



添加圆苞车前子壳粉的鲢鱼糜凝胶工艺优化及其凝胶特性

朱亚军¹, 叶 韬^{2,3}, 王 云^{2,3}, 林 琳^{1,4,5}, 陆剑锋^{1,4,5*}

(1. 合肥工业大学食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 淮南师范学院生物工程学院, 安徽 淮南 232038;

3. 淮南师范学院, 资源与环境生物技术安徽普通高校重点实验室, 安徽 淮南 232038;

4. 合肥工业大学, 安徽省农产品精深加工重点实验室, 安徽 合肥 230009;

5. 合肥工业大学, 农产品生物化工教育部工程研究中心, 安徽 合肥 230009)

摘要: 圆苞车前子壳粉 (psyllium husk powder, PHP) 是一种富含膳食纤维的食品亲水胶体。为了解其在鱼糜制品中的作用, 本实验以冷冻鲢鱼糜为研究对象, 以凝胶强度和持水性 (water holding capacity, WHC) 为考察指标, 研究了 PHP 的添加量、凝胶化温度和凝胶化时间 3 个因素对鱼糜凝胶特性的影响。在单因素试验的基础上, 进行了三因素三水平的正交试验和验证试验。正交试验结果得到最佳工艺条件: PHP 添加量 0.1%, 凝胶化温度 45 °C, 凝胶化时间 2 h。单因素试验结果表明, 添加适量 PHP (0.1%~0.3%) 能够增加鱼糜凝胶的硬度和 WHC, 但对破断距离有不利影响; 根据验证试验中蒸煮损失率、SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE) 和扫描电镜 (scanning electron microscopy, SEM) 分析, PHP 的添加降低了较高凝胶化温度时凝胶的蒸煮损失, PHP 或许可以促进肌球蛋白重链 (myosin heavy chain, MHC) 分子间交联, 减缓蛋白质降解, 形成更加致密的凝胶结构。本研究对 PHP 作为一种新型食品原料应用于开发优质健康鱼糜制品进行了初步的探究, 以期丰富亲水胶在影响鱼糜凝胶特性中的应用研究提供一定的参考。

关键词: 鲢; 圆苞车前子壳粉; 鱼糜; 工艺优化; 凝胶特性

中图分类号: TS 254

文献标志码: A

鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 是中国主要的淡水鱼之一, 据统计, 2019 年鲢产量为 38.10 万 t, 位居全国主要淡水养殖鱼类产量的第 3 位^[1], 其营养丰富、生长快、产量高、价格低廉, 但肉中细刺较多且有土腥味^[2], 将其加工成鱼糜制品可提高产品附加值。常见的鱼糜制品主要有鱼肉香肠、鱼丸、鱼豆腐和模拟蟹肉等^[3]。

鱼糜受热形成凝胶主要经历凝胶化 (35~

40 °C), 凝胶劣化 (50~70 °C) 和鱼糕化 (>70 °C) 3 个阶段^[4]。凝胶化过程中, 肌球蛋白重链在酶的作用下发生交联, 随着温度的升高, 鱼糜中的蛋白质被内源性组织蛋白酶降解, 已形成的凝胶网络结构遭到破坏, 当温度达到 70 °C 以上时, 鱼糜凝胶的网络结构完全形成并固定化^[5]。因此, 在传统二段水浴加热过程中, 为了减少凝胶劣化的影响, 通常采用快速度过劣化温度

收稿日期: 2021-03-05 修回日期: 2021-03-30

资助项目: 安徽水产产业技术体系专项 (AHCYJSTX-08); 国家现代农业产业技术体系专项 (CARS-48)

第一作者: 朱亚军 (照片), 从事鱼糜加工与贮藏研究, E-mail: zyjdyx1@qq.com

通信作者: 陆剑锋, E-mail: lujf@sibs.ac.cn



区间的处理方式加工鱼肠^[4]。

原料鱼和加工方式对鱼糜及其制品的凝胶特性有很大的影响, 而淡水鱼相较于海水鱼来说, 凝胶特性较差^[6]。为了改善鱼糜的凝胶特性, 目前已有学者在添加外源物和使用新型加工方式上进行了相关的研究, 如在鱼糜中添加蛋白质^[7]、油脂^[8]、多酚^[9]等物质以增强凝胶的性质。此外, 徐安琪等^[10]研究发现, 添加0.4%~0.6%的紫菜粉可以增加鲢鱼鱼糜凝胶强度和持水性。另一方面, 据文献报道, 还可将超高压^[11]、微波、超声波^[12]及辐照^[13]等新技术应用于鱼糜凝胶化过程, 如杨镛等^[13]发现进行适宜强度的辐照处理后, 带鱼鱼糜中TGase活性增强, 有利于鱼糜凝胶的形成。

圆苞车前子是车前科(Plantaginaceae)车前属(*Plantago*)圆苞车前(*P. ovata*)干燥成熟的种子^[14]。圆苞车前子壳(psyllium husk, PH)含有可溶性和不可溶性膳食纤维, 含量在80%以上, 经碾磨后可得到白色或浅褐色的圆苞车前子壳粉末(psyllium husk powder, PHP)^[15]。PH具有通便和降低胆固醇的作用, 目前主要以药食同源添加在药理补品中^[16]。有相关研究将PHP或PH适量添加到肉饼^[17]、乳饮料^[18]和酸奶^[19]中, 发现PHP可以改善肉糜的保水性, 增加肉饼的黏度使其易于成型。在适宜条件下添加0.8%的PHP可改善活性乳酸菌饮料的口感和稳定性。0.12%车前子胶和0.63%脂肪配比可制备更优质的酸奶。本实验探究并优化了添加PHP制备鱼糜凝胶的工艺条件, 为今后开发优质健康鱼糜制品提供一定参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

AAA级冷冻鲢鱼糜(含6%糖和0.25%多聚磷酸钠, 水分含量约为76%), 购自湖北省荆州市洪湖市井力水产食品股份有限公司, -18℃冷冻保存不超过2个月; 圆苞车前子壳粉(纯度99%, 100目), 购自上海乐香生物科技有限公司; 食品级塑料肠衣、食品级氯化钠, 购自超市; 10% SDS溶液、0.5 mol/L Tris-HCl (pH 6.8), 购自Solarbio科技有限公司; 甘油、β-巯基乙醇、溴酚蓝、甘氨酸、考马斯亮蓝R-250、醋酸、甲醇、无水磷酸二氢钠、无水磷酸氢二钠、戊二

醛、无水乙醇、十二烷基硫酸钠(SDS), 购自国药集团化学试剂有限公司。所有试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器与设备

