

高强度超声与低氯化钠盐协同作用下 鲢鱼糜凝胶的品质变化

高霞, 冯庆祥, 胡杨, 尹涛, 尤娟, 熊善柏, 刘茹*

(华中农业大学食品科学技术学院, 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心(武汉), 湖北武汉 430070)

摘要: 该实验以鲢鱼糜为研究对象, 研究了高强度超声功率、时间及盐含量单因素对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响; 在此基础上, 设计三因素五水平二次旋转正交实验, 通过测定 TCA-可溶性肽、持水性等指标分析各因素对鱼糜凝胶性能的影响, 并建立回归方程, 同时, 通过绘制响应面分析因素间的交互作用。结果表明盐含量对鱼糜凝胶性能的影响最大, 其次是超声时间, 超声功率的影响最小。盐含量越高, 鱼糜中蛋白质的降解程度越小, 鱼糜凝胶持水性越好。在低盐含量 (<0.75%) 下, TCA-可溶性肽随超声功率升高呈下降趋势; 然而, 在 $\geq 0.75\%$ 盐含量下, TCA-可溶性肽随超声功率升高而升高。综上, 超声功率与低盐间存在协同效应, 高强度超声处理可一定程度抑制低盐鱼糜中蛋白质的降解, 提高了低盐鱼糜凝胶的持水性。

关键词: 二次旋转正交; 高强度超声; 鱼糜凝胶; TCA-可溶性肽; 盐含量

文章编号: 1673-9078(2023)11-197-204

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.11.1521

Changes in the Quality of Silver Carp Surimi Gel Induced by the Synergistic Effect of High-intensity Ultrasound and Low-sodium Chloride Treatment

GAO Xia, FENG Qingxiang, HU Yang, YIN Tao, YOU Juan, XIONG Shanbai, LIU Ru*

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University; Engineering Research Center of Green development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education; National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Wuhan 430070, China)

Abstract: In this study, silver carp surimi was taken as the research object. The effect of a single factor, high-intensity ultrasound (HIU) power, time or salt content, on the breaking force and deformation depth of the surimi gel was firstly investigated. On this basis, three-factor and five-level quadratic rotation orthogonal experiments were designed to investigate the effects of influencing factors on the gel properties of surimi through measuring indices such as TCA-soluble peptides and water holding capacity (WHC). The regression equation was established. Meanwhile, the response surface was plotted to analyze the interactive effects among the factors. The results showed that salt content had the greatest effect on the gel properties of surimi, followed by ultrasonic time, with the HIU power having the least effect. The higher the salt content, the less the protein degradation in surimi, the higher WHC of surimi gel. At a low-salt content (<0.75%), TCA-soluble peptides decreased with the increase of HIU power, whereas, TCA-soluble peptides increased as the HIU power increased in a high-salt environment ($\geq 0.75\%$). Taken together, there was a synergistic effect between low salt and HIU power, and high-intensity ultrasonic treatment can inhibit the degradation of

引文格式:

高霞,冯庆祥,胡杨,等.高强度超声与低氯化钠盐协同作用下鲢鱼糜凝胶的品质变化[J].现代食品科技,2023,39(11):197-204

GAO Xia, FENG Qingxiang, HU Yang, et al. Changes in the quality of silver carp surimi gel induced by the synergistic effect of high-intensity ultrasound and low-sodium chloride treatment [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(11): 197-204

收稿日期: 2022-11-29

基金项目: 现代农业产业技术体系专项基金 (CARS-45)

作者简介: 高霞 (1995-), 女, 博士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: 2652103761@qq.com

通讯作者: 刘茹 (1982-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: liuru@mail.hzau.edu.cn

protein in low-salt surimi to some extent, which improves the WHC of surimi gels with a low salt content.

Key words: quadratic rotation orthogonal; high intensity ultrasound; surimi gel; TCA-soluble peptides; salt content

鱼糜制品因高蛋白、低脂肪、营养价值丰富而广受消费者的喜爱^[1,2]。商业生产时,需加入 2%~3%氯化钠(Sodium Chloride, NaCl)使鱼糜中的盐溶性蛋白充分溶解^[3]。加热过程中,溶出的蛋白伸展并暴露部分活性基团^[4],分子间发生相互作用,形成有序结构的弹性凝胶体^[5,6]。但是,盐含量摄入过多易引发心血管疾病,不利于人体健康。诸多学者报道了鱼糜制品生产时的减盐措施,包括使用钠盐替代物、添加外源亲水胶体、使用新兴高新技术等^[7-9]。其中,前期实验室研究^[10,11]发现高强度超声波技术(10~1 000 W/cm², 20~100 kHz)可促进肌球蛋白溶解,提高低盐(1%, *m/m*)鱼糜凝胶的质构性能,但降低了高盐(>3%)鱼糜凝胶的质构性能,推测这与超声强度及盐含量等因素有关。目前,大多数研究集中于超声强度或盐含量单因素对鱼糜凝胶性能的影响^[12-14],然而,关于超声功率、时间及盐含量三者同时施加对鱼糜凝胶性能的影响鲜有报道。

