

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2022.80277

大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel properties of myofibrillar protein from loach

孙朋朋 王 薇 李若彤 朱 红 任圆圆

SUN Peng-peng WANG Wei LI Ruo-tong ZHU Hong REN Yuan-yuan

(长江大学生命科学学院, 湖北 荆州 434025)

(College of Life Science, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434025, China)

摘要:目的:开发品质优良的淡水鱼鱼糜制品。方法:将不同含量的大豆分离蛋白和卡拉胶添加到泥鳅肌原纤维蛋白中,采用质构仪、色差仪、扫描电镜和红外光谱等探究其对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响。结果:随着大豆分离蛋白含量的增加,泥鳅肌原纤维蛋白凝胶硬度先降低后升高,弹性先升高后降低,保水性增加,蒸煮损失降低,凝胶网络孔洞越来越大,各二级结构相对含量发生变化;而卡拉胶对凝胶硬度和弹性有减弱作用,对白度及蒸煮损失有较好的改善作用,凝胶网络结构规则有序且无规则卷曲结构消失。结论:大豆分离蛋白对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶的作用效果较卡拉胶更明显,形成的复合凝胶性能更好。

关键词:泥鳅;肌原纤维蛋白;凝胶;大豆分离蛋白;卡拉胶

Abstract: Objective: In this study, the effects of exogenous additives on gel properties of myofibrillar protein were explored to improve the property of surimi from fresh-water fish. **Methods:** The myofibrillar protein of loach was mixed with various contents of soybean protein isolate and carrageenan to prepare composite gel. Its properties were investigated by texture analyzer, color difference analyzer, scanning electron microscope and infrared spectroscopy. **Results:** With increased content of soybean protein isolate, the gel hardness of myofibrillar protein from loach decreased firstly and then increased; while gel springiness increased

firstly and then decreased. Soybean protein isolate could enhance the water holding capacity of gel and decrease its cooking loss. Holes in gel network became larger and the relative contents of secondary structure also changed. However, carrageenan could weaken the hardness and springiness of gel, while improve the whiteness as well as cooking loss. The gel network structure became regular and the unordered structure disappeared. **Conclusion:** The effects of soybean protein isolate on gel of myofibrillar protein from loach is more obvious than that of carrageenan, and the composite gel formed by soybean protein isolate have better properties.

Keywords: loach; myofibrillar protein; gel; soybean protein isolate; carrageenan

泥鳅,又称鳅鱼,是中国极具特色的淡水鱼类,有“水中人参”之美誉^[1]。据《中国渔业统计年鉴》^[2-4]显示,2013—2017年泥鳅的养殖量分别为32.15万,34.31万,36.62万,37.26万,39.47万t,以平均每年5.7%的速度持续增加。但泥鳅等淡水鱼与海水鱼相比,其鱼糜的凝胶性能相对较差,因此其深加工程度较低,目前以鲜活销售为主。

肌原纤维蛋白是一类具有重要生物学功能的结构蛋白,因其出色的水结合能力和凝胶形成能力,决定着鱼糜制品的保水性、质构等品质特性。在肌原纤维蛋白的热诱导凝胶化过程中,肌原纤维蛋白内部结构遭到破坏而发生伸展,蛋白质分子之间相互聚集,形成高黏弹性的三维网络凝胶结构,这种结构对鱼糜制品的品质特性非常重要^[5]。目前国内外针对肌原纤维蛋白改性的研究较多,包括物理改性、化学改性、生物改性以及新型技术的改性等^[6]。此外,利用肌原纤维蛋白和高分子化合物(如:多糖、蛋白质等)形成复合物也是提高其凝胶特性的方法之一。吕旭琴等^[7]探讨了不同种类多糖对肌原纤维

基金项目:天津市自然科学基金重点项目(编号:16JCZDJC34100);食品营养与安全国家重点实验室开放课题(编号:SKLFNS-KF-202108);长江大学大学生创新创业训练计划项目(编号:Yz2021222)