FA1104N型电子分析天平, 上海民桥精密科学仪器有限公司; S2-5型斩拌机, 广州旭众食品机械有限公司; SU-50型卡扣机, 瑞安市特丰机械厂; HZ-2型两孔数显水浴锅, 江苏金坛市环宇科学仪器厂; TA-XT plus型物性仪, 英国Stable Micro System公司; CT15RT型台式高速冷冻离心机, 上海天美生化仪器与设备工程有限公司; DYY-11型电泳仪, 北京市六一仪器厂; T18型高速分散器, 德国IKA公司; Regulus SU8230型场发射扫描电镜, 日本日立公司。

1.3 实验方法

鱼糜凝胶的制备 取适量冷冻鱼糜解冻(4℃, 12 h)→斩拌(添加2.5%食盐、PHP)至肉糊状→(手动)灌肠→两端卡扣密封→二段水浴加热→冰水冷却→放置过夜(4℃)→测定凝胶特性。其中斩拌后鱼糜糊的水分含量控制在77%±0.5%。

PHP添加量单因素试验 PHP添加量: 以鱼糜质量为基准, 取质量分数分别为0%、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%和0.5%的PHP与鱼糜混合斩拌并灌肠, 一段水浴条件为40℃加热1 h, 二段水浴条件为90℃加热30 min。以凝胶强度和持水性为评价指标, 比较分析PHP添加量的最优条件。

凝胶化温度单因素试验 凝胶化温度: 取PHP(添加量为0.2%), 与鱼糜混合斩拌并灌肠, 一段水浴条件分别为30、35、40、45和50℃加热1 h, 二段水浴条件为90℃加热30 min。以凝胶强度和持水性为评价指标, 比较分析凝胶化温度的最优条件。

凝胶化时间单因素试验 凝胶化时间: 取PHP(添加量为0.2%), 与鱼糜混合斩拌并灌肠, 一段水浴条件为40℃分别加热处理1.0、1.5、2.0、2.5和3.0 h, 二段水浴条件为90℃加热30 min。以凝胶强度和持水性为评价指标, 比较分析凝胶化时间的最优条件。

鱼糜凝胶制备工艺的正交试验 以凝胶强度和持水性为评价体系, 根据单因素试验结果, 选取凝胶化温度(A)、凝胶化时间(B)、PHP添加量(C)3个因素的3个水平进行L₉(3³)的正交试验。因素水平表如表1所示。

表1 鱼糜凝胶特性正交试验因素水平表
Tab.1 factors and levels of surimi gel properties
orthogonal experiment

水平 levels	因素 factors		
	凝胶化温度/°C gelation temperature	凝胶化时间/h gelation time	PHP添加量/% the addition of PHP
1	40	2.0	0.1
2	45	2.5	0.2
3	50	3.0	0.3

凝胶化强度测定 将过夜放置的鱼肠于室温解冻1 h, 剥去肠衣, 切成约20 mm高度的圆柱, 使用TA-XT plus型物性仪测定其破断力(breaking force, g)、破断距离(deformation, cm)和凝胶强度(gel strength, g·cm), 具体参数: 鱼糜穿刺模式(surimi penetration), P/5S球形探头(直径5 mm), 预压速度1.0 mm/s, 下压速度1.5 mm/s, 测试速度1.0 mm/s, 回复速度10.0 mm/s, 下压距离15 mm, 触发类型Auto(force), 感应力5.0 g。每组样品平行测8次, 去掉最大值和最小值后取平均值。

持水性测定 持水性的测定参考梁峰等^[4]的方法, 略作修改。将过夜放置的鱼肠切成约2 mm厚度的薄片精确称重(W_1), 等分2份后铺置于2层滤纸上并包裹, 放入50 mL离心管中, 6 640 × g、18 °C条件下离心10 min后再次称重(W_2)。每组样品平行测3次, 样品持水性(WHC, %)根据以下公式进行计算:

$$WHC = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

蒸煮损失率测定 参考周扬等^[17]的方法测定鱼糜凝胶的蒸煮损失率, 略有修改。将鱼糜凝胶切成5 mm高的圆柱, 称重记为 m_1 , 放入蒸煮袋中并进行封口, 沸水蒸煮10 min, 蒸煮后沥干并用滤纸吸干表面水分后称重, 记为 m_2 。样品蒸煮损失率(%)根据以下公式进行计算:

$$\text{蒸煮损失率} = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (2)$$

SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳 蛋白质样品制备根据Kudre等^[20]的方法, 将27 mL 5%的热SDS溶液加入3 g左右鱼糜凝胶样品中, 混合均质2 min, 置于85 °C水浴1 h, 然后将样品于8 000 × g离心10 min。取上清液与样品缓冲液[4 mL 10%的SDS、2 mL 50%的甘油、1 mL β-巯基乙醇、2.5 mL 0.5 mol/L Tris-HCl (pH 6.8)、0.03 g 溴酚蓝

和蒸馏水]按照1:1(体积比)进行混合, 沸水浴5 min后, -20 °C冷冻保存。电泳方法根据Laemmli^[21]的方法略作修改, 配制5%浓缩胶、10%分离胶和pH 8.3左右的电极缓冲液(0.025 mol/L Tris和0.192 mol/L的甘氨酸), 上样10 μL, 恒压100 V电泳直至溴酚蓝标记到达凝胶底部(约4 h)。电泳完成后在37 °C下用0.1%考马斯亮蓝R-250染色5 min, 醋酸甲醇溶液摇床脱色12 h, 最后在凝胶成像仪上成像。使用Tanon天能Gel Image System ID 4.2分析软件对电泳蛋白条带强度进行分析。

扫描电镜(SEM)观察 扫描电镜参考Mi等^[22]的方法。将样品切成1 mm的薄片, 浸泡在2.5%戊二醛固定液中, 置于4 °C条件下固定24 h, 之后将凝胶用0.1 mol/L磷酸盐缓冲液(pH 7.2)冲洗3次。然后依次在50%、60%、70%、90%和100%的乙醇中脱水(每次15 min)。脱水后的样品用冷冻干燥机干燥, 然后将样品放在青铜短管上溅射镀金, 通过扫描电镜观察鱼糜凝胶的微观结构。

1.4 数据分析

根据单因素试验结果, 进行 $L_9(3^4)$ 的正交试验, 以凝胶强度和持水性为评价体系, 采用综合评分法, 根据凝胶强度和持水性2个指标的重要性, 确定权重系数分别为5, 求出加权和作为综合分值, 获得最佳工艺条件。对所有实验数据进行误差分析, 表示为平均值±标准差, 并通过SPSS 25.0软件进行显著性检验, $P < 0.05$ 表示显著性差异。

