

DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028394

引用格式: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. YE Yuehua, LIU Xiaoyan, BAI Weidong, et al. Response surface methodology to optimize the combination of microwave and ultrasonic to improve the properties of low-salt tilapia surimi gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(22): 162-169.

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

叶月华¹, 刘晓艳^{1,2,3*}, 白卫东^{1,2,3}, 赵文红^{1,2,3}, 王凤娇⁴

1(仲恺农业工程学院 轻工食品学院, 广东 广州, 510225)2(广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东 广州, 510225)
3(现代农业工程创新研究院, 广东 广州, 510225)4(广州酒家集团利口福食品有限公司, 广东 番禺, 511442)

摘要 为改善低盐罗非鱼鱼糜的凝胶特性,该实验以冷冻罗非鱼片为原料,对微波-超声波联用辅助低盐热诱导凝胶进行工艺参数优化,在单因素试验的基础上,选取微波功率、超声功率和处理时间3个因素进行响应面实验。根据所得试验结果确定最佳工艺条件为:微波功率620 W,超声功率330 W,处理时间8 min,在此条件下,罗非鱼鱼糜的凝胶强度为(403.30 ± 15.91) g·cm、持水性为87.88%、白度为81.76,分别比传统1.5%(质量分数)NaCl处理组提高了63.62%、10.54%及5.76%。与其他不同加热方式处理对比,微波-超声波作用下低盐罗非鱼鱼糜的凝胶强度、持水性、白度及全质构等指标均得到显著改善($P < 0.05$);通过扫描电镜发现微波-超声波处理组的凝胶结构最为均匀致密,表面平整光滑,更有利于提升鱼糜的质构特性。因此,复合物理场不仅可以明显提高罗非鱼鱼糜的凝胶性质,还能有效降低钠盐的摄入量,对后期新能源低钠盐淡水鱼鱼糜制品的开发具有一定的参考价值。

关键词 罗非鱼;鱼糜;低盐;微波;超声波;凝胶特性;响应面分析

享有“白肉三文鱼”美誉的罗非鱼,是我国重要的大宗淡水鱼资源,其不仅肉质鲜嫩、价格亲民,而且营养物质丰富^[1]。目前,罗非鱼对外销售主要以冷冻全鱼或鱼片形式,但将其加工为多样化的鱼糜制品可以促使淡水鱼产业实现效益最大化^[2]。作为水产品加工程度较高的鱼糜制品,具有烹饪简便、细嫩味美、耐贮藏、低脂高蛋白等优点,颇为适合当今消费者的需求^[3]。在制作传统鱼糜制品过程中,通常需要添加2%~3%的NaCl,但NaCl摄入量过高可能会诱发高血压、动脉硬化、心血管疾病等健康问题,开发低盐鱼糜制品是大势所趋^[4]。然而,在低盐条件下鱼糜中的盐溶性肌原纤维蛋白无法充分溶出以发生交联作用,导致低盐鱼糜产品易产生凝胶强度低、持水性低、口感不佳等品质问题^[5]。因此,提高低盐鱼糜凝胶品质是目前亟待解决的必要问题。

由于绝大多数淡水鱼比海水鱼更易发生凝胶劣化现象,导致深加工产品种类少,附加值低^[6]。近几年,不少研究通过开拓并优化不同物理场加工工艺(如微波、超声波、超高压、高密度CO₂等技术)来改

善淡水鱼鱼糜的凝胶特性^[7]。朱玉安等^[8]通过比较蒸制、煮制及微波3种不同加热方式对鲢鱼鱼糜凝胶性质的影响后发现微波加热表现最佳,能使蛋白网络交联结构更加致密有序;叶川^[9]利用响应面法优化微波加热制备低盐白鲢鱼糜(微波功率12.5 W/g,微波时间70 s,加盐量1.25%),此条件下得到的凝胶强度(264.60 g·cm)、持水性(69.31%)及白度(78.36)均高于传统水浴加热制备的低盐白鲢鱼糜凝胶指标;闫虹等^[10]通过分析传统水浴加热、单独微波加热和水浴微波联用对白鲢鱼糜凝胶特性的影响,发现水浴微波联用加热制备的鱼糜凝胶特性表现最优;李斌等^[11]采用超声波辅助鲢鱼糜凝胶化阶段,并且与对照组相比后发现在0.49~0.85 W/cm²声功率强度内能够有效改善鲢鱼糜的凝胶性质。但关于利用微波-超声波联用这一复合物理场加工技术辅助制备低盐罗非鱼鱼糜热诱导凝胶的研究却罕见报道。

因此,本实验以冷冻罗非鱼片为原料,研究了微波功率、超声功率和处理时间3个因素对罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响,并在单因素试验基础上,采用响应

第一作者:硕士研究生(刘晓艳副教授为通讯作者,E-mail:63577396@qq.com)

基金项目:国家重点研发计划蓝色粮仓科技创新(2018YFD0901003);广东省重点领域研发计划项目(2019B020212002);仲恺农业工程学院-大连工业大学-广州酒家合作项目;仲恺农业工程学院研究生科技创新基金项目(KJCX2020007)

收稿日期:2021-06-25,改回日期:2021-07-29

面分析方法,以凝胶强度为响应值,对低盐罗非鱼鱼糜热诱导凝胶的微波-超声波复合物理场加工工艺进行优化,同时通过生物扫描电镜对比分析了不同加热方式处理条件下罗非鱼鱼糜凝胶的微观结构状态。旨在为微波-超声波联用处理技术在淡水鱼鱼糜加工方面的应用提供理论依据,以期为绿色新能源低钠盐淡水鱼鱼糜制品的开发提供更多有价值的参考及新的思路,为提升鱼糜制品的营养品质提供新途径,推动淡水鱼糜产业链高质量发展。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

