

# 基于质构特性对复合虾糜凝胶性能的优化

## Optimization of compound shrimp mince gel based on texture properties

满昊<sup>1</sup> 刘富俊<sup>2</sup> 葛静慧<sup>3</sup> 郭璇<sup>1</sup> 李冬梅<sup>1,4</sup>

MAN Hao<sup>1</sup> LIU Fu-jun<sup>2</sup> GE Jing-hui<sup>3</sup> GUO Xuan<sup>1</sup> LI Dong-mei<sup>1,4</sup>

(1. 大连工业大学食品学院, 辽宁 大连 116034; 2. 辽渔集团有限公司, 辽宁 大连 116000;

3. 辽渔集团远洋食品公司, 辽宁 大连 116000; 4. 大连工业大学海洋食品精深加工关键技术

省部共建协同创新中心, 辽宁 大连 116034)

(1. School of Food Science and Technology Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034,

China; 2. Liaoyu Group Co., Ltd., Dalian, Liaoning 116000, China; 3. Liao Yu Group Ocean Food

Company, Dalian, Liaoning 116000, China; 4. Collaborative Innovation Center of Seafood Deep

Processing, Dalian Polytechnic University, Dalian, Liaoning 116034, China)

**摘要:**目的:促进南极磷虾的精深加工,丰富虾糜制品的种类。方法:以南极磷虾肉与南美白对虾肉为主要原料,添加蜡质玉米乙酰化双淀粉己二酸酯、蛋清粉、大豆分离蛋白、谷氨酰胺转氨酶等辅料,通过单因素试验以及响应面试验,得出虾丸的最佳制作配比。结果:虾丸的最佳制作配比:蜡质玉米乙酰化双淀粉己二酸酯添加量为 6.00%,蛋清粉添加量为 5.00%,大豆分离蛋白添加量为 5.00%,谷氨酰胺转氨酶添加量为 0.50%,魔芋胶添加量为 0.20%。结论:采用二段式加热的方式制作复合虾糜凝胶,通过添加外源添加剂,在改良复合虾糜凝胶质构特性的同时可以保证营养价值。

**关键词:**质构特性;南极磷虾;南美白对虾;凝胶性能

**Abstract: Objective:** To promote the intensive processing of Antarctic Krill and enrich the types of minced shrimp products.

**Methods:** Using Krill meat and prawn meat as main raw materials, waxy corn acetylated distarch adipate, egg white powder, soy protein isolate, glutamine transaminase and other adjuvants were added, and the optimal preparation ratio of shrimp balls was obtained through single factor test and response surface test. **Results:** The optimal preparation ratio of shrimp balls was 6.00% waxy corn acetylated distarch adipate, 5.00% egg white powder, 5.00% soy protein isolate, 0.50% glutamine

transaminase and 0.20% konjac gum. **Conclusion:** The two-stage heating method is used to prepare compound shrimp gel. By adding exogenous additives, the texture properties of compound shrimp gel can be improved and the nutritional value can be guaranteed.

**Keywords:** textural properties; Antarctic krill; South American white shrimp; properties of gel

南极磷虾资源丰富,年捕捞量可达 1 亿 t<sup>[1]</sup>,是南大洋最大且不断增长的渔业目标<sup>[2]</sup>。南极磷虾营养价值高,富含优质蛋白以及磷脂 EPA 和 DHA 等 *n*-3 不饱和脂肪酸<sup>[3]</sup>。此外还含有虾青素<sup>[4]</sup>、甲壳素<sup>[3]</sup>、矿物质等多种营养元素。但由于南极磷虾的自溶酶含量较高,且其肌原纤维含量只占冻藏后蛋白质的 20% 左右,导致南极磷虾凝胶性能差,难以单独制备为凝胶类产品<sup>[5]</sup>。常见的南极磷虾类制品主要以南极磷虾与凝胶性能较好的鱼虾类复配的形式呈现。田利利等<sup>[6]</sup>将阿拉斯加鳕鱼糜与南极磷虾以 7:3 的比例进行复配,获得了凝胶性较强的虾糜—鱼糜凝胶。许刚等<sup>[7]</sup>利用鳙鱼和白姑鱼改善南极磷虾糜的凝胶品质,并测定了其挥发性风味物质。课题组<sup>[8]</sup>前期研究发现,南极磷虾与南美白对虾复配可获得凝胶性能较好的制品,将在此基础上进一步研究外源添加剂对复合虾糜凝胶性能的影响。

虾糜凝胶的品质通常通过添加盐<sup>[9]</sup>、多糖<sup>[10]</sup>、蛋白粉<sup>[11]</sup>、魔芋胶<sup>[12]</sup>等外源添加剂来改善。Jia 等<sup>[9]</sup>研究发现磷酸化修饰结合低剂量氯化钾能够协同改善虾肉肌原纤维蛋白的功能性质,如增强了虾肉肌原纤维蛋白的电负性和溶解性,提高了凝胶强度、保水性及弹性。Li 等<sup>[10]</sup>研究了 6 种多糖(壳聚糖、魔芋葡甘聚糖、羧甲基纤

**基金项目:**“十三五”国家重点研发计划项目(编号:2017YFD0400504);大连市重点研发计划项目(编号:2022YF17SN034)

**作者简介:**满昊,女,大连工业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**李冬梅(1977—),女,大连工业大学教授级高级工程师,博士。E-mail: 426417898@qq.com

**收稿日期:**2022-10-14 **改回日期:**2023-04-09

维素钠、糯玉米淀粉、 $\iota$ -卡拉胶和  $\kappa$ -卡拉胶)对南极磷虾脯质构特性的影响,结果表明卡拉胶的改善效果较好。刘莹等<sup>[11]</sup>研究了大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)、分离乳清蛋白和蛋清粉(Egg white powder, EWP)对虾糜凝胶特性的影响,结果表明适量添加 EWP 能提高南极磷虾混合虾糜的凝胶特性和整体接受度。但目前关于外源添加剂改善南极磷虾凝胶特性的研究较少,鱼糜制品的成功开发为南极磷虾虾糜产品的研制提供了借鉴。Liu 等<sup>[13]</sup>利用红薯淀粉改善罗非鱼-金鲷鱼复合鱼糜凝胶的质地和微观结构。Singh 等<sup>[14]</sup>试验表明添加 2% 的 EWP 显著改善了鲑鱼鱼糜凝胶强度和持水能力,提高了凝胶的致密度。Liu 等<sup>[15]</sup>将 0.5% 的魔芋胶(Konjac glucomannan, KGM)添加至红鲂鱼鱼糜中,结果表明 KGM 具有较强的低温保护作用与抗氧化活性,提高鱼糜凝胶强度的同时降低了其硫代巴比妥酸值。

