郑玉凤, 喻丹丹, 刘羿伶, 等. 油茶籽粕蛋白对白鲢鱼糜凝胶特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 124−130. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080108

ZHENG Yufeng, YU Dandan, LIU Yiling, et al. Effects of *Camellia oleifera* Seed-Cake Crude Protein on the Gel Properties of Silver Carp Surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 124−130. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080108

·研究与探讨·

油茶籽粕蛋白对白鲢鱼糜凝胶特性的影响

郑玉凤[1], 喻丹丹[1], 刘羿伶[1], 张晨曦[1], 陈兆媛[1], 肖益东[2], 胡　婷[1,*]

（1.黄冈师范学院生物与农业资源学院, 经济林木种质改良与资源综合利用湖北省重点实验室, 大别山特色资源开发湖北省协同创新中心, 湖北黄冈 438000;
2.武汉商学院食品科技学院, 湖北武汉 430056）

摘　要: 为了明确油茶籽粕蛋白（*Camellia oleifera* seed-cake crude protein，COCP）对白鲢鱼糜凝胶特性的影响，本研究以不同添加量的 COCP 为变量，测定白鲢鱼糜凝胶持水性、蒸煮损失率、白度值、质构特性及化学键含量，并利用傅里叶变换红外光谱仪和扫描电子显微镜进一步探究 COCP 对鱼糜凝胶蛋白质二级结构及微观结构的影响。研究结果表明：COCP 添加量为 1.5% 时，鱼糜凝胶的持水性和质构特性均达到最佳水平，其中持水性为 81.12%±0.52%，硬度为 3564.49±24.09 g，弹性为 0.92±0.01 mm，内聚性为 0.72±0.02，咀嚼性为 2378.48±115.67 mJ，同时蒸煮损失率降至最低，为 14.33%±0.88%。COCP 的添加增强了凝胶蛋白二级结构的稳定性。与纯鱼糜组相比，添加 1.5%COCP 后，鱼糜凝胶的疏水相互作用和总巯基含量显著增加（P<0.05），微观结构更加有序，凝胶性能显著提升，但此时白度值略有下降。综上所述，COCP 添加量为 1.5% 时，可显著改善鱼糜凝胶的特性。

关键词: 油茶籽粕蛋白, 白鲢鱼糜, 凝胶特性, 微观结构

中图分类号: TS254.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0124−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080108　　本文网刊:

Effects of *Camellia oleifera* Seed-Cake Crude Protein on the Gel Properties of Silver Carp Surimi

ZHENG Yufeng[1], YU Dandan[1], LIU Yiling[1], ZHANG Chenxi[1], CHEN Zhaoyuan[1], XIAO Yidong[2], HU Ting[1,*]

（1.College of Biology and Agricultural Resources, Huanggang Normal University, Hubei Key Laboratory of Economic Forest Germplasm Improvement and Resources Comprehensive Utilization, Hubei Collaborative Innovation Center for the Characteristic Resources Exploitation of Dabie Mountains, Huanggang 438000, China;
2.College of Food Science and Technology, Wuhan Business University, Wuhan 430056, China）

Abstract: To clarify the effect of *Camellia oleifera* seed-cake crude protein (COCP) on the gel properties of silver carp surimi, this study incorporated COCP at different concentrations and measured the gel's water holding capacity, cooking loss, whiteness, texture profile, and chemical bond content. Fourier-transform infrared spectroscopy and scanning electron microscopy were used to further examine the effects of COCP on the secondary structure and microstructure of the gel proteins. The addition of 1.5% COCP resulted in an optimal water holding capacity (81.12%±0.52%) and texture properties (hardness 3564.49±24.09 g; elasticity 0.92±0.01 mm; cohesiveness 0.72±0.02; and chewiness 2378.48±115.67 mJ). Also, the cooking loss rate (14.33%±0.88%) was the lowest. Fourier-transform infrared spectroscopy revealed that the stability of the secondary structure of gel protein was enhanced by the addition of COCP. The hydrophobic interactions and total sulfhydryl content of the surimi gel were significantly increased with the addition of 1.5% COCP compared to pure surimi. This resulted in a more ordered microstructure and improved gel properties, although there was a slight decrease in white-

收稿日期: 2025−08−11

基金项目: 经济林木种质改良与资源综合利用湖北省重点实验室开放基金项目（202414304）; 黄冈师范学院博士基金项目（204202506004）; 湖北省大学生创新创业训练计划项目（S202510514033）。

作者简介: 郑玉凤（2003−）, 女, 本科, 研究方向: 鱼糜制品的加工及保鲜, E-mail: 2697173265@qq.com。

*** 通信作者:** 胡婷（1988−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 鱼糜制品的加工及保鲜, E-mail: 843076915@qq.com。

ness. In conclusion, the addition of 1.5% COCP significantly improved the properties of the surimi gel.

