

不同功能性油脂与斩拌时间处理下鱼糜凝胶品质特性及风味比较

赵钰莹, 杨超, 徐艺, 吕冠成, 黄子鉴, 白俞武, 邓尚贵, 高元沛*
(浙江海洋大学食品与药学学院, 浙江舟山 316000)

摘要: 为了探究功能性油脂(山茶油、大豆油、鱼油)及斩拌时间对鱼糜凝胶品质的影响, 该研究以冷冻阿拉斯加狭鳕鱼糜为原料, 测定其微观结构、质构、水分状态、蛋白质结构等物化指标及风味特征的变化。结果表明, 鱼糜凝胶在斩拌 4 min 获得较佳理化特性, 然而斩拌时间对鱼糜凝胶蛋白质二级结构和风味特征变化的影响并不明显 ($P>0.05$)。相同斩拌时间下, 添加功能性油脂可显著改善鱼糜凝胶的品质 ($P<0.05$), 油脂-鱼糜凝胶白度、持水性较对照组分别提高约 16.15%与 5.44%。添加功能性油脂使鱼糜凝胶蛋白质中 α -螺旋结构减少, β -折叠结构增加, 促进蛋白质之间的疏水作用力与二硫键交联, 形成更加致密的鱼糜凝胶网络结构。此外, 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 结果显示, 功能性油脂的添加改变鱼糜凝胶中挥发性化合物的种类和含量, 使其整体风味更加丰富。综上, 通过添加功能性油脂并控制斩拌时间可有效改善鱼糜凝胶品质, 研究结果可为功能性油脂的开发及其在鱼糜凝胶产品中的应用提供理论基础。

关键词: 鱼糜; 功能性油脂; 斩拌时间; 凝胶特性; 风味

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1351

Comparison of Quality Characteristics and Flavor of Surimi Gel Treated with Different Functional Oils and Chopping Time

ZHAO Yuying, YANG Chao, XU Yi, LYU Guancheng, HUANG Zijian, BAI Yuwu, DENG Shanggui, GAO Yuanpei*

(College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316000, China)

Abstract: To investigate the effect of functional oils (camellia oil, soybean oil, fish oil) and chopping time on the quality of *Alaskan pollock* surimi gel, the physical and chemical indices, including microstructure, textural properties, moisture status, and protein structure were evaluated in conjunction with the flavor profile. The findings revealed that optimal physicochemical characteristics were exhibited by surimi gel with a chopping time of 4 minutes. However, the protein secondary structure and flavor characteristics of the surimi gel were not significantly affected by variations in chopping time ($P>0.05$). With the same chopping time, the incorporation of functional oils significantly improved the quality of surimi gel ($P<0.05$), the whiteness and water holding capacity of oil-surimi group were increased by 16.15% and 5.44%, respectively, compared to control group. Additionally, the inclusion of oils resulted in a reduction of in the α -helix structure being reduced and the β -sheet structure of the surimi gel proteins, fostering hydrophobic interactions and disulfide bond cross-linking, which contributed to the formation of a denser gel network. Furthermore, gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) indicated that the types and concentrations of volatile compounds were altered by functional oils, thereby enriching the overall flavor profile. In conclusion, the quality of surimi gels can be effectively improved through the addition of functional oils and the control of chopping time. The findings have provided a theoretical basis for the development and application of functional oils in surimi gel products.

Keywords: surimi; functional oil; chopping time; gel properties; flavor

阿拉斯加鳕鱼 (Alaska Pollock) 也称狭鳕鱼、明太鱼, 具有高蛋白低脂肪、肉质嫩、价格低、储备足等优点,

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-11-04; 接受日期: 2024-11-07

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (32302112); 浙江省公益探索项目 (LQ23C200008)

作者简介: 赵钰莹 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: zhaoyuying10@163.com

通讯作者: 高元沛 (1989-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: gaoyup89@zjou.edu.cn

以其鱼肉为原料的鱼糜制品备受消费者青睐^[1]。鱼糜制品是一种传统的水产精深加工品,因其味道鲜美、食用方便、易于携带深受消费者喜爱。近年来,我国鱼糜制品需求不断增长,产业发展迅速。然而,随水产食品精深加工工业的快速转型与消费者对水产品品质要求的提升,鱼糜产业面临产品品质不高、营养价值需增强以及风味有待提升等挑战^[2]。因此,改善鱼糜制品品质并研发营养健康新型产品,是水产加工领域的研究热点。

斩拌是鱼糜制品加工过程中必不可少的重要工序,斩拌过程中斩拌时间、斩拌温度会直接影响鱼糜制品的加工品质。斩拌的目的是利用机械作用力使物料混合,并在此过程中促进鱼糜盐溶性蛋白溶出,而不发生变性,斩拌时间过短或过长均不利于鱼糜凝胶品质^[3]。姚志琴^[4]研究发现高速斩拌 60、90 s 后鱼滑的持水性、白度、内聚性和咀嚼性较好;张晓栋^[5]研究发现随着空擂时间的增加,罗非鱼鱼糜凝胶强度呈先增强后减弱趋势;朱士臣等^[3]发现随着斩拌时间的延长,肌原纤维蛋白溶解度、总巯基含量和粒径总体呈先上升后下降趋势。因此,研究斩拌时间对鱼糜凝胶中品质的影响具有重要意义。

在鱼糜加工过程中,漂洗环节通常会去除水溶性蛋白、脂质等杂质,以浓缩肌原纤维蛋白和减少脂质氧化,延长冷冻鱼糜的储存时间^[6]。然而,脂质在维持鱼糜制品质地、营养价值和风味等方面具有不可或缺的作用。功能性油脂是一类具有特殊生理功能的油脂,对人体预防和/或治疗心血管疾病等具有重要的作用,其中主要的活性物质是一些多不饱和脂肪酸和磷脂,某些油脂中还含有角鲨烯、维生素、矿物质等^[7]。功能性油脂多为植物性油脂,目前市场上最常见的功能性植物油有大豆油、菜籽油和花生油,山茶油、橄榄油等也逐渐开始占据一定市场^[8],鱼油是为数不多的动物功能性油脂^[7]。当前市场上可供消费者选择添加功能性油脂的水产食品种类并不多,功能性油脂在鱼糜制品加工领域内的研发与创新仍有待进一步加强。

因此,本文以冷冻阿拉斯加狭鳕鱼糜为原料,选取不同功能性油脂(山茶油、大豆油、鱼油),采用不同斩拌时间制备鱼糜凝胶,通过分析白度、质构特性、凝胶强度、持水性等凝胶特性指标,结合挥发性风味等品质变化差异,研究不同制备条件对鱼糜凝胶品质的影响,以期扩大功能性油脂在食品领域的应用、改善鱼糜制品品质和开发功能性鱼糜制品提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻阿拉斯加狭鳕鱼糜(FA级),浙江兴业集团有限公司;山茶油,浙江久晟油茶科技有限公司;大豆油,中粮粮油工业(巢湖)有限公司;深海多烯鱼油,山东禹王制药有限公司;溴化钾(KBr)为光谱纯,氯化钠(NaCl)、尿素(Urea)等其它试剂均为国产分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