冷冻罗非鱼片,广东省茂名鸿业水产有限公司;NaCl为食品级,广东省盐业集团有限公司;2.5%戊二醛固定液,福州韦伯康生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

超声波微波组合反应系统,南京先欧仪器制造有限公司;陶瓷模具(直径9 cm×高度5 cm),广州雪诺陶瓷有限公司;TMS-Pilot 质构仪,美国FTC仪器有限公司;CR-400 色差仪,中国柯尼卡美能达投资有限公司;HITACHI Regulus 8100 生物扫描电子显微镜,北京日立高新技术公司。

1.3 试验方法

1.3.1 传统普通鱼糜凝胶和传统低盐鱼糜凝胶的制备

样品制备主要参照陈燕婷等^[12]的方法,略作修改:将存放于-20℃的冷冻罗非鱼片置于4℃冰箱中半解冻12 h,后采取1次清水2次盐水对鱼片进行漂洗,切成约30 mm×30 mm×30 mm的方块。先用食品调理机将鱼糜以20 000 r/min空斩90 s;盐斩中分别添加2.5%(质量分数,后同)和1.5% NaCl,以23 000 r/min盐斩120 s后分别得到传统普通鱼糜凝胶和传统低盐鱼糜凝胶;整个斩拌过程加入70 mL的冰水调节水分含量至75%左右,并且使鱼糜的温度控制在10℃以下。最后将斩拌均匀的鱼糜倒入直径9 cm×高度5 cm的陶瓷模具中,用聚乙烯保鲜膜封口并套上耐高温密封袋。采用传统水浴锅二段式加热方式(40℃ 60 min,90℃ 30 min)处理,加热后的凝胶样品取出后立即放入4℃冰箱冷藏过夜,待测相关指标。

1.3.2 单一微波和单一超声波处理低盐鱼糜凝胶的制备

将完成斩拌的低盐(1.5% NaCl)鱼糜放入40℃

水浴锅中进行一段加热30 min,而后利用微波加热(620 W,8 min,90℃;根据响应面试验优化数据而定)代替传统水浴二段式加热的第二段(保温模式),整个过程使用冰袋控制温度,之后取出样品得到微波单一物理场辅助低盐鱼糜热诱导凝胶,立即放入4℃冰箱冷藏过夜,待测相关指标;

将完成斩拌的低盐(1.5% NaCl)鱼糜放入40℃水浴锅中进行一段加热30 min,二段加热置于90℃水浴中保温30 min,并辅以超声波处理(330 W;根据响应面试验优化数据而定),整个过程使用冰袋控制温度,之后取出样品得到超声波单一物理场辅助低盐鱼糜热诱导凝胶,立即放入4℃冰箱冷藏过夜,待测相关指标。

1.3.3 复合物理场处理低盐鱼糜凝胶的制备

将完成斩拌的低盐(1.5% NaCl)鱼糜放入40℃水浴锅中进行一段加热30 min,然后再放入微波-超声波组合反应釜中90℃保温代替传统水浴二段式加热的第二段(保温模式)处理8 min,整个过程使用冰袋控制温度,分别设置微波功率、超声功率、处理时间等参数,之后取出样品得到复合物理场辅助低盐鱼糜热诱导凝胶,立即放入4℃冰箱冷藏过夜,待测相关指标。

1.3.4 单因素试验

添加1.5%的NaCl进行斩拌,先放入40℃水浴锅中进行一段加热30 min,再进行微波-超声波保温处理,其中温度设为90℃,分别进行微波功率、超声功率和处理时间3个单因素的选择。其中,微波功率的选择试验条件:超声功率300 W,微波功率分别设为400、500、600、700、800 W,处理时间为7 min。超声功率的选择试验条件:微波功率设为600 W,超声波功率分别设为100、200、300、400、500 W,处理时间为7 min。处理时间的选择试验条件:微波功率为600 W,超声波功率为300 W,处理时间分别设为3、5、7、9、11 min。处理完后,取出的样品冰水冷却后放4℃冰箱保存。

1.3.5 凝胶强度和质构的测定

参考YU等^[13]和PETCHARAT等^[14]的方法略作修改:取出4℃的鱼糜凝胶样品置于室温下平衡30 min,将其切成1 cm×1 cm×1 cm正方体,利用FTC质构仪对鱼糜凝胶强度和质构进行测定。凝胶强度测定条件:选用12.7 mm柱形探头,检测速度为60 mm/min,穿刺距离为4 mm,触发力0.075 N,每组样品平行测定3次。质构测定条件:选用75 mm圆

盘探头,压缩形变为40%,检测速度为60 mm/min,触发力为0.075 N,探头回升到样品表面上的高度20 mm,力量感应元量程50 N;使用全质构分析程序进行数据的采集与分析,获得硬度、弹性、胶黏性和咀嚼性等参数。每组样品平行测定3次。

