

温-压结合处理对肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响研究进展

潘卓官, 邹怡茜, 陈海强, 周爱梅

Effects of High Hydrostatic-Pressure Combined with Heat Treatment on the Structure and Gel Properties of Myofibrillar Protein: A Review

PAN Zhuoguan, ZOU Yiqian, CHEN Haiqiang, and ZHOU Aimei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

牛骨胶原水解物抑制鲢鱼肌原纤维蛋白氧化和增强凝胶特性研究

Oxidation Inhibition and Gel Properties Enhancement of Myofibrillar Protein from Silver Carp by Bovine-bone Collagen Hydrolysate
食品工业科技. 2021, 42(11): 73-80 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080092>

高压均质处理对不同浓度肌原纤维蛋白水悬液理化特性及蛋白结构的影响

Effects of High Pressure Homogenization on Physicochemical Properties and Protein Structure of Myofibrillar Protein Aqueous Suspensions with Different Concentrations
食品工业科技. 2019, 40(21): 1-6,12 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.21.001>

川白獭兔肉肌原纤维蛋白热诱导凝胶制备工艺优化

Optimization of Preparation Process for Myofibrillar Proteins Thermally-induced Gel of Chuan-bai Rex Rabbit
食品工业科技. 2019, 40(24): 136-143,151 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.24.023>

薯类淀粉与卡拉胶共混体系特性及其对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Characteristics of the Mixed Systems of Tuber Starch and Carrageenan and Its Effect on the Gel Properties of Myofibrillar Protein
食品工业科技. 2020, 41(2): 1-8,15 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.02.001>

氧化对兔肉肌原纤维蛋白结构、乳化性和凝胶性的影响研究

Effect of Oxidation on the Structure, Emulsification and Gelability of Rabbit Meat Myofibrillar Protein
食品工业科技. 2020, 41(24): 22-30 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030298>

氧化对肌原纤维蛋白流变学特性及结构的影响

Effect of Oxidation on Rheological Properties and Structure of Myofibrillar Protein
食品工业科技. 2019, 40(9): 29-33 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.09.006>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

潘卓官, 邹怡茜, 陈海强, 等. 温-压结合处理对肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 455-464. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060297

PAN Zhuoguan, ZOU Yiqian, CHEN Haiqiang, et al. Effects of High Hydrostatic-Pressure Combined with Heat Treatment on the Structure and Gel Properties of Myofibrillar Protein: A Review[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(9): 455-464. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060297

· 专题综述 ·

温-压结合处理对肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响研究进展

潘卓官, 邹怡茜, 陈海强, 周爱梅*
(华南农业大学食品学院, 广东广州 510642)

摘要: 作为一项非热加工技术, 超高压 (high hydrostatic pressure, HHP) 技术常被用于改变蛋白质的结构和理化性质。将超高压与热处理相结合不仅能够降低所需压力和时间, 还能大大改善肉制品的品质。本文系统综述了温-压结合处理技术 (temperature-pressure combined treatment technology, TP) 对肌原纤维蛋白 (myofibrillar proteins, MP) 结构及凝胶特性的影响, 并对其作用机制进行了探讨, 以期为该技术的应用和推广提供理论支持。

关键词: 温-压结合处理技术, 肌原纤维蛋白, 凝胶特性, 结构特征

中图分类号: TS251.5

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)09-0455-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022060297



本文网刊:

Effects of High Hydrostatic-Pressure Combined with Heat Treatment on the Structure and Gel Properties of Myofibrillar Protein: A Review

PAN Zhuoguan, ZOU Yiqian, CHEN Haiqiang, ZHOU Aimei*

(College of Food Science, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: As a non-thermal processing technology, high hydrostatic pressure (HHP) technology is often used to change the structure and physicochemical properties of proteins. Combining HHP with heat treatment can not only reduce the pressure and time required for HHP treatment, but also greatly improve the quality of meat products. In this paper, the effects of temperature-pressure combined treatment technology (TP) on the structure and gel properties of myofibrillar proteins (MP) together with the relevant mechanism are systematically reviewed, providing theoretical support for the application and promotion of this technology.

Key words: temperature-pressure combined treatment technology; myofibrillar proteins; gel properties; structural characteristics

肌原纤维蛋白 (myofibrillar proteins, MP), 又称为盐溶性蛋白, 是组成肌肉中肌原纤维的蛋白质, 主要包括肌球蛋白、肌动蛋白及肌动球蛋白等^[1]。其中肌球蛋白, 又称为肌凝蛋白, 是肌原纤维蛋白中含量最高, 也是最重要的蛋白质^[2]。在食品加工过程中, 加热、剪切、高压等加工方式通常会改变蛋白质的结构和理化性质, 进而改变其功能特性和生物活性^[3-4]。常用的蛋白质改性方法主要分为物理法^[5]、化学法^[6]

和酶法^[7]。化学法操作简单, 产品稳定性高, 但容易造成环境和安全性问题; 酶法作用条件温和、效率高、专一性强, 但水解程度往往难以控制^[8]。近些年, 新兴的物理加工技术在蛋白质改性、产品品质提升等方面展现出较大的发展潜力。

热处理是食品加工中常用的技术之一^[9], 能够影响分子间氢键、二硫键、疏水键等化学作用力, 改变蛋白质的二、三和四级结构, 形成凝胶强度较好的

收稿日期: 2022-06-29

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: 潘卓官 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: 1500023781@qq.com。

* 通信作者: 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。

MP 凝胶^[10],但耗时较长,易破坏食品中的热敏成分,对产品的风味和营养物质产生不良影响^[11]。当前,我国肉糜制品加工企业大多采用传统的热处理方法,然而肉糜盐溶性蛋白在热处理和化学处理上都不稳定,导致其凝胶形成能力弱,采用传统热处理方法制备肉糜凝胶无法满足高品质肉糜制品的需求^[12]。超高压(high hydrostatic pressure, HHP)技术是一项非热加工的新技术,指以水或甘油为介质在 100~1000 MPa 压力下处理物料,使物料发生不可逆的改变^[13]。超高压处理一般不会破坏共价键,只影响非共价键,且能较好的保持食品原有的品质^[14-15]。HHP 技术已被证实可有效改善 MP 的凝胶特性^[16],但往往需要较高压力才能使肉糜的凝胶特性显著优于传统热处理凝胶,而将超高压与热处理相结合,形成一种温-压结合处理技术(temperature-pressure combined treatment technology, TP),不仅能够降低压力和时间,还能大大改善肉糜制品的品质。目前,国内外关于 TP 技术对肉糜 MP 作用的综述并不多见,基于此,本文详细综述了 TP 技术对 MP 结构和凝胶特性的影响,并探讨其作用机制,为该技术应用提供理论参考。

1 温-压结合处理技术对肌原纤维蛋白结构的影响

1.1 对肌原纤维蛋白巯基含量的影响

总巯基是反映蛋白质氧化变性程度的重要特征之一,包括隐藏在蛋白质内部和暴露在蛋白质表面的巯基,其中暴露在蛋白质表面的巯基称为活性巯基^[17]。活性巯基具有很强的还原性,对维持蛋白质三级结构和功能性质具有重要贡献^[18]。许多研究表明,适当的 TP 处理能够降低 MP 中的总巯基含量,增加活性巯基的含量。