FP3010 多功能食品加工机,德国 Braun 公司;HG9245A 热风干燥箱,上海一恒仪器设备有限公司;Quintix35 超微量电子分析天平,德国赛多利斯;iTexture 结构测试仪,浙江浙科仪器设备有限公司;TensorII 傅里叶红外光谱仪,德国 Bruker 公司;U-2800 UV-Vis 紫外分光光度计,上海尤尼柯仪器有限公司;气相离子迁移谱联用仪,FlavourSpec® G.A.S.公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

将冷冻鱼糜在 4℃ 下隔夜解冻,切成小方块称取 300 g,在多功能食品加工机中空斩 1 min 后加入质量分数为 3%的 NaCl 斩拌 2 min,分别添加质量分数为 10%的山茶油、大豆油、鱼油,另以添加质量分数为 10%水替代 10%功能性油脂的鱼糜作为对照,同时加入冰水调节水分含量,将混合鱼糜继续斩拌 2、4、6 min 得到乳化鱼糜糊,使用冰水浴将整个斩拌过程温度控制在 10℃ 以下。鱼糜糊抽真空、灌肠、密封,经二段加热(30℃, 60 min; 90℃, 30 min)后,由冰水冷却至室温,于 4℃ 冰箱保存备用。

1.3.2 油滴微观结构的观察

取适量 1.3.1 所述鱼糜糊置于载玻片上,用盖玻璃缓慢覆盖,尽量减少气泡的形成,采用光学显微镜(10 倍目镜、100 倍物镜)观察油滴微观结构。

1.3.3 白度的测定

参照高霞等^[9]的方法并稍做修改。将鱼糜凝胶切成 20 mm 高的圆柱体,采用色差仪测定鱼糜凝胶的白度。白度值 (W) 的计算公式如下:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

式中:

L^* ——亮度;

a^* ——红/绿色值;

b^* ——黄/蓝色值。

1.3.4 质构及凝胶强度的测定

将鱼糜凝胶切成 20 mm 高的圆柱体,分别采用 iTexture 质构仪的 TPA 测定模式和 Puncture penetration 测定模式,进行质构及凝胶强度的测定。质构的测定: P50 柱型探头,测前速率 2 mm/s,测试速率 1 mm/s,测后速率 10 mm/s,触发力 10 g,形变量 30%。凝胶强度的测定: P0.5 球型探头,测试速率 1 mm/s,返回速率 10 mm/m,触发力 10 g,形变量 90%。凝胶强度的计算公式如下:

$$S = F \times H \quad (2)$$

式中:

S ——凝胶强度, N·cm;

F ——破断力, N;

H ——破断距离, cm。

1.3.5 持水性的测定

将鱼糜凝胶切成 3 g 左右的薄片并准确称重,用滤纸包裹后装入底部垫有脱脂棉的 50 mL 离心管内, 4 °C 下 5 000 g 离心 15 min。离心后对鱼糜凝胶薄片进行再次称量。持水性 (WHC) 的计算公式如下:

$$WHC = \left(1 - \frac{M_1 - M_2}{M_1 \times M_0}\right) \times 100\% \quad (3)$$

式中:

M_0 ——鱼糜凝胶初始水分含量, %;

M_1 ——鱼糜凝胶离心前重量, g;

M_2 ——鱼糜凝胶离心后重量, g。

1.3.6 傅里叶红外光谱测定

参照 Zhang 等^[10]的方法并稍做修改。将冷冻干燥的鱼糜凝胶样品与溴化钾按 1:100 的比例充分混合,研磨均匀后使用压片机压成薄片。采用傅里叶红外光谱仪在 400~4 000 cm^{-1} 范围内以 4 cm^{-1} 分辨率对薄片进行 32 次扫描,使用 Peak Fit v4.12 软件对得到的光谱图取 1 600~1 700 cm^{-1} 范围进行基线校正和平滑等处理以测定蛋白构象比例。

1.3.7 化学作用力的测定

参照 Niu 等^[11]和 Li 等^[12]的方法并稍做修改。准确称取 3 组 2 g 鱼糜凝胶,分别加入 10 mL SA (0.6 mol/L NaCl)、SB (0.6 mol/L NaCl+1.5 mol/L 尿素)、SC (0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素) 试剂, 10 000 r/min 匀浆 1 min。在 4 °C 下静置 1 h 后离心 (4 °C, 10 000 g) 10 min, 取上清液。其中,鱼糜凝胶样品经 SC 试剂处理过后在沉淀中加入 SD (0.6 mol/L NaCl+8 mol/L 尿素+0.5 mol/L β -巯基乙醇) 匀浆、静置、离心、取上清液,在上清液中加入等体积质量分数为 20% 的三氯乙酸溶液,再次离心 (4 °C, 10 000 g) 10 min, 弃去上清液保留沉淀,加入 1 mL 1 mol/L NaOH 对获得的沉淀物进行溶解,使用考马斯亮蓝法测定溶解在 SA、SB、SC、SD 上清液中的蛋白质量浓度。其分别代表鱼糜凝胶中离子键 (SA)、氢键 (SB-SA)、疏水作用力 (SC-SB) 和二硫键 (SD) 的含量。

1.3.8 低场核磁共振测定

参照 Ding 等^[13]的方法并稍作修改。将鱼糜凝胶切成 20 mm 高的圆柱体并装入 40 mm 核磁管底部,采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill (CPMG) 脉冲序列室温下测定鱼糜凝胶的横向弛豫时间 T_2 。测量参数设置为: 采样频率 250 kHz, 主频 20 MHz, 射频延时 0.08 ms, 模拟增益 20 dB, 等待时间 6 000 ms, 累加次数 8, 回波时间 0.8 ms,

回波个数 2 500。

1.3.9 气相色谱-离子迁移谱 (GC-IMS) 测定

称取 3 g 鱼糜凝胶样品放入 20 mL 顶空瓶中, 60 °C 孵育 15 min 后进样。色谱柱温度: 60 °C; 载气: 高纯氮气 (纯度≥99.999%)。色谱运行时间: 30 min; 进样口温度: 80 °C。IMS 电离源: 氙源 (3 H); 迁移管长度: 53 mm; 电场强度: 500 V/cm; 迁移管温度: 45 °C; 漂移气: 高纯氮气 (纯度≥99.999%); 流速: 75.0 mL/min; 正离子模式。检测 6 种酮的混标, 建立保留时间和保留指数的校准曲线, 随后通过目标物的保留时间计算出该物质的保留指数, 使用 VOCal 软件内置的 GC 保留指数 (NIST 2020) 数据库和 IMS 迁移时间数据库检索和比对, 对目标物进行定性分析。利用 VOCal 数据处理软件中的 Reporter、Gallery Plot 和 Dynamic PCA 等插件分别生成挥发性成分的二维差异谱图、指纹图谱及 PCA 图, 用于样品间挥发性化合物的对比。