目前,市面上出现的虾糜产品多以鱼虾等的下脚料为原料制作,缺乏营养丰富且虾糜含量高的产品,尤其以南极磷虾为原料制作的虾糜制品尚未得到充分开发。研究拟以南极磷虾肉与南美白对虾肉为原料,采用二段式加热的方式制作复合虾糜凝胶,通过添加外源添加剂,在改良复合虾糜凝胶质构特性的同时保证其营养价值。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

南极磷虾肉:大连辽渔远洋食品有限公司;

南美白对虾原浆虾仁:大连美极鲜虾食品有限公司;

食盐:大连新春多品种盐有限公司;

蜡质玉米乙酰化双淀粉己二酸酯(Maize acetylated distarch adipate, ADA):中粮生物科技股份有限公司;

EWP、SPI、复合磷酸盐、KGM:河南万邦实业有限公司;

谷氨酰胺转氨酶(Glutamine transaminase, TG):江苏一鸣生物股份有限公司;

葱姜蒜粉:仲景食品股份有限公司;

大豆油:嘉里粮油(营口)有限公司;

戊二醛、乙醇:分析级,北京宝希迪科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

绞肉机:SD-JR57 型,三的电器制造有限公司;

数显恒温水浴锅:HH-4 型,常州智博瑞仪器制造有限公司;

质构仪:Stable Micro Systems TA. XT. plus 型,英国 SMS 公司;

离心机:L550 型,湖南湘仪实验仪器开发有限公司;

冷冻干燥机:Coolsafe 110-4 型,丹麦 Labogene 公司;

扫描电镜仪:JSM-7800F 型,日本东京电子株式会社。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 虾糜凝胶制备工艺

冷冻南美白对虾仁和冷冻南极磷虾肉→解冻→空斩→盐斩→调味斩→凝胶熟化→冷却→成品

#### 1.3.2 操作要点

(1) 预处理:将冷冻南美白对虾虾仁与南极磷虾肉分别在 4 ℃ 下解冻 12 h 后,剔除杂物,备用。

(2) 斩拌:将解冻后的南美白对虾虾仁与南极磷虾肉按照质量比 3:2 混合斩拌 5 min,两种虾肉混匀并斩拌至虾糜无颗粒状;加入食盐和复合磷酸盐进行盐斩,斩拌至虾糜完全分散,释放盐溶蛋白、原料黏稠、有光泽;最后加入调味品及不同外源添加物(ADA、EWP、SPI、TG、KGM)进行调味斩。总斩拌时间至少为 20 min,其间连续加入冰屑,全程控制温度低于 10 ℃ 的同时调节复合虾糜的水分含量,以所有物料充分混合均匀为标准。

(3) 凝胶熟化:将复合虾糜置于 PC 管(圆柱状,内径 25 mm,高 30 mm)中,排气密封,采用两段式加热方法。根据刘莹等<sup>[11]</sup>的方法结合前期预试验结果,加热条件设定为:40 ℃ 水浴加热 1 h,对复合虾糜中添加的 TG 进行活化,再 90 ℃ 水浴加热 30 min。

(4) 冷却:在冰水中冷却 20 min 后,于 4 ℃ 下冷藏过夜,备用。

1.3.3 单因素试验设计 按照 1.3.1 中的样品制备,基本配比:以 100 g 复合虾肉的质量为基准,添加食盐 2.25%、复合磷酸盐 0.50%、葱姜蒜粉 0.30%、ADA 3.00%、EWP 4.00%、SPI 5.00%、TG 0.40%、KGM 0.10%。在基本配方的基础上结合预试验结果,分别考察 ADA 添加量(1.5%,3.0%,4.5%,6.0%,7.5%)、EWP 添加量(2%,3%,4%,5%,6%)、SPI 添加量(1%,3%,5%,7%,9%)、TG 添加量(0.2%,0.3%,0.4%,0.5%,0.6%)和 KGM 添加量(0.1%,0.2%,0.3%,0.4%,0.5%)对虾糜凝胶质构特性的影响。

1.3.4 响应面优化试验设计 依据 Box-Behnken 设计结合单因素试验结果,选取 ADA 添加量、SPI 加入量、EWP 添加量和 TG 添加量 4 个因素,响应值为物性指标,优化虾糜凝胶质构特性。

1.3.5 质地剖面分析(TPA)测定 根据文献<sup>[16]</sup>,修改如下:测前、中、后速度分别为 3,1,2 mm/s,应变为 30%,触发力 0.049 N,将样品切成直径和高度分别为 25,30 mm 的圆柱体并进行 TPA 测定,测定其硬度、弹性、咀嚼度,每组样品测定 6 个平行。

1.3.6 物性综合指标的设置 参照文献<sup>[17]</sup>。在质构测定中选取与虾糜凝胶品质密切相关的硬度、弹性和咀嚼度为关键性物性指标。按式(1)计算虾丸的物性综合指标值。

$$V_{\text{CIPP}} = \frac{H}{H_M} \times 30\% + \frac{S}{S_M} \times 30\% + \frac{C}{C_M} \times 40\%, \quad (1)$$

式中:

$V_{\text{CIPP}}$ ——物性综合指标值;

$H$ ——硬度, N;

$H_M$ ——最高硬度, N;

$S$ ——弹性;

$S_M$ ——最高弹性;

$C$ ——咀嚼度;

$C_M$ ——最高咀嚼度。

1.3.7 复合虾糜凝胶蒸煮损失率的测定 根据文献[18],修改如下:按照优化后的质量组成(ADA 6.0%, EWP 5.0%, SPI 5.0%, TG 0.5%, KGM 0.2%)制备复合虾糜凝胶的样品作为优化组,未加 5 种外源添加物的复合凝胶作为空白对照,称量两组样品蒸煮前后质量,每组测定 3 个平行。按式(2)计算蒸煮损失率。

$$R_{\text{CL}} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\%, \quad (2)$$

式中:

$R_{\text{CL}}$ ——蒸煮损失率, %;

$M_1$ ——凝胶样品蒸煮前的原始重量, g;

