

# pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热凝胶特性及体外消化性的影响

陈艾霖, 刘曼曼, 周春霞, 洪鹏志\*

(广东海洋大学 食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省现代农业科技创新中心, 广东 湛江 524088)

**摘要:** 以罗非鱼和大豆为原料分别提取鱼分离蛋白 (fish protein isolate, FPI) 和大豆分离蛋白 (soy protein isolate, SPI), 制备罗非鱼蛋白-大豆蛋白 (FPI:SPI=1:1, 质量比) 热诱导凝胶, 探讨 pH 值 (6.0、6.5、7.0、7.5) 对混合蛋白热凝胶特性和体外消化性的影响。结果表明: pH 6.5 时罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合蛋白热凝胶储能模量  $G'$  值大于单一蛋白, 凝胶特性最好, 硬度和胶黏性相比 FPI 都得到提升。pH 值会影响蛋白质与水分子的结合能力, 混合蛋白热凝胶的持水性在 pH 6.5 时比其它 pH 值条件下强 ( $P<0.05$ ), 达到最大值 84.02%, 与扫描电镜结果一致, 网络结构致密且光滑平整。pH 6.5 时, 混合蛋白热凝胶的消化率达 91.57%, 高于其它 pH 值下的消化率 ( $P<0.05$ )。因此, 通过调节 pH 值可以改善 FPI 和 SPI 混合蛋白热凝胶的凝胶特性和消化性。

**关键词:** 鱼分离蛋白; 大豆分离蛋白; 混合蛋白; 凝胶特性; 消化性

## Effect of pH Value on Gelling Properties and *in vitro* Digestibility of Heat-induced Gel from Tilapia Protein-Soy Protein Mixtures

CHEN Ai-lin, LIU Man-man, ZHOU Chun-xia, HONG Peng-zhi\*

(School of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Marine Food Engineering Technology Research Center, Guangdong Modern Agricultural Technology Innovation Center, Zhanjiang 524088, Guangdong, China)

**Abstract:** Tilapia and soy were used to extract fish protein isolate (FPI) and soy protein isolate (SPI), and the heat-induced tilapia protein-soy protein (FPI:SPI=1:1, mass ratio) gel was prepared. Thermally induced gels were used to investigate effect of pH (6.0, 6.5, 7.0, 7.5) on the gelling properties and *in vitro* digestibility of the mixed proteins gel was determined. The results showed that at pH 6.5, the elasticity modulus  $G'$  value of the tilapia protein-soy protein mixed protein gel was greater than the elasticity modulus  $G'$  value of the single protein. The pH value affected the binding capacity of the protein and water molecules, making the water retention capacity of the mixed protein gel at pH 6.5 stronger than other pH values ( $P<0.05$ ), reaching a maximum value of 84.02%, which was consistent with the scanning electron microscope results. The network structure was dense and smooth. At pH 6.5, the digestibility of tilapia-soybean protein thermogel was 91.57% higher than other pH values ( $P<0.05$ ). Therefore, by adjusting the pH value, the gel properties and digestibility of the mixed protein thermogel of FPI and SPI could be improved.

**Key words:** fish protein isolate; soy protein isolate; mixed protein; gel properties; digestibility

引文格式:

陈艾霖, 刘曼曼, 周春霞, 等. pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热凝胶特性及体外消化性的影响[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(5): 38-45.

CHEN Ailin, LIU Manman, ZHOU Chunxia, et al. Effect of pH Value on Gelling Properties and *in vitro* Digestibility of Heat-induced Gel from Tilapia Protein-Soy Protein Mixtures[J]. Food Research and Development, 2021, 42(5): 38-45.

基金项目: 广东省科技计划项目 (2015A020209168); 湛江市海洋经济创新发展示范项目建设项目 (XM-202008-01B1)

作者简介: 陈艾霖 (1996—), 女 (汉), 硕士研究生, 研究方向: 食品加工。

\* 通信作者: 洪鹏志 (1966—), 男, 教授, 硕士, 研究方向: 水产品深加工。

中国罗非鱼养殖规模大,2018年产量高达162.45万吨,养殖总产量居世界首位<sup>[1]</sup>。鱼分离蛋白(fish protein isolate, FPI)营养价值高,易消化<sup>[2]</sup>,是优质动物蛋白的主要来源。酸碱提取法蛋白质提取率高,分离到的鱼分离蛋白除了含有大部分肌原纤维蛋白外,还含有水溶性肌浆蛋白<sup>[3]</sup>。与传统鱼糜相比,鱼分离蛋白具有脱脂、脱臭、脱色的优势<sup>[4]</sup>,可作为高档鱼糜制品的蛋白配料。但水产蛋白凝胶在食品应用过程中因其凝胶强度低,难凝胶化而受到限制<sup>[5]</sup>。大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)理化及功能特性突出<sup>[6]</sup>,是一种具有可持续性、高营养价值、优良风味的食品添加剂。近年来含有优质的动植物双蛋白食品成为人们关注的焦点,这种食品优化国民的膳食结构,被列入“健康中国2030”规划纲要及最新颁布的国民营养计划(2017年~2030年)中<sup>[7]</sup>。有研究表明,混合蛋白尤其是动植物蛋白混合可避免单一蛋白的营养不足,提高产品的安全性和营养价值,降低动物蛋白的成本<sup>[8]</sup>。

