

李钊, 秦荣, 袁孝瑞, 等. 超高压对鲤鱼肉糜-MgCl₂凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(16): 53–58. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120081

LI Zhao, QIN Rong, YUAN Xiaorui, et al. Effects of High Pressure Processing on Gel Properties of Carp Surimi Containing Magnesium Chloride [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(16): 53–58. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120081

· 研究与探讨 ·

超高压对鲤鱼肉糜-MgCl₂凝胶特性的影响

李 钊¹, 秦 荣¹, 袁孝瑞¹, 刘 玉¹, 赵岩岩^{1,*}, 卢河东², 王树勋³, 王书贤¹, 訾红丽¹, 周海旭¹, 赵圣明¹

(1.河南科技学院食品学院,河南新乡 453003;

2.淮阴工学院生命科学与食品工程学院,江苏淮安 223003;

3.新乡县市场监督管理局,河南新乡 453731)

摘要:为研究超高压对低盐鲤鱼肉糜凝胶品质的影响,本文在低盐条件下(2% NaCl),探讨了不同压力超高压处理(100~400 MPa)对含有0.3%氯化镁(MgCl₂)鲤鱼肉糜凝胶的蒸煮得率、保水性、色泽、质构、凝胶强度和流变学特性的改善作用。结果表明:适当的压力处理结合MgCl₂可以显著提高鲤鱼肉糜的凝胶品质。当处理压力为200 MPa时,鲤鱼肉糜凝胶的蒸煮得率、保水性、硬度、凝胶强度均达到最大值,分别为93.14%、95.24%、3327.25 g、3277 g。与对照组相比,适当的压力处理可以显著改善鲤鱼肉糜-MgCl₂凝胶的储能模量(G'),同时对产品的色泽影响较小。因此,超高压结合氯化镁可以改善低盐鲤鱼肉糜凝胶的品质,为低盐淡水鱼糜制品的开发提供理论依据。

关键词:超高压,氯化镁,鲤鱼肉糜,凝胶特性

中图分类号:TS254.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0306(2021)16-0053-06

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2020120081

Effects of High Pressure Processing on Gel Properties of Carp Surimi Containing Magnesium Chloride

LI Zhao¹, QIN Rong¹, YUAN Xiaorui¹, LIU Yu¹, ZHAO Yanyan^{1,*}, LU Hedong², WANG Shuxun³,
WANG Shuxian¹, ZI Hongli¹, ZHOU Haixu¹, ZHAO Shengming¹

(1.School of Food Science and Technology, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China;

2.School of Life Science and Food Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;

3.Administration for Market Regulation of Xinxiang Country, Xinxiang 453731, China)

Abstract: In order to explore the effects of high pressure processing (HPP) on low-salt carp surimi, the improvements of carp surimi with magnesium chloride 2% NaCl and 0.3% MgCl₂ under different pressures on the gelation yield, water retention, color, texture, gel strength and rheological properties were studied. The results showed that the gel quality of carp surimi could be significantly improved by appropriate pressure treatment combined with MgCl₂. When the treatment pressure was 200 MPa, the cooking yield, water holding capacity, texture and gel strength of carp surimi gel reached the maximum value (93.14%, 95.24%, 3327.25 g, 3277 g, respectively). Appropriate pressure treatment could improve storage modulus (G') and less affect the color of carp surimi gel. Therefore, high pressure processing combined with magnesium chloride could improve the gel properties of low-salt carp surimi and provide a theoretical basis for the development of low-salt fresh water surimi products.

Key words: high pressure processing; magnesium chloride; carp surimi; gel properties

收稿日期: 2020-12-09

基金项目: 河南省大学生创新创业计划项目 (S202010467033); 河南省科技攻关计划项目 (202102110060, 202102110061, 202102310143); 国家自然科学基金 (31801524); 江苏省自然科学基金 (BK20170461)。

作者简介: 李钊 (1997-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 肉品科学, E-mail: 278649057@qq.com。

