

油脂对鱼糜凝胶品质的影响研究进展

沈志文¹, 王璇¹, 李赤翎¹, 吴金鸿², 王发祥^{1,3}, 刘永乐^{1,3}, 李向红^{1,3}

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 长沙 410114; 2. 上海交通大学农业与生物学院, 上海 200240;
3. 湖南省水生资源食品加工工程技术研究中心, 长沙 410114)

摘要:油脂在食品领域是一种重要的品质改良剂, 其对鱼糜凝胶的影响主要体现在理化性质、微观结构和风味等方面。旨在为生产口感和风味俱佳的鱼糜凝胶提供理论依据, 从油脂与蛋白质分子相互作用的层面阐述了油脂对鱼糜凝胶品质的影响机制, 综述了油脂的种类和添加量等因素对鱼糜凝胶质构特性、流变特性、持水性、蒸煮损失和水分分布等理化性质和微观结构的影响, 总结了油脂对鱼糜凝胶风味的影响。适量添加油脂可以使鱼糜凝胶具有良好的结构、风味和营养价值。

关键词:鱼糜凝胶; 油脂; 品质; 理化特性; 微观结构; 风味

中图分类号: TS254.4; TS225 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2023)09-0037-07

Research progress on the effects of oil on the qualities of surimi gel

SHEN Zhiwen¹, WANG Xuan¹, LI Chiling¹, WU Jinhong²,
WANG Faxiang^{1,3}, LIU Yongle^{1,3}, LI Xianghong^{1,3}

(1. School of Food and Biological Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China; 2. School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Hunan Provincial Engineering Research Center for Food Processing of Aquatic Biotic Resources, Changsha 410114, China)

Abstract: Oil is an important quality improver in the food field, and its influence on surimi gel is mainly reflected in physicochemical properties, microstructure and flavor. The aim is to provide a theoretical basis for the production of surimi gel with good texture and flavor. The mechanism of the effect of oil on the quality of surimi gel was illustrated at the level of the interaction between oil and protein molecules. The effects of the type and addition of oil on the physicochemical properties and microstructure of surimi gels were reviewed, with the physicochemical properties being reflected in the textural properties, rheological properties, water holding capacity, cooking losses and moisture distribution. The effects of oil on the flavor of surimi gel was reviewed. The appropriate addition of oil can contribute to the good structure, flavor and nutritional value of the surimi gel.

Key words: surimi gel; oil; quality; physicochemical property; microstructure; flavor

鱼糜凝胶是一种以鱼糜为基础原料制成的凝胶

收稿日期: 2022-04-28; 修回日期: 2023-05-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(31972017, 31972106, 32072262); 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4096); 湖南省重点研发计划项目(2022NK2032)

作者简介: 沈志文(1998), 男, 在读硕士, 研究方向为农产品加工及贮藏工程(E-mail) shenzw0815@163.com。

通信作者: 李向红, 教授, 博士(E-mail) xianghongli@csust.edu.cn。

类食品, 如常见的鱼丸、鱼香肠和鱼豆腐等, 具有营养价值高、质地富有弹性且口感鲜嫩美味等特点^[1]。因为部分淡水鱼如鲢鱼等具有肉刺多、土腥味大^[2]和销量低等特点, 将其加工成鱼糜可以提高经济价值。因此, 大多数鱼糜是以淡水鱼为原料经过切碎和漂洗等一系列工序加工制成的。为了使鱼糜在低温条件下能更稳定地储存, 在漂洗环节通常会将鱼糜中容易发生氧化的油脂等成分尽可能去除^[3]。经过漂洗后的鱼糜其本质是高度浓缩的肌

原纤维蛋白,在加热后可以形成具有均匀微孔的凝胶网络结构。这种结构使得鱼糜凝胶的质地和口感富有弹性,具有较好的咀嚼性^[4]。除此之外,这种空间网络结构也可以作为油脂良好的载体,并有效固定营养成分和挥发性风味物质。

添加外源性油脂对于改善鱼糜凝胶的品质具有重要作用。添加猪油和牛油等动物油可以使鱼糜凝胶更加软嫩多汁且香气四溢,但动物油因饱和脂肪酸和胆固醇水平较高,摄入过多对人体健康不利。而海洋来源的鱼油富含 DHA、EPA 等 $\omega-3$ 多不饱和脂肪酸,对于改善心脑血管健康具有一定的功效。多数植物油在营养价值、功能性方面都具有优势,且风味良好^[5];而橄榄油和椰子油等除了具有独特的营养价值和风味外,还具有氧化稳定性较高的特性。另外,外源性油脂填充在鱼糜凝胶孔隙中还可以改变鱼糜凝胶的结构,进而影响其理化性质。因此,鱼糜凝胶中添加外源性油脂可以达到同时改善营养组成和理化特性的目的。各类油脂由于其脂肪酸组成不同而具有不同的理化特性,添加至鱼糜凝胶中可能与蛋白质产生不同的作用^[6],且油脂的添加量对鱼糜凝胶的理化性质和风味也有不同的效果^[7]。

