

低盐白鲢鱼糜凝胶超高压制备工艺优化及凝胶特性

Optimization of processing and gel properties of low-salt silver carp surimi gel prepared by ultra-high pressure

戴慧敏¹ 叶 韬² 林 琳¹ 姜绍通¹ 陆剑锋¹

DAI Hui-min¹ YE Tao² LI Lin¹ JIANG Shao-tong¹ LU Jian-feng¹

(1. 合肥工业大学食品科学与工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 淮南师范学院生物工程学院, 安徽 淮南 232038)

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

2. College of Bioengineering, Huainan Normal University, Huainan, Anhui 232038, China)

摘要:为了改善低盐鱼糜的凝胶特性,以凝胶强度和持水性为指标,采用响应面法优化了超高压制备低盐白鲢鱼糜凝胶的最佳工艺参数,并将优化后的超高压低盐鱼糜(1.5% NaCl, 300 MPa)与常压低盐鱼糜(1.5% NaCl, 0.1 MPa)和常压普通鱼糜(2.5% NaCl, 0.1 MPa)的凝胶品质(质构、凝胶强度、持水性、蛋白构象和微观结构)进行比较。结果显示,超高压制备低盐白鲢鱼糜的最佳工艺条件为压力 300 MPa,保压时间 10 min,温度 25 ℃。此时,超高压低盐鱼糜凝胶强度可达 258.24 g·cm,较低盐对照组(203.92 g·cm)提高了 26.04%,也显著($P < 0.05$)高于普通鱼糜对照组(214.87 g·cm),持水性也显著($P < 0.05$)提高。超高压处理的低盐鱼糜凝胶内聚性、回复性显著($P < 0.05$)增加。此外,超高压处理的低盐鱼糜凝胶的肌球蛋白重链(MHC)条带强度明显变弱,且形成的凝胶网络结构也更致密均匀。超高压技术能有效提高低盐白鲢鱼糜的凝胶品质。

关键词:超高压(UHPP);凝胶强度;持水性;低盐鱼糜;白鲢

Abstract: In order to improve the gel properties of low-salt surimi, the optimum conditions for the low-salt silver carp surimi gels by ultra-high pressure processing (UHPP) were obtained by means of response surface methodology (RSM), with the gel strength and water holding capacity (WHC) as indicators. The gel properties (texture, gel strength, WHC, protein pattern and microstructure) of the optimized low-salt surimi (1.5% NaCl, 300 MPa), low-salt surimi (1.5% NaCl, 0.1 MPa) and the standard percentage of added salt of surimi (2.5% NaCl, 0.1 MPa) were compared. The results showed that the optimum conditions of low-salt silver carp surimi gels by UHPP were 300 MPa and 25 ℃ for 10 min. Meanwhile, compared to

the low-salt surimi gels (1.5% NaCl, 0.1 MPa) (203.92 g·cm), the gel strength of the optimized low-salt surimi (1.5% NaCl, 300 MPa) increased by 26.04%, and reached 258.24 g·cm. Moreover, it was significantly higher than that of the standard percentage of added salt of surimi gels (2.5% NaCl, 0.1 MPa) (214.87 g·cm) ($P < 0.05$), and the WHC was also significantly increased ($P < 0.05$). The UHPP treatment significantly enhanced ($P < 0.05$) cohesiveness and resilience of low-salt surimi gels. The myosin heavy chain (MHC) band intensity of low-salt surimi gels by UHPP weaken obviously, and the gel network structure was also more denser and uniform. Therefore, the UHPP technology could effectively improve the quality of low-salt silver carp surimi gels, which provided a good method basis for the subsequent development of low-salt surimi by UHPP.

Keywords: ultra-high pressure processing (UHPP); gel strength; water holding capacity (WHC); low-salt surimi; silver carp

白鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)营养丰富,是中国产量最高的大型淡水鱼种之一。但白鲢鱼肉薄刺多,土腥味、鱼腥味重,对其进行深加工,制成冷冻鱼糜制品,可以提高产品附加值^[1]。在鱼糜制品加工过程中,通常在斩拌工序中添加 2~3 g/100 g·鱼糜的食盐(NaCl)来溶解肌原纤维蛋白,诱导蛋白质的展开,便于后续加热工艺能够形成热凝胶^[2-3];然而由于过量摄入食盐可能会引起高血压、骨质疏松、胃消化系统紊乱等多种疾病,因此开发低盐产品是鱼糜制品研发的一个重要方向。但是低盐条件下鱼糜蛋白质斩拌时不能够充分溶解展开,而导致低盐鱼糜凝胶强度低、持水性差、口感粗糙^[4,6]。因此提高低盐鱼糜凝胶的凝胶强度和持水性亟需解决。

凝胶强度、持水性是衡量鱼糜制品特性的重要指标,但目前的热加工方式(如传统水浴加热,又称“二段式加热”)对于改善鱼糜凝胶特性还不够理想^[5],尤其在改善低盐鱼糜凝

基金项目:安徽省水产产业技术体系项目(编号:201684)

作者简介:戴慧敏,女,合肥工业大学在读硕士研究生。

通信作者:陆剑锋(1976—),男,合肥工业大学教授,博士。

E-mail: lujf@sibs.ac.cn

收稿日期:2018-04-04

胶特性方面。因此有研究将微波技术应用到低盐鱼糜中,如付湘晋等^[6]发现采用微波加热的方法可以显著提高低盐白鲢鱼糜(1%)凝胶强度和持水性,然而微波加热选择性高,鱼糜内部升温不均匀,影响凝胶品质^[7]。超高压作为一种新型技术,通过诱导鱼糜蛋白变性,破坏原有空间结构,构造新的凝胶网络结构,可以得到凝胶特性更好的鱼糜制品^[8]。Cando等^[9]的研究表明,超高压(300 MPa)应用低盐阿拉斯加鳕鱼鱼糜凝胶可以诱导肌原纤维蛋白展开,使得理化性质和感官特性优于普通食盐添加量(3%)鱼糜凝胶。同时,超高压对鱼糜凝胶特性的影响与压力、保压时间、温度、鱼糜种类等有密切关系,程珍珠等^[10]研究发现 400 MPa 处理 30 min 时,马鲛鱼糜的硬度和咀嚼度分别提高了 2.87 和 2.70 倍;500 MPa 处理 30 min 时,两者均有所下降。目前已有研究^[11-12]采用超高压技术改善低盐海水鱼糜制品品质,但是在低盐淡水鱼糜制品中的应用较少,尤其是应用超高压技术制备低盐白鲢鱼糜还尚未见报道。

