

超声波对鲟鱼鱼糜热诱导凝胶特性的影响

韦芳¹, 颜子恒¹, 杨佳华¹, 崔 姍¹, 孙美君¹, 亢春雨^{1*}, 赵春青^{2*}

¹河北农业大学食品科技学院 河北保定 071001

²保定开放大学继续教育处 河北保定 071001)

摘要 目的:为了提高鲟鱼鱼糜的凝胶性能,开发高品质的鲟鱼鱼糜制品,研究超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶特性和蛋白结构的影响。方法:以凝胶强度为主要指标,以超声时间、功率、NaCl 质量分数为因素,设计响应面试验,确定超声处理制备鲟鱼鱼糜热诱导凝胶(SHG)的最佳制备条件。通过凝胶强度、白度、持水性、水分分布、微观结构等分析超声处理对鲟鱼鱼糜热诱导凝胶特性的影响。以二级结构、总巯基(T-SH)和表面疏水性(H_0)等指标对鲟鱼糜凝胶蛋白结构进行表征。结果:最佳制备条件为超声时间 40 min,功率 180 W,NaCl 质量分数 3%,此条件下制备的鲟鱼鱼糜凝胶强度为 657.00 g·cm,与响应面模型理论值 660.40 g·cm 相近。超声波处理可以改善 SHG 的凝胶特性,提高其白度和持水性,可促使 α -螺旋和无规则卷曲向 β -折叠和 β -转角转化,促进肌原纤维蛋白的展开,降低 T-SH 含量并促进蛋白质间的交联。结论:超声处理可提高鲟鱼鱼糜热诱导凝胶的凝胶强度、质构特性、白度和持水性,有助于促进鲟鱼肌原纤维蛋白间的交联,从而形成更均匀、致密的凝胶结构。本研究为改善鲟鱼鱼糜凝胶特性提供了技术手段。

关键词 鲟鱼; 鱼糜; 超声处理; 凝胶特性; 蛋白结构

文章编号 1009-7848(2025)01-0262-11 DOI: 10.16429/j.1009-7848.2025.01.025

近年来,鱼糜产品因高蛋白、低脂肪、特殊的凝胶质地和即食特性而深受消费者的欢迎^[1]。由于海洋环境被污染,全球海水鱼类产量下降,因此养殖淡水鱼是鱼糜产品的重要来源^[2]。据《中国渔业统计年鉴》显示,2021 年我国的鲟鱼淡水养殖量达到最大值,成为全球第一的鲟鱼生产国,是世界上鲟鱼产品的主要贸易国之一^[3]。鲟鱼为亚洲重要的商业鱼类,其珍贵的鱼子酱备受消费者的青睐,其身体则为副产物的主要来源。鲟鱼肉厚,没有肌间骨,可作为加工鱼糜产品的原料,然而其肉质粗糙,纤维质地重,脂肪含量高,导致口感差,极大地限制了其在鱼糜产品加工中的应用^[4]。

鱼糜制品的凝胶特性是衡量其品质的主要指标。鱼糜凝胶的形成过程主要是蛋白质-蛋白质、蛋白质-水之间的聚集,在此期间,鱼糜凝胶特性会随蛋白质间作用力及蛋白结构的变化而改变^[5]。

在此期间会出现鱼糜制品凝胶劣化现象即“modori”现象,这不利于凝胶的形成。为解决这个问题,目前常用的方式有添加外源物质(谷氨酰胺转氨酶^[6]等)和物理处理(超高压^[7]、超声波^[8]等)来提高鱼糜的凝胶性能。其中,超声波因无污染、安全、操作简便等特点而在食品加工领域得到广泛的应用,它可在不影响食品营养和感官特性的同时提高食品质量。超声产生的空化现象可能会改变蛋白质的结构,将活性残基暴露在表面,促进蛋白质间的相互作用,促进凝胶的形成^[9]。Tong 等^[10]研究发现高强度超声处理可以改善木质化鸡肉糜的凝胶性能。Zhang 等^[11]研究发现适当的超声功率可以减少蛋白质结构变化,改善肌原纤维蛋白的凝胶性能,形成紧凑和均匀的凝胶网络。当前,超声在鱼糜或蛋白质凝胶中的应用日渐受到关注。He 等^[12]研究发现超声辅助水浴加热可以改善鲢鱼鱼糜凝胶的强度、质构性能和持水性。邹倩^[13]研究发现超声波协同没食子酸可改变海鲈鱼肌原纤维蛋白结构,促进蛋白的交联,从而形成更具有黏弹性的凝胶网络结构。然而,关于通过超声处理改善鲟鱼凝胶性能的研究很少。

本研究以鲟鱼鱼糜为研究对象,以凝胶强度为响应值,优化超声处理对鲟鱼鱼糜凝胶性能的

收稿日期: 2024-01-21

基金项目: 河北省重点研发计划项目(22327102D);河北省现代农业产业技术体系淡水养殖创新团队建设基金项目(HBCT2023230207)

第一作者: 韦芳,女,硕士生

通信作者: 亢春雨 E-mail: kangc-y@126.com

赵春青 E-mail: 836384065@qq.com

影响,分析不同工艺对凝胶特性、水分分布、微观结构、蛋白结构的影响。本研究结果可为将超声波应用于鲟鱼糜制品的加工提供理论支持。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

鲟鱼,保定市河北农业大学科技市场,平均质量(1.5±0.5)kg,分装后置真空袋中于-20℃保存;氯化钠,国药集团化学试剂有限公司;十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)凝胶制备试剂盒,康为世纪生物科技有限公司;总巯基含量试剂盒,索莱宝生化试剂盒事业部。

