

不同蛋白粉对南极磷虾混合虾糜凝胶特性的影响

刘莹, 姜鹏飞, 傅宝尚, 王月月, 于波, 董秀萍, 祁立波, 尚珊

Effects of Different Protein Powders on Gelation Properties of Mixed Shrimp Mince of Antarctic Krill

LIU Ying, JIANG Pengfei, FU Baoshang, WANG Yueyue, YU Bo, DONG Xiuping, QI Libo, and SHANG Shan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022030258>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Effect of Surimi Ratio and External Additives on the Gel Properties of Composite Antarctic krill Surimi

食品工业科技. 2018, 39(17): 16–21,32

南极磷虾虾糜热加工过程中的风味变化

Flavor Changes of Antarctic Krill Shrimp Surimi during Thermal Processing

食品工业科技. 2018, 39(20): 35–40

山药凝胶体系的3D打印特性

3D Printing Characteristics of Yam Gel

食品工业科技. 2021, 42(23): 1–7

破碎方式对南极磷虾干燥特性和虾粉品质影响

Effect of Crushing Method on Drying Characteristics and Shrimp Powder Quality of Antarctic Krill

食品工业科技. 2019, 40(10): 37–42

酶解制备猪小肠粘膜蛋白粉工艺条件优化

Preparation technology optimization of porcine intestinal mucosa protein powder by enzymatic hydrolysis

食品工业科技. 2018, 39(7): 192–196,231

喷雾干燥法制备双孢菇蛋白粉工艺优化及其营养价值评价

Preparation of *Agaricus bisporus* protein powder by spray drying and evaluation of the nutritional value

食品工业科技. 2018, 39(10): 90–94,104



关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘莹, 姜鹏飞, 傅宝尚, 等. 不同蛋白粉对南极磷虾混合虾糜凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(1): 87–95. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030258

LIU Ying, JIANG Pengfei, FU Baoshang, et al. Effects of Different Protein Powders on Gelation Properties of Mixed Shrimp Mince of Antarctic Krill[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(1): 87–95. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030258

· 研究与探讨 ·

不同蛋白粉对南极磷虾混合虾糜凝胶特性的影响

刘 莹¹, 姜鹏飞¹, 傅宝尚¹, 王月月¹, 于 波², 董秀萍¹, 祁立波¹, 尚 珊^{1,*}

(1. 大连工业大学食品学院国家海洋食品工程技术研究中心, 辽宁大连 116034;

2. 辽渔集团有限责任公司, 辽宁大连 116000)

摘要:为了提高南极磷虾混合虾糜的凝胶特性, 研究大豆分离蛋白粉、分离乳清蛋白粉和蛋清粉对虾糜 3D 打印特性、凝胶强度、质构特性、持水力、流变学特性、感官特性、热力学特性、蛋白质二级结构含量和微观组织结构的影响。结果表明, 三种蛋白粉均能提高混合虾糜的 3D 打印特性, 凝胶强度, 弹性模量 (G') 和黏性模量 (G'')。添加分离乳清蛋白粉虾糜的凝胶强度最高, 相比对照组提高了 100.15%; 添加大豆分离蛋白粉虾糜凝胶的持水力最高, 相比对照组提高了 20%。差示扫描量热分析 (DSC) 结果表明蛋白粉的添加可以有效提高混合虾糜凝胶的变性温度和焓值, 增强蛋白质的稳定性。扫描电镜结果表明添加蛋白粉虾糜的凝胶网络更加致密, 其中添加分离乳清蛋白粉虾糜凝胶的孔洞分布更加均匀。结合感官评定, 蛋清粉能够提高南极磷虾混合虾糜的凝胶特性和整体接受度, 研究结果可为提升南极磷虾糜及其制品的品质提供理论依据。

关键词:蛋白粉, 南极磷虾虾糜, 3D 打印, 凝胶强度, 差示扫描量热分析 (DSC)

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)01-0087-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022030258

本文网刊:



Effects of Different Protein Powders on Gelation Properties of Mixed Shrimp Mince of Antarctic Krill

LIU Ying¹, JIANG Pengfei¹, FU Baoshang¹, WANG Yueyue¹, YU Bo²,
DONG Xiuping¹, QI Libo¹, SHANG Shan^{1,*}

(1. National Engineering Research Center of Seafood, School of Food Science and Technology,

Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China;

2. Liao Yu Group Co., Ltd., Dalian 116000, China)

Abstract: The effects of soybean protein isolate powder, whey protein isolate powder, and egg white powder on 3D printing properties, gel strength, texture properties, water holding capacity, rheological properties, sensory properties, DSC, protein secondary structure content, and microstructures of mixed shrimp mince were investigated in order to improve the gel properties of Antarctic krill mixed shrimp mince. According to the findings, the three kinds of protein powder could improve the 3D printing capabilities, gel strength, elastic and viscosity modulus of mixed shrimp mince. Compared to the control group, the gel strength of shrimp mince with whey protein isolated powder was the highest, increasing by 100.15%, while the water holding capacity of shrimp mince with soy protein isolate powder was the highest, increasing by 20%. DSC results indicated that protein powder could elevate the denaturation temperature and enthalpy, thus enhancing protein stability of mixed shrimp mince enhance the protein stability. According to scanning electron microscopy (SEM) findings, the gel network of shrimp mince with protein powder was more compact and mince added with whey protein isolate showed more consistent porosity. Combined with sensory evaluation, egg white powder could improve the gel properties of

收稿日期: 2022-03-22

基金项目: 辽宁省农业重大专项 (2020JH1/10200002)。

作者简介: 刘莹 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产加工, E-mail: 1372581412@qq.com。

* 通信作者: 尚珊 (1988-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 农 (水) 产品精深加工, E-mail: shangshan@dlpu.edu.cn。

mixed shrimp surimi, providing a theoretical foundation for improving the quality of Antarctic krill surimi and its products.

Key words: protein powder; Antarctic krill shrimp mince; 3D printing; gel strength; DSC

南极磷虾(Antarctic krill, AK)是一种形似虾的海洋甲壳类动物,属于磷虾科(Euphausiidae),是南极海洋的重要物种^[1]。南极磷虾含有丰富的必需氨基酸、不饱和脂肪酸、甲壳素和虾青素等生物活性成分^[2]。目前,关于南极磷虾的研究主要集中在虾油和蛋白质的提取方面,但关于南极磷虾虾肉的加工特性和产品开发的研究较少^[3]。由于南极磷虾内源性蛋白酶活性较高,蛋白质极易发生自溶,导致凝胶效果差、质地粗糙以及持水能力低等现象^[2]。南极磷虾蛋白较差的凝胶特性限制了其糜类制品的研究和应用。因此,在保持南极磷虾肌肉食用价值的同时提高其加工特性是一个亟需解决的问题。南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*, LV)是西半球的主要虾种^[4]。易靓等^[5]研究发现与其他虾相比,南美白对虾其盐溶性蛋白含量高,凝胶强度高,虾糜凝胶口感好,微观结构更致密稳定,适合制备虾糜制品。糜类制品的品质与其凝胶特性显著相关,通常糜类制品的凝胶特性越高,产品品质越好。