1.3.6 鱼糜凝胶持水性的测定

参考 WANG 等^[15]的方法略作修改:将凝胶样品切成0.6 cm × 1 cm × 4 cm 左右的薄片,准确称重(W_1)后置于3层滤纸中间,用滤纸包好后装入50 mL离心管中,5 ℃、6 000 r/min 下离心10 min。离心结束后立即对样品进行称量(W_2)。每组样品平行测定3次,计算如公式(1)所示:

$$\text{持水性}/\% = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (1)$$

1.3.7 鱼糜凝胶白度的测定

参考 MI 等^[16]的方法略作修改:切取厚度为5 mm 的鱼糜凝胶薄片,采用色差仪分别测定鱼糜凝胶的 L^* 值、 a^* 值、 b^* 值,测试前预热15 min,用校正板进行校正,之后镜头垂直于薄片上,压紧,勿漏光,按下摄像按钮,待屏幕上显示数据稳定后,记录下相应数据,每组样品平行测定3次,根据公式(2)计算白度(whiteness, W):

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

1.3.8 生物扫描电镜观察微观结构

参考 FU 等^[17]的方法略作修改:切好的样品用2.5%戊二醛固定过夜;用0.1 mol/L, pH 7.0 的磷酸缓冲液漂洗样品3次,经梯度乙醇(体积分数)脱水:20%, 40%, 60%, 80%, 100% (处理3次),每次10 min;样品用 CO_2 临界点干燥,运行临界点干燥程序:充入液体二氧化碳;液体二氧化碳置换乙醇,20 ~ 60 min;升温升压达到二氧化碳临界点,维持4 min;保持温度和压力并缓慢放出 CO_2 ,大约持续30 min;取出样品并安装到样品台,用真空离子溅射镀金,扫描电镜观察样品的形貌图。

1.3.9 响应面试验

根据单因素试验结果,应用 Design-Expert 11 软件,采用 Box-Behnken 设计方案,选取微波功率、超声功率和处理时间为考察因素,以凝胶强度为响应值,根据响应面分析设计原理,采用3因素3水平响应面试验,探究微波功率、超声功率和处理时间对鱼糜凝胶强度的影响,获得微波-超声波制备低盐罗非鱼鱼糜的最佳工艺,试验设计如表1所示。

表1 响应面试验设计因素与水平

Table 1 Factors and levels used in response surface design

水平	因素		
	A(微波功率)/W	B(超声功率)/W	C(处理时间)/min
-1	500	200	5
0	600	300	7
1	700	400	9

1.4 数据处理与分析

所有试验均进行3次平行,结果以平均值 ± 标准偏差表示,采用 Origin 2018 软件和 Design-Expert 11.0 进行作图和响应面优化设计,试验数据采用 SPSS 22.0 软件进行方差分析, Duncan 多重比较分析试验数据间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 微波功率对低盐罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响

如图1所示,经过不同微波功率处理后,鱼糜凝胶强度呈先增大后减小的趋势,其中600 W 样品的凝胶强度达最大值(321.1 g · cm),与其他组间差异显著($P < 0.05$),相比400 W 样品增加了37.46%;700 W 和800 W 样品的凝胶强度又有所下降,可见过高和过低的微波功率都不适合鱼糜凝胶的形成。这表明适当的微波功率有助于低盐罗非鱼鱼糜的凝胶强度显著提高,这是因为微波加热有利于蛋白质分子聚集形成较大的颗粒,凝胶结构会变得更致密,凝胶强度也会增加^[18-20]。

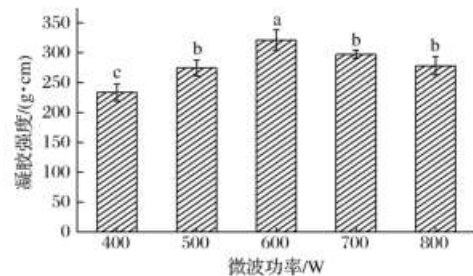


图1 不同微波功率对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响

Fig. 1 Effects of different microwave power on the gel strength of low-salt tilapia surimi

注:误差棒上的不同字母代表样品存在显著差异($P < 0.05$) (下同)

如图2所示,随着微波功率的增加,鱼糜的持水能力逐渐增加,其中400 W 样品的持水性是72.56%,且随着功率的增大,样品的持水性也得到了显著增加($P < 0.05$);400 W 和500 W 处理组的样品差异不显著($P > 0.05$),600 W 处理组的持水性达到

最大值为 79.79%；当继续增大功率时，持水性始终维持在同样的水平上 ($P > 0.05$)。不同微波功率处理对低盐鱼糜的白度值略有改善，但整体差别不大。随着功率升高，样品的白度值也逐渐提高，400 W 处理过的样品白度值是 77.75，600 W 样品的白度值是 80.62，显著提高了 3.69% ($P < 0.05$)，并达到组间峰值；700、800 W 处理过的 2 组鱼糜白度值虽然表现出略微降低的现象，可能是微波功率过大时，鱼糜凝胶表面的水分挥发更加迅速，部分水分损失后样品表皮会相对粗糙，从而造成表面的光反射率变小，白度值也变低，但它们相比 400 W 处理组还是分别增加了 1.75% 和 1.49%，这表明适当增加微波功率可明显提高鱼糜的持水性，不会对该鱼糜的白度值产生不良影响，并且能稍改善该鱼糜的白度值^[21]。

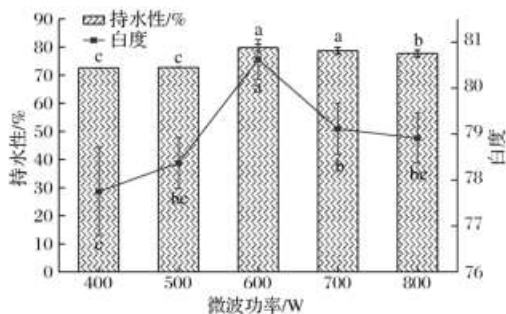


图2 不同微波功率对低盐罗非鱼鱼糜持水性和白度的影响

Fig. 2 Effects of different microwave power on the water holding capacity and whiteness of low-salt tilapia surimi

