吕培楷, 刘晓媛, 徐丹鹤, 等. 板栗蛋白和石榴多酚复配对鳙鱼鱼糜凝胶品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 62−69. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120170

LÜ Peikai, LIU Xiaoyuan, XU Danhe, et al. Effects of Chestnut Protein and Pomegranate Polyphenolson Gel Quality of Bighead Surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 62−69. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120170

· 研究与探讨 ·

板栗蛋白和石榴多酚复配对鳙鱼鱼糜凝胶品质的影响

吕培楷, 刘晓媛, 徐丹鹤, 王荣荣*, 夏　南*, 彭　转

（信阳农林学院食品科学与工程学院, 河南信阳 464000）

摘　要: 探讨板栗蛋白（chestnut protein，CP）和石榴多酚（pomegranate polyphenol，PP）复配对鳙鱼糜凝胶质构、流变学特性、微观结构等方面的影响。结果显示，凝胶强度和持水率随 PP 添加占比增加，呈先增后降趋势。随 PP 添加占比上升，凝胶白度趋于下降，而凝胶蒸煮损失率呈先降后增趋势，其中 PP1 组凝胶蒸煮损失率最小为 5.48%。PP1 组凝胶硬度和咀嚼性较空白组分别提高 54.19% 和 63.56%，PP 添加占比过高会对凝胶整体质构产生不利影响。适当的 PP 添加占比可有效提高鱼糜的 G′和 G″，改善鱼糜流变学特性，并可促进凝胶形成致密紧实的空间结构。同时 PP 添加占比在合适范围内可促进凝胶蛋白中 α-螺旋向 β-折叠和无规则卷曲结构转化。其中 PP1 组凝胶中 α-螺旋相对含量较空白组降低 13.56%，而 β-折叠和无规则卷曲相对含量分别较空白组提高 9.22% 和 12.53%。研究表明，PP 和 CP 复配能有效改善鳙鱼糜凝胶特性，研究结果可为植物多酚和植物蛋白复配改善淡水鱼鱼糜凝胶品质提供参考。

关键词: 石榴多酚, 板栗蛋白, 鳙鱼鱼糜, 凝胶质构, 蛋白构象

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0062−08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120170

本文网刊:

Effects of Chestnut Protein and Pomegranate Polyphenols on Gel Quality of Bighead Surimi

LÜ Peikai, LIU Xiaoyuan, XU Danhe, WANG Rongrong*, XIA Nan*, PENG Zhuan

（College of Food Science and Engineering, Xinyang Agriculture and Forestry University, Xinyang 464000, China）

Abstract: This study aimed to explore the influence of the combination of chestnut protein (CP) and pomegranate polyphenol (PP) on the properties of *Aristichthy nobilis* surimi, such as gel texture, rheological features, and microstructure. The results of this study demonstrated that increasing the proportion of PP initially enhanced gel strength and water-holding capacity, but these properties declined at higher levels. As the percentage of PP elevated, gel whiteness showed a tendency to decline, while the cooking loss rate displayed a first reducing and then rising tendency. The lowest cooking loss appeared in the PP1 group, at 5.48%. Gel hardness and chewiness in the PP1 group individually increased by 54.19% and 63.56% in comparison with the control group. It was also found that at a high level of PP, the overall gel texture declined, but at optimal levels, it significantly improved G′ and G″, enhanced rheological attributes, and promoted a dense, compact gel spatial structure. Moreover, adding a proper percentage of PP could also facilitate the transitions in gel proteins, from α-helix to β-sheet and random coil. Compared to the control, α-helix relative content in the PP1 group declined by 13.56%, while the β-sheet and random coil relative contents in the PP1 group separately increased by 9.22% and 12.53%. This

收稿日期: 2024−12−16

基金项目: 河南省重点研发与推广专项（科技攻关）项目（252102111063、242102110090）; 河南省高等学校重点科研项目（22B550016）; 信阳农林学院科技创新团队项目（XNKJTD-002）; 信阳农林学院水产资源深加工利用科技服务团队。

作者简介: 吕培楷（1994−）, 男, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 食品机械设备与食品加工, E-mail: lvpeikai@xyafu.edu.cn。

*** 通信作者:** 王荣荣（1981−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 食品微生物及发酵技术, E-mail: 494155991@qq.com。

夏南（1988−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与资源利用, E-mail: xianan@xyafu.edu.cn。

research revealed that combining PP and CP could significantly enhance the gel characteristics of the *Aristichthy nobilis* surimi. These findings in this work can offer an evaluable reference for implementing the combination of plant polyphenols and plant proteins as an approach to improve the gelation quality of freshwater fish surimi.

Key words: pomegranate polyphenols; chestnut protein; bighead surimi; gel texture, protein conformation

近年来，鱼糜制品作为一类高蛋白、低脂肪、口感紧实、营养丰富的食品深受消费者的喜爱。但由于鱼糜制品中水分和内源性蛋白酶含量较高，导致其凝胶性能较差，易发生凝胶劣化、腐败变质等问题，制约了鱼糜及其制品深加工行业的发展[1]。虽然通过改善冷冻条件，可使鱼糜制品较大程度地保持其鲜度，但其保存时间较短，且在贮藏和运输途中易发生氧化变质[2−3]。如何提升鱼糜制品凝胶品质、制品保鲜技术研究与开发等，是目前水产品深加工方向亟待解决的重要问题。