蛋白质混合方式主要有化学混合和物理混合。化学混合是指将蛋白原料进行一定比例混合后,重新提取出一种新混合蛋白<sup>[9]</sup>。物理混合是指两种或两种以上蛋白直接混合,这种混合在食品加工方面具有方便快捷的优势。混合蛋白之间相互作用形成网状结构或交联结构,可改善食品的感官和功能特性<sup>[10]</sup>。有研究表明,添加1%黑豆和绿豆分离蛋白,可以抑制沙丁鱼鱼糜中内源性蛋白酶水解肌原纤维蛋白,增强凝胶强度<sup>[11]</sup>;添加花生分离蛋白能够提高肌原纤维蛋白凝胶的持水性、凝胶强度和弹性,使凝胶结构更紧凑<sup>[12]</sup>。pH值会影响氨基酸侧链电荷的数量及分布情况,改变蛋白质的分子结构及蛋白质间的疏水相互作用,进而改变蛋白质功能特性。为此,本研究利用动植物蛋白功能互补的优势,探讨不同pH值条件对罗非鱼蛋白-大豆蛋白(FPI:SPI=1:1,质量比)混合体系热诱导凝胶特性的影响,旨在改善食品加工过程中鱼蛋白的凝胶特性,为新型双蛋白凝胶制品在食品加工中的应用提供理论指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

罗非鱼:湛江水产市场;大豆低温脱脂豆粕[粗蛋白含量为(43.75±0.06)%]:湖北荆州三菱湖小渔村;胃蛋白酶(15 000 U/g)、胰蛋白酶(350 000 U/g):阿拉丁试剂公司;戊二醛、三氯甲烷(均为分析纯):西陇科学股份有限公司。

Avanti J-26sxp 落地高速冷冻离心机:美国 Beckman 公司;VAP-450 自动凯氏定氮仪:德国 Gerhardt 公司;NAI-CCQ-150s 索氏抽提器:上海那艾精密仪器有限公司;NS810 分光测色仪:深圳市三恩时科技有限公司;TMS-PRO 物性分析质构仪:美国 FTC 公司;MARSIII 模块化高级流变仪:德国 HAKKE 公司;JEM-7610-F 扫描电子显微镜:日本 JEOL 公司。

### 1.2 方法

#### 1.2.1 FPI 的制备

取鲜活罗非鱼背部白肉绞碎,按照料液比 1:9(g/mL)与冰蒸馏水混合均质 3 min,调节 pH 值至 11.0,搅拌提取 15 min 后离心(10 000 r/min, 20 min, 4 ℃),上清液 pH 值调至 5.5,再离心(10 000 r/min, 20 min, 4 ℃)。冰蒸馏水分散沉淀,pH 值调至 7.0,透析后冷冻干燥备用。FPI 的蛋白质含量为(90.02±1.07)%。

#### 1.2.2 SPI 的制备

豆粕经粉碎后过筛(100 目),按照料液比 1:10(g/mL)与冰蒸馏水混合均质 3 min,调节 pH 值至 11.0,搅拌提取 2 h 后离心(10 000 r/min, 20 min, 4 ℃),上清液 pH 值调至 4.5 后,再离心(10 000 r/min, 20 min, 4 ℃),冰蒸馏水分散沉淀,pH 值调至 7.0,透析后冷冻干燥备用。SPI 的蛋白质含量为(80.85±0.65)%。

#### 1.2.3 动态黏弹性的测定

参考 Buamard 等<sup>[13]</sup>的方法并作修改。将一定量的冰蒸馏水分别加入 FPI、SPI、FPI:SPI=1:1(质量比)中分散,固定蛋白浓度 12%,调节不同 pH 值为 6.0、6.5、7.0、7.5,使用模块化高级流变仪,取上述样品约 3 mL 于平板上,平板四周加入液体石蜡密封防止该过程中水分蒸发,主要参数为:平板夹具直径 35 mm,探头型号 P35 TIL,狭缝间隙 1 mm,升温范围 25 ℃~95 ℃,降温范围 95 ℃~25 ℃,扫描速率 2 ℃/min,频率 0.1 Hz。

#### 1.2.4 凝胶的制备

将一定量的冰蒸馏水分别加入 FPI、SPI、FPI:SPI=1:1(质量比)中分散,固定蛋白浓度为 12%,调节 pH 值为 6.0、6.5、7.0、7.5,采用二段式加热法(40 ℃热处理 1 h,90 ℃热处理 40 min),冰水浴冷却 30 min,4 ℃放置过夜备用。

#### 1.2.5 凝胶质构的测定

参考 Zhou 等<sup>[14]</sup>方法并略作改动。质构仪参数设定:圆柱形探头直径为 5 mm,量程为 1 000 N,形变量为 75%,起始力为 0.5 N,以 60 mm/min 的速度连续两次压缩样品,间隔为 5 s,测定凝胶强度、硬度、弹性值。凝胶强度按如下公式计算。

$$\text{凝胶强度}(\text{N}\cdot\text{mm}) = \text{破断力}(\text{N}) \times \text{凝胶深度}(\text{mm}) \quad (1)$$