本文分析了油脂与鱼糜蛋白的相互作用机制,并从凝胶强度、水分分布、流变特性等方面综述了油脂对鱼糜凝胶理化性质的影响,另外阐述了油脂对鱼糜凝胶微观结构和风味的影响,以期对鱼糜凝胶的生产和品质改良提供指导。

1 油脂与鱼糜蛋白的相互作用机制

鱼糜凝胶形成过程中油脂与蛋白质的相互作用机制如图 1 所示。鱼糜蛋白和油脂的混合物在斩拌后,油脂会在高速持续剪切作用下分散成微小的油

滴,同时鱼糜蛋白也会被斩拌成更小的蛋白微粒^[8]。在斩拌过程中食盐的添加有利于鱼糜中蛋白质结构的解离,并暴露出内部的疏水性基团^[9],这有利于蛋白质与油脂的相互作用。鱼糜中肌原纤维蛋白这类盐溶性蛋白质是鱼糜形成凝胶的关键性蛋白,而肌球蛋白占肌原纤维蛋白的 50% 以上,是与油脂发生相互作用的关键性蛋白^[10]。肌球蛋白是一种两亲分子,具有一定的界面性质,其亲脂端通过疏水相互作用与油滴结合并吸附在其表面^[11-12],使油滴最终被一层界面蛋白质膜包裹,在这个过程中肌球蛋白充当乳化剂,斩拌完毕的鱼糜混合物是一种比较稳定的乳化体系^[13]。在加热过程中,鱼糜最终形成鱼糜凝胶^[14-15],油滴分散并填充在蛋白质基质中。油脂对鱼糜凝胶的影响主要体现在两个方面:首先,油滴和蛋白质膜通过疏水相互作用形成油脂-蛋白质作用力^[16],不同的油脂分子特性不同,附着在其表面的界面蛋白质膜可以承受热和机械作用的内聚力的大小也可能不同,使界面蛋白质之间巯基形成二硫键的聚合作用受到影响,从而使蛋白质膜的黏弹性不同^[17],而油脂添加量会影响油滴的数量和大小,从而影响蛋白质膜包裹油滴的状态,进而影响乳化体系和凝胶形成;其次,油脂的添加可能会影响凝胶中的离子键和二硫键等作用力,对蛋白质之间的交联和聚集作用以及最终形成的凝胶结构产生影响^[18]。油脂原本的风味物质以及在加工过程中发生氧化反应或美拉德反应产生的醛、酮、醇等风味化合物主要通过共价或静电相互作用与蛋白质相关基团进行化学吸附,也可通过范德华力物理附着在凝胶孔隙中^[19]。因此,紧凑的鱼糜凝胶网络结构有利于将易挥发的风味化合物固定在其中,维持其丰富的风味组成。

