

# 南美白对虾与南极磷虾复合虾糜的凝胶特性

张彪<sup>1</sup>, 李冬梅<sup>1,2\*</sup>, 郭璇<sup>1</sup>, 徐薇<sup>1</sup>, 张玉莹<sup>1,2</sup>, 林峻鑫<sup>1</sup>, 孙培梓<sup>1</sup>, 于波<sup>3</sup>

(1. 大连工业大学食品学院, 辽宁大连 116034) (2. 国家海洋食品工程技术研究中心, 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) (3. 辽渔集团有限公司, 辽宁大连 116000)

**摘要:** 为了改善南极磷虾虾糜的品质, 该研究以南美白对虾与南极磷虾为原料, 按照不同质量比例 (0:1、1:1、3:2、7:3、4:1) 进行混合, 研究了南美白对虾与南极磷虾不同比例对复合虾糜凝胶质构、持水率、蒸煮损失、色泽、流变性能和微观结构的影响。结果表明: 纯南极磷虾虾糜形成凝胶能力差, 南美白对虾与南极磷虾比例从 1:1 到 4:1, 复合虾糜的硬度、凝胶强度和持水率分别增加了 18.28%、168.64% 和 5.55%, 储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ ) 显著提高; 白度值和蒸煮损失分别降低了 4.92% 和 22.81%。扫描电镜结果显示, 随着南美白对虾比例的提高, 复合虾糜凝胶的孔洞逐渐均匀, 致密。南美白对虾与南极磷虾以 3:2 的比例混合所得复合虾糜, 其凝胶性能最好。研究结果为南极磷虾虾糜制品的开发提供理论支撑。

**关键词:** 南极磷虾; 南美白对虾; 虾糜; 凝胶特性; 流变学特性

文章编号: 1673-9078(2022)07-232-239

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.7.1070

## The Gel Properties of White Shrimp and Antarctic Krill Mixed Shrimp Surimi

ZHANG Biao<sup>1</sup>, LI Dongmei<sup>1,2\*</sup>, GUO Xuan<sup>1</sup>, XU Wei<sup>1</sup>, ZHANG Yuying<sup>1,2</sup>, LIN Junxin<sup>1</sup>, SUN Peizi<sup>1</sup>, YU Bo<sup>3</sup>

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

(2.National Engineering Research Center of Seafood, Collaborative Innovation Center of Seafood Deep Processing, Dalian 116034, China) (3.Liaoyu Group Co. Ltd., Dalian 116000, China)

**Abstract:** In order to improve the quality of Antarctic krill shrimp surimi, in this research, white shrimp and Antarctic krill were used as raw materials and mixed in different mass ratios (0:1, 1:1, 3:2, 7:3, 4:1). The effects of different ratios of white shrimp and Antarctic krill on the texture, water holding capacity, cooking loss, color, rheological properties and microstructure of the composite shrimp surimi gel were studied. The results showed that white shrimp and Antarctic krill ratio from 1:1 to 4:1, the hardness, gel strength and water holding capacity were increased by 18.28%, 168.64% and 5.55%, respectively, and the storage modulus ( $G'$ ) and loss modulus ( $G''$ ) were significantly increased. The whiteness and cooking loss were reduced by 4.92% and 22.81%, respectively. Scanning electron microscope results showed that with the increase in the proportion of white shrimp, the pores of the mixed shrimp surimi gel became uniform and compact. The gel properties of the mixed shrimp surimi prepared by mixing white shrimp and Antarctic krill at the ratio of 3:2 were improved. The present research provided theoretical support for the development of Antarctic krill shrimp surimi products.

**Key words:** Antarctic krill; white shrimp; shrimp surimi; gel properties; rheological properties

引文格式:

张彪,李冬梅,郭璇,等.南美白对虾与南极磷虾复合虾糜的凝胶特性[J].现代食品科技,2022,38(7):232-239,+344

ZHANG Biao, LI Dongmei, GUO Xuan, et al. The gel properties of white shrimp and antarctic krill mixed shrimp surimi [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(7): 232-239, +344

南极磷虾 (*Euphausia superba*) 资源丰富, 是地

收稿日期: 2021-09-24

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFD0400504)

作者简介: 张彪(1995-), 男, 硕士, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1240425582@qq.com

通讯作者: 李冬梅(1977-), 女, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向: 海洋资源开发与利用, E-mail: 426417898@qq.com

球上资源量最大的单种生物之一, 年生物量达到  $6.5 \times 10^8 \sim 10 \times 10^8$  t, 生物学年捕捞量约  $1 \times 10^8$  t<sup>[1,2]</sup>。它含有十分丰富的蛋白质, 能为人体提供 8 种必需氨基酸, 是人类理想的营养食物, 也是一个潜在动物性蛋白资源库<sup>[3]</sup>。因此, 南极磷虾成为世界各国竞争开发的战略资源之一。

我国从 2009 年开始对南极磷虾进行探捕, 到 2020

年,年捕捞量已经超过了  $1 \times 10^5$  t<sup>[4]</sup>。随之相关的研究逐渐增多,如研究制备高 F 值南极磷虾寡肽<sup>[5]</sup>、磷虾油的活性<sup>[6]</sup>、磷虾油品质提升<sup>[7]</sup>、氟含量的分布及其检测方法<sup>[8]</sup>等。产品形式也逐渐丰富,包括南极磷虾油、磷虾干、磷虾粉、磷虾肠等。由于南极磷虾壳、头中氟含量较高,目前捕捞公司在船上将南极磷虾捕捞后,对其进行快速去壳去头处理,从而直接获得低氟含量的南极磷虾肉,对其进行充分利用对于提升南极磷虾产业效益具有重要意义。