2.2 超声功率对低盐罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响

如图3所示，低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的大小随着超声功率的增大呈现出先增加后降低的趋势。超声功率达 200 W 以上可显著提高样品的凝胶强度 ($P < 0.05$)；在 300 W 时，呈现最大值 (312.95 g·cm)，比 100 W 处理组 (227.9 g·cm) 提高了 0.37 倍。当功率超过 300 W 时，凝胶强度呈降低的趋势，但 400 W 与 500 W 样品组间的凝胶强度无显著性变化 ($P > 0.05$)，可能是由于超声功率增加后，机械效应增强热效应使蛋白发生变性，影响结构稳定性，凝胶强度随之降低。因此，施加适当功率的超声处理才能有效增强鱼糜制品的机械性能。

如图4所示，变化趋势和凝胶强度、全质构分析指标相似，随着超声功率的增加，持水性先增大而后趋于稳定。300 W 处理可显著提高鱼糜样品的持水性 ($P < 0.05$)，达到最大值为 89%，相比 100 W 处理组 (85%) 提升了 4.71%；但随着功率的增大，持水性略

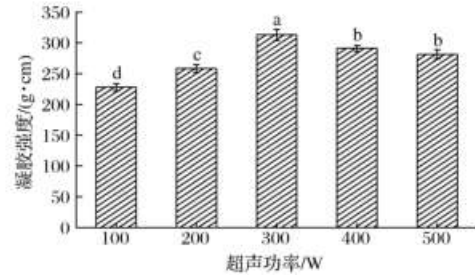


图3 不同超声功率对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响

Fig. 3 Effects of different ultrasonic power on the gel strength of low-salt tilapia surimi

有下降，其中 400 W 和 500 W 2 组样品的持水性变化相对较小，无显著差异 ($P > 0.05$)；在凝胶形成过程中，鱼糜肌原纤维蛋白发生热变性交联，所形成的 3D 网状结构可以锁住水分，提高凝胶持水性。凝胶的白度值随着超声功率的增加呈现先增大后减小的趋势。其中，300 W 处理可显著提高鱼糜的白度 ($P < 0.05$)，可达到 79.99，比 100 W 样品 (78.27) 提高了 2.20%；400 W 与 500 W 样品的白度值无显著差异 ($P > 0.05$)，整体上变化不大，由此说明超声波对低盐鱼糜白度不会产生不良效果。这可能是由于凝胶经过超声处理后持水性得到增强，使其透明度和光泽度也随之增加。

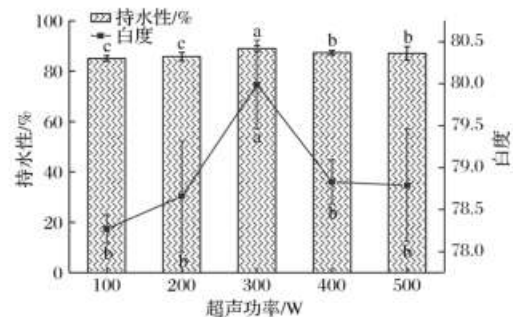


图4 不同超声功率对低盐罗非鱼鱼糜持水性和白度的影响

Fig. 4 Effects of different ultrasonic power on the water holding capacity and whiteness of low-salt tilapia surimi

2.3 处理时间对低盐罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响

如图5所示，当加热时间从 3 min 延长到 7 min 时，鱼糜凝胶强度逐渐增大且效果较为显著 ($P < 0.05$)，但是随着加热时间的延长，鱼糜凝胶强度反而有所下降。当处理时间为 7 min 时达到最大值，为 335.90 g·cm；微波加热能促使鱼糜凝胶内部温度快速升高，组织蛋白酶快速失活，进而达到鱼糜鱼糕化温度区间 (80~90℃)。

如图6所示，随着处理时间的延长，鱼糜凝胶的持水性呈先增加而后略有降低的趋势，低盐鱼糜持水

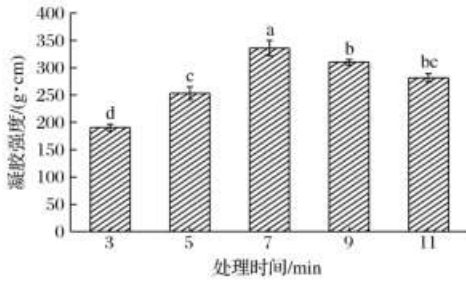


图5 不同处理时间对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响
Fig. 5 Effects of different treatment time on the gel strength of low-salt tilapia surimi

性逐渐增大,在5~11 min,低盐鱼糜凝胶的持水性虽有略微差异,但整体相差不大;其中7 min处理组的持水性达到最大值为81.36%,但与9 min处理组差异不显著($P > 0.05$),因此处理时间在7~9 min较好。在微波-超声波协同作用下,随着加热时间延长,低盐鱼糜持水性始终比3 min处理组好,这可能是由于加热时间越长,鱼糜水分挥发越多,间接性增大鱼糜凝胶的蛋白浓度,促进蛋白交联程度使凝胶网状结构更为致密,从而导致鱼糜的持水性增强^[22]。