2 结果

2.1 单因素试验结果分析

PHP添加量对鱼糜凝胶特性的影响 鱼糜凝胶的破断力和凝胶强度随着PHP添加量的增加呈先增加后下降的趋势, 破断距离随着PHP添加量的增加而下降, PHP添加量为0.1%时, 破断力和凝胶强度达到最大值, 分别为567.35 g、545.68 g·cm。鱼糜凝胶中PHP的添加量为0.1%、0.2%和0.3%时, 破断力、破断距离和凝胶强度没有显著性差异($P > 0.05$)。添加PHP后, 鱼糜凝胶的破断距离下降, 破断力增加, 当PHP添加量大于0.3%时, 凝胶的破断距离、破断力和凝胶强度均出现显著下降($P < 0.05$)(图1)。鱼糜凝胶的持水性随PHP添加量的增加先增强后减弱, 而当添加量过多时持水能力明显下降($P < 0.05$)(图2)。

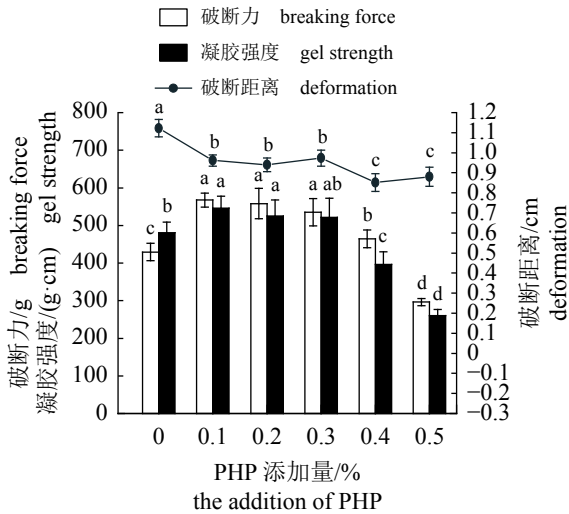


图1 PHP添加量对鱼糜凝胶强度的影响

不同小写字母表示同一指标下, 同一因子在不同水平上存在显著差异, 下同

Fig. 1 Effect of PHP addition on the strength of surimi gel

Different small letters indicate that under the same index, the same factor has significant differences at different levels, the same below

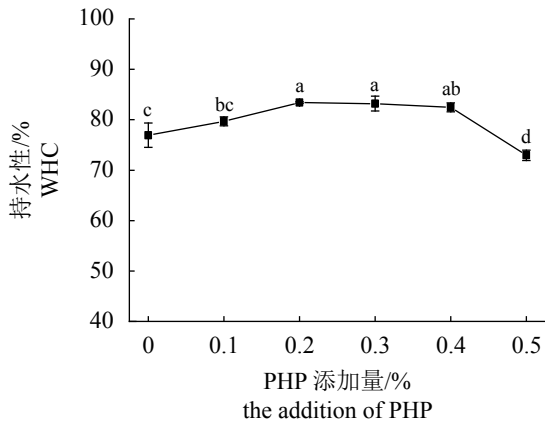


图2 PHP添加量对鱼糜凝胶持水性的影响

Fig. 2 Effect of PHP addition on the WHC of surimi gel

凝胶化温度对鱼糜凝胶特性的影响 鱼糜凝胶的破断力和凝胶强度随温度的升高先增加后下降, 而凝胶化温度对破断距离的影响不显著 ($P>0.05$), 温度在 45 °C 时, 鱼糜凝胶得到最大破断力 (524.03 g)、最大凝胶强度 (542.93 g·cm) 和最大破断距离 (1.04 cm) (图 3)。鲢鱼糜在 45 °C 时凝胶持水性最大, 且与 40 和 50 °C 之间有显著性差异 ($P<0.05$), 但 45 与 35 °C 组之间的持水性无显著性差异 ($P>0.05$)(图 4)。

凝胶化时间对鱼糜凝胶特性的影响 随凝胶化时间的增加, 鱼糜凝胶的破断力和凝胶

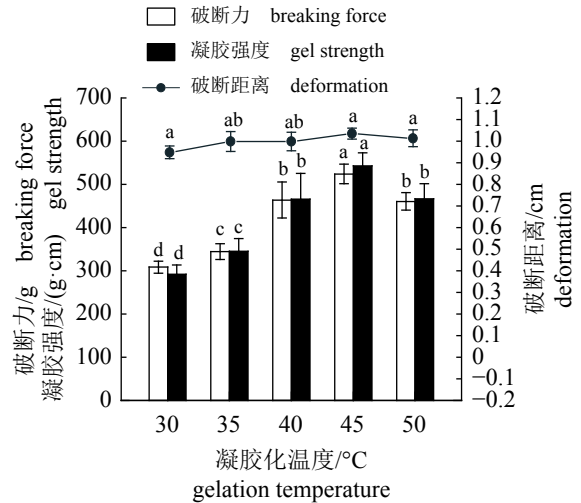


图3 凝胶化温度对鱼糜凝胶强度的影响

Fig. 3 Effect of gelation temperature on the strength of surimi gel

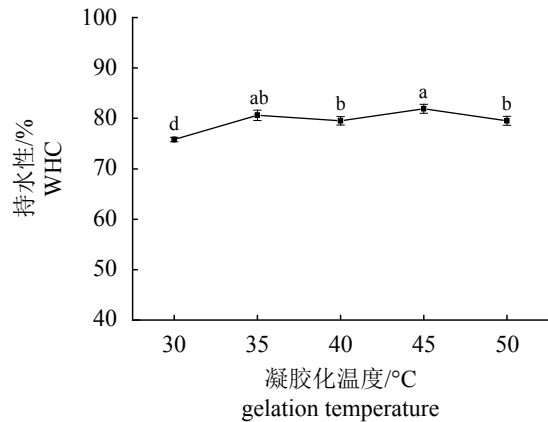


图4 凝胶化温度对鱼糜凝胶持水性的影响

Fig. 4 Effect of gelation temperature on the WHC of surimi gel

强度增加, 但在 2、2.5 和 3 h 之间, 破断力和凝胶强度没有显著性差异 ($P>0.05$); 破断距离先增加后下降, 在 2 h 时得到最大破断距离 1.09 cm (图 5)。鱼糜凝胶的持水性随着凝胶化时间的增加呈上升趋势 (图 6)。