鱼糜类制品开发的成功为南极磷虾肉的开发提供了借鉴,但由于南极磷虾组成成分的特殊性,其肌原纤维含量只占冻藏后蛋白质的 20%左右,以及具有南极磷虾自溶酶,导致其凝胶性能较差,不能单独用于普通虾糜制品的生产<sup>[9-11]</sup>。许刚<sup>[12]</sup>将三种畜禽肉(鸡肉、猪肉、牛肉)和两种鱼肉(鳙鱼和白姑鱼)与南极磷虾混合,以改善复合南极磷虾虾糜的质构、凝胶强度和持水率,如何改善其凝胶特性并开发出高端的南极磷虾虾糜类制品,具有重要的研究价值。

南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*),又称凡纳滨对虾,是世界上产量最高的三大优良养殖虾种之一<sup>[13]</sup>。它含有极其丰富的蛋白质、纤维素、矿物质及多种人体所需的氨基酸,营养价值很高,具有肉质鲜美、出肉率高的特点,深受消费者的青睐<sup>[14]</sup>。Yang 等<sup>[15]</sup>对比了南美白对虾虾糜和阿拉斯加鳕鱼鱼糜的热诱导凝胶化,结果表明虾糜凝胶比鱼糜凝胶具有更好的硬度和弹性以及更高的交联水平和更稳定的结构。因此,本研究将南美白对虾与南极磷虾混合制作复合虾糜,旨在为开发具有良好品质的南极磷虾虾糜制品提供理论基础。

## 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;冷冻南美白对虾虾仁,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;复合磷酸盐,河南万邦实业有限公司。

戊二醛、乙醇(分析纯),北京宝希迪科技有限公司。

### 1.2 仪器与设备

SD-JR57 型绞肉机,三的电器制造有限公司;UltraScan PRO 测色仪,美国 Hunter Lab 公司;L550 型离心机,湖南湘仪实验仪器开发有限公司;HH-4 型数显恒温水浴锅,常州智博瑞仪器制造有限公司;

Stable Micro Systems TA.XT.plus 型质构仪,英国 SMS 公司;Discovery HR-1 旋转流变仪,美国 TA 仪器有限公司;JJ200 型电子天平,常熟市双杰测试仪器厂;Coolsafe 110-4 冷冻干燥机,丹麦 Labogene 公司;JSM-7800F 扫描电镜仪,日本东京电子株式会社。

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 复合虾糜凝胶样品的制备

将冷冻南美白对虾虾仁与南极磷虾肉分别在 4 °C 下解冻 12 h 后,在前期预实验以及更多利用南极磷虾的原则,以不同质量比(0:10、5:5、6:4、7:3、8:2 即 0:1、1:1、3:2、7:3、4:1)混合,斩拌 5 min,加入质量分数为 2.25% 的食盐和 0.5% 的复合磷酸盐斩拌 5 min,斩拌期间不断加入冰水,最终使复合虾糜的水分质量分数保持在 80%。将复合虾糜装入 PC 管( $\phi 30$  mm $\times$ 30 mm)中,排气密封,采用两段式加热方法。根据蓝尉冰<sup>[16]</sup>的研究方法和前期预实验结果,加热条件设定为:40 °C 水浴加热 1 h,90 °C 水浴加热 30 min。在冰水中冷却 20 min 后,于 4 °C 下冷藏过夜,备用。

#### 1.3.2 复合虾糜凝胶质构的测定

将复合虾糜凝胶样品于室温下平衡 2 h,参考 Yang 等<sup>[15]</sup>方法并稍作修改。将样品切成直径为 25 mm、高度为 30 mm 的圆柱体,利用质构仪测定。每组样品至少测定 6 个平行。参数设定:探头为 P/50,测试前速率为 3 mm/s,测试中速率为 1 mm/s,测试后速率为 2 mm/s,应变为 30%,触发力为 5 g。

#### 1.3.3 复合虾糜凝胶强度的测定

将复合虾糜凝胶样品于室温下平衡 2 h,参考 Liang 等<sup>[17]</sup>方法并稍作修改。将样品切成直径为 25 mm、高度为 30 mm 的圆柱体,使用质构仪进行测定,每组样品至少测定 6 个平行。参数设定:选择球形探头 P/5 s,测试前速率为 1 mm/s,测试中速率为 1 mm/s,测试后速率为 10 mm/s,穿透比为 50%,触发力为 5 g。

#### 1.3.4 复合虾糜凝胶保水性的测定

##### 1.3.4.1 复合虾糜凝胶蒸煮损失率的测定

参考 Yang 等<sup>[18]</sup>方法并稍作修改。擦干复合虾糜样品蒸煮前后表面的水分并进行称重,每组样品测定 3 个平行。蒸煮损失率按照公式(1)计算:

$$\text{蒸煮损失率}/\% = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$M_1$ —虾糜样品的原始重量, g;

$M_2$ —虾糜样品蒸煮后的重量, g。

##### 1.3.4.2 复合虾糜凝胶持水率的测定

参考 Yang 等<sup>[18]</sup>方法并稍作修改。将复合虾糜凝胶样品切成厚 2 mm 左右的薄片, 称取样品质量 ( $W_1$ ), 用滤纸包裹, 4000 r/min 离心 20 min, 离心结束后称重 ( $W_2$ )。每组样品测定 3 个平行。持水率按照公式 (2) 计算:

$$\text{持水率} / \% = \left( 1 - \frac{W_1 - W_2}{W_1} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$W_1$ —复合虾糜凝胶的原始质量, g;