Key words: *Camellia oleifera* seed-cake crude protein; silver carp surimi; gel properties; microstructure

鱼糜制品是水产加工领域的重要品类，具有营养价值高、低脂味美、食用便捷等特点[1]。白鲢鱼是我国淡水鱼养殖产量最高的品种之一，凭借其来源广泛、成本低廉的优势，成为鱼糜制品加工的重要原料。白鲢鱼糜是以白鲢鱼为主要原料，经过一系列加工处理后得到的糜状鱼肉制品，是许多鱼糜制品的生产原料，其质量直接影响鱼糜制品的品质。多项研究表明白鲢鱼糜存在许多固有缺陷[2]，加工过程中易发生蛋白变性[3]，严重制约了其加工生产路径的开发。

油茶籽，又称山茶籽，是油茶树（*Camellia oleifera*）的果实。2020 年，中国油茶总种植面积为 446 万 hm^2，油茶籽产量达到 314 万吨[4]。而油茶籽粕（*Camellia oleifera* seed-cake，COS）作为油茶籽经榨油后的副产物，产率占其自身总量 77% 以上[5]，但其综合利用率不足 30%，主要用于低端饲料或肥料[6]，这造成了资源的极大浪费。COS 富含蛋白质（含量可达 30%~40%）、膳食纤维、多酚等功能性成分[7]，其中油茶籽粕蛋白（COCP）氨基酸组成较为均衡，必需氨基酸含量丰富，具有良好的凝胶性、乳化性和持水性等功能特性[8]。植物蛋白能够改善鱼糜加工过程中凝胶易劣化、持水性低等缺陷，提高鱼糜制品的品质。目前已有研究表明大豆蛋白[9−10]、小麦蛋白[11]等植物蛋白，可改良鱼糜制品凝胶品质，但以 COCP 为鱼糜制品添加物的研究尚未见相关报道。

本研究以 COCP 和白鲢鱼糜作为实验研究对象。在前期实验中，利用碱溶酸沉法从 COS 中提取蛋白质，并按不同添加量（0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%）与白鲢鱼糜混合制备凝胶，后期通过探究鱼糜凝胶的持水性、蒸煮损失率等宏观品质指标以及化学作用力、蛋白质二级结构等分子作用机制和微观结构特征，确定改善鱼糜凝胶特性的 COCP 最佳添加量。该研究不仅能将 COCP 开发为新型食品添加剂，实现 COS 资源的高值化开发，还为推动白鲢鱼糜制品深度加工奠定理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

冷冻鱼糜（AAA 级白鲢鱼）　洪湖市井力水产食品有限公司；COS　麻城市五林油茶专业合作社；氢氧化钠、盐酸、溴化钾、福林酚　国药集团化学试剂有限公司；三氨基甲烷、乙二胺四乙酸、2.5% 戊二醛磷酸缓冲液、乙酸异戊酯　上海创赛科技有限公司。

Nicolet6700 傅里叶红外光谱仪　赛默飞世尔科技分子光谱部；722S 可见分光光度计　上海菁华科技仪器有限公司；CR-10 色差计　柯尼卡美能达公司；HR7625 食物调理机　中国香港飞利浦家庭电器有限公司；TMS-PRO 质构仪　美国 FTC 公司；蔡司 sigma300 扫描电子显微镜　德国卡尔·蔡司股份公司。

1.2　实验方法

1.2.1　COCP 的提取　在料液比为 1∶20（g/mL）的条件下，用 NaOH（1 mol/L）溶液调节含粉碎过筛（80 目）后 COS 溶液的 pH 至 10，置于 50 ℃ 磁力搅拌 1 h 获得蛋白提取液[12−13]，在提取液中加入双氧水（体积分数为 4%），继续搅拌 1 h 进行脱色处理[14]，经离心（4000 r/min、20 min）后向上清液中加入盐酸（1 mol/L）调节 pH 到 4.5，二次离心（4000 r/min、20 min）后收集试管底部沉淀，依次采用无水乙醇和重蒸水洗涤，随后置于冷冻干燥机中干燥处理，获得 COCP。通过 Lowry 法测定 COCP 中蛋白质含量为 71.80%±0.04%。

1.2.2　复合凝胶的制备　称取白鲢鱼糜 5 份（200 g/份），使用食物调理机慢速空斩 1 min，接着加入白鲢鱼糜重量 2.5% 的食盐快速盐斩 30 s，再以白鲢鱼糜质量为基准分别添加不同比例 COCP（0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%），并调节含水量至 80%，继续斩拌 30 s 后灌肠，经恒温煮制（40 ℃ 1 h，90 ℃ 30 min）后迅速放入冰水冷却 20 min。

1.2.3　持水性的测定　称取 3 g 切成薄片的凝胶样品（W_1），将其用双层滤纸包裹后在 4 ℃ 下进行离心（3500 r/min、15 min），待离心后复称脱水凝胶重量（W_2），最后按照吴芳等[15] 的公式计算。

$$\text{持水性}(\%) = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \qquad \text{式（1）}$$

1.2.4　蒸煮损失率的测定　将鱼糜凝胶切成 0.5 cm 厚度的薄片，并称取 3 g 样品（M_1）放入蒸煮袋密封，在 90 ℃ 的条件下煮制 30 min 后进行复称（M_2），最后按照郑赵敏等[16] 的公式进行计算。

$$\text{蒸煮损失率}(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \qquad \text{式（2）}$$

