许蒋伟, 章叶, 党慧娴, 等. κ-卡拉胶对大黄鱼肌原纤维蛋白结构特性与乳化稳定性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 124−131. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070397

XU Jiangwei, ZHANG Ye, DANG Huixian, et al. Effects of κ-Carrageenan on the Structure Properties and Emulsification Stability of Myofibrillar Protein from Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 124−131. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070397

·研究与探讨·

κ-卡拉胶对大黄鱼肌原纤维蛋白结构特性与乳化稳定性的影响

许蒋伟[1,2],章　叶[1],党慧娴[1],高　玲[1],程文健[1,2,*]

（1.福建农林大学食品科学学院,福建福州 350002;
2.闽台特色海洋食品加工及营养健康教育部工程研究中心,福建福州 350002）

摘　要: 本研究探讨了 κ-卡拉胶（κ-carrageenan，KC）对大黄鱼肌原纤维蛋白（myofibrillar protein，MP）结构特性和乳化稳定性的影响。通过实验分析了不同浓度 KC 对 MP 分子量分布、二级结构、表面疏水性和活性巯基含量，以及盐水介导的 MP-KC 分散体系浊度、粒径和 Zeta 电位的变化。结果表明，KC 的添加对 MP 的一级结构几乎没有影响，但不同浓度的 KC 有利于促进分散体系中 MP 二级结构中 α-螺旋结构解旋，无规则卷曲比例显著增加（$P<0.05$），同时显著提高了 MP 的表面疏水性和活性巯基含量（$P<0.05$）。浊度、粒径和电位分析结果表明，MP-KC 分散体系的粒径显著降低（$P<0.05$），在一定浓度范围内分散胶粒的 Zeta 电位绝对值也有所增加。以此分散体系制得的乳液的澄清指数、粘度和抗剪切性、液滴形态和分布均有显著的改善，其中以 KC 浓度为 1% 的 MP-KC 分散液制得的乳液稳定性最好。实验结果初步证实了 MP 结构的变化和增强的 MP-KC 相互作用有助于提高 MP 乳液的稳定性，研究成果可为乳化型大黄鱼功能性制品的开发提供理论参考。

关键词: 大黄鱼,肌原纤维蛋白,κ-卡拉胶,结构特性,乳化稳定性
中图分类号: TS245.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0124−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070397　　本文网刊:

Effects of κ-Carrageenan on the Structure Properties and Emulsification Stability of Myofibrillar Protein from Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*)

XU Jiangwei[1,2], ZHANG Ye[1], DANG Huixian[1], GAO Ling[1], CHENG Wenjian[1,2,*]

（1.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2.Ministry Education, Engineering Research Center Fujian Taiwan Special Marine Food Processing & Nutrition, Fuzhou 350002, China）

Abstract: This study investigated the effects of κ-carrageenan (KC) on the structure properties and emulsification stability of myofibrillar protein (MP) from large yellow croaker. Experiments were conducted to analyze the impact of different KC concentrations on the molecular weight distribution, secondary structure, surface hydrophobicity, and active sulfhydryl content of MP. Changes in turbidity, particle size, and Zeta potential of the saline-mediated MP-KC dispersion system were also measured. The results showed that KC addition did not alter on the primary structure of MP. However, different KC concentrations promoted the unwinding of α-helix structures, significantly increasing the proportion of random coils ($P<0.05$). Surface hydrophobicity and active sulfhydryl content of MP also increased significantly ($P<0.05$). Turbidity, particle size, and potential analyses revealed that the particle size of the MP-KC dispersions decreased significantly ($P<0.05$),

收稿日期: 2025−08−01
基金项目: 福建省农业引导性重点项目。
作者简介: 许蒋伟（2003−）,男,硕士研究生,研究方向:水产品加工,E-mail:3444133707@qq.com。
*** 通信作者:** 程文健（1974−）,男,博士,副教授,研究方向:水产品加工,E-mail:chengwj@fafu.edu.cn。

and the absolute Zeta potential value increased within a certain concentration range. Emulsions prepared from this dispersion system showed significant improvements in clarity index, viscosity, shear resistance, droplet morphology and distribution. The emulsion prepared with 1% KC exhibited the best stability performance. The results preliminarily confirmed that changes in MP structure thus enhanced MP-KC interactions contributed to improved emulsion stability. This study provides a theoretical reference for developing emulsified functional products from large yellow croaker.

Key words: large yellow croaker; myofibrillar protein; κ-carrageenan; structure properties; emulsification stability

乳液由互不相溶的两相组成，其中一相以液滴的形式分散于另外的一种连续液相中。乳液是一种热力学不稳定系统，在贮藏过程中存在液滴融合、聚集和相分离的趋势，这使其在食品加工中的应用受到限制[1]。改善乳液稳定性的方法众多，其中半固态的乳化型凝胶可以通过具有凝胶性能基质分散形成的连续相，将乳液液滴固定在一定条件下基质形成的凝胶网络中，形成粘弹性和软硬度可调，并且具有生物活性物质缓控释能力的结构[2]。

肌原纤维蛋白（MP）是一种具有热诱导-凝胶形成能力和乳化功能的盐溶性蛋白，约占肌肉蛋白总量的 50%~60%，在保持乳化型肉类制品如乳化肠等加工制品的质量方面发挥重要的作用[3]，也是凝胶型生物活性物质递送系统的一种理想载体。然而，由 MP 单独形成乳液的结构较弱，稳定性较差[4]。众多研究表明，添加多糖类物质可以提高 MP 的乳化稳定性，已有的研究认为，多糖和 MP 之间存在静电引力、疏水相互作用和氢键等非共价相互作用，可以提高乳液粘度、防止液滴聚集和改善乳液结构[5−6]。然而，在 MP/多糖分散体系中，多糖是如何影响 MP 结构特性，从而达到增强两者之间的相互作用，改善乳液稳定性的目的，目前鲜有这方面的研究报道。