$M_2$ ——凝胶样品蒸煮后的重量, g。

1.3.8 复合虾糜凝胶持水率的测定 根据文献[18],修改如下:将按照优化后的质量组成制备复合虾糜凝胶,选取约 2 mm 厚的样品并称取其质量( $W_1$ ),包裹滤纸后离心称重( $W_2$ )。每组样品 3 个平行,并以未加 5 种外源添加物的复合凝胶作为空白对照。按式(3)计算持水率。

$$C_{\text{WH}} = \left(1 - \frac{W_1 - W_2}{W_1}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

式中:

$C_{\text{WH}}$ ——持水率, %;

$W_1$ ——凝胶离心前的原始质量, g;

$W_2$ ——离心后凝胶的重量, g。

1.3.9 复合虾糜凝胶强度的测定 根据文献[19],修改如下:将优化后的质量组成以及未加 5 种外源添加物的复合凝胶样品均切为直径和高度分别为 25, 30 mm 的圆柱形,于室温下平衡 2 h。每组样品 3 个平行。测前、中、后速度分别为 2, 1, 10 mm/s,穿透比为 50%,触发力为 0.049 N。

1.3.10 复合虾糜凝胶微观结构的测定 参考文献[20],修改如下:将优化后的质量组成以及未加 5 种外源添加物的复合凝胶样品切成 4 mm × 4 mm × 5 mm 的块状,置于 2.5% 戊二醛中并在 4 °C 固定 24 h,用磷酸盐缓冲液漂洗 3 次后,再用乙醇梯度脱水 20 min。冷冻干燥,喷金后,分别观察放大 50 倍和 5 000 倍后扫描显微镜下的微观结构。

## 1.4 数据处理

试验数据均重复 3 次以上,结果取平均值。利用 Design-Expert 8.0.6 软件和 Origin 9.0 软件进行响应面试验设计、数据分析以及图像制作。

## 2 结果与讨论

### 2.1 单因素试验

#### 2.1.1 ADA 添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响

ADA 在食品工业中作为增稠剂和黏合剂,起到填充肌肉蛋白质凝胶基质间隙的作用,影响水结合和质地特性,是肉糜制品的良好填充剂,已被批准用于许多标准化和非标准肉制品加工中[21]。如图 1 所示,ADA 添加量对凝胶的硬度和咀嚼度均有显著影响( $P < 0.05$ ),但对凝胶弹性无显著影响( $P > 0.05$ )。ADA 添加量为 1.5% ~ 7.5% 时,由于加热使得淀粉颗粒吸水膨胀,填充到肉蛋白网络结构中[22],使得凝胶的硬度、弹性和咀嚼度均先上升后降低,并在 ADA 添加量为 6.0% 时达到最大值。当 ADA 添加量为 7.5% 时,虾丸的硬度、弹性和咀嚼度下降,可能是因为过量的 ADA 会减弱虾糜蛋白的交联程度,进而影响虾糜凝胶网络的形成[23]。因此,6.0% 的 ADA 是复合虾糜凝胶的最佳添加量。

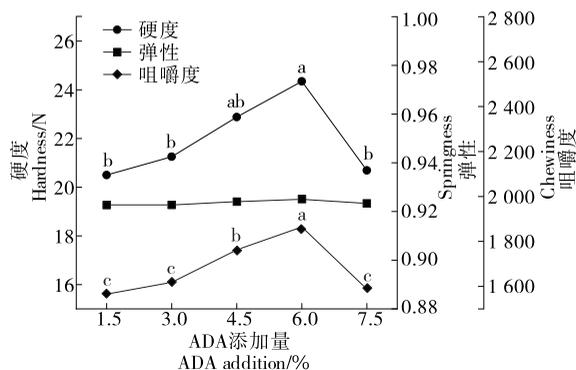


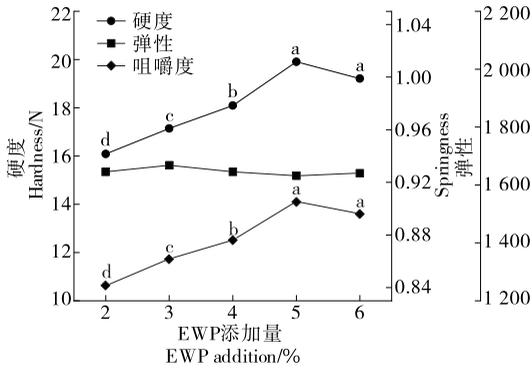
Figure 1 Effect of different ADA additions on the textural properties of composite shrimp mince gel

#### 2.1.2 EWP 添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响

EWP 的营养价值高,稳定性强,是蛋清液的理想替代品。此外,它凭借着凝胶性和乳化性等,可有效改善鱼糜凝胶制品的质构特性[24]。如图 2 所示,随着 EWP 添加量的增加,凝胶的硬度和咀嚼度均呈先上升后降低的趋势( $P < 0.05$ ),凝胶的硬度和咀嚼度在 EWP 添加量为 5% 时取得最大值,而对其弹性无显著影响( $P > 0.05$ )。当 EWP 添加量  $> 5\%$  时,凝胶的质构性能均无显著变化( $P > 0.05$ )。因此,5% 的 EWP 是复合虾糜凝胶的最佳添

#### 2.1.2 EWP 添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响

EWP 的营养价值高,稳定性强,是蛋清液的理想替代品。此外,它凭借着凝胶性和乳化性等,可有效改善鱼糜凝胶制品的质构特性[24]。如图 2 所示,随着 EWP 添加量的增加,凝胶的硬度和咀嚼度均呈先上升后降低的趋势( $P < 0.05$ ),凝胶的硬度和咀嚼度在 EWP 添加量为 5% 时取得最大值,而对其弹性无显著影响( $P > 0.05$ )。当 EWP 添加量  $> 5\%$  时,凝胶的质构性能均无显著变化( $P > 0.05$ )。因此,5% 的 EWP 是复合虾糜凝胶的最佳添



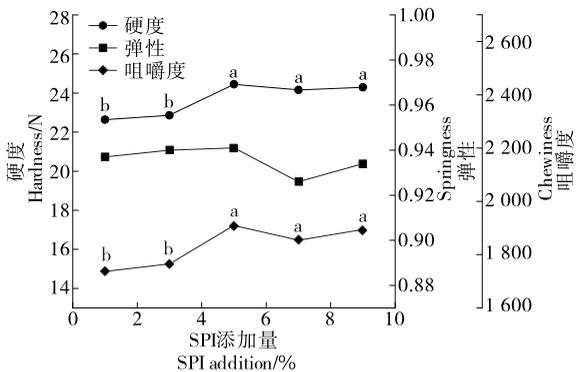
同一指标之间的小写字母不同表示该指标数值存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图2 EWP添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响  
Figure 2 Effect of EWP addition on the textural properties of composite shrimp mince gel