石榴中富含的丹宁、鞣质、黄酮等多种多酚类物质，具有抗氧化、抗炎症、降血脂等作用[4]。多酚氧化形成的醌类物质会促使鱼糜肌原纤维蛋白中的巯基向二硫键转化，可促进蛋白质中不同氨基酸基团的交联，从而提高鱼糜凝胶的强度[5]。程荻等[6]试验表明将植物多酚应用于鱼糜制品中能较好改善鱼糜制品的凝胶特性。板栗中含有丰富的淀粉、蛋白质及多种维生素、矿物质，其中的板栗蛋白(CP)具有一定抗氧化、抑菌等作用[7]。植物蛋白可改良鱼糜的凝胶特性，促进与肌肉蛋白的结合；其富含的内源性蛋白酶抑制剂，可有效抑制鱼糜加热产生的凝胶劣化[8]。Monto 等[9]发现添加板栗蛋白在降低钠盐添加量的同时，可提高罗非鱼鱼糜凝胶强度并改善凝胶的质构特性。Su 等[10]添加大豆分离蛋白与蛋清复合物可有效改善鱼糜凝胶的弹性和内聚性。现阶段研究主要集中在单独添加植物多酚或植物蛋白对鱼糜凝胶品质的影响，而两者共同作用对鱼糜凝胶质构、流变学特性、微观结构等方面影响机理尚不清楚，相关文献鲜有报道。因此本实验以鳙鱼糜为原料，研究 CP 和石榴多酚(PP)复配对鱼糜凝胶特性、流变学特性、微观结构等影响，为 CP 和 PP 在鱼糜制品中的应用及功能性鱼糜制品的开发提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鳙鱼　信阳市西亚超市；PP(纯度 80%)　郑州和合生物工程技术有限公司；CP(纯度 90%)　德州蓝力生物技术有限公司；无水乙醇、过硫酸钾、溴化钾等试剂　均为国产分析纯，郑州派尼化学试剂厂。

DZKWD-1 型恒温水浴锅　上海分析仪有限公司；UV-2550 型紫外分光光度计　岛津公司；TMS-Pro 型质构仪　东方科仪股份有限公司；MCR102e 型流变仪　安东帕公司；CR9 型色差仪　郑州格莱莫检测设备有限公司；Nicolet 型傅里叶红外光谱分析仪　赛默飞世尔公司；EM-30 型扫描电子显微镜　库赛姆公司。

1.2　实验方法

1.2.1　鱼糜凝胶的制备　将新鲜鳙鱼经手工采肉后，加入质量分数 2.5% NaCl 斩拌 1 min，然后分别加入 3% CP 和不同质量分数(0.50%、0.75%、1.00%、1.25%、1.50%) PP 分别记为 PP0.5、PP0.75、PP1、PP1.25、PP1.5 组；同时设置只添加 3% CP 记为 CP3 组；只添加生理盐水记为 CK 组。继续斩拌鱼糜 2 min 至形成均匀状，斩拌过程中温度控制 4~10 ℃。将斩拌好的鱼糜灌入直径为 15 mm 的肠衣中密封后，放入到 40 ℃ 恒温水浴锅中煮制 35 min，然后快速放入 90 ℃ 恒温水浴锅中继续煮制 30 min，使其成型。待加热结束后将鱼肠冷却至室温后，置于 4 ℃ 冷藏备用。

1.2.2　凝胶强度的测定　参考陈媚依[11]的方法，将凝胶切成直径 25 mm、高 25 mm 的圆柱体，选用 P/5S 型探头。参数设定如下：探头暂停时间 0.1 s，形变量 30%，检测速度 1 mm/s，起始力 4 g，回程距离 20 mm，穿刺距离 10 mm，样品重复测定三次，凝胶强度按式(1)计算。

$$凝胶强度(g\cdot mm) = F\times M \qquad 式（1）$$

式中：F 为破断力(g)，M 为破断距离(mm)。

1.2.3　凝胶持水率的测定　参考张仲李[12]的方法略作修改，称取 10 g 样品记质量 W_1，用滤纸包覆好，放入离心机中离心 30 min(2500 r/min、4 ℃)后，取出样品并称其质量记 W_2。样品重复测定三次，持水率按式(2)计算。

$$持水率(\%) = \frac{W_2}{W_1}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中：W_1 为离心前样品质量(g)，W_2 为离心后样品质量(g)。

1.2.4　凝胶蒸煮损失率的测定　参考 Wu 等[13]的方法，将样品切成 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体，称其质量 M_1，放入蒸煮袋中密封好，并置于 90 ℃ 水浴 30 min 后立即取出，擦净表面水分后再次称重 M_2。样品重复测定三次，蒸煮损失率按式(3)计算。

$$蒸煮损失率(\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1}\times 100 \qquad 式（3）$$

式中：M_1 为蒸煮前样品质量(g)，M_2 为蒸煮后样品质量(g)。

1.2.5　凝胶 TPA 参数的测定　参考王睿纯等[14]的方法，将样品切成 10 mm×10 mm×10 mm 的正方体，在室温下进行测量。测试参数：P/50 型探头，压缩形变 30%，测前速度 3 mm/s，测时速度 1 mm/s，回程速度 3 mm/s，触发力 5 g，样品重复测定三次。

1.2.6 凝胶白度的测定 参考 Zhao 等[15] 的方法，将样品在室温下放置 30 min 后，采用色差仪记录其 L^*、a^*和 b^*值，样品重复测定三次，白度值按式(4)计算。

$$白度 = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + a^{*2} + b^{*2}} \quad 式（4）$$

式中：L^*为亮度，a^*为红绿值、b^*为黄蓝值。

1.2.7 鱼糜流变学特性的测定 参考陈媚依[11] 的方法略作修改，采用流变仪对样品进行动态流变特性分析。设定参数：振荡频率 1 Hz，起始温度 20 ℃，终止温度 90 ℃，升温速度 5 ℃/min，并记录扫描过程中储能模量 G′和损耗模量 G"的变化趋势。