1.2.5　白度值的测定　将鱼糜凝胶切成 3 cm 厚的圆柱状，并用 CR-10 色差计测定亮度值（L^*）、红度值（a^*）和黄度值（b^*），最后按照郑赵敏等[16] 的公式进行计算。

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

1.2.6　质构特性分析　参照 Liang 等[17] 方法略作修改，将凝胶制样切成厚度为 2 cm 的圆柱体，利用 TMS-PRO 质构仪测定鱼糜凝胶的各项指标，选用 P/5R 探头，设定参数：检测前速度 5 mm/s、检测中速度 0.5 mm/s、检测后速度 0.5 mm/s，每个样品平行测定不少于 8 次。

1.2.7 感官分析 根据胡曼子等[18]的感官分析评分表，选取 10 位食品专业同学分别对添加不同含量 COCP 的鱼糜凝胶制品进行感官评价。

1.2.8 化学作用力的测定 称取 2 g 凝胶样品，分别与 A、B、C、D 液混合（按吴芳等[15]的方式进行制备），均质，常温放置 2 h，4 ℃ 下 8000 r/min 离心 15 min。最终用 Lowry 法测定上层清液中蛋白质含量[19]，将待测样液在 750 nm 处所得吸光值代入牛血清蛋白标曲（Y=0.1131X+0.009 R^2=0.97）进行计算，得到各样液中蛋白质含量。各化学作用力用蛋白质在各溶液中溶解的含量差表示：离子键：B-A；氢键：C-B；疏水相互作用：D-C。

1.2.9 总巯基含量的测定 按胡熠等[20]的方法，并略作修改。配制缓冲液依据吴芳等[15]的方法。样品与缓冲液比例为 1∶10，将均质后的样品在常温条件下搅拌 2 h 后，随后在 11000 r/min（4 ℃）的条件下离心 15 min。按照上清液与 DTNB（10 mmol/L）比例为 10∶1 进行混合，置于 40 ℃ 下水浴 25 min 使其充分反应，反应结束后在 412 nm 条件下测定吸光度，总巯基含量按公式计算：

$$总巯基含量(nmol\cdot mg^{-1}pro)=\frac{A_{412\,nm}-A_{空白}}{13600\times\rho}\times11\times10^{6} \quad 式（4）$$

式中，ρ 为蛋白溶液质量浓度，mg·mL^{-1}；13600 为巯基摩尔消光系数，L·mol^{-1}·cm^{-1}；11 为稀释倍数；$A_{空白}$为缓冲液与 DTNB 混合反应后的空白体系吸光度。

1.2.10 蛋白质二级结构的测定 按 Zhou 等[21]的方法，并略作修改。取 1~2 mg 经冷冻干燥处理后的凝胶样品与 100 mg 置于 120 ℃ 下干燥后的溴化钾研磨均匀，压片后用 FTIR 对样品进行光谱扫描。扫描条件为：分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 64，波数 4000~500 cm^{-1}。利用 OMNIC 8.2 软件对红外光谱曲线进行平滑处理，之后利用 Peak Fit Version 4.12 软件去卷积，计算各二级结构的相对百分比。

1.2.11 微观结构 参考李雨琦[22]的实验方法处理样品。用冷冻干燥机干燥样品后，将其固定在扫描电镜样品台上，表面喷金后进行观察。扫描电镜加速电压 5 kV。

1.3 数据处理

若无特殊说明实验均重复三次，绘图软件采用 Excel 2021、Origin 2021，SPSS Statistics 26 软件进行 ANOVA 单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶持水性及蒸煮损失率的影响

如图 1(a)所示，随 COCP 添加量的增加，鱼糜凝胶的持水性呈现先升后降的趋势，而蒸煮损失率则呈先降后升趋势（图 1(b)）。在 1.5% 添加量时，持水性达到最高的同时蒸煮损失率最低，相较空白组均具有显著性差异（P<0.05）。这可能是由于 COCP 和肌原纤维蛋白能各自形成独特的网络结构，并能相互交织在一起形成刚性更强的网状结构[23]，减少水分流失。这种结构能够让鱼糜凝胶更好地保持水分[24]，减少蒸煮时水分和可溶性物质的流失，降低蒸煮损失率；但当体系内 COCP 超过一定限度时，可能会破坏鱼糜凝胶内部的网络结构，阻碍肌原纤维蛋白（MP）的交联[25]，使鱼糜凝胶持水能力变弱，蒸煮损失率升高。

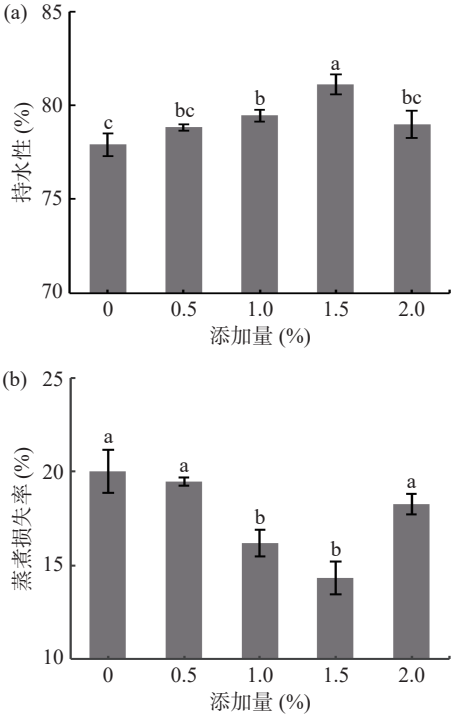


图 1 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶持水性(a)及蒸煮损失率(b)的影响

Fig.1 Effect of different addition amounts of COCP on the water-holding capacity (a) and cooking loss rate (b) of silver carp surimi gel