加量。此结果与张一鸣等<sup>[25]</sup>的一致。

**2.1.3 SPI添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响** SPI是一种蛋白质含量高于90%的非肉类蛋白,并且由于其高蛋白含量,中性味道和优异的乳化性能而被广泛用于肉制品制作中,同时,SPI分散体可能表现出很高的黏度,这有利于凝胶的形成<sup>[26]</sup>。如图3所示,随着SPI添加量的增加,凝胶的咀嚼度呈先升高后降低的趋势( $P < 0.05$ ),而凝胶的硬度和弹性无显著变化( $P > 0.05$ )。当SPI添加量为1%~5%时,虾糜凝胶的硬度和咀嚼度逐渐增大,可能是在水的作用下,肌原纤维蛋白与SPI中的极性基团键合,通过延长肌原纤维蛋白的链长使得凝胶网络更为致密。当SPI添加量为7%时,虾糜凝胶的咀嚼度降低,可能是由于分子之间键合作用降低,SPI直接以填充物的形式存在于凝胶结构中,使得其质构特性发生了变化<sup>[27]</sup>。因此,5%的SPI是复合虾糜凝胶的最佳添加量。

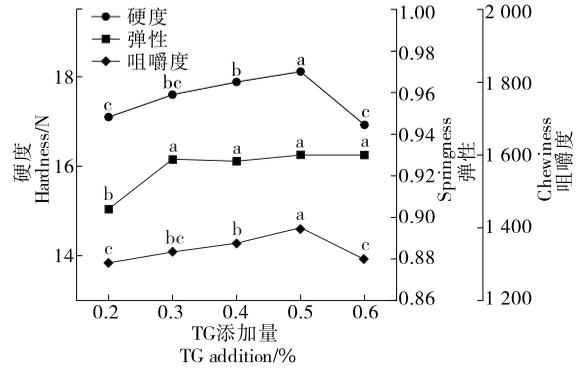
**2.1.4 TG添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响** TG可以催化谷氨酰胺残基(Gln)的 $\gamma$ -羟胺基团和赖氨酸残



同一指标之间的小写字母不同表示该指标数值存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图3 SPI添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响  
Figure 3 Effects of different SPI additions on the textural properties of compound minced shrimp gel

基(Lys)的 $\epsilon$ -氨基的酰基转移,通过分子交联改善蛋白质凝胶化<sup>[28]</sup>。如图4所示,不同添加量的TG对复合虾糜凝胶硬度和咀嚼度有显著性影响( $P < 0.05$ ),而对虾糜凝胶的弹性无显著性影响( $P > 0.05$ )。TG添加量为0.2%~0.6%时,复合虾糜凝胶的质构数值均先增加后降低,并在0.5%时达到最大值。因此,0.5%的TG是复合虾糜凝胶的最佳添加量。此结果与于楠楠等<sup>[29]</sup>的一致。

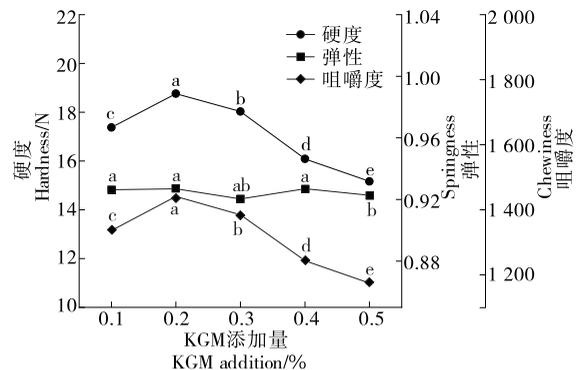


同一指标之间的小写字母不同表示该指标数值存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图4 TG添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响  
Figure 4 Effects of different TG additions on the textural properties of compound minced shrimp gel

**2.1.5 KGM添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响**

KGM以次级键相结合的方式与其他凝胶剂共同作用,改善蛋白凝胶结构<sup>[30]</sup>。如图5所示,KGM的添加显著改变了凝胶样品的硬度和咀嚼度( $P < 0.05$ ),且均呈先上升后下降的趋势,而对其弹性影响不显著( $P > 0.05$ )。当KGM添加量达到0.2%时,硬度和咀嚼度达到最大值,可能是KGM的亲水基与水分子作用,并与蛋白分子以氢键结合的方式形成致密的三维网络结构<sup>[31]</sup>。因此,0.2%



同一指标之间的小写字母不同表示该指标数值存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图5 KGM添加量对复合虾糜凝胶质构特性的影响  
Figure 5 Effects of different KGM additions on the textural properties of compound minced shrimp gel

的 KGM 是复合虾糜凝胶的最佳添加量。

2.2 响应面法优化试验

2.2.1 中心组合试验结果 以物性综合指标为响应值, 响应面试验因素及水平设置见表 1, 分析试验结果见表 2。

2.2.2 响应面试验显著性检验 对试验结果进行多元回归分析, 得到回归方程:

$$Y=0.97+0.015A+0.015B-0.000\ 083\ 3C-0.014D-0.001AB+0.024AC-0.01AD+0.017BC-0.027BD+0.009\ 7CD-0.09A^2-0.052B^2-0.084C^2-0.09D^2。(4)$$

式(4)中 B、D 相互作用系数最大, 说明 SPI 和 TG 添加量对试验结果的影响更显著。

由表 3 可知, 所得模型极显著 ( $P<0.000\ 1$ ), 失拟项

表 1 响应面试验因素及水平表

Table 1 Response surface test factors and level table

水平	A ADA 添加量/%	B SPI 添加量/%	C EWP 添加量/%	D TG 添加量/%
-1	5	4	4	0.4
0	6	5	5	0.5
1	7	6	6	0.6

不显著 ( $P=0.341\ 1>0.05$ ), 该模型高度拟合且可信度高, 可利用其改良复合虾糜凝胶。

2.2.3 各因素对复合虾糜凝胶综合指标的交互作用 试验表明,  $A^2$ 、 $B^2$ 、 $C^2$ 、 $D^2$  差异极显著, A、B、AC、BD 差异显著, 因此选择对 AC 和 BD 的交互作用进行分析。ADA