$W_2$ —复合虾糜凝胶离心后的质量, g。

### 1.3.5 复合虾糜凝胶色泽的测定

将复合虾糜凝胶样品于室温下平衡 2 h, 参考 Yang 等<sup>[18]</sup>方法, 使用测色仪测定样品的  $L^*$  值 (透明度),  $a^*$  值 ( $+a^*$  表示样品的红度,  $-a^*$  表示样品的绿度) 和  $b^*$  值 ( $+b^*$  表示样品的黄度,  $-b^*$  表示样品的蓝度), 测定前用标准白板对测色仪进行校正。每组样品测定 3 个平行。白度值按式 (3) 计算:

$$\text{白度值} = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad (3)$$

### 1.3.6 复合虾糜动态流变学特性的测定

参照 Yang 等<sup>[15]</sup>的方法并稍作修改, 使用流变仪进行测定。采用 40 mm 平板测试, 将待测样品均匀涂布于测试平台, 测定升温过程中储能模量 ( $G'$ )、损耗模量 ( $G''$ ) 的变化。每组样品测定 3 个平行。参数设定: 采用温度扫描模式, 振荡频率 0.1 Hz, 应变 1.0%, 平行板的间距 1 mm, 升温扫描范围 20~90 °C, 升温速率 5.0 °C/min。

### 1.3.7 复合虾糜凝胶微观结构分析

参考 Zhang 等<sup>[19]</sup>方法。将复合虾糜凝胶样品切成 2~3 mm 厚的小块, 经 2.5% 戊二醛 (电镜专用) 4 °C 固定过夜, 用 0.1 mol/L、pH 7.0 的磷酸缓冲液漂洗 3 次, 每次 15 min; 再依次用 30%、50%、70%、90% 和 100% ( $V/V$ ) 的乙醇进行脱水, 脱水时间均为 20 min。冷冻干燥, 喷金后, 用扫描电子显微镜 (scanning electron microscope, SEM) 观察复合虾糜凝胶的微观结构。

## 1.4 数据处理

实验数据处理使用 IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析, 结果以平均值±标准差 ( $\bar{x} \pm s$ ) 表示, 使用 origin9.0 软件进行作图, 显著性分析采用 Duncan 检验。

## 2 结果与讨论

### 2.1 复合虾糜凝胶的外观结构

利用南美白对虾改善南极磷虾虾糜凝胶的性能,

当南美白对虾与南极磷虾的比例从 0:1 逐步提升为 1:1、3:2、7:3:直到 4:1 时, 其加热后的样品外观如图 1 所示。不同比例南美白对虾与南极磷虾的复合虾糜加热后呈现出较为明显的差异。纯南极磷虾虾糜加热后, 直径明显小于复合虾糜凝胶的直径, 体积缩小, 质量变轻。随着南美白对虾与南极磷虾的比例由 0:1 提高到 4:1, 复合虾糜凝胶更为紧实, 蒸煮损失明显减小。说明南美白对虾的加入, 对南极磷虾虾糜凝胶的改善从外观上已看出。

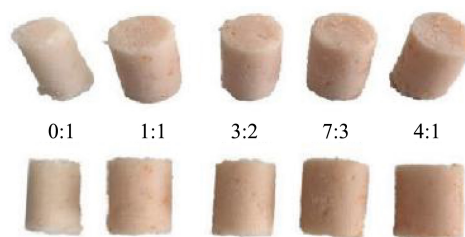


图 1 不同比例南美白对虾与南极磷虾的复合虾糜凝胶的外观结构

Fig.1 The appearance and structure of mixed shrimp surimi gel with different proportions of white shrimp and Antarctic krill

注: 图中上下两层分别表示从上方和正前方观察复合虾糜凝胶的外观结构; 比例为复合虾糜中南美白对虾与南极磷虾的质量比。

### 2.2 复合虾糜凝胶的蒸煮损失和持水率

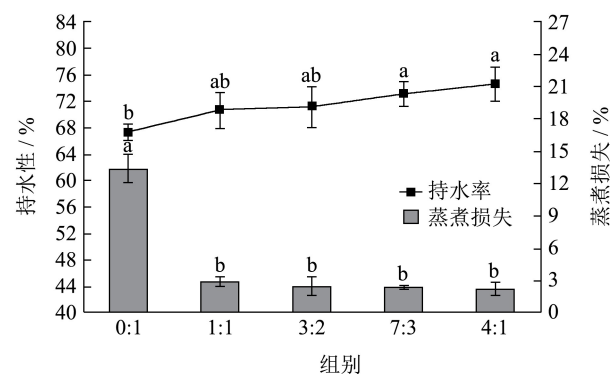


图 2 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶蒸煮损失和持水率的影响

Fig.2 Effect of different proportions of white shrimp gel and Antarctic krill on the cook loss and water holding capacity of mixed shrimp surimi gel

注: 同一指标之间的小写字母表示不同比例南美白对虾与南极磷虾该指标数值存在显著性差异 ( $p < 0.05$ ), 下同。

蒸煮损失可以显示肉糜制品熟化过程中的汁液减少状况, 侧面反映肉糜制品凝胶特性。肉类保水的经典假设是基于静电力或渗透力, 也可以通过水和蛋白质相互作用进行解释<sup>[20]</sup>。由图 2 可知, 纯南极磷虾虾糜蒸煮损失最大, 为 13.25%, 随着南美白对虾比例的

提高,复合虾糜的蒸煮损失无显著性变化 ( $p>0.05$ ),可能因为尽管加入了不同比例的南美白对虾,但尚未影响复合虾糜蛋白质与水之间的结合,而纯南极磷虾糜的蒸煮损失较大,说明南极磷虾自身蛋白对水分的结合能力较差,这可能与南极磷虾蛋白自身肌原纤维蛋白含量较低有关<sup>[9]</sup>。