1.2 仪器与设备

CP214 电子天平,常州奥豪斯仪器有限公司;TMS-Pilot 质构仪,美国 FTC 有限公司;IRAffinity-IS 傅里叶变换红外光谱仪,日本岛津公司;1510 酶标仪,赛默飞世尔科技(中国)有限公司;MesoMr12-060H-1 低场核磁共振仪,苏州纽迈分析仪器股份有限公司;JYL-C022E 九阳榨汁搅拌机,九阳股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 鲟鱼鱼糜热诱导凝胶 (Sturgeon surimi heat-induced gel, SHG)的制备 参考 Núñez-flores 等^[14]的方法稍作修改。将鱼糜于绞肉机中,加入质量分数为 3%的 NaCl、适量的冰水斩拌 1.5 min,使鱼糜的水分调至 80%左右。处理好的鱼糜装入肠衣后,90℃水浴加热 30 min,加热结束后,将鱼糜凝胶置于流水中冷却,4℃环境中冷藏待测。

1.3.2 单因素实验设计 参考 Zhang 等^[15]的方法稍作修改。将鲟鱼肉从冰箱中取出,室温下解冻。用绞肉机将鲟鱼肉斩拌 1 min 成均匀的鱼糜。将鱼糜均匀平铺于自封袋中,放置于超声波清洗机中进行处理,温度控制在(16±3)℃。超声处理后的鱼糜置于 4℃冰箱备用。

1) 将鱼糜样品分别超声预处理 10,20,30,40,50 min,以 0 min 为对照组。超声设备参数为 40 kHz,300 W。

2) 将鱼糜样品分别在超声功率 120,150,180,210,240,270,300 W 预处理 40 min,超声设备参数为 40 kHz。

3) 将超声处理后的鱼糜,分别加入质量分数为 1%,2%,3%,4%,5%的 NaCl,超声设备参数 40 kHz,180 W,40 min。

在保持其它工艺不变的情况下,研究这 3 种因素对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响。

1.3.3 凝胶特性的测定 参考翟璐等^[16]的方法稍作修改。将样品取出平衡至室温,切成 10 mm 的圆柱。用球形探头(P/S5)测试,其中 $V_{测前}=0.5$ mm/s, $V_{测中}=V_{测后}=1$ mm/s,二次压缩停留时间为 5 s,形变量为 50%,触发力为 0.15 N。测试参数包括凝胶强度、内聚性、弹性、胶黏性、咀嚼性。

1.3.4 响应面试验 依据 Box-Behnken 中心组合试验原理,以超声时间、功率、NaCl 浓度为影响因素,各取 3 个水平,以凝胶强度为响应值,设计 3 因素 3 水平二次回归方程,使用 Design-Expert 8.0.8 软件进行响应面分析。响应面因素水平如表 1 所示。

表 1 响应面因素水平表

Table 1 Response surface factor level table

因素	水平		
	-1	0	1
超声时间/min	30	40	50
超声功率/W	150	180	210
NaCl 质量分数/%	2	3	4

1.3.5 白度的测定 参考 Zhang 等^[17]的方法稍作修改。将每个凝胶样品垂直切成(10±0.5)mm 薄片,并用保鲜膜包裹。使用色差仪对所有样品进行颜色分析,读数为 L^* (亮度)、 a^* (红-绿)和 b^* (黄-蓝)值。 W^* (白度)计算如式(1)所示:

$$W^* = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (1)$$

1.3.6 持水性(WHC)的测定 称取(3±0.5)g 的凝胶(m_1)用 3 层滤纸包裹,在 5 000 r/min,4℃离心 20 min 后,取出称其质量(m_2)。持水性按公式(2)计算。

$$\text{持水性}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100 \quad (2)$$

1.3.7 低频核磁共振(LF-NMR)分析及核磁共振成像(MRI) 参考 Ye 等^[18]方法稍作修改。将直径 2.5 cm,高度 2.5 cm 的鱼糜凝胶置于核磁管中,以测量水分分布状态和弛豫时间。在 32℃时,质子

共振频率为 21 MHz, 来自 18 000 个回波的数据被采集为 4 次扫描重复。

参考 Traffano-Schiffo 等^[18]的方法稍作修改。将直径 2.5 cm, 高度 2.5 cm 的鱼糜凝胶放入 MRI 管中, 利用假色处理图像软件获得了水质子密度的假彩色图。主要参数分别为回波时间(TE)8.44 ms 和重复时间(TR)500 ms。

1.3.8 扫描电镜(SEM) 参考 Wang 等^[19]的方法稍作修改。将样品切成 1 mm 左右的薄片, 置于含有 0.1 mol/L PBS(pH 7.2)的 2.5%戊二醛溶液中, 室温下固定 3 h, 用 0.1 mol/L PBS 洗涤样品 3 次, 然后将凝胶分别用 30%、50%、70%、80%、90%、100%乙醇溶液脱水, 每次 10 min。真空冷冻干燥后, 喷金, 并通过 SEM 观察凝胶微观结构。

1.3.9 表面疏水性(H_0) 参考 Hu 等^[20]的方法稍作修改。用 5 g/100 mL 的 SDS 提取蛋白, 室温 10 000 r/min 离心 20 min 后, 将上清液在真空条件下冻干。取 1 mL 0.02 g/10 mL 的蛋白溶液与 1 μ L 溴酚蓝(BPB)(2 g/L)混合均匀, 在室温下反应 20 min 后, 在波长 595 nm 处测量上清液的吸光度记为 A_1 , 并用蒸馏水为对照组记为 A_0 。通过公式(3)计算每克蛋白结合 BPB 的量, 来反映凝胶的表面疏水性。

$$\text{BPB}(\mu\text{g}/\text{mg}) = \frac{2 \times (A_0 - A_1)}{A_0} \quad (3)$$

1.3.10 总巯基(T-SH)含量 用总巯基试剂盒测定鱼糜凝胶总巯基的含量。用酶标仪在波长 412 nm 下检测, 计算 T-SH 含量。

1.3.11 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 参考 Xie 等^[21]的方法稍作修改。将样品在真空条件下冻干, 以避免水分干扰。取 1 mg 冻干样品与 150 mg KBr 混合并压制成透明片。红外光谱扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} , 分辨率为 4 cm^{-1} , 每个样品被扫描 32 次。

1.3.12 数据处理 采用 IBM SPSS Statistics 26.0 软件、Origin 2018 绘图软件、EZ OMNIC 软件及 PeakFit v4.12 进行数据分析并制图。每组数据至少平行测定 3 次。