注：不同小写字母表示差异显著（P<0.05），图 2~图 5 同。

2.2 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶白度值的影响

外源添加物本身的色泽会影响凝胶制品外观[26]。而视觉特征是评价鱼糜制品品质的核心，色泽变化直

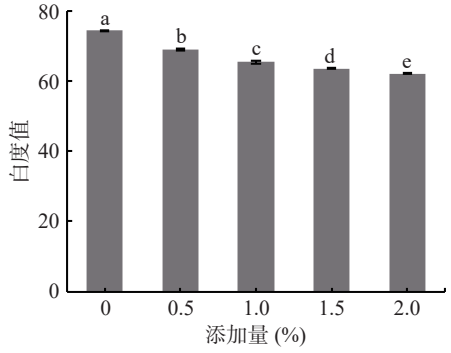


图 2 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶白度值的影响

Fig.2 Effect of different addition amounts of COCP on the whiteness value of silver carp surimi gel

接关系到产品的可接受程度[27−28]。COCP 添加量对白度值的影响见图 2。与空白组相比，添加 COCP 的实验组白度值均出现显著降低趋势（P<0.05）。这一现象归因于 COCP 本身可能含有较多色素类物质，未脱色前呈现棕褐色，脱色后呈现浅橙色，当其添加到白鲢鱼糜中，这些色素会吸收部分可见光导致凝胶制品白度值降低[29]。

2.3　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶质构（TPA）性能的影响

从表 1 可以看出，随着 COCP 添加量的增加，鱼糜凝胶的硬度、弹性、内聚力和咀嚼性均呈现先升高后降低的变化趋势，在添加量为 1.5% 时达到最大值，相较空白组具有显著性差异（P<0.05），与添加量为 1.0% 的实验组差异不显著（P>0.05），其主要原因是适量 COCP 能够较均匀地填充到鱼糜凝胶网络结构的空隙中，提高三维网络结构的致密性，从而使鱼糜凝胶硬度、弹性、内聚力和咀嚼性变大[30]。当添加量超过 1.5%，硬度、弹性和咀嚼性又出现显著下降趋势（P<0.05），这是因为 COCP 浓度超过一定限度，阻碍 MP 的交联，破坏鱼糜凝胶的三维网络结构[25]，使得鱼糜凝胶 TPA 性能整体下降。

表 1　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶 TPA 性能的影响

Table 1　Effect of different addition amounts of COCP on the TPA characteristics of silver carp surimi gel

添加量(%)	硬度(g)	弹性(mm)	内聚力	咀嚼性(mJ)
0	2743.11±22.58^{c}	0.89±0.01^{c}	0.67±0.01^{b}	1857.43±94.89^{d}
0.5	3486.76±78.59^{a}	0.91±0.01^{ab}	0.68±0.03^{ab}	2057.71±87.35^{c}
1.0	3524.97±27.13^{a}	0.91±0.01^{ab}	0.70±0.03^{ab}	2270.76±70.06^{ab}
1.5	3564.49±24.09^{a}	0.92±0.01^{a}	0.72±0.02^{a}	2378.48±115.67^{a}
2.0	3362.65±47.38^{b}	0.90±0.00^{bc}	0.70±0.01^{ab}	2170.13±11.85^{bc}

注：同列不同小写字母表示差异显著（P<0.05），表2同。

2.4　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶感官品质的影响

表 2 表明，相比空白组，当 COCP 添加量为 0.5%~1.5% 时，鱼糜凝胶感官品质中的弹性和滋味指标得分均表现为显著增加趋势（P<0.05），但当添加量超过 1.5% 时弹性得分出现显著下降（P<0.05），这一结果与 TPA 中弹性指标变化结果相符。相较空白组，外观得分呈显著下降趋势（P<0.05），而气味得分无显著性变化（P>0.05）。弹性与滋味得分逐渐增大是由于 COCP 具有良好的持水性和乳化性，在鱼糜体系起到防止脂肪聚集和析出的作用[31]，减少凝胶内部的缺陷和空隙，增大凝胶弹性，从而提升凝胶弹性得分；而鱼糜凝胶口感滋味与凝胶弹性相关，弹性越好，咀嚼口感紧实均匀，滋味释放更充分，因此滋味得分增大。但若体系中 COCP 含量超过一定限度，阻碍 MP 之间的相互靠近和交联，导致蛋白分子之间的交联结构变得松散[32]，使得凝胶弹性得分显著下降（P<0.05）。同时由于 COCP 自身颜色较深，使得凝胶外观得分随添加量的增多而下降。综合上述结果使得总分在添加量为 1.5% 时最大。