1.2.8 凝胶傅里叶红外光谱分析 参考汲晨洋等[16] 的方法略作修改，称取经冷冻干燥后的样品 1 mg，加入干燥溴化钾粉末 100 mg，放入玛瑙研钵中研磨 3 min，使样品和溴化钾均匀混合，再进行压片，并利用傅里叶红外光谱仪进行扫描检测。设定参数：起始扫描波数 500 cm^{-1}，终止起始扫描波数 4000 cm^{-1}，分辨率 4 cm^{-1}，扫描次数 64 次。

1.2.9 凝胶微观结构观察 参考 Wu 等[17] 的方法，将样品切成 5 mm×5 mm×2 mm 薄片，放入 2% 戊二醛缓冲液中，置于 4 ℃ 固定 24 h。用磷酸缓冲液（0.1 mol/L、pH7）漂洗 20 min，然后依次在 30%、50%、70%、90% 乙醇溶液中分别脱水 10 min，待将样品真空冷冻干燥后进行喷金处理，并在加速电压 15 kV 下进行电镜扫描观察。

1.2.10 凝胶感官评定 由 10 名具有丰富经验的食品品鉴专业教师组成品鉴小组，分别从滋味、气味、色泽、组织形态和弹性这五个方面，对凝胶进行感官评定并打分。评分结果将综合反映凝胶在各个方面的品质，并取 10 位成员的平均分作为依据，具体评分标准见表 1。

表 1 感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation criteria

品质指标	评分标准	分值
滋味（20分）	鱼肉鲜味较浓，汁液感较强	15~20
	鱼肉鲜味一般，无汁液感	7~14
	鱼肉鲜味较差，无汁液感	0~6
气味（20分）	石榴和板栗混合香味较足	15~20
	有石榴和板栗混合香味，但略有鱼腥味	7~14
	无混合香味，鱼腥味较重	0~6
色泽（20分）	淡白色，较有光泽	15~20
	呈淡黄色，略有光泽	7~14
	色泽暗淡，光泽欠佳	0~6
组织形态（20分）	切面密实，无裂纹，有均匀的小气孔	15~20
	切面不够紧实，有细小裂纹和不均匀气孔	7~14
	切面较为松散，有不规则裂纹和不均匀气孔	0~6
弹性（20分）	手指挤压产生轻微凹陷，不破裂，松开后能复原	15~20
	手指挤压产生凹陷，基本不破裂，松开后不能完全复原	7~14
	手指挤压产生显著凹陷，发生破裂，松开后无法复原	0~6

1.3 数据处理

所有实验均独立重复 3 次，数据采用 SPSS 27 软件进行 Duncan 检验和显著性分析（$P<0.05$），实验结果以均值±标准差表示，使用 Origin 2022 软件作图。

2 结果与分析

2.1 PP 和 CP 复配对凝胶强度的影响

如图 1 所示，在凝胶强度的贡献方面，PP/CP 各复配组>CP 组>CK 组。且随 PP 添加占比的提高，凝胶强度先呈显著上升趋势。其中 PP1 组凝胶强度提升显著（$P<0.05$），较 CK 组提高 160.12%。这说明单独添加 CP 有助于鱼糜肌原纤维蛋白形成更加致密的凝胶，而 PP 和 CP 复配效果最明显。其原因可能为 PP 中的羟基与鱼糜肌原纤维蛋白中氢键相吸引，而 CP 可促使两者相互结合，以形成稳定的蛋白凝胶复合物[18−19]。当 PP 添加占比超过 1% 后，凝胶强度出现回落但仍高于 CK 组。这可能是因为随 PP 添加比例的提高，凝胶 pH 会有一定程度下降，偏酸性环境会导致肌原纤维蛋白之间的氢键强度和疏水相互作用减弱，而导致凝胶强度发生降低[20]。

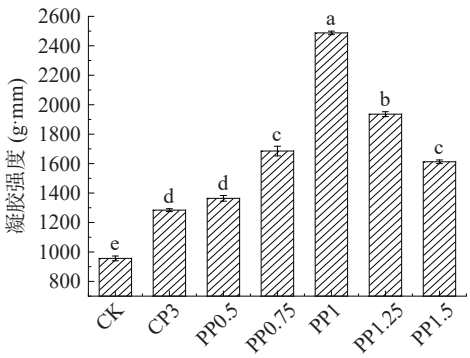


图 1 PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶强度的影响

Fig.1 Effect of PP and CP combination on gel strength of surimi

注：不同字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2、图 5、图 7 同。

2.2 PP 和 CP 复配对凝胶持水率和蒸煮损失率的影响

如图 2 所示，随 PP 的添加，凝胶持水率先呈上升趋势。其中 PP1 组持水率提升显著（$P<0.05$），较 CK 组提高 19.66%；而 PP1 组凝胶蒸煮损失率较 CK 组下降 62.52%。对凝胶持水率和蒸煮损失率的改善方面，PP/CP 各复配组>CP 组>CK 组。这表明相较于单独添加 CP，PP 和 CP 复配对提高凝胶持水性与降低蒸煮损失具有更明显效果。CP 中含有较多的强亲水基团，能与水分子发生水合作用，将大量水分束缚在凝胶三维网络结构中，提高了凝胶的持水率[18]。同时 PP 通过氢键、疏水相互作用等与蛋白质形成多酚-蛋白结合物，改善了凝胶容纳水分的能力，并降低了蒸煮损失[21]。但随着 PP 添加占比继续升高，凝胶的持水率降低和蒸煮损失率上升，可能又由于 PP 的过度聚集，从而使其内部所能容纳水分的能力下降，而对凝胶持水性和蒸煮损失造成不利的影响[22]。