作者简介:孙朋朋,男,长江大学助教,硕士。

通信作者:任圆圆(1991—),女,长江大学讲师,硕士生导师,博士。E-mail: yuanyren@yangtzeu.edu.cn

收稿日期:2022-03-04 **改回日期:**2022-06-26

蛋白凝胶特性的影响,包括阴/阳离子多糖、中性多糖及改性多糖。Lin 等^[8]探究了植物蛋白混合物对红鲷鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响。

大豆分离蛋白与卡拉胶是常用的凝胶改良剂,常被用于鱼糜凝胶制品的食品加工中,以提升产品的凝胶性、持水性以及肉制品的口感。然而,目前关于使用大豆分离蛋白和卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白进行改性的研究尚未见报道。研究拟以泥鳅肌原纤维蛋白为研究对象,探究大豆分离蛋白及卡拉胶对其凝胶特性的影响,以期开发泥鳅类鱼糜制品提供理论参考,提高泥鳅的经济价值。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

1.1.1 材料与试剂

鲜活泥鳅:市售;

大豆分离蛋白、卡拉胶:北京索莱宝科技有限公司;

所有分析用有机溶剂均为国产分析纯。

1.1.2 主要仪器设备

紫外可见分光光度计:UV-2600 型,日本岛津公司;

质构仪:TMS-PRO 型,美国 Food Technology Corporation (FTC)公司;

色差仪:Hunterlab 型,昆山蕴科机电科技有限公司;

扫描电子显微镜:Tescan Vega 3 型,捷克泰斯肯(Tescan)公司;

红外光谱仪:VECTOR22 型,德国 BRUKER 公司。

1.2 方法

1.2.1 泥鳅肌原纤维蛋白的提取 参考 Pan 等^[9]的方法并加以改进。将鲜活泥鳅去头、尾、内脏、鱼皮及骨刺后,清洗沥干,获得泥鳅肉。向其中加入事先预冷(4℃)的 0.02 mol/L 磷酸盐缓冲溶液(含 0.01 mol/L $\text{Na}_2\text{HPO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 、0.01 mol/L $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 、0.1 mol/L Triton-X 100)[$m_{\text{泥鳅肉}}:V_{\text{缓冲溶液}}=1:4$ (g/mL)],高速匀浆,在 4℃、9 982 r/min 条件下离心 15 min 收集沉淀,重复上述步骤两次。向所得沉淀中加入事先预冷(4℃)的 0.1 mol/L NaCl 溶液[$m_{\text{泥鳅肉}}:V_{\text{NaCl溶液}}=1:4$ (g/mL)],高速匀浆,双层纱布过滤。所得滤液在 4℃、9 982 r/min 条件下离心 15 min 收集沉淀,重复上述步骤两次,最终得到的沉淀即为泥鳅肌原纤维蛋白(MP),于 4℃冰箱中保存备用。

1.2.2 凝胶的制备 用 0.6 mol/L NaCl 溶液将 MP 质量浓度调节至 70 mg/mL,分别加入 0%,1%,2%,3%,4%,5%的大豆分离蛋白及卡拉胶(以 MP 含量计),混匀,40℃加热 60 min,90℃加热 30 min,立即取出冷却至室温,置于 4℃冰箱中平衡过夜,得到复合物凝胶。

1.2.3 凝胶强度的测定 将凝胶切成大小均匀一致的圆柱状(Φ 30 mm×10 mm),利用质构仪对其凝胶强度进行

测定。使用 P/0.5 型号圆柱探头,设定探头位移速度为 0.5 mm/s,初始高度为 11 mm,下压比例 30%,触发力 0.1 N。

1.2.4 保水性的测定 采用离心法测定凝胶的保水性。准备一根干燥洁净的离心管,取一定质量的凝胶放入离心管中,在 4℃、9 982 r/min 条件下离心 10 min,倾倒入清液,用滤纸吸干凝胶表面水分,再次称量离心后凝胶与离心管的质量。按式(1)计算凝胶的保水性(Water Holding Capacity,WHC)。

$$W_{\text{HC}} = \frac{W_2 - W}{W_1 - W} \times 100\%, \quad (1)$$

式中:

W_{HC} ——保水性,%;

W ——离心管的质量,g;

W_1 ——离心管与初始凝胶的质量,g;