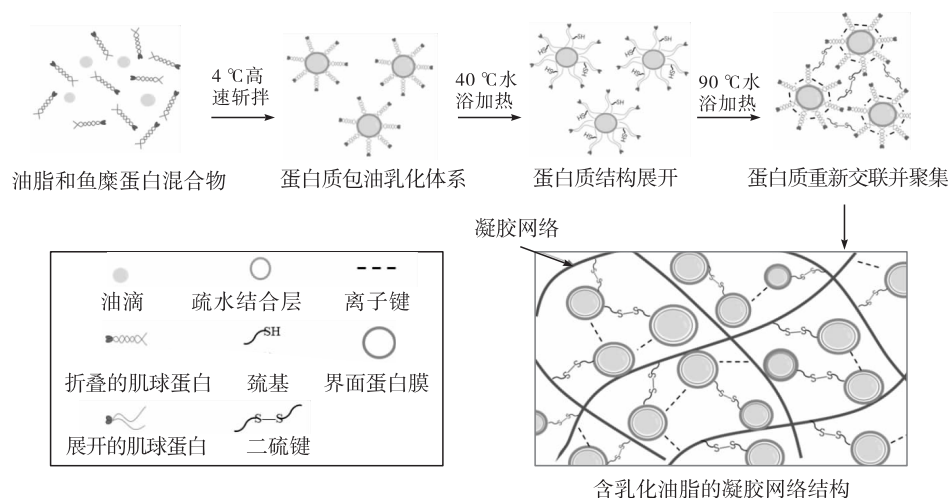


图 1 鱼糜凝胶形成过程中油脂与蛋白质的相互作用机制示意图

2 油脂对鱼糜凝胶理化特性的影响

2.1 对质构特性的影响

质构特性是食品在口感上的物理特征,用于表征鱼糜凝胶结构的质构特性主要包括凝胶强度、断破力、形变力和硬度等。质构特性可以反映鱼糜凝胶空间结构在宏观上的变化,例如较高的凝胶强度意味着更紧密的凝胶网络^[20]。油脂对鱼糜凝胶的结构具有一定的削弱作用:首先,油脂的加入会使凝胶中的蛋白质浓度有所降低,这会使得蛋白质分子之间的距离增加,进而削弱肌原纤维蛋白之间相互聚集和交联形成鱼糜凝胶的能力^[21];其次,油脂在鱼糜中主要以被蛋白质膜包裹的形式存在,若油脂含量过高,积累在凝胶中会形成更大的油滴,不能被充分包裹,并且阻碍凝胶形成过程中蛋白质膜与游离蛋白质之间的交联作用;最后,油脂有可能破坏蛋白质之间的二硫键,最终削弱鱼糜凝胶的断破力和凝胶强度^[22]。Shi^[20]、Chang^[21]、Jiao^[23]等在鱼糜凝胶中添加植物油或鱼油后,均发现鱼糜凝胶强度等质构特性呈降低趋势,证明了油脂对鱼糜凝胶结构的削弱作用。

油脂的乳化处理对鱼糜凝胶的质构起到一定的增强效果。正常情况下鱼糜凝胶是一种均匀分布微孔的空间网络结构,油滴主要是以填充或者镶嵌的状态固定在凝胶结构中。油滴的粒径越小,其填充在凝胶孔隙中形成的凝胶结构越紧密。油脂和蛋白质主要通过疏水作用相结合,通过对油脂进行充分的预乳化处理,可以将油滴粒径降到纳米级别^[24]。这样的油滴可以被蛋白质充分包裹,使得油脂-蛋白质的结合力更强。Gani^[24]、宋春勇^[25]等研究发现,将椰子油或大豆油进行超声预乳化处理后添加在鱼糜中,得到的鱼糜凝胶其断破力比未经预乳化处理的更高,证明了预乳化处理可以一定程度上改善油脂对鱼糜凝胶结构的削弱行为。另外,通过斩拌将油脂与鱼糜混匀的过程也是一种乳化作用,延长斩拌时间或增加斩拌速度,可以将油脂和鱼糜都剪切到足够小的粒径,相互接触的面积更大,使油滴被蛋白质充分包裹,形成稳定的乳化体系^[25]。此外,油脂添加量对鱼糜凝胶结构具有显著的影响。Zhou^[26]、米红波^[27]、王莉莎^[28]等研究了各种植物油(山茶油、大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油)的不同添加量对鱼糜凝胶质构特性的影响,均发现在适宜的油脂添加量下,鱼糜凝胶强度达到峰值,且各种油脂的最适添加量均在10%以下^[29]。Wu^[30]、Gani^[31]等的研究均证明油脂的浓度达到一个较高的水平后(5%以上),鱼糜凝胶强度明显降低。

动物油和植物油对鱼糜凝胶结构的影响也各异,大部分动物油的饱和脂肪酸含量高,熔点高,常温下呈固态,具有较硬的质地^[32],将其添加至鱼糜中制备凝胶,相比液态油脂,可得到凝胶强度更高的鱼糜凝胶。Zhou等^[33]研究发现,添加猪油的鱼糜凝胶相比于添加各类植物油(菜籽油、橄榄油和山茶油)的鱼糜凝胶其硬度、断破力和形变力更高。Lü^[34]、Roy^[35]等也发现用液态植物油代替动物油后,由于其油滴具有易流动的特性,会使得鱼糜凝胶的质地偏软。