1.4 数据处理与统计分析

所有实验均至少进行三次重复, 以平均数±标准差表示。采用 IBM SPSS statistics 27 软件和 OriginPro 2024 对数据进行统计分析。显著性差异分析使用邓肯模型检验分析, $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 鱼糜糊微观结构及鱼糜凝胶白度、持水性

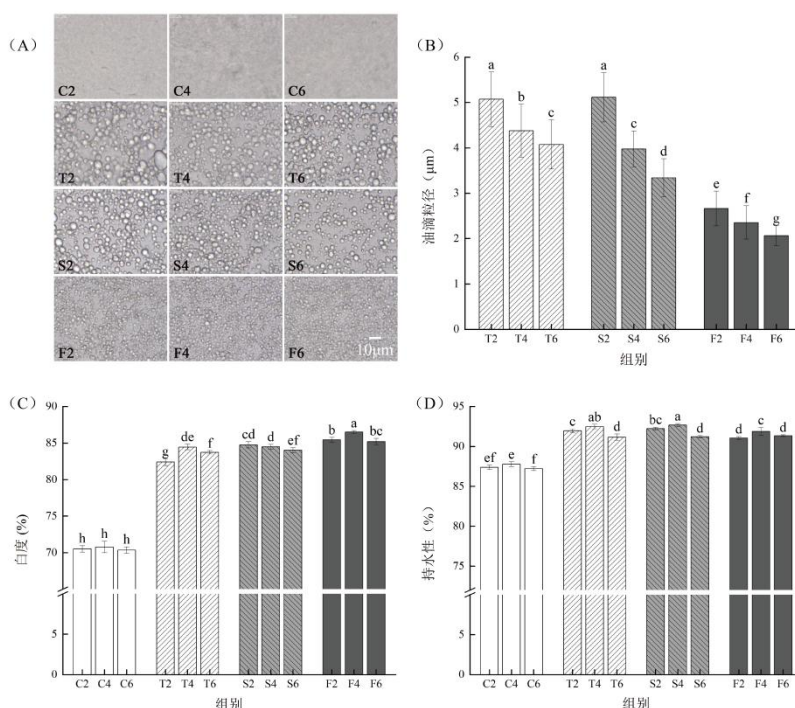


图 1 不同功能性油脂及斩拌时间对乳化鱼糜糊光学显微镜图像 (A)、油滴粒径 (B)、鱼糜凝胶白度 (C) 和持水性 (D) 影响

Fig.1 Effects of different functional oils and chopping time on optical microscope image (A), oil droplet size (B), whiteness (C), and water holding capacity (D) of surimi gel

注: 图中大写字母与数字组合分别表示不同斩拌时间及添加不同功能性油脂的样品名称, T 为山茶油组, S 为大豆油组, F 为鱼油组, C 为对照组。对 12 组样品进行比较, 不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下图同。

不同功能性油脂与斩拌时间处理下鱼糜糊的显微结构和油滴粒径大小情况如图 1A 和 B 所示, 对照组未观察到明显油滴, 而添加油脂后可以清晰观察到规则油滴, 且油脂组油滴粒径大小随斩拌时间的增加而减小。其中鱼油组的油滴粒径最小, 可能与鱼油、山茶油及大豆油在自身黏度及脂肪酸组成上的差异等因素有关。斩拌 2 min 时, 由于水与油之间的界面张力较大, 油滴较大且分布不均匀^[14]; 随斩拌时间的增加, 油滴粒径逐渐减小且均匀

分散,表明斩拌引起了鱼糜蛋白膨胀和构象变化,从而降低了水与油脂之间的界面张力。但斩拌时间过长,油滴过小,盐溶性蛋白质不能完全包裹所有油脂微粒,在热加工过程中会有出油出水现象^[15]。

白度是评价鱼糜凝胶品质的重要指标之一,其变化直接反映鱼糜凝胶内部结构的变化^[16]。由图 1C 可知,斩拌时间和油脂添加均在一定程度上改变了鱼糜凝胶的白度。随斩拌时间的增加,对照组凝胶白度变化不显著 ($P>0.05$),山茶油组和鱼油组鱼糜凝胶的白度出现先增高后降低,大豆油组的鱼糜凝胶白度逐渐下降,这可能由于大豆油中亚油酸具有较高氧化敏感性,随斩拌时间的增加,温度升高,油脂氧化影响鱼糜凝胶的颜色^[17]。白度增加主要是由于斩拌过程中鱼糜纤维组织结构被破坏,鱼糜盐溶性蛋白充分溶出,斩拌时间过长使鱼糜内部温度升高,部分蛋白变性,进而导致凝胶白度降低^[18]。添加油脂组鱼糜凝胶的白度显著高于对照组,鱼油组白度增加效果最显著,大豆油和山茶油组次之,表明油脂的添加对鱼糜凝胶中蛋白质分子间相互作用具有一定影响,不同的油脂对鱼糜凝胶内部结构的影响也不同。且三种油脂均为浅黄色,油脂本身色素沉着会对鱼糜凝胶样品产生影响,在鱼糜中添加功能性油脂,油滴悬于鱼糜凝胶表面,鱼糜凝胶的光散射效应增强,产生更多光反射,从而使鱼糜凝胶的白度增加^[19]。

鱼糜凝胶的持水性测定结果如图 1D 所示,随时间增加,整体呈现先升高后降低的趋势。斩拌时间过短,肌肉纤维和结缔组织破碎不充分,盐溶性蛋白溶出不足,鱼糜凝胶结构疏松,持水性差;斩拌时间过长,导致蛋白变性,降低持水性^[20]。而添加功能性油脂组持水性均在 90%以上,较对照组显著提高 ($P<0.05$)。在鱼糜中加入油脂后,在蛋白质的作用下,油滴表面会形成一层保护膜将脂肪颗粒包埋再填充到鱼糜基质中,促进脂肪液滴的固定,有效地阻止了水分子从鱼糜内部向外部的扩散和流失,从而提高凝胶结构的锁水能力^[21]。

2.2 鱼糜凝胶质构及凝胶强度

由表 1 可知,在斩拌 4 min 时,鱼糜凝胶的硬度、咀嚼性及胶着性显著高于 2 min 及 6 min ($P<0.05$)。适当的斩拌时间可显著提高肉糜凝胶的质构特性,斩拌时间过长或过短均不利于鱼糜形成良好的品质特性。斩拌时间过长会引起蛋白质的部分变性,对肌原纤维蛋白的乳化力和粘着力产生不利影响,从而导致鱼糜凝胶的硬度、咀嚼性和胶着性减小,品质下降;拌时间过短时,盐溶性蛋白无法充分溶出,使得鱼糜制品的凝胶品质下降,进而导致鱼糜凝胶的质构参数下降^[22]。相较于对照组,油脂组硬度、咀嚼性、胶着性分别提高约 25.69%、18.07%、19.95%。不同油脂具有不同的脂肪酸组成和含量,其中富含油酸或多不饱和脂肪酸的油脂可能会影响蛋白与脂质乳化效果,从而改变凝胶质构特征^[6,23]。山茶油由于含有大量油酸,而大豆油和鱼油富含多不饱和脂肪酸能有效改善鱼糜凝胶质构特性。