二次旋转正交设计是一种将正交与回归融为一体的试验方法,可用较少的实验组合实现与完全实施实验相同项数的回归模型,并且旋转性使得预测值的方差处处相等^[15]。应用二次旋转正交试验可同时研究多个单因素水平对响应值的影响,是一种较好的设计方案。

本实验以鲢鱼糜为原料,采用二次旋转正交设计研究超声功率、时间及盐含量三者同时对鱼糜凝胶 TCA-可溶性肽的影响,同时测定鱼糜凝胶色度与持水性的变化,通过建立非线性回归方程、绘制响应面解析三因素的贡献度及因素间的交互作用,探讨超声处理对不同盐含量鱼糜中蛋白质降解情况及凝胶品质的影响,以期为高强度超声辅助鱼糜凝胶的生产提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与试剂

冷冻鲢鱼糜[AAA级,水分含量为 73.26%(*m/m*)],由井力水产食品有限公司提供。福林酚、氯化钠等均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

KQ-300DE 型数控超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;K600 食品调理机,德国博朗电器公司;TA-XT Plus 质构仪,美国 Stable micro system 公司;

1750 型紫外可见分光光度计,日本岛津公司;色度计,美国 Hunter Lab 公司;硬度计,日本 Kiya Seisakusho 公司。

1.3 方法

1.3.1 高强度超声波处理与鱼糜凝胶样品制备

取 150 g 鱼糜于真空袋(160×240×0.2 mm)中并封口,将其置于超声清洗槽中,加入 4 L 冰水控制超声温度为(15±2)℃进行超声处理。

鱼糜凝胶的制备参考本实验室前期^[16]的方法。将鱼糜用食品调理机空斩 3 min,通过添加冰水调节水分含量至 78%,加入 NaCl 后继续斩拌 5 min。斩拌后的肉糜经抽真空、灌肠后,于 40℃加热 1 h、90℃加热 0.5 h。加热结束后,立即将鱼糜凝胶置于流动水下冷却,然后转移至 4℃冰箱存放过夜,第二天进行相关指标的测定。

研究高强度超声功率单因素对鱼糜凝胶质构性能的影响时,实验参数设置为:功率 0~300 W,时间 10 min,盐含量 2%(*m/m*);研究超声时间单因素对鱼糜凝胶质构性能的影响时,实验参数设置为:时间 0~40 min,功率 180 W,盐含量 2%(*m/m*);研究盐含量单因素对鱼糜凝胶质构性能的影响时,实验参数设置为:盐含量 0~2%(*m/m*),功率 180 W,时间 15 min。

1.3.2 质构性能测定

将鱼糜凝胶于室温中平衡 0.5 h,剥去肠衣后,切成 2 cm 高的圆柱体。选用 P/0.25S 球形探头测定样品的破断力与凹陷深度,测试参数设置为:探头运行程序 Return to start,测前速度 2 mm/s,测中速度 1 mm/s,测后速度 2 mm/s,触发力 5 g。每个样品测试 6~10 个平行。

1.3.3 TCA-可溶性肽测定

取 3 g 鱼糜凝胶样品,加入 5%(*m/V*)冷的 TCA 溶液(27 mL),并用高速分散机于 6 000 r/min 下均质 1 min。均质液于 4℃下放置 1 h,10 000 r/min 离心 10 min 后保留上清液。上清液中 TCA-可溶性肽含量的测定参考 Lowry 法^[17],用酪氨酸作标曲。

1.3.4 色度测定

将鱼糜凝胶切成 5 mm 厚的薄片,使用色度计测定样品的 L^* (亮度值)、 a^* (红绿值)、 b^* (黄蓝值)。鱼糜凝胶的白度值(Whiteness,记为 B)按下式计算:

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

式中:

B ——白度;

L^* ——亮度值;

a^* ——红绿值;

b^* ——黄蓝值。

1.3.5 持水性测定

将样品切成 5 mm 厚, 记录其质量 W_1 , 用三层滤纸包裹薄片, 使用硬度计对其施加 5 kg 恒力并持续 3 min, 去除滤纸后称量样品质量, 记为 W_2 。持水性 (Water Holding Capacity, WHC) 按下式计算:

$$C = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

C ——持水性 (WHC), %;

W_2 ——压后样品质量, g;

W_1 ——压前样品质量, g。

1.4 试验设计

根据单因素实验结果, 运用中心组合设计原理^[6], 以超声功率、时间及盐含量为自变量, TCA-可溶性肽、色度及持水性为响应值, 设计二次旋转正交试验, 因素水平表及组合设计表分别见表 1、表 2。采用 SAS9.0 软件对二次旋转正交试验结果进行非线性回归拟合, 二阶多项式如下:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \beta_{ij} X_i X_j \quad (3)$$

式中:

Y ——响应值;

β ——方程的回归系数;