2 结果与分析

2.1 超声时间、功率、NaCl 浓度对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响

凝胶强度是评价鱼糜制品品质的主要指标, 它反映了鱼糜热诱导凝胶化过程中蛋白质的聚集能力^[22]。超声时间、功率、NaCl 浓度对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响如图 1 所示。

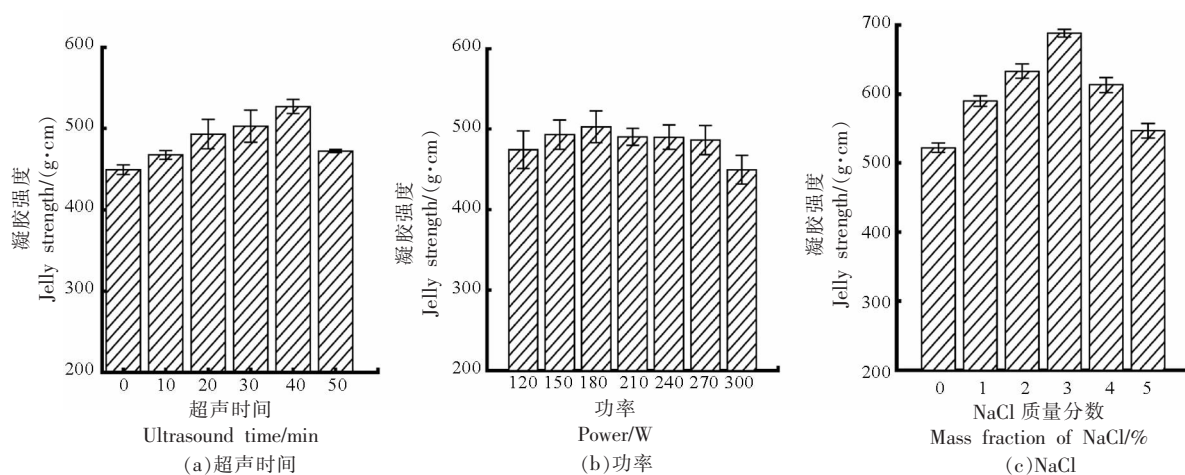


图 1 超声时间、功率、NaCl 对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响

Fig.1 Effect of ultrasound time, power, and NaCl on the gel strength of sturgeon surimi

由图 1a 可知, SHG 的凝胶强度随着超声时间的延长呈先升高后降低的趋势, 超声时间为 40 min 达到最大值。由图 1b 可知, SHG 的凝胶强度

随超声功率的增加呈先上升后缓慢下降的趋势, 在 180 W 时达到最大值, 超过 180 W 后就逐渐下降。结果表明, 适当的超声处理有利于肌原纤维蛋

白的展开,暴露更活跃的肌球蛋白基团,从而进一步增强分子相互作用^[23]。这可能是因为超声处理能促进蛋白质-蛋白质间的相互作用,形成致密均匀的凝胶网络,进而改善鲟鱼鱼糜的凝胶强度,此结果与 Li 等^[24]一致。而过长时间或高强度的超声则会破坏蛋白质的结构,不利于非二硫共价键(ϵ -(γ -Glu)-Lys 键)的形成,进而影响凝胶网络的形成。由图 1c 可知,SHG 的凝胶强度随 NaCl 质量分数的升高呈先上升后下降的趋势,在 NaCl 质量分数为 3% 时达到最大值。适当浓度的 NaCl 可促进肌原纤维蛋白的展开,暴露更多的官能团(如疏水基团等),从而增强蛋白质-蛋白质相互作用,并增强凝胶网络。高浓度的 NaCl 可能会导致肌球蛋白变性,使蛋白质分子间的作用降低,不能产生有序的聚集体,从而使凝胶网络的凝胶强度降低^[25]。

2.2 响应面优化结果分析

利用 Design Expert 8.0.6 软件对 17 组数据进行二次多元回归拟合,得到以凝胶强度为因变量,超声时间(min)、超声功率(W)、NaCl 质量分数(%) 3 个因素为自变量的二元多项回归模型方程: $Y=658.16+7.63A+1.23B-7.77C-2.21AB+6.33AC-0.71BC-46.76A^2-48.68B^2-73.47C^2$ 。

由表 3 可知,A、C 回归系数均为显著,表明超声时间和盐质量分数对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响显著;交互项回归系数均不显著,表明 3 种因素两两交互对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响均不显著。各

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Response surface experimental design and results

序号	A(时间)/ min	B(功率)/ W	C(NaCl 质量 分数)/%	凝胶强度/ (g·cm)
1	30	150	3	550.121
2	50	150	3	569.117
3	30	210	3	560.750
4	50	210	3	570.890
5	30	180	2	538.587
6	50	180	2	541.880
7	30	180	4	421.319
8	50	180	4	549.950
9	40	150	2	549.179
10	40	210	2	524.317
11	40	150	4	524.120
12	40	210	4	521.413
13	40	180	3	652.925
14	40	180	3	660.817
15	40	180	3	649.029
16	40	180	3	669.057
17	40	180	3	658.962

因素对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响程度为:C>A>B,即盐质量分数>超声时间>超声功率。该模型 $P<0.0001$,失拟项系数不显著,回归方程的相关系数 $R^2=0.9895$,表明可以用此模型来分析和预测超声波对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响。

表 3 回归模型方差分析及相关系数检验

Table 3 Analysis of variance and correlation coefficient test of regression model