低盐罗非鱼鱼糜的白度随着处理时间的延长,呈先上升后略微下降的趋势,当时间达到7 min时,白度值显著增大($P < 0.05$),比3 min处理组(76.12)提升了6%。考虑到微波加热的情况下,鱼糜凝胶的水分迅速挥发,当加热时间超过7 min时,会造成部分水分散失,导致样品表面亮度会降低,因而白度也随之下降。加热9 min和11 min样品的水分含量可能已相对较稳定,彼此的白度值相差不大。通过综合分析处理时间对低盐罗非鱼鱼糜凝胶特性的影响,选择最佳的处理时间为7 min,可有效节约实际生产的时间成本。

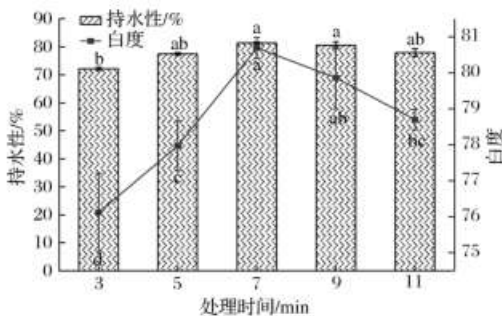


图6 不同处理时间对低盐罗非鱼鱼糜持水性和白度的影响
Fig. 6 Effects of different treatment time on the water holding capacity and whiteness of low-salt tilapia surimi

2.4 响应面法优化低盐罗非鱼鱼糜的微波-超声波处理工艺

2.4.1 响应面模型建立及回归方差分析

综合分析单因素试验结果后,微波功率选取500、600、700 W,超声功率选取200、300、400 W,时间处理选取5、7、9 min,以凝胶强度为响应值,采用Box Behnken法进行试验因素设计,试验方案及结果见表2。试验结果运用Design-Expert对各个因素进行二次多元回归拟合,得到复合物理场加工低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的二次回归方程:

$$R_1 = 395.97 + 53.28A + 51.89B + 6.31C - 4.18AB + 4.35AC - 0.6150BC - 64.31A^2 - 44.91B^2 - 28.82C^2$$

表2 Box-Behnken 响应面试验设计与结果

Table 2 Box-Behnken response surface test design and results

序号	A(微波功率)/W	B(超声功率)/W	C(处理时间)/min	R_1 (凝胶强度)/(g·cm)
1	600	400	5	367.86
2	500	300	5	247.36
3	500	200	7	175.59
4	600	200	9	277.86
5	600	200	5	265.49
6	600	300	7	394.10
7	700	200	7	291.50
8	600	300	7	401.30
9	700	300	5	344.23
10	700	300	9	367.04
11	500	400	7	290.36
12	600	300	7	397.95
13	600	300	7	395.76
14	600	400	9	377.77
15	700	400	7	389.57
16	600	300	7	390.75
17	500	300	9	252.76

由表3方差分析可以看出,以凝胶强度为响应值时,模型 $P < 0.0001$,表明此预测模型极显著。失拟项 $P = 0.7436 > 0.05$,说明失拟项差异不显著;该回归模型的相关系数 $R^2 = 0.9989$,校正决定系数 $R_{Adj}^2 = 0.9975$,表明此模型可以很好地反映凝胶强度与微波功率、超声功率和处理时间各因素之间的关系,能较好地描述微波-超声波处理工艺影响低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的情况。一次项A和B对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度影响极显著($P < 0.001$),一次项C对其影响高度显著($P < 0.01$);二次项 A^2 、 B^2 和 C^2 对其影响极显著($P < 0.001$);交互项中除BC外,其余均

达到显著水平($P < 0.05$)。根据 F 值可知,各因素对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度影响强弱顺序为: A (微波功率) $> B$ (超声功率) $> C$ (处理时间)。

2.4.2 响应面各因素交互作用分析

为更直观地了解各因素交互情况下对各指标的影响情况,根据回归模型方差分析所得数据得出相应的响应面交互图,探究 3 因素对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的交互影响,同时,等高线图可以很直观地反映 2 因素间交互的显著程度,等高线图圆形表示不具有显著交互作用,椭圆形表示具有显著交互作用。

表 3 凝胶强度回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance of gel strength regression model

方差来源	回归系数	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	77 133.64	9	8 570.40	719.13	<0.000 1	***
A	22 713.26	1	22 713.26	1 905.85	<0.000 1	***
B	21 540.58	1	21 540.58	1 807.45	<0.000 1	***
C	318.66	1	318.66	26.74	0.001 3	**
AB	69.72	1	69.72	5.85	0.046 2	*
AC	75.78	1	75.78	6.36	0.039 7	*
BC	1.51	1	1.51	0.126 9	0.732 1	
A^2	17 412.30	1	17 412.30	1 461.05	<0.000 1	***
B^2	8 492.15	1	8 492.15	712.57	<0.000 1	***
C^2	3 496.56	1	3 496.56	293.39	<0.000 1	***
误差	83.42	7	11.92			
失拟项	20.30	3	6.77	0.428 9	0.743 6	不显著
纯误差	63.12	4	15.78			
总和	77 217.07	16				

注:***表示差异极显著($P < 0.001$);**表示差异高度显著($P < 0.01$);*表示差异显著($P < 0.05$)