糜类制品中的常用的外源添加物包括蛋白质类、淀粉类、亲水胶体、明胶、TG 酶和复合磷酸盐等^[6-7]。在虾糜中添加蛋白粉可以改善虾糜制品品质,增强口感和凝胶强度,减少凝胶劣化现象^[8]。目前常见的蛋白质类添加物主要包括大豆分离蛋白粉、乳清蛋白粉和蛋清粉等非肌蛋白^[9]。大量研究表明^[10-14]添加大豆分离蛋白和蛋清粉能够提高鱼糜产品的凝胶强度,增强保水性;添加乳清蛋白粉可以增强鱼糜的弹性,改善鱼糜制品的质构特性。蛋白粉对糜类制品的提高主要是因为非肌蛋白含有亲水基团,在糜类制品擂溃过程中会吸水膨胀进而提高凝胶强度;非肌蛋白可以直接与肌原纤维蛋白作用,填充在凝胶网络中增强鱼糜质地^[8]。此外,大豆分离蛋白、蛋清蛋白和乳清蛋白还可以作为酶抑制剂,抑制凝胶劣化,提高凝胶品质^[11, 15]。以鱼类为原料生产的鱼糜制品早已成功商业化,目前关于蛋白粉的应用主要集中在提高鱼糜制品的凝胶特性方面,而蛋白粉在虾糜制品中的研究却非常有限。

因此,本研究探讨添加大豆分离蛋白粉、分离乳清蛋白粉和蛋清粉对未漂洗南极磷虾混合虾糜凝胶的 3D 打印特性、凝胶强度、全质构特性、持水力、流变学性质、DSC、蛋白质二级结构及微观组织结构的影响,从而为提高南极磷虾混合虾糜凝胶特性和产业化生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

南极磷虾、南美白对虾 辽渔集团提供,冷冻的南极磷虾和南美白对虾由工厂直接运往实验室(路程小于 1 h),在-18 ℃ 条件下储存备用;食盐 大连市山姆

会员店;大豆分离蛋白粉、蛋清粉 江苏鑫瑞生物科技有限公司;分离乳清蛋白粉 天津银河伟业进出口有限公司;溴化钾 国药集团;戊二醛固定液(2.5%)

雷根生物;无水乙醇 天津科密欧试剂有限公司。

SD-JR53 绞肉器 佛山市三的电器制造有限公司;FPE-2 3D 打印机 上海富奇凡科技有限公司;DHS-20A 快速水分测定仪 上海舍岩仪器有限公司;TA.XT.plus 质构仪 英国 SMS 公司;CP100NX 高速冷冻离心机 株式会社日立制作所;TA-DSC250 差示扫描量热仪、DHR-2 流变仪 上海 TA 仪器有限责任公司;Frontier 傅里叶变换红外光谱仪 日本铂金埃尔默仪器有限公司;JSM-7800F 热场发射扫描电镜 日本电子株式会社;LC-1.0 冷冻干燥机 沈阳航空信阳速冻厂。

1.2 实验方法

1.2.1 混合虾糜及凝胶制备

1.2.1.1 混合虾糜制备 冷冻的南美白对虾、南极磷虾于 4 ℃ 条件下解冻。按照南极磷虾:南美白对虾=1:1 的比例称重,添加食盐(质量分数 1.5%),用绞肉机斩拌 10 min, 分别加入 2%(以虾糜总重计)的大豆分离蛋白粉、分离乳清蛋白粉和蛋清粉,继续斩拌 3 min, 通过水分测定仪测定虾糜最终水分含量至 80%,以不添加蛋白粉的虾糜样品作为对照。控制整个流程温度低于 4 ℃。混合虾糜过 40 目筛,立即用于 3D 打印。

1.2.1.2 混合虾糜凝胶制备 取 1.2.1.1 制备好的混合虾糜灌入柱状 PC 管(长×宽×高=25 mm×25 mm×30 mm),保鲜膜包裹,参考杨姣等^[16]的方法采用二段式加热的方法,于水浴锅中加热(40 ℃ 加热 60 min; 90 ℃ 加热 30 min),加热完成后置于冰水冷却 20 min,擦干表面水分,4 ℃ 冰箱过夜储藏。

1.2.2 3D 打印及性能评价 参考 Pan 等^[17]的方法并加以改进,将添加不同蛋白粉的混合虾糜导入到 3D 打印机的进料筒中,选择打印图形(圆柱, 直径 25 mm, 高 20 mm),设置喷嘴直径为 1 mm, 打印速度为 15 mm/s, 平台移动速度为 20 mm/s, 打印温度为 25 ℃。打印完成后立刻在拍照箱中拍照,打印成品于水浴锅(40 ℃ 加热 60 min; 90 ℃ 加热 30 min)熟化。通过打印外观和成型效果评价虾糜的 3D 打印性能。

1.2.3 凝胶强度测定 参考 Mi^[11]的方法并加以改进,将室温(25 ℃)平衡 30 min 后的虾糜凝胶切成圆柱体(直径 25 mm, 高 30 mm),用 TA.XT.plus 质构仪的 P/5S 球形金属探头测定其凝胶强度。测试前后速度 1 mm/s, 测试速度 1 mm/s, 时间 30 s, 穿刺比 50%,触发力 5 g,记录破裂力(g)和破裂距离(mm)。

$$\text{凝胶强度}(\text{g} \cdot \text{mm}) = \text{破裂力}(\text{g}) \times \text{破裂距离}(\text{mm})$$

1.2.4 全质构测定 参考潘禹希等^[18]的方法, 样品前处理同 1.2.3。用 TA.XT.plus 质构仪的 P50 探头测定其质构特性。测试前后速度 2 mm/s, 测试速度 1 mm/s, 连续两次下压, 形变量 50%, 触发力 5 g。

1.2.5 持水力测定 参考 Ding 等^[19]的方法并加以改进, 将虾糜凝胶切成重 2 g 左右的段, 每段精确称重 $w_0(g)$, 用 3 层滤纸包裹放入 50 mL 离心管中, 4 ℃ 条件下, 4000 r/min 离心 20 min。离心后迅速取出样品, 用滤纸吸干表面水分, 立刻称重 $w_1(g)$ 。样品的持水力按下式计算。

$$\text{持水力}(\%) = \frac{w_1}{w_0} \times 100$$

1.2.6 感官评价 取 1.2.1.1 制备好的混合虾糜, 手工制成直径约 3 cm 的球状虾丸于沸水浴中煮制 3 min, 将成型后的虾丸冷却至室温。请接受过感官检验训练的 10 位评价员组成评价小组, 根据虾丸特点, 从弹性、口感、风味、色泽、可接受度五个方面进行感官评价。感官评价表见表 1, 取 10 人评分的平均值为最终评价结果^[20]。