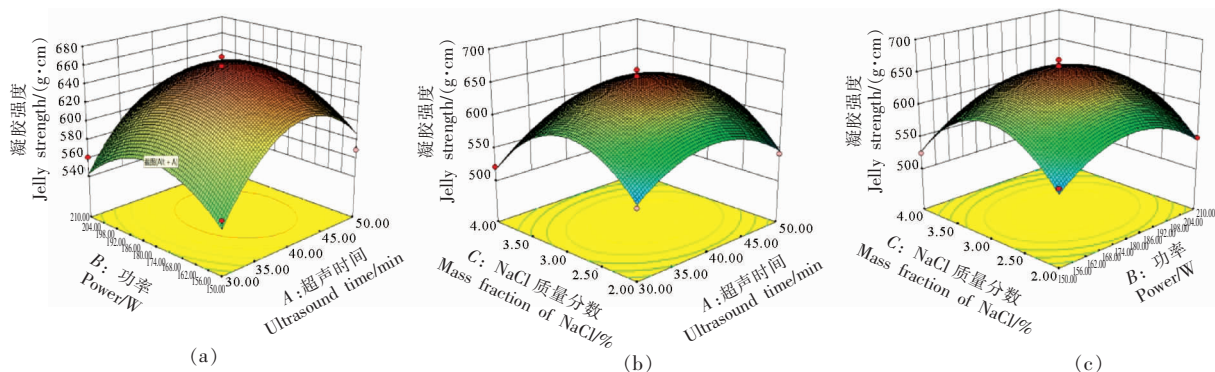
方差来源	偏差平方和	自由度	方差	F 值	P 值	显著性
模型	47 679.77	9	5 296.75	73.33	<0.0001	显著
A(超声时间)	466.04	1	466.04	24.29	0.0387	*
B(超声功率)	12.09	1	12.09	15.02	0.6947	
C(NaCl 质量分数)	483.00	1	483.00	1.93	0.0362	*
AB	19.61	1	19.61	2.72	0.6418	
AC	160.50	1	160.50	5.40	0.1797	
BC	2.02	1	2.02	0.033	0.8718	
A ²	9 204.68	1	9 204.68	169.08	<0.0001	**
B ²	9 978.94	1	9 978.94	78.05	<0.0001	**
C ²	22 726.59	1	22 726.59	94.77	<0.0001	**
残差	505.64	7	72.23			
失拟项	268.41	3	89.47	1.51	0.3411	不显著
纯误差	237.23	4	59.31			
总和	48 176.41	16				

注:*. 有显著性差异($P<0.05$);**. 有极显著性差异($P<0.01$)。

2.3 过程变量的交互作用

各因素及其交互作用对鲟鱼鱼糜凝胶强度影响的响应面 3D 图如图 2 所示。从图中可以看出

超声时间和超声功率、超声时间和盐质量分数、超声功率和盐质量分数的交互作用对凝胶强度的影响不显著,与方差结果一致。



注:a,b,c 分别为因素 AB、AC、BC 间响应面 3D 图。

图 2 各因素对鲟鱼糜凝胶强度的交互影响

Fig.2 Interaction effects of factors on the gel strength of sturgeon surimi

2.4 最优条件的确定与验证

利用 Design Expert 8.0.6 软件的优化功能可以得到鲟鱼鱼糜凝胶强度的最佳条件为: 超声时间 41.60 min, 超声功率 178.99 W, 盐质量分数 2.93%, 此条件下, 鲟鱼鱼糜凝胶强度的理论值为 660.40 g·cm。考虑试验的可操作性, 在实际操作中控制超声时间 40 min, 超声功率 180 W, NaCl 质量分数 3%, 进行 3 次平行试验, 得出鲟鱼糜的凝胶强度为 (657.00±8.67)g·cm, 与理论值无显著差异, 表明该模型有较好的拟合度, 能较好地描述超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶强度的影响。

选取凝胶强度最高的样品 A (超声时间 40 min, 超声功率 180 W, NaCl 质量分数 3%) 和样品 0 (未经处理) 进行比较, 测定凝胶的白度、持水性、水分分布、扫描电镜和 FTIR, 并测定凝胶蛋白的 H_0 和 T-SH 和二级结构。

2.5 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶特性的影响

鱼糜的凝胶特性是衡量其品质的主要指标; 白度是衡量食品质量和外观质量的物理指标; WHC 是鱼糜凝胶保水性的定量指标, 指鱼糜凝胶

的三维网络中保持水分的能力, 可间接反应鱼糜凝胶的结构。表 4 为超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶特性的影响。由表 4 可知, 与对照组相比, 超声波处理后 SHG 的凝胶强度、内聚性、弹性、胶黏性和咀嚼性分别提高 46.43%, 15.52%, 9.58%, 24.70%, 26.22%。结果表明超声波处理可以改善 SHG 的质构特性, 此结果与李斌等^[26]一致。超声波处理后 SHG 的白度为 81.06, 比对照组提高了 8.97%。此现象的原因可能是适当的超声波处理有助于形成更均匀的凝胶网络, 从而利于蛋白质表面容纳更多的水分子, 并通过光的折射产生相对较高的白度。Lu 等^[27]研究发现超声波处理后复合鱼糜凝胶的白度值略有增加, 而差异并不显著, 与本研究结果一致。超声波处理后, SHG 的持水性最高为 81.01%, 比对照组提高了 23.93%, 表明超声波处理可以改善 SHG 的持水性, 此结果与凝胶强度的趋势一致。这可能是因为适当的超声波处理, 通过空化效应将部分肌原纤维蛋白展开, 促进巯基和疏水基团的暴露, 通过二硫键和疏水相互作用加强分子间交联, 从而形成更致密的凝胶网络结构,

表 4 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶特性的影响

Table 4 Effect of ultrasonic treatment on gel properties of sturgeon surimi

名称	凝胶强度/(g·cm)	内聚性	弹性	胶黏性	咀嚼性	白度	持水性/%
样品 0	449.44 ± 5.90	0.58 ± 0.01	4.28 ± 0.04	5.79 ± 0.36	26.54 ± 0.83	74.39 ± 0.27	65.37 ± 0.66
样品 A	658.13 ± 7.36	0.67 ± 0.01	4.69 ± 0.06	7.22 ± 0.18	33.50 ± 0.63	81.06 ± 0.03	81.01 ± 0.76

使更多的水被包裹在凝胶网络中, 进而提高了 SHG 的持水性^[28]。而超声时间过长或功率太高, 则会造成蛋白质氧化和降解, 破坏蛋白质-水的相互作用, 导致形成不均匀的三维凝胶网络, 削弱其保持水分子的能力, 造成鱼糜凝胶水分流失^[29]。