W_2 ——离心管与离心后凝胶的质量,g。

1.2.5 蒸煮损失的测定 取一定质量的凝胶样品,在 40℃条件下加热 1 h,再转入 90℃加热 30 min 后取出,冷却至室温,擦干表面水分后再次称量凝胶的质量。按式(2)计算凝胶的蒸煮损失(Cooking Loss,CL)。

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

式中:

C_{L} ——蒸煮损失,%;

M_1 ——凝胶的初始质量,g;

M_2 ——蒸煮后凝胶的质量,g。

1.2.6 白度的测定 将凝胶切成 10 mm 厚的圆片,利用色差仪测定其表面的色差(L^* , a^* , b^*),测前先用标准白板进行校正。按式(3)计算凝胶的白度(Whiteness,W)。

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

式中:

W ——白度;

L^* ——亮度值;

a^* ——红度值;

b^* ——黄度值。

1.2.7 微观结构测定 将凝胶切成 3 mm×3 mm×3 mm 的块状,在 2.5%的戊二醛溶液中固定过夜,然后用 0.2 mol/L pH 7.0 的磷酸缓冲液清洗 3 次,再依次用 30%,60%,70%,80%,90%,100%的乙醇溶液梯度脱水,每次脱水 30 min。最后经真空冷冻干燥(真空度为 1 Pa,冷阱温度为-70℃,运行时间为 24 h)及喷金处理后,用扫描电子显微镜进行微观结构的观察^[10]。

1.2.8 傅里叶红外光谱的测定 将真空冷冻干燥后的凝胶与 KBr 以 $m_{\text{凝胶}}:m_{\text{KBr}}$ 为 1:150 进行混合研磨,压成薄片,利用傅立叶红外光谱仪对其进行扫描。扫描范围为 4 000~400 cm^{-1} ,分辨率为 4 cm^{-1} ,扫描次数为

16 次。使用 MONIC 软件对数据进行去卷积, PeakFit 软件对 $1\ 700\sim 1\ 600\text{ cm}^{-1}$ 区域进行二阶导数峰值拟合^[11]。

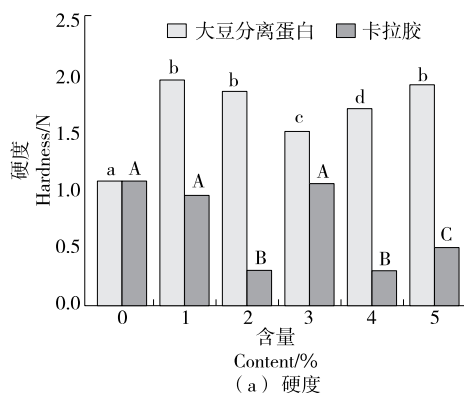
1.3 数据处理与统计分析

所有试验均进行 3 次重复, 并采用 Microsoft Excel 计算平均值及标准偏差, SPSS 23.0 软件中的 Duncan 法进行显著性分析, Origin 2019 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 凝胶强度

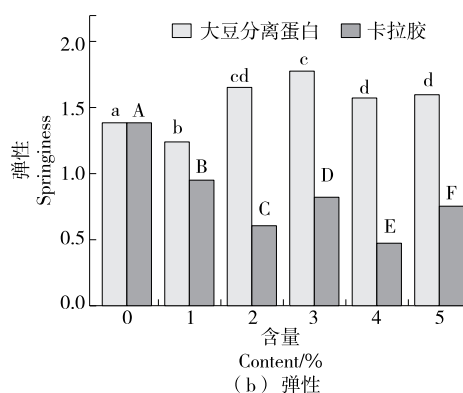
由图 1 可知, 随着大豆分离蛋白含量的增加(1%~5%), MP 凝胶硬度呈先降低后升高的趋势, 而凝胶弹性整体上则先升高后降低。当大豆分离蛋白含量为 1% 时, MP 凝胶硬度最大(1.95 N), 比对照组增加 81.39% ($P<0.05$), 而 MP 凝胶弹性最小, 比对照组减小 10.63% ($P<0.05$); 添加 3% 的大豆分离蛋白, MP 凝胶硬度最低(1.5 N), 但仍显著高于对照组 ($P<0.05$), 此时的凝胶弹性最大。这可能是由于大豆分离蛋白本身具有较好的乳化性能, 可使单位体积凝胶分子数量增加, 促进分子间相互作用^[12]。与大豆分离蛋白不同, 不同含量(1%~5%)的卡拉胶对 MP 凝胶硬度和弹性均有减弱作用。当卡拉胶含量为 1% 时, MP 凝胶弹性较好, 但仍低于对照组 ($P<0.05$); 当卡拉胶含量为 2% 和 4% 时, MP 凝胶硬度低达 0.3 N, 比对照组降低了 72.09%。作为一种凝胶多糖, 卡拉胶具有优良的凝胶特性, 可与蛋白质络合提升产品质量。但试验中, 卡拉胶并未提高泥鳅肌原纤维蛋白的凝胶品质, 与孙泽坤等^[13]的研究结果相反。