随斩拌时间的增加,鱼糜的凝胶强度出现先提高后下降的趋势,这可能与斩拌过程中肌原纤维蛋白的理化性质和结构发生变化有关。斩拌时间过短,肌纤维组织未完全被破坏,蛋白质交联程度差,导致凝胶强度较低^[24];斩拌时间过长,温度过高导致肌球蛋白的高级结构发生变化而影响鱼糜的凝胶强度。添加山茶油和大豆油显著提高鱼糜凝胶强度,而添加鱼油则显著降低了鱼糜的凝胶强度,这可能是由于鱼油油滴形态较小,总表面积较大,小油滴在内部相互挤压变形,干扰了蛋白质之间的相互作用,且微小油滴会增强油滴布朗运动,不利于凝胶三维网络的稳定^[25]。

表 1 不同功能性油脂与斩拌时间对鱼糜凝胶质构及凝胶强度的影响

Table 1 Effects of different functional oils and chopping time on TPA and gel strength of surimi gel

组别	硬度/g	咀嚼性	胶着性	凝胶强度/(N·cm)
C2	1003.97±75.88 ^e	718.12±49.96 ^c	775.55±40.90 ^e	39.31±1.45 ^d
C4	1053.05±42.77 ^e	755.19±32.93 ^c	824.38±42.88 ^e	43.36±2.83 ^d
C6	1048.09±38.44 ^e	736.99±92.03 ^c	813.19±48.10 ^e	42.78±2.72 ^d
T2	1404.33±64.33 ^{ab}	984.45±22.79 ^a	982.56±38.9 ^{cd}	48.95±2.00 ^{bc}
T4	1434.77±69.58 ^a	1019.77±58.63 ^a	1090.70±49.55 ^a	55.01±3.12 ^a
T6	1421.36±48.23 ^a	1005.45±31.29 ^a	1083.70±38.80 ^{ab}	52.87±2.48 ^{ab}
S2	1321.59±58.63 ^{cd}	969.70±40.11 ^a	1031.96±53.52 ^{bc}	49.70±3.57 ^c
S4	1395.38±62.38 ^{ab}	986.54±47.18 ^a	1035.73±36.90 ^{bc}	51.11±4.55 ^b
S6	1347.77±83.22 ^{bc}	980.36±85.55 ^a	1026.86±66.00 ^c	47.75±3.16 ^c

F2	1261.86±57.38 ^d	847.88±50.55 ^{cb}	930.29±57.20 ^d	24.69±2.71 ^c
F4	1277.88±39.44 ^d	875.46±45.06 ^b	944.01±31.30 ^d	27.84±2.83 ^c
F6	1267.07±38.66 ^d	868.78±66.05 ^b	940.38±51.83 ^d	25.53±1.80 ^e

注：每列中不同字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）。

表 2 不同功能性油脂的脂肪酸组成（%）

Table 2 Fatty acid composition of different functional oils (%)			
组别	饱和脂肪酸含量	单不饱和脂肪酸含量	多不饱和脂肪酸含量
山茶油	9.00	79.50	11.50
大豆油	14.20	29.40	56.30
鱼油	≤30.00	/	≥80.30

注：表格数据由生产厂家提供。

2.3 鱼糜凝胶水分分布

由氢质子自由度和结合力反映的 T_2 弛豫时间可以分析鱼糜凝胶内水分分布的状态^[26]。由图 2 可知，鱼糜凝胶样品在 0~10 000 ms 的范围内共检测出 3 个弛豫峰，分别为 T_{21} 结合水（1~10 ms）、 T_{22} 不易流动水（10~150 ms）和 T_{23} 自由水（150~10 000 ms）^[27]，对应的峰所占的比例分别记为 P_{21} 、 P_{22} 、 P_{23} 。不易流动水在鱼糜凝胶水分状态中占据主导地位，和鱼糜凝胶持水性密切相关。相比对照组，添加功能性油脂组不易流动水含量显著降低（ $P<0.05$ ）。随斩拌时间的增加， P_{22} 峰面积比例整体呈现先增大后减少的趋势，表明不易流动水的相对含量发生了变化。斩拌时间为 4 min 时，不易流动水的总比例最高，表明此时鱼糜凝胶具有最强的持水能力，这与上述持水性随斩拌时间的变化趋势相一致。添加功能性油脂后，鱼糜凝胶中结合水含量显著高于对照组（ $P<0.05$ ），可能是油脂通过分散和填充在鱼糜凝胶基质中，同时包裹在鱼糜蛋白表面，减少了鱼糜凝胶中水分的迁移，增强鱼糜凝胶对水分的束缚能力，进而增强鱼糜凝胶的持水性能^[28,29]。

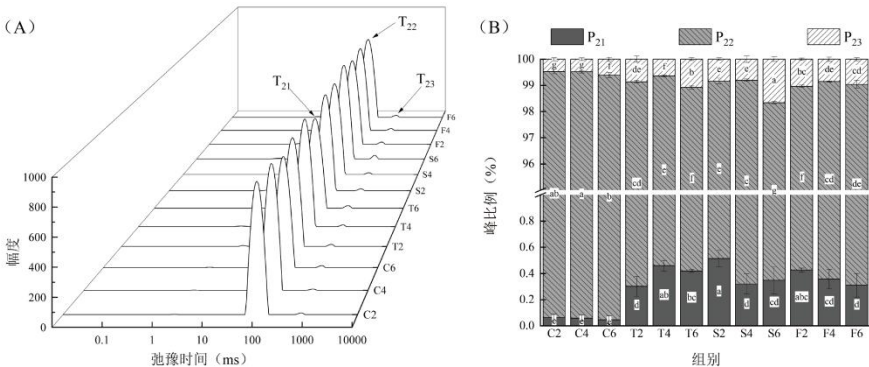


图 2 不同功能性油脂与斩拌时间对鱼糜凝胶水分分布的影响

Fig.2 Effects of different functional oils and chopping time on water distribution of surimi gel

2.4 鱼糜凝胶蛋白二级结构

酰胺一带（1 600~1 700 cm^{-1} ）被认为是研究蛋白质二级结构信息的最有研究意义的波段，其中包括 β -折叠（1 600~1 640 cm^{-1} ）、无规则卷曲（1 640~1 650 cm^{-1} ）、 α -螺旋（1 650~1 660 cm^{-1} ）、 β -转角（1 660~1 700 cm^{-1} ）^[30]。较高 β -折叠含量及较低 α -螺旋含量能维持鱼糜较好的凝胶特性。由图 4 可知，斩拌时间对于鱼糜凝胶的 α -螺旋含量变化的影响较小，但随斩拌时间的增加， β -折叠含量大致呈先上升后下降的趋势。相较于对照组，添加油脂样品中 α -螺旋含量总体减少， β -折叠含量总体增加，这可能是蛋白质与脂质相互作用或蛋白质分子之间相互作用产生。油脂的存在可以改变鱼糜蛋白质的微环境，引起疏水基团的暴露，疏水性侧链嵌入到油滴中，产生更强的脂质-蛋白质相互作用，进一步影响鱼糜凝胶三维网络结构的稳定性^[31]。山茶油组和大豆油组的 β -折叠含量显著高于鱼油组（ $P<0.05$ ），表明其具有较为稳定的蛋白空间构象，与上述凝胶强度的实验结果相符。通常来说， α -螺旋结构会阻碍蛋白的凝胶化， β -折叠能够促进蛋白网络的形成^[32]，因此，功能性油脂的添加对鱼糜凝胶蛋白二