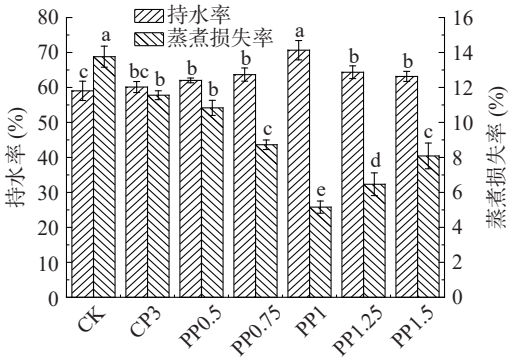


图 2　PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶持水率和蒸煮损失率的影响

Fig.2　Effects of PP and CP combination on water retention and cooking loss of surimi gel

2.3　PP 和 CP 复配对凝胶 TPA 的影响

由表 2 可知，PP 和 CP 各复配组的凝胶硬度、咀嚼性和胶粘性均呈先显著上升后显著下降的趋势（P<0.05），其中 PP1 组凝胶硬度和咀嚼性均最大，较 CK 组分别提高了 54.19% 和 63.56%；而胶粘性最大值出现在 PP0.75 组，较 CK 组提高了 48.08%。凝胶弹性的变化趋势与硬度相似；随 PP 占比增大，凝胶内聚性整体呈上升趋势，较 CK 组增加了 10.00%。总体看来，PP 和 CP 复配对凝胶质构的改善效果要明显好于单独添加 CP。Sun 等[23] 通过将苹果多酚添加到草鱼鱼糜中发现，植物性多酚中的羟基易与肌原纤维蛋白分子中的 C═O 基团形成氢键，形成酚-蛋白类大分子化合物，使凝胶三维结构更加紧密。Zhou 等[24] 观察到茶多酚可通过氢键、疏水相互作用和共价键填充到凝胶蛋白的凝胶网络中，形成更强的凝胶复合物。而当 PP 添加占比大于 1% 后，凝胶硬度、弹性、咀嚼性和胶粘性指标发生下降，可能是由于氧化酚酸类物质聚集导致肌原纤维蛋白质之间过度交联，降低了凝胶中化学键相互作用，从而对质构产生不利影响[25]。

2.4　PP 和 CP 复配对凝胶白度的影响

由表 3 可知，随 PP 和 CP 的加入，各组凝胶的 L^*值和白度，较 CK 组均呈一定幅度的下降趋势。而 a^*和 b^*值随 PP 添加占比增大，均呈显著增大趋势（P<0.05）。CP 质地接近乳白色，其添加多少对凝胶色泽基本不会产生影响；而 PP 具有多羟基结构，呈深红棕色泽，当过量添加到鱼糜中会显著降低凝胶的 L^*值和白度。Arsyad 等[26] 观察到在红鲷鱼糜中过量添加橄榄多酚，而导致凝胶白度显著下降。由于 PP 的引入会直接影响凝胶白度，基于确保凝胶的色泽控制在可接受程度内，因此需适当减少 PP 的添加占比，以维持凝胶的整体观感。

2.5　PP 和 CP 复配对鱼糜流变学特性的影响

储能模量 G′用来分析鱼糜抵抗形变的能力，它主要与鱼糜的弹性有关，并反映鱼糜凝胶弹性的强弱；损耗模量 G″用来分析鱼糜中能量的变化，主要反映鱼糜凝胶的粘性变化[27]。从图 3 可以看出，各实验组鱼糜 G′的变化趋势类似，且 PP/CP 各复配组 G′>CP 组 G′>CK 组 G′。其中 PP1 组的 G′始终高于其他各组，说明相较于单独添加 CP，适当比例 PP 和 CP 复配对提高鱼糜 G′效果最明显。当温度位于 20~42 ℃ 加热初期，G′呈现快速下降的趋势，这可能由于鱼糜肌纤维蛋白中氢键受热被破坏，凝聚力下降；肌球蛋白中氢键作用力减弱或断裂，导致其双螺旋刚性结构被破坏；同时内源蛋白酶活性较强也加速了蛋白的降解，削弱了凝胶网络结构的稳定性[28]。在 42~49 ℃ 区间 G′下降趋于平稳，这可能由于加热

表 2　PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶 TPA 的影响

Table 2　Effect of PP and CP combination on TPA of surimi gel

组别	硬度(N)	弹性(mm)	咀嚼性(mJ)	内聚性(ratio)	胶粘性(N)
CK	7.64±0.25^{e}	3.17±0.06^{c}	4.61±0.08^{e}	0.60±0.02^{b}	3.64±0.40^{c}
CP3	8.09±0.07^{d}	3.89±0.11^{bc}	5.53±0.19^{d}	0.61±0.01^{ab}	3.83±0.27^{bc}
PP0.5	8.97±0.17^{cd}	4.36±0.19^{ab}	6.16±0.37^{c}	0.61±0.01^{ab}	4.55±0.21^{b}
PP0.75	9.62±0.34^{c}	4.29±0.27^{ab}	6.24±0.41^{c}	0.63±0.02^{ab}	5.39±0.04^{a}
PP1	11.78±0.28^{a}	4.72±0.26^{a}	7.54±0.24^{a}	0.65±0.01^{a}	4.37±0.25^{b}
PP1.25	10.83±0.06^{b}	4.11±0.06^{b}	7.17±0.11^{b}	0.65±0.01^{a}	3.94±0.36^{bc}
PP1.5	8.42±0.53^{d}	3.74±0.03^{c}	5.63±0.06^{cd}	0.66±0.02^{a}	2.53±0.08^{d}