持水率是影响肉糜制品品质的一个重要指标。一般而言,持水率越高,表明蛋白与水的交联能力越强,肉糜凝胶能够形成的三维网络结构就越均匀、致密,尤其是肉糜凝胶制品的弹性与口感就会更好<sup>[21]</sup>。不同比例南美白对虾与南极磷虾的复合虾糜制品持水率如图 2 所示。纯南极磷虾糜在热诱导过程中凝胶蒸煮损失较大,内部水分少,持水率较低。当南美白对虾与南极磷虾复合比例大于 3:2 时,持水率与纯南极磷虾糜的持水率存在显著性差异 ( $p<0.05$ )。复合虾糜的持水率随着南美白对虾比例的提高呈现逐渐升高的趋势,当南美白对虾与南极磷虾复合比例为 4:1 时持水率最大,为 74.6%,四组复合虾糜的差异不显著 ( $p>0.05$ ),这可能是因为外源南美白对虾的加入,使凝胶网络结构更加均匀、规则,使得复合虾糜束缚水的能力更强,持水率更高<sup>[22]</sup>。这与许刚<sup>[12]</sup>发现将畜禽肉和南极磷虾以 3:7 的比例混合可以提高复合肉糜的持水率具有一致性。

### 2.3 复合虾糜凝胶的色泽

色泽是评价肉糜质量的一个重要指标,通常认为优质的虾糜具有高亮度、低红度,感官色泽以粉白色为佳<sup>[23]</sup>,粉白色的虾糜产品更受消费者的喜爱。如表 1

表 2 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶质构的影响

Table 2 Effect of different proportions of white shrimp and Antarctic krill on the texture of properties mixed shrimp surimi gel

比例	硬度/g	弹性	粘聚性	胶着度	咀嚼度	回复性
0:1	2043.23±36.25 <sup>a</sup>	0.82±0.05 <sup>a</sup>	0.46±0.01 <sup>b</sup>	924.03±31.72 <sup>a</sup>	751.47±16.48 <sup>a</sup>	0.19±0.01 <sup>b</sup>
1:1	1096.88±102.12 <sup>d</sup>	0.80±0.01 <sup>a</sup>	0.61±0.23 <sup>a</sup>	652.09±194.17 <sup>ab</sup>	530.07±159.67 <sup>ab</sup>	0.27±0.12 <sup>a</sup>
3:2	1112.79±14.29 <sup>cd</sup>	0.80±0.11 <sup>a</sup>	0.50±0.12 <sup>b</sup>	551.38±141.07 <sup>c</sup>	444.66±167.96 <sup>c</sup>	0.24±0.09 <sup>b</sup>
7:3	1173.39±76.72 <sup>c</sup>	0.82±0.02 <sup>a</sup>	0.47±0.02 <sup>b</sup>	580.04±47.19 <sup>c</sup>	452.42±36.31 <sup>bc</sup>	0.23±0.02 <sup>b</sup>
4:1	1342.29±56.14 <sup>b</sup>	0.83±0.05 <sup>a</sup>	0.51±0.05 <sup>b</sup>	678.01±89.51 <sup>bc</sup>	561.02±103.53 <sup>abc</sup>	0.22±0.03 <sup>b</sup>

质地剖面分析 (texture profile analysis, TPA) 测试可以很好地模仿舌头和牙齿对凝胶的作用,质构特性能直观体现出肉糜的感官品质,是评价肉糜制品质量的重要指标之一<sup>[24]</sup>。如表 2 所示,复合虾糜凝胶与纯南极磷虾糜凝胶在硬度、弹性、粘聚性、胶着度、咀嚼性和回复性存在一定差异。纯南极磷虾糜凝胶的硬度远高于复合磷虾糜凝胶,主要是纯南极磷虾糜在热诱导过程中容易造成板结,从而使硬度急速增加。与之对应的,其胶着度和咀嚼度也高于复合虾糜

所示,复合虾糜与纯南极磷虾糜在色泽上存在显著性差异 ( $p<0.05$ ),随着南美白对虾比例的提高, $L^*$ 值、 $a^*$ 值、 $b^*$ 值以及白度值呈现逐渐降低的趋势。当南美白对虾与南极磷虾比例超过 3:2 时, $a^*$ 值和白度值变化不显著 ( $p>0.05$ ), $L^*$ 值和  $b^*$ 值存在显著性差异 ( $p<0.05$ )。许刚<sup>[12]</sup>将畜禽肉和鱼肉与南极磷虾混合后发现畜禽肉和鲷鱼会明显降低复合肉糜的亮度和白度,而白姑鱼对复合肉糜的白度影响不大;袁莉莉<sup>[23]</sup>将鱼肉和虾肉以 1:1 的比例混合后发现添加鱼肉不会对复合虾糜色泽产生显著影响 ( $p>0.05$ )。由表 1 并结合图 1 感官可知,随着南美白对虾比例的提高,复合虾糜的颜色由白变粉,在南美白对虾与南极磷虾比例为 3:2 时,复合虾糜颜色呈现均匀的粉白色泽,色泽最好。

表 1 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶色泽的影响

Table 1 Effect of different proportions of white shrimp and Antarctic krill on the chromatic value of mixed shrimp surimi gel

比例	$L^*$	$a^*$	$b^*$	白度值
0:1	81.56±1.18 <sup>a</sup>	5.94±0.07 <sup>a</sup>	7.36±0.42 <sup>a</sup>	79.26±0.91 <sup>a</sup>
1:1	75.70±0.04 <sup>b</sup>	5.75±0.80 <sup>a</sup>	5.37±1.40 <sup>b</sup>	74.43±0.48 <sup>b</sup>
3:2	74.94±0.67 <sup>b</sup>	4.58±0.99 <sup>ab</sup>	3.05±0.94 <sup>c</sup>	74.32±0.77 <sup>b</sup>
7:3	72.05±1.83 <sup>c</sup>	4.23±0.43 <sup>b</sup>	3.16±0.15 <sup>c</sup>	71.55±1.75 <sup>c</sup>
4:1	71.09±0.43 <sup>d</sup>	4.04±1.04 <sup>b</sup>	1.15±0.77 <sup>d</sup>	70.77±0.55 <sup>c</sup>