2.2 正交试验结果分析

正交试验结果分析 在单因素试验结果的基础上, 对凝胶化温度、凝胶化时间和 PHP 添加量 (表 1), 采用三因素三水平的正交表 $L_9(3^3)$, 以凝胶强度和持水性 (权重均为 5) 为评价体系进行试验。具体试验方案及结果分析如表 2 所示。

由表 2 直观分析, 可以得到鱼糜凝胶的最优方案为 $A_2B_1C_2$, 综合评分为 10 分, 即凝胶化

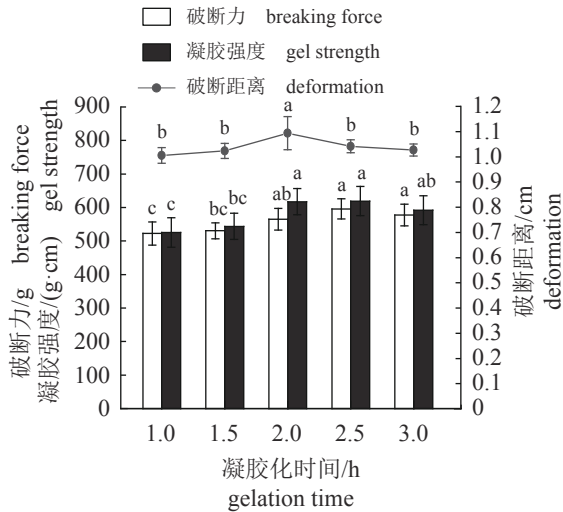


图 5 凝胶化时间对鱼糜凝胶强度的影响

Fig. 5 Effect of gelation time on the strength of surimi gel

温度 45 °C，凝胶化时间 2 h，PHP 添加量 0.2%。直观分析结果与计算分析结果有所不同，因此

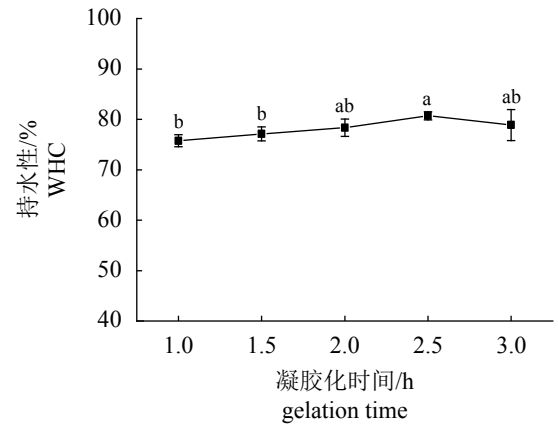


图 6 凝胶化时间对鱼糜凝胶持水性的影响

Fig. 6 Effect of gelation time on the WHC of surimi gel

需要进行验证试验。

验证试验方案及结果分析 由于第一批正交试验和第二批验证试验(表 3)的批次不同，试验结果不能直接比较，因此采用 2 批试验中的共同组合方案 A₂B₁C₂ 作为对照进行比较。

表 2 鱼糜凝胶特性正交试验方案及结果

Tab. 2 Orthogonal experiment scheme and result analysis of surimi gel properties

试验号 no.	凝胶化 温度(A)/°C gelation temperature	凝胶化 时间(B)/h gelation time	PHP添加量 (C)/% the addition of PHP	凝胶强度/ (g·cm) gel strength Y _{i1}	持水性/% WHC Y _{i2}	凝胶强度 隶属度 gel strength degree Y _{i1}	持水性隶 属度 WHC degree Y _{i2}	综合分 comprehensive score Y _i
1	1(40)	1(2)	1(0.1)	502.68	78.47	0.80	0.51	6.55
2	1	2(2.5)	2(0.2)	491.22	77.86	0.73	0.38	5.56
3	1	3(3)	3(0.3)	461.22	76.1	0.56	0.00	2.79
4	2(45)	1	2	537.20	80.74	1.00	1.00	10.00
5	2	2	3	404.49	80.38	0.23	0.92	5.75
6	2	3	1	501.15	80.38	0.79	0.92	8.56
7	3(50)	1	3	365.35	80.37	0.00	0.92	4.60
8	3	2	1	474.93	78.35	0.64	0.48	5.61
9	3	3	2	430.12	77.73	0.38	0.35	3.64
K ₁	14.90	21.15	20.73					
K ₂	24.31	16.92	19.20					
K ₃	13.86	14.99	13.14					
极差 range	10.46	6.16	7.58					
因素主→次 factors major→minor	A C B							
最优组合条件 the optimal conditions	A ₂ B ₁ C ₁							

注：同列中括号内数字为该因素的水平，y_{ij}为指标值，Y_{ij}为指标隶属度，Y_i为综合分值(i. 第i号试验，i=1, 2, ..., 9; j. 第j个考察指标，j=1, 2); K₁, K₂, K₃分别为水平1, 2, 3的3次综合分之。因素A, B, C的下标数字分别表示该因素的水平。下同

Notes: numbers in parentheses in the same column are the levels of the factor; y_{ij} is the index value, Y_{ij} is the index affiliation, and Y_i is the integrated score (i. trial no. i, i = 1, 2, ..., 9; j. trial no. j, j = 1, 2); K₁, K₂, K₃ are the sum of the three composites of level 1, 2, and 3, respectively. Subscript numbers for factors A, B, C indicate the level of the factors, respectively. The same below

表3 鱼糜凝胶特性验证试验方案与结果

Tab. 3 Scheme and result analysis of surimi gel properties verification test

试验号 no.	试验方案 experiment scheme			试验结果 result		综合评分 comprehensive score		
	A	B	C	凝胶强度/(g·cm) gel strength y_{11}	持水性/% WHC y_{12}	凝胶强度隶属度 gel strength degree Y_{11}	持水性隶属度 WHC degree Y_{12}	综合分 comprehensive score Y_i
10	2(45)	1(2)	1(0.1)	551.74	78.29	1.00	0.47	7.36
11	2	1	2(0.2)	522.00	78.32	0.84	0.48	6.59

第二批验证试验 $A_2B_1C_2$ 与第一批正交试验中最优组合 $A_2B_1C_2$ 的比较:

①第一批试验(表2)中的 $A_2B_1C_2$ 综合评分值为10.00分, 作为对照的第4号试验组合方案 $A_2B_1C_2$ 的综合评分值为10.00分, 两者之比为10/10=1。

②第二批验证试验(表3)中 $A_2B_1C_1$ 的综合评分为7.36, 作为对照的第11号试验组合方案 $A_2B_1C_2$ 的综合分值为6.59分, 两者之比为7.36/6.59=1.12。