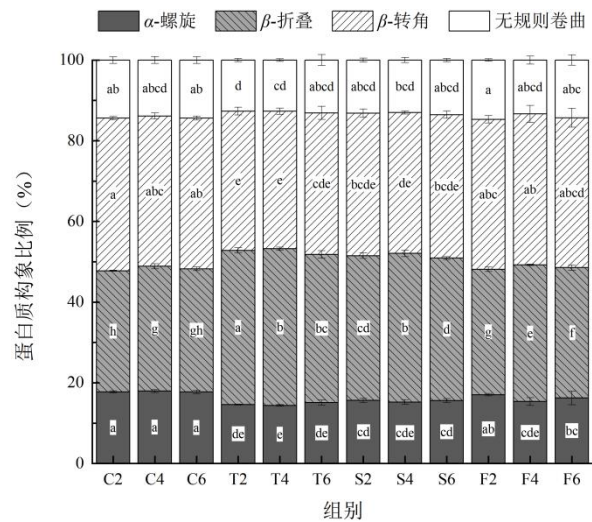


图 3 不同功能性油脂与斩拌时间对鱼糜凝胶蛋白二级结构的影响

Fig.3 Effects of different functional oils and chopping time on secondary structure of surimi gel protein

2.5 鱼糜凝胶化学作用力

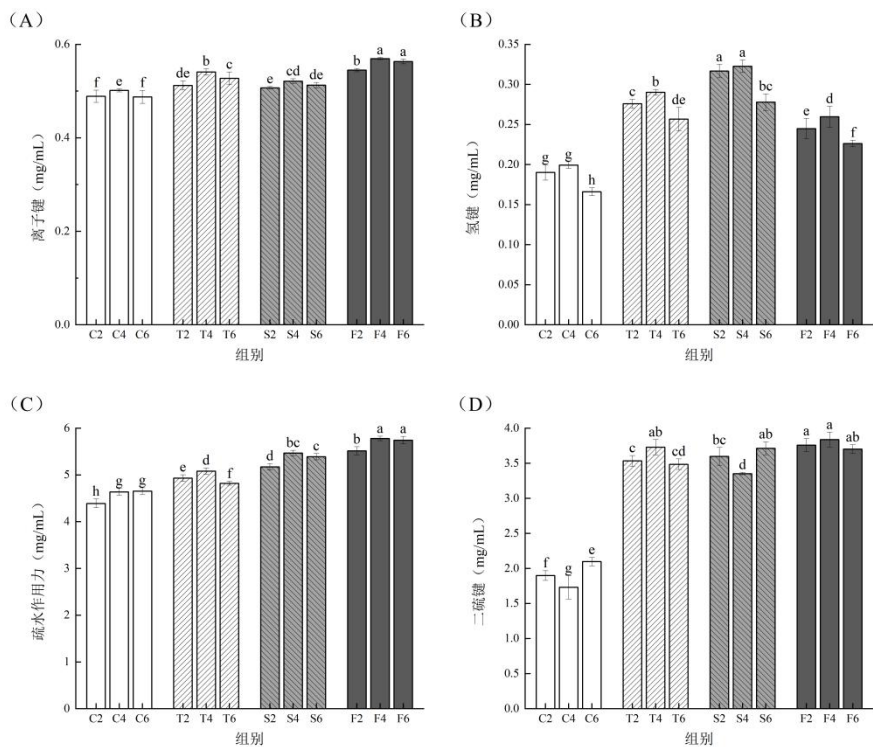


图 4 不同功能性油脂与斩拌时间对鱼糜凝胶化学作用力的影响

Fig.4 Effects of different functional oils and chopping time on chemical forces of surimi gel

不同功能性油脂与斩拌时间对鱼糜凝胶化学作用力的影响见图 3。相较于对照组，油脂组化学作用力均不同程度提升，离子键、氢键、疏水作用力、二硫键含量分别提高约 3.92%、36.18%、9.80%、93.64%，二硫键含量变化最明显。二硫键和疏水作用力可以促进蛋白质分子间形成更加致密的三维网络结构，在鱼糜凝胶形成过程中起主要作用，离子键主要用来稳定蛋白质之间的聚集，氢键通过调节结合水达到维持蛋白质二级结构稳定性的作用^[33]。所有鱼糜凝胶样品中疏水相互作用和二硫键的含量显著高于氢键和离子键，说明这两种力是维持鱼糜凝胶结构的关键作用力。

离子键及氢键随斩拌时间的增加先上升后下降，这可能由于在斩拌过程中蛋白质发生变性聚集所导致的。与

对照组相比, 添加功能性油脂组氢键含量显著高于对照组 ($P<0.05$)。氢键在稳定水分子和二级结构方面起重要作用, 氢键增加说明凝胶的持水性增强, 与上述持水性相印证。另一方面, 油脂处理影响了蛋白质多肽链中氨基和酰基之间氢键的形成, 进而导致鱼糜凝胶二级结构发生改变。

疏水作用力是凝胶基质中的主要作用力, 对维持凝胶网络稳定性至关重要^[34]。随斩拌时间的增加, 疏水作用力先上升后下降, 与凝胶强度的变化趋势一致。油脂的添加引起鱼糜蛋白疏水侧链暴露增多, 从而使疏水作用力增加, 但过高的疏水作用力会破坏鱼糜凝胶网状结构平衡^[35], 反而导致凝胶强度下降。鱼油组疏水作用力含量最高, 可能也是鱼油组凝胶强度下降原因之一。

二硫键作为维持鱼糜凝胶网络结构的重要分子间作用力, 随斩拌时间的增加, 对照组与大豆油组均呈先下降后上升的趋势, 而山茶油组和鱼油组则先上升后下降, 这可能是因为不同油脂在斩拌过程中蛋白质和脂肪发生不同程度的氧化所造成的。油脂的添加同样整体增加了鱼糜凝胶中的二硫键含量, 二硫键是由相邻的 2 个半胱氨酸分子形成, 半胱氨酸属于氧化敏感氨基酸并含有巯基, 其可能原因是功能性油脂提供了更易氧化的环境, 导致更多的巯基在鱼糜加工过程中被氧化形成分子间二硫键^[36]。二硫键含量变化说明油脂处理改变了蛋白质的空间构象, 蛋白间相互作用力上升, 从而影响鱼糜凝胶质构特性。