郭丽萍等^[19]探究了超高压(100~600 MPa/15 min)结合热处理(25~55 °C/15 min)对猪肉 MP 相互作用力及结构的影响,研究发现随着压力和温度的上升,总巯基含量极显著下降,二硫键含量极显著上升,可能是巯基基团暴露于分子表面,与空气中的氧结合形成二硫键。此外,巯基之间的距离减小,也可以形成二硫键^[20-21]。Cando 等^[22]研究了超高压(150~500 MPa/10 min)和热处理(90 °C/20 min)对鳕鱼 MP 结构的影响,发现与 HHP 处理相比,TP 处理能够显著减少总巯基含量,而与所用压力无关。相对于 HHP 处理,热处理诱导 MP 变性展开,更有利于二硫键的形成^[23]。Zhang 等^[24]探讨了超高压(100~500 MPa/10 min)对热诱导(65 °C/20 min)肉鸡 MP 巯基含量的影响,发现低压处理(≤ 200 MPa)时,TP 组活性巯基含量随压力的增加而增加,且显著高于 HHP 组样品,可能是水进入蛋白质分子内部,促使蛋白质分子充分拉伸和展开,埋藏在内部区域的巯基和疏水性氨基酸侧链被非极性环境包围,并暴露于水环境中,使巯基活性化^[25]。而蛋白质构象变化和活性巯基的暴露有利于

分子间相互结合,促进蛋白质发生凝胶化^[20, 26]。但继续增加压力,活性巯基含量反而下降。从蛋白质聚集的角度可以解释这种现象,具体而言,较高的压力或温度促使未折叠的蛋白质通过分子间相互作用重新聚集和交联^[20],活性巯基可能会迅速重新排列并嵌入新的聚集体中^[27]。

1.2 对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

蛋白质的表面疏水性与其表面的疏水残基密切相关,是形成聚集体重要条件^[28]。非极性氨基酸残基侧链之间的疏水相互作用是维持蛋白质三级结构的主要作用力,在蛋白质功能特性中发挥着重要作用^[29]。蛋白质表面疏水性常用的测定方法是荧光探针法,利用 8-苯胺基萘-1-磺酸(1-Anilino-naphthalene-8-sulfonic acid, ANS)与蛋白质分子疏水核心区的非极性部分结合时会发出荧光^[30]。

近些年,许多研究证实,适当的 TP 处理能够增加 MP 的表面疏水性。Wang 等^[31]报道发现,肌球蛋白的表面疏水性随着压力的升高先缓慢增加后急剧增加;温度上升至 55 °C,表面疏水性有很大的增加。Zhang 等^[24]在研究高压(100~500 MPa/10 min)对热诱导(65 °C/20 min)肉鸡 MP 凝胶性质的影响时,发现相比于 HHP 处理,TP 处理能够显著增加表面疏水性,且与压力显著正相关,但在 300~500 MPa 处理之间没有显著差异,作者认为是较高的压力导致疏水性残基相互靠近形成聚集体,而无法更多地暴露出来供 ANS 结合。Huang 等^[32]探究了高压(100~600 MPa/10 min)结合热处理(25~55 °C/10 min)对猪肉 MP 表面疏水性的影响,结果表明 MP 的表面疏水性随着压力和温度的升高而增加,且在 200~400 MPa 加压过程中表现出明显的压力依赖性。有观点认为,表面疏水性的升高可能是 TP 处理过程中,MP 的双螺旋结构解开,内部的疏水基团和非极性氨基酸侧链暴露于蛋白质表面,形成分子间和分子内的疏水相互作用^[18];其次,还可能是暴露出更多的肌球蛋白疏水性核心区域,促使 ANS 可结合的位点更多,从而表现出更高的表面疏水性^[27, 33]。此外,有报告指出^[34],肌球蛋白交联位点在未折叠的疏水区域内是并列的,适当的压力或温度有利于肌球蛋白通过疏水相互作用形成尾-尾交联网络,稳定蛋白质网络构象,改善凝胶特性。

1.3 对肌原纤维蛋白化学作用力的影响

MP 凝胶形成的过程实质上是 MP 变性聚集的过程,其空间构象的稳定性离不开化学作用力的维持,包括氢键、二硫键、离子键和疏水相互作用等^[35]。各种作用力在凝胶网络中发挥着不同的作用,其中,氢键主要维持蛋白质的二级结构,起到稳定结合水、增强凝胶强度的作用^[36];二硫键是最主要的共价键,可发生在蛋白凝胶形成的各个阶段,对蛋白质特定分子结构起相关作用^[37];离子键和疏水相互作用是维持空间构象稳定的主要作用力^[38]。

研究发现,压力、温度等外界加工条件可改变 MP

的化学作用力,调控蛋白网络结构,进而改善肉糜的品质和加工性能。Guo 等^[12]探究了高压处理(100~500 MPa/3 min)和热处理(80 °C/30 min)对含 CaCl₂ 金线鱼肌球蛋白的凝胶机理,发现较低压力处理时,各种化学作用力逐渐增加,但压力超过 300 MPa 时,离子键降低,可能是较强的疏水相互作用掩盖了静电相互作用的极性残基^[39],二硫键也降低,可能是巯基在形成二硫键之前就进入到新的聚集体中。Huang 等^[32]报道称,猪肉 MP 中二硫键随着压力和温度的上升而显著增加,这与巯基基团的暴露和氧化有关^[40]。有研究证实,10000 MPa 的高压可以提供 8.37 kJ/mol 的能量^[41],而破坏二硫键需要 213.1 kJ/mol 的能量^[42],故一般的加压过程不会破坏二硫键。Chen 等^[43]研究了不同压力(100~600 MPa/15 min)和二段热处理(40 °C/30 min+90 °C/20 min)对金线鱼鱼糜凝胶特性的影响,发现与 HHP 处理相比,TP 处理能够减少离子键,增加氢键、疏水相互作用和二硫键,且低水平压力(≤200 MPa)样品的化学作用力较高,有助于锁定凝胶基质的自由水、促进蛋白质-水和蛋白质-蛋白质相互作用,形成致密有序的凝胶网络结构^[27,44]。众所周知,疏水相互作用和二硫键是形成凝胶网络结构的重要作用力,在蛋白质相互作用中起着关键的作用^[45]。蛋白质与水分子之间的静电相互作用和氢键对凝胶体系锁住水分子有重要贡献,能够在凝胶化过程中捕获更多的不易流动水^[27]。

1.4 对肌原纤维蛋白二级结构的影响

蛋白质的二级结构包括 α -螺旋、 β -折叠、 β -转角和无规卷曲^[46]。其中, α -螺旋的稳定性主要由多肽链羰基氧和氨基氢之间形成的分子内氢键维系^[47]; β -折叠由肽链间的氢键维系; β -转角由四个氨基酸残基组成,借助 1,4 残基之间形成的氢键来维系^[48];无规卷曲来源于 α -螺旋、 β -折叠和 β -转角的展开^[49]。大多数研究表明,适当的 TP 处理能够降低 MP 的 α -螺旋含量,增加 β -折叠和无规卷曲含量,而 β -转角含量因蛋白质种类和工艺条件的不同而有所差异。

