

超声波处理对不同盐添加量白鲢鱼糜凝胶特性的影响

于楠楠*, 吴家程, 苑衡, 解春芝, 刘君, 陈学红
(徐州工程学院食品与生物工程学院, 江苏徐州 221018)

摘要: 为改善低盐鱼糜制品凝胶品质, 以白鲢鱼糜为原料, 研究超声波处理功率对不同盐添加量 (质量分数为 3% 和 1.5%) 鱼糜凝胶质构特性、凝胶强度、色泽、持水性的影响, 并通过测定鱼糜蛋白溶解度、分子间作用力及红外光谱来探究超声波的作用机制。结果表明, 随着超声波功率的增加, 高盐、低盐处理鱼糜凝胶的硬度、弹性、凝胶强度均有所提高, 超声功率为 360 W 处理的低盐鱼糜凝胶硬度、弹性与高盐鱼糜凝胶差异不显著。超声功率为 360 W 时, 添加 3% 食盐和 1.5% 食盐的鱼糜持水性分别提高 10.48% 和 22.08%。而超声波处理对高盐和低盐鱼糜凝胶的白度均无显著影响。溶解度、分子间作用力及红外光谱分析表明超声波处理能够提高鱼糜凝胶溶解度, 降低体系中氢键含量, 且经超声处理后鱼糜蛋白中 α -螺旋含量减少, 说明超声处理能够促进活性基团暴露, 增强与水分子相互结合, 提高鱼糜凝胶形成能力。该研究表明采用 360 W 超声功率处理可显著改善低盐鱼糜凝胶特性, 有助于降低鱼糜制品中食盐的添加量, 从而开发品质优良的低盐鱼糜产品。

关键词: 鱼糜; 超声波处理; 低盐; 凝胶特性

文章编号: 1673-9078(2025)07-286-293

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.7.0396

Effects of Ultrasonic Treatment on Gel Properties of Silver Carp Surimi with Varying Salt Levels

YU Nannan*, WU Jiacheng, YUAN Heng, XIE Chunzhi, LIU Jun, CHEN Xuehong
(College of Food and Biological Engineering, Xuzhou University of Technology, Xuzhou 221018, China)

Abstract: The effects of ultrasonic power on the gel properties, including textural characteristics, gel strength, color, and water-holding capacity (WHC), of silver carp surimi with varying salt levels (3% and 1.5% *m/m*) were investigated to improve the gel properties of low-salt surimi. The influencing mechanism of ultrasonic treatment was investigated by determining the protein solubility, intermolecular interactions, and infrared spectrum of surimi gel. The results indicate that, as the ultrasonic power increases, the hardness, elasticity, and gel strength of surimi gel with varying salt levels increased. At an ultrasonic power of 360 W, no significant differences in the hardness and elasticity of the high- and low-salt surimi gels were apparent. The WHC of surimi gels containing 3% and 1.5% salt increased by 10.48% and 22.08%, respectively. Ultrasonication had no significant effect on the whiteness of high- and low-salt surimi gels. The solubility, intermolecular interaction, and infrared spectroscopy analyses reveal that ultrasonic treatment can increase the gel solubility and reduce the

引文格式:

于楠楠,吴家程,苑衡,等.超声波处理对不同盐添加量白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J].现代食品科技,2025,41(7):286-293.

YU Nannan, WU Jiacheng, YUAN Heng, et al. Effects of ultrasonic treatment on gel properties of silver carp surimi with varying salt levels [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(7): 286-293.

收稿日期: 2024-03-28

基金项目: 徐州市基础 Research 计划项目 (KC22057)

作者简介: 于楠楠 (1991-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为水产品加工, E-mail: yunannan528@hotmail.com

hydrogen bonds in surimi. The α -helix content of surimi protein decreases after ultrasonic treatment. The results indicate that ultrasonic treatment increases the exposure of active groups, promotes the interaction between active groups and water molecules, and improves the gel formation ability of surimi. This research demonstrates that the gel properties of low-salt surimi can be significantly improved by ultrasonic treatment at 360 W, enabling the reduction of salt addition to surimi products and thus the development of low-salt, high-quality surimi products.

Key words: surimi; ultrasonic treatment; low salt; gel properties

鱼糜制品具有良好的营养性且风味独特,受到广大消费者的欢迎。食盐在鱼糜制品生产过程中至关重要,添加3%左右的食用盐来促进鱼糜中肌原纤维蛋白溶解,通过肌原纤维蛋白间的相互作用,形成具有网状结构的凝胶,生产出具有良好凝胶特性的鱼糜制品^[1]。我国人均盐摄入量超出了世界卫生组织推荐标准的两倍,饮食中摄入过量的钠,会导致高血压、心血管疾病等问题,迫切需要降低加工食品中NaCl含量,以满足消费者的健康需求^[2]。然而减少盐添加量会导致鱼糜制品凝胶强度降低、凝胶品质变差^[3]。因此,鱼糜制品加工过程中,常通过添加淀粉、大豆分离蛋白、魔芋胶等外源添加物来提高凝胶强度,但外源添加物的加入降低了最终产品中鱼肉蛋白的含量,影响口感及营养价值^[4-6]。