卡拉胶（KC）是从红海藻中提取的线性亲水多糖，是食品工业中最常用的多糖之一，可以作为保水剂、胶凝剂、稳定剂、增稠剂等添加到食品中[7]。已有研究表明，卡拉胶与 MP 的相互作用可以改善 MP 的凝胶性能[8−9]。大黄鱼是我国重要的海洋养殖鱼类之一，具有很高的商业价值，其含有的 MP 具有良好的乳化性，对水产品及相关制品品质有关键影响。因此，在此基础上，本文以我国具有资源优势特色的大黄鱼为原料，旨在探究卡拉胶介导的盐水分散体系中大黄鱼肌原纤维蛋白结构特性的变化及其对乳化稳定性的影响，拓展鱼油递送体系的载体选择，为大黄鱼乳化型功能性制品的开发提供理论参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

冰鲜大黄鱼　福建岳海水产食品有限公司；氯化钠、十二烷基硫酸钠（SDS）、氢氧化钠、溴酚蓝、乙二胺四乙酸（EDTA）　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、氯化钾、脲（尿素）、Tris-三（羟甲基）氨基甲烷、5,5’-二硫代双（2-硝基苯甲酸）（DTNB）、溴化钾、κ-卡拉胶　均为分析纯，范德（北京）生物技术有限责任公司；Bradford 蛋白浓度测定试剂盒　碧云天生物技术有限公司。

SQP 电子分析天平　赛多利斯科学仪器有限公司；C-MAG HS 4 加热磁力搅拌器、T18 brushless 高速分散机　德国 IKA 公司；S12-LA160 绞肉机　杭州九阳生活电器有限公司；IMS-20 全自动雪花制冰机　常熟市雪科电器有限公司；Avanti J-E 冷冻离心机　美国 Beckman 公司；STARTER 2100 型 pH 计　常州奥豪斯仪器有限公司；SpectraMax i3x 型多功能酶标仪　上海美谷分子仪器有限公司；basic+MP4+miniTrans-Blot Cell 电泳系统　上海伯乐仪器有限公司；T6 新世纪紫外可见分光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司；TGL-20 M 台式高速冷冻离心机　湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；LGJ-12S 真空冷冻干燥机　北京松源华兴科技发展有限公司；VERTEX 70 布鲁克傅里叶变换红外光谱仪　北京科技有限公司；Zatasizer Nano Zeta 电位及粒度分析仪　英国马尔文仪器有限公司；LUMiFuge 111 快速稳定分析仪　德国罗姆仪器有限公司；MODEL ECLIPSE Ts2 倒置显微镜　尼康精机（上海）有限公司；MCR301 Rheoplus流变仪　奥地利安东帕有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　大黄鱼肌原纤维蛋白的提取与浓度测定　参考 Wang 等[10] 的方法略微修改，冰鲜大黄鱼去除头、尾、鱼鳞、内脏和鱼皮，取大黄鱼背部肉，将鱼肉与冰水（3~10 ℃）以 1∶3（w/v）的比例漂洗两次，每次漂洗 8 min，静置 3 min。漂洗后的鱼肉用 4 层纱布沥干后切成体积约为 1 cm×1 cm×1 cm 的小块，用绞肉机搅碎成鱼糜。将制备好的鱼糜加入 4 倍体积的冰磷酸盐缓冲液（0.02 mol/L，pH7.5），搅拌均匀后用匀浆机以 10000 r/min 匀浆 60 s，直至鱼糜和缓冲液充分混匀。然后用冷冻离心机在 4 ℃ 以 7500 r/min 离心 10 min 后弃上清液，取沉淀，在上述相同的均质和离心条件下重复 3 次，得到粗肌原纤维蛋白。再在上述相同的均质和离心条件与 4 倍体积的 0.1 mol/L 的 NaCl 溶液洗涤 2 次。最后一次洗涤，需将悬浮液用 2 层纱布过滤，所得滤液离心取沉淀，将所得的肌原纤维蛋白浓缩物储存在 4 ℃ 下，48 h 内使用。

参考 Brion-Espinoza 等[11] 的方法，利用考马斯亮蓝法测试肌原纤维蛋白浓度，采用 Bradford 蛋白浓度测定试剂盒，取适量样品加入 0.6 mol/L NaCl 溶液（pH7.5）在 4 ℃ 下磁力搅拌 2 h 使其稀释浓度范围在 0.1~1.5 mg/mL 之间，并用酶标仪在 595 nm

下测定其吸光度，以牛血清蛋白为标准品制作标准曲线，得到的标准曲线方程为 y=5.2729x+0.4625，(R^2=0.9938)。根据标准曲线和使用的样品体积计算出样品中的蛋白浓度。

1.2.2 κ-卡拉胶/肌原纤维蛋白分散液制备 参照 Yan 等[12] 的方法并作修改。在 250 mL 玻璃烧杯中倒入 96 g 蒸馏水，将 KC(4 g)分散到涡流中的烧杯里，并在高温下(55 ℃)使用磁力搅拌器以 500 r/min 连续搅拌 1 h 以分散 KC。之后，将 KC 悬浮液(4.0wt%)，在 4 ℃ 的冰箱中储存过夜，以允许最大程度的水合作用。