Wang 等^[31]研究发现热处理过程中,不同压力处理的肌球蛋白表现出相同的趋势,即 α -螺旋比例降低, β -结构和无规卷曲比例增加,100 MPa 处理时 α -螺旋在 55~70 °C 处有最大的下降速率,说明肌球蛋白螺旋尾部的大部分解折叠发生在此温度范围内,有利于形成尾-尾交联网络。Chen 等^[50]探究了高压(300~450 MPa/5 min)协同热处理(90 °C/30 min)对带鱼 MP 结构的影响,发现 HHP 处理后 MP 中的 α -螺旋和 β -转角含量降低,而 β -折叠和无规卷曲含量有所增加,随后热处理将部分 β -折叠转变成 α -螺旋。与 α -螺旋相比, β -折叠的结构相对疏松,TP 处理能够暴露更多的氨基酸侧链,增强蛋白质之间的相互作用,有利于后续加热过程中的蛋白质凝胶化^[51]。Xue 等^[52]研究了兔肌球蛋白高压效应(100~300 MPa/9 min)与热凝胶(25~75 °C)之间的关系,发现相同压

力下,TP 处理能够显著降低肌球蛋白中 α -螺旋的含量,增加 β -折叠、 β -转角和无规卷曲的含量,这与 Chen 等^[43]对金线鱼糜的研究结果不一致,其发现相比于 HHP 处理,100 MPa 处理组(100 TP)中 α -螺旋和 β -折叠含量升高,而 β -转角和无规卷曲含量降低。出现上述差异,可能是由于不同的蛋白质系统(鱼糜或肌球蛋白)所导致的。首先,鱼糜不仅含有 MP,还含有少量的结缔组织和肌浆蛋白^[53],这些组分都具有各自的吸收特征光谱;其次,蛋白质-蛋白质或蛋白质-水之间的相互作用可能因分子类型或分子密度的不同而变化^[52]。根据勒夏特列原理,蛋白质体系在压力作用下会被压缩,且压缩程度与压力成正比,因此蛋白质、水和其他分子之间的相互作用因不同系统而异,蛋白质结构可能会以不同的方式发生变化。此外,适当的 TP 处理能够破坏 MP 中 α -螺旋的链内氢键,促进 α -螺旋向 β -折叠结构转变^[54],从而增加 β -折叠中主导地位的疏水相互作用结构,增强蛋白质之间的相互作用,改善凝胶特性^[55]。

2 温-压结合处理技术对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

蛋白质的凝胶特性对食品品质具有重要的影响,从某种程度上决定了食品的状态和等级。MP 在凝胶形成过程中通常涉及变性和聚集,即通过物理和化学反应形成三维网络结构,并截留水分、脂肪或其他成分^[20]。一般来说,蛋白质的凝胶特性包括凝胶强度、持水性、白度、质构等。

2.1 对肌原纤维蛋白凝胶强度的影响

凝胶强度是衡量肉制品质量的关键指标之一,反映凝胶网络结构的牢固程度。凝胶强度越大,说明蛋白质的凝胶性能越好,易被消费者所接受^[56]。许多研究证实,适当的 TP 处理能够增加 MP 的凝胶强度。表 1 列举了 TP 处理过程中部分 MP 的凝胶强度。

Guo 等^[12]研究发现,在 TP 处理过程中,较低压力(≤300 MPa)处理时肌球蛋白/Ca²⁺复合凝胶的凝胶强度显著增加,继续增加压力,凝胶强度反而下降,可能是由于疏水基团发生重排,蛋白 S-1 亚段中二硫键相互交联,形成了较大的聚集体^[65]。Chen 等^[43]也发现了类似的结论,较低压力(100~200 MPa)耦合二段热处理能够显著提高金线鱼糜的凝胶强度,进一步研究发现较低压力处理时内源性 TGase 酶活性仍保持在原始活性的 86% 以上,有利于随后 40 °C 热静置阶段催化蛋白质分子通过非二硫共价键发生相互作用^[16]。传统的热处理方法(40 °C 热静置和 90 °C 鱼糕化)在鱼糜加工中已有多年的历史,并且认为内源性 TGase 酶在 40 °C 热静置过程中对蛋白质凝胶化起着至关重要的作用^[66]。Tan 等^[63]探究了高压(50~300 MPa/30 min)和加热(90 °C/20 min)处理下罗非鱼糜的凝胶强度,发现相比于单独 HHP 处理,TP 处理能够显著增加破断强度和凝胶强度,但降低凹陷深度,可能是热凝胶化过程中产生了新的相互作用(如疏水键和

表1 TP处理过程中部分MP的凝胶强度
Table 1 Gel strength of some MP during TP treatment

原料	蛋白质	超高压参数	热处理参数	最优超高压(MPa)	凝胶强度	参考文献
金线鱼	鱼糜蛋白	100~600 MPa/15 min	40 °C/30 min+90 °C/20 min	100	1009.40 g·cm	[43]
兔	肌球蛋白	100~200 MPa/2 min	80 °C/20 min	150	14.64 g	[57]
飞鱼	鱼糜蛋白	40~200 MPa/10 min	40 °C/30 min+90 °C/30 min	80	65.52 N·mm	[58]
带鱼	鱼糜蛋白	350~400 MPa/8 min	90 °C/30 min	350	8568 g·mm	[59]
金线鱼	肌球蛋白	100~500 MPa/3 min	80 °C/30 min	300	-	[12]
尖吻鲈	鱼糜蛋白	300~500 MPa/10 min	50 °C/10 min	500	-	[60]
鸡胸肉	MP	200~400 MPa/30 min	75 °C/30 min	200	-	[61]
鸡胸肉	肌球蛋白	100~400 MPa/10 min	70 °C/30 min	200	-	[62]
罗非鱼	鱼糜蛋白	50~300 MPa/30 min	90 °C/20 min	200	-	[63]
鳙鱼	鱼糜蛋白	400~600 MPa/15 min	90 °C/25 min	400	-	[64]

注：“-”表示文中未列出具体的凝胶强度值。

二硫键等),从而形成稳定的凝胶网络结构^[67]。适当的TP处理后,MP结构展开,更多的酪氨酸、色氨酸等疏水性氨基酸残基暴露,增强疏水相互作用,同时暴露蛋白质内部的巯基基团,有利于二硫键的形成或交换,进而形成稳定的三维网络结构,增加凝胶强度^[68]。

2.2 对肌原纤维蛋白凝胶白度的影响

白度是评价肉糜制品品质的重要感官指标,反映肉糜凝胶的外观状态和新鲜程度^[69],通常用亮度(L^* 值)、红度(a^* 值)和黄度(b^* 值)来表示。一般来说, L^* 值越高、 b^* 值越低,白度越高,肉糜凝胶品质越好。白度的变化能够反映肉糜凝胶内部的结构变化,与蛋白质的变性、交联及聚集等密切相关^[70]。研究表明,适当的TP处理能够增加MP凝胶的白度。

