

超高压耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶特性和水分迁移的影响

邹怡茜¹, 陈海强^{1,2}, 潘卓官¹, 肖苏尧¹, 周爱梅^{1*}

(1. 华南农业大学食品学院, 广东广州 510642) (2. 阳江职业技术学院食品与环境工程系, 广东阳江 529500)

摘要: 研究不同压力 (100~500 MPa) 耦合热处理 (40 °C/30 min, 90 °C/20 min) 对鳙鱼 (*Aristichthys nobilis*) 鱼糜凝胶特性及水分迁移的影响, 考察了不同处理条件下鳙鱼鱼糜的凝胶强度、持水性 (WHC)、白度、质构、微观结构、SDS-PAGE 电泳及水分迁移的变化, 并进行相关性分析。研究发现, 超高压耦合热处理能显著改善鳙鱼鱼糜的凝胶特性。超高压条件为 300 MPa/15 min 的压力耦合热处理 (记为 300PH) 样品的凝胶强度和不易流动水单位质量峰面积 (A_{22}) 显著性高于其他处理组 ($p < 0.05$)。与传统二段热处理样品相比, 300PH 样品的凝胶强度和 WHC 分别提高了 88.40%、4.75%。与鱼糜凝胶的凝胶强度具有高度相关性的指标分别是破断强度、凹陷深度、硬度、弹性、胶着性、咀嚼性和 A_{22} 。结合水单位质量峰面积 (A_{21}) 与鱼糜凝胶强度具有中度相关性, 这些表明 300PH 样品形成致密的凝胶网络结构, 锁住更多结合水, 限制不易流动水向自由水迁移, 从而改善鱼糜凝胶的凝胶特性。该研究旨在为超高压技术鱼糜凝胶制品加工中的产业化应用、优质淡水鱼鱼糜制品的加工提供数据参考。

关键词: 超高压耦合热处理; 鳙鱼; 凝胶特性; 鱼糜; 低场核磁共振

文章编号: 1673-9078(2022)12-272-280

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.12.0083

Effect of Ultra-high Pressure Coupled with Heat Treatment on the Gel Properties and Water Migration of Bighead Carp Surimi Gel

ZOU Yiqian¹, CHEN Haiqiang^{1,2}, PAN Zhuoguan¹, XIAO Suyao¹, ZHOU Aimei^{1*}

(1. College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (2. Department of Food and Environmental Engineering, Yangjiang Vocational and Technical College, Yangjiang 529500, China)

Abstract: The effects of ultra-high pressure (100~500 MPa) coupled with heat treatment (40 °C/30 min, 90 °C/20 min) on the gel properties and water migration of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi were studied. The changes in gel strength, water-holding capacity (WHC), whiteness, texture, microstructure, SDS-PAGE, and water migration of bighead carp surimi gel under different treatment conditions were investigated, and the correlations of these indicators with gel strength were analyzed. The results show that ultra-high pressure treatment coupled with heat treatment significantly improves the gel properties of bighead carp surimi. The gel strength and unit mass peak area of immobile water (A_{22}) of the gel after ultra-high pressure treatment at 300 MPa/15 min followed by heat treatment (denoted as 300PH) were significantly higher than those of the other treatment groups ($p < 0.05$). The gel strength and WHC of the 300PH sample were higher by 88.40% and 4.75%, respectively, than those of the samples subjected to traditional two-stage heat treatment. The indicators that were highly correlated with the gel strength of surimi gel were breaking force, depression depth, hardness, springiness, cohesiveness, chewiness, and A_{22} . The unit mass peak area of bound water (A_{21}) was moderately correlated with the gel strength of surimi gel. This indicates that 300PH formed a dense gel network structure, locked more bound water, and restricted the migration of immobile water to free water, thereby improving the properties of

引文格式:

邹怡茜, 陈海强, 潘卓官, 等. 超高压耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶特性和水分迁移的影响[J]. 现代食品科技, 2022, 38(12): 272-280

ZOU Yiqian, CHEN Haiqiang, PAN Zhuoguan, et al. Effect of ultra-high pressure coupled with heat treatment on the gel properties and water migration of bighead carp surimi gel [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(12): 272-280

收稿日期: 2022-01-23

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31972103); 广东省自然科学基金-面上项目 (2020A1515010363)

作者简介: 邹怡茜 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1870953758@qq.com

通讯作者: 周爱梅 (1971-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品化学与营养及水产品与农产品精深加工, E-mail: zhouam@scau.edu.cn

surimi gel. This research aims to provide data reference for industrial application of ultra-high pressure in the processing of surimi gel products and high-quality freshwater fish surimi products.

Key words: ultra-high pressure coupled with heat treatment; bighead carp; gel properties; surimi; low-field nuclear magnetic resonance

超高压技术是一种非热加工新技术,应用领域涉及肉制品、乳制品、水产品、果蔬产品等^[1]。超高压不破坏分子共价键^[2],可显著改善物料的结构特性^[3],改善食品的品质^[4,5]。大量研究表明,超高压诱导水产品凝胶化有望作为热处理诱导凝胶化的替代方案^[6-9],但单独的超高压处理一般需要较高压力(海水鱼 300~600 MPa,淡水鱼 400~600 MPa)水平才能得到较好品质的鱼糜凝胶制品^[2,10-13],例如,前人研究发现带鱼^[28]、金线鱼^[35]、鲢鱼^[38]、鳙鱼^[2]鱼糜单独超高压处理的最优处理压力分别为 300~350 MPa/5 min、400 MPa/15 min、400 MPa/15 min、500 MPa/30 min,这导致超高压设备投入和生产运行成本过高,不利于超高压技术在鱼糜制品加工中的产业化应用。我们前期研究表明,中超高压耦合热处理在改善低值海水鱼鱼糜凝胶特性方面显著优于单纯较高压力的超高压处理和传统的二段加热处理^[13],但该技术对淡水鱼鱼糜凝胶特性的影响还需进一步研究。