将 KC 原液(4.0wt%)、0.6 mol/L NaCl (pH7.5)分别与提取的 MP 混合，得到最终 KC 浓度分别为 0.5%、1%、1.5%、2%，MP 终浓度均为 4%(w/w)的 MP/KC 分散液，将 KC/MP 分散液在 4 ℃ 下用电动搅拌器 500 r/min 搅拌 10 min，然后在 4 ℃ 条件下静置备用，同时以未添加 KC 的同浓度 MP 分散液为对照组。

1.2.3 十二烷基硫酸钠-聚丙烯酰胺凝胶电泳(SDS-PAGE)分析 用 0.6 mol/L 的 NaCl(pH7.5)将 KC/MP 分散液中 MP 稀释至 2 mg/mL，与 5×上样缓冲液按 4∶1(v∶v)比例混合，在 90 ℃ 中水浴加热 6~10 min 后冷却至室温，使用 5% 浓缩胶和 10% 分离胶进行电泳。使用染色液考马斯亮蓝(R-250)对凝胶进行染色过夜，采用脱色液(50% 乙醇和 7.5% 乙酸)脱色至背景清晰，采用凝胶成像系统进行拍照分析。

1.2.4 蛋白质二级结构的测定 使用傅立叶变换红外光谱仪测定样品二级结构。样品经冻干之后与溴化钾晶体以质量比 1∶100 的比例充分混合并研磨成为粉末。混合物使用压片机压成厚度均匀的溴化钾窗片进行测定。扫描波长 4000~400 cm^{-1}，速度 4 cm^{-1}，温度 25 ℃，模式为单波束模式，间隔 32 次扫描[13]。使用 PeakFit v. 4.1.1 软件对酰胺 I 带(1700~1600 cm^{-1})进行去卷积并校正基线，进行曲线拟合之后将所有分峰匹配不同的二级结构，根据每个二级结构的峰面积与总峰面积的比值计算二级结构的百分含量。

1.2.5 活性巯基含量的测定 根据 Yin 等[14] 的方法，用 0.6 mol/L 的 NaCl(pH7.5)将 KC/MP 分散液中 MP 浓度稀释至 5 mg/mL，取 1 mL 上述稀释液加入 9 mL 0.2 mol/L Tris-HCl 缓冲液(内含 2% SDS、10 mmol/L EDTA，pH6.8)，混匀后取出 4 mL 混合液加入 0.4 mL 0.1% 的 DTNB(溶于 0.2 mol/L 的 Tris-HCl 中，pH8.0)，在 40 ℃ 水浴 25 min，用酶标仪在 412 nm 波长处测定吸光度。空白组用 0.6 mol/L NaCl 溶液代替。按下式计算活性巯基含量：

$$\text{活性巯基含量}(\mu mol/g) = \frac{73.53 \times A \times n}{c}$$

式中：A 为波长 412 nm 处的吸光度；n 为 MP 稀释倍数；c 为蛋白溶液质量浓度(mg/mL)。

1.2.6 表面疏水性的测定 参照 Pan 等[15] 方法，将 KC/MP 分散液用 0.6 mol/L 的 NaCl(pH7.5)稀释至 MP 浓度为 5 mg/mL，在 5 mL 的稀释溶液中加入 300 μL 溴酚蓝溶液(1 mg/mL)，通过涡旋混合均匀后，在 4 ℃，7000 r/min 下离心 15 min，取上清液稀释 10 倍后再如上述离心 1 次后，取上清液用酶标仪在 595 nm 波长处测定吸光值。以提取 B 液(0.6 mol/L NaCl，pH7.5)作为对照。计算公式如下：

$$\text{表面疏水性}(\mu g) = 300\ \mu L \times \frac{A_{对照} - A_{样品}}{A_{对照}}$$

式中：A 为波长 595 nm 处的吸光度。

1.2.7 浊度的测定 参照 Cao 等[16] 的方法，并稍作修改。将 KC/MP 分散液用 5 mmol/L(pH7.5)磷酸盐缓冲液(含 0.6 mol/L 的 NaCl)稀释至 MP 浓度为 1 mg/mL，使用紫外可见分光光度计在 600 nm 波长处测定吸光值，溶液的吸光值被视为浊度。

1.2.8 粒径及 Zeta 电位的测定 使用 Zeta 电位及粒度分析仪测定样品的粒径和 Zeta 电位。用 5 mmol/L(pH7.5)磷酸盐缓冲液将 KC/MP 分散液稀释 40 倍，仪器参数设定为：颗粒折射率为 1.520，分散剂折射率为 1.330，吸光率为 0.1。在收集数据之前，将样品在仪器内部平衡 120 s 再进行测量，每个样本重复 3 次，取平均值。

1.2.9 基于 κ-卡拉胶/肌原纤维蛋白体系负载鱼油乳液的制备与稳定性分析 将 1.2.2 步骤制备的各样品稀释至蛋白含量为 1 mg/mL，与鱼油以 7∶3(v/v)混合，将混合物在 4 ℃ 条件下用手持式均质机以 10000 r/min 的速度均质 1 min，每均质 30 s 停 30 s，得到乳液。将上述制备的乳液用纯水将乳液稀释 40 倍，振荡混匀后吸取 50 μL 样液滴到载玻片上，选择视野清晰、液滴分布较均匀的区域进行拍照记录。

根据 Zheng 等[17] 的方法使用 LUM 稳定性分析仪测试乳液稳定性，取 470 μL 新鲜乳液于离心管中，仪器参数为轮廓线 300、离心时间 50 min、转速 3000 r/min、温度 4 ℃。使用 SEPView 6 软件分析数据，计算澄清指数；使用流变仪对乳液进行测定，选用 50 mm 的平板，设置夹缝间距为 1.00 mm，剪切速率为 0.1~100 s^{-1}，温度设定为 25 ℃，测定剪切过程中黏度的变化。