表 2 Box-Behnken 试验设计结果

Table 2 Box-Behnken test design and results

试验号	A	B	C	D	硬度/N	弹性	咀嚼度	综合指标
1	0	1	0	-1	22.992	0.915	1 733.460	0.890
2	0	0	-1	-1	20.456	0.923	1 550.110	0.817
3	-1	-1	0	0	19.876	0.920	1 500.840	0.798
4	0	0	0	0	25.303	0.921	1 906.300	0.961
5	1	0	1	0	21.153	0.921	1 601.800	0.837
6	1	0	0	-1	20.320	0.916	1 534.520	0.810
7	1	-1	0	0	20.274	0.917	1 535.670	0.810
8	0	-1	0	1	19.813	0.921	1 515.650	0.800
9	0	1	0	1	19.980	0.916	1 522.560	0.803
10	0	0	0	0	24.636	0.921	1 852.170	0.940
11	0	0	1	-1	18.507	0.914	1 402.610	0.756
12	0	-1	0	-1	18.686	0.918	1 418.880	0.763
13	-1	0	1	0	18.082	0.919	1 365.720	0.744
14	0	1	1	0	21.078	0.918	1 608.740	0.837
15	-1	1	0	0	20.210	0.921	1 549.920	0.813
16	-1	0	0	-1	17.635	0.916	1 352.149	0.733
17	1	0	0	1	17.852	0.920	1 368.580	0.741
18	1	0	-1	0	17.514	0.920	1 343.805	0.731
19	0	0	0	0	26.397	0.919	2 014.322	0.998
20	-1	0	0	1	16.758	0.927	1 295.804	0.711
21	0	0	1	1	18.061	0.925	1 393.866	0.750
22	0	-1	-1	0	19.680	0.925	1 524.943	0.801
23	0	0	0	0	25.159	0.922	1 944.368	0.966
24	1	1	0	0	21.172	0.919	1 632.114	0.843
25	0	0	-1	1	20.924	0.924	1 620.651	0.838
26	0	-1	1	0	18.902	0.919	1 459.650	0.775
27	-1	0	-1	0	18.779	0.919	1 449.782	0.771
28	0	1	-1	0	19.200	0.919	1 484.153	0.784
29	0	0	0	0	25.339	0.922	1 951.852	0.970

表 3 回归模型的方差分析<sup>†</sup>

Table 3 Variance analysis of regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.13	14	$8.95 \times 10^{-3}$	18.34	<0.000 1	* *
A	$2.64 \times 10^{-3}$	1	$2.64 \times 10^{-3}$	5.41	0.035 6	*
B	$2.55 \times 10^{-3}$	1	$2.55 \times 10^{-3}$	5.23	0.038 3	*
C	$8.33 \times 10^{-8}$	1	$8.33 \times 10^{-8}$	$1.71 \times 10^{-4}$	0.989 8	
D	$2.24 \times 10^{-3}$	1	$2.24 \times 10^{-3}$	4.59	0.050 2	
AB	$4.00 \times 10^{-6}$	1	$4.00 \times 10^{-6}$	$8.20 \times 10^{-3}$	0.929 1	
AC	$2.30 \times 10^{-3}$	1	$2.30 \times 10^{-3}$	4.72	0.047 5	*
AD	$4.41 \times 10^{-4}$	1	$4.41 \times 10^{-4}$	0.90	0.357 9	
BC	$1.23 \times 10^{-3}$	1	$1.23 \times 10^{-3}$	2.51	0.135 4	
BD	$2.97 \times 10^{-3}$	1	$2.97 \times 10^{-3}$	6.09	0.027 1	*
CD	$3.80 \times 10^{-4}$	1	$3.80 \times 10^{-4}$	0.78	0.392 3	
A <sup>2</sup>	$5.20 \times 10^{-2}$	1	$5.20 \times 10^{-2}$	106.70	<0.000 1	* *
B <sup>2</sup>	$1.70 \times 10^{-2}$	1	$1.70 \times 10^{-2}$	35.56	<0.000 1	* *
C <sup>2</sup>	$4.50 \times 10^{-2}$	1	$4.50 \times 10^{-2}$	93.17	<0.000 1	* *
D <sup>2</sup>	$5.20 \times 10^{-2}$	1	$5.20 \times 10^{-2}$	107.30	<0.000 1	* *
残差	$6.83 \times 10^{-3}$	14	$4.88 \times 10^{-4}$			
失拟项	$5.48 \times 10^{-3}$	10	$5.48 \times 10^{-4}$	1.61	0.341 1	
纯误差	$1.36 \times 10^{-3}$	4	$3.39 \times 10^{-4}$			
总和	0.13	28				

<sup>†</sup> \* 表示差异显著( $P < 0.05$ ); \* \* 表示差异极显著( $P < 0.001$ )。

和 EWP 添加量的交互作用对复合虾糜凝胶综合指标的响应曲面图和等高线图见图 6。AC 交互作用的响应曲面图呈陡峭弧状,等高线图趋向于椭圆形,凝胶的综合指标值随着 ADA 和 EWP 添加量的增加呈先增大后降低的趋势。当 ADA 添加量为 6.09%,EWP 添加量为 5.02%时,虾糜凝胶的综合指标值最高。

如图 7 所示,SPI 和 TG 添加量的交互作用产生的 3D 模型图呈一个陡峭弧面,等高线图趋向于椭圆形,表

明 SPI 和 TG 添加量的交互作用对复合虾糜凝胶的综合指标值影响很大。这可能是因为加热时绝大多数蛋白质与蛋白质通过二硫键或疏水相互作用与肌球蛋白分子头部发生键合,从而形成致密的凝胶网络结构<sup>[32]</sup>。因此,当 SPI 添加量为 5.17%,TG 添加量为 0.49%时复合虾糜凝胶具有最好的质构特性,综合指标值最高。