字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

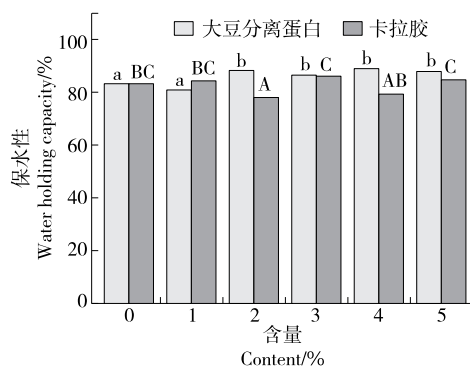
图 1 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶硬度和弹性的影响

Figure 1 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel hardness and springiness of myofibrillar protein from loach



2.2 凝胶保水性

由图 2 可知, 低含量(1%)的大豆分离蛋白不利于 MP 凝胶保水性, 而高含量($\geq 2\%$)的大豆分离蛋白可以



字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)

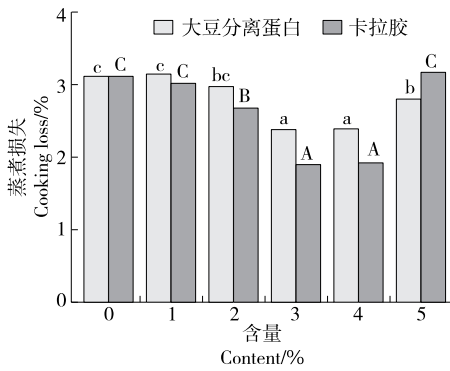
图 2 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶保水性的影响

Figure 2 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel water holding capacity of myofibrillar protein from loach

提高其保水性。当大豆分离蛋白含量为 4% 时, MP 凝胶保水性高达 88.97%, 比对照组提高了 6.67% ($P<0.05$)。这可能是由于大豆分离蛋白可以为周围水分子提供更多的氢键结合位点, 增强氢键和二硫键^[14-15], 使蛋白质交联程度增大。张钰嘉等^[16]也发现大豆分离蛋白可以提高草鱼肌原纤维蛋白凝胶的保水能力。与大豆分离蛋白不同, 卡拉胶的添加对 MP 凝胶保水性的影响没有一定规律。当卡拉胶含量为 2%, 4% 时, MP 凝胶保水性低于对照组, 而在其他添加量时则高于对照组。

2.3 凝胶蒸煮损失

由图 3 可知, 随着大豆分离蛋白和卡拉胶含量(1%~5%)的增加, MP 凝胶蒸煮损失呈先降低后升高的趋势, 且均低于对照组, 表明这两种添加物都可以不同程度地降低 MP 凝胶的蒸煮损失率。这可能是由于在加热过程中, 大豆分离蛋白、卡拉胶及肌原纤维蛋白的结构被充分打开, 分子间相互作用增强, 使得凝胶网络持水能力增强, 从而减少蒸煮损失率^[17]。值得注意的是, 添加相同含量($\leq 4\%$)的大豆分离蛋白及卡拉胶, 后者的 MP 凝胶



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图3 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶蒸煮损失的影响

Figure 3 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel cooking loss of myofibrillar protein from loach