由此看出, 对于同一个基准, $A_2B_1C_2$ 的综合评分值比 $A_2B_1C_1$ 的综合评分值低0.12, 所以由第二批验证试验可进一步得结果: 第10号组合方案 $A_2B_1C_1$ 优于第一批中最优组合方案 $A_2B_1C_2$ 。因此, 最终确定鱼糜凝胶的最优方案为 $A_2B_1C_1$, 即凝胶化温度45℃, 凝胶化时间2h, PHP添加量为0.1%。

2.3 不同工艺条件鱼糜凝胶蒸煮损失率分析

对不同工艺条件下鱼糜凝胶特性进行验证分析, 传统鱼肠的工艺条件: 一段水浴40℃保温1h, 二段水浴90℃保温30min, 不添加PHP; 而根据最优方案, 设定优化鱼肠的工艺条件: 一段水浴45℃保温2h, 二段水浴90℃保温30min, 添加0.1%的PHP; 另设一组优化对照组, 其工艺条件: 一段水浴45℃保温2h, 二段水浴90℃保温30min, 不添加PHP。

蒸煮损失主要表达鱼糜凝胶经蒸煮后水分的流失, 传统水浴和优化组的鱼糜凝胶蒸煮损失率显著低于优化对照组 ($P<0.05$), 但传统水浴组和优化组蒸煮损失率没有显著差异 ($P>0.05$)。研究表明, PHP的添加或许可以减少较高凝胶化温度条件下鱼糜凝胶的蒸煮损失率(图7)。

2.4 不同工艺条件鱼糜凝胶 SDS-PAGE 电泳

3条泳道中的重肌球蛋白-肌球蛋白重链 (heavy meromyosin-myosin heavy chain, HMM-MHC), 原肌球蛋白 (tropomyosin, TM), 肌球蛋白轻链 (myosin light chain, MLC) 条带几乎无变化(图8), 优化组(泳道2、3)中出现了较低的肌球蛋白重链 (myosin heavy chain, MHC) 带强度。同

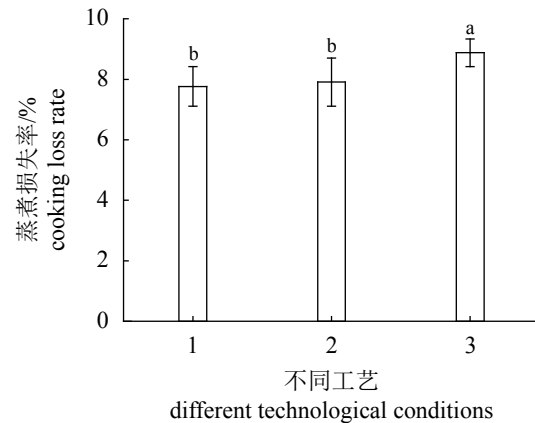


图7 不同工艺条件鱼糜凝胶蒸煮损失率

1.传统组; 2.优化组(加PHP); 3.优化对照组(无PHP), 下同

Fig. 7 Cooking loss rate of surimi gels under different technological conditions

1. traditional surimi gel; 2. optimized surimi gel (with PHP); 3. optimized surimi gel control (without PHP), the same below

时, 优化组(泳道2、3)中副肌球蛋白 (paramyosin, PM)、轻肌球蛋白 (light meromyosin, LMM)

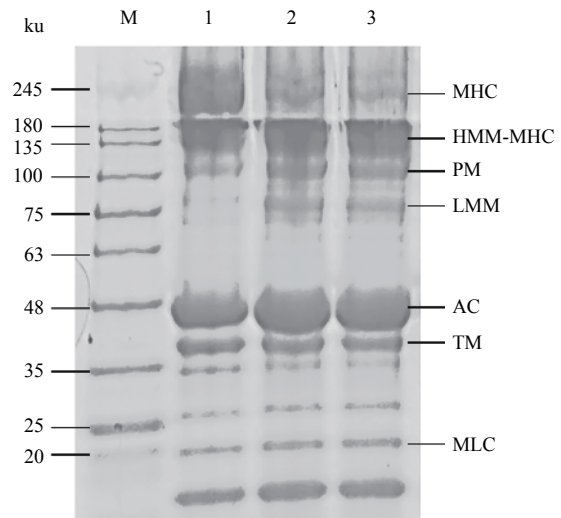


图8 不同工艺条件鱼糜凝胶电泳图

M. 预染蛋白质分子量标记

Fig. 8 Protein patterns of surimi gels under different process conditions

M. pre-stained molecular weight marker of protein

和肌动蛋白 (actin, AC) 带强度较传统鱼肠 (泳道 1) 有所增加, 而 TM 带强度有所降低。与优化对照组 (泳道 3) 相比, 优化鱼肠组 (泳道 2) 中 MHC 带强度较弱, 优化鱼肠组 (泳道 2) 中 PM 和 LMM 带比优化对照组 (泳道 3) 稍强 (图 9)。

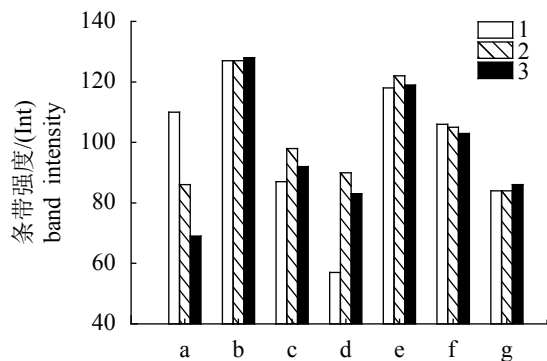


图 9 不同工艺条件鱼糜凝胶电泳条带强度

Fig. 9 Band intensity of protein pattern of surimi gels under different process conditions

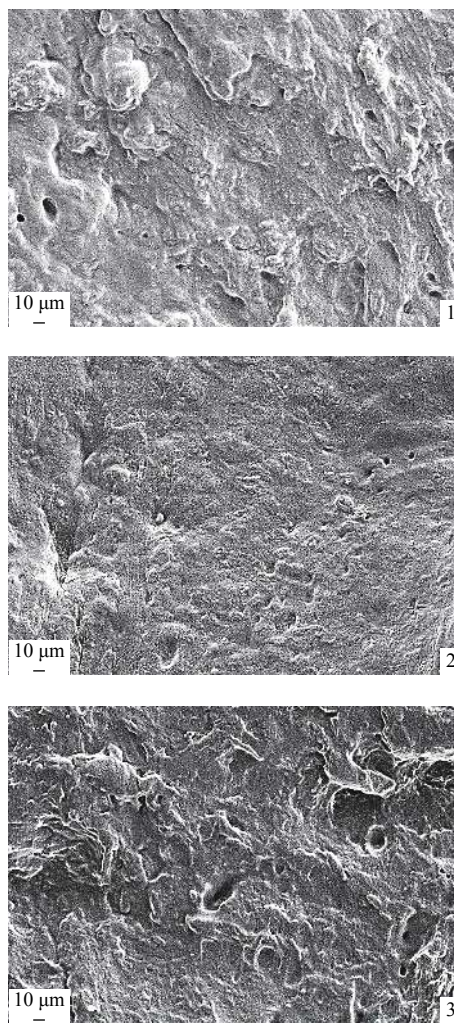
a. MHC, b. HMM-MHC, c. PM, d. LMM, e. AC, f. TM, g. MLC