X_i, X_j ——因素水平。

1.5 数据分析

所有实验均进行三次重复, 每次至少 3 个平行, 实验数据以平均值±标准偏差表示。采用 Origin 9.0 软件作图, SPSS 22.0 软件中的 Duncan 方法进行显著性检验, $P < 0.05$ 表示数据间差异显著。

2 结果与讨论

2.1 单因素实验

2.1.1 高强度超声功率对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响

高强度超声功率对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响如图 1 所示。与对照组相比, 超声处理后鱼糜凝胶的破断力显著升高 ($P < 0.05$), 且随着超声功率增

大呈现先上升后下降的趋势, 在 240 W 时获得最大值 (452.21 g), 较对照组提高了 19.64%。有研究表明鱼糜凝胶的破断力与蛋白质分子间的相互作用有关^[18]。鱼糜中的功能性蛋白是盐溶性肌球蛋白^[11], 其良好的分散性是促进分子间相互作用的重要前提。前期研究发现^[10]高强度超声处理显著提高了肌球蛋白的溶解度, 这有利于提高鱼糜凝胶的破断力。类似地, 尹艺霖等^[19]研究表明增大超声功率促进了肌原纤维蛋白的分散性, 从而提高了蛋白凝胶性能。此外, 由图 1 可知, 鱼糜凝胶的凹陷深度随超声功率增大呈现先升高后趋于稳定的趋势。当超声功率为 180、210、240 W 时, 鱼糜凝胶的破断力与凹陷深度无显著差异 ($P > 0.05$), 故选取 180 W 超声功率为二次旋转正交设计的零水平值。

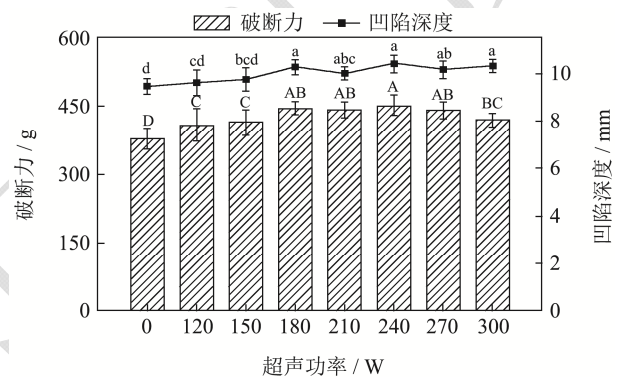


图 1 高强度超声功率对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响

Fig.1 Effect of HIU power-on the breaking force and deformation of surimi gels

注: 小写字母不同表示凹陷深度差异显著 ($P < 0.05$); 大写字母不同表示破断力差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

2.1.2 高强度超声时间对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响

根据上述实验结果, 固定超声功率为 180 W, 研究了超声时间对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响, 结果见图 2。鱼糜凝胶的破断力随着超声时间延长呈先升高后下降的趋势, 在 15 min 时获得最大值 440.10 g, 较未超声处理提高了 8.90%。高强度超声处理适当时间时, 其产生的空穴效应及高剪切力、微射流等机械效应能够提高鱼糜中蛋白质分子的分散性^[20], 这有利于促进热诱导过程中蛋白质间发生相互作用, 破断力增大; 然而, 超声时间过长时, 蛋白质易发生降解^[21], 从而降低了鱼糜凝胶的破断力。类似地, Zhang 等^[22]研究发现相较于超声时间 15 min 时, 超声处理 30 min 后虾肉糜凝胶的破断力显著降低 ($P < 0.05$)。此外, 鱼糜凝胶的凹陷深度随超声时间延长无显著变化 ($P > 0.05$)。

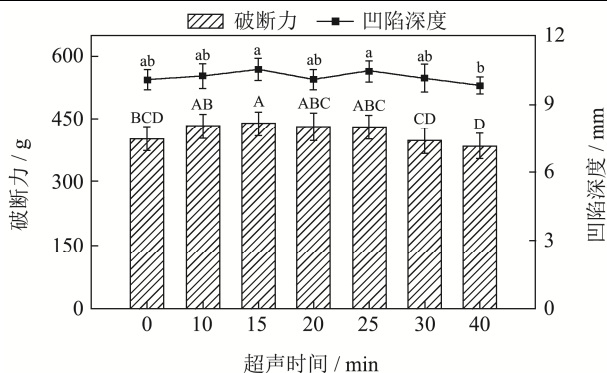


图2 高强度超声时间对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响
Fig.2 Effect of HIU time on the breaking force and deformation of surimi gels

2.1.3 盐含量对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响

图3为盐含量对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响。未添加NaCl时,样品的破断力与凹陷深度较低,仅为193.03 g、5.46 mm。随着盐含量升高,鱼糜凝胶的破断力与凹陷深度显著增大 ($P < 0.05$),当盐含量为2.0% (m/m)时,其破断力与凹陷深度较对照组分别提高了127.16%、97.89%。鱼糜凝胶过程中,蛋白质分子(尤其盐溶性蛋白)发生解折叠暴露出活性位点,促进了分子间相互作用,形成质地良好的弹性凝胶体^[2]。低盐环境中,肌球蛋白主要以组装体形式存在^[23],溶解性较低,限制了加热过程中蛋白质分子的变性与聚集,从而鱼糜凝胶质地较差。增加盐含量提高了肌球蛋白的溶出与分散性^[10],有利于热诱导时蛋白质分子充分伸展,从而促进分子间发生相互作用,使得鱼糜凝胶的破断力与凹陷深度显著增大。该结果与Cando等^[24]的报道一致。