1.3 数据处理

所有实验均在同一实验条件下重复 3 次，并计算其算术平均值±标准差。使用 Excel 2016 对数据进行处理分析；使用 SPSS 26 对数据进行单因素方差分析(ANOVA)，多重比较得到差异显著性分析结果(P<0.05)；使用 Origin Pro 2021 进行数据图像处理。

2 结果与分析

2.1 卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白分子量的影响

大黄鱼肌原纤维蛋白的 SDS-PAGE 条带主要

对应于肌球蛋白重链（220 kDa）、副肌球蛋白（97 kDa）、肌动蛋白（43 kDa）、原肌球蛋白（37 kDa）、肌球蛋白轻链（15~20 kDa），其中肌球蛋白重链和肌动蛋白对肌原纤维蛋白的功能特性起到重要作用[18]。不同含量 KC 对大黄鱼肌原纤维蛋白分子量分布的影响如图 1 所示。由图 1 可知，与对照组相比，样品组的蛋白条带未出现消失或增加，且颜色没有发生明显变化，说明组成大黄鱼肌原纤维蛋白的各组成部分如肌球蛋白、肌动蛋白等的分子量不受 KC 的影响，在该浓度范围的 κ-卡拉胶/肌原纤维蛋白分散体系中，大黄鱼肌原纤维蛋白的一级结构保持不变。

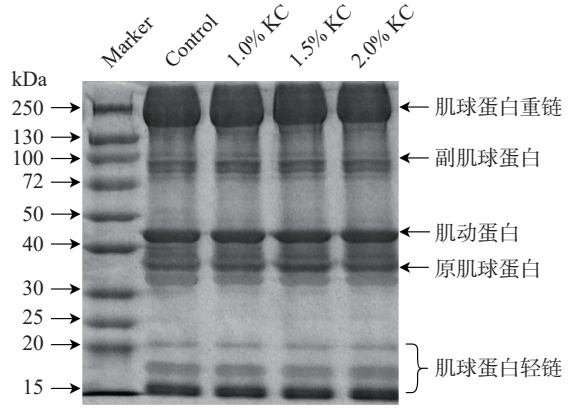


图 1　κ-卡拉胶对 MP 分子量的影响

Fig.1　Effect of κ-carrageenan on molecular weight of MP

注：0.5% KC 组条带与对照组完全一致，故图中未展示。

2.2　卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白二级结构的影响

蛋白质的二级结构包括 α-螺旋、β-折叠、β-转角、无规则卷曲，二级结构的变化会引起蛋白质结构的折叠或展开，从而影响蛋白质的功能特性。傅立叶红外光谱（FT-IR）常用于蛋白质二级结构分析，根据 Zhang 等[19] 所述，α-螺旋对应 1660~1650 cm^{-1} 谱带，β-折叠对应 1640~1600 cm^{-1} 谱带，β-转角对应 1700~1660 cm^{-1} 谱带，无规则卷曲对应 1650~1640 cm^{-1} 谱带。KC 对 MP 二级结构的影响如图 2 所示。由图 2 可知，对照组单相体系中 MP 二级结构 α-螺旋、β-折叠、β-转角和无规则卷曲的比例分别为 26.55%±0.45%、35.62%±2.59%、22.75%±3.04% 和 15.07%±0.85%，这与 Sun 等[13] 的研究结果相一致。与对照组相比，在 MP 体系中添加浓度为 0.5%、1%、1.5%、2% 的 KC 后，MP 的 α-螺旋结构的含量均显著降低（$P<0.05$），分别从 26.55% 降低至 13.35%、12.51%、12.43% 和 13.11%，无规则卷曲的含量显著增加（$P<0.05$），分别从 15.07% 上升至 27.52%、29.41%、29.46% 和 28.06%，但在实验设置浓度范围内，KC 对 MP 的 α-螺旋结构含量的影响差异并不显著，KC 的添加对无规则卷曲、β-折叠和 β-转角的含量影响较小。这可能是由于 KC 中含有大量的羟基，其与蛋白质主链上的 C=O 和 N-H 竞争氢键，从而促使螺旋结构解旋，并向无规则卷曲等其它结构转变。MP 这种由有序向松散结构的转变，导致肌原纤维蛋白质分子膨胀和展开，二级结构的这种变化对于肌原纤维蛋白的功能特性如乳化特性有着重要的影响[5]。

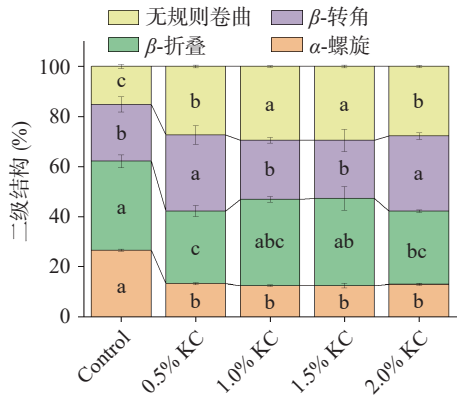


图 2　κ-卡拉胶对 MP 二级结构的影响

Fig.2　Effect of κ-carrageenan on secondary structure of MP

注：不同字母代表组间具有显著性差异（$P<0.05$），图 3~图 6 同。

2.3　卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白活性巯基含量的影响

活性巯基是指暴露在蛋白质表面的巯基，是蛋白质中的活性功能基团，其容易氧化形成稳定的二硫键，在维持蛋白质三级结构和四级结构中起重要作用[20]。从图 3 可以看出，在 MP 分散体系中添加 0.5% KC、1% KC、1.5% KC 和 2% KC 样品的活性巯基含量均显著高于对照组（$P<0.05$），表明 KC 的添加可以提高 MP 的活性巯基含量，且随着 KC 浓度的增加，活性巯基含量逐渐增加，这可能是因为 KC 可以促使蛋白分子结构逐渐展开，内部巯基逐渐暴露出来，从而使活性巯基含量增加。活性巯基的增加对于油脂在 MP 分散体系的乳化过程中在油滴表面形成具有良好结构的界面膜具有重要的作用。Zhuang 等[21] 的研究表明，在乳化过程中由于 MP 二硫键的形成以及疏水相互作用，在乳液油滴的表面形成更有利于稳定乳液的界面膜，从而提高 MP 的乳化稳定性。