注：同列不同字母表示有显著性差异，P<0.05，表3同。

表 3　PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶白度的影响

Table 3　Effect of PP and CP combination on whiteness of surimi gel

组别	L^*	a^*	b^*	白度
CK	87.91±0.54^{a}	−0.90±0.06^{e}	3.43±0.11^{d}	87.40±0.17^{a}
CP3	87.32±0.61^{a}	−0.43±0.11^{d}	3.81±0.43^{cd}	86.75±0.11^{b}
PP0.5	86.38±0.19^{b}	0.39±0.03^{c}	4.23±0.53^{c}	85.73±0.01^{c}
PP0.75	86.17±0.23^{b}	0.84±0.05^{b}	4.76±0.12^{c}	85.34±0.12^{c}
PP1	85.61±0.17^{bc}	0.87±0.02^{ab}	5.53±0.33^{b}	84.56±0.19^{d}
PP1.25	85.23±0.15^{c}	0.93±0.06^{ab}	5.92±0.27^{b}	84.06±0.17^{d}
PP1.5	83.05±0.07^{d}	1.27±0.03^{a}	6.67±0.16^{a}	81.74±0.21^{e}

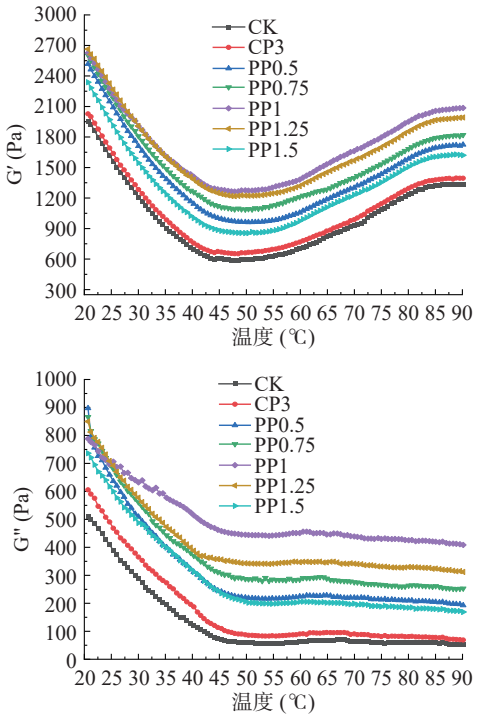


图 3 PP 和 CP 复配对鱼糜 G′和 G″的影响

Fig.3 Effects of PP and CP compound pairing on G′ and G″ of surimi

引起轻肌球蛋白链逐渐展开，暴露出来的酰胺基团和氨基基团，以共价键方式发生缠绕与结合，改善了凝胶网络的稳定性；同时内源蛋白酶活性在此温度范围内活性出现下降也抑制了凝胶网格的解离[29]。在 49~81 ℃ 区间 G′迅速上升，随后在温度到达 86 ℃ 后 G′逐渐趋于平缓。此过程中肌球蛋白和肌动蛋白不断发生变性，逐渐形成了致密的蛋白质凝胶网络结构。G″在 20~42 ℃ 区间快速下降，42~52 ℃ 区间 G″下降趋于平稳，52~65 ℃ 区间 G″呈小幅上升趋势而后逐渐趋于缓慢下降状态。通过对比发现 G″较 G′更小，说明凝胶在形成过程中弹性性质较粘性性质占主要作用，表现出凝胶网络具备典型的粘连性固体特性。结果表明，适当比例的 PP 和 CP 复配可有效改善鱼糜的流变学特性。

2.6 PP 和 CP 复配对凝胶红外光谱及蛋白质二级结构的影响

鱼糜肌纤维蛋白中含有大量酰胺键，可以通过测定酰胺带的位置和大小来研究鱼糜凝胶中蛋白质二级结构的变化。酰胺带主要分酰胺Ⅰ带、酰胺Ⅱ带和酰胺Ⅲ带，其中酰胺Ⅰ带中分别在 1645~1660、1610~1637、1670~1690、1660~1670 和 1637~1645 cm^{-1} 范围内聚集了大量 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲结构，对研究蛋白质二级结构具有较大价值[30]。如图 4 所示，各组凝胶的红外光谱具有相似的特征吸收峰，红外特征峰无明显位移或有新特征峰生成，且均位于 1646、1540 和 1238 cm^{-1} 左右处，说明 PP 和 CP 复配对凝胶蛋白的二级结构影响较小，并没有破坏原有的蛋白三维结构。钟坦君等[31]在鳙鱼凝胶中添加没食子酸，显示出没食子酸的添加并没有对凝胶蛋白空间结构造成破坏，且凝胶蛋白结构主要通过共价键方式进行强化。

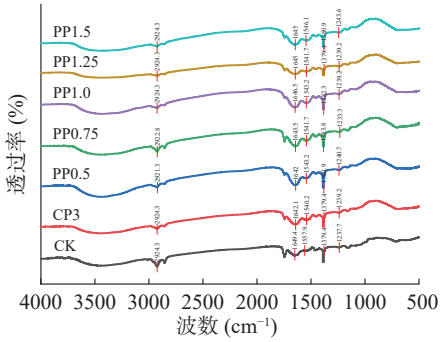


图 4 PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶红外光谱的影响

Fig.4 Effect of PP and CP combination on IR spectrum of surimi gel

由图 5 可知，随着 PP 添加占比的提高，α-螺旋和 β-转角相对含量呈先降后增的趋势，而 β-折叠和无规则卷曲相对含量呈先增后降的趋势。其中 PP1 组凝胶中 α-螺旋相对含量较 CK 组降低 13.56%，而 β-折叠和无规则卷曲相对含量分别较 CK 组提高 9.22% 和 12.53%。α-螺旋相对含量减少和 β-折叠相对含量增加，与凝胶强度增加呈正相关；且 β-折叠成分含有较多的氢键和二硫键，并有助于形成富有弹性的蛋白质网络结构[32]。PP和 CP 复配的相互作用可诱导 α-螺旋结构发生解旋，并逐渐向 β-折叠和无规则卷曲结构转化，从而通过氢键、疏水相互作用形成有序、坚固的凝胶网络结构[33]。但随 PP 添加占比进一步提高时，α-螺旋相对含量开始上升，而 β-折叠和无规则卷曲相对含量呈下降趋势。这可能是由于 PP 及热诱导使得蛋白凝胶过程中二级结构处于动态变化，从而导致 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲之间各含量发生一定的相互转化[34]。