2.5　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶化学作用力的影响

图 3 表明，随 COCP 的添加，鱼糜凝胶中离子键和氢键水平相较空白组没有显著变化（P>0.05），而疏水相互作用呈现先上升后下降的趋势，在添加量为 1.5% 时最大。这可能是因为：当适量添加 COCP 时，外源添加蛋白在凝胶体系中会发生构象变化，内部疏水基团逐渐暴露，使疏水相互作用含量上升显著高于空白组（P<0.05），通常表现为鱼糜凝胶的硬度、弹性增大[33]，这与 TPA 性能研究结果一致。而当 COCP 添加量过多时，难以形成均匀网络，引起疏水相互作用减弱，导致形成的凝胶网络结构稳定性较差，凝胶强度也显著降低[34]。

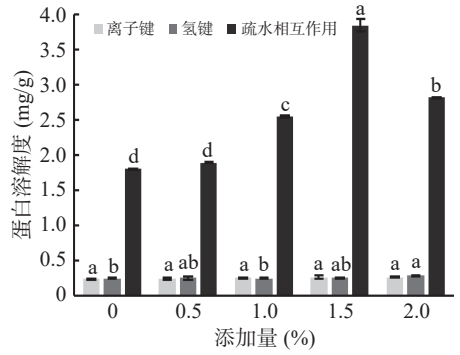


图 3　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶化学作用力的影响

Fig.3　Effect of different addition amounts of COCP on chemical forces of silver carp surimi gel

2.6　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶总巯基含量的影响

如图 4 所示，随着 COCP 添加量的增加，混合溶液中总巯基含量呈现先增加后减少的趋势，在 COCP 添加量为 1.5% 时达到最大。这可能是因为适量的

表 2　不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶感官品质的影响

Table 2　Effect of different addition amounts of COCP on the sensory evaluation of silver carp surimi gel

添加量(%)	外观(分)	气味(分)	弹性(分)	滋味(分)	总分(分)
0	17.125±0.354^{a}	7.500±0.535^{a}	22.500±0.926^{d}	24.750±0.707^{d}	71.875±1.126^{d}
0.5	15.875±0.354^{b}	7.250±0.463^{a}	24.625±0.916^{c}	25.375±0.744^{c}	73.125±1.553^{c}
1.0	15.250±0.463^{c}	7.375±0.518^{a}	26.250±0.463^{b}	26.375±0.518^{b}	75.250±0.886^{b}
1.5	15.110±0.333^{c}	7.625±0.518^{a}	27.625±0.518^{a}	27.750±0.463^{a}	78.250±1.035^{a}
2.0	10.375±0.518^{d}	7.500±0.535^{a}	25.750±0.463^{b}	27.250±0.463^{a}	70.875±0.641^{d}

COCP 使白鲢鱼糜肌球蛋白三级结构发生变化，促使蛋白分子变性展开，从而暴露出更多的巯基，使总巯基被检测的可能性增大[35]。然而，过量添加 COCP，会导致体系中已经暴露的巯基被再次包埋于致密网络结构中，导致总巯基有效检出量降低，最终引起总巯基含量的显著下降（P<0.05）。

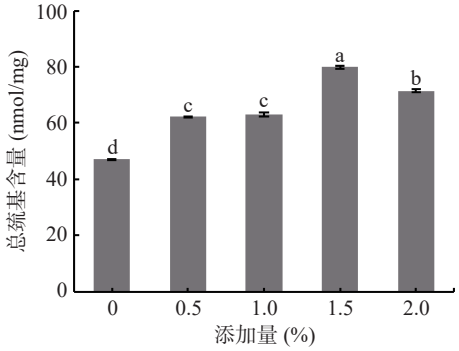


图 4 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶总巯基含量的影响

Fig.4 Effect of different addition amounts of COCP on the content of total sulfhydryl groups of silver carp surimi gel

2.7 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

图 5(a)显示，添加 COCP 的实验组并未出现新特征峰或特征峰位移等现象，说明体系内未形成新物质，由于酰胺 I 带对蛋白质二级结构更为敏感，所以将其作为主要研究目标，确定α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲的变化[36]。图 5(b)为鱼糜凝胶蛋白质二级结构相对含量的变化。结果显示 COCP 添加量

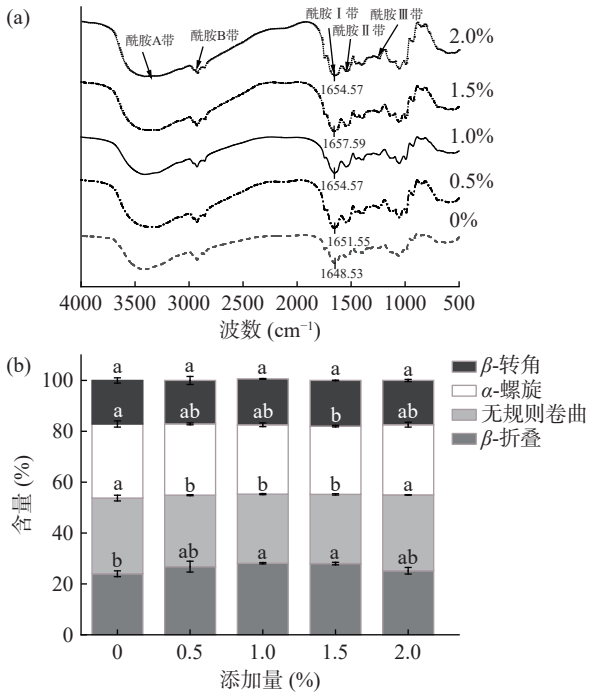


图 5 不同添加量的 COCP 凝胶红外光谱(a)和蛋白质二级结构含量(b)