2.6 鱼糜凝胶风味

2.6.1 鱼糜凝胶挥发性化合物主成分分析

对经不同制备条件的鱼糜凝胶中主要风味物质进行主成分分析, 从图 5A 中可以看出鱼糜凝胶样品组内距离较近, 说明鱼糜样品的重复性良好^[37]; 组间相距较远, 说明制备条件显著改变鱼糜样品的挥发性化合物。由图可见, PC1 和 PC2 的贡献率分别为 63%和 20%, 累计贡献率为 83%, 说明 PC1 和 PC2 能较为客观的反映鱼糜样品挥发性风味物质的绝大部分信息。添加不同功能性油脂的鱼糜凝胶风味差异较大, 添加鱼油组相较于其它组风味差异最大, 而斩拌时间对于风味差异影响较小。

图 5B 为鱼糜样品的最近邻-欧氏距离图, 距离越远, 说明两种样品之间的相似性越低, 反之越高。由图分析结果可知, 添加功能性油脂组与对照组样品间相似性存在一定差异, 山茶油组与对照组的相似性最高, 大豆油组次之, 鱼油组与对照组的相似性最低, 斩拌时间则对于样品间的相似性没有太大影响。

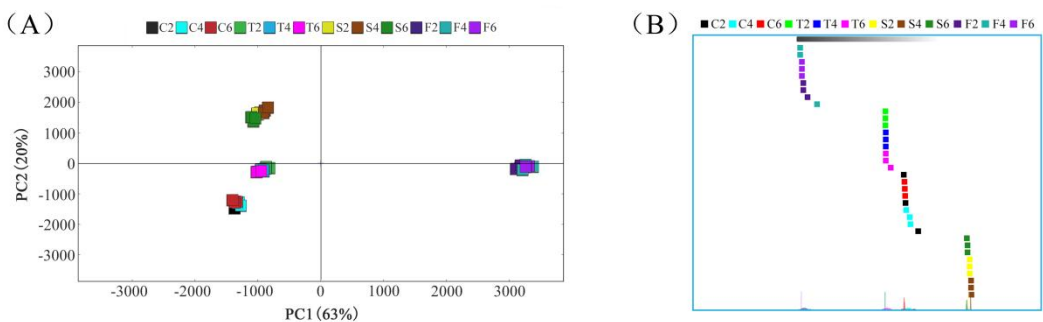


图 5 不同功能性油脂与斩拌时间的鱼糜样品 PCA 分析图 (A) 和最近邻-欧氏距离图 (B)

Fig.5 PCA analysis diagram (A) and nearest neighbor-Euclidean distance diagram (B) of surimi samples under different functional oils and chopping time

2.6.2 鱼糜凝胶挥发性化合物的识别

图 6A 采用差异对比模式, 选取未添加油脂组斩拌 2 min (C2) 的鱼糜凝胶样品谱图作为参照, 其余谱图扣除 C2 中的信号峰, 得到二者的差异谱图。红色或蓝色分别代表风味物质浓度高于或低于参照, 红或者蓝色越深, 说明差异越大^[38]。GC-IMS 能够对不同处理鱼糜凝胶样品挥发性化合物进行识别和分离, 通过图 6A 可准确看出添加功能性油脂组挥发性化合物分布多于未添加组, 且鱼油组挥发性化合物分布最多, 可能是由于鱼油为深海动物油脂, 其富含的 ω -3 型不饱和脂肪酸在氧化过程中容易分解产生具有挥发性的小分子醛、酮及醇类等化合物, 这些化合物赋予了鱼油特有的鱼香味, 而斩拌时间对于鱼糜凝胶样品挥发性化合物分布影响不大, 这和 PCA 分析结果相印证。

不同制备条件下的鱼糜凝胶样品中挥发性物质指纹图谱如图 6B 所示。每行代表一个样品，每列代表一个化合物，颜色由浅到深表示含量由低到高。由图 6 可知，在鱼糜凝胶样品中，通过 GC-IMS 共鉴定出 57 种挥发性化合物（包括单体和二聚体），其中醛类 23 种，醇类 9 种，酸类 1 种，酮类 6 种，酯类 11 种，其它化合物 2 种以及未知物质 5 种，具体结果见指纹图谱。鱼糜凝胶样品中，醛类、醇类、酮类和酯类物质种类比较丰富，它们是构成鱼糜凝胶风味的主要组成化合物。油脂的添加导致鱼糜凝胶中的某些挥发性化合物含量上升或出现新增的挥发性化合物。其中，山茶油的添加引入或增加正戊醛和丙酮等挥发性化合物含量，正戊醛具有发酵的面包香，丙酮有类似于酒的芳香味；大豆油的添加引入或增加 2-庚酮和 2-辛酮等挥发性化合物含量，2-庚酮有类似于香蕉的水果香，2-辛酮具有霉香、酮香，并有牛奶、乳酪、蘑菇的气味；尤其是鱼油的添加使丁醛、二甲硫醚、2-己烯醛、2-戊烯醛、4-庚烯醛、己酸乙酯、丁酸丙酯、丙酸乙酯、丁酸乙酯等挥发性化合物含量上升或新增，丁醛、2-己烯醛、己酸乙酯、丁酸丙酯、丙酸乙酯、丁酸乙酯通常具有果香味，2-戊烯醛具有土豆、豌豆香，4-庚烯醛具有青草味和油脂味，说明鱼油的加入使鱼糜凝胶的风味更加独特。综上，功能性油脂的添加改变了鱼糜凝胶中挥发性化合物的含量，其将本身所含有的独特芳香风味化合物带入到鱼糜凝胶中，使鱼糜凝胶的挥发性风味更加丰富。