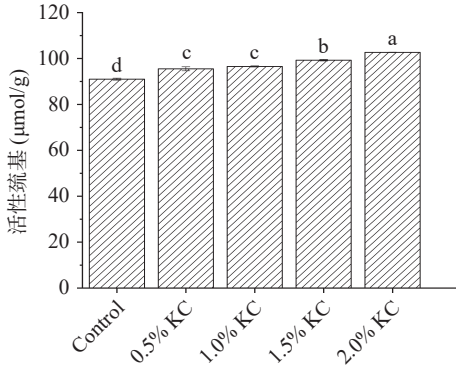


图 3　κ-卡拉胶对 MP 中活性巯基的影响

Fig.3　Effect of κ-carrageenan on active sulfhydryl group of MP

2.4　卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响

表面疏水性不仅与蛋白质表面疏水性氨基酸残

基的分布有关，而且和蛋白质的结构和构象也有着密切的关系。蛋白质表面疏水性的变化，能够反映蛋白质分子结构和微观构象的变化[22]。加入 KC 对肌原纤维蛋白表面疏水性的影响如图 4 所示，未添加 KC 组的表面疏水性为 74.6695 μg，添加 KC 显著提升了 MP 的表面疏水性（P<0.05），且表面疏水性随着 KC 添加量的增加呈现先上升后下降的趋势，添加了 0.5%、1.0%、1.5% 和 2% KC 的组别表面疏水性分别提升了 57.34%、63.19%、55.04%、40.27%，这与 Cao 等[16] 的研究结果类似，在低浓度范围内，MP-KC 混合溶胶的表面疏水性随着 KC 浓度的增加而显著增加。KC 提升了 MP 表面疏水性的原因可能在于 KC 可与 MP 内部的亲水基团发生反应，从而使得 MP 的二级结构由有序的螺旋结构向无序的无规则卷曲转变。这种改变影响了 MP 的构象，促进肌原纤维蛋白结构展开，从而暴露出更多埋藏在蛋白质分子内部的疏水性基团，使其呈现出更高的表面疏水性[23]。从图 4 中也可以发现，随着 KC 浓度的增加，MP 的表面疏水性有所降低，这可能是由于较高浓度的 KC 与肌原纤维蛋白之间存在空间位阻效应，一定程度影响了 MP 的结构展开。在一定范围内，MP 表面疏水性的提高，有利于提高 MP 的表面活性。

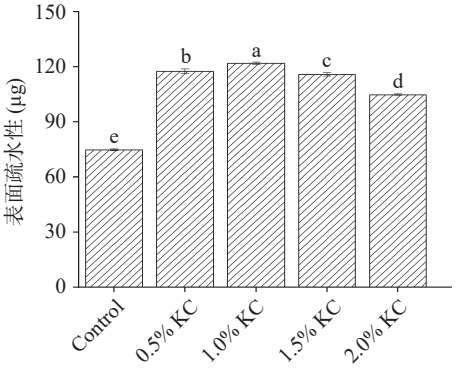


图 4 κ-卡拉胶对 MP 表面疏水性的影响

Fig.4 Effect of κ-carrageenan on surface hydrophobicity of MP

2.5 卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白粒径及 Zeta 电位的影响

粒径的变化可以反映肌原纤维蛋白分子间的聚集程度，蛋白质分子间的聚集会降低其水合能力[24]。本文考察 KC 的加入对肌原纤维蛋白粒径与 Zeta 电位的影响，结果如表 1 所示。与对照组相比，KC 的添加可以显著降低肌原纤维蛋白的粒径（P<0.05），当 KC 浓度为 0.5%、1.0% 和 1.5% 时，MP-KC 混合体系的粒径显著降低（P<0.05），在此浓度范围内，分散体系中 MP粒径无显著差异。而当 KC 浓度增加到 2% 时，MP-KC 混合体系的粒径有所增加（1592.33±66.23 nm）（P<0.05），这可能是因为随着 KC 浓度的增加，由于 KC 和蛋白质颗粒之间的相互作用使得颗粒壁层变厚，导致粒径上升，但仍低于对照组。Zhao 等[25] 研究也表明，添加海藻酸钠会减小 MP-海藻酸钠混合物的粒径，主要是由于形成了可溶性蛋白质-多糖复合物。

表 1 κ-卡拉胶对 MP 粒径和 Zeta 电位的影响

Table 1 Effects of κ-carrageenan on particle size and Zeta-potential of MP

组别	粒径（nm）	Zeta电位（mV）
Control	1935.67±62.27^{a}	−11.60±0.10^{b}
0.5% KC	1070.67±21.78^{c}	−13.33±0.13^{c}
1.0% KC	1107.00±63.55^{c}	−15.47±0.32^{d}
1.5% KC	1135.33±71.28^{c}	−16.87±0.65^{e}
2.0% KC	1592.33±66.23^{b}	−10.37±0.76^{a}