2.2.4 验证实验 以物性综合指标值为响应值,得到的复合虾糜凝胶的最佳优化配比为:ADA 添加量 6.09%,

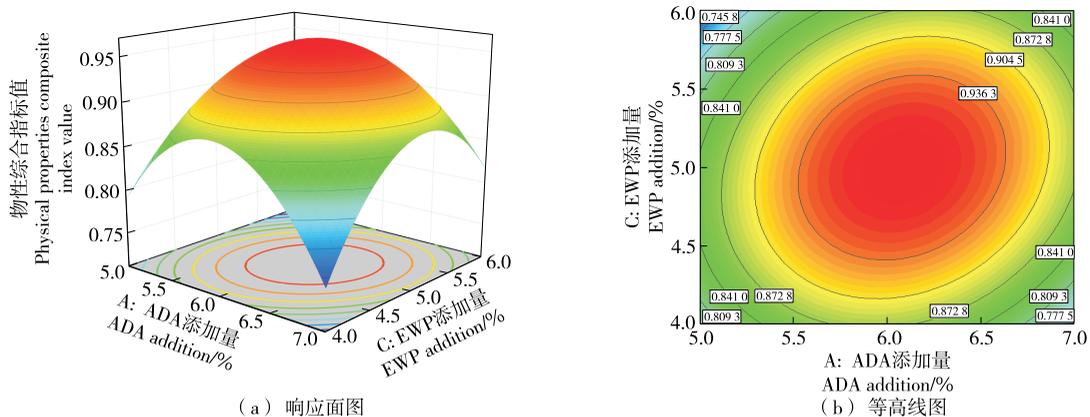


图 6 ADA 添加量与 EWP 添加量交互影响物性综合指标的响应曲面图和等高线图

Figure 6 The response surface plot and contour plot of the comprehensive index influenced by the addition of ADA and EWP and their interaction

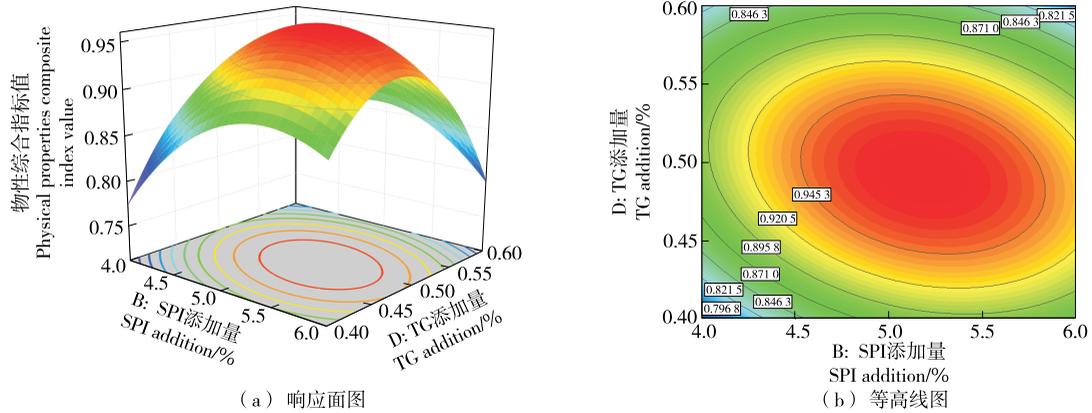


图 7 TG 添加量与 SPI 添加量交互影响综合指标的响应面图和等高线图

Figure 7 The response surface plot and contour plot of the comprehensive index influenced by the addition of TG and SPI and their interaction

SPI 添加量 5.17%，EWP 添加量 5.02%，TG 添加量 0.49%，结合实际生产以及通过回归模型验证：选取 ADA 添加量 6.00%，EWP 添加量 5.00%，SPI 添加量 5.00%，TG 添加量 0.50%，进行 8 次平行验证试验，测得结果中硬度平均值为 24.768 N，弹性平均值为 0.93，咀嚼度平均值为 1 901.98，综合指标为 0.96。与预测结果（硬度 25.487 N，弹性 0.92，咀嚼度 1 941.33，综合指标 0.97）接近，说明该模型较为准确。

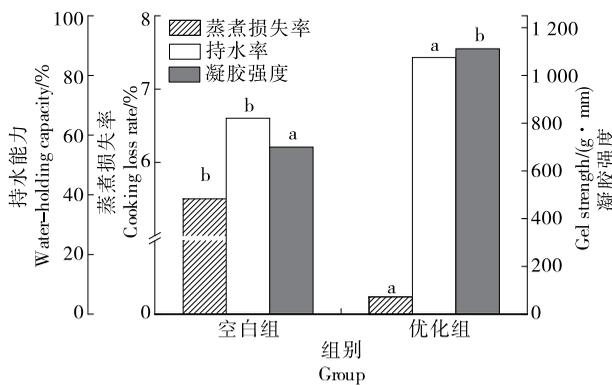
### 2.3 复合虾糜凝胶保水性和凝胶强度分析

如图 8 所示，与空白组相比，优化组的持水率升高了 30.96%，蒸煮损失率降低了 95.74% ( $P < 0.05$ )。同时，添加 5 种外源添加物的虾糜凝胶强度显著高于空白组 ( $P < 0.05$ )，与持水率的结果一致。Mi 等<sup>[33]</sup>证实 4% 的 SPI 和 0.4% 的 TG 结合增强了栉孔扇贝肌肉的凝胶性能。Luo

等<sup>[34]</sup>证明了持水率与凝胶强度有关。此外，Yang 等<sup>[35]</sup>认为持水率与蒸煮损失率呈负相关。5 种外源添加物同时加入对复合虾糜的凝胶性能有明显的增效作用。一般来说，凝胶网络结构较差导致失水较大，而凝胶网络结构越紧密则持水率越大。因此，外源添加物对复合虾糜持水率的影响与凝胶网络结构中水分分布的变化有一定关系。

### 2.4 复合虾糜凝胶的微观结构图

如图 9 所示，空白组放大 50 倍与 5 000 倍扫描电镜下观察的微观结构明显比优化组不规则，不致密；相比空白组，优化组网络结构的孔隙分布更为均一连续且平整。外源添加物的加入使凝胶具有相对光滑且连续的微观结构。ADA、EWP、KGM 和 SPI 在加热过程中吸收周围的水分子，填充在复合虾糜凝胶网络中，从而改善了虾糜凝胶的凝胶特性<sup>[14]</sup>。TG 通过促进蛋白质分子中非二硫共价键的形成，形成相对致密的微观结构，促进复合虾糜肌原纤维蛋白的结合<sup>[19]</sup>。



同一指标之间的小写字母不同表示添加外源添加物该指标数值存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