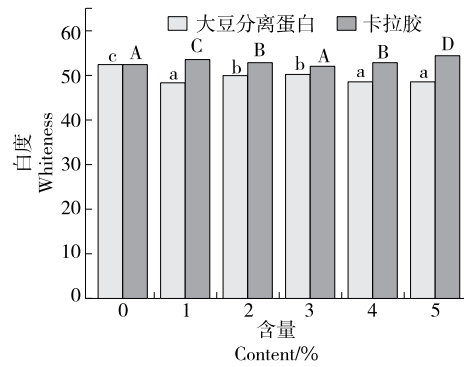
蒸煮损失均较小,说明卡拉胶对MP凝胶蒸煮损失的降低效果比大豆分离蛋白的好。

2.4 凝胶白度

由图4可知,与对照组相比,不同含量(1%~5%)的大豆分离蛋白对MP凝胶白度均有一定的降低作用($P < 0.05$),而卡拉胶对MP凝胶白度整体上呈增大作用。当卡拉胶含量为5%时,MP凝胶白度最大,较对照组增加3.77% ($P < 0.05$)。这主要是因为大豆分离蛋白外观呈暗黄色,而卡拉胶为白色粉末,因而大豆分离蛋白的添加会降低整个体系的白度,而卡拉胶则与之相反。赵泽润等^[12]在研究大豆分离蛋白对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响时也得到类似结论。

2.5 凝胶微观结构

由图5可知,对照组MP凝胶为不均匀的、疏松的网络结构,这是由于肌原纤维蛋白受热而变性展开,又因降温时的聚合作用相互交联形成。随着大豆分离蛋白含量



字母不同表示差异显著 ($P < 0.05$)

图4 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶白度的影响

Figure 4 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel whiteness of myofibrillar protein from loach

的增加,MP凝胶出现较多孔洞,且孔径越来越大。当大豆分离蛋白含量 $\geq 4\%$ 时,疏松的网络结构明显变得更加紧实,可能是由于大豆分离蛋白填充到肌原纤维蛋白凝胶的微观空隙中造成的。由于大分子的填充以及蛋白质分子间的相互作用使得复合凝胶的硬度增大,但网络结构趋向于刚性结构,造成弹性下降^[18]。研究^[19]表明,肌原纤维蛋白凝胶微观结构与其保水性有关,若凝胶网络均匀致密,则凝胶保水性高。这与试验结果相吻合。与大豆分离蛋白不同,添加1%的卡拉胶后,MP凝胶由疏松多孔的结构变为层次分明的网络状;随着卡拉胶添加量的继续增加,MP凝胶又出现规则有序的凝胶网络结构。

2.6 凝胶二级结构

蛋白质的红外光谱特征谱带主要由酰胺I带、酰胺II带和酰胺III带组成。利用PeakFit软件对酰胺I带进行基线校正、去卷积和峰拟合,然后根据各拟合峰位置及峰面积可以对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶二级结构的相对含