随着传统优质海水鱼鱼糜原料产量的下降以及我国鱼糜制品需求量的不断攀升,海水鱼已无法满足鱼糜产业的发展需求,价格低廉、产量稳定的淡水鱼有望成为鱼糜制品加工的新原料。但相比于海水鱼,淡水鱼普遍存在凝胶形成能力弱的问题,采用传统的二段热处理技术无法满足生产高品质鱼糜制品的需求,因此急需采用新技术来提高淡水鱼鱼糜制品的凝胶特性。鳙鱼,又称花鲢、胖头鱼、大头鱼、黑鲢、黄鲢^[14],是我国主要的淡水鱼之一。2020年我国鳙鱼养殖产量高达 3.13×10^6 t,占全国淡水鱼养殖产量的 10.13%^[15]。鳙鱼富含蛋白质、矿物质,氨基酸组成均衡性好,且脂肪酸组成具有较高的营养价值^[16]。研究发现,鳙鱼较其他淡水鱼所制成的鱼糜的凝胶特性适中^[17-19],适合作为淡水鱼鱼糜制品的生产原料代表。此外,由于鱼糜凝胶是肌原纤维蛋白相互交联形成的网络结构,通过截留水分形成的弹性凝胶体,而经过不同加工处理的鱼糜凝胶,其水分子的存在状态和分布会发生改变,进而导致水分迁移,因此水分迁移与鱼糜凝胶网络的结构密切相关,并影响鱼糜的凝胶特性^[20]。

本文以淡水鱼的代表鳙鱼冷冻鱼糜作为研究对象,开展不同压力(100~500 MPa)耦合热处理(40 °C/30 min, 90 °C/20 min)对鳙鱼鱼糜凝胶的凝胶强度、持水性、白度及质构的影响,并探究超高压耦合热处理对鱼糜凝胶水分含量和分布的影响,以期对淡水鱼加工生产

优质的鱼糜制品提供有益参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

新鲜鳙鱼,购于广州市长湴菜市场;食盐,广州盐业公司提供;蔗糖、山梨糖醇,食品级。

1.2 仪器与设备

UHPF-600 MPa 超高压设备,中国包头科发高压科技有限责任公司;DS-1 高速组织捣碎机,上海标本模型厂;DM-JRJJ 灌肠器,中国德明;CT3 质构仪,美国 Brookfield;CR-10 色差仪,日本日立;HH-S8 水浴锅,金坛市医疗仪器厂;EVO MA 15 扫描电子显微镜,德国 ZEISS;低场核磁共振仪,苏州纽迈分析仪器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品的制备

鱼糜的制备:新鲜鳙鱼去鳞、去头、去内脏、采肉、绞肉、漂洗(用 5 倍冰水漂洗 2 次/10 min, 0.15% NaCl 漂洗 1 次/10 min)、脱水、加抗冻剂($m=4\%$ 蔗糖、 $m=4\%$ 山梨糖醇)。

鱼肠的制备:参照周爱梅等^[21]的方法并略修改。冷冻鳙鱼鱼糜在 4 °C 冰箱中解冻 8 h 后,切成 2 cm 的方块并采用高速组织捣碎机将其捣碎 1 min,根据冷冻鱼糜的质量加冰水,将鱼糜水分含量调至 79%左右,再添加 2.5% (m/m) 的食盐,继续捣碎 4 min,赶气后用灌肠器将鱼糜灌入至肠衣中,鱼肠长度在 15 cm 左右。将鱼肠分别在 100、200、300、400、500 MPa 压力下常温保压 15 min,然后采用二段加热法(40 °C/30 min 后再采用 90 °C/20 min 加热)处理,记为超高压耦合热处理组 (PH);单纯采用二段加热法处理为对照组 (0.1 PH)。所有加热后的鱼糜凝胶样品立即置于冰水中冷却 (1 h),在 4 °C 冰箱放置 24 h 后进行分析测定。

1.3.2 鱼糜凝胶凝胶强度的测定

选用 CT-3 质构仪测定鱼糜凝胶的破断力 (g)、凹陷深度 (mm),二者乘积为凝胶强度 (g·cm)。具体测定方法为,将鱼肠平衡至室温后 (2 h),切成直径 20 mm、高 25 mm 的柱形体进行测定。选用直径为 5 mm 的 P/5 探头,测试速度为 1.0 mm/s,返回速度为

1.0 mm/s, 触发力为 4.0 g, 循环次数为 1 次, 每个样品做 5 个平行样。

1.3.3 鱼糜凝胶质构的测定

参考 Maqsood 等^[22]的方法对样品的硬度 (Hardness)、弹性 (Springiness)、内聚性 (Cohesiveness)、咀嚼性 (Chewiness) 和胶着性 (Gumminess) 进行测定。质构分析参数设定为: 预测试速度为 2 mm/s, 测试速度为 1.5 mm/s, 测试后探头上升速度为 1.5 mm/s, 形变量为 50%, 触发力为 25 g, 循环次数为 2 次。每组鱼糜凝胶样品重复测量 7 次。

1.3.4 鱼糜凝胶持水性 (WHC) 的测定

参考 Pan 等^[23]的方法测定持水性能。把鱼糜凝胶样品切成小块 (0.5 cm×0.5 cm×2 cm), 用两层滤纸包裹后置于 50 mL 离心管内, 在 10 000×g 下 4 °C 离心 10 min, 持水性计算公式为:

$$H = (1 - \frac{CG - CG'}{CG}) \times 100\% \quad (1)$$

式中:

H ——鱼糜凝胶持水性 (WHC), %;

CG ——鱼糜凝胶离心前的质量, g;

CG' ——鱼糜凝胶离心后的质量, g。

1.3.5 鱼糜凝胶白度的测定

参考 Balange 等^[24]的方法测定鱼糜凝胶的色差。将鱼糜凝胶样品切成厚 3 mm 的圆片, 采用色差仪 CR-10 进行样品色度分析。测定鱼糜凝胶的 L^* (亮度)、 a^* (红度)、 b^* (黄度), 白度 (D) 计算公式为:

$$D = 100 - [(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (2)$$

1.3.6 鱼糜凝胶十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE)

参考 Chen 等^[13]的方法测定鱼糜凝胶的 SDS-PAGE。

1.3.7 鱼糜凝胶微观结构的观察

参考 Chen 等^[25]的方法, 将鱼糜凝胶切成 3 mm×3 mm×3 mm 的薄片, 在室温下, 用 2.5% (V/V) 戊二醛固定 12 h 后, 在 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液 (pH 值 7.0) 中浸泡 10 min, 依次用不同梯度 (30%、50%、70%、80%、90% 和 100%) 的乙醇溶液脱水 10 min, 冷冻干燥, 喷金, 扫描电子显微镜放大 10 000 倍对样品进行观察。