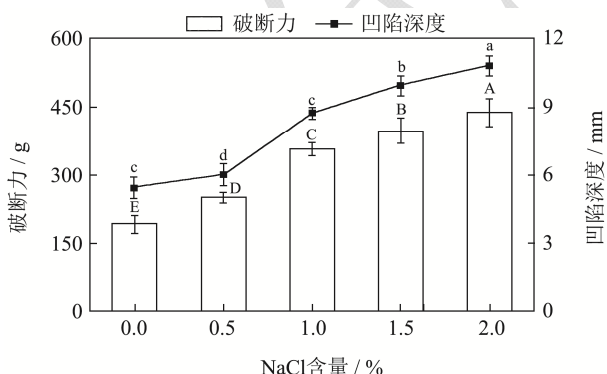


图3 盐含量对鱼糜凝胶破断力与凹陷深度的影响
Fig.3 Effect of NaCl contents on the breaking force and deformation of surimi gels

2.2 二次旋转正交试验

在单因素实验基础上,分别选取超声功率180 W、时间15 min及盐含量1.5% (m/m)为中心水平,设计

三因素五水平的二次旋转正交实验,结果见表1。

表1 二次旋转正交设计因素水平表

Table 1 Factor level table of quadratic rotation orthogonal design

| 因素 | 水平 | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 |
| 超声功率 X_1/W | 120 | 150 | 180 | 210 | 240 |
| 超声时间 X_2/min | 0 | 10 | 15 | 20 | 30 |
| 盐含量 $X_3/%$ | 0 | 1.0 | 1.5 | 2.0 | 3.0 |

2.2.1 高强度超声处理对不同含盐量鱼糜凝胶TCA-可溶性肽的影响

TCA-可溶性肽可表征蛋白质的降解程度,其数值越大说明小分子肽含量越多,蛋白质降解程度越高^[16]。采用二次旋转正交设计研究了超声功率、时间及盐含量对鱼糜凝胶TCA-可溶性肽的影响,结果如表2所示。二次旋转正交设计共包含23组实验,其中9组设置为零水平的重复实验。

表2 二次旋转正交设计及试验结果

Table 2 Results of quadratic rotation orthogonal design

| 试验号 | X_1 | X_2 | X_3 | Y |
|-----|---------|--------|---------|------------|
| 1 | 210(1) | 20(1) | 2.0(1) | 0.27±0.004 |
| 2 | 210(1) | 20(1) | 1.0(-1) | 0.28±0.003 |
| 3 | 210(1) | 10(-1) | 2.0(1) | 0.25±0.003 |
| 4 | 210(1) | 10(-1) | 1.0(-1) | 0.26±0.001 |
| 5 | 150(-1) | 20(1) | 2.0(1) | 0.25±0.004 |
| 6 | 150(-1) | 20(1) | 1.0(-1) | 0.28±0.003 |
| 7 | 150(-1) | 10(-1) | 2.0(1) | 0.26±0.003 |
| 8 | 150(-1) | 10(-1) | 1.0(-1) | 0.27±0.004 |
| 9 | 120(-2) | 15(0) | 1.5(0) | 0.26±0.003 |
| 10 | 240(2) | 15(0) | 1.5(0) | 0.26±0.003 |
| 11 | 180(0) | 0(-2) | 1.5(0) | 0.26±0.004 |
| 12 | 180(0) | 30(2) | 1.5(0) | 0.27±0.003 |
| 13 | 180(0) | 15(0) | 0(-2) | 0.31±0.005 |
| 14 | 180(0) | 15(0) | 3.0(2) | 0.28±0.003 |
| 15 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.25±0.003 |
| 16 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.25±0.003 |
| 17 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.26±0.002 |
| 18 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.26±0.003 |
| 19 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.26±0.002 |
| 20 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.29±0.000 |
| 21 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.28±0.001 |
| 22 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.27±0.002 |
| 23 | 180(0) | 15(0) | 1.5(0) | 0.27±0.004 |

注: X_1 表示超声功率, W; X_2 表示超声时间, min; X_3 表示盐含量, %; Y表示TCA-可溶性肽, $\mu\text{mol Tyr}/10\text{ g pro}$ 。下同。

对表 2 结果进行方差分析, 结果见表 3。方差分析结果表明, 回归方程 $Y=0.5198-0.0015X_1-0.0048X_2-0.1162X_3+0.000002X_1^2+0.00002X_1X_2+0.00005X_2^2+0.0003X_1X_3+0.0175X_3^2$ 具有显著性 ($R^2=0.93, P<0.01$), 说明该模型适用于描述本实验条件下 TCA-可溶性肽的变化。