2.5 不同工艺条件鱼糜凝胶微观结构分析

鱼糜中肌原纤维蛋白经过加热, 发生变性和聚集, 最后形成紧密的三维网状结构^[23]。3种加工条件下鱼糜凝胶的微观结构如图版所示, 添加了 0.1% PHP 的凝胶表面看起来更加均匀、平滑, 较多微孔, 结构致密。在传统二段水浴下的鱼糜凝胶表面有较明显的颗粒感, 而优化对照组的鱼糜凝胶表面同样也粗糙不均匀, 但 1 组和 2 组凝胶相比, 交联度似乎更高, 表明 PHP 可能更多作用于填充蛋白质分子之间的孔隙而增加凝胶基质的密度, 这也验证了单因素试验中添加 PHP 的鱼糜凝胶破断力增加而破断距离减小的结果 (图版)。

3 讨论

目前, 有许多研究发现, 可以通过外源添加物来改善鱼糜凝胶的特性。其中可食用亲水胶被广泛应用于蛋白质凝胶特性的研究。Mi 等^[22]研究了羟丙基木薯淀粉、可得然胶、K-卡拉胶及三者复合物对鲢鱼糜的凝胶和质地、微观结构和感官特性等的影响。研究发现单一添加 1.37% 的淀粉或者添加 1.37% 淀粉、0.44% 可得然胶和 0.22% K-卡拉胶三者组合胶可以提高鱼糜凝胶的硬度、弹性和持水性, 使得凝胶微观结构更加



图版 不同工艺条件鱼糜扫描电镜图

Plate Scanning electron microscopy of surimi gels under different processing conditions

致密有序, 而与单一淀粉相比, 复合物对改善鱼糜凝胶的性质更加有效。Hernández-Briones 等^[24]从鱼皮中水解胶原蛋白得到鱼明胶, 研究发现含 0.75%~1.50% 鱼胶的 FA 级鱼糜凝胶有更好的持水性, 然而添加 1.50% 的鱼明胶对鱼糜凝胶的力学性能有不利影响。Sanchez-Alonso 等^[25]研究 3% 和 6% 不同粒径的小麦纤维对鱼糜凝胶特性的影响, 发现小麦纤维的添加对凝胶的白度没有显著影响, 但随着纤维含量的增加, 蛋白质被破坏, 凝胶中结合水的含量显著下降, 硬度降低。

从添加 PHP 后凝胶破断距离的下降及破断力的增加中可以看出, PHP 的添加增加了鱼糜凝胶的硬度, 凝胶由软弹性逐渐变成硬弹性, 这与 Cardoso 等^[26]的研究结果有一定的相似性 (图 1)。

这可能是由于 PHP 富含膳食纤维, 其填充到凝胶网络中可以促进蛋白质-蛋白质或蛋白质-水之间的相互作用, 使得凝胶结构更加紧密^[27]。但高膳食纤维含量可能会破坏和稀释蛋白质凝胶基质, 导致体系中出现蛋白质和多糖两相分离, 同时膳食纤维的强吸水性也会争夺凝胶网络的水分^[28], 而适量添加 PHP 形成的紧密三维凝胶网络有助于锁住水分, 但添加量过多时 (>0.3%), 则破坏了凝胶网络的形成和稳定, 会对凝胶强度、持水性有不利影响 (图 2)。尽管与传统鱼肠相比, PHP 的添加对鱼糜凝胶的蒸煮损失率的影响较小, 但较之优化对照组, 在凝胶化温度较高时, 凝胶基质中的 PHP 的强吸水性以及鱼糜蛋白和多糖间的相互作用产生的凝胶网络结构能够帮助锁住更多的水分子, 减少水分在蒸煮中的流失 (图 7)。

鱼糜凝胶中参与凝胶形成的主要是肌原纤维蛋白, 其中的肌球蛋白和肌动球蛋白经加热会发生聚集反应, 在凝胶化过程中肌动蛋白的充分变性和聚集是形成良好的凝胶的基础^[29]。梁峰等^[4]的研究表明, 性早熟蟹肉和鲑鱼糜混合凝胶最佳凝胶化温度为 34.03 °C, 与本研究实验结果得到最佳凝胶化温度为 45 °C 有所不同 (图 3)。这可能是由于 PHP 通过多糖链分子间氢键的结合本身可以引发凝胶体, 随着温度的升高, 提高了这种多糖聚合物链的迁移率而有利于形成更致密的蛋白凝胶网络^[30]。而当温度升高到 50 °C 时, 可能导致鱼糜中内源性蛋白酶的活性增强使得形成的凝胶三维网络被破坏, 造成凝胶强度和持水性的降低 (图 4)。

3 种工艺条件下中的 HMM-MHC、TM 和 MLC 条带几乎无变化, 表明这些蛋白质可能不属于凝胶形成的主要成分。MHC 可以通过非二硫共价键形成分子内和分子间的交联, 所形成的大分子量蛋白无法通过浓缩胶进入分离胶^[31]。一方面可能 PHP 的添加促进了 MHC 之间的交联, 另一方面, PHP 或许对鱼糜中的蛋白质有其他的影响作用, 这有待进一步研究, 因此优化组 (泳道 2、3) 中出现了较低的 MHC 带强度。同时, 优化组 (泳道 2、3) 中 PM、LMM 和 AC 带强度较泳道 1 有所增加, TM 带强度有所降低, 表明鱼糜中肌原纤维蛋白质对热变性很敏感。与泳道 3 相比, 泳道 2 中 MHC 带强度较弱, 可能是鱼糜较长时间处于 45 °C, 接近于内源性蛋白酶最适