注:表中同列右肩不同的小写字母表示不同比例南美白对虾与南极磷虾的该指标数值存在显著性差异 ( $p<0.05$ ),下同。

### 2.4 复合虾糜凝胶的质构特性

凝胶。而弹性、粘聚性、回复性则与复合虾糜凝胶具有一定差异,但相差不大。

在复合虾糜凝胶中,随着南美白对虾比例的提高,硬度和弹性呈现逐渐升高的趋势,说明四组复合虾糜凝胶的硬度和弹性与南美白对虾的含量呈正比;复合虾糜凝胶的粘聚性、胶着度和咀嚼性呈现出先升高后降低再升高的趋势,粘聚性在南美白对虾与南极磷虾的比例为 1:1 时,出现最大值 0.61,胶着度和咀嚼度在 4:1 时出现最大值 678.01 和 561.02;回复性呈现逐

渐降低的趋势，且都大于纯南极磷虾虾糜。LI 等<sup>[25]</sup>将猪肉与鱼肉混合，随着猪肉比例的提高，复合肉糜的硬度逐渐升高，弹性、胶着度和咀嚼性先升高后降低，粘聚性先降低后升高。研究结果说明，南美白对虾的加入可以在一定程度上改善复合虾糜的质构特性。

### 2.5 复合虾糜凝胶的凝胶强度

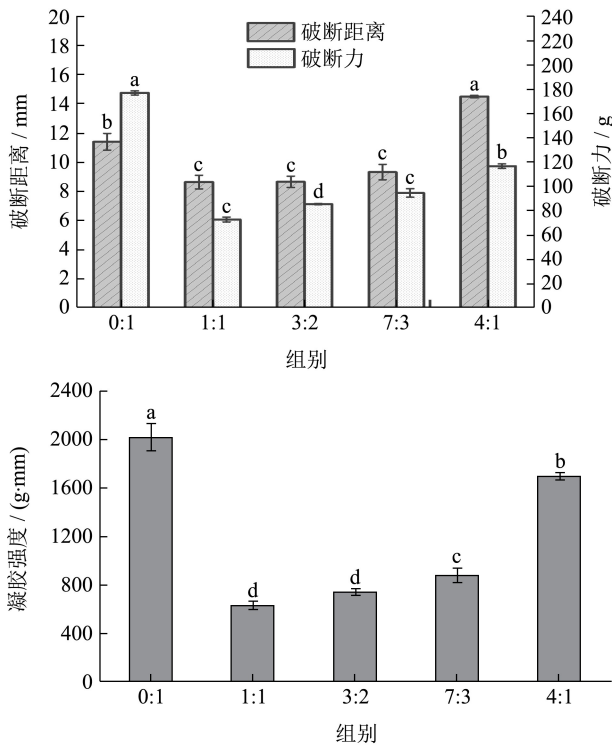


图3 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶强度的影响

Fig.3 Effect of different proportions of white shrimp and Antarctic krill on the gel strength of mixed shrimp surimi gel

凝胶强度是评价肉糜制品品质的一项重要指标。凝胶强度是指凝胶样品在崩裂或断裂时，单位面积所受到的力，能够直观地反映出凝胶样品内部结构的坚实程度。一般而言，凝胶强度越高，表示肉糜的品质越好；破断距离能够表征凝胶样品的弹性，破断距离越大，表示凝胶样品的弹性越大；破断力能够表征凝胶样品的硬度，破断力越大，表示凝胶样品的硬度越高<sup>[26]</sup>。图3显示了不同比例的南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶强度的影响。在南美白对虾与南极磷虾比例为1:1时，复合虾糜凝胶的破断距离、破断力和凝胶强度均最低，分别为8.64 mm、72.95 g和629.9 g·mm，随着南美白对虾比例的提高，复合虾糜凝胶的破断力和凝胶强度均显著增加 ( $p<0.05$ )，这与田利利等<sup>[27]</sup>将鱼糜与南极磷虾混合结果一致，随着鱼糜比例的提高复合南极磷虾虾糜的凝胶强度显著提高

( $p<0.05$ )。纯南极磷虾虾糜凝胶强度高不是因为其凝胶特性好，其本身无法形成凝胶，本文利用PC管使纯南极磷虾虾糜成型，由于南极磷虾加热后出现板结使纯南极磷虾虾糜硬度极大，导致纯南极磷虾虾糜破断力和破断距离显著增加 ( $p<0.05$ )，这与质构测试的结果一致。