1.3.8 鱼糜凝胶水分迁移的分析

将处理后的鱼糜凝胶切成直径 20 mm、高 30 mm 的柱形体置于核磁管中, 采用磁场强度为 0.5 T 的低场核磁共振 (LF-NMR) 分析仪分析鱼糜凝胶的水迁移率和分布, 具体参考 Wang 等^[26]的方法进行测量分析。

1.3.9 数据处理方法

使用 Origin-pro 9.1 软件进行绘制, 数据采用 SPSS 19.0 软件进行显著性、方差和相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶强度的影响

凝胶强度是指凝胶崩裂或断裂时单位面积所受的力, 反应凝胶内部结构的坚实程度^[27]。由图 1a 和 1b 可知, 超高压耦合热处理鱼糜凝胶的破断力和凹陷深度随着压力的增大呈先增加后减小的趋势, 两者均在 300 MPa 时达到最大值, 与传统二段加热的对照组 (0.1 PH) 相比, 分别增加了 60.23% 和 17.38% ($p < 0.05$)。图 1c 表明, 超高压耦合热处理的鳙鱼鱼糜凝胶的凝胶强度显著高于 0.1 PH ($p < 0.05$) 样品, 其中 100、200、300、400、500 PH 样品的凝胶强度分别比 0.1 PH 样品 (232.65 g·cm) 提高了 33.19%、38.08%、88.40%、50.05%、32.19%, 过高压 (>300 MPa) 处理下, 鱼糜凝胶强度显著降低 ($p < 0.05$)。这与 Chen 等^[28]研究结果相似, 当压力达到 400 MPa 或以上时, 高压与热处理耦合的鱼糜凝胶强度显著降低。Ye 等^[29]也得到类似结果, 鲢鱼鱼糜凝胶经超高压结合热处理, 凝胶强度在压力为 300 MPa 时最大。我们前期研究结果发现, 鳙鱼鱼糜单独超高压处理的最优处理压力为 500 MPa^[2], 而压力耦合热处理的最优压力为 300 MPa, 表明超高压耦合热处理可显著降低压力的需求, 这有利于超高压技术在鱼糜产业中的推广应用。

二段热处理是鱼糜制品加工企业广泛应用的鱼糜凝胶化方法^[30]。在二段加热的 40 °C 热处理阶段, 鱼糜内源性转谷氨酰胺酶 (Transglutaminase, TGase) 催化鱼糜蛋白质的谷氨酰胺残基和赖氨酸残基进行交联, 促进蛋白质-蛋白质的结合^[31], 形成品质较好的鱼糜凝胶。本研究发现, 超高压耦合热处理 (40 °C/30 min, 90 °C/20 min) 对鳙鱼鱼糜凝胶强度的改善显著高于传统的二段热处理 ($p < 0.05$), 这可能是由于超高压促进鱼糜蛋白质的展开, 使其二级结构中的 β -折叠结构增多, 活性巯基基团暴露。这些有利于在后续的热处理阶段中内源性 TGase 催化蛋白质-蛋白质交联, 形成致密的网络结构, 最终表现出更好的凝胶特性^[12,32]。相对于更高压力耦合热处理组, 300 MPa 超高压耦合热处理在改善鱼糜凝胶强度方面更具有优势, 这可能是由于鱼糜内源性 TGase 活性随着压力的增加而降低^[33], 过高压 (>300 MPa) 抑制内源性 TGase 活性, 从而不利于蛋白质-蛋白质的交联。此外, 蛋白质展开和聚集的相对速度在鱼糜凝胶网络的形成中起着关键作用, 在过高压 (>300 MPa) 处理下, 鱼糜凝胶蛋白聚集

速率比展开速率快,不利于蛋白质-蛋白质之间的交联,导致蛋白质快速形成大聚体并破坏均匀的凝胶结构,从而导致鱼糜凝胶的凝胶强度下降^[13,34]。

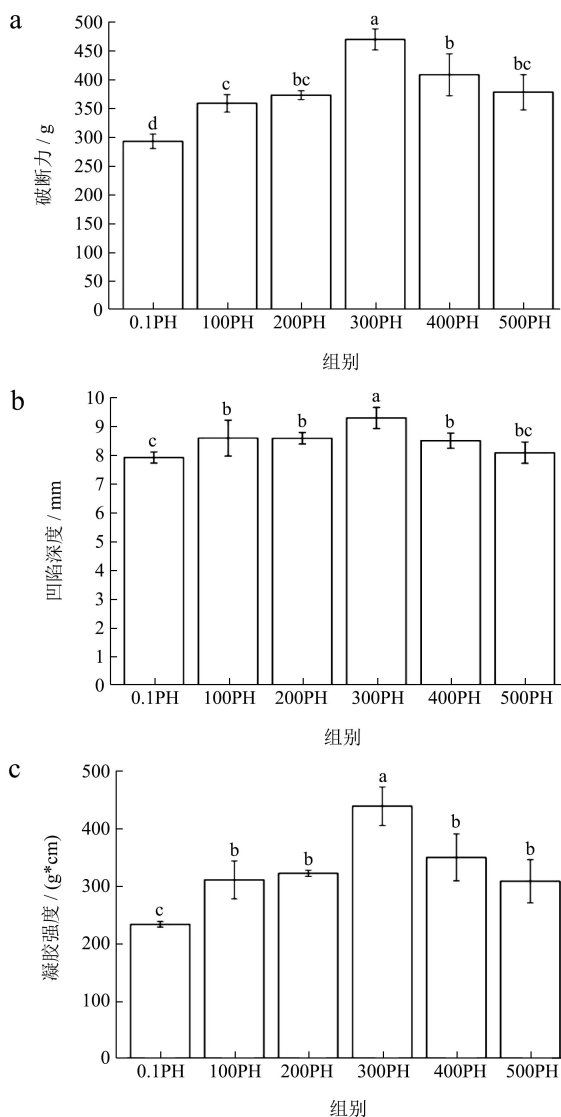


图1 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶强度的影响

Fig.1 Effect of different pressure coupled heat treatment on the gel strength of bighead carp surimi