2.2 对流变特性的影响

在流变特性中,储能模量和损耗模量是描述鱼糜凝胶结构变化的重要指标,尤其是储能模量,它可以反映鱼糜凝胶的弹性行为和变形能力等固体特性的变化,储能模量增大说明凝胶的强度和弹性增大^[36-37]。不同于质构特性,流变特性可以反映在加热形成凝胶过程中每个温度对应的凝胶结构性质的变化^[38-39]。鱼糜在加热形成凝胶的过程中,储能模量一般远大于损耗模量,这个过程中鱼糜的固体性质逐渐增强,内部网络结构逐渐形成。而油脂的添加一般会降低鱼糜凝胶的储能模量,这种作用与油脂和鱼糜蛋白之间的相互作用无关^[40],而与油脂自身的储能模量有关。Shi^[20]、Gani^[31]等研究发现,在20~90℃热处理期间,不同植物油(椰子油、大豆油、花生油、玉米油和菜籽油)的添加整体上均降低了鱼糜凝胶的储能模量,从而破坏了鱼糜凝胶的固体特性。但是油脂的储能模量会随着温度的波动发生变化,例如椰子油冷却到25℃以下会凝结成固体,具有较高的储能模量。Gani等^[31]的研究证明在20~24℃范围内添加椰子油的鱼糜凝胶显示出较高的储能模量,而随后伴随着椰子油的熔化,储能模量下降。这说明温度的变化也可以改变油脂对鱼糜凝胶流变特性的影响。

2.3 对持水性和蒸煮损失的影响

持水性可反映凝胶的保水能力和结构的疏松程度,蒸煮损失可反映凝胶在加热烹煮过程中水分、油脂和小分子蛋白质等物质的渗出损失情况。优质的鱼糜凝胶具有较高的持水性和较低的蒸煮损失^[26]。鱼糜凝胶中的油滴占据了蛋白质基质的空隙,形成了较紧凑和稳定的结构,使水分不容易从凝胶中流失,从而使持水性升高。另外,油脂在鱼糜凝胶中可以充当“黏合剂”,使得凝胶结构更致密,从而防止水分和一些小分子营养物质的流失。Zhou^[33]、Zhang^[41]等研究发现,提高鱼油、油茶籽油和猪油的含量会使鱼糜凝胶的持水性增加。另外,经过乳化

处理的油脂可以增强鱼糜凝胶的结构,使其具有较强的固定水分和其他小分子物质的能力。宋春勇^[25]的研究证实了经过预乳化处理的油脂可以提高各类肉制品凝胶的持水能力,并且降低了蒸煮损失,这与预乳化油脂增强凝胶的质构特性的原理类似^[42]。

然而,一些研究表明,油脂的添加对鱼糜凝胶网络的致密程度以及对小分子物质的固定能力存在一定的负面影响,并且随着油脂添加量的升高,更多的油脂容易在蒸煮过程中流失^[43]。这是因为凝胶对水分的束缚能力与蛋白质基质中亲水基团的数量有关,油脂通过疏水作用结合蛋白质后,可能减少了蛋白质结构中亲水基团的暴露,且由于油脂本身的疏水作用,对凝胶中水分也有排斥的能力^[44]。另外,油脂的加入可以导致凝胶网络结构变得疏松,这会使一些小分子蛋白质、油脂以及其他营养成分在蒸煮过程中从凝胶微孔结构中流失。

2.4 对水分分布的影响

水分在鱼糜凝胶中的分布状态有结合水、物理束缚水和自由水^[45],其中物理束缚水和自由水与鱼糜凝胶的持水性相关。添加油脂后可能使鱼糜凝胶中水分子受到的束缚力发生改变,并导致这3种状态的水分发生迁移。Jiao等^[23]研究发现,鱼油的加入使鱼糜凝胶中更多水分向自由水迁移。宋春勇^[25]的研究中也发现类似结果,添加大豆油后,鱼糜凝胶中自由水的比例显著增加,且结合水比例显著减少。Yu等^[38]研究发现,添加鱼油后鱼糜凝胶结合水含量明显降低,且物理束缚水比例有一定升高,自由水比例没有显著变化。以上结果说明添加油脂后鱼糜凝胶中水分受到的束缚力减小,流动性增大,这可能是因为油脂的添加使得鱼糜凝胶中亲水基团的暴露减少,不利于水分的固定,最终使得水分在网络结构中流动性增强,这也是鱼糜凝胶持水性降低的原因之一。

3 油脂对鱼糜凝胶微观结构的影响

通过扫描电镜等手段可以直观地观察鱼糜凝胶微观结构的变化以及油滴在凝胶中的填充状态。不添加油脂的鱼糜凝胶中可以观察到典型的纤维结构^[20],肌原纤维蛋白排列有序且均匀地聚集,具有较强空间层次感和紧凑度^[25]。而随着油脂的加入,油滴占据在蛋白质纤维的空隙中或渗透在蛋白质基质中,如果油滴大小形状适当,这种油脂-蛋白质结合的结构可能使得鱼糜凝胶结构更紧凑,从而增强鱼糜凝胶结构,如:Zhou等^[26]在添加油茶籽油后,观察到油滴充分占据了鱼糜凝胶蛋白质基质的空