根据主因素回归系数的绝对值判断, 盐含量对 TCA-可溶性肽的影响最大, 超声时间次之, 超声功率的影响最小。观察表 3 发现, 超声功率、时间均与 TCA-可溶性肽呈极显著负相关 ($P<0.01$)。鱼糜中含有内源性蛋白酶^[25], 可将蛋白质水解为小分子肽。据此结果推测超声波处理可抑制内源性蛋白酶的活性, 削弱了其水解能力。有研究表明超声波与传统加热联用可有效抑制过氧化氢酶的活性^[26], 胃蛋白酶和胰蛋白酶经 305.62 W/cm^2 强度超声处理 18 min 后, 活性分别下降了 15%和 50%^[27,28], 类似地, Zhang 等^[29]通过研究超声波辅助凝胶化发现超声波处理抑制了罗非鱼内源性蛋白酶的活性。关于超声处理对内源性蛋白酶活性的影响及机理有待进一步研究。

此外, 方差分析指出盐含量与 TCA-可溶性肽呈极显著负相关 ($P<0.01$), 即 TCA-可溶性肽随盐含量升高而降低, 这可能与内源性蛋白酶活性受离子强度影响有关。前期研究发现^[11], 当盐含量提高至 5%时, 鱼糜中 TCA-可溶性肽较 1%盐含量时下降了 23.22%。相似地, Ohkubo 等^[30]对白鱼中内源性蛋白酶活性的研究发现, 增大盐含量至 3%即可抑制蛋白酶的活性。

表 3 TCA-可溶性肽的回归系数与方差分析

Table 3 Regression coefficients and analysis of variance of the regression models for TCA-soluble peptides

| 因子 | 参数估值 | 标准差 | P |
|----------|------------|-------------|----------|
| 常数项 | 0.519 8 | 0.031 1 | <0.000 1 |
| X_1 | -0.001 5 | 0.000 2 | <0.000 1 |
| X_2 | -0.004 8 | 0.001 2 | 0.000 3 |
| X_3 | -0.116 2 | 0.012 0 | <0.000 1 |
| X_1X_1 | 0.000 002 | 0.000 000 6 | 0.003 7 |
| X_1X_2 | 0.000 02 | 0.000 006 | 0.000 2 |
| X_2X_2 | 0.000 05 | 0.000 009 | <0.000 1 |
| X_1X_3 | 0.000 3 | 0.000 06 | <0.000 1 |
| X_2X_3 | -0.000 4 | 0.000 3 | 0.257 7 |
| X_3X_3 | 0.017 5 | 0.000 9 | <0.000 1 |
| 模型 | $R^2=0.93$ | | <0.000 1 |

由表 3 可知, X_1X_3 (超声功率-盐含量)、 X_1X_2 (超声功率-时间) 的交互作用对 TCA-可溶性肽具有显著影响 ($P<0.05$), 因此绘制响应面解析两因素间的交互作用, 结果见图 4。由图 4a 可知, 低盐条件下 (0、

0.5%), TCA-可溶性肽随超声功率升高而降低, 说明超声处理协同低盐条件可抑制蛋白质的降解, 推测这与超声处理抑制蛋白酶活有关。该结果一定程度上解释了高强度超声协同低盐后鱼糜凝胶的破断力与凹陷深度升高^[31]; 然而, 高盐条件下 (2%、3%), TCA-可溶性肽随超声功率升高而升高, 这不利于鱼糜凝胶品质。盐含量增加, 鱼糜中肌球蛋白的溶解性提高, 推测分散性良好的蛋白质分子经超声处理后更易发生降解, 易损害鱼糜的凝胶品质。观察图 4b 发现, 超声功率较低 ($\leq 150 \text{ W}$) 时, 随时间延长, 鱼糜凝胶的 TCA-可溶性肽含量逐渐降低; 然而, 当超声功率高达 240 W 时, TCA-可溶性肽随超声时间延长逐渐升高。该结果说明, 当超声强度较低时, 延长超声时间有利于更大程度地抑制蛋白酶活性, 但是当超声强度较大时, 长时间超声处理也会造成蛋白质分子降解, 产生更多 TCA-可溶性肽。