注:小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$),下同。

2.2 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶持水性的影响

持水性体现了鱼糜凝胶的保水性,持水性越高,说明鱼糜凝胶内部的水分越不易流失。由图2可知,鳙鱼鱼糜凝胶持水性的变化和凝胶强度的变化较一致,超高压耦合热处理的鳙鱼鱼糜凝胶具有更高的持水能力,其中300PH样品的持水性为76.92%,较传统二段热处理的对照组样品的持水性(73.43%)显著提高了4.75% ($p < 0.05$)。然而,随着压力进一步增加,

鳙鱼鱼糜凝胶的持水性呈下降趋势,其中500PH鱼糜凝胶的持水性相对于300PH样品和对照组的持水性分别下降了10.37%和6.12%,这可能是由于过高压力不利于鱼糜凝胶网络结构的改善,导致鱼糜凝胶持水性下降^[13]。适当的压力耦合热处理促进鱼糜蛋白质之间的交联,形成更加致密和均匀、更有弹性、更具包埋水分子能力的层次化三维网络结构,从而能锁住更多水分,使鱼糜凝胶具有更高的持水性^[35,36]。

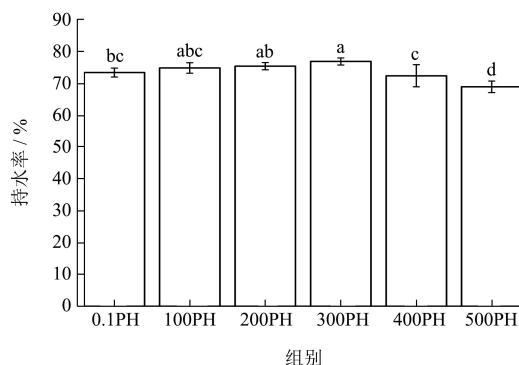


图2 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶持水性的影响

Fig.2 Effect of different pressure coupled heat treatment on the water holding capacity of bighead carp surimi gel

2.3 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶白度的影响

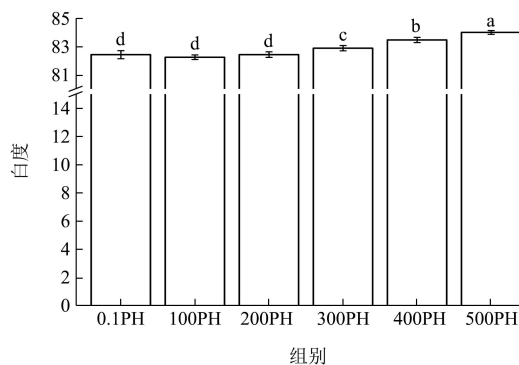


图3 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶白度的影响

Fig.3 Effect of different pressure coupled heat treatment on the whiteness of bighead carp surimi gel

白度是鱼糜凝胶的色泽指标,是评价鱼糜制品品质的指标之一^[28]。如图3所示,不同压力耦合热处理的鳙鱼鱼糜凝胶均获得较高的白度值(82.25~84.01),白度整体相差不大。中等水平压力(100~300 MPa)耦合热处理所获得的鳙鱼鱼糜凝胶的白度值与对照组较接近 ($p > 0.05$),随着压力的继续升高,白度值呈上升的趋势 ($p < 0.05$),500PH样品的白度值获得最大值(84.01),这与前人^[37,38]的研究结果相似,加热可导致鱼糜凝胶白度的增加^[32]。鳙鱼属红肉鱼,经过压力耦

合热处理后, 鱼糜凝胶白度的增加可能归因于肌红蛋白在热处理过程中的变性, 类似烹饪过程中肉色的变化^[39]。此外, 超高压处理使鱼糜凝胶网络形成更小的孔洞, 增加其不透明度, 减少光吸收, 从而提高白度^[9]。

2.4 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶质构的影响

由表 1 可见, 在不同的压力耦合热处理下, 300PH 鱼糜凝胶的硬度、胶着性、咀嚼性显著高于其他处理组 ($p < 0.05$)。虽然 300PH 鱼糜凝胶的弹性与其他压力耦合热处理组无显著差异 ($p > 0.05$), 但仍显著高于传统二段热处理的对照组。300PH 鱼糜凝胶的内聚性

显著高于 500PH 鱼糜凝胶的内聚性, 但与对照组和其他压力处理组无显著差异 ($p > 0.05$)。300PH 样品的硬度、内聚性、弹性、胶着性、咀嚼性较对照组依次增加了 32.11%、2.72%、4.52%、34.83%、41.02%, 表明适当压力耦合热处理可以显著地改善鳙鱼鱼糜的质构特性, 这与前人的研究结果相似^[25,38]。这可能是由于超高压处理改变鱼糜蛋白质的构象, 促进鱼糜蛋白质-蛋白质和蛋白质-水的相互作用, 而后续的加热处理进一步增强了鱼糜凝胶网络中蛋白质的连接性和刚性, 最后形成结构完整、排列紧密有序的凝胶网络结构, 从而呈现出更高的硬度、内聚性、胶着性和咀嚼性^[32]; 但过高的压力 (> 500 MPa) 会使鱼糜蛋白凝胶变性和聚集, 致使凝胶网络排列不规则, 凝胶结构变差^[40]。

表 1 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶质构的影响

Table 1 Effect of different pressure coupled heat treatment on the texture of bighead carp surimi gel

处理方式	0.1 PH	100 PH	200 PH	300 PH	400 PH	500 PH
硬度/g	1 511.67±46.46 ^e	1 671.25±49.22 ^d	1 761.00±73.57 ^c	1 995.00±27.52 ^a	1 870.00±22.73 ^b	1 792.50±34.03 ^c
内聚性	0.61±0.01 ^{ab}	0.62±0.01 ^{ab}	0.63±0.01 ^a	0.63±0.02 ^a	0.62±0.02 ^{ab}	0.61±0.01 ^b
弹性/mm	9.12±0.23 ^b	9.28±0.04 ^{ab}	9.43±0.44 ^{ab}	9.54±0.17 ^a	9.46±0.14 ^{ab}	9.26±0.20 ^{ab}
胶着性/g	929.00±20.30 ^c	1 038.50±34.16 ^d	1 107.00±36.61 ^c	1 252.60±45.54 ^a	1 160.25±37.20 ^b	1 086.25±13.77 ^{cd}
咀嚼性/mJ	83.07±1.87 ^e	94.55±3.20 ^d	102.34±6.15 ^{bc}	117.14±4.09 ^a	107.63±4.74 ^b	98.65±2.76 ^{cd}