1.2.7 流变学分析 采用 DHR-2 流变仪测定虾糜及凝胶的静态流变学性质。测试参数: 直径 40 mm 及 20 mm 平行板, 测试温度为 25 ℃, 应变为 0.5%, 两板间隙 1 mm。在 0.1~70 Hz 的频率范围内进行振荡扫描。测定频率扫描与样品弹性模量(G')和黏性模量(G'')之间的关系^[17]。

1.2.8 差示扫描量热分析 参考 Thorarinsdottir 等^[21]的方法, 采用差示扫描量热仪(DSC250)对不同蛋白粉的热力学参数进行测量。取 10 mg 左右样品立刻密封在铝坩埚中, 放入样品池, 以空样品盒为对照, 在 20~100 ℃ 范围内以每分钟 5 ℃/min 的升温速率进行扫描, 记录该升温范围内的吸热变性曲线。通过峰值点温度为变性温度 T_m (℃), 曲线与基线间的面积来确定总焓值 ΔH (J/g)。

1.2.9 傅里叶变换红外光谱分析 参考 Yang 等^[4]的方法, 将虾糜和热诱导凝胶在冷冻干燥机中冻干 72 h。将所得冻干粉与溴化钾按 1:100 的质量比混合, 用研钵研磨均匀。压片后, 利用傅里叶变换红外光谱仪在 4000~400 cm⁻¹ 范围内扫描其波数吸收光谱, 得到光谱。利用 OMNIC 软件分析该蛋白的光谱和二级结构变化。

1.2.10 微观结构分析 采用热场发射扫描电镜观察

添加不同蛋白粉虾糜凝胶的微观结构。样品切成 3 mm 厚, 密封在玻璃瓶子后加入 2.5% 的戊二醛溶液, 置于 4 ℃ 冰箱浸泡 48 h, 用去离子水清洗后用梯度浓度的乙醇脱水, 每次 15 min, 并浸泡在无水乙醇中。用冷冻干燥机冻干样品, 最后使用扫描电子显微镜分别放大 10000× 和 1000× 扫描微观结构^[22]。

1.3 数据处理

所有试验平行测定三次, 结果为均值±标准差。实验数据采用 IBM SPSS 统计软件进行方差和显著性分析, 显著性水平 $P<0.05$, 使用 Origin 2021 软件进行图表绘制。

2 结果与分析

2.1 混合虾糜 3D 打印特性分析

3D 打印的精度和稳定性是评估 3D 打印产品质量的重要指标。用于 3D 打印的原料应均匀且具有适当的流动性能, 容易挤出并可以在打印后支持其自身结构, 保持稳定性, 虾糜是一种粘稠的食品凝胶体系, 可作为开发各种 3D 打印食品的理想材料, 3D 打印能力与其糜类制品凝胶性能密切相关, 糜类制品的流动性、弹性模量和黏性模量对挤出型 3D 打印具有显著影响^[23]。不同蛋白粉对混合虾糜 3D 打印特性的影响如图 1 所示。对照组样品(未添加蛋白粉)打印后, 层与层之间空隙较大, 俯视面凹凸不平且呈现塌陷现象; 而添加三种蛋白粉的虾糜打印后, 柱体支撑性增强, 表面变得光滑平整, 断裂减少, 与设计的柱体形状基本一致, 但添加三种蛋白粉虾糜凝胶之间的打印性状无明显差异, 在打印后均具有较强的稳定性。

对照组较差的打印特性可能是由于南极磷虾中含有大量肌浆蛋白, 肌浆蛋白可能与肌动球蛋白结合形成沉淀, 阻碍虾糜凝胶的形成, 此外南极磷虾含有高度活化的酶系统(羧肽酶 A、羧肽酶 B 及类胰蛋白酶等), 在打印过程中随着温度的升高, 内源性蛋白酶活力增强, 导致混合虾糜中的蛋白质被降解^[24~27], 进而导致虾糜在 3D 打印过程中出现塌陷现象。Pan 等^[17]发现用纯虾糜进行 3D 打印时, 打印出来的产品容易坍塌, 这可能是由于虾肉的水分含量较高, 导致粘弹性和支撑性较差。三种蛋白粉均具有亲水性且具有自身凝胶能力, 在擂溃过程中会吸水溶胀填充在虾糜凝胶网络中, 增强混合虾糜的粘弹性, 改善混合虾糜打印过程的支撑性和稳定性^[9]。此外大豆分离蛋白粉含有胰蛋白酶抑制剂, 可能会降低南极磷虾

表 1 混合虾糜凝胶感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria of mixed shrimp mince gel

分数(分)	弹性	口感	风味	色泽	可接受度
8~10	弹性好, 虾滑成型规则, 按压无散开, 可恢复原状, 表面光滑, 有光泽, 无大气孔	口感鲜嫩, 软硬适中, 有嚼劲	磷虾味浓郁, 无蛋白粉腥味	颜色饱满, 粉嫩, 均匀无杂色	整体感觉好, 易于接受
4~7	弹性一般, 虾滑成型, 按压无散开, 松手恢复原状稍慢, 表面略粗糙, 存在个别大气孔	口感鲜嫩, 肉质偏软, 有嚼劲	磷虾味适中, 有明显蛋白粉腥味	颜色较粉, 且均匀	整体感觉较好, 能接受
1~3	无弹性, 虾滑基本成型, 内部松散, 按压立即散开	口感鲜嫩, 肉质软烂, 无嚼劲	无磷虾味, 蛋白粉腥味严重	颜色偏白, 且不均匀, 有杂色	整体感觉一般, 不易接受

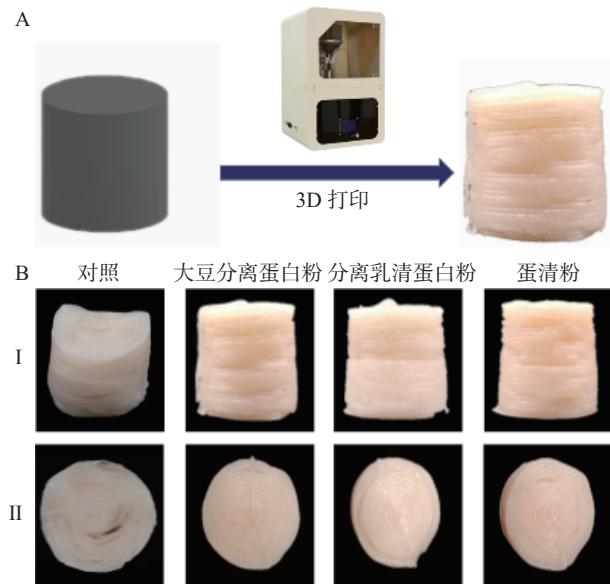


图1 不同蛋白粉对混合虾糜3D打印特性的影响

Fig.1 Effects of different protein powders on the 3D printing properties of mixed shrimp mince gel