隙,这可以看作一种复合结构,这种结构具有更强的牢固性;米红波等^[27]添加3%的植物油后,鱼糜凝胶表面相对光滑、平整,网络结构较为致密。且不同的油脂由于本身独特的分子性质和状态,观察到的微观结构也存在差异。但一些研究发现,添加油脂会对鱼糜凝胶结构产生不良影响,如:Pérez - Mateos等^[37]研究发现,添加鱼油后在鱼糜凝胶基质中发现较大的油滴,这些较大油滴的出现对凝胶基质中蛋白质之间的相互作用表现出更高的干扰效应;Yu等^[38]也观察到添加鱼油后鱼糜凝胶的结构明显变得疏松;Gani等^[31]研究发现,椰子油的添加使得凝胶基质中嵌入了许多形状不规则的油滴,增加了蛋白质链之间的分子间距离。

4 油脂对鱼糜凝胶风味的影响

经过漂洗后的商业鱼糜其风味组成成分比较单一,添加外源性油脂对于鱼糜凝胶风味的改善具有重要意义^[46-47]。多数植物油或动物油本身含有独特的芳香风味化合物,这些风味化合物随着油脂的添加也被带入鱼糜凝胶中。并且,由于鱼糜凝胶的空间结构具有多孔的性质,可以稳定地锁住风味物质^[48]。此外,鱼糜凝胶的蛋白质基质中存在多种风味化合物的结合位点,可以作为风味物质的良好载体,所以外源性油脂添加后可以显著地改变鱼糜凝胶整体的风味特性^[49]。宋春勇^[25]将红花籽油添加到金线鱼鱼糜凝胶中,结果发现:油脂对鱼糜凝胶中醛类物质种类和含量的影响最明显,主要是一些相对分子量较小的直链醛类,如己醛、庚醛、辛醛和壬醛等;其次是醇类,以1-辛烯-3-醇和己醇为代表,表现为特殊的刺激性气味^[50];此外,对于酮类、烯炔和烷炔类等化合物的种类和含量也有较大的影响。其中,醛类和醇类物质的阈值较低,对风味的影响显著,而酮类、烯炔和烷炔类物质的阈值一般较高,对风味的影响相对温和。不同油脂的风味化合物种类和含量的影响具有较大差别,也造成鱼糜凝胶风味存在差异,如亚麻籽油含吡嗪和吡啶类物质较多,这使得鱼糜凝胶的风味更加丰富多样^[51]。

外源性油脂影响鱼糜凝胶风味的形成已被证明与油脂的氧化作用密切相关。在制作鱼糜产品的过程中,通常采用两段加热程序来对其进行熟化,第一段温度为40℃左右,此时鱼糜中残留的脂肪氧合酶可能活性较高,外源性油脂的加入为其提供了丰富的底物,在此条件下,油脂的酶促氧化和自动氧化的程度都较高,是鱼糜凝胶风味化合物形成的一个重要阶段。第二段加热一般维持在90℃左右,这时的反应以油脂的自动氧化和美拉德反应为主,油脂氧

化产生的羰基化合物可以为鱼糜凝胶中的美拉德反应提供原料物质,羰基化合物可以与鱼糜中的小分子肽和游离氨基酸发生羰氨反应,从而生成更复杂且多样的风味成分^[52]。鱼糜凝胶的风味成分会在这个阶段发生明显的改变,若油脂添加过量或者加热时间控制不当还可能产生令人不悦的气味^[53]。所以,油脂的氧化作用在鱼糜凝胶制备的各个阶段对于风味物质的形成都具有至关重要的作用,在实际的生产中应该对油脂氧化反应加以控制和利用,以生产出具有良好风味的鱼糜凝胶。

5 总结和展望

从理化特性(质构特性、流变特性、持水性、蒸煮损失、水分分布)、微观结构和风味等方面对油脂对鱼糜凝胶品质的影响进行了综述。鱼糜本身成分较为单一,油脂的添加可以赋予鱼糜制品独特的风味并适当强化其营养价值。油脂种类及添加量对鱼糜凝胶品质的影响不同,对于油脂的种类及其添加量对鱼糜凝胶的影响机制需要进一步明确。研究油脂对鱼糜凝胶品质的影响为生产出口感和风味俱佳的鱼糜凝胶提供了理论依据和开发思路。