Chen等^[50]在对带鱼MP的研究中发现,相同压力下TP组 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值和白度显著高于HHP组,且300 MPa处理时白度达到最大值,继续加压,白度反而下降。朱金鹏等^[71]探究了高压(50~400 MPa/30 min)协同热处理(75 °C/30 min)对鸡肉肠品质的影响,发现 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值随压力增加先下降后升高,白度的趋势则相反,其中200 MPa处理时白度和持水性最高。凝胶的 a^* 值降低可能是TP处理引起组成血红蛋白的珠蛋白发生变性或血红素的释放^[72]。有观点认为,凝胶白度变化归因于MP结构及其持水性的变化^[73]。较低压力能够提高凝胶白度,而压力过高则对白度不利,可能是较高的压力导致MP过度变性和聚集,掩盖了蛋白质-水的结合位点,降低了蛋白质与水的相互作用,进而降低持水性,削弱光散射作用。Tan等^[63]研究表明,罗非鱼糜凝胶的白度随压力和温度的增加而升高,且温度对白度的影响比压力大,从外观上看,热诱导的凝胶表现为不透明,而压力诱导的凝胶保持了原有的颜色和光泽度。目前,关于压力和温度对肉制品颜色变化的作用机制有多种说法,一方面是由于蛋白质-水和蛋白质-蛋白质相互作用及二硫键交联,形成致密的蛋白质凝胶基质和较高的持水性,为光散射提供更大的反射面积^[74-75];另一方面是由于肌红蛋白和MP的变性、脂质和蛋白质的氧化所引起的^[76]。

2.3 对肌原纤维蛋白凝胶质构的影响

全质构(TPA)主要通过模拟人口腔的咬合动作,对样品进行两次咀嚼,获得与感官评定相对应的一些参数,比如硬度、弹性、咀嚼性和内聚性等^[77]。其中,硬度和弹性是研究最多的两个参数^[78]。质构特性是评价肉制品鲜度的重要指标,能间接反映蛋白质基质的结构完整性及与其他成分相结合的状态^[79]。研究表明,适当的TP处理能够提高MP凝胶的质构特性,改善肉制品的口感。

Chen等^[50]对带鱼凝胶特性进行了研究,发现与HHP处理相比,TP处理后凝胶硬度、弹性、内聚性和咀嚼性显著降低;压力诱导后,TP组硬度、弹性和咀嚼性降低,但内聚性增加。HHP和TP处理的肉糜凝胶质构参数具有显著性差异,可能是由于HHP通过诱导MP变性,主要依靠氢键形成凝胶,而热处理是离子键和疏水键主导形成的凝胶^[80]。此外,热处理过程中MP发生完全变性,并通过二硫键进行聚集^[22]。Martínez-Maldonado等^[81]探究了高压(100~600 MPa/5 min)结合二段热处理(40 °C/30 min+90 °C/20 min)对蓝蟹肉质构特性的影响,发现100 MPa处理时凝胶具有最高的硬度、弹性和内聚性,但较高的压力(≥ 300 MPa)反而会降低质构参数,可能是由于较低的压力处理有利于MP在随后热处理过程中共价和非共价键的生成,形成致密的凝胶网络结构^[82]。

TP处理在开发健康的低盐肉制品中也表现出一定的潜力。Zheng等^[83]研究了温-压处理(200~400 MPa, 75 °C, 30 min)和氯化钠(0~2 g/100 g)对鸡肉品质的影响,发现200 MPa处理时硬度最高,且在1~2 g/100 g盐浓度中没有显著性差异。Truong等^[84]对尖吻鲈进行研究时发现,在10 g/kg的盐浓度下,蒸煮前高压(300~500 MPa/10 min, 90 °C/30 min)处理的鱼糜凝胶具有与20 g/kg盐浓度传统热诱导(90 °C/30 min)凝胶相当的质构特性和保水能力,且凝胶网络结构更为光滑致密。有研究认为,适当的压力处理后MP发生部分变性,盐的存在会降低蛋白质的热稳定性,随后热处理过程中较低温度就能使MP发生完全变性,从而减少能量输入,但这种变性效果取

决于盐的种类和浓度,如 1% 的氯化钠能够增加肌球蛋白头部区域的变性,而 0.25% 的三聚磷酸钠对变性有一定的保护作用^[85]。由此可见,适当的 TP 处理能够提高肉制品的口感,降低盐含量,符合健康饮食理念。

2.4 对肌原纤维蛋白溶解度和浊度的影响

溶解度和浊度常被用来表征蛋白质的变性和聚集,其中溶解度反映蛋白质的变性程度和在溶液中的状态,溶解度越高,说明蛋白质在溶液中分散越好,越有利于其发挥功能性^[86];浊度反映蛋白质的构象变化和聚集情况,蛋白质聚集后溶液中悬浮颗粒的直径增加,导致光密度增加^[87]。许多研究表明,适当的 TP 处理能够提高 MP 的溶解度,降低浊度。

Huang 等^[32] 研究发现,在溶解度方面,适当加热(25~45 °C)时猪肉 MP 的溶解度随压力的增加呈现出先升高后降低的趋势;在浊度方面,适当加热(25~45 °C)时 MP 浊度缓慢下降,但 55 °C 处理的溶解度和浊度相对恒定。郑海波^[88] 探究了高压(200~400 MPa/30 min)结合热处理(35~65 °C/30 min)过程中鸡肌球蛋白形成凝胶的机理,发现不同压力下肌球蛋白出现沉淀的温度不同,常压组溶解度在 50 °C 时明显降低,而加压组需要到 65 °C,而浊度的变化与溶解度呈现负相关,高压组浊度在 50 °C 处理后较低,说明高压能够减缓肌球蛋白在高温下的热变性聚集^[89]。有观点指出,蛋白质的溶解度取决于蛋白质分子间的疏水相互作用和静电相互作用之间的平衡^[90-91],不同工艺条件下蛋白质溶解度的差异可能是疏水和静电相互作用的差异。Xue 等^[92] 研究了高压(100~300 MPa/9 min)处理兔肌球蛋白亚片段在加热过程(25~70 °C/5 min)中的浊度变化,发现加热能够提高重酶解肌球蛋白(heavy meromyosin, HMM)的浊度,且 70 °C 温度条件下 HMM 的浊度随压力的增加而降低。在 TP 处理过程中,MP 二级结构和空间构象发生改变,疏水基团暴露,并通过离子键、疏水键等作用力使蛋白质聚集^[93]。众所周知,蛋白质的变性展开和聚集是同时进行的,当 MP 聚集速率大于展开速率时,溶液中悬浮颗粒的直径会增加,导致光散射和吸光度增加,从而表现为溶解度降低和浊度升高^[94-95]。因此,在实际生产应用中要根据原料中蛋白质特性,选取合适的工艺条件,使蛋白质在变性展开和聚集之间处于平衡状态,以获得高溶解度的蛋白溶液。

2.5 对肌原纤维蛋白凝胶持水性和水分迁移的影响

持水性(water holding capacity, WHC)表示肉制品对水分的束缚能力,反映了凝胶网络中基质形态和蛋白质-水相互作用^[96]。低场核磁共振(low field-nuclear magnetic resonance, LF-NMR)已被广泛应用于监测水在食品体系中的流动性和分布的物理化学状态^[97]。质子横向弛豫时间(T_{21} 、 T_{22} 和 T_{23})和单位质量峰面积(A_{21} 、 A_{22} 和 A_{23})的变化能够定量结合