2.6 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶水分分布的影响

T_2 弛豫时间可以直接反映凝胶基质中水分子的流动性和分布, 这与 WHC 密切相关^[30]。 T_2 弛豫时间分别对应 T_{21} (0~10 ms) 为结合水、 T_{22} (10~100 ms) 为不易流动水、 T_{23} (100~10 000 ms) 为自由水。超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶弛豫时间的影响如图 3a 所示, 与对照组相比, 超声波处理后使 T_{22} 鱼糜凝胶峰向左移, 表明弛豫时间缩短, 水分子迁移率降低。这可能是由于超声波处理促进了蛋白质分子的展开和交联, 有助于形成紧凑而牢固的网络结构, 从而在凝胶网络中包裹更多的水分子^[31]。对各峰面积进行积分, 得出超声波处理后 T_{21} 和 T_{23}

由 0.02% 和 58.80% 下降至 0.01% 和 57.04%, T_{22} 由 41.18% 升至 42.95%, 此结果表明超声波处理可以形成更紧凑和规则的网络结构, 从而提高 SHG 不易流动水的比例, 降低游离水的含量, 这与鲟鱼鱼糜凝胶的 WHC 增强相对应, 此结果与 He 等^[32]一致。

核磁共振成像可以通过氢质子图直观的监测凝胶中的水分迁移状态, 颜色的深浅反映了水分子分布和迁移的变化。超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶氢质子密度的影响如图 3b 所示, 其中红色表示质子密度高, 蓝色表示质子信号密度低。与对照组相比, 超声波处理后红色加深且分布的更加均匀。Ye 等^[8]也研究发现超声波处理会导致罗非鱼鱼糜热诱导凝胶表现出较高的氢质子密度, 与本结果一致。凝胶的氢质子密度越高, 持水性越高, 这与 WHC 的变化一致。

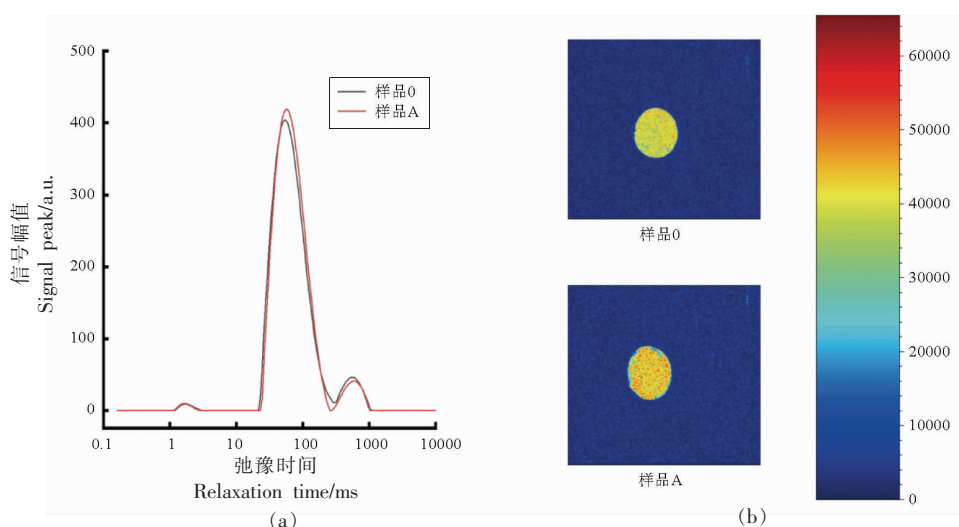


图 3 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶 T_2 弛豫时间和氢质子密度的影响

Fig.3 Effects of ultrasonic treatment on the T_2 relaxation time and hydrogen proton density of sturgeon surimi gel

2.7 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶微观结构的影响

扫描电子显微镜是评估鱼糜凝胶特性的指标之一^[33]。超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶微观结构的影响如图 4 所示。如图 4a、4b 所示, 对照组凝胶的三维网络结构较松散且有大量的大孔隙。三维网络结构对凝胶的功能特性起决定性作用, 这解释了对照组凝胶质构特性和 WHC 差的原因之一。如图 4c、4d 所示, 超声波处理显著改善了 SHG 的

微观结构, 形成更加致密、均匀的三维网络结构。结果表明, 凝胶三维网络更牢固, 水分分布更均匀, 凝胶的品质更好, 这也与上文凝胶强度和 WHC 结果一致。Gao 等^[34]也发现超声波预处理可以形成孔径小、微观结构均匀、致密的凝胶。

2.8 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶表面疏水性和总巯基的影响

表面疏水性 (H_0) 通常用于表示蛋白质中非极

性疏水基团的展开、聚集及蛋白质结构的变化。这些变化会影响蛋白的凝胶形成能力。表面疏水性用 BPB ($\mu\text{g}/\text{mg}$) 表示,且 BPB 与表面疏水性呈反比。图 5 表示超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶表面疏水性和总巯基的影响。由图 5 可知,与对照组相比,超声波处理后凝胶的 BPB 下降至 $0.33 \mu\text{g}/\text{mg}$,此时其表面疏水性较高,表明适当的超声波处理使得 SHG 表面疏水性增加。可能是超声的空化作用导致肌原纤维蛋白展开,从而暴露出更多的疏水氨基酸残基,暴露的疏水基团可以与 BPB 结合,导致其表面疏水性增强。疏水相互作用会影响肌球蛋白的聚集^[35]。表面疏水性的增加可以增强疏水相互作用,进而可以促进肌球蛋白的聚集,提高蛋白质-蛋白质间的相互作用从而发生交联,利于 SHG 的形成,此结果与 Xie 等^[21]的研究结果