注: 同行数据右肩字母不同表示差异性显著, $p < 0.05$, 下同。

2.5 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶

SDS-PAGE 的影响

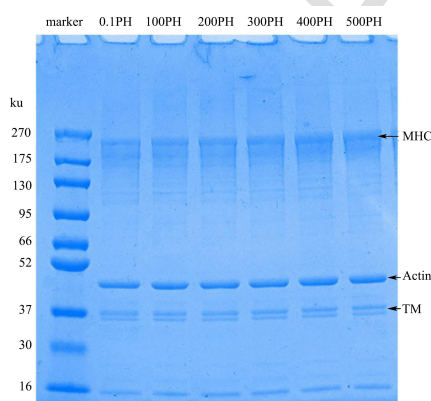


图 4 不同压力耦合热处理条件下鳙鱼鱼糜凝胶的 SDS-PAGE 图像

Fig.4 SDS-PAGE image of bighead carp surimi gel under different pressure coupled heat treatment

肌原纤维蛋白在对肉制品的内聚结构和质地起重要作用, 主要的蛋白质是肌球蛋白重链 (MHC)、肌动蛋白 (Actin)^[28]。由图 4 可知, 随着压力的增加, MHC 条带和 Actin 条带的强度逐渐增强, 压力处理超过 300 MPa 可能使肌原纤维结合丝氨酸蛋白酶钝化, 导致 MHC 降解降低^[13,28]。相对于 0.1PH, 300PH 样品的 Actin

条带密度显著性增加。100PH~300PH 样品比 400PH 和 500PH 样品的 MHC 条带密度弱, 说明适度的压力处理耦合热处理促使肌球蛋白重链交联或降解^[5]。此外, 在热处理期间, TGase 催化 MHC 的交联^[36], 适度的压力处理可以诱导蛋白质的展开, 使肌球蛋白更容易被 TGase 催化交联^[41]。

2.6 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶微观结构的影响

凝胶质构的物理性质与微观结构密切相关, 致密有序的网络结构可能具有更高的持水性和凝胶强度^[13]。从图 5 可以看出, 不同压力耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶微观结构具有明显改善作用。传统二段热处理的对照组样品表面不平整, 鱼糜凝胶蛋白交联形成粗大的团簇状聚集体, 结构松散分布不均匀。300PH 鱼糜凝胶的空间结构较平整光滑、有序均匀、结构致密、孔洞数量明显减少。适当的超高压处理可使鱼糜蛋白质通过不同程度的展开和变性而改变结构, 从而促进蛋白质凝胶的改变, 有助于后续热处理获得连续均匀的凝胶^[42], 而过高压力处理, 会导致鱼糜蛋白质的降解或解聚, 蛋白质不规则聚集, 堆积成块, 不利于水分保持在鱼糜凝胶网络结构中, 导致鱼糜凝胶强度和质构特性降低^[43]。

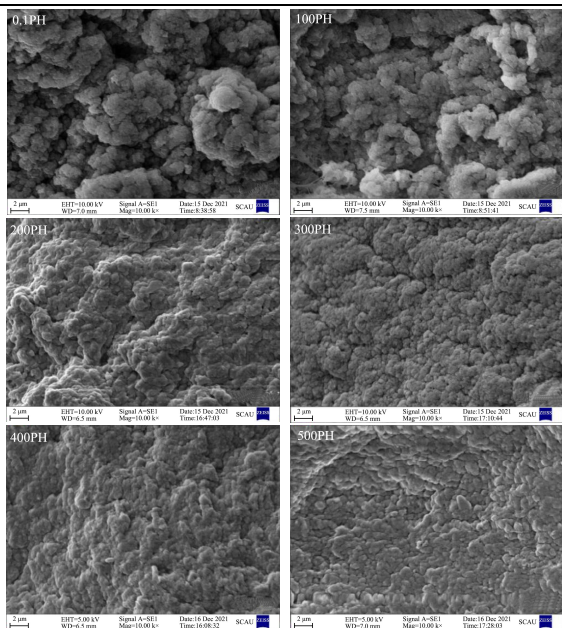


图5 不同压力耦合热处理对鲮鱼鱼糜凝胶微观结构的影响

Fig.5 Effect of different pressure coupled heat treatment on the microstructure of bighead carp surimi gel

2.7 不同压力耦合热处理对鲮鱼鱼糜凝胶水分迁移的影响

采用低场核磁共振成像技术分析不同处理条件所获得的鲮鱼鱼糜凝胶的水分分布情况、弛豫时间和峰面积。弛豫时间 (T_2) 反映鱼糜蛋白质和水分子的结合情况, 其中 T_{21} 代表与大分子鱼糜蛋白紧密结合的结合水, T_{22} 反映被滞留在鱼糜凝胶结构中的水, 为不易流动水, 而 T_{23} 对应于鱼糜凝胶结构外的流动性较大的自由水^[44]。如图 6 和表 2 所示, 100PH、200PH、300PH 鱼糜凝胶样品的 T_{21} 和 T_{22} 无显著性差异 ($p > 0.05$), 并且没有表现出与凝胶强度变化类似的趋势, 表明这两部分的结合水能力对凝胶强度的提高贡献较小。而随着压力的增加, PH 组鱼糜凝胶的 T_{21} 呈下降的趋势, 这可能是由于超高压耦合热处理能形成更均匀致密的凝胶网络结构, 增强对结合水的束缚, 减弱水的流动性, 从而导致水分子的弛豫时间降低^[45]。 A_{21} 、 A_{22} 、

A_{23} 分别为结合水、不易流动水和自由水的单位质量峰面积, 表示不同状态水分的相对含量^[46]。由图 6 或表 2 可以看出, 超高压耦合热处理鱼糜凝胶样品均检出自由水的峰, 且 0.1PH (对照组) 样品 A_{23} (自由水单位质量峰面积) 显著高于压力耦合热处理组样品 ($p < 0.05$)。0.1PH 样品的 A_{22} 显著小于其他压力耦合热处理组的 A_{22} , 其中 300PH 样品的 A_{22} 最高, 这与凝胶强度和持水性一致, 超高压耦合热处理增强鱼糜蛋白与水分的紧密结合, 使自由水向不易流动水迁移。此外, 300PH 鱼糜凝胶的 A_{21} 显著高于 0.1PH 的 A_{21} , 表明超高压耦合热处理促进水与蛋白质的结合, 更有利于增加鱼糜凝胶结合水的含量, 这可能是由于超高压耦合热处理更有利于形成更致密的鱼糜凝胶网络结构, 增加结合水的含量, 减弱凝胶中水分子的流动性^[47]。