注：同列不同字母代表具有显著性差异（P<0.05）。

颗粒表面的有效电荷对于分散体系中颗粒的分散和聚集有重要影响。通常，较高的 Zeta 电位绝对值下分散相不易聚集，反之较低的 Zeta 电位绝对值下更容易聚集。由表 1 可知，与未添加 KC 组相比，添加 1% KC 和 1.5% KC 显著增加了 MP 的 Zeta 电位绝对值（P<0.05），而 2% KC 显著降低了 MP 的 Zeta 电位绝对值（P<0.05）。本研究中 Zeta 电位绝对值变化趋势与 Zhao 等[25] 的研究结果一致，MP-海藻酸钠混合物的 Zeta 电位绝对值先明显增加，然后略有下降。KC 作为具有硫酸根基团的阴离子海藻多糖，带有一定量的负电荷[26]，MP 的带电氨基团（-NH_3^+）与 KC 带负电的酯硫酸盐基团之间存在相互作用，所以 KC 的存在使 MP/KC 分散体系中蛋白质颗粒产生了更高的 Zeta 电位绝对值。

以上粒径和电位分析结果表明，KC/MP 分散体系中，MP 分子的展开可以提高其与 KC 之间的相互作用，有效防止 MP 聚集，提高其分散性与溶解性。

2.6 卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白浊度的影响

浊度是衡量分散液对光散射和吸收能力的指标，与分散液中颗粒的粒径、数量以及光学性质密切相关。KC/MP 分散液的浊度如图 5 所示。结果表明，随着 KC 添加量的增加，MP-KC 混合体系的浊度增加（P<0.05）。如前面实验结果所述，在 KC/MP 分散液中，KC 的存在可以防止蛋白质分子聚集形成大的颗粒[27]。同时高度展开的 MP 和带相反电荷的多糖通过静电引力可以形成复合物[28]，但复合物的粒径

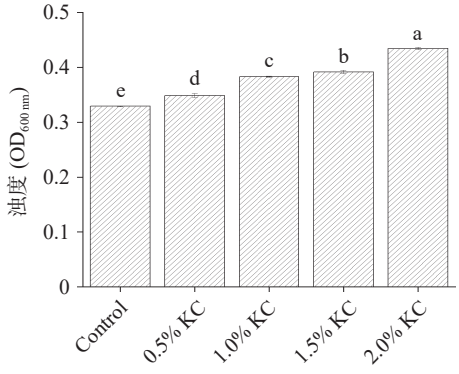


图 5 κ-卡拉胶对 MP 体系浊度的影响

Fig.5 Effect of κ-carrageenan on turbidity of MP sols

较小。因此总体上，虽然添加 KC 使分散液中蛋白质的颗粒粒径变小，而单位体积内颗粒数量却显著增加，从而导致分散液浊度有所增加。

2.7　卡拉胶添加量对肌原纤维蛋白乳化稳定性的影响

在乳液制备中，蛋白质通常作为乳化剂，利用其两亲特性提供空间或静电斥力来稳定油滴[29]。Lumisizer 稳定性分析仪基于 Stocks 理论及 Beer-Lambert 定律，利用近红外光对样品实时扫描分析乳液样品，直接客观地反映样品分层、沉降、聚合等状态的变化，测定的澄清指数可以衡量乳液的稳定性，在相同条件下澄清指数越大（接近于 1）说明乳液分离较快，乳液不稳定[30]。KC 对 MP 稳定的鱼油乳液澄清指数的影响如图 6 所示。由图 6 可知，与对照组相比，不同浓度 KC 的添加均可使 MP 稳定的乳液体系的澄清指数减小，表明添加 KC 后，MP 乳液具有更好的稳定性，其可能原因是多糖和 MP 共同有效地包裹油滴，形成粘弹性的保护层进而促进乳液的稳定性。各组样品中，1% KC-MP-鱼油乳液的稳定性最佳。

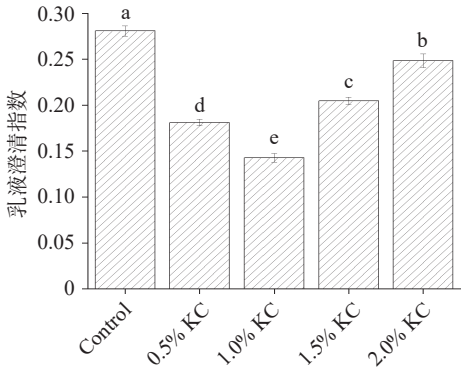


图 6　κ-卡拉胶对 MP 乳液澄清指数的影响

Fig.6　Effect of κ-carrageenan on clarification index of MP stabilized emulsions

流变学测试结果（图 7）表明各样品的表观粘度随剪切速率的增加呈非线性降低趋势，所有样品均表现出剪切稀化的行为，表现出假塑性流体特性[31]，出现该现象的原因是剪切行为破坏了先前的分子排列模式，蛋白质聚集体之间的键断裂，导致液滴在流动方向上的重新排列[32]。从测试结果也可以看出，在同一剪切速率下，添加 KC 的 MP 乳液表观黏度均高于空白对照组，可见添加 KC 可以使乳液液滴在剪切过程中很好地抵抗外力的破坏，使乳液的表观黏度维持在较高水平，从而提高乳液的稳定性。从图 7 中也可以发现在低剪切速率时，添加了 1% KC 的 MP 乳液样品表观黏度最高，过高的 KC 添加量反而降低了乳液的粘度，不利于乳液的稳定。通过光学显微镜观察，如图 8 所示，与对照组相比，添加 KC 可以使乳液中液滴分布更均匀。这可能是因为 MP 和 KC 相互作用，紧密吸附在油滴表面，形成更加致密的界面膜，同时 KC 具有较强的静电排斥力，因此可以使乳液液滴充分分散，减少聚集[33]。