### 1.2.6 凝胶持水性的测定

按 1.2.4 制备凝胶,参考 Wu 等<sup>[15]</sup>的方法并略作改动。称总质量记  $W_1(g)$ ,经离心(5 000 r/min, 15 min)除去水分,再称质量记  $W_2(g)$ ,持水性根据下面公式计算。

$$\text{持水性}/\% = W_2/W_1 \times 100 \quad (2)$$

### 1.2.7 凝胶白度的测定

参照 Niu 等<sup>[16]</sup>的方法并略作修改。用色差仪测定凝胶,分别记录  $L^*$ (亮度), $a^*$ (红色/绿色), $b^*$ (黄色/蓝色),凝胶白度值按如下公式计算<sup>[17]</sup>。

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

### 1.2.8 扫描电镜观察

参考林端权<sup>[18]</sup>的方法并略作修改。扫描电镜凝胶切片厚度为 5 mm,用 2.5% pH 6.8 的戊二醛固定 12 h,磷酸盐缓冲液(0.1 mol/L, pH 6.8)浸泡洗涤 15 min,重复 3 次。接着分别用 50%、70%、80%、90%乙醇各浸泡 10 min,无水乙醇浸泡 15 min,重复 3 次。三氯甲烷脱脂 1 h,乙醇:叔丁醇 1:1(体积比)混合液浸泡 15 min,100%叔丁醇溶液置换 15 min,真空冷冻干燥。样品采用离子溅射镀膜法对样品喷金后进行电镜扫描,观察其微观结构。

### 1.2.9 体外消化特性

参考 Menezes 等<sup>[19]</sup>的方法并略作修改,体外消化的测定模拟人体胃液和肠液的消化过程。按 1.2.4 制备凝胶,称适量搅碎的凝胶放入 100 mL HCl 溶液(0.1 mmol/L, pH 2.0),使得溶液中的蛋白质含量为 3 mg/mL,添加 0.33 g 胃蛋白酶,37 °C 条件下水浴振荡 1.5 h。用 1.0 mol/L NaOH 中和至 pH 7.0。加入等体积 10 mg/mL 胰蛋白酶-磷酸盐缓冲溶液,37 °C 水浴振荡反应 3 h,加入碳酸钠中止反应,利用考马斯亮蓝法测定消化后蛋白含量。总蛋白含量是通过凯氏定氮法测定凝胶的蛋白含量。体外消化率的计算公式如下。

$$\text{消化率}/\% = \frac{C_i - C_p}{C_i} \times 100 \quad (4)$$

式中: $C_i$  为消化前的总蛋白含量,mg/mL; $C_p$  为消化后的蛋白含量,mg/mL。

### 1.3 数据统计分析

数据采用 Origin 9.0 软件进行绘图,数据间的显著性采用 SPSS Statistics 24.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 pH 值对混合蛋白凝胶流变特性的影响

pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合体系热诱导储能模量的影响见图 1。

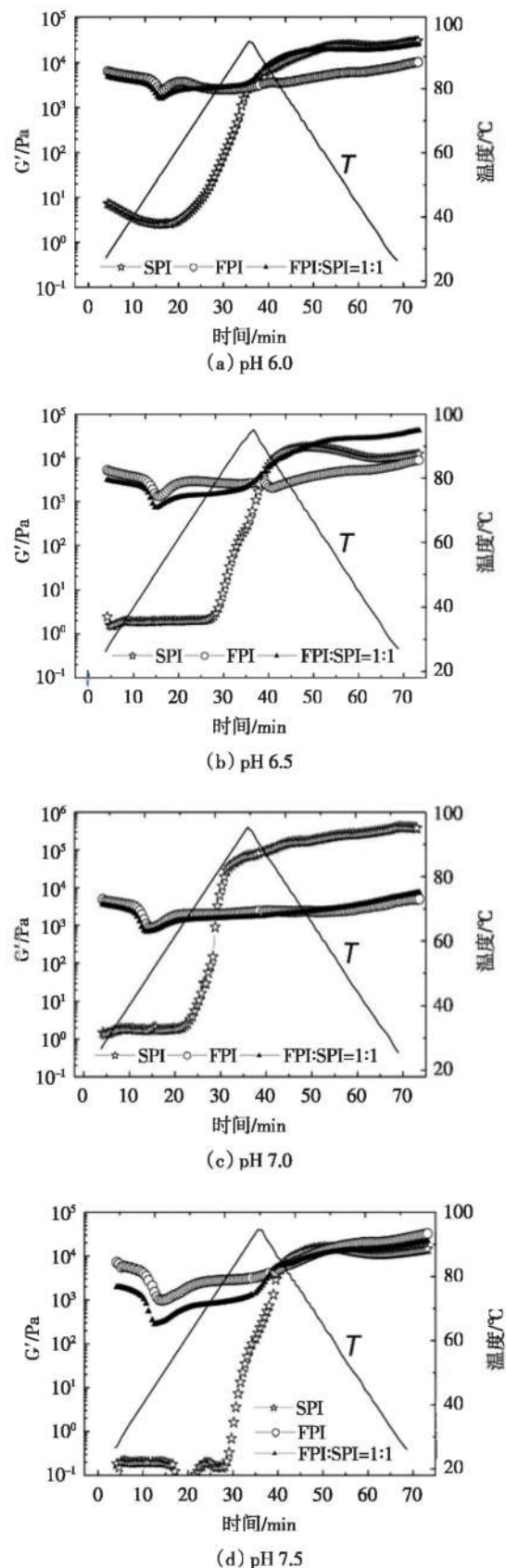
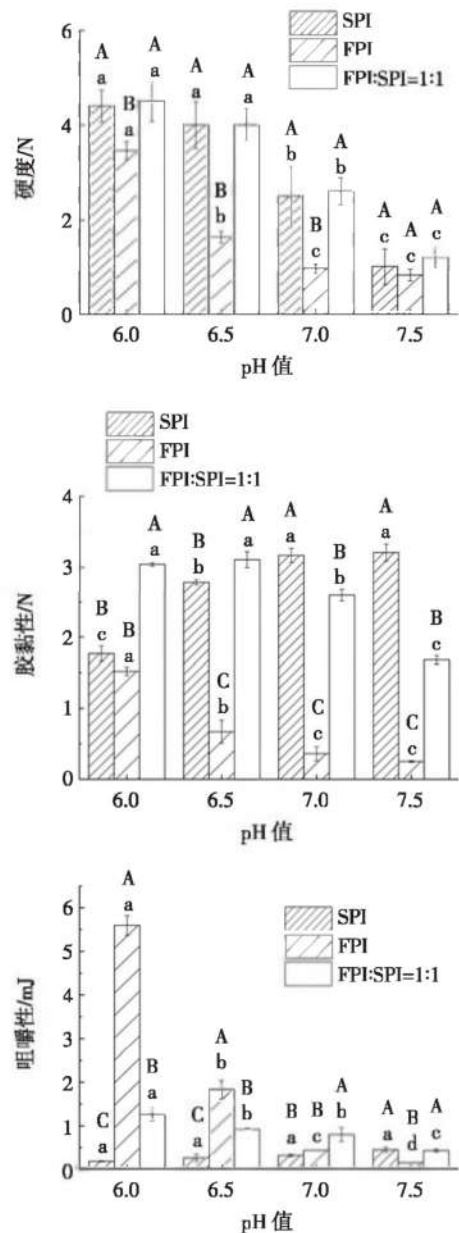
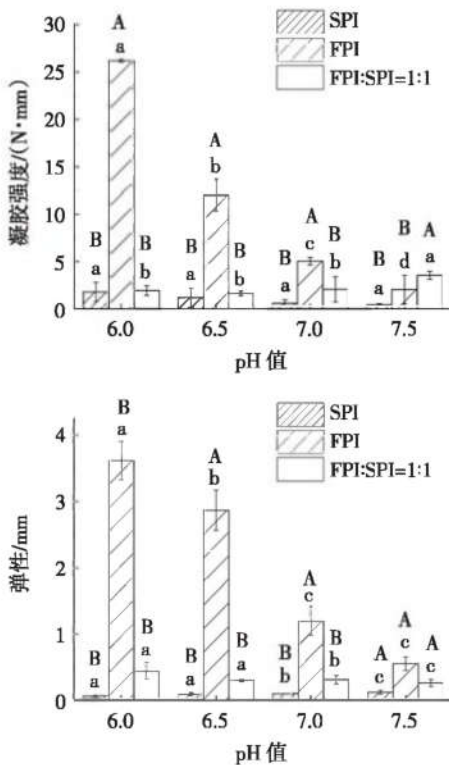


图 1 pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合体系热诱导凝胶储能模量的影响  
Fig.1 Effect of pH on heat-induced dynamic elastic modulus of tilapia protein-soy protein mixtures

如图1所示,FPI初始的储能模量值较大,SPI溶解性好,在起始阶段加热温度低,变性程度低,初始储能模量值小<sup>[20]</sup>,混合蛋白体系的初始储能模量值介于FPI与SPI之间。随着温度的上升,蛋白质发生变性,水产蛋白凝胶的网络结构受到破坏,分子间的流动性增大<sup>[21]</sup>,FPI的储能模量 $G'$ 值下降,之后缓慢上升,分子结构展开后聚集,当温度高于48℃, $G'$ 值开始明显增加,鱼糜凝胶有序的网络结构被固定,凝胶强度和弹性增强;SPI的7S和11S的变性温度分别在75℃和90℃<sup>[16]</sup>,当温度从95℃开始下降,7S和11S充分变性后,弱酸条件下混合蛋白质亚基之间的连接和相互作用增强, $G'$ 值快速增大,明显高于FPI,凝胶特性增强。混合蛋白体系在41℃之前,凝胶形成松散的网络结构;41℃~46℃,蛋白质开始变性,部分肽链解螺旋,增加了蛋白的黏性,同时不同程度上破坏了蛋白凝胶网络结构导致凝胶劣化<sup>[22]</sup>;46℃~95℃时两种蛋白内部结构展开,分子间作用增强,形成强凝胶。混合蛋白凝胶在pH 6.5时的 $G'$ 值大于在pH 6.0时的 $G'$ 值。有研究表明,pH 5.5~6.0,大豆蛋白11S往往不能发生变性和结构变化,蛋白质之间的相互作用有限<sup>[23]</sup>。弱酸条件能增强混合蛋白质的凝胶特性,且pH 6.5时混合蛋白的凝胶特性最好。

2.2 pH值对混合蛋白凝胶质构特性的影响

pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶质构特性的影响见图2。



大写字母不同表示同一 pH 值下蛋白之间差异显著 ( $P < 0.05$ );小写字母不同表示同一种蛋白在不同 pH 值下差异显著 ( $P < 0.05$ )。