磁共振成像 (MRI) 可以描述鱼糜的内部结构状态和质子的分布。伪彩图颜色的深浅反映水分的含量, 高质子密度对应红色, 水分含量较高; 反之, 颜色越暗 (偏蓝), 水分含量少^[48]。由图 7 可知, 超高压耦合热处理组的鲮鱼鱼糜凝胶较对照组颜色偏红、黄, 说明压力耦合热处理有利于鱼糜凝胶锁住水分子。上述结果说明, 超高压耦合热处理有利于增加鱼糜凝胶对结合水和不易流动水的束缚, 降低凝胶中水的流动性, 从而导致鱼糜凝胶呈现更高的持水性。

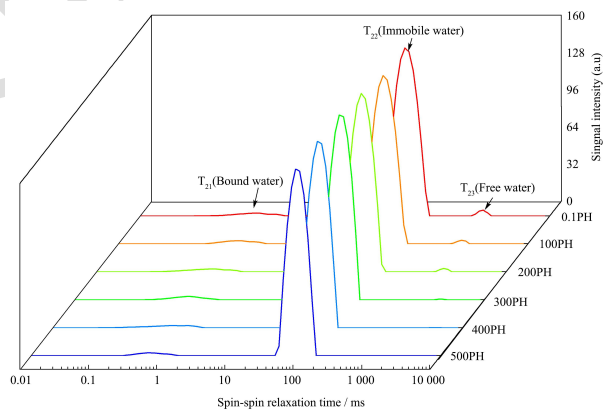


图6 不同压力耦合热处理条件下鲮鱼鱼糜凝胶 T2 弛豫时间的分布

Fig.6 Distribution of T2 relaxation time of bighead carp surimi gel under different pressure coupled heat treatment conditions

表 2 不同压力耦合热处理条件下鲮鱼鱼糜凝胶水分迁移率和水分分布的影响

Table 2 Effect of different pressure coupling heat treatment on water mobility and water distribution of bighead carp surimi gel

处理方式	0.1PH	100PH	200PH	300PH	400PH	500PH
T_{21} (ms)	0.50±0.00 ^{ab}	0.55±0.04 ^a	0.50±0.00 ^{ab}	0.50±0.00 ^{ab}	0.44±0.09 ^{bc}	0.43±0.00 ^c
T_{22} (ms)	75.65±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a	75.65±0.00 ^a
T_{23} (ms)	1 044.33±62.46 ^c	1 238.86±141.10 ^c	1 488.23±122.56 ^{bc}	1 892.09±371.01 ^b	1 733.89±379.36 ^b	2 875.81±563.90 ^a
A_{21}	285.9±29.99 ^{bc}	240.29±43.78 ^c	307.29±0.26 ^{abc}	380.92±14.59 ^a	337.65±28.54 ^{ab}	328.37±35.31 ^{ab}
A_{22}	9 713.98±73.38 ^d	8 728.25±668.64 ^{cd}	10 456.45±69.63 ^{bc}	13 469.18±373.42 ^a	11 323.15±701.31 ^b	10 105.61±760.64 ^{bc}
A_{23}	126.63±18.66 ^a	53.61±14.80 ^b	48.57±17.05 ^{bc}	22.01±4.43 ^{cd}	22.00±15.52 ^{bcd}	8.75±3.60 ^d

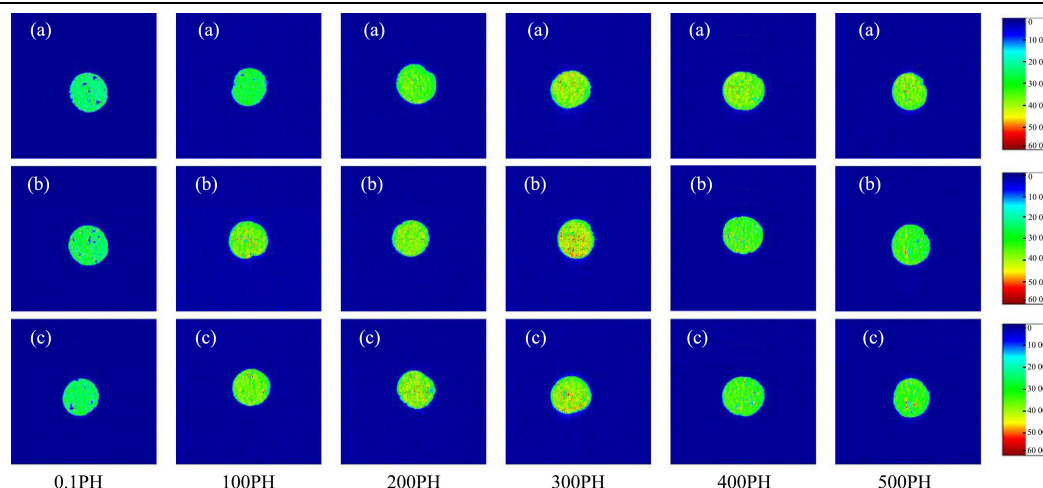


图7 不同压力耦合热处理条件下鳙鱼鱼糜凝胶的MRI 图像

Fig.7 MRI image of bighead carp surimi gel under different pressure coupled heat treatment

2.8 相关性分析

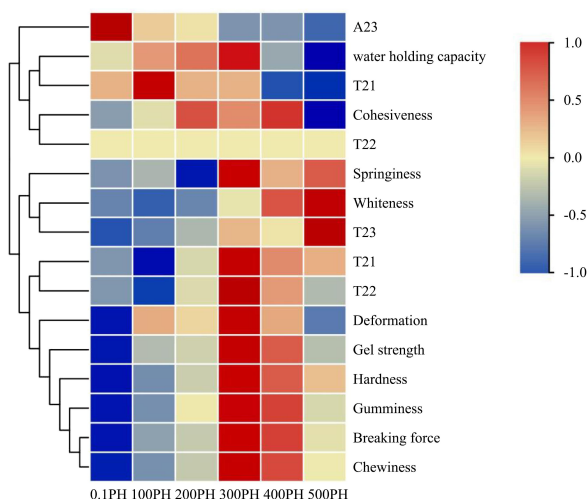


图8 压力耦合热处理鳙鱼凝胶特性与各指标之间的聚类热图

Fig.8 The clustering heat map between the gel characteristics and various indicators of bighead carp surimi gel under different pressure-coupled heat treatment