Fig.5 Infrared spectra of COCP gels with different additive amounts (a) and the content of protein secondary structure (b)

为 1.5% 的实验组 β-折叠相对含量显著高于空白组（P<0.05），无规则卷曲和α-螺旋相对含量较空白组显著降低（P<0.05）。各组间 β-转角相对含量无显著性变化（P>0.05）。依据 Walayat[37] 研究，出现这一现象可归因于所添加的外源蛋白与 MP 产生相互作用，使α-螺旋相对含量减少，促使 MP 展开，形成的 β-折叠相互作用增强，使得凝胶品质提升。同时严浩[33] 研究表明 β-折叠的含量与肉制品硬度呈正相关，这一结果与前文 TPA 性能结果相符，均表明在 COCP 添加浓度为 1.5% 时凝胶品质有所提升。

2.8 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶微观结构的影响

凝胶内部的有序程度与结构性能呈正相关[38]。如图 6 呈现的结果所示，随着 COCP 的添加，鱼糜凝胶内部有序程度逐渐增大，网络结构更致密、孔径更小（如图 6(A)~(D)），说明适量添加 COCP 能填充鱼糜凝胶空间网络孔洞，使得凝胶基质密度增大[27]，促进致密凝胶结构的形成。但当添加量超过一定限度，内部结构无序性增大，这是因为 COCP 具有良好的乳化能力，可乳化 MP，当 MP 被乳化过多，可参与形成凝胶网络的 MP 则相对减少，故此凝胶网络孔洞变大[39]。

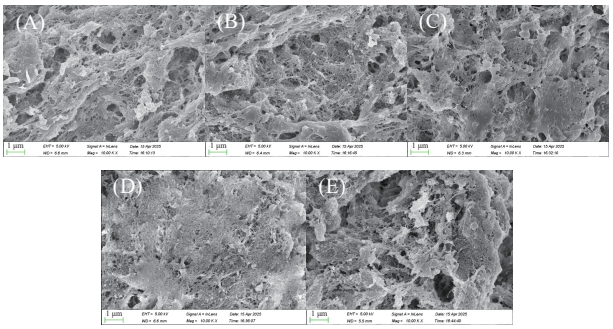


图 6 不同添加量的 COCP 对白鲢鱼糜凝胶微观结构的影响

Fig.6 Effect of different addition amounts of COCP on the microstructure of silver carp surimi gel

注：A~E 分别表示 COCP 添加量为 0%、0.5%、1.0%、1.5%、2.0%。

3 结论

本研究探讨了添加 COCP 对白鲢鱼糜凝胶性质的影响。添加 1.5%COCP 后鱼糜凝胶持水性以及蒸煮损失率均有所改善，这可能是由于 COCP 和 MP 共同形成更致密的网络结构，减少了水分流失。当 COCP 添加量为 1.0% 和 1.5% 时，鱼糜凝胶的弹性、硬度、内聚力和咀嚼性均显著提升，与感官评价结果一致，这是因为适量 COCP 能较均匀地填充到鱼糜凝胶网络空隙中，提高三维网络结构的致密性。此外，COCP 中含有的色素导致鱼糜凝胶白度有所下降。从作用机制层面来看，添加 1.5%COCP 使鱼糜凝胶的疏水相互作用和总巯基含量显著提高，说明外源添加蛋白在凝胶体系中会发生构象变化，使内部疏水基团暴露，同时促使体系中蛋白分子变性展开，暴

露出更多巯基，增大总巯基被检测的可能性。红外光谱结果显示添加 COCP 后未出现新特征峰，但二级结构分析表明，相较于空白组，添加 1.0% 和 1.5% COCP 时，β-折叠含量显著上升，无规则卷曲减少，提升了蛋白二级结构稳定性。微观结构观察也证实，COCP 填充使凝胶结构更加均匀致密。综上，在 0%~2.0% 的添加范围内，1.5%COCP 可使鱼糜凝胶展现出最佳的凝胶特性，其疏水相互作用和总巯基含量最大，微观结构最为致密均匀。因此，适量添加 COCP 能有效改善白鲢鱼糜凝胶品质，为其凝胶特性改良提供理论依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

［1］ TAO Y, CHEN X, LU Y F, et al. Masterly substitution of plant proteins can achieve acceptable sensory and nutritional attributes in meat-reduced surimi gel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 208(9): 1−12.