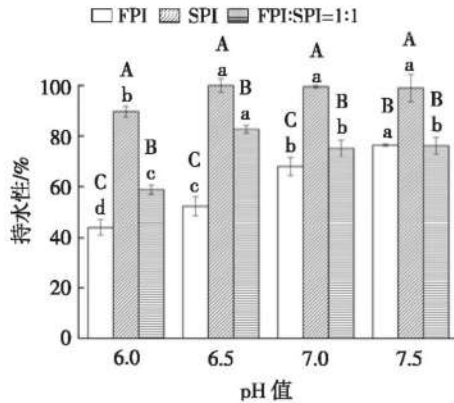
图2 pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶质构特性的影响  
Fig.2 Effect of pH on the texture properties of heat-induced gel from tilapia protein-soy protein mixtures

如图2所示,在试验范围内,FPI凝胶的凝胶强度、弹性、硬度、胶黏性和咀嚼性均随pH值的增大而减小;SPI凝胶的硬度随pH值的增大而减小,且SPI凝胶的凝胶强度、弹性均小于FPI;对于混合蛋白热凝胶,pH值对凝胶强度和弹性的影响不大( $P > 0.05$ ),而pH值偏酸性时混合蛋白热凝胶的弹性、胶黏性、咀嚼性和硬度整体上都显著高于中性和弱碱性条件( $P < 0.05$ ),这个结果与流变特性的结果一致,弱酸条件下混合蛋白热凝胶的 $G'$ 值较高,对应的质构特性得到了改善。

当 pH 6.5 时,混合蛋白热凝胶的硬度和胶黏性相比 FPI, 都得到提升。说明 pH 6.5 的条件下,添加同浓度的大豆蛋白能显著提高 FPI 的硬度和胶黏性( $P<0.05$ )。

### 2.3 pH 值对混合蛋白凝胶持水性的影响

pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶持水性的影响见图 3。



大写字母不同表示同一 pH 值下蛋白之间差异显著( $P<0.05$ );小写字母不同表示同一种蛋白在不同 pH 值下差异显著( $P<0.05$ )。

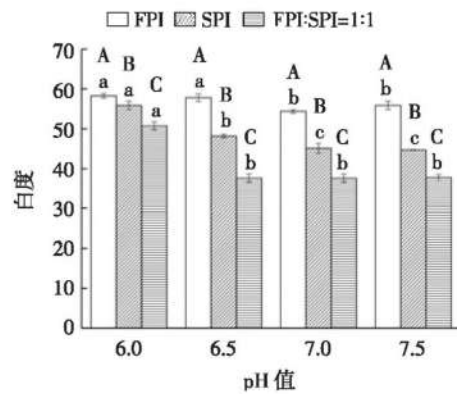
图 3 pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶持水性的影响  
Fig.3 Effect of pH on water holding capacity of heat-induced gel from tilapia protein-soy protein mixtures

持水性反映凝胶中蛋白质与水分的结合程度<sup>[24]</sup>。如图 3 所示, FPI 凝胶的持水性比 SPI 凝胶持水性弱( $P<0.05$ ),凝胶水分和蛋白质之间结合程度较低。随着 pH 值上升, FPI 凝胶的持水性逐渐增强( $P<0.05$ )。FPI 和 SPI 混合后, pH 6.0 ~ 7.0 时,体系的凝胶持水性明显高于 FPI 凝胶的持水性( $P<0.05$ )。可能是 SPI 的侧链反应基团促进肌原纤维蛋白和 SPI 之间的相互作用,氢键增加,水分与蛋白质结合程度增强,形成一个连续的三维网络结构<sup>[25]</sup>。pH 6.5 时,罗非鱼-大豆混合蛋白热凝胶持水性相比其它 pH 值条件下混合蛋白热凝胶持水能力强,达到最大值为 84.02%。可能是 pH 值会使蛋白质分子的离子化作用和净电荷值发生改变,从而影响蛋白质与水分子的结合能力<sup>[26]</sup>。

### 2.4 pH 值对混合蛋白凝胶白度的影响

pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶白度的影响见图 4。

如图 4 所示, SPI 及 FPI-SPI 混合蛋白热凝胶的白度值均低于 FPI 凝胶的白度,这可能与大豆分离蛋白本身的颜色有关。大豆分离蛋白颜色偏黄,将 SPI 添加到 FPI 中制成凝胶,其白度下降,这个结果与王博等<sup>[27]</sup>的结果一致, SPI 的添加会降低肌原纤维蛋白凝胶的白度值。对于混合体系的热凝胶, pH 6.0 时白度值显著



大写字母不同表示同一 pH 值下蛋白之间差异显著( $P<0.05$ );小写字母不同表示同一种蛋白在不同 pH 值下差异显著( $P<0.05$ )。

图 4 pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶白度的影响

Fig.4 Effect of pH on the whiteness of heat-induced gel from tilapia protein-soy protein mixtures