### 2.6 复合虾糜的动态流变学特性

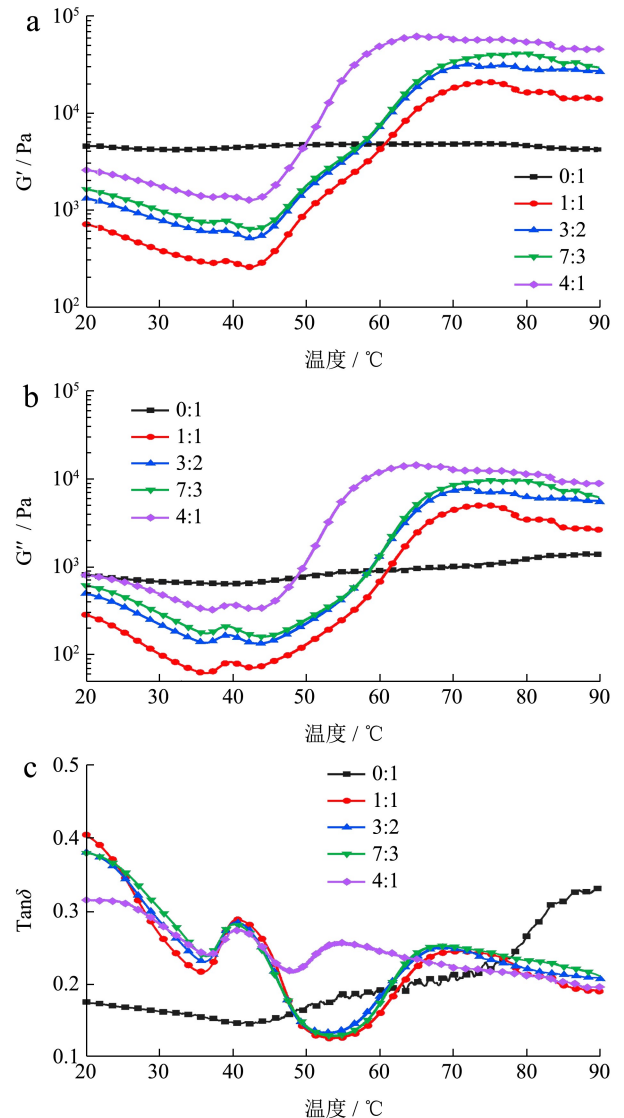


图4 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜的动态流变学特性的影响

Fig.4 Effect of different proportions of white shrimp and Antarctic krill on dynamic rheological characteristics of mixed shrimp surimi

图4显示了不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜储能模量 ( $G'$ )、损耗模量 ( $G''$ ) 和损耗因子 ( $Tan\delta$ ) 的影响。 $G'$ 与凝胶化过程中样品弹性的变化有关，能表征在不同温度下复合虾糜的蛋白分子展开和凝集的过程和复合虾糜形成具有三维网络结构凝胶的

过程,  $G'$ 越高表示样品形成凝胶的能力越强<sup>[28]</sup>。如图4a所示, 纯南极磷虾虾糜因为自身的特殊性在整个热诱导过程中没有明显变化, 说明其凝胶特性差, 不能自身形成凝胶; 四组复合虾糜样品  $G'$ 基本相似, 说明不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜蛋白变性的温度基本没有影响, 然而比例为4:1的复合虾糜凝胶  $G'$ 明显高于其他三组, 说明南美白对虾比例与复合虾糜凝胶  $G'$ 呈正相关; 复合虾糜的蛋白质变性对  $G'$ 的影响变化大致可分为以下4个阶段: 第一阶段(20~36 °C), 随着温度的升高,  $G'$ 急剧下降, 主要是因为复合虾糜绞碎过程中有大量的肌原纤维蛋白发生溶解和溶胀, 它们在此温度范围内会发生折叠, 导致  $G'$ 出现降低的趋势; 第二阶段(36~40 °C), 随着温度的升高,  $G'$ 缓慢增加, 并在40 °C左右出现第一个热变性峰, 说明此时大多数肌球蛋白分子已经展开, 并相互交联结合, 蛋白质聚集体之间交联增多, 凝胶初步形成; 第三阶段(40~42 °C), 随着温度的升高,  $G'$ 缓慢降低, 主要是因为虾糜中副肌球蛋白的存在, 破坏了凝胶网络结构<sup>[15]</sup>。此外, 南极磷虾自溶酶会降解肌球蛋白, 肌球蛋白发生的解离和肌球蛋白尾部出现的变性会增加蛋白质的流动性, 导致已形成的凝胶网络结构在此温度范围内被破坏, 凝胶变成较为松散状态<sup>[10,29]</sup>; 第四个阶段(42~90 °C), 在进一步加热后, 随温度的升高,  $G'$ 急剧上升, 这可能是由于蛋白质持续聚集而形成稳定凝胶网络结构造成的。当超过70 °C后,  $G'$ 随着温度增加最后趋于平缓, 表明半溶胶在此温度范围内逐渐转化为具有弹性的固体凝胶<sup>[30]</sup>, 此时凝胶网络结构完全形成。纯南极磷虾虾糜在整个升温过程中无明显变化, 一种原因可能是由于南极磷虾肌原纤维蛋白含量过低而导致无法形成凝胶<sup>[9]</sup>, 另一种原因可能是南极磷虾自溶酶的作用, 导致南极磷虾几乎不形成凝胶, 影响了南极磷虾虾糜凝胶网络结构的形成<sup>[29]</sup>。

由图4b可知, 四组复合虾糜的  $G''$ 与  $G'$ 结果相似, 比例为4:1的复合虾糜  $G''$ 最高, 7:3和3:2的复合虾糜次之, 1:1的复合虾糜  $G''$ 最低。四组复合凝胶样品  $G''$ 均在40 °C左右出现第一个峰值和70 °C左右达到第二个峰值, 随后缓慢降低并趋于平稳。 $\tan\delta$ 在数值上是  $G''$ 与  $G'$ 的比值, 也能从侧面表征复合虾糜流变特性的

变化。由图4c可知, 复合虾糜样品的  $\tan\delta$ 一直小于1, 表示复合虾糜样品的黏性始终小于弹性, 为溶胶或凝胶<sup>[31]</sup>。当南美白对虾与南极磷虾比例为4:1时,  $\tan\delta$ 与其他三组不一致, 可能是因为南美白对虾比例较高, 南极磷虾自溶酶不能对复合虾糜造成影响。在20~36 °C范围内, 四种比例复合虾糜样品的  $\tan\delta$ 更高, 表示复合虾糜样品在此温度范围内具有更好的黏性; 在35~40 °C温度范围内, 复合虾糜样品的  $\tan\delta$ 均有一定增加, 表示黏性溶胶转变为弹性半固体, 在40 °C左右达到第一个峰值, 温度进一步升高后复合虾糜样品的  $\tan\delta$ 迅速下降, 然后再升高, 在70 °C左右达到第二个峰值。随后复合虾糜样品的  $\tan\delta$ 继续下降, 最后趋于平稳, 这表明蛋白质分子构象进一步改变, 形成了不可逆的固体凝胶<sup>[32]</sup>。