［2］ 李圣威, 韩冰, 张萌, 等. 淡水鱼鱼糜凝胶品质影响因素的研究进展[J]. 中国调味品, 2024, 49(6): 213−220. ［LI S W, HAN B, ZHANG M, et al. Research progress on factors influencing quality of freshwater fish surimi gel[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 213−220.］

［3］ 傅振坤. 射频热诱导白鲢鱼糜凝胶特性的研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2024. ［FU Z K. Research on the characteristics of radio frequency induced silver carp surimi (*Hypophthalmichthys molitrix*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024.］

［4］ 秦小霞, 甘海清, 佘高进, 等. 油茶籽粕的活性成分、生物学功能及其在畜禽生产中的应用研究进展[J]. 畜牧兽医学报, 2025, 56(5): 2070−2081. ［QIN X X, GAN H Q, SHE G J, et al. Research progress in active components, biological functions of *Camellia* seed meal and its applications in livestock and poultry production[J]. Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica, 2025, 56(5): 2070−2081.］

［5］ LI G H, MA L, YAN Z P, et al. Extraction of oils and phytochemicals from *Camellia oleifera* seeds: trends, challenges, and innovations[J]. Processes, 2022, 10(8): 1489−1489.

［6］ 杨志友, 赖琼玮, 谭传波, 等. 油茶籽粕综合利用研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2020, 45(11): 138−142. ［YANG Z Y, LAI Q W, TAN C B, et al. Research progress on comprehensive utilization of *Camellia s*eed meal[J]. Grain Science and Technology and Economy, 2020, 45(11): 138−142.］

［7］ SARMAH K, DAS P, SAIKIA G K, et al. Biochemical characterization of tea (*Camellia* spp) seed oil cake[J]. Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences, 2018, 7(9): 45−49.

［8］ 王宗成, 秦源, 刘艳芳, 等. 油茶籽粕中化学成分与提取工艺研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 260−265. ［WANG Z C, QIN Y, LIU Y F, et al. Review on study of chemical constituents and extraction process of tea seed meal[J]. The Food Industry, 2019, 40(5): 260−265.］

［9］ GAO L Y, YOSHIDA A, LIU Y J, et al. Quality improvement of threadfin bream (*Nemipterus virgatus*) surimi-gel using soy protein as a natural food additive[J]. Food Chemistry, 2024, 460(P1): 140423.

［10］ 刘黄鑫, 朱凯, 吴俊灵, 等. 菜籽蛋白-大豆分离蛋白复合凝胶的制备及性能表征[J]. 粮食与油脂, 2025, 38(3): 74−80. ［LIU H X, ZHU K, WU J L, et al. Preparation and characterization of rapeseed protein-soy protein isolate composite gel[J]. Cereals & Oils, 2025, 38(3): 74−80.］

［11］ 于繁千惠, 孔文俊, 韦依侬, 等. 小麦蛋白和谷氨酰胺转氨酶对 120 ℃ 高温处理鱼糜凝胶特性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 81−85. ［YU F Q H, KONG W J, WEI Y N, et al. Effects of wheat protein and transglutaminase on gel properties of surimi heated at 120 ℃ high temperature[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(21): 81−85.］

［12］ 熊拯, 陈敏娥, 张炳亮. 茶籽粕蛋白质提取工艺及功能特性研究[J]. 粮油食品科技, 2013, 21(1): 27−30. ［XIONG Z, CHEN M E, ZHANG B L. Research on extraction of protein from *Camellia oleifera* seed meal and the functional properties[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2013, 21(1): 27−30.］

［13］ 丁丹华, 彭光华, 夏辉, 等. 油茶籽粕蛋白提取工艺研究[J]. 食品科学, 2010, 31(8): 102−105. ［DING D H, PENG H H, XIA H, et al. Orthogonal array design for extraction optimization of protein from *Camellia oleifera* seed meal[J]. Food Science, 2010, 31(8): 102−105.］

［14］ 何玮, 郑庆丽, 陈健, 等. 双氧水脱色对油茶粕蛋白结构和功能特性的影响[J]. 热带作物学报, 2019, 40(4): 766−772. ［HE W, ZHENG Q L, CHEN J, et al. Effect of decolorization with hydrogen peroxide on the structure and functional properties of protein from *Camellia oleifera* seed cake[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(4): 766−772.］

［15］ 吴芳, 江舒, 胡曼子, 等. 豆粕蛋白对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 91−96. ［WU F, JIANG S, HU M Z, et al. Effect of soybean meal proteins on gel properties of silver carp surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 91−96.］

［16］ 郑赵敏, 徐巧玲, 郑洪梨, 等. 枸杞粉对白鲢鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(2): 168−176. ［ZHENG Z M, XU Q L, ZHENG H L, et al. Effects of wolfberry powder on gel quality of silver carp surimi[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(2): 168−176.］

［17］ LIANG F, LIN L, ZHU Y J, et al. Comparative study between surimi gel and surimi/crabmeat mixed gel on nutritional properties, flavor characteristics, color, and texture[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2020, 29(7): 681-692.］.