参考文献:

- [1] 周文娟. 鲢鱼酶解产物在冷冻鱼糜中的抗冻机理及其应用[D]. 长沙:长沙理工大学, 2019.
- [2] 叶月华, 钱敏, 刘晓艳, 等. 不同外源物质对淡水鱼鱼糜热诱导凝胶特性增效作用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 285-293.
- [3] 熊泽语, 谢晨, 陈百科, 等. 不同添加物对未漂洗大黄鱼鱼糜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 151-158.
- [4] 冯扬扬, 王辉, 康辉, 等. 乳液凝胶的基质及质构特性对风味物质释放效果的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 325-331.
- [5] 从娇娇. 饲料中植物油替代鱼油对中华绒螯蟹品质的影响[D]. 上海:上海海洋大学, 2020.
- [6] 腾军伟. 不同植物油脂在再制奶油干酪中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 101-107.
- [7] 翟璐, 陈康, 金仁耀, 等. 乙酯型鱼油对鱼糜制品理化特性和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(3): 159-168.
- [8] 汪张贵. 肌肉蛋白与脂肪剪切乳化机理的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2010.
- [9] 叶蕾蕾, 吴晨曦, 刘茹, 等. 阳离子种类和添加量对鲢鱼糜凝胶力学特性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(8): 2319-2326.
- [10] HODGE T, JAMIE M, COPE T V. A myosin family tree [J]. J Cell Sci, 2000, 113(19): 3353-3354.
- [11] GORDON A, BARBUT S. Mechanisms of meat batter stabilization; a review [J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 1992, 32(4): 299-332.
- [12] CHEN J, DENG T, WANG C, et al. Effect of hydrocolloids on gel properties and protein secondary structure of silver carp surimi [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100(5): 2252-2260.
- [13] ZHANG Y, WANG Z, PENG Z, et al. Distribution of fat droplets/particles and protein film components in batters of lean and back fat produced under controlled shear conditions [J]. CYTA - J Food, 2013, 11(4): 352-358.
- [14] 励建荣, 余永名, 仪淑敏, 等. 鱼糜制品热凝胶形成机理研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 380-385.
- [15] RAMÍREZ J A, URESTI R M, VELAZQUEZ G, et al. Food hydrocolloids as additives to improve the mechanical and functional properties of fish products; a review [J]. Food Hydrocolloid, 2011, 25(8): 1842-1852.
- [16] JIANG Y, LI D, TU J, et al. Mechanisms of change in gel water holding capacity of myofibrillar proteins affected by lipid oxidation: the role of protein unfolding and crosslinking [J]. Food Chem, 2021, 344: 1285-1287.
- [17] 王智丰, 雷帆, 武艺, 等. 芝麻油体的稳定性及油体膜蛋白结构分析[J]. 食品科技, 2019, 44(8): 190-196.
- [18] DICKINSON E. Emulsion gels: the structuring of soft solids with protein-stabilized oil droplets [J]. Food Hydrocolloid, 2012, 28(1): 224-241.
- [19] 杨洁, 孙翠霞, 李蕊蕊, 等. 蛋白-风味物质相互作用的研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2016(11): 217-223.
- [20] SHI L, WANG X, CHANG T, et al. Effects of vegetable oils on gel properties of surimi gels [J]. LWT - Food Sci Technol, 2014, 57(2): 586-593.
- [21] CHANG T, WANG C, WANG X, et al. Effects of soybean oil, moisture and setting on the textural and color properties of surimi gels [J]. J Food Quality, 2015, 38(1): 53-59.
- [22] 贾丽娜, 庞杰, 吴云辉, 等. 乳化油脂与罗非鱼肌原纤维蛋白复合凝胶质构性质的研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 121-125.
- [23] JIAO X, CAO H, FAN D, et al. Effects of fish oil incorporation on the gelling properties of silver carp surimi gel subjected to microwave heating combined with conduction heating treatment [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 94: 164-173.
- [24] GANI A, BENJAKUL S. Impact of virgin coconut oil nanoemulsion on properties of croaker surimi gel [J]. Food Hydrocolloid, 2018, 82: 34-44.
- [25] 宋春勇. 植物油的添加对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响及机理[D]. 广东 湛江:广东海洋大学, 2021.
- [26] ZHOU X, JIANG S, ZHAO D, et al. Changes in