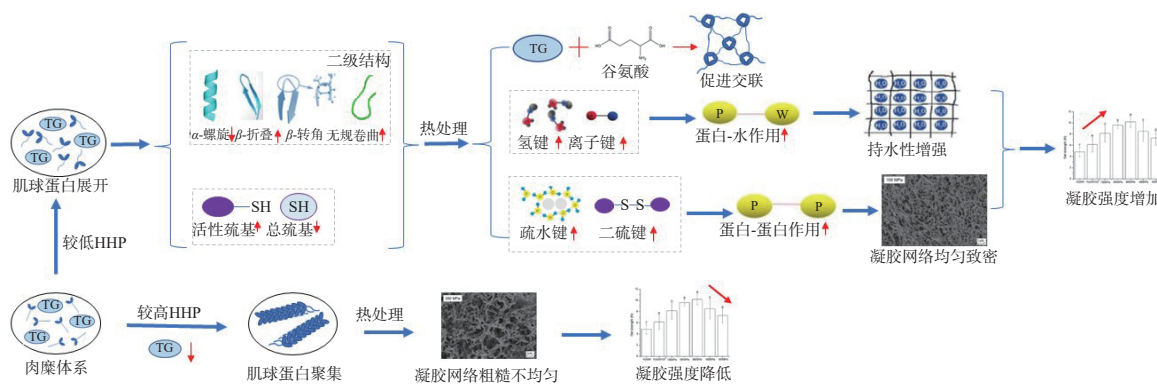
水、不易流动水和自由水的束缚能力和相对含量^[12]。研究表明,适当的 TP 处理能够促使 MP 凝胶网络截留更多的水分子,提高持水性。

Guo 等^[12] 报道称,TP 处理过程中,较低压力(≤ 300 MPa)处理能够提高金线鱼肌球蛋白的持水性,同时 LF-NMR 分析表明, A_{22} 比例变化与持水性呈正相关,较低压力处理能够减少 T_{22} 弛豫时间,增加 A_{22} 比例,但继续增加压力,持水性反而下降,可能是较高的压力破坏了蛋白质-水相互作用,使水从凝胶基质中排出^[25]。Zhang 等^[24] 在对肉鸡 MP 进行研究时发现,随着压力的增加,持水性呈现先上升后下降的趋势,进一步通过 LF-NMR 观察到 A_{21} & A_{22} 比例不断增加,而 A_{23} 比例显著降低,可能是更多的自由水与蛋白质结合或截留在凝胶网络中。有观点认为,肉糜凝胶中蛋白质与水分子通过氢键结合,不仅能够增加凝胶弹性,还能降低键能,从而使凝胶网络结构更加稳定^[98]。Chen 等^[43] 研究发现,相比于 HHP 组,TP 组的持水性显著降低,且 100~200 MPa 处理时持水性和 A_{21} & A_{22} 比例最高,但压力超过 400 MPa 时, A_{21} & A_{22} 比例显著降低, A_{23} 比例显著升高。较高的压力容易形成大聚集体,掩盖活性基团和氢键交联位点,形成疏松且不均匀的凝胶网络结构,导致不易流动水排出并转化为自由水,降低持水性^[12, 18]。Chen 等^[50] 在对带鱼 MP 进行研究中也得到了类似的结论,与 HHP 处理相比,高压后热处理会显著降低持水性,可能是由于热处理减少了与蛋白质相关的水分子数量^[50]。适当的 HHP 处理诱导 MP 解折叠,水分子进入疏水核心并附着在暴露的残基上,有利于随后热处理阶段中蛋白质的交联和聚集,形成致密的凝胶网络结构,从而锁住更多的不易流动水,增加持水性^[33, 99]。综上所述,食品加工过程中应结合蛋白质自身的特性,充分考虑水分子分布和迁移对蛋白质结构和功能特性的影响。

2.6 对肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响

MP 凝胶的微观结构主要是指凝胶网络结构,与蛋白质的聚集情况、分子间相互作用、化学作用力等密切相关。凝胶网络结构越均匀致密有序,凝胶强度越高,持水性越好^[100-101]。表征凝胶微观结构常用的手段有扫描电镜^[102]、原子力显微镜^[103] 和激光共聚焦显微镜^[104] 等。研究表明,适当的 TP 处理有利于 MP 形成均匀、致密且有序的凝胶网络结构,改善凝胶特性。

Guo 等^[12] 通过扫描电镜发现,较低压力(200~300 MPa、80 °C)处理时,含 CaCl_2 的肌球蛋白形成光滑、连续和致密的凝胶网状结构,但过高压力下凝胶空腔变大且不连续,同时原子力显微镜观察到,200 MPa 处理时肌球蛋白聚集体分解成更小的亚基或单体。作者认为肌球蛋白单体能够促进疏水相互作用和二硫键交联,从而增强肌球蛋白的机械性能。Chen 等^[43] 在金线鱼糜的研究中也发现了类似的现

图1 TP技术改善肉糜凝胶特性机制图^[12, 52]Fig.1 Diagram of the mechanism by which TP technology improved the gel properties of minced meat^[12, 52]

象,在TP处理过程中,100 MPa处理的鱼糜凝胶呈现蜂窝状、有序的三维网络结构,但随着压力的增加,凝胶网络出现无序的孔洞和聚集体。有观点认为,由于水分子倾向于被困在较小的孔洞中,因此均匀致密的凝胶网络有助于截留更多的水分子,从而表现出较好的凝胶特性^[105]。Zhou等^[106]研究发现,相比于单独热处理和HHP处理,TP处理的肌球蛋白形成均匀、致密且有序的凝胶网络结构,同时原子力显微镜观察到TP组拥有更多和更高的肌球蛋白簇。在TP处理过程中,肌球蛋白去折叠,导致 β -折叠结构增多,疏水性氨基酸暴露,有利于蛋白质分子之间的相互作用,进而促使蛋白质聚集形成蛋白簇^[107]。众所周知,蛋白质的变性展开和聚集是同时进行的,二者之间的平衡对凝胶网络的形成起着至关重要的作用,如果MP的聚集速度快于展开速度,就会形成粗糙且不均匀的凝胶网络^[94-95]。较高的压力处理后,MP发生过度变性聚集,在随后的热处理过程中难以继续展开,从而形成不规则的聚集体^[12]。而适当的压力诱导肉糜MP变性展开,二级结构发生改变,减少总巯基含量,增加活性巯基含量,同时内源性TG酶保持较高的活性,有利于随后热处理阶段中内源性TG酶诱导蛋白质交联、增强化学作用力,促进蛋白质分子间的相互作用,形成均匀致密有序的凝胶网络结构,锁住更多的水分子,改善凝胶特性(见图1)。

3 总结与展望

作为一种非热加工技术,超高压技术具有其他加工技术所不具备的优势,能够最大限度地保持食品原有的感官品质、营养物质和风味。单独使用超高压技术,往往需要较高的压力且要求机械设备具有良好的稳定性,若结合热处理,则在一定程度上能够减轻压力带来的品质变化,减少加压所需的时间和强度。目前,关于温-压结合处理技术诱导MP形成凝胶的作用机制尚不够深入,实验手段存在一定局限性,无法获取蛋白质更微观层面的结构变化信息,后续可采用分子动力学模拟技术,从分子和原子层面上研究温-压结合处理过程中MP结构变化信息。因此,深入开展温-压结合处理技术的研究和探讨,有利于该技术在食品工业上的推广与应用。