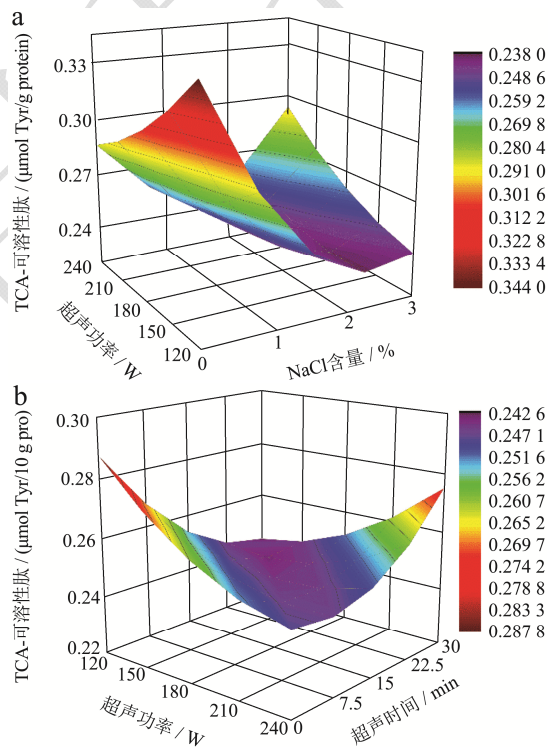


图 4 超声功率-盐含量 (a) 与超声功率-时间 (b) 的交互作用对 TCA-可溶性肽的影响

Fig.4 Effect of interactive effect of HIU power-salt contents (a) and HIU power-time (b) on the TCA-soluble peptides

2.2.2 高强度超声处理对不同含盐量鱼糜凝胶色度的影响

色度是评价鱼糜制品品质的重要指标^[32], 由表 4 可知, 色度的回归模型均具有显著性 ($P<0.01$)。超声功率与 L^* 、 b^* 、白度值显著正相关 ($P<0.01$), 增大超声功率可获得白度较大的鱼糜凝胶, 推测这与超声处理诱导形成了致密的凝胶结构有关^[33], 从而样品

表面光反射率变大,白度值增加。此外,盐含量与 a^* 、 b^* 呈显著负相关($P < 0.01$),即盐含量降低,鱼糜凝胶的红绿值、黄蓝值增大。 a^* 取决于鱼糜中肌红蛋白的含量^[34],当盐含量降低时,鱼糜在胶凝过程中易发生蒸煮损失,析出较多水分,推测肌红蛋白的浓度因

此增大,导致 a^* 升高。Pietrasik 和 Li-Chan^[6]也报道了类似的结果。超声时间对各指标无显著影响($P > 0.05$)。进一步观察表 4 发现,超声功率、时间及盐含量间的交互作用对色度影响不显著($P > 0.05$)。

表 4 色度的回归系数与方差分析

Table 4 Regression coefficients and analysis of variance of the regression models for color values

| 因子 | L^* | | | a^* | | | b^* | | | 白度 | | |
|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|------------|----------|----------|------------|----------|----------|
| | 参数估值 | 标准差 | P | 参数估值 | 标准差 | P | 参数估值 | 标准差 | P | 参数估值 | 标准差 | P |
| 常数项 | 69.707 | 3.292 | <0.000 1 | -1.404 | 0.608 | 0.024 8 | 2.381 | 1.559 | 0.131 8 | 69.560 | 3.355 | <0.000 1 |
| X_1 | 0.096 | 0.025 | 0.000 4 | 0.001 | 0.005 | 0.761 7 | 0.041 | 0.012 | 0.001 0 | 0.087 | 0.026 | 0.001 3 |
| X_2 | 0.207 | 0.133 | 0.125 8 | 0.012 | 0.025 | 0.634 3 | -0.005 | 0.063 | 0.942 3 | 0.203 | 0.136 | 0.140 2 |
| X_3 | -1.014 | 1.334 | 0.450 4 | -0.733 | 0.246 | 0.004 2 | -2.132 | 0.631 | 0.001 3 | -0.483 | 1.360 | 0.723 5 |
| X_1X_1 | -0.000 2 | 0.000 06 | 0.000 5 | -0.000 000 8 | 0.000 01 | 0.944 7 | -0.000 1 | 0.000 03 | <0.000 1 | -0.000 2 | 0.000 06 | 0.002 3 |
| X_1X_2 | -0.000 9 | 0.000 6 | 0.147 5 | -0.000 1 | 0.000 1 | 0.366 8 | 0.000 3 | 0.000 3 | 0.304 1 | -0.001 | 0.001 | 0.139 2 |
| X_2X_2 | -0.000 8 | 0.001 | 0.429 1 | -0.000 08 | 0.000 2 | 0.621 6 | -0.001 | 0.000 5 | 0.029 4 | -0.001 | 0.001 | 0.552 7 |
| X_1X_3 | -0.005 | 0.006 | 0.475 1 | 0.000 5 | 0.001 | 0.693 2 | -0.000 8 | 0.003 | 0.785 9 | -0.004 | 0.007 | 0.505 6 |
| X_2X_3 | -0.015 | 0.039 | 0.703 1 | 0.007 | 0.007 | 0.320 1 | -0.01 | 0.018 | 0.538 7 | -0.012 | 0.039 | 0.769 1 |
| X_3X_3 | 0.346 | 0.095 | 0.000 6 | 0.114 | 0.018 | <0.000 1 | 0.498 | 0.045 | <0.000 1 | 0.211 | 0.097 | 0.033 5 |
| 模型 | $R^2=0.69$ | | | $R^2=0.71$ | | | $R^2=0.90$ | | | $R^2=0.57$ | | |