在前期制备低盐鱼糜的预试验中,得出添加 1.5% NaCl 可以保证白鲢鱼糜制品所属的咸味味感,但凝胶品质明显低于工业化生产中的白鲢鱼糜(含 NaCl 量为 2.5% 左右)。因此,本试验通过响应面法优化出超高压制备低盐鱼糜凝胶工艺参数,并对其凝胶特性进行分析,以期为改善低盐鱼糜凝胶品质提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

鲜活白鲢鱼:重量(1.0±0.2) kg,体长(36.0±3.0) cm,市售;

塑料肠衣:食品级,规格为 45~47 mm(折叠直径)灌肠后直径约 30 mm,市售;

氯化钠:食品级,市售;

乙醇、25% 戊二醛、溴化钾、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠、无水乙醇、十二烷基硫酸钠(SDS):分析纯,美丰生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

斩拌机:S2-5 型,广州旭众食品机械有限公司;

超高压:HPP. L2-600/0.6 型,天津华泰森森生物工程技术股份有限公司;

质构仪:TA-XT plus 型,英国 Stable Micro System 公司;

台式高速冷冻离心机:CT15RT 型,上海天美生化仪器工程有限公司;

电泳仪:DYY-11 型,北京市六一仪器厂;

扫描电子显微镜:JSM-6490LV 型,日本电子株式会社。

1.3 白鲢鱼糜凝胶的制备方法

1.3.1 鱼糜凝胶的制备

白鲢鱼糜解冻(4℃条件下)→斩拌(空斩 3 min,添加 1.5% NaCl 或 2.5% NaCl 斩 8 min)→灌肠→加热(二段式加热,先 35℃加热 1 h,再 90℃加热 0.5 h)→冷却(冰水冷却)→4℃条件下放置过夜→得到常压低盐鱼糜和常压普通

鱼糜

1.3.2 低盐鱼糜的超高压处理 将灌肠之后的低盐鱼糜真空包装后,放入超高压设备,设置好已定的参数,进行升压、保压、卸压,之后取出样品,再进行二段式加热处理,得到高压低盐鱼糜凝胶。

1.4 超高压低盐鱼糜的单因素试验

鱼糜凝胶中添加 1.5% NaCl,压力分别为 100,200,300,400,500 MPa,保压时间为 10 min,根据凝胶强度和持水性确定压力;鱼糜凝胶中添加 1.5% NaCl,压力为 300 MPa,保压时间分别为 5,10,15,20,25 min,根据凝胶强度和持水性确定保压时间;鱼糜凝胶中添加 1.5% NaCl,压力为 300 MPa,保压时间为 10 min,温度分别为 10,20,30,40,50℃,根据凝胶强度和持水性确定温度。

1.5 超高压低盐鱼糜的响应面优化

从单因素试验中选取压力、保压时间以及温度的最佳范围,并以凝胶强度和持水性为响应值进行响应面优化。

1.6 鱼糜凝胶强度的测定

参考文献[13]。

1.7 持水性测定

参考文献[14]。

1.8 鱼糜凝胶品质的比较

从质构(TPA)、SDS-聚丙烯酰胺凝胶以及微观结构等方面,将响应面优化后的超高压低盐鱼糜(1.5% NaCl)与常压低盐对照组(1.5% NaCl)和常压普通添加盐量对照组(2.5% NaCl)凝胶品质进行比较,分析超高压低盐鱼糜的品质特性。

1.8.1 TPA 的测定 将鱼肠切成圆柱体(直径 20 mm,高 10 mm)。选用质构仪的 TPA(Texture Profile Analysis)模型分析低盐白鲢鱼糜凝胶的质构。测定参数设定为:探头类型为 P/36R,触发类型 Button、测试前速率 1.00 mm/s、探头返回速率 1.00 mm/s、下压距离 4.00 mm,2 次压缩之间的停留时间为 5 s,重复检测 6 次。

1.8.2 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳分析 称取鱼糜凝胶 3 g,根据 Kudre 等^[15]的方法进行电泳分析。

1.8.3 扫描电镜(SEM)观察凝胶结构变化 参考文献[4]^[16]。

1.9 数据处理

所有数据均采用 Excel 2003 软件和 SSPS 19.0 进行作图和显著性统计分析。

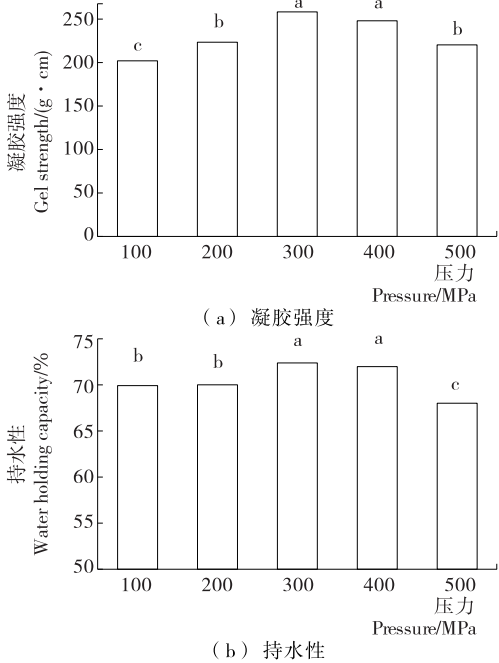
2 结果与分析

2.1 超高压制备低盐鱼糜的单因素试验

2.1.1 压力对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响 鱼糜凝胶强度是指凝胶破坏时单位面积所受的力,被作为评价鱼糜凝胶的坚实程度的指标^[16],凝胶强度大小可反映鱼糜凝胶性能好坏。由图 1(a)可知,鱼糜凝胶强度随着压力增大,呈先增加后减少趋势,并在 300 MPa 达到最大值(P<0.05)。超高压处理使低盐白鲢鱼糜凝胶强度增大,可能是超高压处理促使蛋白质变性,使蛋白质网络结构更加致密,凝胶性能得到改善^[17]。罗小玲等^[18]研究表明高压对马鲛鱼凝胶性能在 400 MPa 达到最大,此后随着压力增加会破坏凝