* 通信作者: 赵岩岩 (1987-), 女, 博士, 讲师, 研究方向: 肉品科学, E-mail: zhaoyanyan@hist.edu.cn。

鲤鱼是我国目前养殖和消费量最大的一种淡水鱼。鲤鱼由于具有营养丰富,肉质口感细腻且市场价格低廉等优势,深受我国消费者的喜爱^[1-2]。采用鲤鱼鱼糜制成的鱼丸和鱼肉肠等鱼糜制品近年来也备受关注^[3]。但是鲤鱼等淡水鱼与海水鱼相比,肌原纤维蛋白的凝胶性能较差,影响鲤鱼鱼糜制品的食用品质。为了改善淡水鱼糜加工过程中凝胶性能差等缺点,提高淡水鱼鱼糜制品的市场竞争力,目前,食品加工中常用的物理方法(包括超高压、电磁场、超声波等)^[4-6]和化学方法(包括多糖、转股酰胺酶和金属离子等)^[7-10]都已经被应用于改善淡水鱼糜品质方面的研究。

超高压作为一种非热加工技术,可以通过改善蛋白质结构,提高鱼肉蛋白凝胶的功能特性,改善鱼糜制品的品质^[11]。Wang 等^[12]的研究表明超高压可以显著提高金线鱼糜的凝胶特性。氯化钠通过导致肉中的盐溶性蛋白溶出,促进蛋白形成有序的凝胶结构,从而提高凝胶肉制品的品质^[13]。但是众所周知,食盐的摄入量与高血压和心脑血管疾病密切相关^[14],因此实现肉制品的低盐化,对改善人体健康具有重要的意义。氯化镁和氯化钠同属于氯化物,是低盐肉制品的开发中研究较多的一种替代盐^[15]。有研究表明,氯化镁部分替代氯化钠,可以增加猪肉肌原纤维蛋白的溶解度,提高肉蛋白的凝胶特性^[16]。近年来,在低盐肉制品研究中,超高压与钠盐替代盐的结合处理用于改善低盐肉制品品质的研究报道已经越来越多^[17-19]。但是关于超高压与氯化镁部分替代食盐相结合用于改善鲤鱼鱼糜凝胶品质的研究还未见相关报道。因此,本文以新鲜鲤鱼鱼糜为原料,通过分析其持水性、色泽、质构和流变特性等,研究超高压和氯化镁部分替代氯化钠对鲤鱼鱼糜凝胶品质的改善作用,为提高低盐淡水鱼糜制品的品质提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲜活鲤鱼 重量约 1000 g, 河南新乡某农贸市场; 无水氯化镁 分析纯, 国药集团沪试试剂有限公司; 食盐 食品级, 山东肥城精制盐厂有限公司。

Sartous 电子精密天平 北京赛多利斯天平有限公司; T25 高速匀浆器 德国 IKA 公司; CR-400 色差计 日本美能达公司; HAAKEMARS 流变仪、离心机 Thermo scientific 公司; UMC-5C 斩拌机 德国 Stephan 公司; TA-XT plus 质构仪 英国 Stable Micro Systems(SMS)公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鲤鱼鱼糜的制备 在低温条件下,将鲜活鲤鱼去头尾、内脏、去皮脱骨后进行采肉,首先去除鱼肉中肉眼可见的结缔组织和脂肪,然后用 5 倍于鱼肉质量的冰水漂洗三次后,放入斩拌机中斩拌 5 min,参考潘杰等^[13]的方法以及本研究前期的预实验,确

定 NaCl 和 MgCl₂ 的添加量分别为 2.0% 和 0.3%(质量分数)鱼糜重量,然后再斩拌 5 min,使 NaCl 和 MgCl₂ 分散均匀,得到鱼糜混合体系。

1.2.2 超高压处理 参考 Cando 等^[4]的方法,取上述搅拌鱼糜样品 60 g 左右放入干净的聚乙烯袋中,然后进行真空包装。将真空包装好的样品放置在超高压装置中,样品分别经过 100、200、300 和 400 MPa 处理 10 min,以未经高压处理的样品为对照。样品受压前后均保藏于 4 ℃ 冰箱中。

1.2.3 鲤鱼鱼糜凝胶的制备 参考王健一等^[20]方法略有改进。将经过超高压处理的鲤鱼鱼糜样品取出直接卷成圆柱形,用橡皮筋固定好形状后采用两段式加热法获得鱼糜凝胶。首先在 40 ℃ 条件下凝胶化 40 min,再将温度调至到 90 ℃ 加热 30 min,加热处理完成后立即用冰水迅速冷却,然后 4 ℃ 冷藏 24 h 后用于测定各项指标。