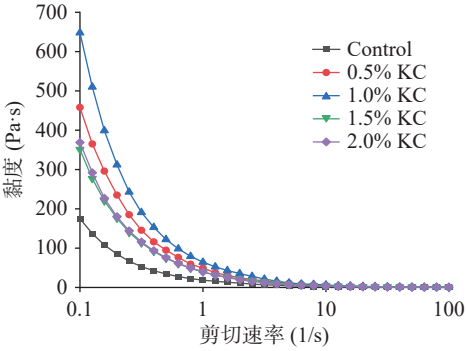


图 7　κ-卡拉胶对 MP 乳液流变学特性的影响

Fig.7　Effect of κ-carrageenan on rheological properties of MP stabilized emulsions

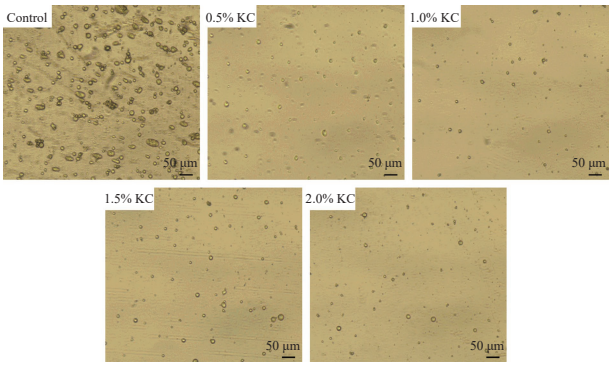


图 8　κ-卡拉胶对 MP 乳液微观形态的影响

Fig.8　Effect of κ-carrageenan on microstructure of MP stabilized emulsions

3　结论

本文探究了盐水介导的分散体系下 KC 对大黄鱼肌原纤维蛋白结构特性的影响。与对照组相比，KC 的添加对 MP 的一级结构几乎没有影响，但其有利于促进分散体系中 MP 二级结构中 α-螺旋结构解旋，致使 α-螺旋比例显著降低，无规则卷曲比例显著增加，从而促进了 MP 分子链的展开，暴露出更多疏水基团，显著提高了 MP 的表面疏水性和活性巯基含量。浊度、粒径和电位分析结果表明，与对照组相比，MP-KC 分散体系的粒径显著降低，在一定 KC 浓度范围内分散胶粒的 Zeta 电位绝对值也有所增加。且将鱼油加入此分散体系中乳化后制得的乳液通过快速稳定性测试、流变特性分析以及微观结构观察的结果表明，KC 存在情况下，乳液的澄清指数、粘度和抗剪切性、液滴形态和分布均有显著的改善，其中以 KC 浓度为 1% 的 MP-KC 分散液制得的乳液稳定性最好。综上，本文研究分析结果初步证实了 KC 的加入改善了 MP 的结构功能特性，且在以该分散体系制得的乳液中，MP-KC 的相互作用有助于提高 MP 乳液的稳定性。该研究成果拓展了鱼油递送体系的载体选择，且为乳化型大黄鱼功能性制品的开发提供理论参考。

© 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] LIN Jieqiong, YANG Jun, QI Xin, et al. Effect of cellulose nanofibrils on formation, interactions and gelation properties of chickpea protein isolate emulsion gels[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110252.

[2] CHENG Xiaoyi, WANG Huan, WANG Zhiyong, et al. Development and characteristics of emulsion gels with microwave-assisted ferulic acid covalently modified soy protein: Structure, function and digestive properties[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 146: 109230.

[3] ZHENG H N, BEAMER S K, MATAK K E, et al. Effect of *κ*-carrageenan on gelation and gel characteristics of Antarctic krill (*Euphausia superba*) protein isolated with isoelectric solubilization/precipitation[J]. Food Chemistry, 2019, 278: 644−652.

[4] CHU Zejun, LI Xinqi, HAN Runzhi, et al. Effect of ultrasound on heated soybean isolate protein-soybean oligosaccharide glycation conjugate acid-induced emulsion gels and their applications as carriers of Zeaxanthin[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109719.

[5] YU Han, ZHANG Jian. Emulsion co-stabilized with high methoxyl pectin and myofibrillar protein: Used to enhance the application in emulsified gel[J]. Food Chemistry, 2025, 475: 143359.

[6] XU Yujuan, XU Xinglian. Modification of myofibrillar protein functional properties prepared by various strategies: A comprehensive review[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 458−500.

[7] van de VELDE F, ANTIPOVA A S, ROLLEMA H S, et al. The structure of *κ*/*ι*-hybrid carrageenans II. Coil-helix transition as a function of chain composition[J]. Carbohydrate Research, 2005, 340(6): 1113−1129.

[8] ZHANG Qiuqin, TANG Jing, WU Yingfeng, et al. Gelation of crocodile myofibrillar protein–*κ*-carrageenan mixtures in two low-NaCl solution[J]. Food Chemistry, 2024, 445: 138753.

[9] YAN Shuang, LIU Xiaohan, SANG Yaxin, et al. Gel mechanism analysis of minced scallop (*Patinopecten yessoensis*) meat modified by three kinds of food colloids[J]. Food Bioscience, 2024, 57: 103541.

[10] WANG Yudong, ZHUANG Yang, YAN Hao, et al. The influence of pH and monovalent/divalent cations on the structural and physicochemical properties of myofibrillar protein from silver carp[J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134519.