- physicochemical properties and protein structure of surimi enhanced with camellia tea oil [J]. *LWT – Food Sci Technol*, 2017, 84: 567–571.
- [27] 米红波, 王聪, 赵博, 等. 大豆油、亚麻籽油和紫苏籽油对草鱼鱼糜品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 60–73.
- [28] 王莉莎. 植物油与肌原纤维蛋白乳化复合凝胶的结构特性[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [29] WU M, XIONG Y L, CHEN J. Rheology and microstructure of myofibrillar protein – plant lipid composite gels: effect of emulsion droplet size and membrane type[J]. *J Food Eng*, 2011, 106(4): 318–324.
- [30] WU Y, LIN D, WANG S Y, et al. Effects of wheat – fiber addition on emulsion and lipid/protein stabilities of an ω -3 fatty – acid fortified chicken – surimi product [J]. *Poult Sci*, 2020, 100(2): 1319–1327.
- [31] GANI A, BENJAKUL S, NUTHONG P. Effect of virgin coconut oil on properties of surimi gel [J]. *J Food Sci Technol*, 2018, 55(2): 496–505.
- [32] LIN L, XIONG Y L. Competitive adsorption and dilatational rheology of pork myofibrillar and sarcoplasmic proteins at the O/W emulsion interface [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2021, 118: 106816 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106816>.
- [33] ZHOU X, CHEN H, LYU F, et al. Physicochemical properties and microstructure of fish myofibrillar protein – lipid composite gels: effects of fat type and concentration [J]. *Food Hydrocolloid*, 2019, 90: 433–442.
- [34] LÜ Y, SUN X, JIA H, et al. Antarctic krill (*Euphausia superba*) oil high internal phase emulsions improved the lipid quality and gel properties of surimi gel [J/OL]. *Food Chem*, 2023, 423: 136352 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.136352>.
- [35] ROY V C, CHAMIKA W A S, PARK J S, et al. Preparation of bio – functional surimi gel incorporation of fish oil and green tea extracts: physico – chemical activities, in – vitro digestibility, and bacteriostatic properties [J/OL]. *Food Control*, 2021, 130: 108402 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108402>.
- [36] ZHAO X, LI D, WANG L, et al. Rheological properties and microstructure of a novel starch – based emulsion gel produced by one – step emulsion gelation: effect of oil content [J/OL]. *Carbohydr Polym*, 2022, 281: 119061 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.119061>.
- [37] PÉREZ – MATEOS M, GÓMEZ – GUILLÉN M C, HURTADO J L, et al. The effect of rosemary extract and ω -3 unsaturated fatty acids on the properties of gels made from the flesh of mackerel (*Scorpaenopsis scorpaenoides*) by high pressure and heat treatments [J]. *Food Chem*, 2002, 79(1): 1–8.
- [38] YU J, SONG L, XIAO H, et al. Structuring emulsion gels with peanut protein isolate and fish oil and analyzing the mechanical and microstructural characteristics of surimi gel [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2022, 154: 112555 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112555>.
- [39] TORRES O, TENA N M, MURRAY B, et al. Novel starch based emulsion gels and emulsion microgel particles: design, structure and rheology [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 178: 86–94.
- [40] 吴满刚. 脂肪和淀粉对肌原纤维蛋白凝胶性能的影响机理[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2010.
- [41] ZHANG R, ZHANG T, HU M, et al. Effects of oleogels prepared with fish oil and beeswax on the gelation behaviors of protein recovered from Alaska Pollock [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2020, 137: 110423 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110423>.
- [42] ASUMING – BEDIAKO N, JASPAL M H, HALLETT K H, et al. Effects of replacing pork backfat with emulsified vegetable oil on fatty acid composition and quality of UK – style sausages [J]. *Meat Sci*, 2014, 96(1): 187–194.
- [43] LU Y, CAO J, ZHOU C, et al. The technological and nutritional advantages of emulsified sausages with partial back – fat replacement by succinylated chicken liver protein and pre – emulsified sunflower oil [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 149: 111824 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111824>.
- [44] FANG Q, SHI L, REN Z, et al. Effects of emulsified lard and TGase on gel properties of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 146(9): 111513 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111513>.
- [45] MENG L, JIAO X, YAN B, et al. Effect of fish mince size on physicochemical and gelling properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gel [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021(3): 111912 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111912>.
- [46] SHEN X, LI T, LI X, et al. Dual cryoprotective and antioxidant effects of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) protein hydrolysates on unwashed surimi stored at conventional and ultra – low frozen temperatures [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2022, 153: 112563 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112563>.
- [47] 丁浩宸, 阮东娜, 江银梅, 等. 高值海水鱼糜熟制后挥发性风味的分析及对比 [J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(8): 163–169.