超声波是一种蛋白质物理改性方法,通过超声介质传递加快底物的物理化学反应速度。因其高效、低成本、操作简便、污染少的特点,在食品加工中越来越受到关注。超声处理能够影响鱼糜凝胶化过程,显著改善鱼糜制品凝胶品质。张崑等^[7]在40℃低温凝胶化时,采用功率为100 W,频率为28 kHz的超声波对罗非鱼糜进行处理,发现超声波处理后鱼糜凝胶强度显著提高。王静宇等^[8]研究发现超声波处理能够显著增加肌原纤维蛋白表面疏水性,降低平均粒径,增加蛋白溶解度,从而增强凝胶强度。Ye等^[9]研究发现微波-超声波联合处理能够改善低盐罗非鱼糜的凝胶品质。

目前,超声波处理功率对不同盐添加量白鲢鱼糜凝胶品质影响的研究较少。因此,本课题以冷冻白鲢鱼糜为原料,研究超声波功率对高盐、低盐鱼糜凝胶的凝胶特性、白度、持水率、溶解度、分子间作用力及蛋白质结构的影响,以期对低盐鱼糜制品的开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 主要材料与试剂

白鲢鱼糜(AAA级,水分含量的质量分数为

77.0%±0.5%, pH值6.8),湖北井力水产食品有限公司;食盐,江苏省盐业集团有限责任公司;氯化钠、氢氧化钠、十二烷基硫酸钠、尿素、巯基乙醇、三氯乙酸,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 主要仪器与设备

DCTZ-2000型三频多用途恒温超声波提取机,北京弘祥隆生物技术开发有限公司;JYL-D020型料理机,九阳股份有限公司;WS70C型分光测色仪,深圳威福光电科技有限公司;TMS-PRO型质构仪,美国FTC仪器公司;TENSOR27型红外光谱仪,德国布鲁克公司;HH-4型数显电子恒温水浴锅,常州国华电器有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备

根据He等^[10]的实验方法稍作修改。将解冻后的鱼糜块放入料理机中,斩拌5 min至充分破碎,分别加入质量分数为3%和1.5%食盐,继续斩拌混合5 min,保持温度低于10℃。将50 g糊状鱼糜挤入肠衣中并封口,随后在40℃恒温水浴条件下超声处理30 min(超声功率分别为0、270、315、360 W),在90℃下继续加热20 min,将凝胶样品迅速转移到冷水中冷却,存放在4℃的冰箱中。未经超声处理的作为对照组。

1.3.2 质构测定

根据Zhang等^[11]的方法,对照组和超声处理样品取出后恢复至室温,去除肠衣,切成圆柱形。TPA测试采用P/0.5平底圆柱形探头,测试速度1 mm/s,起始力0.1 N,形变量40%。每组试验重复六次,取平均值。凝胶强度计算如公式(1):

$$B=H \times S \quad (1)$$

式中:

B——所测得凝胶强度(GS), N×mm;

H——所测得凝胶硬度, N;

S——所测得凝胶弹性, mm。

1.3.3 持水性测定

根据 Zhang 等^[11]的方法, 取约 10 g 左右鱼糜凝胶放入 50 mL 离心管中, 质量记为 W_1 , 用滤纸包住, 4 °C 条件下以 10 000×g 离心 10 min。取出后去除管中和鱼糜凝胶表面水分, 称重记为 W_2 。离心管质量记为 W_0 。每组样品重复测定三次, 取平均值, 如下公式 (2) 计算持水性:

$$D = \frac{W_2 - W_0}{W_1 - W_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

D ——持水性 (WHC), %;

W_0 ——离心管质量, g;

W_1 ——鱼糜凝胶原始质量, g;

W_2 ——鱼糜凝胶离心后的质量, g。

1.3.4 白度测定

参照孔文俊等^[12]的方法, 使用色差仪测定鱼糜凝胶薄片的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 每个样品重复 3 次并计算平均值。按照公式 (3) 计算白度 (W):

$$W = 100 - [(100 - L^*) + a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \quad (3)$$

式中:

L^* ——亮度;

a^* ——红绿值;

b^* ——黄蓝值。

1.3.5 溶解率的测定

参照于楠楠等^[13]的方法, 取 1 g 鱼糜样凝胶加入 20 mL 20 mmol/L Tris-HCl 缓冲液 (pH 值 8.0, 含 1% (m/V) 十二烷基硫酸钠, 8 mol/L 尿素和 2% (m/V) 巯基乙醇) 并均质。将混合物在沸水中加热 2 min, 然后在室温下搅拌 4 h。搅拌结束后进行 5 000×g 离心 60 min。取离心后上清液的 10 mL, 加入 50% (m/V) 三氯乙酸使最终质量浓度为 10% (m/V)。混合物在 4 °C 静置 18 h 后, 以 5 000×g 离心力离心 60 min, 用 10% (m/V) 三氯乙酸冲洗沉淀物, 再用 0.5 mol/L 氢氧化钠将沉淀物溶解。通过 Lowry 法测定蛋白质含量。总蛋白含量为鱼糜凝胶溶解于 0.5 mol/L NaOH 中测得的蛋白质含量。溶解率为溶液中蛋白质含量占总蛋白质含量的百分比。

1.3.6 分子间作用力的测定

参照于楠楠等^[13]的方法, 在离心管中放入 2 g 鱼糜凝胶样品, 分别添加 10 mL 以下溶液: 0.05 mol/L NaCl (SA)、0.6 mol/L 氯化钠 (SB)、0.6 mol/L

氯化钠 +1.5 mol/L 尿素 (SC)、0.6 mol/L 氯化钠 +8 mol/L 尿素 (SD)。每个样品进行 2 min 均质处理后, 在 4 °C 下搅拌 1 h, 然后冷冻离心 15 min (10 000×g), 取上清液。上清液中蛋白含量采用 Lowry 法测定。 C_{SA} 、 C_{SB} 、 C_{SC} 、 C_{SD} 分别为溶解在 SA、SB、SC、SD 溶液中的蛋白含量 (g/L)。非特异性连接作用 = C_{SA} , 离子键作用 = $C_{SB} - C_{SA}$, 氢键作用 = $C_{SC} - C_{SB}$, 疏水键作用 = $C_{SD} - C_{SC}$ 。

1.3.7 鱼糜制品红外光谱检测

参照 Vela 等^[14]的方法, 将样品取出切成薄片, 置于冰箱冷冻层中冷冻 24 h 后, 取出冷冻样品, 放置于培养皿中, 然后利用冷冻干燥机, 冷冻干燥 28 h 后取出。将冷冻干燥的样品磨成细腻的粉末状。取适量的粉末样品放入研钵中, 加入 KBr 混合均匀后压成薄片, 用红外光谱仪进行检测, 检测后的数据保留, 采用 PeakFit 软件分析蛋白质二级结构含量。

1.3.8 数据统计分析

所有数据采用 SPSS 19.0 分析, 差异显著性 $P < 0.05$ 。采用 Origin 8.6 作图。

2 结果与讨论

2.1 超声波对鱼糜凝胶质构特性的影响

由表 1 可知, 相同超声处理条件下, 添加 3% 食盐鱼糜的硬度、弹性、胶粘性和咀嚼性显著 ($P < 0.05$) 高于添加 1.5% 食盐处理组, 这是由于添加 NaCl, 可使在肌原纤维蛋白膨胀断裂, 螺旋结构展开, 氨基酸残基充分暴露, 持水性增强, 凝胶性提高^[15]。与未经超声处理的对照组相比, 随着超声功率的增强, 高盐和低盐鱼糜凝胶的质构特性均有所提高。当超声功率为 360 W 时, 与对照组相比, 高盐鱼糜和低盐鱼糜凝胶的硬度分别提高了 10.56% 和 17.36%, 弹性分别增加了 17.64% 和 25.20%, 内聚性分别提高了 33.33% 和 23.21%, 咀嚼性分别增加了 29.38% 和 37.32%, 胶粘性分别降低了 32.54% 和 34.44%。超声波对低盐鱼糜质构的改善作用强于高盐鱼糜。另一方面, 经 360 W 超声处理的低盐鱼糜凝胶硬度和弹性与未经超声处理的高盐鱼糜凝胶没有显著差异 ($P > 0.05$)。Zhang 等^[16]研究发现, 超声处理可以显著改善 1% 低盐海龙鱼鱼糜凝胶的质构特性。