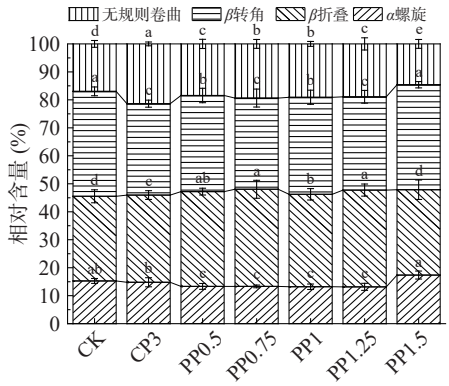


图 5 PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶蛋白质二级结构的影响

Fig.5 Effect of PP and CP pairing on secondary structure of surimi gel protein

2.7 PP 和 CP 复配对凝胶微观结构的影响

由图 6 可知，CK 组凝胶表面粗糙，网状结构较为松散，部分区域边缘呈撕裂状态，孔洞较多且大小不均匀；B、C 和 D 组凝胶表面虽较不平整，但较

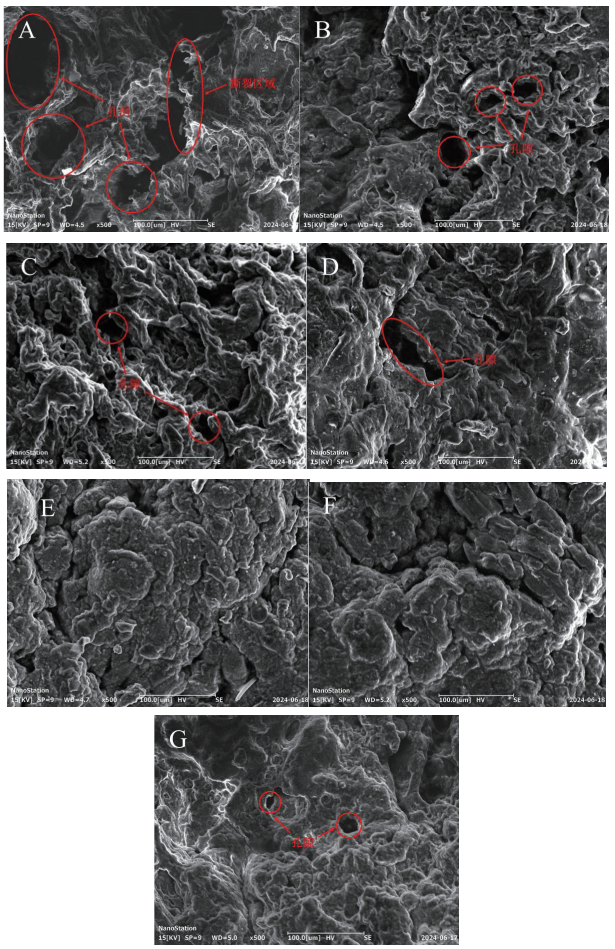


图 6　PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶微观结构的影响

Fig.6　Effect of PP and CP combination on microstructure of surimi gel

注：图 A~G 分别为：CK、CP3、PP0.5、PP0.75、PP1、PP1.25 和 PP1.5 组凝胶的微观形貌。

CK 组相比结构变得致密，表面孔隙数量和大小减小，凝胶基体由丝状结构缠绕形成凝胶三维结构。当 PP 添加占比为 1%~1.25% 时，此时凝胶基体呈片状的致密紧实结构，表面较光滑均匀，且基本无孔隙。酚类化合物含有的酚羟基可能诱导蛋白质之间相互发生交联，形成蛋白质丝状，这些细丝进一步有效进行聚合，从而形成具有纤维结构的凝胶网络结构[34−35]。PP 在加热过程中通过氢键、疏水相互作用和二硫键与蛋白质形成多酚-蛋白结合物，形成了具有致密且排列规整的三维空间网络结构[25,32−33]。以上表明适当比例的 PP 和 CP 复配能促进与肌纤维蛋白表面的结合，并能够在凝胶基质中起到一定填充和聚合效应，使凝胶三维网络结构中孔隙的孔径和数量减小[36]，在改善凝胶微观结构方面，较单独添加 CP 效果更好。如图 6G 所示，当 PP 添加占比达到 1.5% 时，凝胶表面再次变得粗糙不光滑，部分区域出现了细小孔隙，但较 CK 组相比其表面整体的孔隙数量仍更少。上述实验现象可能是由于 PP 添加占比过高阻碍了肌纤维蛋白聚集，导致蛋白凝胶的不规则排列，从而对微观结构产生不利影响[37]。这与实验结果中的凝胶强度和持水率减小趋势相吻合。综上所述，适当添加 PP 能较好地改善凝胶的微观结构，而过量添加则会对凝胶网络结构产生不利影响。

2.8　PP 和 CP 复配对凝胶感官评定的影响

如图 7 所示，随着 PP 添加占比增加，凝胶的感官评分呈先增后降趋势。其中 PP1 组的凝胶感官评分为 84.5 分，较 CK 组提高显著 22.46%（P<0.05）。对凝胶感官总体改善方面，PP/CP 各复配组>CP 组>CK 组。这表明相较于单独添加 CP，PP 和 CP 复配对提高凝胶的口感效果更明显。当 PP 添加占比达到 1% 时，凝胶表面富有光泽和弹性，口感最佳。但当 PP 添加占比超过 1% 后，凝胶感官评分趋于降低。这可能是由于凝胶中的肌原纤维蛋白与多酚类物质过度结合，不利于凝胶网络结构的形成，从而影响其弹性和风味，导致口感变差[38]。