温度区间^[4], 内源性蛋白酶活性增强, 相对于蛋白质分子间的交联, MHC 可能发生了更多的降解, 而优化鱼肠组添加的 PHP 或可通过其残基与肌纤维间发生交联, 形成复合物减缓了蛋白质的降解^[32]。泳道 2 中 PM 和 LMM 带比泳道 3 的稍强, 进一步说明, PHP 可能对分子量较低的蛋白质具有一定的保护作用 (图 8)。

由于 PHP 中含有可溶性和不可溶性膳食纤维, 一方面可溶性膳食纤维自身的凝胶性可能促进蛋白质之间的作用, 另外, 不溶性膳食纤维也可以物理形式填充蛋白网络结构, 改变凝胶基质, 从而强化了三维网络结构, 使得添加 PHP 优化组的凝胶结构更加精细、均匀、有序^[16]。传统水浴条件下蛋白质与蛋白质分子之间延展性不够, 形成了很小的聚集, 导致鱼肠表面的颗粒感, 优化对照组表面呈现较小的团簇状, 可能由于凝胶化温度升高、凝胶化时间加长对蛋白质的聚集和伸展有不利的影响 (图版)。

本研究通过在传统鱼糜凝胶制作工艺中添加 PHP, 考察了 PHP 添加量、凝胶化温度和凝胶化时间对鱼糜凝胶的破断力、破断距离、凝胶强度以及持水性的影响。在单因素试验的基础上, 采用正交试验确定最优方案: PHP 添加量 0.1% (基于鱼糜质量), 凝胶化温度 45 °C, 凝胶化时间 2 h。SDS-PAGE 电泳结果显示, 添加 PHP 或许促进了 MHC 分子间交联, 从扫描电镜的结果看出, 添加 PHP 使得优化鱼肠的表面更平滑、致密。关于 PHP 与鱼糜蛋白之间的交互、优化鱼肠的水分分布和状态以及 PHP 对鱼糜凝胶的化学作用力的影响还有待进一步研究。

参考文献 (References):

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2020[M]. 北京: 中国农业出版社, 2020: 25-26.
The People's Republic of China Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Fisheries Bureau, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2020: 25-26 (in Chinese).
- [2] 梁雯雯, 杨天, 郑志红, 等. 升温方式对二段加热鲑鱼糜水分分布和品质的影响 [J/OL]. 大连海洋大学学报. doi: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.2020-221. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=C>

- APJLAST&filename=DLSC20201126003&v=MTUw-MTFscVdNMENMTDdSN3FkWnVacUZ5bmtXN3pMSIZzPUITSfliYkc0SE5ITnJvMURaT3NNWXc5TXptUm42ajU3VDNm.
- Liang W W, Yang T, Zheng Z H, *et al.* Effects of heating ways on water distribution and quality of silver carp surimi during two stage heating[J/OL]. Journal of Dalian Ocean University. doi: 10.16535/j.cnki.dlhyxb.2020-221. <https://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspx?dbcode=CJFQ&dbname=CAPJLAST&filename=DLSC20201126003&v=MTUwMTFscVdNMENMTDdSN3FkWnVacUZ5bmtXN3pMSIZzPUITSfliYkc0SE5ITnJvMURaT3NNWXc5TXptUm42ajU3VDNm>(in Chinese).
- [3] 郭梦, 武瑞赟, 马俪珍, 等. 鱼糜制品及其凝胶特性研究进展[J]. 中国水产, 2020(2): 83-85.
- Guo M, Wu R Y, Ma L Z, *et al.* Research progress of surimi products and their gel properties[J]. China Fisheries, 2020(2): 83-85(in Chinese).
- [4] 梁峰, 何天海, 林琳, 等. 性早熟蟹肉和白鲢鱼糜混合凝胶工艺优化及其凝胶特性[J]. 食品科学, 2019, 40(22): 313-319.
- Liang F, He T H, Lin L, *et al.* Optimization of processing conditions and gel properties of precocious crab meat and silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi mixed gels[J]. Food Science, 2019, 40(22): 313-319(in Chinese).
- [5] 王丽丽, 杨文鸽, 徐大伦, 等. 外源添加物对鱼糜及其制品凝胶性能影响的研究[J]. 核农学报, 2015, 29(10): 1985-1990.
- Wang L L, Yang W G, Xu D L, *et al.* Effects of exogenous additives on gel properties of surimi and its products[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(10): 1985-1990(in Chinese).
- [6] 何晓萌. 罗非鱼混合鱼糜凝胶特性改良的研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2018.
- He X M. Study on improving the gel-formation property of tilapia (*Oreochromis niloticus*) mixed surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2018 (in Chinese).
- [7] Borderías A J, Tovar C A, Domínguez-Timón F, *et al.* Characterization of healthier mixed surimi gels obtained through partial substitution of myofibrillar proteins by pea protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 107: 105976.
- [8] Yan B W, Jiao X D, Zhu H P, *et al.* Chemical interactions involved in microwave heat-induced surimi gel fortified with fish oil and its formation mechanism[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105779.
- [9] 孙科, 闫方华, 许晓敏, 等. 苹果多酚改性蛋清改善鲑鱼鱼糜的凝胶性质[J]. 现代食品科技, 2020, 36(10): 210-217, 164.
- Sun K, Yan F H, Xu X M, *et al.* Apple Polyphenols-modified egg white improves the gelling properties of Spanish mackerel surimi[J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(10): 210-217, 164(in Chinese).
- [10] 徐安琪, 杨镭, 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.
- Xu A Q, Yang R, Zhu Y K, *et al.* Effect of laver (*Porphyra umbilicalis*) powder on gel properties and protein structure of giant squid (*Dosidicus gigas*) surimi[J]. Food Science, 2021, 42(2): 46-52(in Chinese).
- [11] 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(in Chinese).
- [12] Liang F, Zhu Y J, Ye T, *et al.* Effect of ultrasound assisted treatment and microwave combined with water bath heating on gel properties of surimi-crabmeat mixed gels[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 133: 110098.
- [13] 杨镭, 徐安琪, 朱煜康, 等. 辐照对带鱼鱼糜内源性转谷氨酰胺酶及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 71-76.
- Yang R, Xu A Q, Zhu Y K, *et al.* Effect of irradiation on endogenous transglutaminase and gel properties of hairtail surimi[J]. Food Science, 2020, 41(11): 71-76(in Chinese).
- [14] Singh N, Lal R K, Shasany A K. Phenotypic and RAPD diversity among 80 germplasm accessions of the medicinal plant isabgol (*Plantago ovata*, Plantaginaceae)[J]. Genetics and Molecular Research, 2019, 8(3): 1273-1284.