1.2.4 蒸煮得率的测定 参考赵岩岩等^[21]方法,首先用吸水纸除去 4 ℃ 冷却 12 h 的鱼肉糜凝胶表面的渗出液,然后分别测量不同压力处理的鱼肉糜凝胶重量,蒸煮得率按照以下公式计算,平行测定 5 次。

$$\text{蒸煮得率}(\%) = M_1 \times 100 / M_2$$

式中: M₁ 为鱼肉糜凝胶重量, g; M₂ 为生鱼肉糜重量, g。

1.2.5 保水性(WHC)的测定 参考计红芳等^[22]的方法,首先将样品切成 15 mm 厚的圆柱体,测量质量记为 M₁,然后将鲤鱼鱼糜凝胶样品用滤纸包好后置于 50 mL 离心试管中,在 4 ℃、5000 r/min 条件下离心 10 min。取出离心后样品,测量重量记为 M₂,每个压力下做 5 组。通过如下公式计算样品的保水性:

$$\text{保水性}(\%) = M_2 \times 100 / M_1$$

式中: M₁ 为鱼肉糜凝胶重量, g; M₂ 为生鱼肉糜重量, g。

1.2.6 色泽的测定 使用色差仪对肉糜凝胶中心位置进行测定,记录样品的 L* 值、a* 值和 b* 值。其中 L* 表示亮度, a* 表示红度值, b* 表示黄度值,每个样品均匀选取 5 个点进行测定。

1.2.7 质构和凝胶强度的测定 质构测定参考 Zhao 等^[23]方法略做修改。将鱼糜凝胶样品制成直径 2.5 cm, 高 2 cm 的圆柱体。测定参数为: 选择 TPA 模式, P/36R 探头; 测前速度 5.0 mm/s, 测中速度 2.0 mm/s, 测后速度 5.0 mm/s, 压缩比为 40%, 触发力为 5 g, 触发类型为自动。每组样品平行测定 5 次。凝胶强度的测定参数为: 选择 Return To Start 模式, P/0.5 探头; 测前速度 1.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 5.0 mm/s, 穿透比 50%, 数据采集速度 100 pps。每组样品平行测定 5 次。

1.2.8 流变性质的测定 参考 Li 等^[24]方法略作修改。将鲤鱼鱼糜样品置放于两个 50 mm 圆形平板探头之间,间隙为 1 mm,用 P35 Ti 平板探头采用升

温程序进行测定。测定参数为: 样品起始温度 20 ℃, 保持 10 min 后以 2 ℃/min 的升温速率上升至 90 ℃, 振荡频率为 0.1 Hz。测定升温过程中样品储能模量 (G') 的变化。

1.3 数据处理

所有试验数据采用 SPSS 20.0 软件进行分析, 试验结果以平均值±标准差表示, 采用 Duncan 检验进行显著性分析, 绘图采用 Excel 2013 软件。

2 结果与分析

2.1 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶蒸煮得率的影响

不同压力处理对鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)蒸煮得率的影响见图 1A。由图 1A 可知, 随着处理压力的升高, 鲤鱼鱼糜凝胶的蒸煮得率呈先升高后降低的趋势。与对照组相比, 当处理压力为 200 MPa 时, 鲤鱼鱼糜蒸煮得率最高, 达到 93.14%, 主要因为适当的压力建议可以促进蛋白质的解聚, 并提高蛋白质的溶解性,

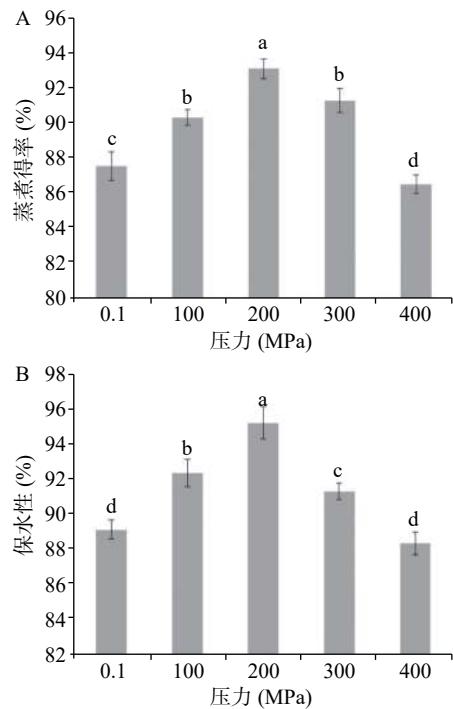


图 1 不同压力处理对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶蒸煮得率(A)和保水性(B)的影响