[11] BRION-ESPINOZA I A, IÑIGUEZ-MORENO M, RAGAZZO-SÁNCHEZ J A, et al. Edible pectin film added with peptides from jackfruit leaves obtained by high-hydrostatic pressure and pepsin hydrolysis[J]. Food Chemistry: X, 2021, 12: 100170.

[12] YAN Jianan, NIE Bin, JIANG Xinyu, et al. Complex coacervation of scallop (*Patinopecten yessoensis*) male gonad hydrolysates and *κ*-carrageenan: Effect of NaCl and KCl[J]. Food Research International, 2020, 137: 109659.

[13] SUN Weizheng, ZHOU Feibai, SUN Dawen, et al. Effect of oxidation on the emulsifying properties of myofibrillar proteins[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(7): 1703−1712.

[14] YIN Tao, HE Yating, LIU Lulu, et al. Structural and biochemical properties of silver carp surimi as affected by comminution method[J]. Food Chemistry, 2019, 287: 85−92.

[15] PAN Jinfeng, LIAN Hongliang, JIA Hui, et al. Dose affected the role of Gallic acid on mediating gelling properties of oxidatively stressed Japanese seerfish myofibrillar protein[J]. LWT, 2020, 118: 108849.

[16] CAO Chuanai, ZHU Zicheng, LIANG Xue, et al. Elucidation of interactions between myofibrillar proteins and *κ*-carrageenan as mediated by NaCl level: Perspectives on multiple spectroscopy and molecular docking[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 248: 125903.

[17] ZHENG Yimei, CHANG Yu, LUO Biying, et al. Molecular structure modification of ovalbumin through controlled glycosylation with dextran for its emulsibility improvement[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 194: 1−8.

[18] MAO Junlong, FU Jingjing, ZHU Zhengyu, et al. Impact of KCl and ultrasound on the structural properties of myofibrillar proteins in low sodium semi-dried large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. LWT, 2023, 178: 114604.

[19] ZHANG Mingcheng, LI Fangfei, DIAO Xinping, et al. Moisture migration, microstructure damage and protein structure changes in porcine longissimus muscle as influenced by multiple freeze-thaw cycles[J]. Meat Science, 2017, 133: 10−18.

[20] 吴佳. DHPM 处理和 Salecan 添加量对低盐条件下肌原纤维蛋白理化特性和结构的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [WU Jia. Effects of dhpm treatment and salecan addition on the physical and chemical properties and structure of myofibrils protein under low-salt condition[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]

[21] ZHUANG Xinbo, JIANG Xiping, ZHOU Hengyue, et al. The effect of insoluble dietary fiber on myofibrillar protein emulsion gels: Oil particle size and protein network microstructure[J]. LWT, 2019, 101: 534−542.

[22] 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 Jingyu, HU Xin, LIU Xiaoyan, 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.]

[23] ZHUANG Xinbo, JIANG Xiping, ZHOU Hengyue, et al. Insight into the mechanism of physicochemical influence by three polysaccharides on myofibrillar protein gelation[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 229: 115449.

[24] ZHOU Bin, LIU Jinjin, YE Ting, et al. Phase separation in mixtures of ovalbumin and konjac glucomannan: Physicochemical and microscopic investigations[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2014, 70: 167−173.

[25] ZHAO Ning, ZOU Henan, SUN Shuang, et al. The interaction between sodium alginate and myofibrillar proteins: The rheological and emulsifying properties of their mixture[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 161: 1545−1551.

[26] XU Xinwei, JIANG Feng, LIN Kuncheng, et al. Anhydride esterification to regulate water migration and reduce ice crystal formation in *κ*-carrageenan gel during freezing[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109726.

[27] CHAI Jiale, XU Xinglian, ZHAO Xue. Effects of polysaccharides on the solubilization of myofibrillar protein in aqueous solution: A comparative study[J]. Food Hydrocolloids, 2025, 164: 111193.

[28] MAO Yuzhu, HUANG Min, BI Jiapei, et al. Effects of kappa-carrageenan on egg white ovalbumin for enhancing the gelation and rheological properties via electrostatic interactions[J]. Food Hy-

drocolloids, 2023, 134: 108031.
［29］ 曹燕. 高分子多糖乳化剂对肌原纤维蛋白界面吸附、乳化及凝胶特性的影响[D]. 扬州：扬州大学, 2020. ［CAO Yan. Effects of high molecular polysaccharide emulsifiers on interfacial adsorption, emulsification and gel properties of myofibrillar proteins［D］. Yangzhou: Yangzhou University, 2020.］
［30］ 李锦锦, 唐善虎, 李思宁, 等. 真空冷冻干燥大蒜粉对 Fenton 氧化体系中牦牛肉肌原纤维蛋白乳化特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(20): 70−77. ［LI Jinjin, TANG Shanhu, LI Sining, et al. Effect of freeze-dried garlic powder on emulsification properties of yak meat myofibril protein in the Fenton oxidation system[J]. Food Science, 2022, 43(20): 70−77.］
［31］ ZHANG Guangyao, BI Xinxin, WANG Rongrong, et al. Effects of catechin on the stability of myofibrillar protein-soybean oil emulsion and the adsorbed properties of myosin at the oil–water interface[J]. Food Chemistry, 2024, 442: 138478.
［32］ XIE Dengke, HU Hong, HUANG Qingrong, et al. Development and characterization of food-grade bigel system for 3D printing applications: Role of oleogel/hydrogel ratios and emulsifiers[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108565.
［33］ LI Shengnan, LI Panpan, WANG Jing, et al. Characterization and stability of low-oil emulsion gels with newly shaped droplets stabilized by *Camellia* saponin and k-carrageenan[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 149: 109585.