2.2.3 高强度超声处理对不同含盐量鱼糜凝胶持水性的影响

表 5 持水性的回归系数与方差分析

Table 5 Regression coefficients and analysis of variance of the regression models for WHC

| 因子 | 参数估值 | 标准差 | P |
|----------|------------|---------|----------|
| 常数项 | 61.323 | 20.889 | 0.005 3 |
| X_1 | 0.032 | 0.165 | 0.847 4 |
| X_2 | 0.228 | 0.807 | 0.778 9 |
| X_3 | 29.435 | 8.067 | 0.000 7 |
| X_1X_1 | -0.000 008 | 0.000 4 | 0.984 7 |
| X_1X_2 | -0.000 6 | 0.004 | 0.880 4 |
| X_2X_2 | -0.001 | 0.006 | 0.850 3 |
| X_1X_3 | -0.010 | 0.039 | 0.798 2 |
| X_2X_3 | -0.053 | 0.233 | 0.820 1 |
| X_3X_3 | -6.584 | 0.624 | <0.000 1 |
| 模型 | $R^2=0.85$ | | <0.000 1 |

持水性可用于表征蛋白质与水分子之间的结合能力^[35]。方差分析(表 5)显示,持水性方程具有显著性($R^2=0.85$, $P < 0.01$),且鱼糜凝胶的持水性与盐含量成正比($P < 0.01$),即增大盐含量,鱼糜凝胶持水性随之提升。随盐含量升高,由于电荷屏蔽效应使肌原纤维蛋白之间的静电斥力增大^[10],肌球蛋白溶出增多,蛋白质分散得更好,形成的凝胶网络更加致密均

匀^[11],提升了对水分子的截留能力。

观察表 5 发现,超声功率及时间对鱼糜凝胶持水性无显著影响($P > 0.05$),这似乎与前期实验^[16]相矛盾,但其实不然,本实验的超声参数与文献报道存在差异。另外,由表 5 可知,盐含量对持水性的影响最大,其回归系数(29.435)远大于超声功率(0.032)与时间(0.228)的回归系数,推测盐含量水平削弱了超声功率及时间水平对凝胶持水性的影响。

3 结论

用于评价鱼糜凝胶品质的模型均具有显著性($P < 0.01$),且各因素对鱼糜凝胶品质影响的贡献度依次为盐含量>超声时间>超声功率。主因素分析表明盐含量与 TCA-可溶性肽呈负相关,增大盐含量可抑制蛋白质降解,从而获得持水性较高和红度值较低的凝胶体。此外,交互作用分析揭示了低盐与超声功率间存在协同效应,增大超声功率降低了低盐鱼糜中蛋白质的降解程度,提高了其持水性。综上,高强度超声波的应用可抑制低盐环境中蛋白质的降解,这有利于提高低盐鱼糜的凝胶性能。

参考文献

[1] Omura Futo, Takahashi Kigen, Okazahi Emiko, et al. A novel and simple non-thermal procedure for preparing