Fig.1 Effect of different pressure treatments on the cooking yield (A) and water holding capacity (B) of carp surimi-MgCl₂ gel

注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 图 2 同。

从而增强了自由水与蛋白质之间的结合能力^[13]。当处理压力超过 300 MPa 时, 蒸煮得率明显下降。可能是由于过高的压力处理使鱼糜中蛋白质分子二级空间结构被破坏, 蛋白质结构变松散, 促使蛋白质分子内部疏水基团暴露出来, 最终降低了鱼糜中蛋白质结合水分的能力^[25]。

2.2 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶保水性的影响

不同压力处理对鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶保水性的影响见图 1B。由图 1B 可知, 随着处理压力的升高, 鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶保水性呈现先升高后降低的趋势。与对照组相比, 当处理压力为 200 MPa 时保水性最高可达到 95.24%。适当的压力可以促使蛋白质解聚, 提高其溶解性, 促进鱼糜蛋白的伸展和交联, 增强蛋白质与水分子之间的水化作用, 有助于均匀致密的凝胶网络结构形成, 从而提高了凝胶的保水性^[25-26]。但是当处理压力超过 300 MPa 时, 鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶的保水性呈显著下降趋势 ($P<0.05$)。过高的压力可能破坏蛋白质与钠离子和镁离子之间的相互作用, 破坏凝胶网络结构, 导致凝胶的保水性降低; 另外过高的压力还可能导致肌节断裂, 导致肌丝结构中的水分流失, 导致保水性降低^[8,27]。

2.3 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶色泽的影响

不同压力处理对鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶色泽影响见表 1。由表 1 可知, 随着处理压力的增加, 鲤鱼鱼糜凝胶的 L^* 值呈现上升趋势, a^* 和 b^* 值呈现下降趋势。与对照组相比, 当处理压力为 400 MPa 时, L^* 值上升, 而 a^* 值和 b^* 值明显下降。陈燕婷等研究表明超高压处理可以导致带鱼鱼糜的 L^* 值升高, a^* 值和 b^* 值下降, 并认为 L^* 值的升高可能是高压可促进紧密凝胶结构的形成, 锁住更多的水分, 从而减少光的散射^[28]。但是本研究的结果发现适当的压力可提高鲤鱼鱼糜凝胶的保水性, 过高的压力导致保水性降低, 因此, 随着处理压力增加导致的鲤鱼肉糜凝胶 L^* 值升高可能是因为高压作用可以导致肌红蛋白变性或者失去亚铁血红素, 从而使 L^* 值升高, a^* 值下降^[29]。

2.4 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶质构的影响

不同压力处理对鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶质构影响见表 2。由表 2 可知, 随着处理压力的增加鲤鱼鱼糜凝胶的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性均呈现先升高后降低的趋势。当处理压力为 200 MPa 时, 样

表 1 不同压力处理对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶色泽的影响

Table 1 Effect of different pressure treatments on the color of carp surimi-MgCl₂ gel

压力值(MPa)	L^* 值	a^* 值	b^* 值
0.1	68.74±0.34 ^d	3.74±0.15 ^a	10.65±0.15 ^a
100	69.89±0.28 ^c	3.67±0.08 ^a	10.33±0.06 ^b
200	70.51±0.14 ^b	3.50±0.03 ^b	9.78±0.14 ^c
300	70.33±0.09 ^b	3.37±0.11 ^c	8.33±0.08 ^d
400	71.20±0.22 ^a	3.28±0.17 ^c	7.99±0.12 ^e

注: 不同小写字母表示差异显著($P<0.05$); 表 2 同。

表 2 不同压力处理对鲤鱼鱼糜肉糜-MgCl₂ 凝胶质构的影响
Table 2 Effect of different pressure treatments on the texture of carp surimi-MgCl₂ gel