胶空间网络结构致使凝胶强度下降,降低鱼糜凝胶品质。

鱼糜凝胶持水性能力是指鱼糜在离心过程中将水分保持在其微观结构中的能力,是鱼糜凝胶特性的重要指标之一^[19]。从图 1(b)可以看出,压力在 200~500 MPa 时持水性在较好状态,有先增大后减少的趋势,说明超高压处理可以提高低盐鱼糜凝胶的持水性($P<0.05$),且在 300 MPa 达到最大值,与 400 MPa 没有显著性变化,可能是超高压处理促使蛋白质发生解聚,溶解性升高,使更多自由水与蛋白质形成结合水,增强持水性^[20]。



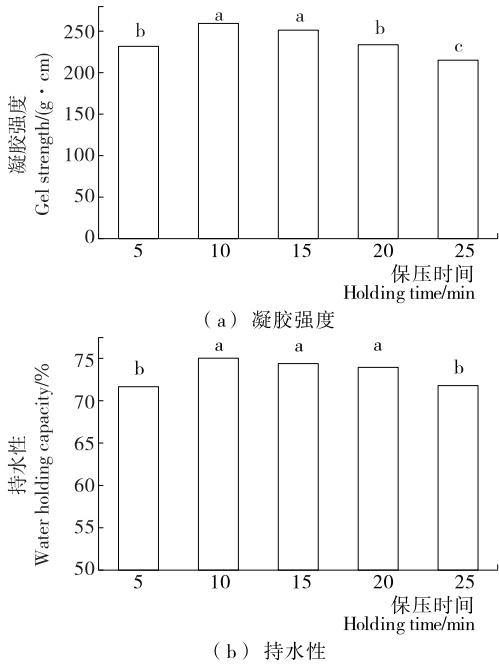
不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 1 压力对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响
Figure 1 Effect of pressure on the gel strength and WHC of low-salt silver carp surimi gels

2.1.2 保压时间对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响

从图 2(a)可以看出,保压时间对低盐白鲢鱼糜凝胶强度的影响也是呈先增大后减少的趋势,在保压 10 min (300 MPa)时得到凝胶强度最大($P<0.05$);疏水键相互作用和二硫键之间的相互作用可以改善鱼糜凝胶强度^[21],保压 10 min 后,继续延长保压时间,鱼糜凝胶强度变化不明显($P>0.05$),而在保压时间达到 20 min 时的凝胶强度开始显著降低($P<0.05$)。在胡飞华^[22]^[32]的研究中也得出类似结果,加压时间过长可能导致蛋白质分子内部化学键断裂,组织蛋白酶水解鱼糜中的大量蛋白质,且占主导作用,使得凝胶网络结构交联度降低,鱼糜凝胶强度下降^[23],因此加压时间过长不能改善鱼糜凝胶性能。

从图 2(b)可以看出,保压时间对持水性的影响也是呈先增大然后减少的趋势,最大值在 10 min (300 MPa)时得到 ($P<0.05$),但与保压时间 15, 20 min 时均没有显著性差异,在保压时间为 25 min 时,鱼糜凝胶的持水性能显著降低 ($P<0.05$),可能是保压时间过长破坏蛋白质分子内部化学键,鱼糜凝胶网络交联度降低,致使水分流出,降低持水性。

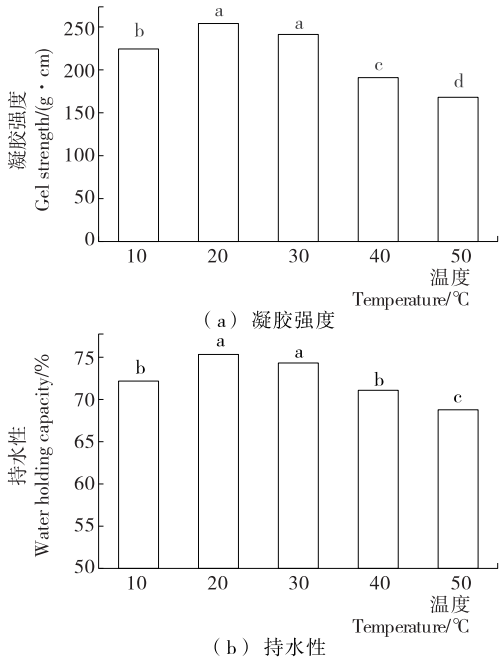


不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 2 保压时间对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响
Figure 2 Effect of holding time on the gel strength and WHC of low-salt silver carp surimi gels

2.1.3 超高压处理温度对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响

从图 3(a)可看出,超高压处理温度对低盐白鲢鱼糜凝胶强度影响显著。超高压处理温度升高不利于凝胶强度改善,随着温度升高,凝胶强度呈下降趋势,从 30 ℃ 开始出现显著下降($P<0.05$),可能是低温度的超高压处理使得蛋



不同字母表示差异显著($P<0.05$)

图 3 温度对低盐白鲢鱼糜凝胶强度和持水性的影响
Figure 3 Effect of temperature on the gel strength and WHC of low-salt silver carp surimi gels