由图 7 的 3D 响应曲面可以看出,随着微波功率、超声功率和处理时间 3 个因素增大,低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度呈现先上升后下降趋势,与单因素试验结果一致,在设定的自变量范围内均存在响应曲面最高点,说明因素之间的影响是显著的。当其他因素恒定,在一定的范围内,随着微波功率的升高和处理时间的提高,鱼糜的凝胶强度增加幅度最大,二者的曲线相对较陡,微波功率与超声功率影响次之,从图 7-a、图 7-b 的等高线图来看,椭圆效果相对明显,而超声功率和处理时间的交互作用对凝胶强度的影响较小,表现为其曲面相对平缓,等高线图趋近圆形。

2.4.3 优化工艺的确定和验证实验

运用 Design-Expert 11 软件对试验结果进行分析优化,得出微波-超声波处理低盐罗非鱼鱼糜的理论最优工艺条件为微波功率 619.193 W、超声功率 328.127 W、处理时间 7.813 min,由此预测出低盐罗

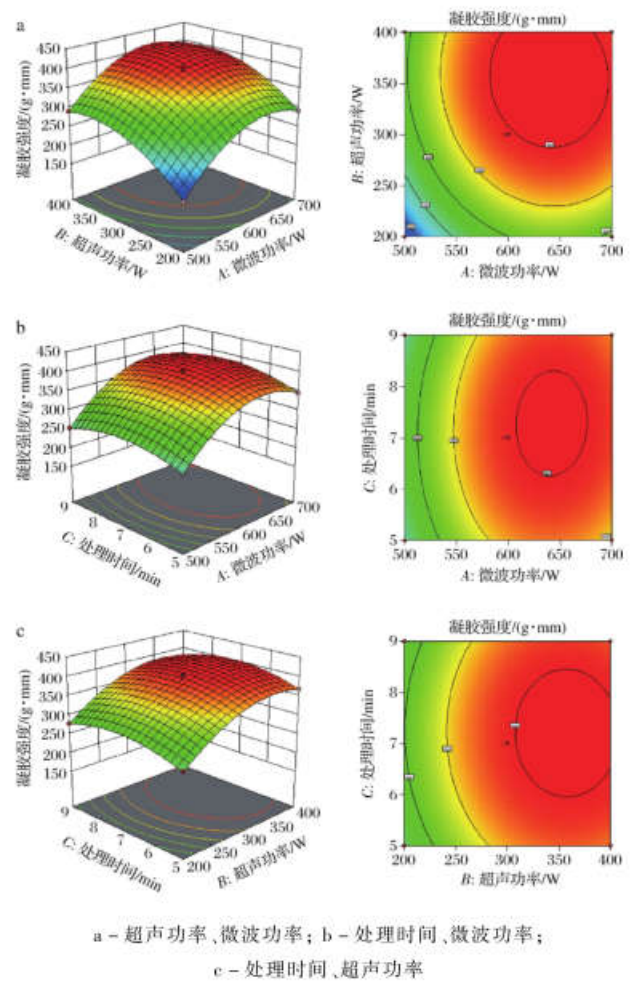


图 7 各因素的交互作用对低盐罗非鱼鱼糜凝胶强度的影响
Fig. 7 The effect of the interaction of various factors on the gel strength of low-salt tilapia surimi

非鱼鱼糜的凝胶强度为 $412.723 \text{ g} \cdot \text{cm}$ 。根据实际可操作性,将其修正为:微波功率 620 W、超声功率 330 W、处理时间 8 min。在修正的优化条件下进行验证实验,进行 3 次平行试验,取平均值后得到的凝胶强度为 $(403.30 \pm 5.91) \text{ g} \cdot \text{cm}$,与预测值比较接近,表明响应面法对微波-超声波处理工艺条件进行的优化是稳定可行的,对实践具有一定指导意义。响应面法验证结果具体见表 4。

2.5 微观结构观察及对比分析

由图 8 可以看出,传统 2.5% NaCl 处理组、传统 1.5% NaCl 处理组、微波 + 1.5% NaCl 处理组、超声波 + 1.5% NaCl 处理组及微超联用 + 1.5% NaCl 处理组的罗非鱼鱼糜结构在 5 000 倍扫描电子显微镜观察下有显著不同。在传统热诱导鱼糜处理组中,添加 2.5% NaCl 比添加 1.5% NaCl 的鱼糜凝胶结构相对紧密,孔洞较小,交联程度较好,但仍存在局部呈现