- [15] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 关于批准塔格糖等6种新食品原料的公告(2014年第10号)[J]. 中国食品卫生杂志, 2014, 26(4): 339.
National Health Commission of the People's Republic of China. Announcement on the approval of 6 new food ingredients including tagatose[J]. Chinese Journal of Food Hygiene, 2014, 26(4): 339(in Chinese).
- [16] Zhou Y, Dai H J, Ma L, *et al.* Effect and mechanism of psyllium husk (*Plantago ovata*) on myofibrillar protein gelation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110651.
- [17] 周扬, 马良, 戴宏杰, 等. 圆苞车前子壳粉的添加对肉饼品质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(5): 42-49.
Zhou Y, Ma L, Dai H J, *et al.* Effect of psyllium husk powder addition on quality of meat patties[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2019, 37(5): 42-49(in Chinese).
- [18] 荆培培. 圆苞车前子在发酵乳饮料中的应用研究[J]. *农产品加工*, 2019(3): 9-12.
Jing P P. Study on the application of *Plantago* in fermented milk drinks[J]. *Farm Products Processing*, 2019(3): 9-12(in Chinese).
- [19] Ladjevardi Z S, Gharibzahedi S M T, Mousavi M. Development of a stable low-fat yogurt gel using functionality of psyllium (*Plantago ovata* Forsk) husk gum[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 125: 272-280.
- [20] Kudre T, Benjakul S, Kishimura H. Effects of protein isolates from black bean and mungbean on proteolysis and gel properties of surimi from sardine (*Sardinella albella*)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 50(2): 511-518.
- [21] Laemmli U K. Cleavage of structural proteins during the assembly of the head of bacteriophage T4[J]. *Nature*, 1970, 227(5259): 680-685.
- [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] Zhuang X B, Han M Y, Bai Y, *et al.* Insight into the mechanism of myofibrillar protein gel improved by insoluble dietary fiber[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 74: 219-226.
- [24] Hernández-Briones A, Velázquez G, Vázquez M, *et al.* Effects of adding fish gelatin on Alaska Pollock surimi gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(8): 2446-2449.
- [25] Sánchez-Alonso I, Haji-Maleki R, Borderías A J. Effect of wheat fibre in frozen stored fish muscular gels[J]. *European Food Research and Technology*, 2006, 223(4): 571-576.
- [26] Cardoso C, Mendes R. Restructured gel products from farmed meagre (*Argyrosomus regius*) muscle: effect of low salt levels, psyllium fiber, and chilled storage[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2015, 24(5): 490-501.
- [27] 仪淑敏, 吕柯明, 张诗雯, 等. 芹菜茎对金线鱼鱼糕凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(20): 1-5.
Yi S M, Lü K M, Zhang S W, *et al.* Effect of celery petiole on the gel properties of *Nemipterus virgatus* fish cake[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(20): 1-5(in Chinese).
- [28] Debusca A, Tahergorabi R, Beamer S K, *et al.* Physicochemical properties of surimi gels fortified with dietary fiber[J]. *Food Chemistry*, 2014, 148: 70-76.
- [29] 励建荣, 余永名, 仪淑敏, 等. 鱼糜制品热凝胶形成机理研究进展[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(23): 380-385.
Li J R, Yu Y M, Yi S M, *et al.* Research of progress in thermal gelation mechanisms of surimi products[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(23): 380-385(in Chinese).
- [30] Farahnaky A, Askari H, Majzoobi M, *et al.* The impact of concentration, temperature and pH on dynamic rheology of psyllium gels[J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100(2): 294-301.
- [31] 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.
- [32] Zhang T, Li Z J, Wang Y M, *et al.* Effects of konjac glucomannan on heat-induced changes of physicochemical and structural properties of surimi gels[J]. *Food Research International*, 2016, 83: 152-161.

Processing optimization and gel properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi gels fortified with psyllium husk powder

ZHU Yajun¹, YE Tao^{2,3}, WANG Yun^{2,3}, LIN Lin^{1,4,5}, LU Jianfeng^{1,4,5*}

(1. School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. School of Bioengineering, Huainan Normal University, Huainan 232038, China;

3. Key Laboratory of Bioresource and Environmental Biotechnology of Anhui Higher Education Institutes, Huainan Normal University, Huainan 232038, China;

4. Key Laboratory for Agricultural Products Processing of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

5. Engineering Research Center of Bio-process, Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Psyllium husk powder (PHP) is a food hydrocolloid rich in both soluble and insoluble dietary fiber. Previous studies have shown that the interaction between polysaccharide hydrocolloids and proteins could affect the ability to form gels, which suggests that the addition of PHP to surimi paste may have an impact on the properties of surimi gels. In order to study the the development and application of PHP in surimi products, three factors including the amount of PHP added, gelation temperature and gelation time on the gel properties of surimi were investigated, using frozen silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) surimi as the research object, gel strength and water holding capacity (WHC) as the inspection indicators. On the basis of single factor experiments, three-factor and three-level orthogonal experiment and verification experiment were carried out. The best processing conditions obtained through orthogonal test result were as follows: PHP addition amount 0.1%, gelation temperature 45 °C, and gelation time 2 h. The cooking loss rate, protein pattern and microstructure of fish sausage prepared by the traditional process (without PHP, gelation temperature 40 °C, gelation time 1 h), optimized process (0.1% PHP addition, gelation temperature 45 °C, gelation time 2 h) and optimized control process (without PHP, gelation temperature 45 °C, gelation time 2 h) were analyzed and compared to verify the properties of surimi gels under different conditions. The single factor test results showed that the addition of an appropriate amount of PHP (0.1%-0.3%) could increase the hardness and WHC of the surimi gel, but PHP might have an adverse effect on the deformation, and compared with the traditional technology, slightly higher temperature and longer time would help the surimi mixture to form better gel; the results of cooking loss rate, SDS-polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE) and scanning electron microscopy (SEM) in the verification experiment indicated that the participation of PHP might reduce the cooking loss of surimi gel formed at higher gelation temperature, promote cross-linking between myosin heavy chain molecules, retard protein degradation and help to form a denser gel structure. PHP as a new food raw material used in the development of high-quality and healthy surimi products was preliminarily explored in this study. And it is expected to be able to provide some reference for enriching the research content about application of hydrocolloid in the performance of surimi gel properties.

Key words: *Hypophthalmichthys molitrix*; psyllium husk powder; surimi; process optimization; gel properties

Corresponding author: LU Jianfeng. E-mail: lujf@sibs.ac.cn

Funding projects: Anhui Provincial Modern Agro-industry Technology Research System (AHCYJSTX-08); China Agriculture Research System (CARS-48)