注: (A)预设模型及模型打印后的照片; (B)不同蛋白粉混合虾糜3D打印效果; I代表正视图; II代表俯视图。

的胰蛋白酶活性,维持凝胶网络结构^[15, 28],蛋清粉含有卵蛋白酶抑制剂,可以延缓凝胶劣化,提高凝胶特性。综上,三种蛋白粉的添加均能有效改善虾糜的3D打印特性。

2.2 混合虾糜凝胶强度分析

凝胶强度是反映糜类产品凝胶效果的重要指标,通常凝胶强度越高,糜类制品的品质越好^[29]。不同蛋白粉对混合虾糜凝胶强度的影响,如图2所示。

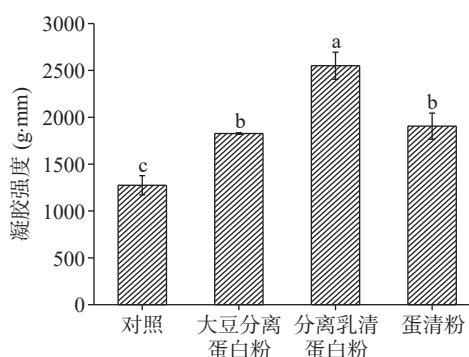


图2 不同蛋白粉对混合虾糜凝胶强度的影响

Fig.2 Effects of different protein powder on gel strength of mixed shrimp mince gel

注: 不同字母表示差异显著($P<0.05$); 图3同。

与对照组($1274.49\pm102.50\text{ g}\cdot\text{mm}$)相比,添加蛋白粉均能显著提高混合虾糜的凝胶强度($P<0.05$),其中分离乳清蛋白粉优于蛋清粉和大豆分离蛋白粉,添加分离乳清蛋白粉的虾糜凝胶强度最高($2550.00\pm144.50\text{ g}\cdot\text{mm}$),显著提高了 $100.15\% (P<0.05)$,添加蛋清粉和大豆分离蛋白粉的虾糜凝胶之间无显著性差异($P>0.05$)但均高于对照组,分别为 1905.60 ± 44.74 和 $1826.51\pm8.56\text{ g}\cdot\text{mm}$ 。三种蛋白粉均能与肌原纤维蛋白在热诱导中相互作用填充在凝胶基质网络中,进而增强混合虾糜的凝胶强度^[30-31]。有研究指出分离乳清蛋白具有良好的凝胶性,加热变性聚集后形成稳定的三维网络结构,使得凝胶强度增强^[12]。田利利等^[32]研究发现添加大豆分离蛋白粉和蛋清粉能显著增强南极磷虾-鳕鱼复合虾糜凝胶的凝胶强度,但两种蛋白粉之间无显著差异,这与本文的研究结果一致。

2.3 混合虾糜凝胶全质构特性分析

质构特性被认为是检验糜类制品的重要指标^[5]。表2显示了不同蛋白粉对虾糜凝胶质构特性的影响。与对照组相比,添加蛋白粉后能显著提高虾糜的硬度和咀嚼度($P<0.05$),其中大豆分离蛋白粉>分离乳清蛋白粉>蛋清粉,硬度分别提高了45%、38%、17%,咀嚼度分别提高了68%、60%、18%,这可能与氢键在凝胶冷却后又重新形成且大豆分离蛋白粉吸水性较强,在热诱导过程中吸收水分,填充在肌肉蛋白质的空隙,导致蛋白质基质密度增加有关^[11],进而增大凝胶的硬度和咀嚼度。在弹性方面均能提高混合虾糜凝胶的弹性,其中添加分离乳清蛋白粉的虾糜凝胶与对照组具有显著差异性($P<0.05$),这与凝胶强度结果一致;添加蛋清粉和大豆分离蛋白粉的虾糜凝胶弹性差异不显著($P>0.05$),指出分离乳清蛋白粉依靠自身凝胶性,在热诱导与肌原纤维蛋白相互作用形成复合凝胶体促使样品弹性增加^[12]。蛋清粉与大豆分离蛋白粉的回复性均高于分离乳清蛋白粉;三个处理组粘聚性均无显著差异($P>0.05$),这可能与蛋白粉本身具有良好的粘弹性有关^[33]。因此,在混合虾糜中添加蛋白粉能改善热诱导凝胶的质构特性,提高制品的硬度、弹性和咀嚼度。

2.4 混合虾糜凝胶持水力分析

持水力是反映糜类制品多汁性和口感的重要指标,凝胶网络结构越紧密,持水力越高,糜类制品口感越好^[32]。对照组混合虾糜持水力较差($50.53\%\pm0.57\%$),

表2 不同蛋白粉对混合虾糜凝胶质构特性的影响

Table 2 Effects of different protein powder on texture properties of mixed shrimp mince gel

蛋白粉	硬度(g)	弹性	粘聚性	咀嚼度	回复性
对照	1119.16 ± 8.37^d	0.62 ± 0.01^b	0.29 ± 0.01^b	218.75 ± 5.87^c	0.10 ± 0.00^e
大豆分离蛋白粉	1630.59 ± 2.49^a	0.65 ± 0.01^{ab}	0.32 ± 0.00^a	368.81 ± 3.22^a	0.12 ± 0.00^a
分离乳清蛋白粉	1548.04 ± 20.51^b	0.68 ± 0.01^a	0.31 ± 0.00^a	350.24 ± 8.63^a	0.11 ± 0.00^{bc}
蛋清粉	1311.99 ± 33.82^c	0.66 ± 0.01^{ab}	0.30 ± 0.01^{ab}	259.67 ± 14.30^b	0.12 ± 0.01^{ab}

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),表3同。

这可能与混合虾糜凝胶强度较差(图 2),水分不能很好地保持在凝胶网络中有关^[11]。由图 3 可知,与对照组相比,三种蛋白粉均能显著提高混合虾糜凝胶持水力($P<0.05$),分别提高了 20%、16%、10%,其中,大豆分离蛋白粉和分离乳清蛋白粉之间无显著差异($P>0.05$),但优于蛋清粉,三种蛋白粉与虾糜蛋白相互作用形成共价键,从而导致持水力增加,且蛋白粉在熟化过程中受热变性,分子间发生聚集,形成紧密的三维网状结构,从而将水分包裹起来,提高样品持水力^[12]。这与王冬妮等^[14]的研究结果相似,其发现添加大豆分离蛋白粉能提高鱿鱼鱼糜持水能力。研究表明大豆分离蛋白中含有亲水基团,在加热过程中大豆分离蛋白与肌原纤维蛋白相互作用结合形成稳定的网络结构并锁住水分,从而提高虾糜凝胶的持水力^[10]。综上,三种蛋白粉均能提高混合虾糜凝胶的持水力,出现持水力的差异可能是由于蛋白粉结构的不同和自身吸水能力的不同所致,使其在与混合虾糜热诱导过程中热变性程度不同,从而导致内部形成的网络空间结构也不同^[34],与质构特性中硬度的变化(表 2)一致。