处理压力(MPa)	硬度(g)	弹性	内聚性	咀嚼性(g)
0.1	2670.93±86.45 ^c	0.872±0.02 ^b	0.569±0.02 ^c	1326.06±73.21 ^c
100	3097.94±48.97 ^b	0.935±0.03 ^{ab}	0.606±0.01 ^b	1569.97±81.45 ^b
200	3327.25±69.02 ^a	0.983±0.03 ^a	0.652±0.02 ^a	1678.25±34.47 ^a
300	1986.50±37.87 ^d	0.862±0.02 ^b	0.478±0.03 ^d	877.84±38.29 ^d
400	1955.66±63.25 ^d	0.811±0.02 ^c	0.444±0.01 ^d	770.80±58.19 ^e

品的硬度、弹性、内聚性以及咀嚼性均达到最高, 分别达到 3327.25、0.983、0.652 和 1678.25 g, 显著优于对照组($P<0.05$)。高压处理使鱼糜体积缩小, 有助于蛋白质之间化学键和疏水作用力的形成, 促进蛋白质之间发生交联形成紧密的凝胶结构, 使凝胶结构更稳定, 从而导致硬度、弹性、内聚性和咀嚼性升高^[30]。才卫川等^[31]的研究表明, 适当的压力可通过增加肉糜的团聚性, 从而提高凝胶的硬度, 但是过高的压力会破坏肌原纤维蛋白结构, 从而导致硬度降低。

2.5 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶强度的影响

不同压力处理对鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶强度影响见图 2。由图 2 可知, 随着处理压力的上升鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶的凝胶强度呈现先升高后降低的趋势, 与对照组相比, 当处理压力为 200 MPa 时鲤鱼肉糜的凝胶强度最高, 达到 3277 g, 显著高于对照组($P<0.05$)。而当处理压力超过 300 MPa 时, 凝胶强度显著降低($P<0.05$)。Ye 等^[8]研究表明, 200 MPa 的压力处理可以显著提高鲢鱼鱼糜的凝胶强度, 可能是因为超高压处理可以增强鱼糜蛋白质之间的交联程度, 同时使受压的蛋白质暴露出更多的基团, 这些基团可以与盐离子之间相作用, 可增加含盐聚合物的数量从而最终改善鱼糜凝胶的凝胶强度^[32]。此外, 鱼糜内源蛋白酶活性也是影响鱼糜凝胶强度的重要因素, 高压可以通过抑制鱼糜的内源性蛋白酶的活性, 减少蛋白酶对蛋白网络结构的降解, 从而改善凝胶强度^[33]。但是过高的压力可能加剧蛋白质的变性, 降低蛋白之间的相互作用, 导致了鱼糜凝胶蛋白的交联度降低, 不利于其中的凝胶网络结构的形成, 从而会使形成的凝胶强度降低^[25]。

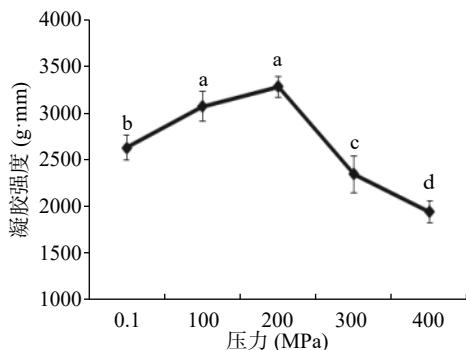


图 2 不同压力处理对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶强度的影响

Fig.2 Effect of different pressure treatments on the gel strength of carp surimi-MgCl₂

2.6 超高压对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶储能模量 (G')