参考文献

- [1] CHOI Y M, KIM B C. Muscle fiber characteristics, myofibrillar protein isoforms, and meat quality[J]. *Livestock Science*, 2009, 122(2-3): 105-118.
- [2] 耿翠竹, 王海滨, 崔莹莹, 等. 蛋白质降解对猪肉制品品质影响的研究进展[J]. *肉类研究*, 2016, 30(2): 35-39. [GENG C Z, WANG H B, CUI Y Y, et al. A review of the influence of protein degradation on the quality of pork products[J]. *Meat Research*, 2016, 30(2): 35-39.]
- [3] LIANG Y, GUO B, ZHOU A, et al. Effect of high pressure treatment on gel characteristics and gel formation mechanism of big-head carp (*Aristichthys nobilis*) surimi gels[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(5): e13155.
- [4] FENG D, XUE Y, LI Z, et al. Effects of microwave radiation and water bath heating on the physicochemical properties of actomyosin from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) during setting[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2017, 41(4): e13031.
- [5] YAN B, PARK S H, BALASUBRAMANIAM V M. Influence of high pressure homogenization with and without lecithin on particle size and physicochemical properties of whey protein-based emulsions[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2017, 40(6): e12578.
- [6] STANIC-VUCINIC D, VELICKOVIC T C. The modifications of bovine beta-lactoglobulin-effects on its structural and functional properties[J]. *Journal of the Serbian Chemical Society*, 2013, 78(3): 445-461.
- [7] SHAO S, SHEN X, GUO M. Zinc-loaded whey protein nanoparticles prepared by enzymatic cross-linking and desolvation[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(9): 2205-2211.
- [8] JUNG S, LAMSAL B P, STEPIEN V, et al. Functionality of soy protein produced by enzyme-assisted extraction[J]. *Journal of the American Oil Chemists Society*, 2006, 83(1): 71-78.
- [9] YANG C, WANG Y, VASANTHAN T, et al. Impacts of pH and heating temperature on formation mechanisms and properties of thermally induced canola protein gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40: 225-236.
- [10] LIU R, ZHAO S, LIU Y, et al. Effect of pH on the gel properties and secondary structure of fish myosin[J]. *Food Chemistry*,

2010, 121(1): 196–202.

[11] 刘兴静, 刘斌, 韩清华, 等. 超高压对苹果汁微生物和多酚氧化酶的影响[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(9): 4–6. [LIU X J, LIU B, HAN Q H, et al. Effect of ultra high pressure treatment on bacterium and polyphenol oxidase of apple juice[J]. Food Research and Development, 2012, 33(9): 4–6.]

[12] GUO Z, LI Z, WANG J, et al. Gelation properties and thermal gelling mechanism of golden threadfin bream myosin containing CaCl₂ induced by high pressure processing[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 95: 43–52.

[13] MIRMOGHATAIE L, ALIABADI S S, HOSSEINI S M. Recent approaches in physical modification of protein functionality [J]. Food Chemistry, 2016, 199: 619–627.

[14] MARCINIAK A, SUWAL S, NADERI N, et al. Enhancing enzymatic hydrolysis of food proteins and production of bioactive peptides using high hydrostatic pressure technology[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 80: 187–198.

[15] WANG B, LIU F, LUO S, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the properties of heat-induced wheat gluten gels[J]. Food and Bioprocess Technology, 2019, 12(2): 220–227.

[16] 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.

[17] HAMADA M, ISHIZAKI S, NAGAI T. Variation of SH content and kamaboko-gel forming ability of shark muscle protein by electrolysis[J]. Journal of the Shimonoseki University of Fisheries, 1994, 42(3): 131–135.

[18] CAO Y, XIA T, ZHOU G, et al. The mechanism of high pressure-induced gels of rabbit myosin[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 16: 41–46.

[19] 郭丽萍, 熊双丽, 黄业传. 超高压结合热处理对猪肉蛋白质相互作用力及结构的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(2): 196–204. [GUO L P, XIONG S L, HUANG Y C. Effects of ultra-high pressure combined with thermal treatment on molecular interaction and structure of pork proteins[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(2): 196–204.]

[20] ZHOU A, LIN L, 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.

[21] LIU R, ZHAO S, XIE B, et al. Contribution of protein conformation and intermolecular bonds to fish and pork gelation properties[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(5): 898–906.

[22] CANDO D, MORENO H M, TOVAR C A, et al. Effect of high pressure and/or temperature over gelation of isolated hake myofibrils[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 7(11): 3197–3207.

[23] VISSCHERS R W, DE JONGH H H J. Disulphide bond formation in food protein aggregation and gelation[J]. Biotechnology Advances, 2005, 23(1): 75–80.

[24] ZHANG Z, YANG Y, TANG X, et al. Chemical forces and water holding capacity study of heat-induced myofibrillar protein gel as affected by high pressure[J]. Food Chemistry, 2015, 188: 111–118.

[25] CANDO D, HERRANZ B, BORDERIAS A J, et al. Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 176–187.

[26] QIU C, XIA W, JIANG Q. Pressure-induced changes of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myofibrillar protein structure[J]. European Food Research and Technology, 2014, 238(5): 753–761.

[27] LI Z, WANG J, ZHENG B, et al. Effects of high pressure processing on gelation properties and molecular forces of myosin containing deacetylated konjac glucomannan[J]. Food Chemistry, 2019, 291: 117–125.

[28] NAKAI S, LI C E. Hydrophobicity-functionality relationship of food proteins[J]. Hydrophobic Interactions in Food Systems, 1988, 2: 47–48.

[29] WINTER R, DZWOLAK W. Exploring the temperature-pressure configurational landscape of biomolecules: From lipid membranes to proteins[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2005, 363(1827): 537–563.

[30] BALANGE A K, BENJAKUL S. Cross-linking activity of oxidised tannic acid towards mackerel muscle proteins as affected by protein types and setting temperatures[J]. Food Chemistry, 2010, 120(1): 268–277.

[31] WANG M, CHEN X, ZOU Y, et al. High-pressure processing-induced conformational changes during heating affect water holding capacity of myosin gel[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52(3): 724–732.

[32] HUANG Y, GUO L, XIONG S, et al. Property and structure changes of myofibril protein in pork treated by high pressure combined with heat[J]. Food Science and Technology International, 2016, 22(7): 647–662.

[33] WANG J, LI Z, ZHENG B, et al. Effect of ultra-high pressure on the structure and gelling properties of low salt golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin[J]. LWT-Food Science and Technology, 2019, 100: 381–390.

[34] CHAN J K, GILL T A, PAULSON A T. Thermal aggregation of myosin subfragments from cod and herring[J]. Journal of Food Science, 1993, 58(5): 1057–1061.

[35] GÓMEZ-GUILLÉN M C, BORDERÍAS A J, MONTERO P. Chemical interactions of nonmuscle proteins in the network of sardine (*Sardina pilchardus*) muscle gels[J]. LWT, 1997, 30(6): 602–608.