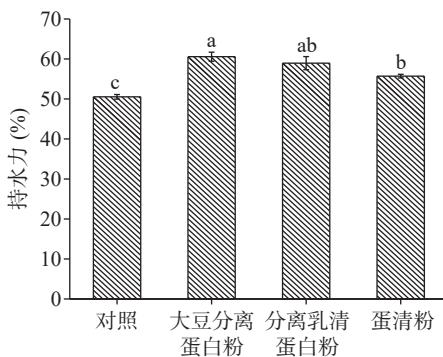


图 3 不同蛋白粉对混合虾糜凝胶持水力的影响

Fig.3 Effects of different protein powder on water holding capacity of mixed shrimp mince gel

2.5 混合虾糜凝胶感官评价

不同蛋白粉对煮制后的混合虾糜感官评价的影响如图 4 所示。相比未添加蛋白粉的对照组,添加蛋白粉对虾糜制品的弹性、口感、风味和整体接受度

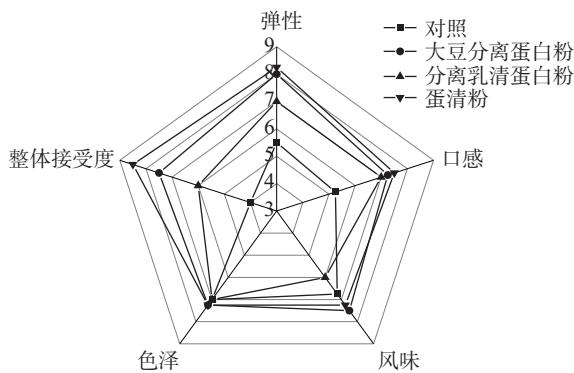


图 4 蛋白粉对混合虾糜凝胶感官评价的影响

Fig.4 Effects of protein powder on sensory evaluation of mixed shrimp mince gel

均存在显著性差异($P<0.05$),但对虾糜制品色泽的影响无显著性差异($P>0.05$)。弹性是评价糜类制品的重要指标,由图可知三种蛋白粉均能提高混合虾糜制品的弹性,这是因为三种蛋白粉均可填充在虾糜凝胶网络结构中从而提高虾糜的凝胶特性,其中蛋清粉>大豆分离蛋白粉>分离乳清蛋白粉。蛋白粉对虾糜制品弹性的影响与对虾糜制品口感的影响一致;相比对照组,添加蛋白粉的虾糜制品在口感上软硬适中,有嚼劲。三种蛋白粉对虾糜制品风味的影响也存在差异,添加大豆分离蛋白粉和蛋清粉的虾糜中磷虾风味浓郁,无蛋白粉腥味,整体风味较柔和,其中大豆分离蛋白粉>蛋清粉;而添加分离乳清蛋白粉的虾糜中存在明显的腥味,不利于虾糜制品的整体风味。在整体接受度方面,添加蛋清粉的虾糜制品的感官评分最高,其次为大豆分离蛋白粉和分离乳清蛋白粉($P<0.05$);综合考虑,添加蛋清粉可以有效改善混合虾糜制品的弹性、口感和风味,提高产品的整体接受程度。

2.6 混合虾糜和热诱导凝胶流变学分析

图 5 显示了混合虾糜和热诱导虾糜凝胶的弹性模量和黏性模量在添加不同蛋白粉后随频率变化的关系,由图可知,添加蛋白粉后虾糜的弹性模量和黏性模量有所增高,同时随频率的增大而增大;在线性范围内,虾糜和热诱导凝胶的弹性模量明显大于黏性模量,样品表现为良好的弹性。添加分离乳清蛋白粉的混合虾糜弹性和黏性模量最高,其次为添加大豆分离蛋白粉和蛋清粉的混合虾糜,这可能是因为蛋白粉结构和性质间的差异导致与虾糜凝胶网络结合紧密程度不同^[33]。混合虾糜经热诱导后,弹性模量和黏性模量均明显大于熟化前,这是因为肌原纤维蛋白具有高度活性的反应表面,虾糜在加热过程中,蛋白质分子展开暴露反应表面后,疏水相互作用、氢键及二硫键等作用使蛋白质之间聚集,进而形成有序的凝胶网络结构^[8]。三种蛋白粉对混合虾糜热诱导凝胶弹性模量和黏性模量影响不同,其中分离乳清蛋白粉>蛋清粉>大豆分离蛋白粉,这与凝胶强度结果一致,这可能是因为蛋清粉作为酶抑制剂,可有效抑制凝胶过程中的凝胶劣化现象,从而使样品更具有弹性^[15]。

2.7 差示扫描量热分析

图 6 及表 3 显示了不同蛋白粉对混合虾糜热变性温度的影响,对照组及添加蛋白粉的混合虾糜均出现了三个蛋白质变性峰,其中峰 1($T_{\text{Peak}}: 42\sim47^{\circ}\text{C}$),峰 2($T_{\text{Peak}}: 62\sim65^{\circ}\text{C}$),峰 3($T_{\text{Peak}}: 81\sim84^{\circ}\text{C}$)分别对应了肌球蛋白、肌浆蛋白和肌动蛋白的变性交联,肌球蛋白和肌动蛋白属于肌原纤维蛋白的主要成分,通常具有良好的凝胶特性^[21]。与对照相比,三种蛋白粉均能延缓混合虾糜的三种蛋白的变性峰值温度,并提高蛋白变性焓值,这表明虾糜凝胶的交联度增大^[35]。糜类制品的凝胶强度主要与肌球蛋白的变性温度相关,且焓值的增加表明变性蛋白质所需的热量就越高,其