表4 试验结果验证

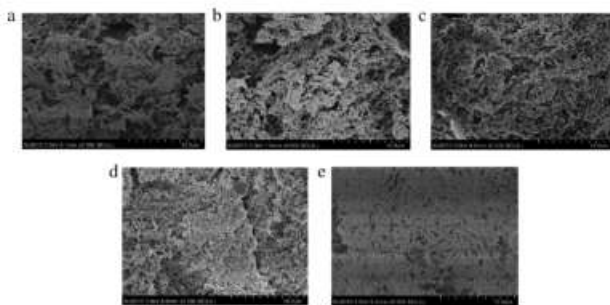
Table 4 Verification of test results

处理组	全质构分析					凝胶强度/ (g·cm)	持水性/%	白度
	硬度/N	内聚性	弹性/mm	胶黏性/N	咀嚼性/mJ			
A	4.34 ± 0.26 ^d	0.55 ± 0.01 ^a	2.02 ± 0.27 ^a	1.93 ± 0.09 ^a	5.35 ± 0.90 ^a	354.70 ± 9.14 ^b	82.40 ± 1.20 ^b	78.31 ± 1.17 ^{bc}
B	3.47 ± 0.22 ^d	0.48 ± 0.02 ^b	1.96 ± 0.25 ^d	1.69 ± 0.01 ^e	3.27 ± 0.48 ^d	246.49 ± 8.61 ^c	79.50 ± 2.80 ^c	77.31 ± 0.48 ^c
C	9.93 ± 0.44 ^b	0.49 ± 0.03 ^b	2.90 ± 0.32 ^a	2.88 ± 0.03 ^b	6.96 ± 0.06 ^b	381.21 ± 6.47 ^a	84.61 ± 1.09 ^b	80.31 ± 0.69 ^a
D	7.35 ± 0.39 ^c	0.54 ± 0.03 ^a	3.47 ± 0.13 ^b	2.39 ± 0.05 ^b	6.35 ± 0.95 ^b	367.83 ± 7.03 ^b	83.80 ± 0.92 ^b	79.94 ± 0.75 ^b
E	10.04 ± 0.47 ^a	0.59 ± 0.01 ^a	4.77 ± 0.24 ^a	4.11 ± 0.32 ^a	10.12 ± 0.42 ^a	403.30 ± 5.91 ^a	87.88 ± 1.04 ^a	81.76 ± 0.91 ^a

注:A、B、C、D、E组分别代表传统2.5% NaCl、传统1.5% NaCl、微波+1.5% NaCl、超声波+1.5% NaCl、微超联用+1.5% NaCl;不同小写字母表示差异显著

不均匀的团簇、聚集状,表面不够均匀、有序和平整。而分别经过微波和超声波处理的低盐罗非鱼鱼糜凝胶空间结构均比前者有明显的改善,凝胶网络中的孔洞数量和团簇状物显著减少,结构较为均匀,交联更加致密。微超联用处理组的低盐鱼糜凝胶不仅表面非常平整、光滑,孔隙高度均匀、微小,且其3D网状结构的致密程度和分布程度均远远高于其他组。这种微观结构极有利于牢牢地锁住更多的游离水,减少水分等物质的流失,从而有效改善了鱼糜凝胶的凝胶强度、持水性、白度和全质构等指标。

由此说明,微波-超声波复合物理场处理可以增强淡水鱼鱼糜凝胶基质密度和消除一些孔洞,形成光滑、连续、均匀的凝胶,能够在一定程度上改善低盐罗非鱼鱼糜凝胶的微观结构,这也验证了前文中基础指标测定的结果。这可能是由于复合物理场能够诱导罗非鱼鱼糜蛋白质发生有利于聚合形成立体凝胶网络结构的均匀变性^[23-24],使凝胶内部更趋向于形成均匀平整的3D网状结构。



a - 传统2.5% NaCl; b - 传统1.5% NaCl; c - 微波+1.5% NaCl;
d - 超声波+1.5% NaCl; e - 微超联用+1.5% NaCl

图8 不同加热方式处理对罗非鱼鱼糜微观结构的影响

Fig. 8 Effects of different heating methods on the microstructure of tilapia surimi

3 结论

通过单因素试验和响应面优化试验考察微波功

率、超声功率及处理时间3个因素对低盐罗非鱼鱼糜凝胶性质的影响,得到微波-超声联用处理对低盐罗非鱼鱼糜的最优工艺条件为微波功率620 W、超声功率330 W、处理时间8 min,在此条件下,鱼糜凝胶强度为(403.30 ± 5.91) g·cm,与模型预测值吻合率达到97.72%。

采用响应曲面法进行二次回归拟合,所得模型 $P < 0.001$,表明该模型影响高度显著;3个影响因素与响应目标值 R_1 之间存在交互作用的影响,其影响程度分别为:微波功率 > 超声功率 > 处理时间。

通过对不同加热方式处理罗非鱼鱼糜的微观结构进行对比分析,结果表明:微波-超声波处理组的鱼糜凝胶结构交联程度最高,孔洞微细,表面平整光滑,是有效提升低盐罗非鱼鱼糜质构特性的重要研究手段。

本研究提供了一种绿色高效加工低盐淡水鱼鱼糜的方法,能够充分改善新能源低钠盐罗非鱼鱼糜品质,为进一步实现低盐罗非鱼鱼糜制品工业化生产提供了一定的参考价值及数据支撑,同时也可作为后期机制的深入研究奠定基础。

参 考 文 献

- [1] 张晓栋,江虹霓,刘小玲.影响罗非鱼鱼糜凝胶性的工艺条件研究[J].食品科技,2016,41(8):114-120.
ZHANG X D, JIANG H R, LIU X L. The effect of processing parameters on gelling property of tilapia surimi[J]. Food Science and Technology, 2016, 41(8):114-120.
- [2] 赵志霞,吴燕燕,李来好,等.我国罗非鱼加工研究现状[J].食品工业科技,2017,38(9):363-367;373.
ZHAO Z X, WU Y Y, LI L H, et al. Current research situation of tilapia processing in China[J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(9):363-367;373.
- [3] 李萌立,杨梦昕,李忠海,等.加工方式对鱼糜凝胶性质影响研究进展[J].食品工业科技,2015,36(8):370-373.
LI M L, YANG M X, LI Z H, et al. Effect of processing methods on the gel properties of surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(8):370-373.
- [4] 邓伟.低钠复合盐和加热方式对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D].合肥:合肥工业大学,2013.
DENG W. Effects of different low sodium compound salts and heating methods on the gelling properties of surimi from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013.