白容易形成凝胶,鱼糜凝胶劣化温度带在 40~50 ℃,内源性组织蛋白酶类能引起肌球蛋白分解,蛋白质凝胶网络结构容易被破坏,而导致凝胶特性急剧下降^{[22]33}。因此超高压处理温度并不是越高越好,适宜的超高压处理温度可以得到较好的凝胶强度。

同样超高压处理温度过高也不利于鱼糜凝胶的持水能力。从图 3(b)可以看出,随着温度升高,低盐白鲢鱼糜凝胶的持水性呈现减弱的趋势,30 ℃以后持水性显著下降,温度越高下降越快,可能是适宜的温度使蛋白质凝胶网络更致密,能捕捉住更多的水分,从而使持水性增大^[24],但是温度过高会导致蛋白质凝胶网络结构容易被破坏,水分流失以至于持水性能变差。

2.2 响应面优化超高压对低盐白鲢鱼糜最佳工艺的确定

2.2.1 回归模型的建立 在单因素试验结果的基础上,以凝胶强度和持水性为指标,采用三因素三水平进行 Box-Benhknen 试验设计和分析,试验因素水平见表 1,试验设计及结果见表 2。

2.2.2 凝胶强度回归模型的显著性检验和方差分析 采用 Design-Expert 7.0 软件对试验结果回归拟合,得到凝胶强度对压力、保压时间、处理温度的二次多元回归方程为:

表 1 Box-Benhknen 试验因素水平表

Table 1 Factor and levels of Box-Benhknen

编码水平	A 压力/MPa	B 保压时间/min	C 处理温度/℃
—1	200	5	10
0	300	10	20
1	400	15	30

表 2 试验设计及结果

Table 2 Design and results of experiment

试验组	A	B	C	R ₁ 凝胶强度/ (g·cm)	R ₂ 持水性/ %
1	—1	—1	0	167.07	66.53
2	1	—1	0	175.42	69.30
3	—1	1	0	168.95	70.43
4	1	1	0	209.36	68.56
5	—1	0	—1	173.78	70.25
6	1	0	—1	187.09	70.45
7	—1	0	1	198.21	71.23
8	1	0	1	207.43	71.33
9	0	—1	—1	199.52	68.24
10	0	1	—1	219.32	70.23
11	0	—1	1	234.10	69.83
12	0	1	1	230.77	71.69
13	0	0	0	251.43	72.91
14	0	0	0	253.51	72.97
15	0	0	0	256.11	71.99
16	0	0	0	251.21	71.97
17	0	0	0	257.89	72.78

$$R_1 = 254.03 + 8.91A + 6.54B + 11.35C + 8.02AB - 1.02AC - 5.78BC - 51.56 A^2 - 22.26 B^2 - 10.84 C^2。$$

(2)

凝胶强度的显著性检验和方差分析见表 3,可以看出试验模型极显著(P<0.01),失拟不显著(P>0.05),表明该回归模型可用。回归模型的决定系数 R²为 0.990 4、变异系数 C.V.为 2.28%<10%,分别表明此二次多项式的回归效果好且回归模型具有试验稳定性。从表 3 还可以看出,一次项 A、B、C,交互项 AB、BC 以及二次项 A²、B²、C²对低盐鱼糜凝胶强度都有显著性影响(P<0.05)。

各因素的交互作用对低盐鱼糜凝胶强度的影响见图 4。由图 4 可知,压力、保压时间和处理温度两两交互作用对鱼糜凝胶强度影响比较明显。当其他因素恒定,在一定范围内,随着超高压压力的提高和保压时间的延长以及处理温度的增大,鱼糜凝胶强度都呈现不同变化。其中,由于压力和温度二者曲线弯曲程度较大,可知压力和温度对凝胶强度影响较大,保压时间影响较小。

表 3 凝胶强度的显著性检验和方差分析[†]

Table 3 Significance and analysis of variance (ANOVA) of gel strength

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9	17 177.79	1 908.64	79.90	<0.000 1	* *
A	1	635.28	635.28	26.59	0.001 3	* *
B	1	341.78	341.78	14.31	0.006 9	* *
C	1	1 030.58	1 030.58	43.14	0.000 3	* *
AB	1	256.96	256.96	10.76	0.013 5	*
AC	1	4.18	4.18	0.18	0.488 2	
BC	1	133.75	133.75	5.60	0.049 9	*
A ²	1	11 195.58	11 195.58	468.68	<0.000 1	* *
B ²	1	2 087.29	2 087.29	87.38	<0.000 1	* *
C ²	1	494.53	494.53	20.70	0.002 6	* *
残差	7	167.21	23.89			
失拟	3	133.00	44.33	5.18	0.072 9	
纯误差	4	34.21	8.55			
总和	16	17 345.00				

[†] * 差异显著,P<0.05; * * 差异极显著,P<0.01;R²为 0.990 4; C.V.为 2.28%。

2.2.3 持水性回归模型的显著性检验和方差分析 采用 Design-Expert 7.0 软件对试验结果回归拟合,可以得到持水性对压力、保压时间、处理温度的二次多元回归方程为:

$$R_2 = 72.52 + 0.15A + 0.88B + 0.61C - 1.16AB - 0.025AC - 0.033BC - 1.5 A^2 - 2.32 B^2 - 0.21 C^2。$$

(3)

持水性的显著性检验和方差分析见表 4,由表 4 可以看出试验模型极显著(P<0.01),失拟不显著(P>0.05)。回归模型的决定系数 R²=0.974 5,变异系数 C.V.=0.61%<10%,可以得出此二次多项式的回归效果好且该回归模型具备试验稳定性。从表 4 还可以看出,一次项 B、C 交互项,AB 以及二次项 A²、B²对低盐白鲢鱼糜持水性都有显著性影响(P<0.05)。