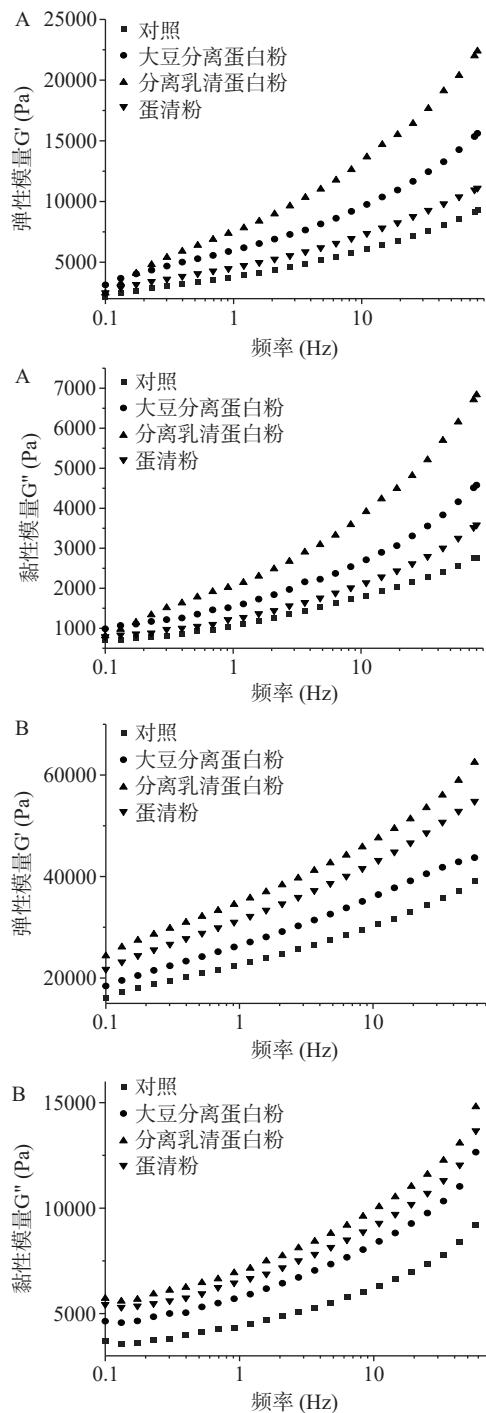


图5 蛋白粉对混合虾糜(A)和热诱导凝胶(B)流变学性质的影响

Fig.5 Effects of protein powder on rheological properties of mixed shrimp mince (A) and heat-induced gel (B)

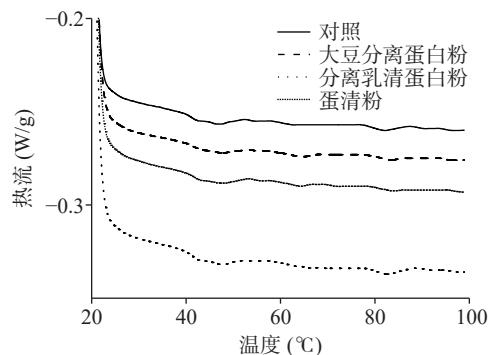


图6 添加不同蛋白粉的混合虾糜热相变温度曲线

Fig.6 Thermal phase transition temperature curve of mixed shrimp minced with different protein powders

稳定性提高^[36]。添加蛋白粉后混合虾糜中峰1的峰值温度及焓值明显提高,其中添加分离乳清蛋白的最高,这可能与分离乳清蛋白热诱导变性温度高且接近等电点易于聚集有关^[12],与凝胶强度结果一致(图2)。综上,添加蛋白粉能够延缓混合虾糜蛋白变性温度并提高混合虾糜的蛋白稳定性。

2.8 混合虾糜和热诱导凝胶蛋白质二级结构分析

添加蛋白粉后混合虾糜和热诱导凝胶蛋白质二级结构的变化如图7所示。研究表明,1700~1600 cm⁻¹区域广泛应用于蛋白质二级结构的变化,包括 β -折叠(1613~1637 cm⁻¹; 1682~1696 cm⁻¹)、 α -螺旋(1645~1662 cm⁻¹)、 β -转角(1662~1682 cm⁻¹)和无规则卷曲(1637~1645 cm⁻¹)^[37]。混合虾糜(图7A)和虾糜凝胶(图7B)的主要结构为 β -折叠和 β -转角,所有混合虾糜中的无规则卷曲、 α -螺旋和 β -折叠相对含量无明显变化,但虾糜在热诱导后,其 β -折叠相对含量相比生糜呈明显增加趋势, α -螺旋和 β -转角相对含量降低,但热诱导虾糜凝胶组间的蛋白质二级结构无明显差异。研究发现,热诱导促进了混合虾糜中蛋白质二级结构相对含量的变化, α -螺旋结构展开促进分子间的交联和聚集,在凝胶网络的形成中向更稳定的 β -折叠转化^[4]。结果表明,蛋白粉的加入对虾糜的二级结构的变化无明显影响, β -折叠在虾糜凝胶网络形成过程中起重要作用且热诱导凝胶中的蛋白质结构比生虾糜中的蛋白质结构更稳定。

2.9 混合虾糜凝胶微观结构分析

不同蛋白粉对混合虾糜凝胶微观组织结构的影

表3 不同蛋白粉对混合虾糜热相变温度的影响

Table 3 Effects of different protein powders on thermal phase transition temperature of mixed shrimp mince

蛋白粉	峰1		峰2		峰3	
	T _{Peak} (°C)	ΔH(J/g)	T _{Peak} (°C)	ΔH(J/g)	T _{Peak} (°C)	ΔH(J/g)
对照	42.85±0.07 ^b	0.42±0.01 ^b	63.26±0.05 ^b	0.09±0.01 ^a	81.76±0.05 ^d	0.10±0.02 ^b
大豆分离蛋白粉	46.68±0.24 ^a	0.46±0.02 ^a	64.23±0.01 ^a	0.14±0.01 ^a	83.16±0.06 ^b	0.11±0.03 ^b
分离乳清蛋白粉	46.73±0.19 ^a	0.49±0.01 ^a	64.03±0.08 ^a	0.12±0.03 ^a	82.60±0.21 ^c	0.16±0.02 ^a
蛋清粉	46.64±0.35 ^a	0.46±0.01 ^a	63.73±0.02 ^a	0.10±0.00 ^a	83.76±0.20 ^a	0.12±0.01 ^{ab}

注: T_{Peak}代表峰值温度, ΔH代表焓值。

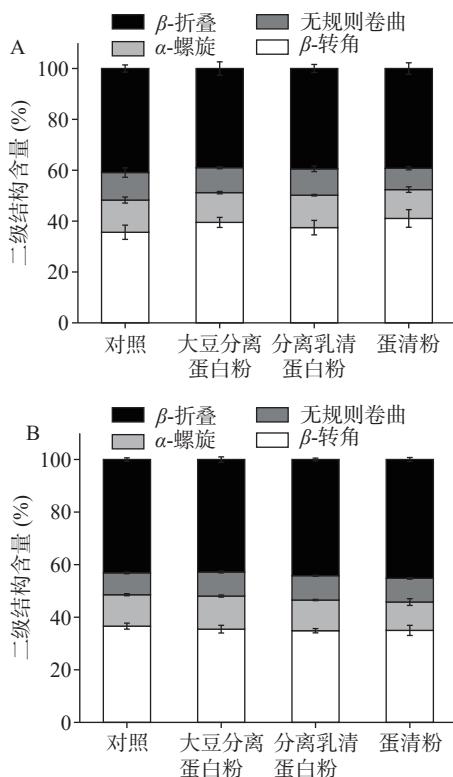


图 7 不同蛋白粉对混合虾糜(A)和热诱导凝胶(B)中蛋白质二级结构相对含量的影响

Fig.7 Effects of protein powder on relative content of protein secondary structure of mixed shrimp mince (A) and heat-induced gel (B)