- [5] 张彬. 低钠盐白鲢鱼糜制品的制备及其凝胶特性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
ZHANG B. Preparation of low sodium surimi product and research on its gel properties from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2012.
- [6] 叶月华, 钱敏, 刘晓艳, 等. 不同外源物质对淡水鱼鱼糜热诱导凝胶特性增效作用的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(12): 285-293.
YE Y H, QIAN M, LIU X Y, et al. The enhancement of different exogenous substances on thermal-induced gel properties of fresh water fish surimi [J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(12): 285-293.
- [7] 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, 19(1): 1-11.
FAN D M, JIAO X D. The mechanism of electromagnetic and electric fields to improve the gel properties of surimi products and their application [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2019, 19(1): 1-11.
- [8] 朱玉安, 刘友明, 张秋亮, 等. 加热方式对鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(23): 107-110.
ZHU Y A, LIU Y M, ZHANG Q L, et al. Effect of heating methods on gel properties of silver carp fish surimi [J]. Food Science, 2011, 32(23): 107-110.
- [9] 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.
YE C. Effects of microwave treatment and carrageenan on the gelling properties of low-salt surimi gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2016.
- [10] 闫虹, 林琳, 叶应旺, 等. 两种微波加热处理方式对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. 现代食品科技, 2014, 30(4): 196-204.
YAN H, LIN L, YE Y W, et al. Effects of two microwave heating methods on gelling properties of silver carp surimi [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(4): 196-204.
- [11] 李斌, 陈海琴, 赵建新, 等. 超声辅助凝胶化对鲢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 ultrasound assisted gelling on gel properties of silver carp surimi [J]. Food and Fermentation Industries, 2015, 41(6): 65-69.
- [12] 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.
CHEN Y T, LIN L, GAO X, et al. Effect of ultra-high pressure on the myofibrillar protein structure and gel properties of hairtail surimi [J]. Food Science, 2019, 40(21): 115-120.
- [13] YU N N, XU Y S, JIANG Q X, et al. Molecular forces involved in heat-induced freshwater surimi gel; Effects of various bond disrupting agents on the gel properties and protein conformation changes [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 69: 193-201.
- [14] PETCHARAT T, BENJAKUL S. Effect of gellan incorporation on gel properties of bigeye snapper surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 746-753.
- [15] WANG L M, XIA M Q, ZHOU Y H, 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.
- [16] 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.
- [17] FU X J, HAYAT K, LI Z H, et al. Effect of microwave heating on the low-salt gel from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 27(2): 301-308.
- [18] KO W C, YU C C, HSU K C. Changes in conformation and sulfhydryl groups of tilapia actomyosin by thermal treatment [J]. LWT - Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1316-1320.
- [19] 曹洪伟. 微波对鱼糜加工过程中肌球蛋白和关键酶结构的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
CAO H W. Effect of microwave on the structure of myosin and key enzymes in surimi processing [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [20] UZZAN M, KESSELMAN E, RAMON O, et al. Mechanism of textural changes induced by microwave reheating of a surimi shrimp imitation [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(2): 279-284.
- [21] 朱克卫. 微波处理改善鱼糜制品凝胶性的研究进展[J]. 农产品加工(学刊), 2014(18): 60-63.
ZHU K W. Advances of microwave on improvement of surimi gel properties [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2014(18): 60-63.
- [22] 付婷婷, 覃小丽, 刘雄. 食品的微波加工研究新进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(4): 187-194.
FU T T, QIN X L, LIU X. New progress in microwave processing of food [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(4): 187-194.
- [23] 王仕钰. 微波对鸡胸肉糜凝胶特性的影响研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WANG S Y. Study on the effects of microwave on gel properties of chicken breast mince meat [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [24] 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.

Response surface methodology to optimize the combination of microwave and ultrasonic to improve the properties of low-salt tilapia surimi gel

YE Yuehua¹, LIU Xiaoyan^{1,2,3*}, BAI Weidong^{1,2,3},
ZHAO Wenhong^{1,2,3}, WANG Fengjiao⁴

1(College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

2(Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Guangzhou 510225, China)

3(Academy of Contemporary Agricultural Engineering Innovations, Guangzhou 510225, China)

4(Guangzhou Restaurant Group Likoufu Food Co. Ltd., Panyu 511442, China)

ABSTRACT To improve the gel properties of low-salted tilapia surimi, this experiment took frozen tilapia fillets as raw material to optimize the process parameters of the microwave-ultrasonic assisted low-salted thermally induced gel. Based on the single factor test, three factors including microwave power, ultrasonic power and treatment time were selected to carry out the response surface test. According to the experimental results, the optimal process conditions were as follows. Under the conditions of microwave power of 620 W and ultrasonic power of 330 W for the treatment of 8 min, the gel strength of tilapia surimi was $(403.30 \pm 15.91) \text{ g} \cdot \text{cm}$, water holding capacity was 87.88% and whiteness was 81.76. Compared with traditional 1.5% NaCl treatment group, these indexes increased by 63.62%, 10.54% and 5.76%, respectively. Compared with other heating methods, microwave-ultrasonic treatment could significantly improve the gel strength, water retention, whiteness and total texture of low-salt tilapia surimi ($P < 0.05$). Through scanning electron microscopy, it was found that the microwave-ultrasonic treatment group had the most uniform and dense gel structure, and the surface was smooth, which was more conducive to improving the texture characteristics of surimi. Therefore, the composite physical field can not only significantly improve the gel properties of tilapia surimi but also effectively reduce the intake of sodium salt. This study has a certain reference value for the development of new energy low-sodium freshwater fish surimi products in the later stage.

Key words tilapia; surimi; low salt; microwave; ultrasonic; gel properties; response surface analysis