影响

流变学变化是研究食品加工过程中蛋白组分功能变化的重要手段之一。储能模量又称为弹性模量, 代表流体中的弹性部分, 可以有效反映凝胶三维网络结构形成过程中贮存的能量以及凝胶强度^[34], G'值越高表明凝胶强度越好。如图 3 所示, 鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶在加热过程中可分为三个变化阶段: 阶段一(20~47 °C), 随着温度的升高, 鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.3%)凝胶的 G'值也不断升高, 可能是因为在此温度范围内, 肌球蛋白开始变性, 导致蛋白之间发生聚集交联, 形成不稳定的凝胶网络结构^[20]。阶段二(47~58 °C), 随着温度升高, 鲤鱼肉糜-MgCl₂(0.2%)凝胶的 G'值开始下降, 主要是因为鱼糜内源转谷氨酰胺酶在 50 °C 左右的活性最高, 导致凝胶劣化。阶段三(58~80 °C), 随着温度的进一步升高, 肌球蛋白结构完全解螺旋, 在二硫键和疏水作用下, 蛋白质交联聚集形成结构更加稳定的不可逆凝胶网络结构^[35]。与未经压力处理的对照组相比, 随着处理压力的上升鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶 G'值呈现先升高后降低的趋势, 当处理压力为 200 MPa 时肉糜-MgCl₂ 凝胶的 G'值最高, 明显高于对照组。而当处理压力超过 300 MPa 时, G'值明显降低。适当的压力处理可导致肌球蛋白的部分变性, 当温度升高时, 促进蛋白质的进一步凝胶化, 形成更加稳定的凝胶网络结构。而当处理压力超过 300 MPa 后, 过高的压力导致蛋白质过度变性, 过度变性的蛋白不易聚集形成紧凑、稳定的

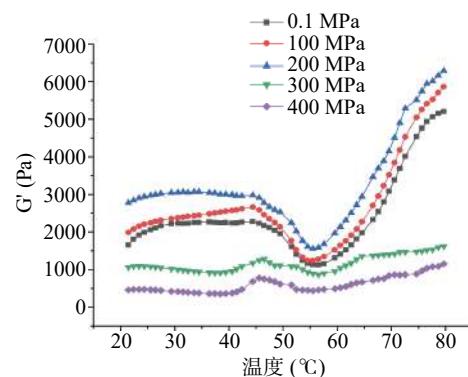


图 3 不同压力处理对鲤鱼鱼糜-MgCl₂ 凝胶储能模量(G')的影响

Fig.3 Effect of different pressure treatments on the storage modulus (G') of carp surimi-MgCl₂ gel

凝胶网络结构, 导致加热过程中的 G' 曲线特征峰的消失^[36]。这与王健一等^[20]和 Wang 等^[12]的研究结果类似, 适当的压力可以提高金线鱼糜的 G' 值, 而过高的压力导致 G' 值降低。