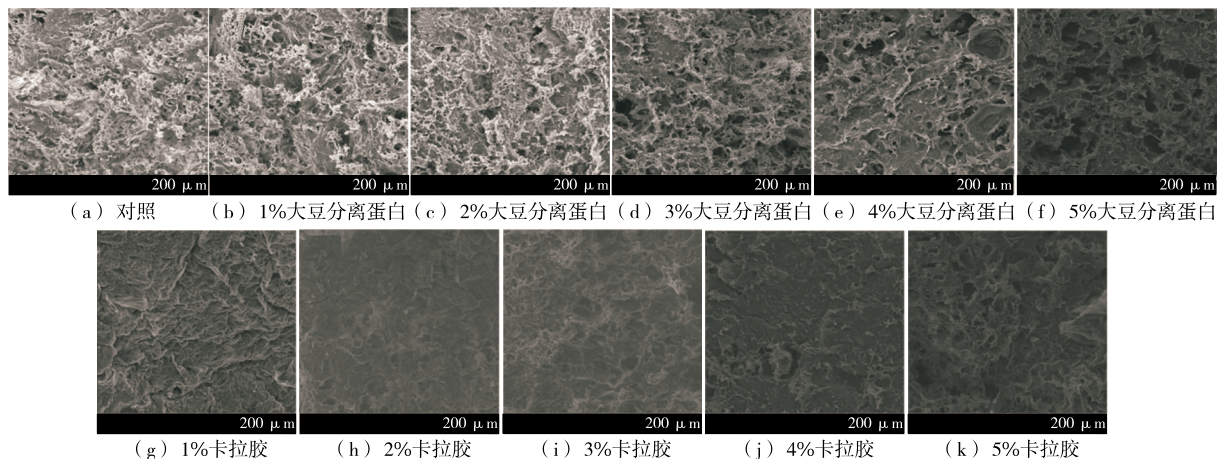


图5 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响

Figure 5 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel microstructure of myofibrillar protein from loach

量进行分析。由图 6(a)可知,与对照组相比,添加大豆分离蛋白后,肌原纤维蛋白凝胶中 β -折叠结构有所下降,仅在添加量为 3%时略高于对照组;无规则卷曲及 α -螺旋结构相对含量均低于对照组,而转角结构则较对照组显著增加。这可能是由于大豆分离蛋白与肌原纤维蛋白复合物在形成凝胶的过程中产生了共价相互作用,促使肌原纤维蛋白的 α -螺旋展开,形成更多的转角结构^[20]。也有可能是因为大豆分离蛋白与肌原纤维蛋白是非共价结合,而大豆分离蛋白本身作为一种蛋白质,对肌原纤维蛋白的二级结构测定结果产生了一定的影响^[21]。

与大豆分离蛋白不同,卡拉胶的添加使肌原纤维蛋

白凝胶中无规则卷曲结构消失, β -折叠结构大幅度上升,表明更多的蛋白质分子之间靠氢键发生交联,蛋白质三维网络结构变得更加有序^[22],见图 6(b)。但 α -螺旋及转角结构的相对含量呈不规则的变化,在添加量为 1%,3%,5%时两者的相对含量都增加,其余添加量时则相反,说明凝胶的质地性质不仅仅与肌原纤维的 β -折叠结构有关,可能还取决于其 α -螺旋和转角结构。梁恽红等^[23]认为,蛋白质中 α -螺旋向有序的 β -折叠转化时,更有利于形成规则有序的凝胶网络结构。因此,推测凝胶网络的有序性与 β -折叠的数量呈正相关,与卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响结果一致。

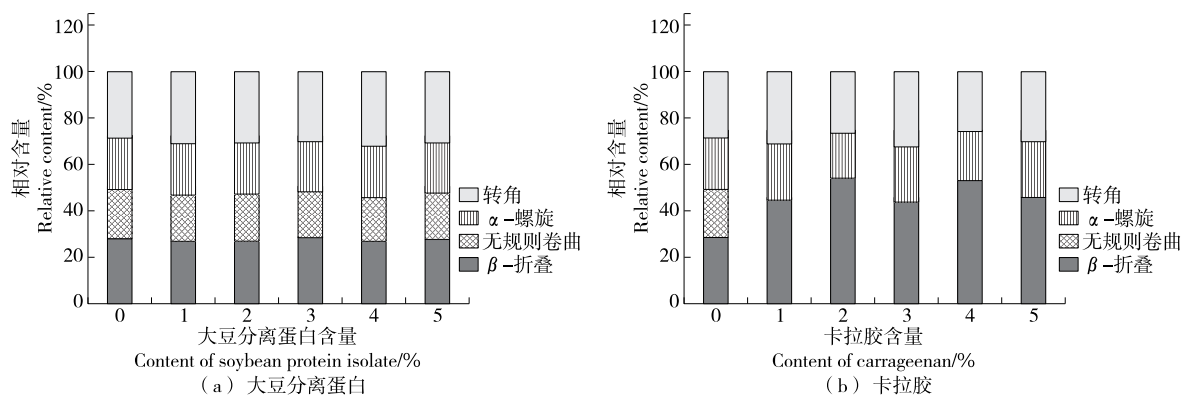


图 6 大豆分离蛋白及卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶二级结构的影响

Figure 6 Effects of soybean protein isolate and carrageenan on gel secondary structure of myofibrillar protein from loach