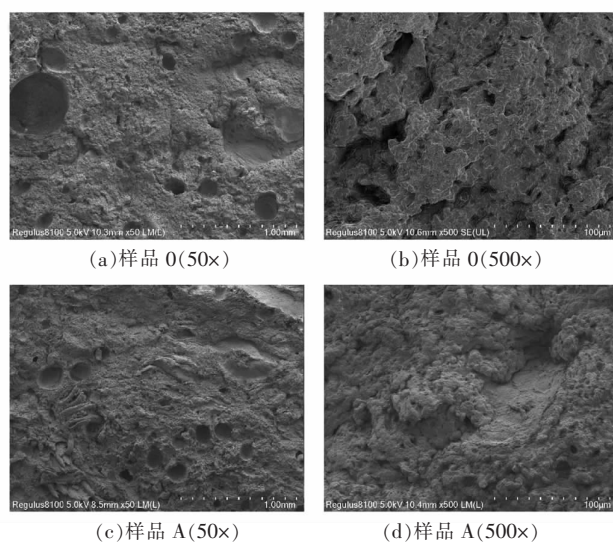


图 4 超声处理对鲟鱼鱼糜凝胶微观结构的影响

Fig.4 Effect of ultrasonic treatment on the microstructure of surimi gel of sturgeon

2.9 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

傅里叶红外光谱 (FTIR) 广泛用于肌原纤维蛋白结构的定量和定性分析。酰胺 I 带 ($1600\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$) 通常用来分析蛋白质的二级结构,其峰值位置分布如下: $1650\sim 1660 \text{ cm}^{-1}$ 为 α -螺旋, $1640\sim 1650 \text{ cm}^{-1}$ 为无规则卷曲, $1610\sim 1640 \text{ cm}^{-1}$ 为 β -折叠和 $1660\sim 1695 \text{ cm}^{-1}$ 为 β -转角^[39]。图 6 为超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶红外光谱及蛋白质二级结

一致。

总巯基 (T-SH) 含量是指蛋白质中或蛋白质表面巯基含量的总和,可以反映蛋白质的展开状态。如图 5 所示,超声波处理后凝胶 T-SH 的含量降低为 $1.04 \mu\text{mol}/\text{g}$,此时凝胶的三维网络最稳定。造成这种现象的原因可能是超声处理促进了巯基的暴露,而裸露的巯基极易氧化形成二硫键,进而促进蛋白质凝胶网络的形成。因为氢键和二硫键是维持蛋白质结构稳定的重要化学键^[36]。而过长时间的超声处理则会破坏分子内或分子间的二硫键,导致 T-SH 含量增加^[37]。Feng 等^[38]研究发现适当超声处理会导致 T-SH 含量降低而形成二硫键,有利于蛋白质间的聚集,从而产生凝胶强度更稳定的凝胶网络,其结果与本试验结果一致。

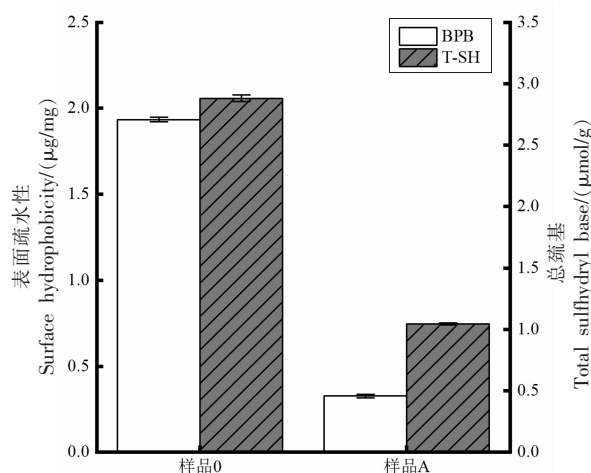


图 5 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶 BPB 和总巯基含量的影响

Fig.5 Effects of ultrasonic treatment on BPB and total sulfhydryl groups of sturgeon surimi gel

构的影响。

由图 5a 可知,与对照组相比,在酰胺 I 带区域超声处理对 SHG 的峰形没有较大变化,表明超声波处理对蛋白质的多肽骨架影响较小,此结果与 Liu 等^[40]结果一致。由图 5b 可知,与对照组相比,超声处理后 SHG 中蛋白二级结构的 β -折叠和 β -转角分别增加 3.10% 和 39.04% ,无规则卷曲和 α -螺旋分别下降 12.79% 和 37.09% ,此时 α -螺旋含量最低, β -折叠含量最高。鱼糜凝胶的凝胶强度

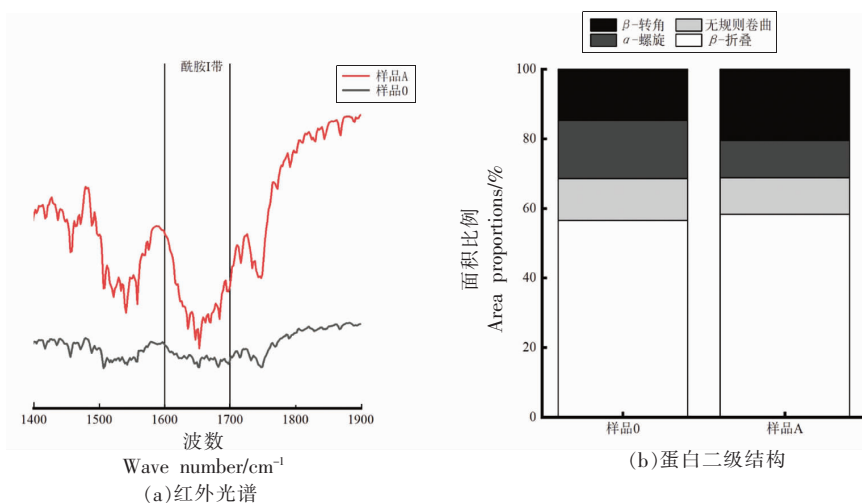


图6 超声波处理对鲟鱼鱼糜凝胶红外光谱及蛋白质二级结构的影响

Fig.6 Effects of ultrasonic treatment on infrared spectroscopy and protein secondary structure of sturgeon surimi gel

与 α -螺旋含量成负相关^[41],与 β -折叠的含量成正相关^[42]。超声波处理会破坏 α -螺旋,导致鱼糜中蛋白质的聚集和交联发生改变,进而形成更有序的凝胶结构。 β -折叠会影响蛋白质分子间的氢键,进而会影响蛋白质-蛋白质间的聚集, β -转角含量的增多也有利于形成持水性高,凝胶网络稳定的凝胶结构^[43]。结果表明, α -螺旋和无规则卷曲的减少,以及 β -折叠和 β -转角的增加,可能与SHG的凝胶强度增加和WHC提高密切相关。