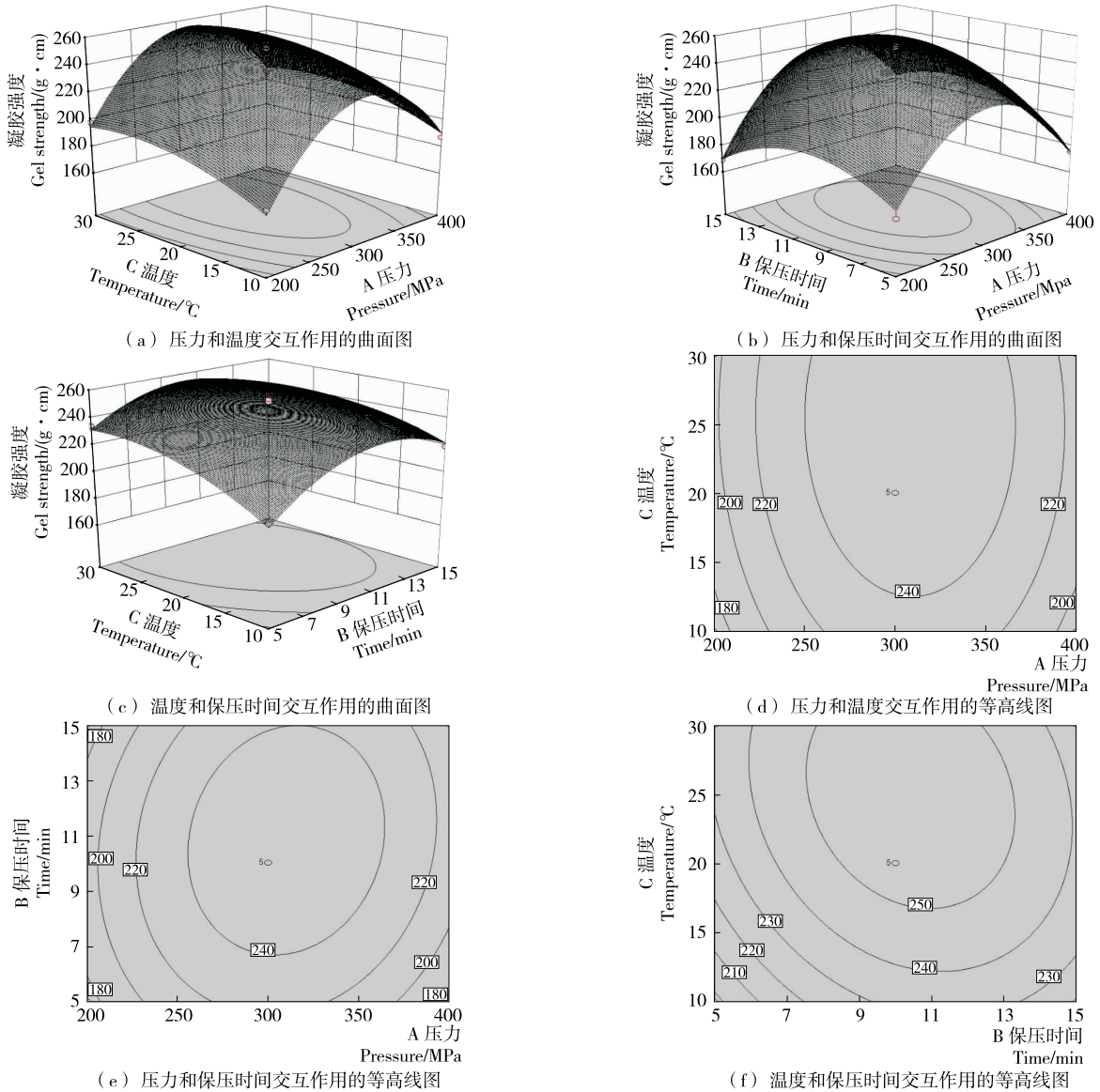


图 4 压力、保压时间和温度的交互作用对低盐鱼糜凝胶强度的影响

Figure 4 Effects of pressure, holding time and temperature interaction on gel strength of low-salt surimi gels

表 4 持水性的显著性检验和方差分析[†]

Table 4 Significance and analysis of variance (ANOVA) of WHC

方差来源	自由度	平方和	均方	F 值	P 值	显著性
模型	9	49.22	5.47	29.74	<0.000 1	* *
A	1	0.18	0.18	0.98	0.355 4	
B	1	6.14	6.14	33.41	0.000 7	* *
C	1	3.01	3.01	16.39	0.004 9	* *
AB	1	5.38	5.38	29.27	0.001 0	* *
AC	1	2.50E-03	2.50E-03	0.014	0.910 4	
BC	1	4.23E-03	4.23E-03	0.023	0.883 8	
A ²	1	9.48	9.48	51.58	0.000 2	* *
B ²	1	22.63	22.63	123.07	<0.000 1	* *
C ²	1	0.18	0.18	0.99	0.352 2	
残差	7	1.29	0.18			
失拟	3	0.28	0.094	0.37	0.777 8	
纯误差	4	1.01	0.25			
总和	16	50.51				

[†] * 差异显著, P<0.05; * * 差异极显著, P<0.01; R²为 0.974 5; C.V.为 0.61%。

图 5 所示是各因素的交互作用对低盐鱼糜凝胶持水性的影响。由图 5 可知,压力、保压时间和处理温度及交互作用对低盐白鲢鱼糜凝胶持水性影响比较明显。当其他因素恒定,在一定范围内,随着超高压压力的提高和保压时间以及温度的增加,鱼糜凝胶持水性有一定变化,且由于压力和保压时间二者曲线弯曲程度较大,可知压力和保压时间对持水性影响较大,温度影响较小。

2.2.4 最佳工艺的确定 通过 Design-Expert 软件计算分析得到最大凝胶强度和持水性时的最佳工艺条件是:压力 306.22 MPa,保压时间 10.64 min,温度 26.95 ℃,由此预测出凝胶强度最大值为 257.01 g·cm,持水性最大值为 72.92%。考虑到实际操作和实验可行性,以压力 300 MPa,保压时间 10 min,温度 25 ℃为条件进行验证性实验,此时凝胶强度为 258.24 g·cm,持水性为 71.92%。