表 1 超声波功率对鱼糜凝胶质构特性的影响

Table 1 Effect of ultrasonic power on the textural properties of surimi gels						
	超声波功率 /W	硬度 /N	内聚性	弹性 /mm	胶粘性 /N	咀嚼性 /mJ
添加 3% 食盐	0	7.67 ± 0.21 ^{Cc}	0.60 ± 0.11 ^{Aa}	6.35 ± 0.44 ^{Bb}	6.76 ± 0.17 ^{Aa}	25.70 ± 1.31 ^{Ccd}
	270	7.79 ± 0.12 ^{Cc}	0.74 ± 0.08 ^{Aa}	7.17 ± 0.30 ^{Aa}	6.52 ± 0.08 ^{Aa}	27.71 ± 0.72 ^{Cbc}
	315	8.10 ± 0.16 ^{Bb}	0.77 ± 0.02 ^{Aa}	7.34 ± 0.22 ^{Aa}	4.88 ± 0.45 ^{Bc}	30.63 ± 1.87 ^{Bab}
	360	8.48 ± 0.12 ^{Aa}	0.80 ± 0.06 ^{Aa}	7.47 ± 0.21 ^{Aa}	4.56 ± 0.35 ^{Bcd}	33.25 ± 1.28 ^{Aa}
添加 1.5% 食盐	0	6.51 ± 0.25 ^{Cc}	0.56 ± 0.08 ^{Bb}	5.04 ± 0.08 ^{Dd}	6.30 ± 0.16 ^{Aa}	17.71 ± 0.52 ^{Bf}
	270	6.97 ± 0.13 ^{Bd}	0.67 ± 0.05 ^{Aab}	5.40 ± 0.21 ^{Cd}	5.72 ± 0.36 ^{Bb}	19.38 ± 1.88 ^{Bef}
	315	7.24 ± 0.22 ^{Bd}	0.70 ± 0.02 ^{Aa}	5.85 ± 0.09 ^{Bc}	5.36 ± 0.24 ^{Bb}	21.19 ± 3.15 ^{ABe}
	360	7.64 ± 0.11 ^{Ac}	0.69 ± 0.05 ^{Aa}	6.31 ± 0.21 ^{Ab}	4.13 ± 0.09 ^{Cd}	24.32 ± 1.81 ^{Ad}

注：同列数字上标的大写字母表示相同盐添加量不同超声处理具有显著差异（ $P<0.05$ ），小写字母表示不同盐添加量不同超声处理具有显著差异（ $P<0.05$ ）。下表同。

表 2 超声波功率对鱼糜凝胶色泽的影响

Table 2 Effect of ultrasonic power on color of surimi gels					
	超声波功率/W	L^*	a^*	b^*	W
添加 3% 食盐	0	72.27 ± 2.09 ^{Aa}	-0.48 ± 0.09 ^{Aabc}	2.50 ± 0.16 ^{Aa}	72.15 ± 2.06 ^{Aa}
	270	72.37 ± 1.00 ^{Aa}	-0.45 ± 0.12 ^{Aabc}	2.39 ± 0.26 ^{Aa}	72.26 ± 0.98 ^{Aa}
	315	71.23 ± 2.67 ^{Aab}	-0.59 ± 0.04 ^{Ac}	2.48 ± 0.45 ^{Aa}	71.12 ± 2.66 ^{Aab}
	360	72.33 ± 2.74 ^{Aa}	-0.58 ± 0.09 ^{Ac}	2.41 ± 0.32 ^{Aa}	72.22 ± 2.70 ^{Aa}
添加 1.5% 食盐	0	65.27 ± 2.69 ^{Abc}	-0.36 ± 0.07 ^{Aa}	2.45 ± 0.22 ^{Aa}	65.18 ± 2.68 ^{Abc}
	270	65.05 ± 4.48 ^{Ac}	-0.42 ± 0.03 ^{ABab}	2.40 ± 0.50 ^{Aa}	64.96 ± 4.47 ^{Ac}
	315	65.46 ± 3.85 ^{Abc}	-0.50 ± 0.06 ^{Bbc}	2.44 ± 0.11 ^{Aa}	65.37 ± 3.84 ^{Abc}
	360	66.45 ± 4.50 ^{Aabc}	-0.51 ± 0.06 ^{Bbc}	2.53 ± 0.35 ^{Aa}	66.35 ± 4.47 ^{Aabc}

2.2 超声波对鱼糜凝胶强度的影响

从图 1 可知，和对照组相比，添加 3% 和 1.5% 食盐的鱼糜经超声波处理，凝胶强度都有所增加，并随着超声波功率的提升，鱼糜凝胶强度逐渐增大。当超声功率为 360 W 时，添加 3% 食盐的鱼糜，与未经超声处理对照组相比，凝胶强度提高了 30.38%；添加 1.5% 食盐的鱼糜，与对照组相比，凝胶强度提高了 46.92%。1.5% 食盐的鱼糜经 360 W 超声处理后其凝胶强度与未经超声处理添加 3% 食盐的鱼糜凝胶强度接近，没有显著差异（ $P>0.05$ ）。说明采用超声处理能够提高低盐鱼糜的凝胶强度。Zhang 等^[17]研究超声波处理对罗非鱼（*Sarotherodon nilotica*）鱼糜凝胶强度的影响，发现超声波处理导致肌肉组织被破坏，肌肉蛋白质被盐有效溶解，形成更强的凝胶。Mcdonnell 等^[18]研究发现超声处理腌渍猪肉的凝胶强度显著增强。