图 8 外源添加物对复合虾糜凝胶蒸煮损失率、持水率和凝胶强度的影响

Figure 8 Effects of exogenous additives on cooking loss rate, water holding rate and gel strength of compound minced shrimp gel

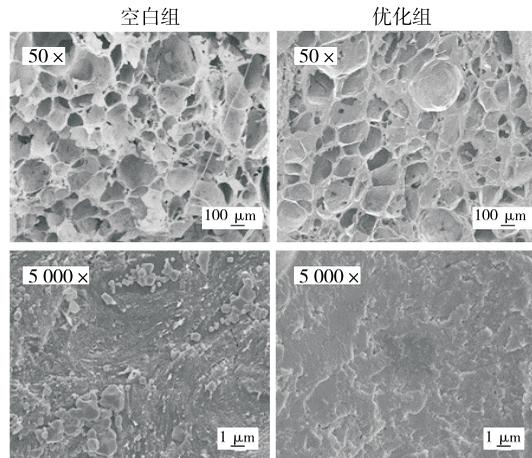


图 9 复合虾糜凝胶的微观结构图

Figure 9 Microstructure of compound minced shrimp gel

### 3 结论

通过单因素试验及响应面优化试验,对复合虾糜凝胶性能进行优化,建立了二次回归方程模型,模型较好地反映了蜡质玉米乙酰化双淀粉己二酸酯、大豆分离蛋白、蛋清粉和谷氨酰胺转氨酶与硬度、弹性及咀嚼度的关系。最终得到虾丸的最佳配方:以 100 g 复合虾糜的质量为基准,添加食盐 2.25%、复合磷酸盐 0.50%、蜡质玉米乙酰化双淀粉己二酸酯 6.00%、蛋清粉 5.00%、大豆分离蛋白 5.00%、谷氨酰胺转氨酶 0.50%、魔芋胶 0.20%。经优化后的复合虾糜凝胶具有较高的持水率、凝胶强度且蒸煮损失率较低,结构均匀且致密,凝胶性能好。该产品解决了虾丸热加工后口感粗糙,品质劣化,不易被消费者接受等问题,且制作方法简便,改良了虾糜的凝胶性能,具有一定的开发价值。后续还需对外源添加物的相互作用机制进行深入探索,并在此基础上开展营养健康型虾丸的研发设计。

#### 参考文献

- [1] 赵昕源, 欧阳杰, 马田田, 等. 南极磷虾体内主要营养活性物质在热处理过程中的流向[J]. 水产学报, 2021, 45(7): 1 172-1 180.  
ZHAO X Y, OUYANG J, MA T T, et al. Flow direction of main substances in Antarctic krill (*Euphausia superba*) heat treatment[J]. Journal of Fisheries of China, 2021, 45(7): 1 172-1 180.
- [2] DEVI V, SOPHIE B, SO K, et al. Overwinter sea-ice characteristics important for Antarctic krill recruitment in the southwest Atlantic [J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107934.
- [3] YUAN Y, LIU X, MIAO J, et al. Chitin from Antarctic krill shell: Eco-preparation, detection, and characterization [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 4 125-4 137.
- [4] 刘小芳, 刘建志, 唐一新, 等. 南极磷虾油改善虾青素生物利用度的研究[J]. 中国食品学报, 2021, 21(7): 141-148.  
LIU X F, LIU J Z, TANG Y X, et al. Studies on the improvement of astaxanthin bioavailability by Antarctic Krill oil [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021, 21(7): 141-148.
- [5] ZHENG H, BEAMER S K, MATAK K E, et al. Effect of kappa-carrageenan on gelation and gel characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) protein isolated with isoelectric solubilization/precipitation[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 644-652.
- [6] 田利利, 薛长湖, 尹利昂, 等. 复合南极磷虾糜中鱼糜配比量及外源添加剂对其凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(17): 16-21, 31.  
TIAN L L, XUE C H, YIN L A, et al. Effects of surimi ratio and exogenous additives on gel properties of compound krill surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(17): 16-21, 31.
- [7] 许刚, 丁浩宸, 张燕平, 等. 畜禽肉和鱼肉对南极磷虾凝胶制品挥发性风味成分的影响[J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(5): 132-139.  
XU G, DING H C, ZHANG Y P, et al. Effects of meat and fish on volatile flavor components of krill gel products [J]. Food and Fermentation Industry, 2016, 42(5): 132-139.
- [8] ZHANG B, GUO X, LIN J X, et al. Effect and synergy of different exogenous additives on gel properties of the mixed shrimp surimi (Antarctic krill and white shrimp)[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(8): 5 338-5 348.
- [9] JIA B, CHEN J, YANG G, et al. Improvement of solubility, gelation and emulsifying properties of myofibrillar protein from mantis shrimp (*Oratosquilla oratoria*) by phosphorylation modification under low ionic strength of KCl [J]. Food Chemistry, 2022, 403: 134497.
- [10] LI S, LIN S, JIANG P, et al. Insight into the gel properties of antarctic krill and pacific white shrimp surimi gels and the feasibility of polysaccharides as texture enhancers of antarctic krill surimi gels[J]. Foods, 2022, 11(16): 2 517.
- [11] 刘莹, 姜鹏飞, 傅宝尚, 等. 不同蛋白粉对南极磷虾混合虾糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 44(1): 88-96.  
LIU Y, JIANG P F, FU B S, et al. Effects of different protein powders on gel properties of mixed prawn surimi of krill [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 44(1): 88-96.
- [12] 孙乐常, 周典颖, 杜瀚, 等. 魔芋胶对南美白对虾肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(12): 42-50.  
SUN L C, ZHOU D Y, DU H, et al. Effect of konjac glucomannan on gelling properties of myofibrillar protein from the pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Science, 2022, 43(12): 42-50.
- [13] LIU Z, YUAN Y, QIN Y, et al. Sweet potato starch addition together with partial substitution of tilapia flesh effectively improved the golden pompano (*Trachinotus blochii*) surimi quality[J]. Journal Texture Studies, 2021, 52(2): 197-206.
- [14] SINGH A, BENJAKUL S. Effect of serine protease inhibitor from squid ovary on gel properties of surimi from Indian mackerel[J]. J Texture Stud, 2017, 48(6): 541-549.
- [15] LIU J, FANG C, LUO Y, et al. Effects of konjac oligo-glucomannan on the physicochemical properties of frozen surimi from red gurnard (*Aspitrigla cuculus*) [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 668-673.
- [16] RAN M, CHEN C, LI C, et al. Effects of replacing fat with Perilla seed on the characteristics of meatballs[J]. Meat Science, 2020, 161: 107995.
- [17] 侯宇. 蛋干生产工艺优化研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015: 12-14.  
HOU Y. Optimization of production process of egg dry [D]. Changchun: Jilin University, 2015: 12-14.
- [18] YANG N, FAN X, YU W, et al. Effects of microbial transglutaminase on gel formation of frozen-stored longtail southern cod (*Patagonotothen ramsayi*) mince [J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 128: 109444.
- [19] LIANG F, LIN L, HE T, et al. Effect of transglutaminase on gel

- properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 98: 105261.
- [20] ZHANG W, CHENG S, WANG S, et al. Effect of pre-frying on distribution of protons and physicochemical qualities of mackerel [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2021, 101(11): 4 838-4 846.
- [21] CAKIR E, DAUBERT C R, DRAKE M A, et al. The effect of microstructure on the sensory perception and textural characteristics of whey protein/ $\kappa$ -carrageenan mixed gels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 26(1): 33-43.
- [22] GARCIA E, TOTOSAUS A. Low-fat sodium-reduced sausages: Effect of the interaction between locust bean gum, potato starch and  $\kappa$ -carrageenan by a mixture design approach[J]. *Meat Science*, 2008, 78(4): 406-413.
- [23] SUN F, HUANG Q, HU T, et al. Effects and mechanism of modified starches on the gel properties of myofibrillar protein from grass carp [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2014, 64: 17-24.
- [24] HUNT A, PARK J W, HANDA A. Effect of various types of egg white on characteristics and gelation of fish myofibrillar proteins [J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(9): C683-C692.
- [25] 张一鸣, 李思仪, 沈晓溪, 等. 外源添加剂对鲢鱼-鳙鱼复合鱼糜凝胶性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 197-203. ZHANG Y M, LI S Y, SHEN X X, et al. Effect of exogenous additives on gel characteristics of silverfish-cod fish mixture[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 197-203.
- [26] FLYNN T D O, HOGAN S A, DALY D F M, et al. Rheological and solubility properties of soy protein isolate[J]. *Molecules*, 2021, 26(10): 3 015.
- [27] 陈瑜, 张小军, 丁国芳, 等. 外源添加剂对日本黄姑鱼鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 149-153. CHEN Y, ZHANG X J, DING G F, et al. Effect of exogenous additives on gel properties of *Nibea japonica* surimi products[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(12): 149-153.
- [28] LI Y, DAMODARAN S. In vitro digestibility and IgE reactivity of enzymatically cross-linked heterologous protein polymers[J]. *Food Chemistry*, 2017, 221: 1 151-1 157.
- [29] 于楠楠, 王卫东, 陈学红, 等. TG 酶对高温杀菌鱼糜凝胶特性影响[J]. *食品工业*, 2020, 41(4): 98-101. YU N N, WANG W D, CHEN X H, et al. Effects of glutamine transaminase on gel properties of high temperature sterilization surimi[J]. *The Food Industry*, 2020, 41(4): 98-101.
- [30] JIANG Y, REDDY C K, HUANG K, et al. Hydrocolloidal properties of flaxseed gum/konjac glucomannan compound gel[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 133: 1 156-1 163.
- [31] PETCHARAT T, BENJAKUL S. Effect of gellan incorporation on gel properties of bigeye snapper surimi[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 77: 746-753.
- [32] WANG Z, LIANG J, JIANG L, et al. Effect of the interaction between myofibrillar protein and heat-induced soy protein isolates on gel properties [J]. *CYTA: Journal of Food*, 2015, 13(4): 527-534.
- [33] MI H, ZHAO Y, LI Y, et al. Combining effect of soybean protein isolate and transglutaminase on the gel properties of zhikong scallop (*Chlamys farreri*) adductor muscle[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 138: 110727.
- [34] LUO H, GUO C, LIN L, et al. Combined use of rheology, LF-NMR, and MRI for characterizing the gel properties of hairtail surimi with potato starch[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2020, 13(1): 637-647.
- [35] YANG S, TU Z C, WANG H, et al. Effects of coagulant promoter on the physical properties and microstructure of the mixed system of ultrafine fishbone and surimi [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109792.
- 
- (上接第 185 页)
- [20] 陈鹏泉, 刘磊, 陈楠, 等. 不同干燥预处理下储藏条件对花生品质变化影响研究[J]. *花生学报*, 2022, 51(1): 30-41. CHENG P X, LIU L, CHEN N, et al. Study on effect of storage conditions on peanut quality under different dry pretreatment[J]. *Journal of Peanut Science*, 2022, 51(1): 30-41.
- [21] 秦朗. 含 DHA 的花生蛋白酸奶稳定性的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019: 9-11. QIN L. Study on stability of peanut protein yogurt containing DHA[D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019: 9-11.
- [22] BECKER W M, JAPPE U. Peanut allergens [J]. *Chemical Immunology & Allergy*, 2014, 100: 256-267.
- [23] KOPPELMAN S J, VLOOSWIJK R A A, KNIPPELSNIPPELS L M J, et al. Quantification of major peanut allergens Ara h 1 and Ara h 2 in the peanut varieties Runner, Spanish, Virginia, and Valencia, bred indifferent parts of the world[J]. *Allergy*, 2015, 56(2): 132-137.
- [24] 史云凤, 张彤, 陈沁. 花生过敏原 Ara h 1 蛋白的原核表达及致敏性分析[J]. *食品科学*, 2019, 40(6): 121-127. SHI Y F, ZHANG T, CHEN Q. Prokaryotic expression of peanut allergen Ara h 1 and its allergenicity[J]. *Food Science*, 2019, 40(6): 121-127.
- [25] 朱广成, 覃思, 聂乾忠. 椴子果提取物对酸奶发酵特性和功能特性的影响[J]. *食品与机械*, 2020, 36(4): 176-182. ZHU G C, QIN S, NIE Q Z. Effect of *Gardenia fruit* extract on fermentation and functional properties of yogurt [J]. *Food & Machinery*, 2020, 36(4): 176-182.
- [26] 魏秋红, 赵美琳. 芹菜花生酸奶的研制[J]. *中国酿造*, 2011(9): 192-194. WEI Q H, ZHAO M L. Preparation of celery-peanut yoghurt[J]. *China Brewing*, 2011(9): 192-194.