## 2.7 复合虾糜凝胶的微观组织结构

SEM是观察肉糜凝胶微观结构的常用手段之一。如图5所示, 不同比例南美白对虾与南极磷虾复合虾糜凝胶在微观组织结构存在一定差异, 纯南极磷虾虾糜凝胶表面不平整, 结构粗糙, 无规则, 没有形成均一的、有序的网络结构, 显示出不紧实、不均匀、多孔和海绵状的微观结构。复合虾糜孔洞较纯南极磷虾虾糜更加均匀, 随着南美白对虾比例的提高, 大小不一、不均匀孔洞以及孔洞破裂的情况减少; 南美白对虾与南极磷虾比例为3:2和7:3时, 表面平整, 孔洞均匀、规则, 形成了较为均一、有序的网络结构, 当比例为4:1时, 孔洞变得更大, 但依旧规则有序。可能正是这种规则的网络结构, 才使得复合虾糜的蒸煮损失和持水率随着南美白对虾比例的提高而减少, 也使凝胶强度逐渐增加。这与Zhang等<sup>[33]</sup>发现肉糜结构的致密程度与其持水率呈正相关结果一致。余永明等<sup>[34]</sup>发现鲢鱼和金线鱼质量比为5:1时, 混合鱼糜凝胶形成的三维网络结构高度均匀、有序, 具有更强的空间层次感; 仪淑敏等<sup>[35]</sup>发现鸡肉与金线鱼糜质量比为5:1时, 结构较为平滑且孔洞分布较为均匀。因此, 将南美白对虾与南极磷虾复合以3:2质量比混合, 有利于改善南极磷虾的微观组织结构, 且形成较好的凝胶性能。

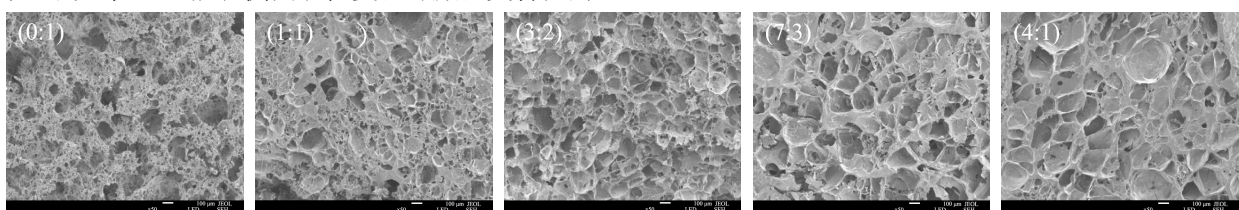


图5 不同比例南美白对虾与南极磷虾对复合虾糜凝胶微观组织结构的影响

Fig.5 Effect of different proportions of white shrimp and Antarctic krill on scanning electron micrographs of mixed shrimp surimi gel

### 3 结论

纯南极磷虾虾糜加热后, 硬度变大且无法形成凝胶。南美白对虾与南极磷虾按照不同质量比例进行混合后, 形成的复合虾糜凝胶的质构、蒸煮损失、持水率、色泽、流变性能和微观结构都存在一定程度上的改善。随着南美白对虾比例的提高, 复合虾糜的微观结构孔洞变得均匀、规则, 形成了较为均一、有序的网络结构, 从而导致复合虾糜的持水率、硬度、破断力、破断距离、储能模量 ( $G'$ ) 和损耗模量 ( $G''$ ) 都逐渐升高,  $L^*$  值、 $a^*$  值、 $b^*$  值、白度值和蒸煮损失逐渐降低, 在 7:3 和 3:2 时差异不显著 ( $p>0.05$ ), 考虑到在极大限度地增加南极磷虾使用量的同时保证复合虾糜的品质, 选择南美白对虾与南极磷虾以 3:2 的比例混合为最佳。本文的研究结果为开发具有较高蛋白含量的、以虾为主要原料的虾肠、虾丸、虾糕等南极磷虾虾糜制品提供了理论支撑, 通过营养的均衡设计, 可以开发适合于老人、儿童等个性化食品, 为拓展南极磷虾的应用领域提供参考和借鉴。

### 参考文献

- [1] 刘永新,李梦龙,方辉,等.南极磷虾的资源概况与生态系统功能[J].水产学杂志,2019,32(1):55-60  
LIU Yongxin, LI Menglong, FANG Hui, et al. Resources status and ecosystem function in Antarctic krill [J]. Chinese Journal of Fisheries, 2019, 32(1): 55-60
- [2] 高翠竹, 岂玉丽, 张泳成, 等. 水煮加工对南极磷虾粉脂质品质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(13): 235-240  
GAO Cuizhu, QI Yuli, ZHANG Yongcheng, et al. Effect of boiling process on the quality of Antarctic krill meal [J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(13): 235-240
- [3] Siegel V. Biology and Ecology of Antarctic Krill. Advances in Polar Ecology [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2016: 321-350
- [4] 王万勇, 刘怡锦, 谢宁. 南极磷虾捕捞加工船及装备发展现状和趋势[J]. 船舶工程, 2020, 42(7): 33-39, 93  
WANG Wanyong, LIU Yijing, XIE Ning. Development status and trend of Antarctic krill factory trawler and equipment [J]. Ship Engineering, 2020, 42(7): 33-39, 93
- [5] Lan C, Zhao Y Q, Li X R, et al. High Fischer ratio oligopeptides determination from Antarctic krill: preparation, peptides profiles, and *in vitro* antioxidant activity [J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(5)
- [6] 胥亚夫, 俞存兵, 余奕珂, 等. 抗氧化剂对南极磷虾油氧化稳定性的影响研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(6): 1-5  
XU Yafu, YU Cunbing, YU Yike, et al. Study on the effects of antioxidants on oxidative stability of Antarctic krill oil [J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 1-5
- [7] Wang L L, Yang F, Rong Y L, et al. Effects of different proteases enzymatic extraction on the lipid yield and quality of Antarctic krill oil [J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(7): 2224-2230
- [8] 郭帆, 汪之和, 施文正, 等. 南极磷虾不同部位氟形态及其分布特征[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 237-242  
GUO Fan, WANG Zhihe, SHI Wenzheng, et al. Distribution characteristics and speciation of fluorine in different parts of Antarctic krill [J]. Food Science, 2018, 39(8): 237-242
- [9] 徐蓓蓓, 胡玲萍, 姜晓明, 等. 冷冻南极磷虾 (*Euphausia superba*) 肌肉的理化性质及蛋白的加工特性[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 56-64  
XU Beibei, HU Lingping, JIANG Xiaoming, et al. Physicochemical properties and processing characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) muscle [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(21): 56-64
- [10] Zheng H N, 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, 2018, 278: 644-652
- [11] 胡玲萍, 张晓梅, 张鸿伟, 等. 南极磷虾自溶前后氨基酸和胰蛋白酶降解产物的变化[J]. 食品科学, 2019, 40(11): 1-6  
HU Lingping, ZHANG Xiaomei, ZHANG Hongwei, et al. Changes in amino acids and tryptic peptides from Antarctic krill protein before and after autolysis [J]. Food Science, 2019, 40(11): 1-6
- [12] 许刚. 南极磷虾凝胶性能及其加工产品挥发性风味的研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2016  
XU Gang. Study on gel properties and volatile flavor of processed Antarctic krill products [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2016
- [13] 艾红, 黄巧珠, 徐泽智, 等. 世界对虾生产及其贸易特征分析[J]. 南方水产, 2008, 4(6): 113-119  
AI Hong, HUANG Qiaozhu, XU Zezhi, et al. World production and trade characteristics of shrimp [J]. South China Fisheries, 2008, 4(6): 113-119
- [14] 李晓, 王颖, 李红艳, 等. 凡纳滨对虾虾头与肌肉营养成分分析与评价[J]. 水产科学, 2018, 37(1): 66-72  
LI Xiao, WANG Ying, LI Hongyan, et al. Analysis and assessment of nutrient composition in head and muscle of