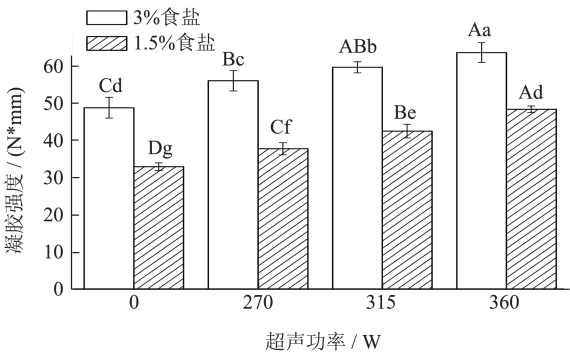


图 1 超声波功率对鱼糜凝胶凝胶强度的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic power on gel strength of surimi gels

注：图中大写字母表示相同盐添加量不同超声处理具有显著差异（ $P<0.05$ ），小写字母表示不同盐添加量不同超声处理具有显著差异（ $P<0.05$ ）。下图同。

2.3 超声波对鱼糜凝胶持水性的影响

持水率是鱼糜凝胶性能的优劣性重要指标。从由图 2 可以看出，超声波处理能够提高高盐和低盐

处理鱼糜凝胶的持水性,随着超声功率的增加,持水性显著增强 ($P<0.05$)。与未进行超声处理的鱼糜凝胶相比,对高盐鱼糜凝胶,当超声功率为 360 W 时,持水性从 82.65% 提高到 91.31%,增加了 10.48%;对低盐鱼糜凝胶,持水率从 68.06% 提高到 83.09%,增加了 22.08%。说明超声处理对低盐鱼糜凝胶持水性的提高具有更好的效果。同时,经 360 W 超声处理的低盐鱼糜凝胶持水性与未进行超声波处理的高盐鱼糜凝胶持水性无显著差异 ($P>0.05$)。凝胶网络结构越紧密,对水分的束缚力越强,持水性越高。Tang 等^[19]的研究发现,高强度超声波处理的鱼糜形成了更规则的凝胶网络。因此,超声处理后低盐鱼糜凝胶的持水性增强。

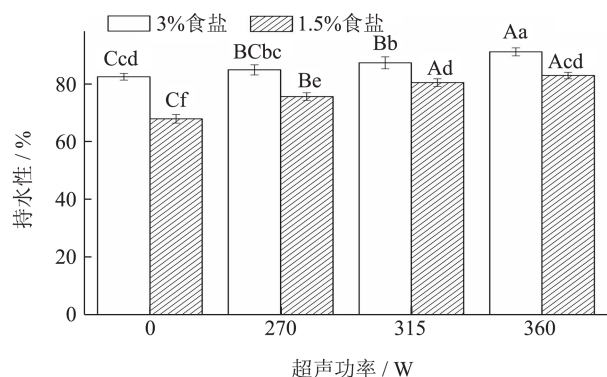


图 2 超声波功率对鱼糜凝胶持水性的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic power on water retention of surimi gels

2.4 超声波对鱼糜凝胶白度的影响

从表 2 可以看出,添加 3% 食盐鱼糜的亮度和白度均高于添加 1.5% 食盐的鱼糜。白度主要取决于水分和蛋白质,尤其是肌球蛋白和血红蛋白的含量、蛋白质变性程度、聚合程度以及物体表面的光学特性。食盐添加量增加,白度增大可能由于鱼糜凝胶在高盐环境下形成均匀而致密的结构,对光具有更好的反射作用,从而白度较高^[20,21]。随着超声功率的增加,添加 3% 食盐和 1.5% 食盐鱼糜的白度均无显著变化 ($P>0.05$)。经过超声波处理后,添加 3% 和 1.5% 食盐的鱼糜具有相同的变化趋势, L^* 值和 b^* 值变化不显著 ($P>0.05$), a^* 值随着超声功率的增加逐渐降低。Zhang 等^[16]研究发现超声处理对高盐和低盐鱼糜的白度无显著影响。

2.5 超声波对鱼糜凝胶溶解度的影响

从图 3 可以看出,经超声波处理后,高盐和低盐鱼糜的溶解度均显著增大,且随着超声功率的增强,溶解度显著增加 ($P<0.05$)。对高盐鱼糜,

超声功率为 360 W 时,溶解度从 31.55% 上升到 46.76%,增加了 48.21%。对低盐鱼糜,超声功率为 360 W 时,溶解度从 20.52% 上升到 31.30%,增加了 52.53%。超声波破坏了蛋白结构,导致蛋白结构展开,暴露出内部的亲水基团,增强了蛋白质与水的相互作用,促进可溶性蛋白的形成,蛋白质溶解度增加^[22,23]。Yao 等^[24]研究发现超声波处理能够改变大麻籽蛋白结构,随着超声功率的提高,蛋白质溶解度逐渐增强。李可等^[25]采用超声波处理类 PSE 鸡肉肌原纤维蛋白,发现经过超声波处理的肌原纤维蛋白溶解度均显著高于对照组,随着超声波功率的增加 (150~450 W),其溶解度逐渐增大。Zhang 等^[26]的研究发现,在低盐条件下 (1.3 mmol/L) 下,由于高强度超声产生的空化效应和机械力破坏了蛋白质之间的相互作用,蛋白质颗粒变小,蛋白质颗粒的比表面积增大,促进蛋白质分子和水之间的相互作用,使得肌原纤维蛋白的溶解度显著提高。盐添加量和超声功率对溶解度的影响与质构和凝胶强度的影响相似,随着超声功率的增加,溶解度增大,凝胶强度增强。高盐鱼糜凝胶溶解度显著高于低盐鱼糜,与硬度、弹性、凝胶强度变化趋势一致。