2.3 超高压低盐鱼糜凝胶品质比较

2.3.1 凝胶特性的分析 由表 5 可知,优化后的超高压低盐

鱼糜凝胶强度(258.24 g·cm)与最佳工艺理论值接近。几种鱼糜凝胶品质比较发现,在常压下(0.1 MPa),添加 1.5% NaCl 的低盐鱼糜凝胶的凝胶强度、持水性均显著低于添加 2.5% NaCl 的普通鱼糜的($P<0.05$),因此,食盐添加量是影响白鲢鱼糜凝胶强度的重要因素。但经过超高压处理的低盐鱼糜凝胶的凝胶强度、持水性均显著($P<0.05$)大于常压处理组的(2.5% NaCl 和 1.5% NaCl),可能是高压可促进蛋白质分子内部交联,从而改善鱼糜凝胶网络结构,增强凝胶强度、持水性能,进而改善鱼糜凝胶特性^[13]。TPA 质构参数指标方面,在常压下(0.1 MPa),添加 1.5% NaCl 的低盐鱼糜凝胶的黏附性、咀嚼度同样均显著低于添加 2.5% NaCl 的常压鱼糜的($P<0.05$);而超高压处理的低盐鱼糜凝胶的硬度、咀嚼度显著($P<0.05$)下降,内聚性、回复性显著增加($P<0.05$),可能是超高压处理能增强蛋白质非共价键强度,致使鱼糜凝胶结构更紧凑,从而形成内聚性更好的凝胶网络结构^[25]。超高压处理能够明显改善低盐鱼糜的质构特性,可作

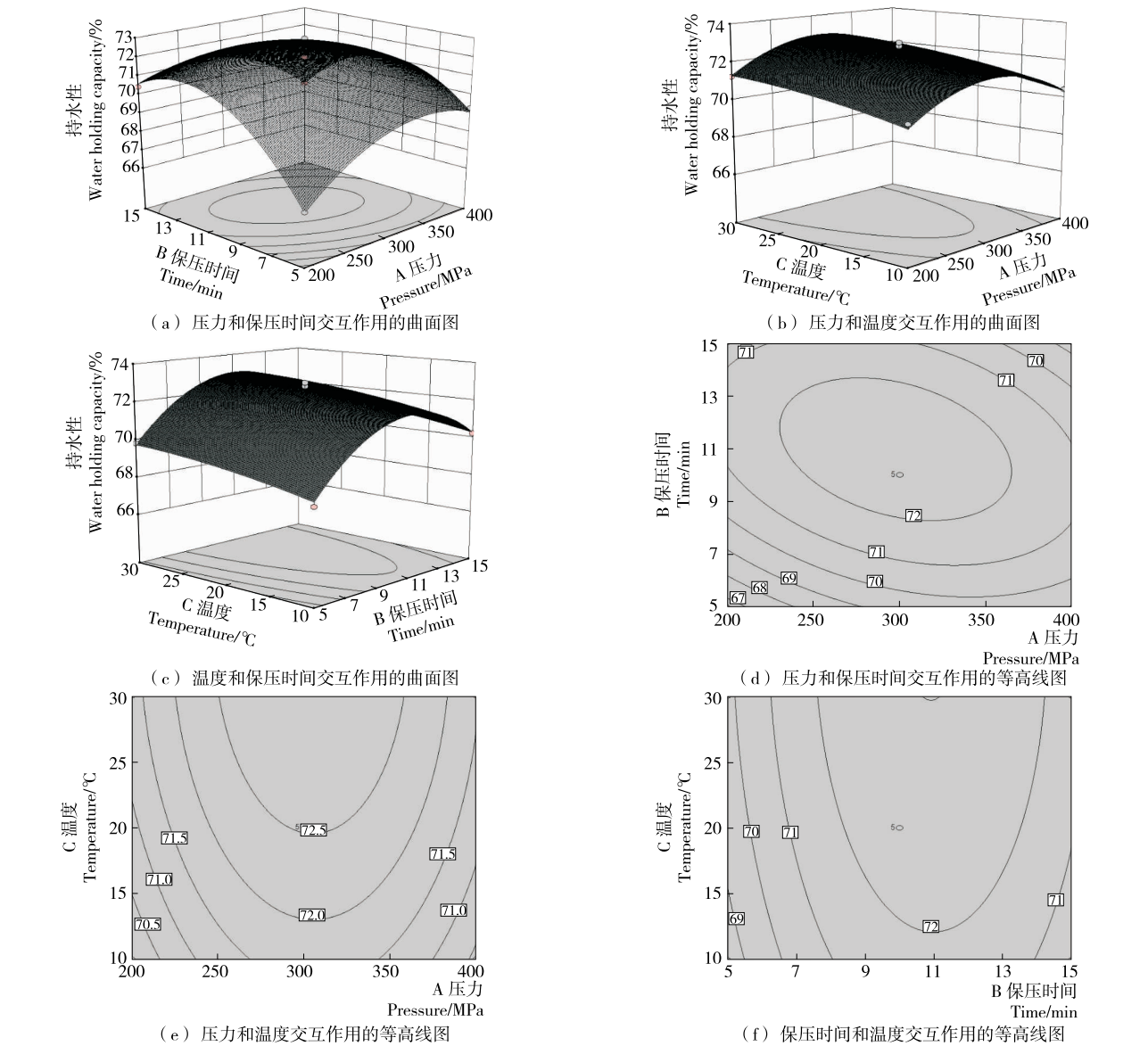


图 5 压力、保压时间和温度的交互作用对低盐鱼糜凝胶持水性的影响

Figure 5 Effects of pressure, holding time and temperature interaction on WHC of low-salt surimi gels