［18］ 胡曼子, 周雨琪, 罗忆芝, 等. 巴河莲藕粉对白鲢鱼糜制品品质的影响[J]. 食品科技, 2021, 46(11): 136−141. ［HU M Z, ZHOU Y Q, LUO Y Z, et al. Effect of Bahe lotus root powder on quality of surimi products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 46(11): 136−141.］

［19］ 张品, 佘顺波, 朱文秀, 等. 紫苏饼粕分离蛋白中蛋白质含量测定方法比较[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(11): 150−154. ［ZHANG P, YU S B, ZHU W X, et al. Comparison of methods for determining protein content in perilla meal protein isolate[J]. Cereals & Oils, 2021, 34(11): 150−154.］

［20］ 胡熠, 张进杰, 唐艳, 等. 没食子酸对海鳗肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响[J]. 核农学报, 2019, 33(11): 2203−2210. ［HU Y, ZHANG J J, TANG Y, et al. Effect of gallic acid on the oxidative and gelling properties of myofibrillar protein from *Muraenesox cinereus* meat[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2019, 33(11): 2203−2210.］

［21］ ZHOU X, CHEN T, LIN H, et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by

tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 90: 82−89.
[22] 李雨琦. 两种调味成分对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. [LI Y Q. Effect of two seasoning ingredients on the gel properties of silver carp surimi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.]
[23] 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. [LIN D Q. Effect of mixed proteins on rheological properties and microstructures of surimi[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.]
[24] CAO M M, ZHANG X C, ZHU Y Q, et al. Enhancing the physicochemical performance of myofibrillar gels using Pickering emulsion fillers: Rheology, microstructure and stability[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 128: 107606.
[25] 彭晶. 菜籽蛋白的制备及其对白鲢鱼糜凝胶特性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2017. [PENG J. Study on the preparation of rapeseed protein and its effect on the gelation of silver carp surimi[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2017.]
[26] DUANGMAL K, TALUENGPHOL A. Effect of protein additives, sodium ascorbate, and microbial transglutaminase on the texture and colour of red tilapia surimi gel[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2010, 45(1): 48−55.
[27] 雍金叶, 邹钰萱, 田洋, 等. 辣木膳食纤维对鲢鱼糜凝胶性能的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(20): 74−81. [YONG J Y, ZOU Y X, TIAN Y, et al. Effect of moringa oleifera dietary fiber on gel properties of silver carp surimi[J]. Food Science, 2024, 45(20): 74−81.]
[28] 曾泽政, 朱礼锋, 曹扬洪, 等. 金花茶多糖对巴沙鱼糜理化性质及凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(17): 191−202. [ZENG Z Z, ZHU L F, CAO Y H, et al. Effect of *Camellia nitidissima* Chi polysaccharide on the physicochemical properties and gel properties of surimi gel in *Pangasius bocourti*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(17): 191−202.]
[29] 王敬涵, 王舒彤, 戴瑞, 等. 芋头粉对低盐巴沙鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 中国调味品, 2024, 49(8): 106−112. [WANG J H, WANG S D, DAI R, et al. Effect of taro powder on gel properties of low-salt Basa fish surimi[J]. China Condiment, 2024, 49(8): 106−112.]
[30] GANI A, BENJAKUL S. Impact of virgin coconut oil nanoemulsion on properties of croaker surimi gel[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82(3): 34−44.
[31] 张善英. 蒸汽爆破预处理对油茶籽油和油茶籽粕蛋白质影响研究[D]. 海南: 海南大学, 2019. [ZHANG S Y. Influence of steam explosion pretreatment on the *Camellia* seed oil and protein[D]. Hainan: Hainan University, 2019.]
[32] 宋春勇, 洪鹏志, 周春霞, 等. 大豆油和预乳化大豆油对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(8): 90−97. [SONG C Y, HONG P Z, ZHOU C X, et al. Effect of soybean oil and pre-emulsified soybean oil on the quality of *Nemipterus virgatus* surimi gel[J]. Food Science, 2021, 42(8): 90−97.]
[33] 严浩. 外源蛋白对白鲢鱼糜凝胶性能及风味的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2022. [YAN H. Effect of external proteins on gel properties and flavor of surimi gel from silver carp[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.]
[34] 何进武, 樊伟伟. 糖基化大豆分离蛋白对鲤鱼鱼糜凝胶和乳化特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(6): 23−27. [HE J W, FAN W W. Effects of glycosylated soy protein isolate on gel and emulsifying properties of carp myofibrillar protein[J]. Food Research and Development, 2018, 39(6): 23−27.]
[35] 刘珍, 王金厢, 李学鹏, 等. 大豆分离蛋白与金线鱼肌球蛋白的相互作用对其凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(16): 122−130. [LIU Z, WANG J X, LI X P, et al. Effect of interactions between soy protein isolate and *Nemipterus virgatus* myosin on its gel properties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(16): 122−130.]
[36] ZHAO F, LIU X, DING X, et al. Effects of high-intensity ultrasound pretreatment on structure, properties, and enzymolysis of soy protein isolate[J]. Molecules, 2019, 24(20): 3637−3637.
[37] WALAYAT N. 蛋清蛋白/低聚糖复合物对冻藏鱼肌原纤维蛋白结构与性质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. [WALAYAT N. Effect of egg white protein and oligosaccharides mixture on the functional and structural properties of myofibrillar proteins during frozen storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.]
[38] BUAMARD N, BENJAKUL S. Improvement of gel properties of sardine (*Sardinella albella*) surimi using coconut husk extracts[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 146−155.
[39] LIU X, JI L, ZHANG T, et al. Effects of pre-emulsification by three food-grade emulsifiers on the properties of emulsified surimi sausage[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 247: 30−37.