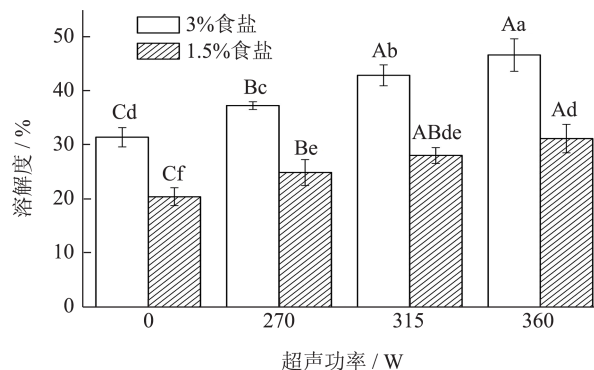


图 3 超声波功率对鱼糜凝胶中蛋白溶解度的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic power on protein solubility in surimi gels

2.6 超声波对鱼糜凝胶分子间作用力的影响

热诱导是鱼糜凝胶形成过程主要方式,随着加热过程的进行,肌原纤维蛋白变性,肌球蛋白按一定规律发生集聚形成网状结构,通过蛋白质分子之间相互作用形成凝胶^[10]。图 4 和图 5 所示是超声波处理对高盐和低盐鱼糜中蛋白质构象的分子间作用力的影响。从图中可以看出,超声波功率对高盐和低盐鱼糜非特异性连接和离子键作用的影响较小,而氢键作用和疏水键作用随着超声功率的增大逐渐减小。由此可见,超声波处理对鱼糜凝胶质构特

性的改善，与氢键的减少以及疏水相互作用的减弱有关，而非特异性连接和离子键无明显相关性。Gao 等^[27]研究发现，超声处理通过促进低盐鱼糜蛋白质疏水相互作用和非二硫键共价键作用增强蛋白质聚集，从而有效改善低盐含量（0~2% NaCl）鱼糜的凝胶特性。

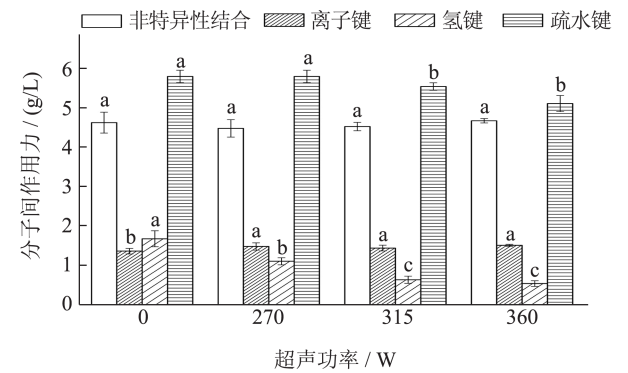


图 4 超声波功率对高盐鱼糜凝胶分子间作用力的影响
Fig.4 Effect of ultrasonic power on intermolecular force of high salt surimi gels

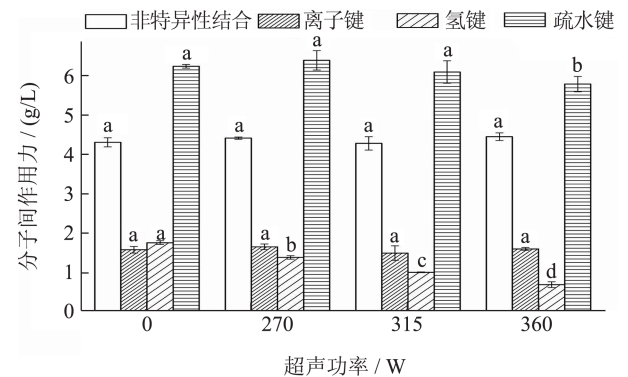


图 5 超声波功率对低盐鱼糜凝胶分子间作用力的影响
Fig.5 Effect of ultrasonic power on intermolecular force of low salt surimi gels

2.7 超声波处理对鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

如图 6 和图 7 所示，与高盐鱼糜凝胶相比，低盐鱼糜凝胶中 α -螺旋含量增加， β -折叠含量降低。这表明高盐条件有助于诱导更多的蛋白质展开，从而促进 α -螺旋结构向 β -折叠结构的转变。图 6 和图 7 也表明超声波处理导致 α -螺旋含量降低， β -折叠含量增加，随着超声功率的增加，高盐鱼糜凝胶中 α -螺旋含量降低了 48.44%， β -折叠含量增加了 52.50%，低盐鱼糜凝胶中 α -螺旋含量降低了 35.12%， β -折叠含量增加了 53.28%。 α -螺旋含量越低，凝胶强度越高。因此，超声波可能促进了