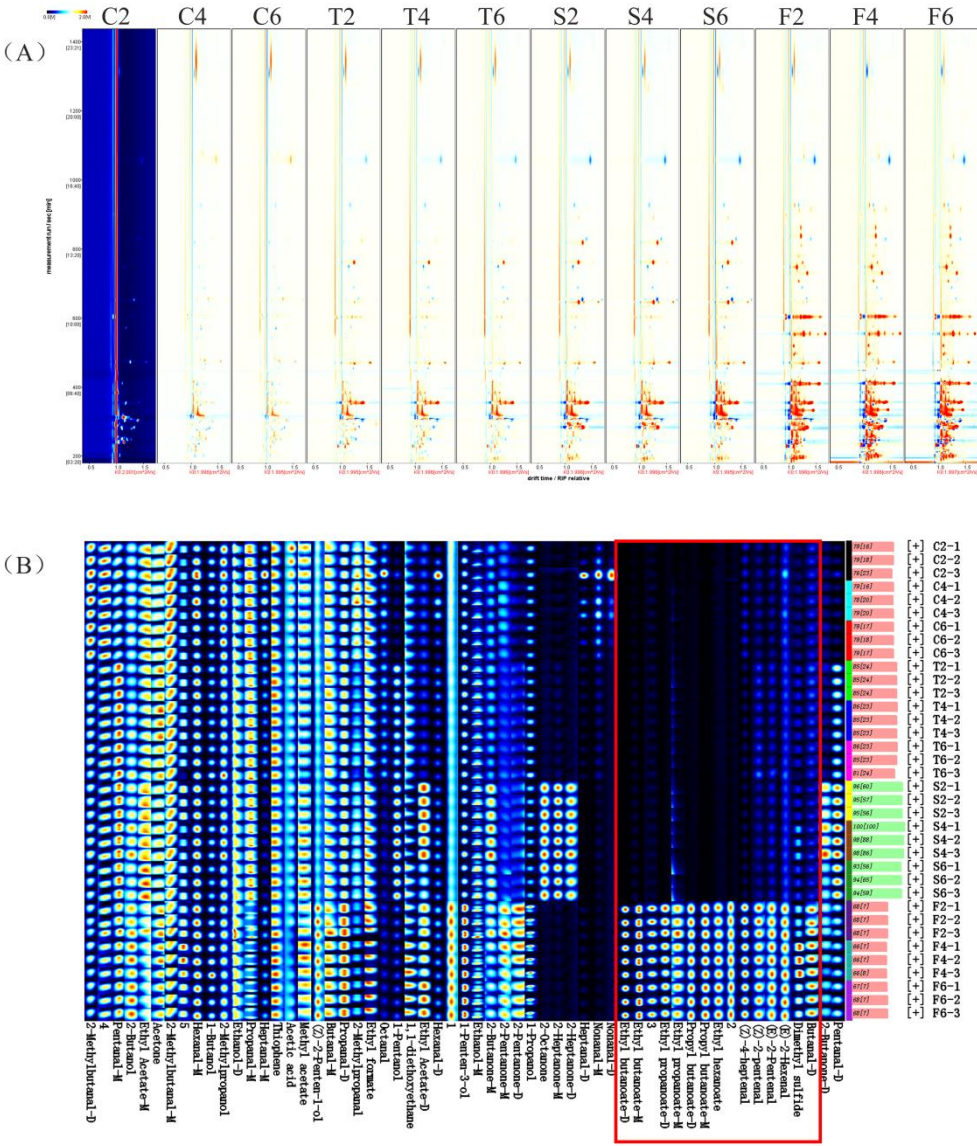


图 6 不同功能性油脂与斩拌时间的鱼糜样品 GC-IMS 二维差异谱图 (A) 和指纹图谱 (B)

Fig.6 GC-IMS 2D difference Spectra (A) and fingerprints (B) of surimi samples under different functional oils and chopping time

2.7 相关性分析

为进一步揭示不同制备条件对鱼糜凝胶各指标之间的关系，采用 Pearson 双尾检验对 17 组指标进行相关性分析，颜色深浅表示其相关性程度。如图 7 所示，17 组指标间存在不同程度的相关性。其中，鱼糜凝胶白度与硬度、咀嚼性、胶着性呈正相关，表明随斩拌时间的变化和油脂的加入，在蛋白质的作用下，鱼糜凝胶的白度和质构特性发生改变。P₂₁ 峰比例与硬度、咀嚼性、胶着性、氢键呈正相关，表明鱼糜凝胶内部网络结构中蛋白质与水发生相互作用，氢键增加，进而调节结合水含量，增强了鱼糜凝胶的质构特性。 β -折叠与硬度、咀嚼性、胶着性、氢键、持水性和 P₂₁ 峰比例呈正相关，但与 α -螺旋呈负相关，说明不同功能性油脂与斩拌时间改变了鱼糜凝胶蛋白质的二级结构，促使 α -螺旋向 β -折叠转变，导致分子内氢键含量增加，促进鱼糜凝胶蛋白及水分子与活性基团的相互作用，最终改善鱼糜凝胶的质构特性与持水性。二硫键与质构特性、持水性呈正相关，说明斩拌及油脂处理影响了蛋白质的空间构象，促使蛋白间相互作用力上升，从而改变鱼糜凝胶的质构特性和持水性。在鱼糜斩拌过程中，机械效应的产生会促使肌原纤维蛋白溶出，但过度的机械处理及由此产生的热效应会导致肌原纤维蛋白结构的破坏和变性^[31]。鱼糜凝胶形成阶段，蛋白质结构变化在鱼糜制品品质方面起关键作用，其变化直接影响鱼糜的特性，而功能性油脂的添加又会对蛋白质结构产生其它复杂影响。

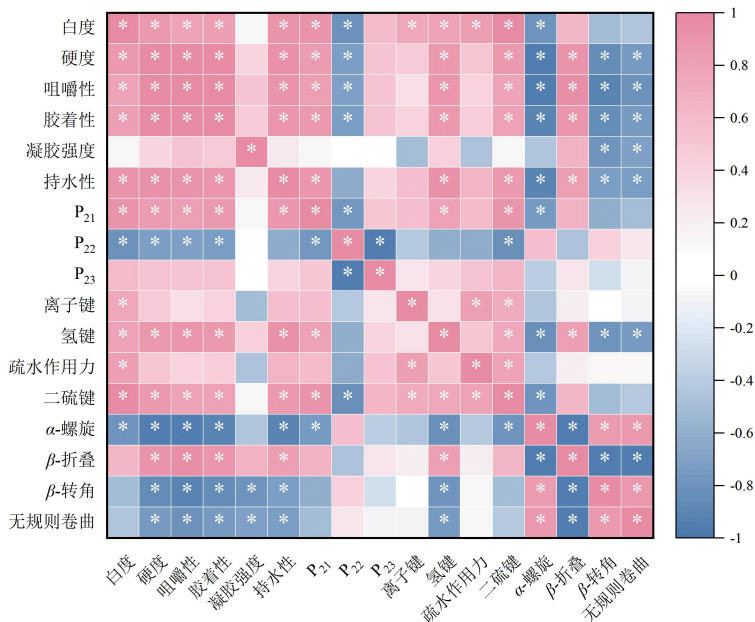


图 7 不同功能性油脂与斩拌时间的鱼糜凝胶各指标间相关性分析
Fig.7 Correlation analysis of each index of surimi gel under different functional oils andchopping time
注：*表示 $P\leq0.05$ 。

3 结论

本研究着重研究了油脂-鱼糜凝胶在不同制备条件下理化性质及风味特征的变化。当斩拌时间为 4 min 时，各组鱼糜凝胶具有最高的白度、硬度、咀嚼性、胶着性、持水性以及凝胶强度，但斩拌时间对于鱼糜凝胶蛋白质二级结构及风味特征影响不显著 ($P>0.05$)。三种油脂对鱼糜凝胶各项指标的改善效果各异，山茶油和大豆油的添加较好的提高了鱼糜凝胶强度、质构特性、持水性、蛋白二级结构 β -折叠含量及三级结构氢键含量，鱼油添加对凝胶白度增加的效果最好，且鱼油凭借其源自深海动物油脂的特有鱼香味赋予了凝胶较为独特的风味。与对照组相比，功能性油脂组的白度、持水性、质构特性、P₂₁ 峰比例、氢键和二硫键含量均显著提高 ($P<0.05$)，挥发性风味物质增加。综上，功能性油脂的添加及适当的斩拌时间能够改善凝胶理化特性，增加凝胶风味，该研究结果可为功能性油脂的应用及冷冻鱼糜制品的开发提供理论支撑，在后期工作中应对乳化鱼糜凝胶中油脂氧化性等的影响进行深入研究。