高于其它 pH 值条件下的白度值。有研究表明, pH 值会影响蛋白质分子间作用力<sup>[28]</sup>,从而影响蛋白质的变性,而凝胶的白度与蛋白质的变性息息相关,蛋白质的变性程度越大,白度值越高。凝胶的动态黏弹性、质构特性的结果是 pH 6.5 时蛋白质变性程度最大,形成的凝胶性能最好,而白度值的结果是 pH 6.0 时白度值最大,这是由于白度不仅取决于蛋白质变性、聚合程度,还取决于表面的光学特性<sup>[29]</sup>,致密的蛋白质凝胶基质可能导致更多的光从凝胶表面反射,从而导致颜色略显明亮,这可能与混合蛋白的微观结构有关。

### 2.5 pH 值对混合蛋白凝胶微观结构的影响

pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶微观结构的影响见图 5。

FPI 凝胶网状结构松散,凝胶微观孔隙较大。而 SPI 溶解性较好,较强的分子间相互作用促进热处理过程中分子间的缔合作用,形成凝胶的网络结构更为连续且孔洞小<sup>[30]</sup>,因此, SPI 凝胶孔径比 FPI 凝胶小,分布均匀。FPI 和 SPI 混合凝胶与 FPI 凝胶相比,孔隙减小,致密均匀,更加平整。可能是热处理使大豆球蛋白肽链裂解,反应基团暴露<sup>[31]</sup>,肌原纤维蛋白通过疏水作用力和二硫键与大豆分离蛋白分子聚集更加紧密,凝胶网络结构呈现孔洞小,均匀对称。这种结构使蛋白和水之间的作用力更强,形成凝胶的网络结构更稳定。相比其它 pH 值条件下,混合蛋白热凝胶在 pH 值为 6.0 时其凝胶结构为多孔的致密网状,凝胶基质中水分更多释放到凝胶表面,持水能力差,促进光散射作用,进而会增加凝胶白度<sup>[32]</sup>,这个结果进一步验证了 pH 6.0 时白度值最大的结论。其它 pH 值条件下混合蛋白热凝胶表面呈片状少孔,其中 pH 6.5 条件下混合

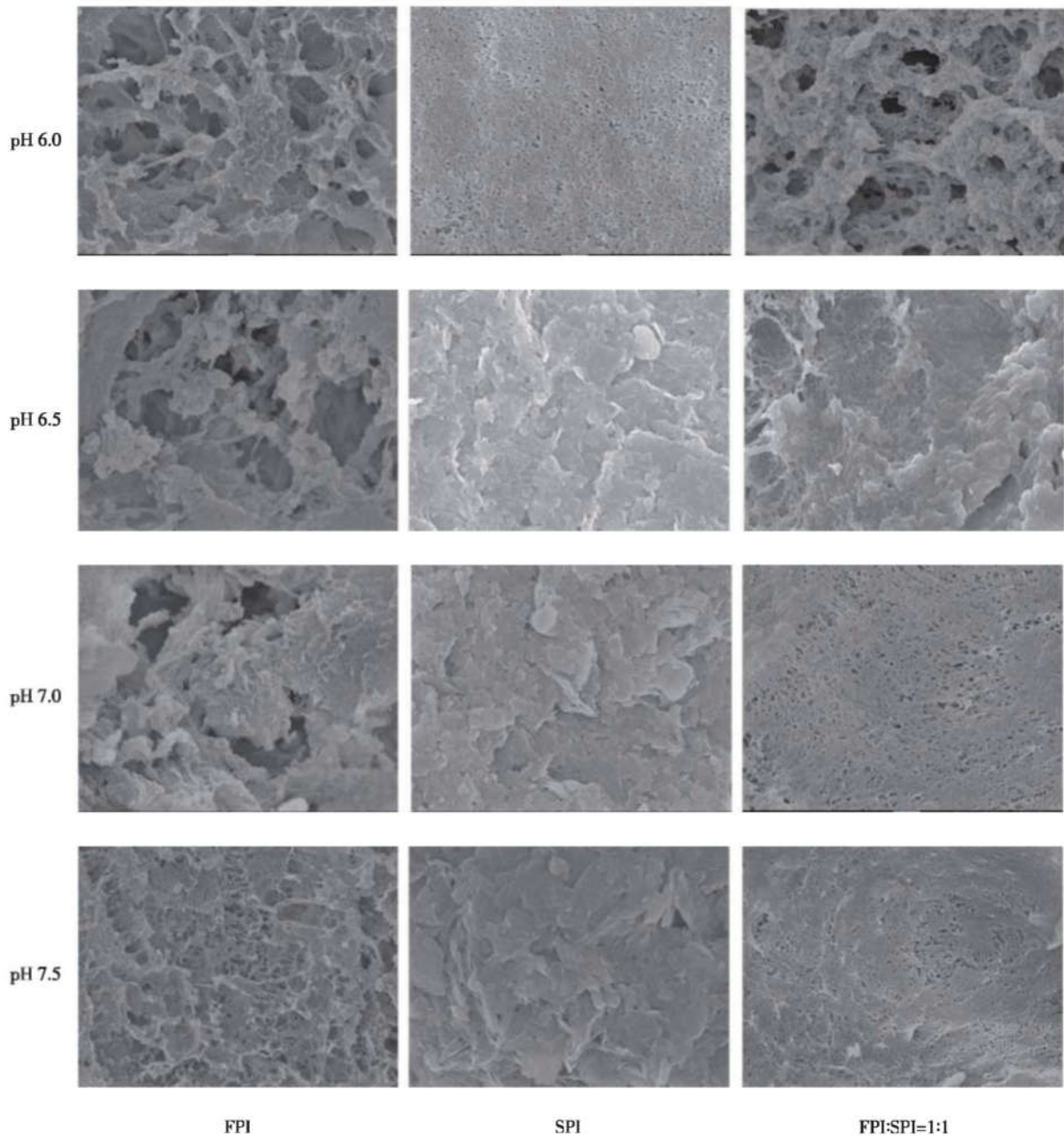


图5 pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶扫描电镜图( $\times 10\ 000$ )的影响