表 5 凝胶特性结果验证[†]

Table 5 Results of verifying test of gel properties

样品	硬度/g	黏附性/(g·s)	咀嚼度	内聚性	回复性	凝胶强度/(g·cm)	持水性/%
1.5% NaCl	2 326.91±208.20 ^a	—73.77±1.22 ^c	1 738.51±99.23 ^a	0.78±0.07 ^b	0.41±0.12 ^b	203.92±9.93 ^c	67.83±1.50 ^c
2.5% NaCl	2 286.02±132.10 ^b	—53.38±3.24 ^b	1 633.98±77.30 ^b	0.80±0.10 ^b	0.42±0.02 ^b	214.87±8.21 ^b	69.34±2.60 ^b
UHP+1.5% NaCl	1 988.02±210.90 ^c	—38.49±2.11 ^a	1 266.17±53.44 ^c	0.85±0.03 ^a	0.46±0.06 ^a	258.24±1.00 ^a	71.92±0.27 ^a

[†] UHP;300 MPa/10 min;同列不同字母表示差异显著(P<0.05)。

为降低白鲢鱼糜食盐添加量的一种有效手段。

2.3.2 SDS-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析 肌球蛋白重链(MHC,200 kDa)和肌动蛋白(Actin,43 kDa)是鱼糜蛋白中的主要成分,其中 MHC 是肌球蛋白分子中参与凝胶网络结构形成的最主要部分。由图 6 可知,几种鱼糜的肌球蛋白重链(MHC,200 kDa)有较大变化,而肌动蛋白条带无明显差异;添加 2.5% NaCl 的普通鱼糜凝胶 MHC 条带与添加 1.5% NaCl 的低盐鱼糜凝胶 MHC 条带的强度没有明显变化,但相比较而言,添加 1.5% NaCl 的低盐鱼糜凝胶 MHC 条带强度略强;而超高压处理的低盐鱼糜凝胶的 MHC 条带强度明显减弱。Cando 等^[26]研究表明,超高压鱼糜凝胶的 MHC 条带强度明显低于对照组凝胶,本研究结果与其类似。这可能是肌原纤维蛋白聚集成大分子,无法通过聚丙烯凝胶的微孔,导致其停留在浓缩胶上,使得电泳条带变弱^[27]。图 6 中高压组的 MHC 条带强度明显减弱,可见超高压组的蛋白质聚合程度高于未处理组,超高压处理使更多的蛋白质分子通过非二硫共价键促进分子内及分子间的交联形成,从而影响着最终凝胶的品质^[28]。因此,高压能诱导鱼糜中肌球蛋白发生变性,从而改善低盐鱼糜的凝胶特性。

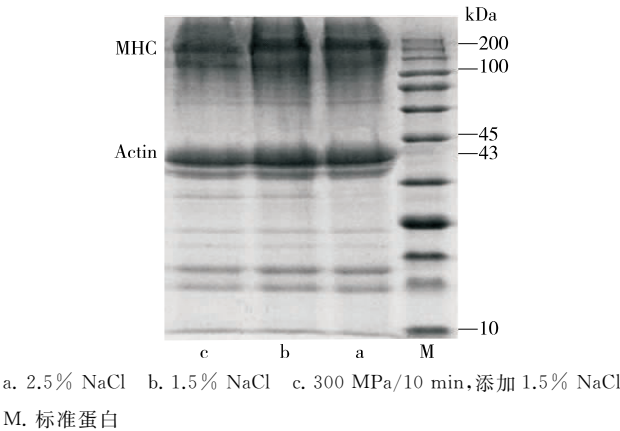


图 6 鱼糜凝胶 SDS-PAGE 图

Figure 6 SDS-PAGE pattern of surimi gels

2.3.3 微观结构观察 图 7 为鱼糜凝胶扫描电镜图,由图 7 可知,超高压处理后的低盐鱼糜凝胶网络结构与添加 1.5%, 2.5% NaCl 的鱼糜凝胶网络结构明显不同。与添加 2.5% NaCl 的鱼糜凝胶网络结构相比,添加 1.5% NaCl 的鱼糜凝胶表面相对不平整,孔隙大,凝胶结构松散不均匀。而超高压(300 MPa/10 min)的低盐鱼糜凝胶表面比较均匀平整,结构致密,孔洞数量明显减少。超高压处理可以增强凝胶基质

密度和消除一些孔洞,形成光滑、连续、均匀的凝胶。超高压形成的致密凝胶网络结构与更高的持水性和破断力有关,从而形成良好的凝胶^[29],这也验证了前文中凝胶强度和持水性的相关结果。这可能是超高压能够诱导白鲢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^[25],具有更高的持水性和凝胶强度,从而改善鱼糜凝胶特性。因此,超高压能够在一定程度上改善低盐鱼糜凝胶的微观结构。

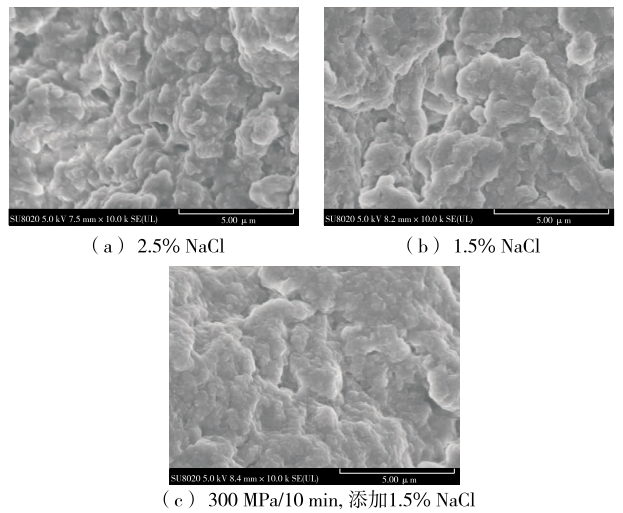


图 7 鱼糜凝胶扫描电镜图

Figure 7 Micrographs of surimi gels (×10 000 times)