- pacific white leg shrimp *Litopenaeus vannamei* [J]. Fisheries Science, 2018, 37(1): 66-72
- [15] Yang Y, Liu X Y, Xue Y, et al. The process of heat-induced gelation in *Litopenaeus vannamei* [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105260.1-105260.7
- [16] 蓝尉冰. 凡纳滨对虾肌肉蛋白组成及其肉糜特性研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2012  
LAN Weibing. Studies on muscle protein composition and meat characteristics of *Litopenaeus vannamei* [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2012
- [17] Liang F, Lin L, He T H, et al. Effect of transglutaminase on gel properties of surimi and precocious Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) meat [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105261.1-105261.8.
- [18] Yang N, Fan X R, Yu W Y, 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] Zhang W, Cheng S S, Wang S Q, 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): 4838-4846
- [20] Puolanne E, Marjo H. Theoretical aspects of water-holding in meat [J]. Meat Science, 2010, 86(1): 151-165
- [21] 白登荣, 温佳佳, 贺雪华, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(15): 158-164  
BAI Dengrong, WEN Jiajia, HE Xuehua, et al. Effect of  $\gamma$ -polyglutamic acid on gelation properties of minced chicken breast meat [J]. Food Science, 2017, 38(15): 158-164
- [22] 李莎莎, 计红芳, 张令文, 等. 添加面筋蛋白对鸡肉凝胶品质特性的改善[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(7): 142-147  
LI Shasha, JI Hongfang, ZHANG Lingwen, et al. Effect of gluten protein on quality properties of heat-induced gel of chicken [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(7): 142-147
- [23] 袁莉莉. 凡纳滨对虾肉糜凝胶特性研究及虾肉肠的研发[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2013  
Yuan Lili. Research on gel properties of shrimp minced meat and development of shrimp sausage [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2013
- [24] Luo H B, Guo C X, 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(4): 637-647
- [25] Li Q Z, Gui P, Huang Z H, et al. Effect of transglutaminase on quality and gel properties of pork and fish mince mixtures [J]. Journal of Texture Studies, 2018, 49(1): 56-64
- [26] 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  
ZHANG Xiaoyan, ZHANG Na, SONG Zhiqiang, et al. Study of gel quality of salt-soluble proteins treated by high hydrostatic pressure [J]. Food and Fermentation Sciences & Technology, 2012, 48(6): 32-36
- [27] 田利利, 薛长湖, 尹利昂, 等. 复合南极磷虾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, 17: 16-21  
TIAN Lili, XUE Changhu, YIN Li'ang, et al. Effect of surimi ratio and external additives on the gel properties of composite Antarctic krill surimi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 17: 16-21
- [28] Sun J X, Zhen W, Xu X L, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation [J]. Meat Science, 2012, 91(1): 88-92
- [29] 杭虞杰, 李学英, 杨宪时, 等. 南极磷虾自溶酶性质的初步研究[J]. 食品科学, 2011, 13: 198-200  
HANG Yujie, LI Xueying, YANG Xianshi, et al. Properties of autolysis enzymes from Antarctic krill [J]. Food Science, 2011, 13: 198-200
- [30] Montejano J G, Hamann D D, Lanier T C. Thermally induced gelation of selected comminuted muscle systems-rheological changes during processing, final strengths and microstructure [J]. Journal of Food Science, 1984, 49(6): 1496-1505
- [31] 朱佳倩, 张顺亮, 赵冰, 等. 大豆分离蛋白对肌原纤维蛋白加热过程中结构及流变特性的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(9): 1-7  
ZHU Jiaqian, ZHANG Shunliang, ZHAO Bing, et al. Influence of soybean protein isolate on structure and rheological properties of myofibrillar protein during heat-induced gelation [J]. Meat Research, 2019, 33(9): 1-7
- [32] Li H, Kong B H, Zhao J Y, et al. Contributions of fat content and oxidation to the changes in physicochemical and sensory attributes of pork dumpling filler during frozen storage [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(27): 6390