3 结论

本研究结果表明适当的压力处理可以改善鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶的品质。与 0.1 MPa(常压状态)的对照组相比, 随着处理压力的升高, 鲤鱼肉糜-MgCl₂ 凝胶 L* 值呈现上升趋势, a* 和 b* 值呈现下降趋势, 蒸煮得率、保水性、质构特性、凝胶强度和储能模量呈先升高后降低的趋势, 在 200 MPa 时分别达到最高值; 当压力大于 300 MPa 时, 过高的压力可能破坏蛋白质与钠离子和镁离子之间的相互作用, 导致凝胶网络结构被破坏, 最终导致凝胶蒸煮得率、保水性、质构特性和储能模量均呈降低趋势。因此, 超高压结合氯化镁在低盐淡水鱼糜肉制品开发方面具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] 杜洪振, 孙钦秀, 杨振, 等. 转谷氨酰胺酶对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(6): 126-130, 278.
- [2] 杨明. 马铃薯淀粉及转谷氨酰胺酶对鲤鱼肌原纤维蛋白功能特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [3] 崔旭海, 毕海丹, 崔晓莹, 等. 不同食用蛋白的添加对鲤鱼肉糜流变和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 195-200, 225.
- [4] 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.
- [5] 范大明, 焦熙栋. 电磁场和电场改善鱼糜制品凝胶特性的机制及应用[J]. 中国食品学报, 2019(1): 1-11.
- [6] Xiong Y, Li Q, Miao S, et al. Effect of ultrasound on physicochemical properties of emulsion stabilized by fish myofibrillar protein and xanthan gum[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2019, 54: 225-234.
- [7] Petcharat T, Benjakul S. Effect of gellan incorporation on gel properties of bigeye snapper surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 746-753.
- [8] Ye T, Dai H, 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.
- [9] Feng J, Cao A, Cai L, et al. Effects of partial substitution of NaCl on gel properties of fish myofibrillar protein during heating treatment mediated by microbial transglutaminase[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 93: 1-8.
- [10] 余永名, 李晓丽, 刘宇彤, 等. 漂洗液中氯化镁浓度对鲤鱼肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 322-327.
- [11] Chen X, Tume R K, Xiong Y, et al. Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2018, 58(17): 2981-3003.
- [12] 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.
- [13] 潘杰. 超高压和氯化镁对鸡肉糜凝胶特性的影响及机制[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2017.
- [14] De Marchi M, Manuelian C L, Ton S, et al. Prediction of sodium content in commercial processed meat products using near infrared spectroscopy[J]. *Meat Science*, 2017, 125: 61-65.
- [15] 丁习林, 王桂瑛, 王雪峰, 等. 肉制品加工中镁盐部分替代氯化钠的应用研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 327-332, 339.
- [16] 魏朝贵, 吴菊清, 邵俊花, 等. KCl 和 MgCl₂ 部分替代 NaCl 对猪肉肌原纤维蛋白乳化凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2014, 35(5): 89-95.
- [17] Tamm A, Bolumar T, Bajovic B, et al. Salt (NaCl) reduction in cooked ham by a combined approach of high pressure treatment and the salt replacer KCl[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2016, 36: 294-302.
- [18] 谢婷婷, 姚静, 李月双, 等. MgCl₂ 对低钠盐 κ -卡拉胶-肌球蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 35-40.
- [19] Wang Y, Zhou Y, Li P, et al. Combined effect of CaCl₂ and high pressure processing on the solubility of chicken breast myofibrillar proteins under sodium-reduced conditions[J]. *Food Chemistry*, 2018, 269: 236-243.
- [20] 王健一, 郭泽镔, 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(2): 58-62.
- [21] 赵岩岩, 王书彦, 李钊, 等. γ -聚谷氨酸对鲤鱼肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(20): 73-78.
- [22] 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 豌豆蛋白对鸡肉糜热诱导凝胶品质特性与微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(4): 74-79.
- [23] Zhao S, Li N, Li Z, et al. Shelf life of fresh chilled pork as affected by antimicrobial intervention with nisin, tea polyphenols, chitosan, and their combination[J]. *International Journal of Food Properties*, 2019, 22(1): 1047-1063.
- [24] Li K, Liu J Y, Fu L, et al. Effect of gellan gum on functional properties of low-fat chicken meat batters[J]. *Journal of Texture Studies*, 2019, 50(2): 131-138.
- [25] 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.
- [26] Tabilo-Munizaga G, Barbosa-Cánovas G V. Pressurized and heat-treated surimi gels as affected by potato starch and egg white: Microstructure and water-holding capacity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 38(1): 47-57.
- [27] Ma F, Chen C, Zheng L, et al. Effect of high pressure

- processing on the gel properties of salt-soluble meat protein containing CaCl_2 and κ -carrageenan[J]. *Meat Science*, 2013, 95(1): 22–26.
- [28] 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.
- [29] 陈燕婷, 林露, 高星, 等. 超高压对带鱼鱼糜凝胶特性及其肌原纤维蛋白结构的影响[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 115–120.
- [30] 王健一. 超高压处理对低盐鱼糜制品品质特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2018.
- [31] 才卫川, 张坤生, 任云霞. TG 酶协同超高压处理对鸡肉糜制品品质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(18): 22–27.
- [32] Zhang Z, Yang Y, Zhou P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein[J]. *Food Chemistry*, 2017, 217: 678–686.
- [33] Sutloet P, Sompongse W, Morioka K. Effect of protease inhibitors on proteolytic degradation of rohu (*Labeo rohita*) gel[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2018, 53(11): 2509–2514.
- [34] Cao Y, Xia T, Zhou G, et al. The mechanism of high pressure-induced gels of rabbit myosin[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2012, 16: 41–46.
- [35] Yin T, Park J W. Textural and rheological properties of Pacific whiting surimi as affected by nano-scaled fish bone and heating rates[J]. *Food chemistry*, 2015, 180: 42–47.
- [36] Galazka V B, Smith D, Ledward D A, et al. Complexes of bovine serum albumin with sulphated polysaccharides: effects of pH, ionic strength and high pressure treatment[J]. *Food Chemistry*, 1999, 64(3): 303–310.