蛋白质的展开，导致蛋白质聚集和交联发生改变，从而形成更为致密均匀的结构凝胶网络^[28]。Zhang 等^[29]的研究发现，与对照组相比，经超声处理的蛋白中 α -螺旋含量明显降低。经过超声波处理的鱼糜，肌原纤维蛋白结构的展开程度增强，肌动球蛋白杆部的 α -螺旋结构开始解构。在超声空化效应和机械力共同作用下，蛋白质分子结构变化，导致热凝胶过程中蛋白质分子间相互作用增强。Zhang 等^[30]的研究发现超声处理诱导了凡纳滨对虾肌原纤维蛋白分子的拉伸并增强其柔性，肌原纤维蛋白的降解受到抑制， α -螺旋含量降低。Taha 等^[31]发现超声处理过程所产生的“空穴效应”使鱼糜蛋白二级结构中的 α -折叠转化为无规则卷曲和 β -折叠，暴露更多活性基团，水分子相互结合作用增强，分子间的作用力增强，从而凝胶特性增强。

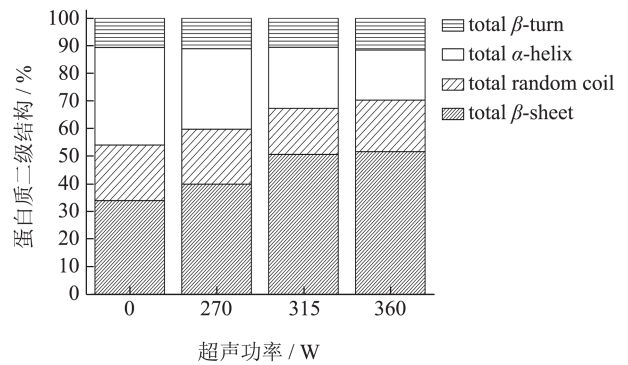


图 6 超声波功率对高盐鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响
Fig.6 Effect of ultrasonic power on the protein secondary structure of high salt surimi gels

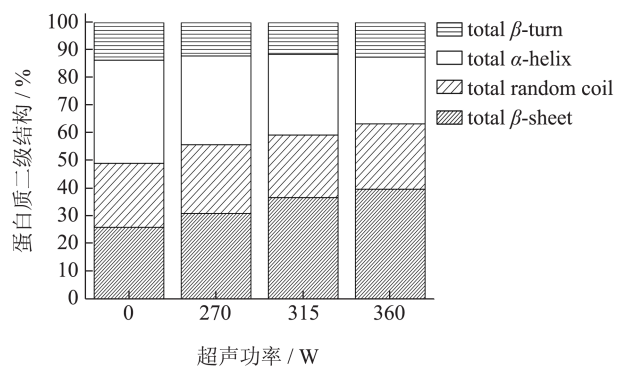


图 7 超声波功率对低盐鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响
Fig.7 Effect of ultrasonic power on the protein secondary structure of low salt surimi gels

3 结论

随着超声波功率的加大，高盐和低盐鱼糜的

鱼糜凝胶性能有所提升, 3% 盐添加量鱼糜和 1.5% 盐添加量鱼糜经 360 W 超声处理后凝胶强度分别增加 30.38% 和 46.92%, 硬度分别增加 10.56% 和 17.36%, 持水性分别增强 10.48% 和 22.08%。高强度超声通过肌纤维蛋白膨胀空化效应, 暴露出蛋白质内部更多的活性基团, 导致 α -螺旋含量降低。超声波辅助加工可以提高低盐鱼糜的凝胶品质, 能弥补低盐对鱼糜凝胶带来的负面影响, 经 360 W 功率超声波处理后的低盐鱼糜凝胶特性与未经超声处理的高盐鱼糜差异不显著。因此超声波可以用来辅助鱼糜凝胶化, 以减少鱼糜凝胶中食盐添加量, 从而获得更加健康的鱼糜制品。