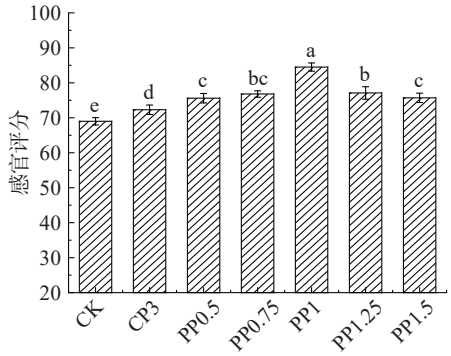


图 7　PP 和 CP 复配对鱼糜凝胶感官评定的影响

Fig.7　Effect of PP and CP combination on sensory evaluation of surimi gel

3　结论

相较于单独添加 CP，PP 和 CP 复配对改善鳙鱼鱼糜凝胶品质具有更显著的改善作用。适当比例的 PP 和 CP 复配可提高凝胶的强度、持水率、白度、TPA 参数、感官评价、蒸煮特性等，而过量添加则会对上述指标产生不良影响。PP 的引入对凝胶蛋白的二级结构影响较小，可使蛋白中 β-折叠和无规则卷曲结构相对含量相应增加，以强化凝胶网络结构。适当比例的 PP 和 CP 复配可有效提高鱼糜的 G′ 和 G″，以改善其流变学特性；促使凝胶形成致密紧实的三维网络结构，并可改善凝胶的感官评价。上述实验结果可为植物多酚和植物蛋白复配，以期改善淡水鱼鱼糜凝胶品质提供一定理论依据。

© 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] 吕欣然, 王彦博, 王小咪, 等. 人工接种单一/复合乳酸菌对发酵鲅鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2024, 24(6): 74−82. [LÜ Xinran, WANG Yanbo, WANG Xiaomi, et al. Effect of artificial inoculation of single/compound lactic acid bacteria on gel characteristics of fermented Spanish mackerel surimi[J]. Jour-

nal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(6): 74−82.]
[2] 王悦松, 刘香玲, 李学鹏, 等. 白藜芦醇对鲢鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 42−49. [WANG Yuesong, LIU Xiangling, LI Xuepeng, et al. Effect of resveratrol on gel properties of silver carp myofibrillar protein[J]. Food Science, 2023, 44(12): 42−49.]
[3] 宁云霞, 杨淇越, 鲍佳彤, 等. 抗氧化剂对未漂洗革胡子鲶鱼鱼糜品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 84−90. [NING Yunxia, YANG Qiyue, BAO Jiatong, et al. Effect of antioxidants on the quality of unrinsed *Clarias gariepinus* surimi[J]. Meat Research, 2020, 34(7): 84−90.]
[4] 吴琳. 石榴皮多酚对牛肉中亚硝酸钠降低效果影响研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017. [WU Lin. The effects of pomegranate peel polyphenol on the reduction of sodium nitrate in pickled meat[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2017.]
[5] 彭林, 马良, 戴宏杰, 等. 多酚与肌原纤维蛋白相互作用机制及其对蛋白特性的影响研究进展[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 239−246. [PENG Lin, MA Liang, DAI Hongjie, et al. Recent progress in understanding the interaction mechanism between polyphenols and myofibrillar protein and its effects on protein properties[J]. Food Science, 2020, 41(11): 239−246.]
[6] 程荻, 李维, 杨宏. 3 种植物多酚对鱼糜制品储藏品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2019, 38(1): 119−124. [CHENG Di, LI Wei, YANG Hong. Effects of three plant polyphenols on preservation quality of surimi products[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2019, 38(1): 119−124.]
[7] 冯艳霞, 贾一凡, 顾海华, 等. 响应面法优化板栗多肽制备及其清除 DPPH·能力的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(22): 315−319, 335. [FENG Yanxia, JIA Yifan, GU Haihua, et al. Optimization of extraction conditions of Chinese chestnut peptides by response surface methodology and its DPPH· scavenging abilities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(22): 315−319, 335.]
[8] 张馨月, 耿文豪, 田苗苗, 等. 动物性、植物性蛋白与鱼糜混合凝胶品质研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 17−24. [ZHANG Xinyue, GENG Wenhao, TIAN Miaomiao, et al. Progress on the quality of animal/plant protein and fish surimi mixed gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 17−24.]
[9] MONTO A R, LI M Z, WANG X, et al. Recent developments in maintaining gel properties of surimi products under reduced salt conditions and use of additives[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(30): 8518−8533.
[10] SU Yujie, DONG Yiting, NIU Fuge, et al. Study on the gel properties and secondary structure of soybean protein isolate/egg white composite gels[J]. European Food Research and Technology, 2015, 240(2): 367−378.
[11] 陈媚依. 鹧鸪茶提取物对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2020. [CHEN Meiyi. Effects of the *Mallotus* obongifolius extract on gelation properties and preservation quality of surimi-based products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2020.]
[12] 张仲李. 功能性低聚糖与蛋清蛋白协同作用对冻藏鲐鱼肌原纤维蛋白结构及功能性质的影响机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023. [ZHANG Zhongli. Synergistic effects of oligosaccharides and egg white protein on structural and functional properties of *Culter alburnus* myofibrillar protein during frozen storage[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023.]
[13] WU Yuntao, HUO Yunfeng, XU Lin, et al. Purification, characterization and antioxidant activity of polysaccharides from *Porphyra haitanensis*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 165: 2116−2125.
[14] 王睿纯, 李义, 林松毅, 等. 不同类型变性淀粉对鲅鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 85−92. [WANG Ruichun, LI Yi, LIN Songyi, et al. Effects of different types of modified starch on gel properties of Spanish mackerel surimi[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 85−92.]
[15] ZHAO Qiaoli, ZHENG Bin, LI Jinwei, et al. Emulsion-filled surimi gel: A promising approach for enhancing gel properties, water holding capacity, and flavor[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 152: 104663.
[16] 汲晨洋, 胡晓, 吉宏武, 等. 条斑紫菜多糖对白鲢鱼鱼糜凝胶特性及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(19): 144−152. [JI Chenyang, HU Xiao, JI Hongwu, et al. Effects of *Porphyra yezoensis* polysaccharides on gel characteristics and antioxidant activity of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(19): 144−152.]
[17] WU Jing, LI Chunsheng, LI Laihao, et al. Improved physicochemical properties and product characteristics of tilapia surimi by tea polyphenols during chilled storage[J]. LWT, 2022, 167: 113822.
[18] BALANGE A K, BENJAKUL S. Effect of oxidised phenolic compounds on the gel property of mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) surimi[J]. LWT - Food Science and Technology, 2009, 42(6): 1059−1064.
[19] QUAN T H, BENJAKUL S. Comparative study on the effect of duck and hen egg albumens on proteolysis and gel property of sardine surimi[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(sup3): S2786−S2797.
[20] SHARMA S, MAJUMDAR R K, MEHTA N K. Gelling properties and microstructure of the silver carp surimi treated with pomegranate (*Punica granatum* L.) peel extract[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 59(11): 4210−4220.
[21] SHAH S, PATANGE S B, MESHRE S D, et al. Effects of pomegranate peel extract on gelation characteristic of lesser sardine (*Sardinella* spp.) surimi[J]. Journal of Experimental Zoology India, 2020, 23(1): 811−817.
[22] 王萍, 刘慧, 付湘晋, 等. 13 种植物多酚提取物抗氧化活性分析及其对冻藏未漂洗鱼糜品质的影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(16): 50−56. [WANG Ping, LIU Hui, FU Xiangjin, et al. Study on the analysis of antioxidant activity of 13 kinds of plant polyphenol extracts and its effect on the quality of frozen unwashed surimi[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(16): 50−56.]
[23] SUN Lijun, SUN Jiaojiao, THAVARAJ P, et al. Effects of thinned young apple polyphenols on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) surimi during cold storage[J]. Food Chemistry, 2017, 224: 372−381.
[24] ZHOU Xuxia, CHEN Ting, LIN Honghan, et al. Physicochemical properties and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 82−89.
[25] CAO Hongwei, JIAO Xidong, FAN Daming, et al. Microwave irradiation promotes aggregation behavior of myosin through conformation changes[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 96: 11−19.
[26] ALI ARSYAD M, AKAZAWA T, OGAWA M. Effects of olive leaf powder on mechanical properties of heat-induced surimi