- [59] YEH A I, HWANG S J. Effect of screw profile on extrusion – cooking of wheat flour by a twin – screw extruder [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2007, 27 (5): 557 – 563.
- [60] 郎珊珊, 阎树田. 螺杆构型对植物蛋白挤压组织化感官评定的影响[J]. *食品与机械*, 2012, 28(5): 135 – 137.
- [61] 武建堂, 董海洲. 花生蛋白挤压组织化及应用现状[J]. *粮食与油脂*, 2008(1): 13 – 15.
- [62] TOLSTOGUZOV V. Some thermodynamic considerations in food formulation [J]. *Food Hydrocolloid*, 2003, 17 (1): 1 – 23.
- [63] 张波, 魏益民, 康立宁. 等. 挤压参数对组织化大豆蛋白持水性的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(11): 260 – 263.
- [64] 张波, 魏益民, SIETZE W, 等. 双螺杆挤压机螺杆元件类型对扭矩和压力的影响[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(9): 71 – 74, 58.
- [65] GAUTAM A, CHOUDHURY G S. Screw configuration effects on starch breakdown during twin – screw extrusion of rice flour [J]. *J Food Process Pres*, 1999, 23 (5): 355 – 375.
- [66] LIU K S, HSIEH F H. Protein – protein interactions during high – moisture extrusion for fibrous meat analogues and comparison of protein solubility methods using different solvent systems [J]. *J Agric Food Chem*, 2008, 56(8): 2681 – 2687.
- [67] 李淑静, 张波, 魏益民, 等. 挤压能量作用对蛋白质分子质量的影响研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(21): 399 – 402.
- [68] LIN S, HUFF H E, HSIEH F. Extrusion process parameters, sensory characteristics, and structural properties of a high moisture soy protein meat analog [J]. *J Food Sci*, 2010, 67(3): 1066 – 1072.
- [69] VAZ L, AREAS J. Recovery and upgrading bovine rumen protein by extrusion: effect of lipid content on protein disulphide cross – linking, solubility and molecular weight [J]. *Meat Sci*, 2010, 84(1): 39 – 45.
- [70] KOCH L, EMIN M A, SCHUCHMANN H P. Influence of processing conditions on the formation of whey protein – citrus pectin conjugates in extrusion [J]. *J Food Eng*, 2017, 193: 1 – 9.
- [71] MARSMAN G, GRUPPEN H, GROOT J D, et al. Effect of toasting and extrusion at different shear levels on soy protein interactions [J]. *J Agric Food Chem*, 1998, 46 (7): 2770 – 2777.
- [72] 张波. 双螺杆挤压机螺杆作用表征研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [73] PUPPO C, CHAPLEAU N, SPERONI F, et al. Physicochemical modifications of high – pressure – treated soybean protein isolates [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(6): 1564 – 1571.
- [74] SPERONI F, BEAUMAL V, LAMBALLERIE M D, et al. Gelation of soybean proteins induced by sequential high – pressure and thermal treatments [J]. *Food Hydrocolloid*, 2009, 23(5): 1433 – 1442.
- [75] TANG C H, MA C Y. Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate [J]. *LWT – Food Sci Tech*, 2009, 42(2): 606 – 611.

(上接第 42 页)

- [48] ZHOU X, CHONG Y, DING Y, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE – GC – MS, e – nose and sensory evaluation [J]. *Food Chem*, 2016, 207(15): 205 – 213.
- [49] LU Y, ZHU Y, YE T, et al. Physicochemical properties and microstructure of composite surimi gels: the effects of ultrasonic treatment and olive oil concentration [J/OL]. *Ultrason Sonochem*, 2022, 88: 106065 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106065>.
- [50] XU P, LIU L, LIU K, et al. Flavor formation analysis based on sensory profiles and lipidomics of unrinsed mixed sturgeon surimi gels [J/OL]. *Food Chem: X*, 2023, 17: 100534 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100534>.
- [51] 张丽涵. 亚麻籽油风味分析及其在肉制品中的应用 [D]. 辽宁 锦州: 渤海大学, 2021.
- [52] LI W, WEN L, XIONG S, et al. Investigation of the effect of chemical composition of surimi and gelling temperature on the odor characteristics of surimi products based on gas chromatography – mass spectrometry/olfactometry [J/OL]. *Food Chem*, 2023, 420: 135977 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2023.135977>.
- [53] AN Y, WEN L, LI W, et al. Insight into the evolution of aroma compounds during thermal processing of surimi gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J/OL]. *Food Chem*, 2022, 374: 131762 [2022 – 04 – 28]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.131762>.