Fig.5 Effect of pH on scanning electron micrograph ( $\times 10\ 000$ ) of heat-induced gel from tilapia protein-soy protein mixtures

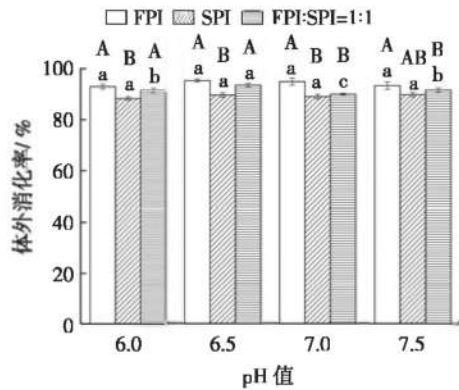
蛋白凝胶光滑平整,致密的网络结构更好锁住凝胶内部水分。

#### 2.6 pH值对混合蛋白凝胶体外消化性的影响

pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合蛋白凝胶体外消化性的影响见图6。

食物的微观和宏观结构以及聚集体的形态,都会对其消化程度产生影响<sup>[3]</sup>。如图6所示,FPI热凝胶的消化率明显高于SPI热凝胶的消化率( $P < 0.05$ ),这可能与凝胶的结构有关,从扫描电镜的结果可以看出SPI凝胶结构比FPI凝胶的结构更加致密,降低与消化酶的反应,从而降低了SPI凝胶的消化率,有研究显

示SPI为氨基酸间相联结形成的具有特定空间结构的生物大分子,紧密的分子结构能够对酶解作用产生较强的抵抗力<sup>[34]</sup>。pH值为6.0、6.5时,FPI和SPI两种蛋白混合后凝胶的消化率明显比SPI热凝胶的消化率高( $P < 0.05$ )。当pH值为6.5时,罗非鱼-大豆混合蛋白热凝胶的消化率达91.57%,高于其它pH值下的消化率,这可能是由于FPI和SPI混合蛋白在该pH值下蛋白质分子中的非共价相互作用(氢、离子和疏水键),从而影响二级和三级结构<sup>[35]</sup>。二级结构发生显著的变化,热诱导凝胶的蛋白质 $\beta$ -折叠含量会降低,无规则卷曲的含量会提高<sup>[36]</sup>,蛋白质的无规则卷曲的含量与



大写字母不同表示同一 pH 值下蛋白之间差异显著 ( $P < 0.05$ ); 小写字母不同表示同一种蛋白在不同 pH 值下差异显著 ( $P < 0.05$ )。

图6 pH 值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热诱导凝胶体外消化性的影响

Fig.6 Effect of pH on *in vitro* digestibility of heat-induced gel from tilapia protein-soy protein mixtures

体外消化率成正相关, 随着不规则卷曲含量的升高, 体外消化率也有所提高。

### 3 结论

本研究探讨不同 pH 值(6.0、6.5、7.0、7.5)对罗非鱼-大豆混合蛋白热凝胶特性和体外消化特性的影响。结果表明添加 SPI 使得混合蛋白形成的凝胶网络结构更加致密, 持水性增强, 在弱酸条件混合体系的凝胶特性、胶黏性和硬度整体上都显著高于中性和弱碱性条件 ( $P < 0.05$ ), 体外消化率明显优于 SPI 的消化率 ( $P < 0.05$ )。pH 值为 6.5 时, 混合蛋白的凝胶质构最好; 持水性比 SPI 高 14.8%~39.6%; 体外消化性优于其它 pH 值条件下的混合蛋白凝胶。综上, 罗非鱼分离蛋白和大豆分离蛋白混合制备的热凝胶特性以及体外消化特性得到明显的改善, 且 pH 6.5 时凝胶质构、持水性、微观结构、体外消化特性最好。总之, 双蛋白凝胶特性及消化性的相关研究还需要进一步探讨两种蛋白混合比例, 可通过调节 pH 值提高混合蛋白凝胶的加工品质和营养价值, 为新型双蛋白凝胶制品在食品加工应用提供借鉴与指导。

### 参考文献:

[1] 农业部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.  
 [2] RUXTON C H S. The benefits of fish consumption [J]. Nutrition Bulletin, 2011, 36(1): 6-19.  
 [3] 刘诗长. 罗非鱼分离蛋白的制备及其性质研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2011.  
 [4] 姜梦云, 周晏琳, 张晴, 等. 鱼贝肌肉分离蛋白糖基化功能改性的研究与比较[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 21-26.