参考文献

- [1] HOU Y, XIA S, MA C, et al. Effects of the soy protein to wheat gluten ratio on the physicochemical and structural properties of Alaska pollock surimi-based meat analogs by high moisture extrusion [J]. Food Research International, 2023, 173(Pt 2): 113469.
- [2] 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.
- [3] 朱士臣, 任晓露, 魏传双, 等. 斩拌处理对鱼糜肌原纤维蛋白结构特性的影响及效应分析[J]. 核农学报, 2023, 37(11): 2206-2213.
- [4] 姚志琴. 鱼滑类预凝胶鱼糜制品的制备研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
- [5] 张晓栋, 江虹锐, 刘小玲. 影响罗非鱼鱼糜凝胶性的工艺条件研究[J]. 食品科技, 2016, 41(8): 114-120.
- [6] 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 Science and Technology, 2017, 84: 562-571.
- [7] 蒲凤琳, 孙伟峰, 车振明. 功能性油脂研究与开发进展[J]. 粮食与油脂, 2016, 29(8): 5-8.
- [8] 周春红, 王雪娇, 段筱筠, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法分析不同种类功能性油脂中挥发性成分[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(7): 178-188.
- [9] 高霞, 冯庆祥, 胡杨, 等. 高强度超声与低氯化钠盐协同作用下鲢鱼糜凝胶的品质变化[J]. 现代食品科技, 2023, 39(11): 197-204.
- [10] ZHANG S, RAMASWAMY H S, HU L, et al. Effect of pressure-shift freezing treatment on gelling and structural properties of grass carp surimi [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2023, 88: 103456.
- [11] NIU F, YU J, FAN J, et al. The role of glycerol on the thermal gelation of myofibrillar protein from giant squid (*Dosidicus gigas*) mince [J]. Food Chemistry, 2022, 371: 131149.
- [12] LI M, YANG J, BAO H, et al. The effect of heating method on the gel structures and properties of surimi prepared from Bombay duck (*Harpodon nehereus*) [J]. Frontier in Nutrition, 2022, 9: 1060188.
- [13] DING J, ZHAO X, LI X, et al. Effects of different recovered sarcoplasmic proteins on the gel performance, water distribution and network structure of silver carp surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107835.
- [14] CHEN J, ZHANG X, XUE S, et al. Effects of ultrasound frequency mode on myofibrillar protein structure and emulsifying properties [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 1768-1779.
- [15] 高菲菲, 汪张贵, 彭增起, 等. 剪切时间对肉糜中微粒分散特性的影响[J]. 食品科学, 2012, 33(5): 74-77.
- [16] LIU X, JI L, ZHANG T, et al. Effects of pre-emulsification by three food-grade emulsifiers on the properties of emulsified surimi sausage [J]. Journal of Food Engineering, 2019, 247: 30-37.
- [17] SHARMA S, CHAKKARAVARTHI S, BHATTACHARYA B. Enhancement of oxidative stability of soybean oil via nano-emulsification of eggplant peel extract: Process development and application [J]. Food Chemistry, 2023, 402: 134249.
- [18] 邓秀蝶, 杨媚, 廖嫦雯, 等. 斩拌对鱼糜凝胶特性影响的研究进展[J]. 食品安全导刊, 2022, 29: 147-149.
- [19] PIETROWSKI B N, TAHERGORABI R, MATAK K E, et al. Chemical properties of surimi seafood nutrified with omega-3 rich oils [J]. Food Chemistry, 2011, 129(3): 912-919.
- [20] 陈雅平, 黄秀娟, 陈日春, 等. 斩拌条件对高品质鱼糜制品凝胶强度的影响[J]. 农产品加工, 2016, 20: 22-24.
- [21] 李玉娥, 王晓闻, 梁亚萍, 等. 大豆分离蛋白凝胶的制备[J]. 粮食与油脂, 2019, 32(4): 48-50.
- [22] 罗小迎, 孙晓欢, 戈春东, 等. 斩拌时间和凝胶化时间对微波熟制鱼饼品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(10): 22-28.
- [23] ZHENG J, SUN D, LI X, et al. The effect of fatty acid chain length and saturation on the emulsification properties of pork myofibrillar proteins [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 139: 110242.
- [24] 李儒仁, 杨鹏, 荣良燕, 等. Chaotropic 离子对肌球蛋白乳化特性影响的研究进展[J]. 肉类研究, 2018, 32(9): 47-54.
- [25] 张伊依. 体系条件及超声波处理对大豆油预乳化效果的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2020.
- [26] LUO H, GUO C, LIN L, et al. Combined use of Rheology, LF-NMR, and MRI for characterizing the gel properties of hairtail surimi with potato starch [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(4): 637-647.
- [27] 王悦松, 刘香玲, 李学鹏, 等. 白藜芦醇对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 42-49.
- [28] 赵洪雷, 聂凯, 徐永霞, 等. 甘油二酯油对白鲢鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(13): 232-238.
- [29] ZHANG X, XIE W, LIANG Q, et al. High inner phase emulsion of fish oil stabilized with rutin-grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) myofibrillar protein: Application as a fat substitute in surimi gel [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109115.
- [30] KONG Y, SUN L, WU Z, et al. Effects of ultrasonic treatment on the structural, functional properties and beany flavor of soy protein isolate: Comparison with traditional thermal treatment [J]. Ultrason Sonochem, 2023, 101: 106675.

- [31] 周佳滢,胡之恒,黄佳茵,等.基于蛋白质结构和理化性质的鱼糜蛋白-油脂相互作用[J].食品科学,2023,44(8):55-61.
- [32] 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 Hydrocolloids, 2019, 90(May): 433-442.
- [33] 吕欣然,王彦博,王小咪,等.人工接种单一/复合乳酸菌对发酵鲮鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].中国食品学报,2024.
- [34] GAO X, XIE Y, YIN T, et al. Effect of high intensity ultrasound on gelation properties of silver carp surimi with different salt contents [J]. Ultrason Sonochem, 2021, 70: 105326.
- [35] 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.
- [36] 彭新颜,黄磊,崔云,等.蓝点马鲛鱼皮抗氧化肽段对 H₂O₂ 诱导 Caco-2 细胞氧化损伤的保护作用[J].水产学报,2017,41(3):456-464.
- [37] 周明珠,熊光权,乔宇,等.不同干燥方式下鲷鱼片的干燥特性及风味变化[J].现代食品科技,2021,37(4):242-251.
- [38] DUAN Z, DONG S, DONG Y, et al. Geographical origin identification of two salmonid species via flavor compound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue [J]. Food Research International, 2021, 145: 110385.