由不同压力耦合热处理下不同指标之间的聚类热图(图8)分析可知,在不同压力耦合热处理条件下,鳙鱼鱼糜凝胶的凝胶强度与质构特性、A₂₁、A₂₂以及白度聚为一大类,表明这些指标间的相关性可能比较高。由表3可知,鱼糜凝胶的破断强度、凹陷深度、硬度、内聚性、弹性、胶着性、咀嚼性、A₂₁、A₂₂、A₂₃与凝胶强度的相关系数分别为0.99、0.91、0.97、0.68、0.94、0.98、0.98、0.74、0.83、-0.76。由此可知,在不同压力耦合热处理条件下,超高压耦合热处理改善鱼糜凝胶的凝胶强度与凝胶的破断强度、凹陷深度、硬度、弹性、胶着性、咀嚼性、A₂₂具有高度正相关性(相关系数>0.8),与凝胶的内聚性、A₂₁具有中度正相关性(相关系数在0.5~0.8之间),与A₂₃呈负相关。综上所述

述,超高压耦合热处理改善鳙鱼鱼糜凝胶的凝胶强度是由鱼糜凝胶特性中的破断强度、凹陷深度、凝胶质构特性的提高所贡献,鱼糜凝胶中的水分分布的状态和含量的变化与鱼糜的凝胶强度、凝胶网络结构密切相关,300PH诱导鱼糜凝胶形成致密多孔有序的凝胶网络,使自由水向不易流动水和结合水迁移,并增强对水分的束缚能力,凝胶网络结构与水分的变化共同影响鱼糜凝胶的特性。

表3 不同压力耦合热处理形成的鱼糜凝胶强度和其他指标的关联性分析

Table 3 Correlation analysis of surimi gel strength and other indicators formed by different pressure coupled heat treatment

Index	Correlation coefficient	Index	Correlation coefficient
凹陷深度	0.91*	持水性	0.35
破断强度	0.99**	T ₂₁	-0.18
白度	0.30	T ₂₃	0.34
硬度	0.97**	A ₂₁	0.74
胶着性	0.98**	A ₂₂	0.83*
内聚性	0.68	A ₂₃	-0.76
弹性	0.94**		
咀嚼性	0.98**		

注: *在0.05级别(双尾),相关性显著; **在0.01级别(双尾),相关性显著。

3 结论

超高压耦合热处理对鳙鱼鱼糜凝胶特性的改善显著高于传统的二段热处理($p < 0.05$)。随着压力的提高,鳙鱼鱼糜的凝胶强度、白度和质构特性得到显著改善。核磁共振弛豫时间和相应的峰面积表明,适当的超高压耦合热处理形成的鱼糜凝胶结构对结合水的束缚能力显著高于传统的二段热处理样品($p < 0.05$), A₂₃(自

由水单位峰面积)显著降低,有利于鱼糜凝胶水分的保持,提高持水性。过高压力耦合热处理不利于鱼糜凝胶蛋白与水的相互作用,500PH 鱼糜凝胶样品的凝胶强度、持水性、质构特性显著下降($p < 0.05$)。因此超高压耦合热处理会影响鱼糜凝胶内的水分分布,能显著改善鱼糜的凝胶特性,提高鱼糜凝胶的品质。SDS-PAGE 表明,超高压耦合热处理可导致肌原纤维蛋白中 MHC 和 Actin 的降解。根据相关性分析,超高压耦合热处理下的鳙鱼鱼糜凝胶的破断强度、硬度、弹性、咀嚼性、 A_{22} 与凝胶强度显著性相关(相关系数 > 0.8),与 A_{21} 呈中度相关性(相关系数在 0.5~0.8 之间),说明鱼糜的凝胶强度、质构特性与水分状态共同影响鱼糜的凝胶特性,300PH 有利于鳙鱼鱼糜凝胶形成致密网络结构,锁住更多的结合水,并限制不易流动水向自由水迁移,从而改善鱼糜凝胶的凝胶特性。