gel[J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2019, 28(1): 2−13.
[27] SARKER M Z I, ELGADIR M A, FERDOSH S, et al. Effect of some biopolymers on the rheological behavior of surimi gel[J]. Molecules, 2012, 17(5): 5733−5744.
[28] 程荻. 三种植物多酚对鱼糜制品凝胶特性及保藏品质的影响[D]. 武汉：华中农业大学, 2018. [CHENG Di. Effects of three plant polyphenols on gel properties and preservation quality of surimi-based products[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.]
[29] LUO Huabin, GUO Chenxu, LIN Lu, 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.
[30] LU Yufeng, ZHU Yajun, YE Tao, et al. Physicochemical properties and microstructure of composite surimi gels: The effects of ultrasonic treatment and olive oil concentration[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 88: 106065.
[31] 钟坦君, 洪鹏志, 周春霞, 等. 没食子酸对金线鱼鱼糜凝胶特性及其体外消化产物活性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(14): 76−84. [ZHONG Tanjun, HONG Pengzhi, ZHOU Chunxia, et al. Effect of gallic acid on gel properties and *in vitro* activity of digested products of *Nemipterus virgatus* surimi[J]. Food Science, 2022, 43(14): 76−84.]
[32] SHARMA S, MAJUMDAR R K, MEHTA N K. Bioactive compounds from the mosambi (*Citrus limetta*) peel and their fortification into tilapia surimi improve gelling and textural properties[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2025, 15(4): 4955−4967.
[33] NILSUWAN K, BENJAKUL S, PRODPRAN T. Properties and antioxidative activity of fish gelatin-based film incorporated with epigallocatechin gallate[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 80: 212−221.
[34] SHARMA S, MAJUMDAR R K, MEHTA N K. Valorisation of pineapple peel waste as natural surimi gel enhancer and its optimization in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) surimi gels[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2024, 31(53): 62283−62295.
[35] WANG Xinyan, LIN Songyi, WANG Ruichun, et al. Enhancing gel behavior of yellow croaker surimi by fruit extracts: Physicochemical properties and molecular mechanism[J]. Journal of Texture Studies, 2024, 55(1): e12811.
[36] DUAN W W, QIU H, HTWE K K, et al. Investigation of the relationship between gel strength and microstructure of surimi gel induced by dense phase carbon dioxide based on quantitative analysis[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109209.
[37] 宋春勇, 洪鹏志, 周春霞, 等. 负载白藜芦醇的红花籽油乳液对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(24): 102−109. [SONG Chunyong, HONG Pengzhi, ZHOU Chunxia, et al. Effect of safflower seed oil emulsion loaded with resveratrol on the quality of *Nemipterus virgatus* surimi gel[J]. Food Science, 2022, 43(24): 102−109.]
[38] LIN Jun, HONG Hui, ZHANG Longteng, et al. Antioxidant and cryoprotective effects of hydrolysate from gill protein of bighead carp (*Hypophthalmichthys nobilis*) in preventing denaturation of frozen surimi[J]. Food Chemistry, 2019, 298: 124868.