[5] 赵志霞, 吴燕燕, 李来好, 等. 我国罗非鱼加工研究现状[J]. 食品工业科技, 2017, 38(9): 363-367.  
 [6] NISHINARI K, FANG Y, GUO S, et al. Soy proteins: A review on composition, aggregation and emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 39(2): 301-318.  
 [7] 中国营养学会. 国民营养计划 (2017-2030 年)[J]. 营养学报, 2017, 39(4): 315-320.  
 [8] 韩越. 混合蛋白体系的稳定性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016.  
 [9] 张梦霞. 罗非鱼-大豆蛋白混合体系乳化性的研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014.  
 [10] LIN D, LU W, KELLY A L, et al. Interactions of vegetable proteins with other polymers: Structure-function relationships and applications in the food industry[J]. Trends in Food Science and Technology, 2017, 68: 130-144.  
 [11] 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.  
 [12] SUN J, WU Z, XU X, 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.  
 [13] BUAMARD N, BENJAKUL S. Improvement of gel properties of sardine (*Sardinella albella*) surimi using coconut husk extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 146-155.  
 [14] ZHOU Y, CHEN C, CHEN X, et al. Contribution of three ionic types of polysaccharides to the thermal gelling properties of chicken breast myosin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(12): 2655-2662.  
 [15] WU M, XIONG Y L, CHEN J, et al. Rheological and microstructural properties of porcine myofibrillar protein-lipid emulsion composite gels[J]. Journal of Food Science, 2009, 74(4): 207-217.  
 [16] NIU H, XIA X, WANG C, et al. Thermal stability and gel quality of myofibrillar protein as affected by soy protein isolates subjected to an acidic pH and mild heating[J]. Food Chemistry, 2018, 242: 188-195.  
 [17] ZHU K, KANU P J, CLAVER I P, et al. A method for evaluating Hunter whiteness of mixed powders[J]. Advanced Powder Technology, 2009, 20(2): 123-126.  
 [18] 林端权. 复合植物蛋白对鱼糜凝胶特性影响的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2017.  
 [19] MENEZES E A, OLIVEIRA A F, FRANCA C J, et al. Bioaccessibility of Ca, Cu, Fe, Mg, Zn, and crude protein in beef, pork and chicken after thermal processing[J]. Food chemistry, 2018, 240: 75-83.  
 [20] 冯凌凌, 熊健. 大豆浓缩蛋白粘度与动态粘弹性研究[J]. 食品与发酵工业, 2007(12): 36-39.  
 [21] HAN M, WANG P, XU X, et al. Low-field NMR study of heat-induced gelation of pork myofibrillar proteins and its relationship with

- microstructural characteristics [J]. Food Research International, 2014, 62: 1175-1182.
- [22] 武雅琴, 王莉莎, 邹咪, 等. 热诱导大豆分离蛋白对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(10): 60-65
- [23] RAMIREZ-SUAREZ J C, XIONG Y L. Effect of transglutaminase-induced cross-linking on gelation of myofibrillar/soy protein mixtures[J]. Meat Science, 2003, 65(2): 899-907.
- [24] PUOLANNE E, HALONEN M. Theoretical aspects of water-holding in meat[J]. Meat Science, 2010, 86(1): 151-165.
- [25] NIU H, LI Y, HAN J, et al. Gelation and rheological properties of myofibrillar proteins influenced by the addition of soybean protein isolates subjected to an acidic pH treatment combined with a mild heating[J]. Food Hydrocolloids, 2017, 70: 269-276.
- [26] 牛祥臣, 王洪彩, 马军, 等. 食盐浓度和热处理条件对大豆蛋白凝胶特性影响的研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(6): 19-22
- [27] 王博, 伊东, 谢梦颖, 等. 基化大豆分离蛋白对肌原纤维蛋白功能特性的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(7): 63-69.
- [28] 王丽, 张英华. 大豆分离蛋白的凝胶性及其应用的研究进展[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(4): 96-99.
- [29] BAJOVIC B, BOLUMAR T, HEINZ V. Quality considerations with high pressure processing of fresh and value added meat products[J]. Meat Science, 2012, 92(3): 280-289.
- [30] LIN D, ZHANG L, LI R, et al. Effect of plant protein mixtures on the microstructure and rheological properties of myofibrillar protein gel derived from red sea bream (*Pagrosomus major*)[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 537-545.
- [31] HUANG X, LI C, YANG F, et al. Interactions and gel strength of mixed myofibrillar with soy protein, 7S globulin and enzyme-hydrolyzed soy proteins [J]. European Food Research and Technology, 2010, 231(5): 751-762.
- [32] VISESSANGUAN W, OGAWA M, NAKAI S, et al. Physicochemical changes and mechanism of heat-induced gelation of arrowtooth flounder myosin [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(4): 1016-1023.
- [33] NYEMB K, GUERINDUBIARD C, PEZENNEC S, et al. The structural properties of egg white gels impact the extent of *in vitro* protein digestion and the nature of peptides generated [J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 315-327.
- [34] 苏丹, 李树君, 赵凤敏, 等. 中心组合设计优化超高压处理的大豆蛋白体外消化工艺[J]. 农产品加工(学刊), 2009(10): 85-88
- [35] LIU M, LIU G Y, YANG Y, et al. Thermal processing influences the digestibility and immunoreactivity of muscle proteins of *Scylla paramamosain*[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 559-567.
- [36] 陶汝青, 夏宁, 滕建文. 热处理对大豆分离蛋白结构和凝胶性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 60-66.

加工编辑:王艳

收稿日期:2020-04-10