参考文献

- [1] 侯养全.超高压食品灭菌技术研究进展与应用[J].山西科技,2018,33(1):106-108
- [2] Liang Y, Guo B Y, Zhou A M, et al. Effect of high pressure treatment on gel characteristics and gel formation mechanism of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi gels [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2017, 41(5): e13155
- [3] 崔燕,林旭东,康孟利,等.超高压技术在水产品贮藏与加工中的应用研究进展[J].食品科学,2016,37(21):291-299
- [4] Xuan X T, Cui Y, Lui X D, et al. Impact of ultra-high pressure pressure on the shelling efficacy, physicochemical properties, and microstructure of fresh razor clam (*Sinonovacula constricta*) [J]. Journal of Food Science, 2018, 83(2): 284-293
- [5] 陆海霞,张蕾,李学鹏,等.超高压对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].中国水产科学,2010,17(5):1107-1114
- [6] Guo Z, Li Z, Wang J, et al. Gelation properties and thermal gelling mechanism of golden threadfin bream myosin containing CaCl_2 induced by high pressure processing [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 43-52
- [7] Li X Y, Mao L K, He X Y, et al. Characterization of β -lactoglobulin gels induced by high pressure processing [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2018, 47: 335-345
- [8] Qiu C J, Xia W S, Jiang Q X. Effect of high hydrostatic pressure (HHP) on myofibril-bound serine proteinases and myofibrillar protein in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Food Research International, 2013, 52(1): 199-205
- [9] Ribeiro A T, Elias M, Teixeira B, et al. Effects of high pressure processing on the physical properties of fish ham prepared with farmed meagre (*Argyrosomus regius*) with reduced use of microbial transglutaminase [J]. LWT, 2018, 96: 296-306
- [10] Zhou A M, Lin L Y, Liang Y, et al. Physicochemical properties of natural actomyosin from threadfin bream (*Nemipterus* spp.) induced by high hydrostatic pressure [J]. Food Chemistry, 2014, 156: 402-407
- [11] 王汇川,张志祥,宣晓婷,等.超高压对鲈鱼鱼糜品质与凝胶特性的影响[J].食品研究与开发,2018,39(13):13-17
- [12] 周爱梅,林丽英,梁燕,等.超高压诱导鱼糜凝胶性能的研究[J].现代食品科技,2013,29(9):2058-2062
- [13] Chen H Q, Zhou A M, Benjakul S, et al. The mechanism of low-level pressure coupled with heat treatment on water migration and gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi [J]. LWT, 2021, 150(7): 112086
- [14] 苏红,李雨欣,钱雪丽,等.鳙鱼、金枪鱼和三文鱼鱼头的营养分析与品质评价[J].食品工业科技,2019,40(17):212-217
- [15] 农业农村部渔业渔政管理局.中国渔业统计年鉴 2021[G].北京:中国农业出版社,2021
- [16] 姜启兴.鳙鱼肉热加工特性及其机理研究[D].无锡:江南大学,2015
- [17] 刘芳芳,林婉玲,韩迎雪,等.5种淡水鱼鱼糜凝胶基本特性研究[J].南方水产科学,2021,17(2):114-121
- [18] 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
- [19] 韩迎雪.我国主要淡水鱼品种脂质特征分析及其鱼肉凝胶性能研究[D].上海:上海海洋大学,2019
- [20] 杨文鸽,张问,王小飞,等.用低场核磁共振研究盐溶液漂洗对带鱼鱼糜凝胶品质的影响[J].农业工程学报,2016,32(7):263-269
- [21] 周爱梅,黄文华,刘欣,等.转谷氨酰胺酶对鳙鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].食品与发酵工业,2003,8:27-31
- [22] Pan T, Guo H Y, Li Y, et al. The effects of calcium chloride on the gel properties of porcine myosin- κ -carrageenan mixtures [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 63: 467-477
- [23] Balange A K, Benjakul S, Maqsood S. Gel strengthening effect of wood extract on surimi produced from mackerel stored in ice [J]. Journal of Food Science, 2009, 74(8): C619-C627
- [24] Maqsood S, Benjakul S, Balange A K. Effect of tannic acid and kiam wood extract on lipid oxidation and textural properties of fish emulsion sausages during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2011, 130(2): 408-416
- [25] Chen H Q, Zou Y Q, Zhou A M, et al. Insight into the effect of ice addition on the gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel combined with water migration [J]. Foods, 2021, 10(8):

- 1815
- [26] Wang L, Zhang M, Bhandari B, et al. Effects of malondialdehyde-induced protein modification on water functionality and physicochemical state of fish myofibrillar protein gel [J]. Food Research International, 2016, 86: 131-139
- [27] 郝磊勇,李汴生,阮征,等.高压与热结合处理对鱼糜凝胶质构特性的影响[J].食品与发酵工业,2005,7:35-38
- [28] Chen Y, Xu A, Yang R, et al. Myofibrillar protein structure and gel properties of *Trichiurus haumela* surimi subjected to high pressure or high pressure synergistic heat [J]. Food and Bioprocess Technology, 2020, 13(4): 589-598
- [29] Ye T, Dai H M, Lin L, et al. Employment of κ -carrageenan and high pressure processing for quality improvement of reduced NaCl surimi gels [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(9): e14074
- [30] 张一鸣,李思仪,沈晓溪,等.加热方式对混合鱼糜凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2021,42(19):64-69
- [31] Zhu Z W, Lanier T C, Farkas B E. High pressure effects on heat-induced gelation of threadfin bream (*Nemipterus* spp.) surimi [J]. Journal of Food Engineering, 2015, 146: 23-27
- [32] Buamard N, Benjakul S. Combination effect of high pressure treatment and ethanolic extract from coconut husk on gel properties of sardine surimi [J]. LWT, 2018, 91: 361-367
- [33] Orquidea M, Harshadrai R, Uwe S, et al. Structural changes of microbial transglutaminase during thermal and high-pressure treatment [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(5): 1716-1721
- [34] Wang L M, Xia M, Zhou Y H, et al. Gel properties of grass carp myofibrillar protein modified by low-frequency magnetic field during two-stage water bath heating [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105920
- [35] Ma X S, Yi S M, Yu Y M, et al. Changes in gel properties and water properties of *Nemipterus virgatus* surimi gel induced by high-pressure processing [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 61(2): 377-384
- [36] Cando D, Borderías A J, Moreno H M. Combined effect of aminoacids and microbial transglutaminase on gelation of low salt surimi content under high pressure processing [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2016, 36: 10-17
- [37] 王健一,郭泽镜,李致瑜,等.超高压处理对低盐鱼糜制品凝胶特性的影响研究[J].食品工业,2018,39(2):58-62
- [38] 付强,马海建,杨璐,等.超高压处理对鲢鱼糜品质和贮藏特性的影响[J].上海海洋大学学报,2016,25(3):465-470
- [39] 陆剑锋,邵明栓,林琳,等.卡拉胶和超高压对鱼糜凝胶性质的影响[J].农业机械学报,2011,42(12):164-170
- [40] Guo Z B, Li Z Y, Wang J Y, et al. Gelation properties and thermal gelling mechanism of golden threadfin bream myosin containing CaCl_2 induced by high pressure processing [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 43-52
- [41] Sun X D, Holley R A. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1)
- [42] Velazquez G, Mendez-Montecalvo M G, Welti-Chanes J, et al. Effect of high pressure processing and heat treatment on the gelation properties of blue crab meat proteins [J]. LWT, 2021,146: 111389
- [43] Zhang Z Y, Yang Y L, Zhou P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678-686
- [44] Diao X Q, Guan H N, Zhao X X, et al. Physicochemical and structural properties of composite gels prepared with myofibrillar protein and lard diacylglycerols [J]. Meat Science, 2016, 121: 333-341
- [45] 刘友明.鲢鱼和草鱼肌原纤维蛋白的聚集及鱼糜凝胶特性的研究[D].武汉:华中农业大学,2010
- [46] 叶韬,戴慧敏,林琳,等.不同处理条件下鲢鱼糜凝胶水分状态和微观结构的特征[J].南方水产科学,2019,15(2):102-109
- [47] 戴慧敏.超高压、卡拉胶对低钠盐白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D].合肥:合肥工业大学,2018
- [48] Bao Z J, Kang D, Li C, et al. Effect of salting on the water migration, physicochemical and textural characteristics, and microstructure of quail eggs [J]. LWT, 2020,132(5): 109847