3 结论

利用大豆分离蛋白和卡拉胶对泥鳅肌原纤维蛋白进行改性,采用质构仪、色差仪、扫描电镜和红外光谱等探究其对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响。结果显示,随着大豆分离蛋白含量的增加,泥鳅肌原纤维蛋白凝胶硬度先降低后升高,弹性先升高后降低,保水性增加,蒸煮损失降低,凝胶网络孔洞越来越大,各二级结构相对含量发生变化;而卡拉胶对凝胶硬度和弹性有减弱作用,对白度及蒸煮损失有较好的改善作用,凝胶网络结构规则有序且无规则卷曲结构消失。

参考文献

- [1] SUN P P, REN Y Y, WANG S Y, et al. Characterization and film-forming properties of acid soluble collagens from different by-products of loach (*Misgurnus anguillicaudatus*) [J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 149: 111844.
- [2] 徐乐俊, 吕永辉, 高宏泉, 等. 中国渔业统计年鉴: 2018[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018: 25.
- [3] 袁晓初, 赵文武, 高宏泉, 等. 中国渔业统计年鉴: 2016[M]. 北

京: 中国农业出版社, 2016: 31.

YUAN X C, ZHAO W W, GAO H Q, et al. China fishery statistical yearbook: 2016[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016: 31.

- [4] 董金和, 陈恩友, 袁晓初, 等. 中国渔业统计年鉴: 2014[M]. 北京: 中国农业出版社, 2014: 31.

DONG J H, CHEN E Y, YUAN X C, et al. China fishery statistical yearbook: 2014[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2014: 31.

- [5] 王静宇, 胡新, 刘晓艳, 等. 肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性及化学作用力研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(8): 300-306.

WANG J Y, HU X, LIU X Y, et al. Advances in heat-induced gel properties and chemical forces of myofibrillar protein gel[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(8): 300-306.

- [6] 胡娟. 脉冲电场对肌原纤维蛋白结构、乳化及凝胶特性的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2021: 1-5.

HU J. Effect of pulsed electric field on the structure, emulsification and gel properties of myofibrillar protein[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021: 1-5.

- [7] 吕旭琴, 周娇娇, 蔡杰, 等. 基于多糖调节肌原纤维蛋白凝胶特性的研究进展[J/OL]. 食品工业科技. (2022-01-17) [2022-03-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100012>.

LU X Q, ZHOU J J, CAI J, et al. Research progress in regulation of the gel properties of myofibrillar protein based on polysaccharides[J/OL].