参考文献

- [1] ZHENG J B, HAN Y R, GE G, et al. Partial substitution of NaCl with chloride salt mixtures: Impact on oxidative characteristics of meat myofibrillar protein and their rheological properties [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 36-42.
- [2] MENTE A, O'DONNELL M, RANGARAJAN S, et al. Urinary sodium excretion, blood pressure cardiovascular disease, and mortality: A community level prospective epidemiological cohort study [J]. The Lancet, 2018, 392(10146): 496-506.
- [3] 叶川.微波处理与卡拉胶对低盐白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [4] ZHAO Y D, LI J J, WEI G P, et al. Fortification of surimi gels by tuning the synergetic effect of multiple enzyme-related factors [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 143: 108895.
- [5] XU Y Q, YU J, XUE Y, et al. Enhancing gel performance of surimi gels via emulsion co-stabilized with soy protein isolate and κ -carrageenan [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108217.
- [6] YAN W L, YIN T, XIONG S B, et al. Gelling properties of silver carp surimi incorporated with konjac glucomannan: Effects of deacetylation degree [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 191: 925-933.
- [7] 张崑,曾庆孝,张佳敏,等.超声和斩拌对罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响[J].食品研究与开发,2010,31(10):63-67.
- [8] 王静宇,杨玉玲,周磊,等.超声波对肌原纤维蛋白理化和质构特性的影响[J].食品工业科技,2018,39(11):12-16,21.
- [9] YE Y H, LIU X Y, BAI W D, et al. Effect of microwave-ultrasonic combination treatment on heating-induced gel properties of low-sodium tilapia surimi during gel setting stage and comparative analysis [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 161: 113386.
- [10] HE X, LV Y, LI X, et al. Improvement of gelation properties of silver carp surimi through ultrasound-assisted water bath heating [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 83: 105942.
- [11] ZHANG T, XUE Y, LI Z, et al. Effects of deacetylation of konjac glucomannan on Alaska Pollock surimi gels subjected to high-temperature (120 °C) treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 43: 125-131.
- [12] 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.
- [13] 于楠楠,李景敏,汤楚琦,等.羊血浆蛋白对高温杀菌鱼糜制品凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(16):32-36,42.
- [14] VELA A J, VILLANUEVA M, SOLAESA Á G, et al. Impact of high-intensity ultrasound waves on structural, functional, thermal and rheological properties of rice flour and its biopolymers structural features [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106480.
- [15] CHAIJAN M, PANPIPAT W, BENJAKUL S. Physicochemical properties and gel-forming ability of surimi from three species of mackerel caught in Southern Thailand [J]. Food Chemistry, 2009, 121(1): 85-92.
- [16] ZHANG C, LU M X, AI C, et al. Ultrasonic treatment combined with curdlan improves the gelation properties of low-salt *Nemipterus virgatus* surimi [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125899.
- [17] ZHANG Y, ZENG Q X, ZHU Z W, et al. Effect of ultrasonic treatment on the gel strength of tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi [J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34(2): 533-548.
- [18] MCDONNELL C K, ALLEN P, MORIN C, et al. The effect of ultrasonic salting on protein and water-protein interactions in meat [J]. Food Chemistry, 2014, 147(15): 245-251.
- [19] TANG L, YONGSAWATDIGUL J. High-intensity ultrasound improves threadfin bream surimi gelation at low NaCl contents [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 842-851.
- [20] 田金河,张艳芳,王艳婕,等.酸溶条件及高强度超声波对鲢鱼肉分离蛋白的提取及凝胶特性的影响[J].现代食品科技,2019,12:232-240.
- [21] HE X L, ZHAO H L, XU Y X, et al. Synergistic effects of oat β -glucan combined with ultrasound treatment on gel properties of silver carp surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 95: 106406.
- [22] SHENG L, WANG Y B, CHEN J H, et al. Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white [J]. Food Research International, 2018, 108: 604-610.
- [23] 毕雅雯,刘晶,蒋艳,等.超声处理辅助大豆分离蛋白改善蛋黄乳化性[J].食品与生物技术学报,2022,1:60-67.
- [24] YAO S Y, LI W, WU Y, et al. The impact of high-intensity ultrasound-assisted extraction on the structural and functional properties of hempseed protein isolate (HPI) [J]. Foods, 2023, 12(2): 348.
- [25] 李可,张俊霞,王欣瑶,等.不同超声波功率处理对类PSE

- 鸡肉肌原纤维蛋白结构和乳化稳定性的影响[J].食品科学,2023,13:23-31.
- [26] ZHANG X H, GUO Q Y, SHI W Z. Ultrasound-assisted processing: Changes in gel properties, water-holding capacity, and protein aggregation of low-salt *Hypophthalmichthys molitrix* surimi by soy protein isolate [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 92:106258.
- [27] 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.
- [28] CAO G, CHEN X T, Hu B B, et al. Effect of ultrasound-assisted resting on the quality of surimi-wheat dough and noodles [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94:106322.
- [29] ZHANG T, WANG J, FENG J Q, et al. Ultrasonic pretreatment improves the gelation properties of low-salt *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106031.
- [30] ZHANG T, WANG J, FENG J Q, et al. Effects of ultrasonic-microwave combination treatment on the physicochemical, structure and gel properties of myofibrillar protein in *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106218.
- [31] TAHA A, AHMED E, ISMAIEL A, et al. Ultrasonic emulsification: An overview on the preparation of different emulsifiers-stabilized emulsions [J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105(11): 363-377.