如图 8 所示。由图可知, 添加蛋白粉对混合虾糜凝胶的微观结构有显著影响, 对照组虾糜的热诱导凝胶显示出多孔的微观组织结构和基质断裂现象, 这是因为在混合虾糜中, 南极磷虾糜的水溶性肌浆蛋白比例高, 而肌浆蛋白会影响肌球蛋白的聚集程度进而降低肌原纤维蛋白凝胶形成能力^[38]。与对照组相比, 三种蛋白粉均能使混合虾糜凝胶网络更加致密, 这可能是因为蛋白粉都含有蛋白酶抑制剂, 在一定程度上降低混合虾糜的酶活性, 致使凝胶孔隙更加致密, 此外三种蛋白粉均具有凝胶性, 促进虾糜凝胶形成更加稳定的网络结构^[28]。其中添加分离乳清蛋白粉的虾糜凝胶微观组织结构最为致密, 网络结构中空隙分布均匀平整; 优于添加蛋清粉和大豆分离蛋白粉的虾糜凝胶网络, 这与凝胶强度结果一致。

3 结论

本研究表明, 添加大豆分离蛋白粉、分离乳清蛋白粉和蛋清粉均能够有效改善混合虾糜的 3D 打印特性和流变学特性, 提高凝胶强度、质构特性、持水力及感官评价。在凝胶强度、弹性和流变学特性方面: 分离乳清蛋白粉>蛋清粉>大豆分离蛋白粉; 在持水力和硬度方面: 大豆分离蛋白粉>分离乳清蛋白粉>蛋清粉; 蛋白粉的加入能够延缓混合虾糜蛋白质变性温度并提高变性焓值, 增强混合虾糜蛋白质稳定性。SEM 结果表明蛋白粉有助于混合虾糜形成更加

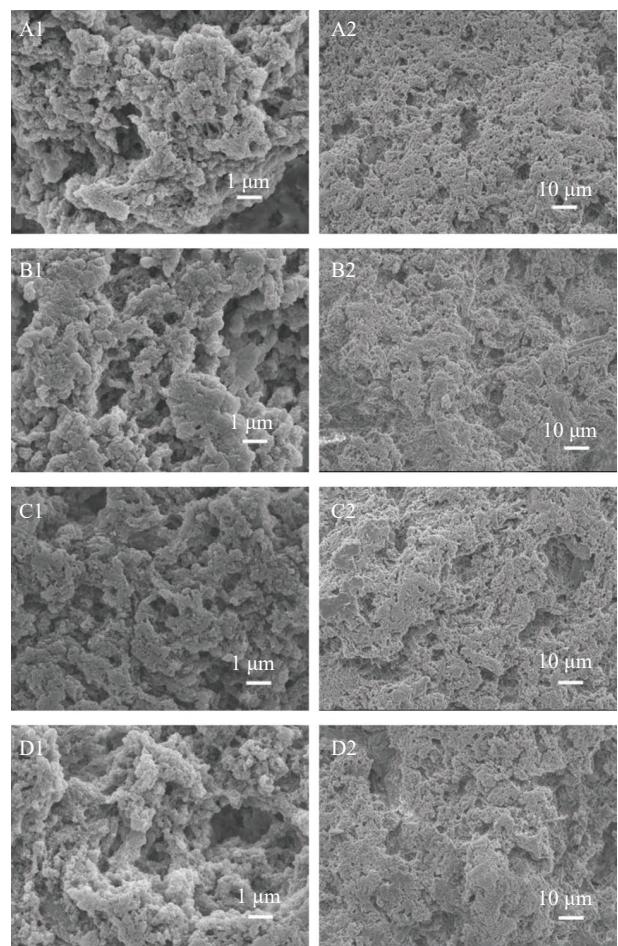


图 8 不同蛋白粉对混合虾糜凝胶微观结构影响

Fig.8 Effect of different protein powder on the microstructure of mixed shrimp mince gel

注: A: 对照; B: 大豆分离蛋白粉; C: 分离乳清蛋白粉; D: 蛋清粉; 1: 10000×; 2: 1000×。

致密的凝胶网络结构。感官评价表明大豆分离蛋白粉和分离乳清蛋白粉对混合虾糜风味产生不良影响, 而添加蛋清粉可提高虾糜的整体接受度并提高虾糜的凝胶特性, 提升食用品质, 为后续蛋白粉在南极磷虾糜类制品的应用提供理论依据。

参考文献

- [1] NAKANO S, YOSHINUMA T, YAMADA T. Reactivity of shrimp allergy-related IgE antibodies to krill tropomyosin[J]. International Archives of Allergy and Immunology, 2008, 145(3): 175–181.
- [2] ZHENG H, BEAMER S K, MATAK K E, et al. Effect of κ -carrageenan on gelation and gel characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) protein isolated with isoelectric solubilization/precipitation[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 644–652.
- [3] HOU H, WANG S, ZHU X, et al. A novel calcium-binding peptide from Antarctic krill protein hydrolysates and identification of binding sites of calcium-peptide complex[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 389–395.
- [4] YANG Y, LIU X, XUE Y, et al. The process of heat-induced gelation in *Litopenaeus vannamei*[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105260.