3 结论

超声波处理制备鲟鱼鱼糜凝胶的最佳工艺参数为:超声时间40 min,功率180 W,NaCl浓度3%,此条件下制备的鲟鱼鱼糜凝胶强度为657.00 g·cm。与空白对照组相比,超声处理可提高鲟鱼鱼糜凝胶的凝胶强度、质构特性、白度和持水性。鱼糜凝胶蛋白分析显示,超声处理可诱导 α -螺旋和无规则卷曲向 β -折叠和 β -转角的转化,这会改变蛋白质的二级结构,暴露更多的巯基和疏水基团,从而促进二硫键及氢键的形成,并促进肌原纤维蛋白间的相互交联,形成更均匀、致密的鲟鱼鱼糜凝胶结构。本研究可为开发高品质的鲟鱼鱼糜制品提供数据参考。

参 考 文 献

[1] ZHAO X Y, WANG X F, ZENG L J, et al. Ef-

fects of oil-modified crosslinked/acetylated starches on silver carp surimi gel: Texture properties, water mobility, microstructure, and related mechanisms[J]. Food Research International, 2022, 158: 111521.

[2] XU P F, LIU L, LIU K, et al. Flavor formation analysis based on sensory profiles and lipidomics of unrinsed mixed sturgeon surimi gels[J]. Food Chemistry: X, 2023, 17: 100534.

[3] BRONZI P, CHEBANOV M, MICHAELS J T, et al. Sturgeon meat and caviar production: Global update 2017[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2019, 35(1): 257-266.

[4] WANG Z M, YU X L, ZHAO W Y, et al. 3D printability of sturgeon paste as affected by colloid milling[J]. Journal of Food Engineering, 2023, 346: 1-9.

[5] 乔翠平. 金线鱼鱼糜和白鲢鱼鱼糜混合鱼糜凝胶协同增效作用研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2018.

QIAO C P. Study on gel properties of synergistic effects of mixed surimi from nemipterus virgatus and hypophthalmichthys molitrix[D]. Jinzhou: Bohai University, 2018.

[6] LIANG F, LIN L, HE T H, et al. Effect of transglutaminase on gel properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98(C): 105261.

[7] 邱春江. 超高压对鲢鱼中关键酶与结构蛋白质构影响的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014.

QIU C J. Effect of ultra-high pressure technology on key enzymes and structural proteions in silver carp

- processing[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2014.
- [8] 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, 2022, 161: 113386.
- [9] GAO T X, ZHAO X, LI R, et al. Synergistic effects of polysaccharide addition-ultrasound treatment on the emulsified properties of low-salt myofibrillar protein[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 123: 107143.
- [10] TONG X, YING X, JUN Q, et al. Effect of high intensity ultrasound on the gelation properties of wooden breast meat with different NaCl contents[J]. Food Chemistry, 2021, 347(3): 129031.
- [11] ZHANG C, LI X A, WANG H, et al. Ultrasound-assisted immersion freezing reduces the structure and gel property deterioration of myofibrillar protein from chicken breast[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 67: 105137.
- [12] HE X L, LV Y N, LI X P, et al. Improvement of gelation properties of silver carp surimi through ultrasound-assisted water bath heating[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 83: 105942.
- [13] 邹倩. 超声波辅助没食子酸对海鲈鱼肌原纤维蛋白理化性质与凝胶性能的影响[D]. 锦州: 渤海大学, 2020.
- ZOU Q. Effect of gallic acid by ultrasound on physicochemical properties and gel properties of *Lateolabrax Japonicus* myofibrillar protein[D]. Jinzhou: Bohai University, 2020.
- [14] NÚÑEZ-FLORES R, CANDO D, BORDERÍAS J A, et al. Importance of salt and temperature in myosin polymerization during surimi gelation[J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1226-1234.
- [15] 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.
- [16] 翟璐, 杨加成, 陈康, 等. 金枪鱼纳米鱼骨钙对鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(5): 180-188.
- ZHAI L, YANG J C, CHEN K, et al. Effect of tuna nansoncale fish bone calcium on gelation characteristic of surimi products[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(5): 180-188.
- [17] 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.
- [18] TRAFFANO-SCHIFFO V M, LANGHI L, CASTRO-GIRALDEZ M, et al. Osmotic dehydration of organic kiwifruit pre-treated by pulsed electric fields and monitored by NMR[J]. Food Chemistry, 2017, 236: 87-93.
- [19] WANG X J, YI Y X, GUO C F, et al. Enhanced sodium release and saltiness perception of surimi gels by microwave combined with water bath heating [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 1-10.
- [20] HU Y P, ZHANG L, YI Y W, et al. Effects of sodium hexametaphosphate, sodium triphosphosphate and sodium pyrophosphate on the ultrastructure of beef myofibrillar proteins investigated with atomic force microscopy [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128146.
- [21] XIE D F, DENG F H, SHU J X, et al. Impact of the frying temperature on protein structures and physico-chemical characteristics of fried surimi[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(7): 4211-4221.
- [22] MI H B, LI Y, WANG C, et al. The interaction of starch-gums and their effect on gel properties and protein conformation of silver carp surimi[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106290.
- [23] LIU R, LIU Q, XIONG S B, et al. Effects of high intensity ultrasound on structural and physicochemical properties of myosin from silver carp[J]. Ultrasonics - Sonochemistry, 2016, 37: 150-157.
- [24] LI N, ZHANG K X, DU J Y, et al. High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of *Litopenaeus vannamei* myofibrillar protein[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106217.
- [25] 马瑶兰, 熊善柏, 尹涛, 等. 斩拌方式和氯化钠浓度对白鲢鱼糜品质特性的影响[J]. 现代食品科技, 2017, 33(8): 182-187.
- MA Y L, XIONG S B, YIN T, et al. Effects of chopping method and sodium chloride concentration on the quality characteristics of silver carp surimi[J].