- low-pH-induced surimi gel from Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) using glucose oxidase [J]. Food Chemistry, 2020, 321: 126722.
- [2] Lanier Tyre, Carvajal Patricio, Yongsawatdigul Jirawat. Surimi Gelation Chemistry [M]. In Jae W. Park (Ed.), Surimi and Surimi Seafood (2nd Ed., pp. 435-489). Boca Raton, FL: CRC Press, 2005.
- [3] 王艳敏,于加美,石彤,等.原子力显微镜研究 L-半胱氨酸对鲢肌球蛋白溶液热聚集行为的影响[J].食品科学,2018,39(14):1-8.
- [4] Nunez-Flores Ruth, Cando Deysi, Borderias Javier, et al. Importance of salt and temperature in myosin polymerization during surimi gelation [J]. Food Chemistry, 2018, 239: 1226-1234.
- [5] YUAN Li, KONG Yunfei, LENG Weijun, et al. L-glutamic acid affects myosin aggregation and the physical properties of bighead carp (*Aristichthys nobilis*) surimi gels [J]. Food Bioscience, 2021, 40: 100886.
- [6] Pietrasik Zbigniew, Li-Chan Eunice. Response surface methodology study on the effects of salt, microbial transglutaminase and heating temperature on pork batter gel properties [J]. Food Research International, 2002, 35: 387-396.
- [7] Tahergorabi Reza, Jaczynski Jacek. Physicochemical changes in surimi with salt substitute [J]. Food Chemistry, 2012, 132(3): 1281-1286.
- [8] Singh Avtar, Prabowo Fathur, Benjakul Soottawat, et al. Combined effect of microbial transglutaminase and ethanolic coconut husk extract on the gel properties and *in-vitro* digestibility of spotted golden goatfish (*Parupeneus heptacanthus*) surimi gel [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106107.
- [9] WANG Limei, WANG Xian, MA Jing, et al. Effects of radio frequency heating on water distribution and structural properties of grass carp myofibrillar protein gel [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128557.
- [10] 高霞,谢亚如,胡杨,等.高强度超声处理对不同盐浓度下鲢鱼肌球蛋白理化特性的影响[J].食品科学,2022,43(7):67-73.
- [11] GAO Xia, XIE Yaru, YIN Tao, et al. Effect of high intensity ultrasound on gelation properties of silver carp surimi with different salt contents [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 70: 105326.
- [12] TANG Ling, Yongsawatdigul Jirawat. Physicochemical properties of tilapia (*Oreochromis niloticus*) actomyosin subjected to high intensity ultrasound in low NaCl concentrations [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 63: 104922.
- [13] WANG Guan, LIU Manman, CAO Liwei, et al. Effects of different NaCl concentrations on self-assembly of silver carp myosin [J]. Food Bioscience, 2018, 24: 1-8.
- [14] ZHANG Yin, ZENG Qingxiao, ZHU Zhiwei, 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.
- [15] 宋照风,朱峰,赵海全.二次旋转正交法优化提取板栗壳斗中多酚类物质的工艺及其抗氧化性研究[J].天然产物研究与开发,2018,30:1021-1029.
- [16] GAO Xia, Yongsawatdigul Jirawat, Wu R L, et al. Effect of ultrasound pre-treatment modes on gelation properties of silver carp surimi [J]. LWT, 2021, 150: 111945.
- [17] Lowry O H, Rosebrough N J, Farr A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent [J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, 193(1): 265-275.
- [18] MA Yaolan, XIONG Shanbai, YOU Juan, et al. Effects of vacuum chopping on physicochemical and gelation properties of myofibrillar proteins from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [J]. Food Chemistry, 2018, 245: 557-563.
- [19] 尹艺霖,刘学军.不同超声功率处理对鲢鱼肌原纤维蛋白理化特性及凝胶品质的影响[J].肉类研究,2019,33(3):14-19.
- [20] TANG Ling, Yongsawatdigul Jirawat. High-intensity ultrasound improves threadfin bream surimi gelation at low NaCl contents [J]. Journal of Food Science, 2021, 86: 842-851.
- [21] LIU Ru, LIU Qing, XIONG Shanbai, et al. Effects of high intensity ultrasound on structural and physicochemical properties of myosin from silver carp [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2017, 37: 150-157.
- [22] ZHANG Tong, WANG Jie, FENG Jiaqi, et al. Ultrasonic pretreatment improves the gelation properties of low-salt *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 86: 106031.
- [23] 高霞,曹立伟,熊善柏,等.不同质量浓度鲢鱼肌球蛋白低温自组装动力学及理化性质[J].食品科学,2019,40(1):1-8.
- [24] Cando Deysi, Herranz Beatriz, Borderias Javier, et al. Different additives to enhance the gelation of surimi gel with reduced sodium content [J]. Food Chemistry, 2016, 196: 791-799.
- [25] WANG Qian, JIAO Xidong, YAN Bowen, et al. Inhibitory effect of microwave heating on cathepsin L-induced

- degradation of myofibrillar protein gel [J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129745.
- [26] Gennaro L, Cavella Silvana, Romano Romano, et al. The use of ultrasound in food technology I: inactivation of peroxidase by thermosonication [J]. Journal of Food Engineering, 1999, 39: 401-407.
- [27] TIAN Zhongmin, WAN Mingxi, WANG Supin, et al. Effects of ultrasound and additives on the function and structure of trypsin [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2004, 11: 399-404.
- [28] 王康. 超声对胃蛋白酶, 胰蛋白酶, 过氧化氢酶作用的研究 [J]. 中国生物工程杂志, 2006, 5: 81-84.
- [29] ZHANG Yin, ZENG Qingxiao, ZHU Zhiwei. Effect of ultrasonic treatment on the activities of endogenous transglutaminase and proteinases in tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi during gel formation [J]. Journal of Food Process Engineering, 2011, 34: 1695-1713.
- [30] Ohkubo Makoto, Osatomi Kiyoshi, Hara Kenji, et al. Myofibrillar proteolysis by myofibri-bound serine protease from white croaker *Argyrosomus argentatus* [J]. Fishery Science, 2005, 71: 1143-1148.
- [31] GAO Xia, YOU Juan, YIN Tao, 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.
- [32] Castillo Zamudio, Paniagua Martinez, Ortuno Cases, et al. Use of high-power ultrasound combined with supercritical fluids for microbial inactivation in dry-cured ham [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 67: 102557.
- [33] 叶月华, 刘晓艳, 白卫东, 等. 响应面法优化微波-超声波联用改善低盐罗非鱼糜凝胶的特性 [J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(22): 162-169.
- [34] GAO Ruichang, WANG Xin, SHI Tong, et al. Enhanced physical properties of reduced-salt surimi gels from Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*) by L-arginine and L-histidine [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(11): e15887.
- [35] 徐安琪, 杨榕, 朱煜康, 等. 紫菜粉添加对鲑鱼鱼糜凝胶特性及其蛋白结构的影响 [J]. 食品科学, 2021, 42(2): 46-52.