- [5] 易靓, 董鑫磊, 马舒恬, 等. 不同品种虾糜的凝胶品质比较 [J]. *食品工业科技*, 2022, 43(7): 94–101. [YI L, DONG X L, MA S T, et al. Comparison of the gel quality of different varieties of minced shrimp [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2022, 43(7): 94–101.]
- [6] 米红波, 李政翰, 李岩, 等. 外源添加物在鱼糜制品中的应用研究进展 [J]. *食品工业科技*, 2019, 40(15): 349–355. [MI H B, LI Z H, LI Y, et al. Research progress on the application of exogenous additives in surimi products [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2019, 40(15): 349–355.]
- [7] 叶丽红, 许艳顺, 夏文水, 等. K-卡拉胶, 复合磷酸盐和蛋清粉对高水分鱼丸水分和质构特性的影响 [J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 291–297. [YE L H, XU Y S, XIA W S, et al. Effects of K-carrageenan, complex phosphate and egg white powder on the moisture and texture properties of high-moisture fish balls [J]. *Food Science and Technology*, 2019, 44(4): 291–297.]
- [8] 李钰金, 林洪, 赵元晖, 等. 蛋白质类添加物在鱼糜制品中的应用现状及发展趋势 [J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(5): 220–224. [LI Y J, LIN H, ZHAO Y H, et al. Application status and development trend of protein additives in surimi products [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(5): 220–224.]
- [9] 崔旭海, 毕海丹, 崔晓莹, 等. 不同食用蛋白的添加对鲤鱼鱼糜流变和凝胶特性的影响 [J]. *食品工业科技*, 2018, 39(16): 195–200, 225. [CUI X H, BI H D, CUI X Y, et al. Effects of different edible protein additions on the rheology and gel properties of carp surimi [J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(16): 195–200, 225.]
- [10] 沈晓蕾, 李向红, 俞健, 等. 大豆分离蛋白, 木薯淀粉与转谷氨酰胺酶组合对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响 [J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 26–31. [SHEN X L, LI X H, YU J, et al. Effects of soy protein isolate, tapioca starch and transglutaminase combination on the quality of silver carp surimi [J]. *Food and Machinery*, 2019, 35(9): 26–31.]
- [11] MI H, ZHAO Y, LI Y, et al. Combining effect of soybean protein isolate and transglutaminase on the gel properties of Zhikong scallop (*Chlamys farreri*) adductor muscle [J]. *LWT*, 2021, 138: 110727.
- [12] 江联. 凉粉草多糖-乳清分离蛋白凝胶体系的凝胶特性和凝胶机理的研究及应用 [D]. 南昌: 南昌大学, 2020. [JIANG L. Research and application of gel properties and gel mechanism of jelly grass polysaccharide-whey protein isolate gel system [D]. Nanchang: Nanchang University, 2020.]
- [13] 程文雯. 改良剂对带鱼鱼糜品质的影响研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2018. [CHENG W W. Study on the effect of modifiers on the quality of hairtail surimi [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.]
- [14] 王冬妮, 范馨茹, 祁立波, 等. 淀粉和蛋白类添加物对鱿鱼鱼糜凝胶特性的影响 [J]. *中国食品学报*, 2018, 18(4): 65–71. [WANG D N, FAN X R, QI L B, et al. Effects of starch and protein additives on the gel properties of squid surimi [J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2018, 18(4): 65–71.]
- [15] SUTLOET P, SOMPONGSE W, MORIOKA K. Gel-forming ability of Rohu as affected by egg white powder addition [J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2019, 10(8): 985–996.
- [16] 杨姣, 安琪琦, 陈雨欣, 等. 鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 265–280. [YANG J, AN Y Q, CHEN Y X, et al. Analysis of characteristic flavor components of overcooked fish surimi products during heating process [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(8): 265–280.]
- [17] PAN Y, SUN Q, LIU Y, et al. The relationship between rheological and textural properties of shrimp surimi adding starch and 3D printability based on principal component analysis [J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9(6): 2985–2999.
- [18] 潘禹希, 奥婉莹, 赵文宇, 等. 鲢鱼糜和海参复配 3D 打印食品材料 [J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 175–183, 130. [PAN Y X, YU W Y, ZHAO W Y, et al. 3D printing food materials combined with surimi and sea cucumber [J]. *Modern Food Technology*, 2020, 36(8): 175–183, 130.]
- [19] 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.
- [20] 丁浩宸, 张燕平, 戴志远. 南极磷虾糜应用于鱼糜制品的工艺及机理 [J]. *中国食品学报*, 2016, 16(12): 124–132. [DING H C, ZHANG Y P, DAI Z Y. The technology and mechanism of Antarctic krill surimi used in surimi products [J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2016, 16(12): 124–132.]
- [21] THORARINSDOTTIR K A, ARASON S, GEIRSDÓTTIR M, et al. Changes in myofibrillar proteins during processing of salted cod (*Gadus morhua*) as determined by electrophoresis and differential scanning calorimetry [J]. *Food Chemistry*, 2002, 77(3): 377–385.
- [22] 钟坦君, 洪鹏志, 周春霞, 等. 没食子酸对金线鱼鱼糜凝胶特性及其体外消化产物活性的影响 [J/OL]. *食品科学*: 1–14 [2022-03-21] <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20220107.1708.026.html>. [ZHONG T J, HONG P Z, ZHOU C X, et al. Effects of gallic acid on the gel properties of surimi and the activity of their digestive products *in vitro* [J/OL]. *Food Science*: 1–14. [2022-03-21] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.ts.20220107.1708.026.html>]
- [23] CHEN H Z, ZHANG M, YANG C H. Comparative analysis of 3D printability and rheological properties of surimi gels via LF-NMR and dielectric characteristics [J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 292: 110278.
- [24] CANDO D, HERRANZ B, BORDERÍAS A J, et al. Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels [J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 51: 176–187.
- [25] ELLINGSEN T E, MOHR V. Biochemistry of the autolytic processes in Antarctic krill post mortem Autoproteolysis [J]. *Biochemical Journal*, 1987, 246(2): 295–305.
- [26] KIM Y S, YONGSAWATDIGUL J, PARK J W, et al. Characteristics of sarcoplasmic proteins and their interaction with myofibrillar proteins [J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2005, 29(5): 517–532.
- [27] KAWAMURA Y, NISHIMURA K, IGARASHI S, et al. Characteristics of autolysis of Antarctic krill [J]. *Agricultural and*

- Biological Chemistry, 2014, 45(1): 93–100.
- [28] 孔文俊, 刘鑫, 薛勇, 等. 不同蛋白添加剂对秘鲁鱿鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(14): 119–122. [KONG W J, LIU X, XUE Y, et al. Effects of different protein additives on the gel properties of Peruvian squid surimi[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2015, 36(14): 119–122.]
- [29] KONG W, ZHANG T, FENG D, et al. Effects of modified starches on the gel properties of Alaska Pollock surimi subjected to different temperature treatments[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 56: 20–28.
- [30] SAGER V F, MUNK M B, HANSEN M S, et al. Formulation of heat-induced whey protein gels for extrusion-based 3D printing[J]. *Foods*, 2020, 10(1): 8.
- [31] ZHANG M, LI J, SU Y, et al. Preparation and characterization of hen egg proteins-soybean protein isolate composite gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 97: 105191.
- [32] 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. Effects of the proportion of surimi in composite Antarctic krill surimi and exogenous additives on its gel properties[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2018, 39(17): 16–21,32.]
- [33] 潘燕墨. 食品配料改善虾肉糜 3D 打印适应性的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2021. [PAN Y M. Research on food ingredients to improve the adaptability of shrimp minced meat 3D printing [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2021.]
- [34] 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*, 2012, 47(2): 261–266.
- [35] PARK J W. Functional protein additives in surimi gels[J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(3): 525–527.
- [36] WU Q, WANG W, LI X, et al. Gel Properties of Blue Round Scad (*Decapterus maruadsi*) Mince as influenced by the addition of egg white powder[J]. *Journal of Texture Studies*, 2022, 53(4): 563–576.
- [37] SU Y, DONG Y, NIU F, et al. Study on the gel properties and secondary structure of soybean protein isolate/egg white composite gels[J]. *European Food Research and Technology*, 2015, 240(2): 367–378.
- [38] 夏秀芳, 孔保华, 张宏伟. 肌原纤维蛋白凝胶形成机理及影响因素的研究进展[J]. 食品科学, 2009, 30(9): 264–268. [XIA X F, KONG B H, ZHANG H W. Research progress on the formation mechanism and influencing factors of myofibrillar protein gel[J]. *Food Science*, 2009, 30(9): 264–268.]