3 结论

超高压制备低盐白鲢鱼糜凝胶的最佳工艺条件为:压力 306.22 MPa,保压时间 10.64 min,温度 26.95 ℃,此时鱼糜凝胶强度为 258.24 g·cm,持水性为 71.92%。超高压处理的低盐鱼糜内聚性、回复性显著高于常压低盐对照组(1.5% NaCl,0.1 MPa)和常压普通鱼糜对照组(2.5% NaCl,0.1 MPa)(P<0.05);SDS-PAGE 蛋白电泳和凝胶微观扫描结果表明,超高压处理的低盐鱼糜的肌球蛋白重链条带强度明显变弱,且形成了一个密集的、细致均匀的三维网络结构,明显优于 2 个常压对照组。因此,超高压技术可以提高低盐白鲢鱼糜的凝胶品质。然而,有关超高压提高低盐白鲢鱼糜凝胶品质的机制还有待进一步研究。

参考文献

[1] 焦道龙. 鲢鱼鱼糜的加工工艺以及相关特性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010: 1-2.

[2] CANDO D, HERRANZ B, BORDERIAS A J, et al. Different additives to enhance the gelation of surimi gel with reduced sodium content[J]. Food Chemistry, 2016, 196(1): 791-799.

[3] LANIER T C, CARVAJAL P, YONGSAWATDIGUL J, et al. Surimi gelation chemistry[M]. Surimi and Surimi seafood. 2005: 435-489.

[4] 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.

[5] 仪淑敏, 马兴胜, 励建荣, 等. 超高压诱导鱼糜凝胶形成中水分特性及凝胶强度的相关性研究[J]. 中国食品学报, 2015, 15(7): 26-31.

[6] 付湘晋, 许时婴, 王璋. 微波加热法制备白鲢鱼低盐鱼糜凝胶[J]. 中国食品学报, 2010, 10(3): 52-57.

[7] 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.

[8] 郭宝颜, 梁燕, 周爱梅, 等. 超高压对罗非鱼肌动球蛋白物化特性的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(6): 259-263.

[9] CANDO D, HERRANZ B, BORDERÍAS A J, et al. Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51(1): 176-187.

[10] 程珍珠. 超高压和膳食纤维对复合鱼糜凝胶品质的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2012: 10-18.

[11] YUO Xiao-lin, YANG Rui-jin, ZHAO Wei, et al. Gelling properties of spanish mackerel (*Scomberomorus niphonius*) surimi as affected by washing process and high pressure[J]. International Journal of Food Engineering, 2010, 6(4): 61-64.

[12] CANDO D, MORENO H M, BORDERÍAS A J, et al. Combined effect of high hydrostatic pressure and lysine or cystine addition in low-grade surimi gelation with low salt content[J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 9(8): 1 391-1 398.

[13] 陆剑锋, 邵明栓, 林琳, 等. 结冷胶和超高压对鱼糜凝胶性质的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(11): 372-377.

[14] PHATCHARAT S, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W. Effects of washing with oxidising agents on the gel-forming ability and physicochemical properties of surimi produced from bigeye snapper (*Priacanthus tayenus*) [J]. Food Chemistry, 2006, 98(3): 431-439.

[15] 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.

[16] 张小燕, 张娜, 宋志强, 等. 猪肉盐溶蛋白质超高压诱导凝胶品质研究[J]. 食品与发酵科技, 2012, 48(6): 32-36.

[17] BEBJAKUL S, VISESSANGUAN W, CHANTARASUWAN C. Effect of porcine plasma protein and setting on gel properties of surimi produced from fish caught in Thailand[J]. LWT-Food Science and Technology, 2004, 37(2): 177-185.

[18] 罗晓玲, 杨瑞金, 赵伟, 等. 超高压处理复合鱼糜凝胶性能研究[J]. 食品与机械, 2010, 26(4): 15-18.

[19] 秦影, 汤海青, 欧昌荣, 等. 超高压处理对大黄鱼鱼糜水分状态和蛋白质结构的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 246-252.

[20] SIKES A L, TOBIN A B, TUME R K. Use of high pressure to reduce cook loss and improve texture of low-salt beef sausage batters[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2009, 10(4): 405-412.

[21] KIM S K, MENDIS E. Bioactive compounds from marine processing byproducts: a review[J]. Food Research International, 2006, 39(4): 383-393.

[22] 胡飞华. 梅鱼鱼糜超高压凝胶化工艺及凝胶机理的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2010.

[23] SHUKLA S, MEHTA A, MEHTA P, et al. Antioxidant ability and total phenolic content of aqueous leaf extract of *Stevia rebaudiana* Bert[J]. Experimental & Toxicologic Pathology, 2012, 64(7/8): 807.

[24] KOÇ M, KOÇ B, SUSYAL G, et al. Improving functionality of whole egg powder by the addition of gelatine, lactose, and pullulan[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(9): S508-S515.

[25] 周爱梅, 林丽英, 梁燕, 等. 超高压诱导鱼糜凝胶性能的研究[J]. 现代食品科技, 2013, 29(9): 2 058-2 062.

[26] CANDO D, BORDERIAS A J, MORENO H M. Combined effect of aminoacids and microbial transglutaminase on gelation of low salt surimi content under high pressure processing[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 36: 10-17.

[27] CHEN Xin, TUME R K, XIONG You-lin, et al. Structural modification of myofibrillar proteins by high-pressure processing for functionally improved, value-added, and healthy muscle gelled foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2017, 5(1): 1-23.

[28] ZHU Zhi-wei, LANIER T C, FARKAS B E, et al. Transglutaminase and high pressure effects on heat-induced gelation of Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 131(3): 154-160.

[29] CANDO D, BORDERIAS A J, MORENO H M. Influence of amino acid addition during the storage life of high pressure processed low salt surimi gels[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75(1): 599-607.