- Modern Food Technology, 2017, 33(8): 182-187.
- [26] 李斌, 陈海琴, 赵建新, 等. 超声辅助凝胶化对鲟鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2015, 41(6): 65-69.
- LI B, CHEN H Q, ZHAO J X, et al. Effect of ultrasonic assisted gelling on gel properties of silver carp surimi[J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(6): 65-69.
- [27] LU Y F, ZHU Y J, YE T, et al. Physicochemical properties and microstructure of composite surimi gels: The effects of ultrasonic treatment and olive oil concentration[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106065.
- [28] XIA G, JUAN Y, TAO Y, et al. Simultaneous effect of high intensity ultrasound power, time, and salt contents on gelling properties of silver carp surimi[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134478.
- [29] YI S, LIANG M, YU F, et al. The improvement of gel and physicochemical properties of porcine myosin under low salt concentrations by pulsed ultrasound treatment and its mechanism[J]. Food Research International, 2021, 141: 110056.
- [30] XU Y X, LV Y N, YIN Y M, et al. Improvement of the gel properties and flavor adsorption capacity of fish myosin upon yeast β -glucan incorporation[J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133766.
- [31] HE X L, LV Y N, LI X P, et al. Effect of oat β -glucan on gel properties and protein conformation of silver carp surimi[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(7): 3367-3375.
- [32] 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.
- [33] RODIANA N, NURUL H, NORAYATI I, et al. Effect of polydextrose on physicochemical properties of threadfin bream (*Nemipterus spp*) surimi during frozen storage[J]. Journal of Food Science and Technology, 2013, 50(4): 739-746.
- [34] GAO X, JIRAWAT Y, WU R L, et al. Effect of ultrasound pre-treatment modes on gelation properties of silver carp surimi[J]. LWT, 2021, 150: 111945.
- [35] AN Y Q, LIU Q, XIE Y R, et al. Aggregation and conformational changes of silver carp myosin as affected by ultrasound-calcium combination system[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2018, 98(14): 5335-5343.
- [36] HE D, YI X Z, XIA G H, et al. Effects of fish oil on the gel properties and emulsifying stability of myofibrillar proteins: A comparative study of tilapia, hairtail and squid[J]. LWT, 2022, 161: 113373.
- [37] TANG L, JIRAWAT Y. High - intensity ultrasound improves threadfin bream surimi gelation at low NaCl contents[J]. Journal of Food Science, 2021, 86(3): 842-851.
- [38] FENG J Q, WANG J, ZHANG T, et al. Independent and combined effects of ultrasound and transglutaminase on the gel properties and *in vitro* digestion characteristics of bay scallop (*Argopecten irradians*) adductor muscle[J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1185-1194.
- [39] LI M, YANG R, FENG X H, et al. Effects of low-frequency and high-intensity ultrasonic treatment combined with curdlan gels on the thermal gelling properties and structural properties of soy protein isolate[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 127: 107506.
- [40] LIU H T, ZHANG J N, WANG H, et al. High-intensity ultrasound improves the physical stability of myofibrillar protein emulsion at low ionic strength by destroying and suppressing myosin molecular assembly[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 74: 105554.
- [41] FAN D M, HUANG L L, LI B, et al. Acoustic intensity in ultrasound field and ultrasound-assisted gelling of surimi[J]. LWT - Food Science and Technology, 2017, 75: 497-504.
- [42] SHAO J H, ZOU Y F, XU X L, et al. Evaluation of structural changes in raw and heated meat batters prepared with different lipids using Raman spectroscopy[J]. Food Research International, 2011, 44(9): 2955-2961.
- [43] CHENG Y, DONKOR P O, REN X F, et al. Effect of ultrasound pretreatment with mono-frequency and simultaneous dual frequency on the mechanical properties and microstructure of whey protein emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 434-442.

Effect of Ultrasonic Treatment on Heat-induced Gel Properties of Sturgeon Surimi

WEI Fang¹, YAN Ziheng¹, YANG Jiahua¹, CUI Shan¹, SUN Meijun¹, KANG Chunyu^{*}, ZHAO Chunqing^{2*}

¹College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, Hebei

²Department of Continuing Education, Baoding Open University, Baoding 071001, Hebei)

Abstract Objective: To improve the gel properties of sturgeon surimi and promote the development of high-quality sturgeon surimi products. The effect of ultrasonic treatment on gel properties of sturgeon surimi was studied. Methods: In this study, the optimal conditions for the preparation of sturgeon surimi heat-induced gel (SHG) by ultrasonic treatment were obtained through response surface experiment, in which gel strength was the main evaluation index, and ultrasonic time, ultrasonic power, and NaCl mass fraction were the evaluation factors. The effects of ultrasonic treatment on the heat-induced gel properties of sturgeon surimi were evaluated by analyzing the changes in relevant parameters, such as gel strength, whiteness, water retention, water distribution, and microstructure. The structural characteristics of sturgeon surimi gel protein were analyzed by analyzing secondary structure, total sulfhydryl group (T-SH), and surface hydrophobicity (H_0). The optimal conditions of ultrasonic treatment were an ultrasonic time of 40 min, ultrasonic power of 180 W, and NaCl mass fraction 3%. The heat-induced gel strength of sturgeon surimi prepared under these conditions was the highest, reaching 657.00 g·cm. This data was generally consistent with the theoretical value predicted by the response surface model (660.40 g·cm). The results showed that ultrasonic treatment could improve the gel properties, whiteness, and water retention of SHG. In addition, ultrasonic treatment could promote the transformation of α -helix and random curling to pleated sheet and β -turning, promote the unfolding of the myofibrillar protein, reduce T-SH content, and promote the cross-linking of proteins. Conclusion: Ultrasonic treatment could improve the gel strength, texture properties, whiteness, and water retention of sturgeon surimi heat-induced gel, and promote the cross-linking of sturgeon myofibrillar proteins, which was conducive to the formation of more uniform and dense gel structure. This study provides a technical means to improve the gel properties of sturgeon surimi.

Keywords sturgeon; surimi; ultrasonic treatment; gel properties; protein structure