[36] 梁辉红, 卢涵, 张香美. 蛋白二、三级结构对鱼糜凝胶质构和持水力的影响及其测定方法研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 87–96. [LIANG Y H, LU H, ZHANG X M. Research progress on the effects of protein secondary and tertiary structures on texture and water-holding capacity of surimi gel and protein structure determination methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 87–96.]

[37] 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. [LI J R, YU Y M, YI S M, et al. Research of progress in thermal gelation mechanisms of surimi products[J]. Science and Technology of Food In-

- dustry, 2015, 36(23): 380–385.]
- [38] 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]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2021, 70: 105326.
- [39] ZHANG L, LI Q, SHI J, et al. Changes in chemical interactions and gel properties of heat-induced surimi gels from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during setting and heating: Effects of different washing solutions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 116–124.
- [40] HSU K C, HWANG J S, YU C C, et al. Changes in conformation and in sulfhydryl groups of actomyosin of tilapia (*Oreochromis niloticus*) on hydrostatic pressure treatment[J]. *Food Chemistry*, 2007, 103(2): 560–564.
- [41] MORILD E. The theory of pressure effects on enzymes[J]. *Advances in Protein Chemistry*, 1981, 34: 93–166.
- [42] PITZER K S. The nature of the chemical bond and the structure of molecules and crystals: An introduction to modern structural chemistry[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 1960, 82(15): 4121–4121.
- [43] CHEN H, ZHOU A, 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: 112086.
- [44] LI X, HE X, MAO L, et al. Modification of the structural and rheological properties of β -lactoglobulin/ κ -carrageenan mixed gels induced by high pressure processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2020, 274: 109851.
- [45] 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): 33–51.
- [46] CEPERO-BETANCOURT Y, OPAZO-NAVARRETE M, JANSSEN A E M, et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) on protein structure and digestibility of red abalone (*Haliotis rufescens*) muscle[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 60: 102282.
- [47] WANG J, YANG Y, TANG X, et al. Effects of pulsed ultrasound on rheological and structural properties of chicken myofibrillar protein[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2017, 38: 225–233.
- [48] ZHANG Y, YANG R, ZHANG W, et al. Structural characterization and physicochemical properties of protein extracted from soybean meal assisted by steam flash-explosion with dilute acid soaking[J]. *Food Chemistry*, 2017, 219: 48–53.
- [49] LIU H, XU Y, ZU S, et al. Effects of high hydrostatic pressure on the conformational structure and gel properties of myofibrillar protein and meat quality: A review[J]. *Foods*, 2021, 10(8): 1872.
- [50] 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.
- [51] IMTIAZ-UL-ISLAM M, HONG L, LANGRISH T. CO₂ capture using whey protein isolate[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2011, 171(3): 1069–1081.
- [52] XUE S, QIAN C, KIM Y H B, et al. High-pressure effects on myosin in relation to heat gelation: A micro-perspective study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 84: 219–228.
- [53] GORDON A, BARBUT S. Mechanisms of meat batter stabilization: A review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 1992, 32(4): 299–332.
- [54] LI Z, SUN Q, ZHENG Y, et al. Effect of two-step microwave heating on the gelation properties of golden threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) myosin[J]. *Food Chemistry*, 2020, 328: 127104.
- [55] LIU R, ZHAO S, XIONG S, et al. Role of secondary structures in the gelation of porcine myosin at different pH values[J]. *Meat Science*, 2008, 80(3): 632–639.
- [56] 仪淑敏, 马兴胜, 励建荣, 等. 超高压对金线鱼鱼肉凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(10): 129–133. [YI S M, MA X S, LI J R, et al. Effect of ultra-high pressure on gel properties of fish (*Nemipterus virgatus*) sausage[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(10): 129–133.]
- [57] BAI Y, ZHANG Y, CUI X, et al. Effect of high-pressure treatment on the heat-induced emulsion gelation of rabbit myosin[J]. *LWT*, 2022, 154: 112719.
- [58] MORENO H M, BARGIELA V, TOVAR C A, et al. High pressure applied to frozen flying fish (*Parexocoetus brachyterus*) surimi: Effect on physicochemical and rheological properties of gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 48: 127–134.
- [59] CHEN Y, XU A, YANG R, et al. Chemical interactions and rheological properties of hairtail (*Trichiurus haumela*) surimi: Effects of chopping and pressure[J]. *Food Bioscience*, 2020, 38: 100781.
- [60] TRUONG B Q, BUCKOW R, NGUYEN M. Mechanical and functional properties of unwashed barramundi (*Lates calcarifer*) gels as affected by high-pressure processing at three different temperatures and salt concentrations[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2020, 29(4): 373–382.
- [61] ZHENG H, HAN M, BAI Y, et al. Combination of high pressure and heat on the gelation of chicken myofibrillar proteins[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2019, 52: 122–130.
- [62] CHEN X, CHEN C, ZHOU Y, et al. Effects of high pressure processing on the thermal gelling properties of chicken breast myosin containin κ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 40: 262–272.
- [63] TAN F, LAI K, HSU K. A comparative study on physical properties and chemical interactions of gels from tilapia meat pastes induced by heat and pressure[J]. *Journal of Texture Studies*, 2010, 41(2): 153–170.
- [64] 郝磊勇, 李沛生, 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, 31(7): 35–38. [HAO L Y, LI B S, RUAN Z, et al. The effect of combined processes of high pressure and heat on surimi gel texture[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2005, 31(7): 35–38.]
- [65] WANG Y, ZHOU Y, WANG X, et al. Origin of high-pressure induced changes in the properties of reduced-sodium chicken myofibrillar protein gels containing CaCl₂: Physicochemical and molecular modification perspectives[J]. *Food Chemistry*, 2020, 319:

