al. Research progress of protein additives in enhancing gel properties of meat products[J]. *Food Science*, 2024, 45(7): 348–357.]
- [14] PANPIPAT W, CHAIJAN M, BENJAKUL S. Gel properties of croaker–mackerel surimi blend[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4): 1122–1128.
- [15] KUDRE T, BENJAKUL S, KISHIMURA H. Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 511–518.
- [16] GU R J, XIAO X H, SUN J W, et al. Effects of rice residue on physicochemical properties of silver carp surimi gels[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1743–1754.
- [17] LIU L, LUO Y K, SONG Y L, et al. Study on gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and white croaker (*Argyrosomus argentatus*) blended surimi at different setting conditions[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2013, 22(1): 36–46.
- [18] YI S M, LI Q, QIAO C P, et al. Myofibrillar protein conformation enhance gel properties of mixed surimi gels with *Nemipterus virgatus* and *Hypophthalmichthys molitrix*[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105924.
- [19] ABDOLLAHI M, REZAEI M, JAFARPOUR A, et al. Dynamic rheological, microstructural and physicochemical properties of blend fish protein recovered from kilka (*Clupeonella cultriventris*) and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) by the pH-shift process or washing-based technology[J]. *Food Chemistry*, 2017, 229(15): 695–709.
- [20] YI S M, JI Y, GUO Z H, et al. Gel properties and flavor characteristics of blended anchovy (*Engraulis japonicus*) mince and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi[J]. *RSC Advances*, 2020, 10(11): 6563–6570.
- [21] XIAO H, YANG Y, YU J, et al. Alaska pollock surimi addition affects Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) surimi gel properties[J]. *Rheologica Acta*, 2021, 60(12): 741–749.
- [22] 梁峰. 不同处理方式对鱼糜与蟹肉混合凝胶品质的影响[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. [LIANG F. Effect of different treatments on the quality of surimi and crabmeat mixed gel[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.]
- [23] 袁莉莉, 刘书成, 解万翠, 等. 虾肉和鱼肉混合肉糜凝胶特性的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(12): 246–250. [YUAN L L, LIU S C, XIE W C, et al. Study on gel properties of surimi mixed by shrimp and fish meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(12): 246–250.]
- [24] 田利利, 薛长湖, 尹利昂, 等. 复合南极磷虾糜中鱼糜配比量及外源添加剂对其凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(17): 16–21, 32. [TIAN L L, XUE C H, YIN L A, et al. Effect of surimi ratio and external additives on the gel properties of composite antarctic krill surimi[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(17): 16–21, 32.]
- [25] 张奇秀. 鱿鱼鱼糜凝胶品质比较及其混合鱼糜研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [ZHANG Q X. Study on comparison of gel quality of squid surimi and its mixed surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
- [26] 潘禹希, 于婉莹, 赵文宇, 等. 鲑鱼糜和海参复配 3D 打印食品材料[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 175–183. [PAN Y X, YU W Y, ZHAO W Y, et al. 3D printing food materials made with *Hypophthalmichthys molitrix* surimi and sea cucumber pulp[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 175–183.]
- [27] ZHANG F H, FANG L, WANG C J, et al. Effects of starches on the textural, rheological, and color properties of surimi–beef gels with microbial transglutaminase[J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 533–537.
- [28] WANG R H, GAO R C, XIAO F, et al. Effect of chicken breast on the physicochemical properties of unwashed sturgeon surimi gels[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 113: 108306.
- [29] 仪淑敏, 杨领, 赵璐泽, 等. 不同鸡肉与金线鱼糜混合比例香肠的凝胶品质对比[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(5): 207–213. [YI S M, YANG L, ZHAO J Z, et al. Comparison of gelation properties on different proportions of chicken *Nemipterus-virgatus* surimi mixture sausage[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(5): 207–213.]
- [30] LIU R, ZHAO S M, REGENSTEIN J M, et al. Gelling properties of fish/pork mince mixtures[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(2): C301–307.
- [31] LI Q Z, GUI P, HUANG Z, et al. Effect of transglutaminase on quality and gel properties of pork and fish mince mixtures[J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(1): 56–64.
- [32] EBERT S, JUNGBLUT F, HERRMANN K, et al. Influence of wet extrudates from pumpkin seed proteins on drying, texture, and appearance of dry-cured hybrid sausages[J]. *European Food Research and Technology*, 2022, 248(6): 1469–1484.