- Science and Technology of Food Industry. (2022-01-17) [2022-03-23]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021100012>.
- [8] LIN D Q, ZHANG L T, LI R J, 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.
- [9] PAN S, WU S. Effect of chitoooligosaccharides on the denaturation of weever myofibrillar protein during frozen storage [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 65(5): 549-552.
- [10] URBONAITE V, DE JONGH H H J, VAN DER LINDEN E, et al. Water holding of soy protein gels is set by coarseness, modulated by calcium binding, rather than gel stiffness [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 46: 103-111.
- [11] BYLER D M, SUSI H. Examination of the secondary structure of proteins by deconvolved FTIR spectra[J]. Biopolymers, 1986, 25(3): 469-487.
- [12] 赵泽润, 邢通, 赵雪, 等. 大豆分离蛋白添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 49-56.
- ZHAO Z R, XING T, ZHAO X, et al. Effects of soy protein isolate content on the gelation properties of low-salt wooden chicken breast meat paste[J]. Food Science, 2022, 43(6): 49-56.
- [13] 孙泽坤, 谢云飞, 于航, 等. 魔芋胶与卡拉胶复配优化驴头骨肉冻凝胶特性[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(1): 146-152.
- SUN Z K, XIE Y F, YU H, et al. Optimization of meat jelly properties from donkey skull by konjac gum / carrageenan mixtures[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(1): 146-152.
- [14] NIU H L, XIA X F, 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, 2017, 242: 188-195.
- [15] LI J G, CHEN Y H, DONG X P, et al. Effect of chickpea (*Cicer arietinum* L.) protein isolate on the heat-induced gelation properties of pork myofibrillar protein[J]. Journal Science of Food and Agriculture, 2020, 101(5): 2 108-2 116.
- [16] 张钰嘉, 万杨卓群, 石尚轩, 等. 磷酸盐一大豆分离蛋白联合处理对草鱼肌原纤维蛋白凝胶化的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(2): 21-26.
- ZHANG Y J, WAN Y Z Q, SHI S X, et al. Effects of combined treatment of phosphates and soybean protein isolate on the gelation properties of myofibrillar proteins from grass carp[J]. Meat Research, 2022, 36(2): 21-26.
- [17] 张立彦, 胡嘉颖, 王仕钰. 食盐添加量对微波加热鸡胸肉糜凝胶品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(3): 183-188.
- ZHANG L Y, HU J Y, WANG S Y. Effects of the amount of added salt on gel properties of microwave-heated chicken breast mince[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(3): 183-188.
- [18] 张蒙琪. 鸡蛋蛋白与大豆分离蛋白间相互作用及其凝胶特性的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 26-38.
- ZHANG M Q. The research of interaction between hen egg proteins and soybean protein isolate and its gelation properties[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 26-38.
- [19] 胡爱军, 于辉, 郑婕, 等. 木薯淀粉对泥鳅肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 天津科技大学学报, 2020, 35(4): 21-30.
- HU A J, YU H, ZHENG J, et al. Effect of cassava starch on gel properties of loach myofibrillar protein[J]. Journal of Tianjin University of Science & Technology, 2020, 35(4): 21-30.
- [20] 叶贝贝. 白鲢鱼/金线鱼混合肌原纤维蛋白及肌球蛋白热聚集的作用机制[D]. 锦州: 渤海大学, 2019: 22-23.
- YE B B. Mechanism of thermal aggregation of mixed myofibrillar protein and myosin from *Hypophthalmichthys molitrix* and *Nemipterus virgatus*[D]. Jinzhou: Bohai University, 2021: 22-23.
- [21] 张倩. 大豆蛋白/多糖复合凝胶缓释体系构建与表征[D]. 无锡: 江南大学, 2021: 35-36.
- ZHANG Q. Preparation and characterization of soybean protein/polysaccharide composite gels slow-release system [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021: 35-36.
- [22] 汤嘉惠. κ -卡拉胶/ K^+ 凝胶体系对鱼糜性质和结构的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2020: 31-32.
- TANG J H. Effects of κ -carrageenan/ K^+ gel system on the properties and structure of surimi[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2020: 31-32.
- [23] 梁辉红, 卢涵, 张香美. 蛋白二、三级结构对鱼糜凝胶质构和持水力的影响及其测定方法研究进展[J]. 东北农业大学学报, 2021, 52(10): 87-96.
- LIANG Y H, LU H, ZHANG X M. Research progress on the effects of protein secondary and tertiary structures on texture and water-holding capacity of surimi gel and protein structure determination methods[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(10): 87-96.

(上接第 27 页)

- [21] KOLAWOLE O F, AKINPELU S C. Physical, functional, pasting and thermal properties of flours and starches of six Nigerian rice cultivars[J]. Food Hydrocolloid, 2015, 44: 478-490.
- [22] 李湘, 郭东权, 陈云堂, 等. 电子束辐照对大米营养和蒸煮品质的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(15): 251-257.
- LI X, GUO D Q, CHEN Y T, et al. Effect of electron beam irradiation on nutritive and cooking qualities of rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(15): 251-257.
- [23] 周小理, 肖文艳, 周一鸣. 不同品种荞麦糊化特性与直链淀粉含量关系的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(11): 37-40.
- ZHOU X L, XIAO W Y, ZHOU Y M. Study on relationship between pasting properties and amylose content of different buckwheat varieties[J]. Food Science, 2008, 29(11): 37-40.
- [24] 杜春微, 高梦晗, 刘庆, 等. 黄米品质特性研究[J]. 食品工业, 2018, 39(2): 83-87.
- DU C W, GAO M H, LIU Q, et al. Quality characteristics of proso millet[J]. The Food Industry, 2018, 39(2): 83-87.