- 126535.
- [66] BENJAKUL S, CHANTARASUWAN C, VISESSANGUAN W. Effect of medium temperature setting on gelling characteristics of surimi from some tropical fish[J]. *Food Chemistry*, 2003, 82(4): 567–574.
- [67] LANIER T C, CARVAJAL P, YONGSAWATDIGUL J. Surimi gelation chemistry[J]. *Surimi and Surimi Seafood*, 2005, 2: 436–489.
- [68] MA R, LIU H, LI Y, et al. Effects of high hydrostatic pressure treatment: Characterization of eel (*Anguilla japonica*) surimi, structure, and angiotensin-converting enzyme inhibitory activity of myofibrillar protein[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2021, 14(9): 1631–1639.
- [69] ALIPOUR H J, REZAEI M, SHABANPOUR B, et al. Effects of sulfated polysaccharides from green alga *Ulva intestinalis* on physicochemical properties and microstructure of silver carp surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 87–96.
- [70] 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.
- [71] 朱金鹏, 王浩明, 郑海波, 等. 高压协同热处理改善鸡肉肠品质的研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(7): 125–129. [ZHU J P, WANG H M, ZHENG H B, et al. Quality improvement of chicken sausage by heating under pressure[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45(7): 125–129.]
- [72] GUO B, ZHOU A, LIU G, et al. Changes of physicochemical properties of greater lizardfish (*Saurida tumbil*) surimi gels treated with high pressure combined with microbial transglutaminase[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2019, 43(10): e14150.
- [73] SHIE J S, PARK J W. Physical characteristics of surimi seafood as affected by thermal processing conditions[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(2): 287–290.
- [74] LIANG F, LIN L, HE T, et al. Effect of transglutaminase on gel properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105261.
- [75] URESTI R M, VELAZQUEZ G, RAMIREZ J A, et al. Effect of high-pressure treatments on mechanical and functional properties of restructured products from arrowtooth flounder (*Atheresthes stomias*) [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2004, 84(13): 1741–1749.
- [76] de OLIVEIRA F A, NETO O C, DOS SANTOS L M R, et al. Effect of high pressure on fish meat quality: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 66: 1–19.
- [77] 李颖畅, 宋素珍, 杨钟燕, 等. 甲醛对鲑鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 60–69. [LI Y C, SONG S Z, YANG Z Y, et al. Effects of formaldehyde on the myofibrillar protein gel properties of peru squid[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(8): 60–69.]
- [78] NIELSEN G S, PETERSEN B R, MØLLER A J. Impact of salt, phosphate and temperature on the effect of a transglutaminase (F XIIIa) on the texture of restructured meat[J]. *Meat Science*, 1995, 41(3): 293–299.
- [79] SOUISSI N, JRIDI M, NASRI R, et al. Effects of the edible cuttlefish gelatin on textural, sensorial and physicochemical quality of octopus sausage[J]. *LWT*, 2016, 65: 18–24.
- [80] BRIONES-LABARCA V, PEREZ-WON M, ZAMARCA M, et al. Effects of high hydrostatic pressure on microstructure, texture, colour and biochemical changes of red abalone (*Haliotis rufescens*) during cold storage time[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2012, 13: 42–50.
- [81] MARTÍNEZ-MALDONADO M A, VELAZQUEZ G, DE LEÓN J A R, et al. Effect of high pressure processing on heat-induced gelling capacity of blue crab (*Callinectes sapidus*) meat[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102253.
- [82] HWANG J, LAI K, HSU K. Changes in textural and rheological properties of gels from tilapia muscle proteins induced by high pressure and setting[J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(2): 746–753.
- [83] ZHENG H, HAN M, YANG H, et al. Application of high pressure to chicken meat batters during heating modifies physicochemical properties, enabling salt reduction for high quality products[J]. *LWT*, 2017, 84: 693–700.
- [84] TRUONG B Q, BUCKOW R, NGUYEN M H, et al. Gelation of barramundi (*Lates calcarifer*) minced muscle as affected by pressure and thermal treatments at low salt concentration[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2017, 97(11): 3781–3789.
- [85] SPERONI F, SZERMAN N, VAUDAGNA S R. High hydrostatic pressure processing of beef patties: Effects of pressure level and sodium tripolyphosphate and sodium chloride concentrations on thermal and aggregative properties of proteins[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2014, 23: 10–17.
- [86] DONG M, XU Y, ZHANG Y, et al. Physicochemical and structural properties of myofibrillar proteins isolated from pale, soft, exudative (PSE)-like chicken breast meat: Effects of pulsed electric field (PEF)[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 59: 102277.
- [87] LI Y, KONG B, XIA X, et al. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp (*Cyprinus carpio*) muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system[J]. *Process Biochemistry*, 2013, 48(5): 863–870.
- [88] 郑海波. 高压下加热处理对鸡肉糜凝胶品质的影响及机制研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018. [ZHENG H B. Effects of heating under pressure on the gelation of chicken batters and its mechanism[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.]
- [89] FERNANDEZ-MARTIN F. Bird muscles under hydrostatic high-pressure/temperature combinations: A DSC evaluation[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2007, 87(1): 285–290.
- [90] 康大成, 刘云国, 张万刚. 高功率超声波对蛋白质功能特性的影响及其在肉品加工中的应用研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(23): 289–297. [KANG D C, LIU Y G, ZHANG W G. Recent advances in understanding the effect of high power ultrasound on protein functional characteristics and its applications in meat processing[J]. *Food Science*, 2019, 40(23): 289–297.]
- [91] CHANTARASUWAN C, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. The effects of sodium bicarbonate on conformational changes of

- natural actomyosin from Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*)[J]. *Food Chemistry*, 2011, 129(4): 1636–1643.
- [92] XUE Z, WANG M, CHEN X, et al. Conformational and rheological changes of high-pressure processing treated rabbit myosin subfragments during heating[J]. *LWT*, 2020, 122: 108994.
- [93] CAO H, JIAO X, FAN D, et al. Microwave irradiation promotes aggregation behavior of myosin through conformation changes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 11–19.
- [94] GROSSI A, OLSEN K, BOLUMAR T, et al. The effect of high pressure on the functional properties of pork myofibrillar proteins[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 1005–1015.
- [95] WANG L, XIA M, ZHOU Y, 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.
- [96] HAN M, WANG P, XU X, et al. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with microstructural characteristics[J]. *Food Research International*, 2014, 62: 1175–1182.
- [97] BERTRAM H C, KOHLER A, BOCKER U, et al. Heat-induced changes in myofibrillar protein structures and myowater of two pork qualities: A combined FT-IR spectroscopy and low-field NMR relaxometry study[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(5): 1740–1746.
- [98] NAKASAKO M. Structural characteristics in protein hydration investigated by cryogenic X-ray crystal structure analyses[J]. *Journal of Biological Physics*, 2002, 28(2): 129–137.
- [99] TINTCHEV F, BINDRICH U, TOEPFL S, et al. High hydrostatic pressure/temperature modeling of frankfurter batters[J]. *Meat Science*, 2013, 94(3): 376–387.
- [100] 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): 60–64. [MI H B, WANG C, ZHAO B, et al. Effects of soybean, flaxseed and perilla seed oils on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 60–64.]
- [101] 王艳霞, 张金丽, 张瑞婷, 等. 鱼种和亲水胶体对鱼糜制品凝胶性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(2): 143–147. [WANG Y X, ZHANG J L, ZHANG R T, et al. Effects of fish species and hydrocolloids on the gel properties of surimi gels[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(2): 143–147.]
- [102] ZHUANG X, HAN M, BAI Y, et al. Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel improved by insoluble dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 219–226.
- [103] 朱杰, 孙润广. 原子力显微镜的基本原理及其方法学研究[J]. *生命科学仪器*, 2005(1): 22–26. [ZHU J, SUN R G. Introduction to atomic force microscope and its manipulation[J]. *Life Science Instruments*, 2005(1): 22–26.]
- [104] 俞滢洁, 林婷, 杨胜平, 等. 姜黄素结合胡椒碱对冷链物流运输过程中三文鱼保鲜效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 152–160. [YU Y J, LIN T, YANG S P, et al. The effect of curcumin combined with piperine on quality of salmon (*Salmo salar*) in cold chain logistics[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(20): 152–160.]
- [105] WANG X, XIONG Y L, SATO H. Rheological enhancement of pork myofibrillar protein-lipid emulsion composite gels via glucose oxidase oxidation/transglutaminase cross-linking pathway[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(38): 8451–8458.
- [106] ZHOU A, CHEN H, ZOU Y, et al. Insight into the mechanism of optimal low-level pressure coupled with heat treatment to improve the gel properties of *Nemipterus virgatus* surimi combined with water migration[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111230.
- [107] GAO R, WANG Y, MU J, et al. Effect of L-histidine on the heat-induced aggregation of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) myosin in low/high ionic strength solution[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 75: 174–181.