- [33] 林端权. 复合植物蛋白对鱼糜凝胶特性影响的研究[D]. 福

- 州:福建农业大学, 2017. [LIN D Q. Effect of mixed vegetable proteins on rheological properties and microstructures of surimi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]
- [34] WANG Z J, LIANG J, JIANG L Z, et al. Effect of the interaction between myofibrillar protein and heat-induced soy protein isolates on gel properties[J]. *CyTA-Journal of Food*, 2015, 13(4): 527-534.
- [35] OUJIFARD A, BENJAKUL S, AHMAD M, et al. Effect of bambara groundnut protein isolate on autolysis and gel properties of surimi from threadfin bream (*Nemipterus bleekeri*) [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2012, 47(2): 261-266.
- [36] BORDERÍAS A J, TOVAR C A, DOMÍNGUEZ-TIMÓN F, et al. Characterization of healthier mixed surimi gels obtained through partial substitution of myofibrillar proteins by pea protein isolates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 107: 105976.
- [37] YOON W B, PARK J W, JUNG H. Effects of potato protein isolated using ethanol on the gelation and anti-proteolytic properties in Pacific whiting surimi[J]. *Foods*, 2022, 11(19): 3114.
- [38] JIANG J, XIONG Y L. Extreme pH treatments enhance the structure-reinforcement role of soy protein isolate and its emulsions in pork myofibrillar protein gels in the presence of microbial transglutaminase[J]. *Meat Science*, 2013, 93(3): 469-476.
- [39] 暴伊芮, 赵前程, 吴燕燕, 等. 复合无磷保水剂对未漂洗海鲈鱼肉糜保水性的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2022, 37(4): 676-682. [BAO Y R, ZHAO Q C, WU Y Y, et al. Effects of compound phosphorus-free water retention agent on water retention of unrinsed minced flesh of sea bass *Lateolabrax japonicus* [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2022, 37(4): 676-682.]
- [40] 张晓慧. 鱿鱼鱼糜制品凝胶特性改良及贮藏品质变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2023. [ZHANG X H. Study on improvement of gel properties and storage quality of squid surimi products[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2023.]
- [41] 魏涵伟, 张钊, 王才立, 等. 响应面优化添加拉丝蛋白制备包子馅[J]. *农产品加工*, 2021(22): 21-26. [WEI H W, ZHANG Z, WANG C L, et al. Response surface optimization and adding silky protein to prepare bun fillings[J]. *Farm Products Processing*, 2021(22): 21-26.]
- [42] 杨舒琦. 大豆拉丝蛋白对鱼糜制品品质特性影响的研究[D]. 福州: 福建农业大学, 2022. [YANG S Q. Effect of drawing soy protein on the quality characteristic of surimi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022.]
- [43] LAM A C Y, KARACA A C, TYLER R T, et al. Pea protein isolates: Structure, extraction, and functionality[J]. *Food Reviews International*, 2016, 34(2): 126-147.
- [44] LU Z X, HE J F, ZHANG Y C, et al. Composition, physicochemical properties of pea protein and its application in functional foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60(15): 2593-2605.
- [45] ZHANG D Q, MU T H, SUN H N. Calorimetric, rheological, and structural properties of potato protein and potato starch composites and gels[J]. *Starch-Stärke*, 2017, 69(7-8): 1600329.
- [46] KATZAV H, CHIRUG L, OKUN Z, et al. Comparison of thermal and high-pressure gelation of potato protein isolates[J]. *Foods*, 2020, 9(8): 1041.
- [47] KUDRE T, BENJAKUL S. Effects of bambara groundnut protein isolate on protein degradation and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*) [J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2013, 37(5): 977-986.
- [48] GHRIBI A M, AMIRA A B, GAFSI I M, et al. Toward the enhancement of sensory profile of sausage "Merguez" with chickpea protein concentrate[J]. *Meat Science*, 2018, 143: 74-80.
- [49] 刘骁, 王营娟, 赵电波, 等. 鹰嘴豆分离蛋白对黄河鲤鱼丸凝胶品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(22): 8-13. [LIU X, WANG Y J, ZHAO D B, et al. Effect of chickpea protein isolate on the gel quality of Yellow River carp (*Cyprinus carpio*) fish balls[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(22): 8-13.]
- [50] 孔云菲. 鹰嘴豆蛋白复合鱼糜凝胶的制备及加工贮藏对其品质的影响[D]. 镇江: 江苏大学, 2023. [KONG Y F. Preparation of chickpea protein-surimi hybrid gel and effects of processing and storage on its quality[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023.]