

热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液与乳液稳定性的比较

余焱^{1,2}, 王杰^{1,2}, 郝梦², 汪兰², 徐宁^{1*}, 石柳^{2*}

(1. 湖北工业大学生命科学与健康工程学院, 湖北武汉 430068) (2. 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北省农业科技创新中心农产品加工研究分中心, 湖北武汉 430064)

摘要: 为制备稳定的肌原纤维蛋白乳液, 该研究探讨了在加热条件下不同的离子强度对肌原纤维蛋白溶液及乳液的影响。研究离子强度 (NaCl 浓度分别为 0.1、0.3、0.6 mol/L) 与热处理 (85 ℃, 10 min) 对大豆油-肌原纤维蛋白溶液及乳液的蛋白组成、粒径分布、Zeta 电位、粘度、SEM、显微结构等影响。结果表明, 加热导致肌原纤维蛋白发生聚集, 粒径增大, 当离子强度为 0.1 mol/L 时, 热处理后溶液粒径从 32 nm 最大增加到 4 043 nm; 而乳液粒径从最大 768 nm 减小至 79 nm, 肌原纤维蛋白乳液的稳定性增强。随着离子强度的增加, 肌原纤维蛋白溶液表观粘度下降, Zeta 绝对值由 7.47 mV 下降至 6.72 mV, 经热处理后, Zeta 绝对值增大; 乳液的 Zeta 电位经加热后, 绝对值减小; 加热使得肌原纤维蛋白乳液液滴数增加, 且液滴更小, 分散性增强, 乳化活性提高, 肌原纤维蛋白乳液稳定性增加。综上所述, 在离子强度为 0.6 mol/L 时, 经热处理的肌原纤维蛋白乳液稳定性最佳。该研究为稳定肌原纤维蛋白乳液的制备提供一定参考。

关键词: 热处理; 离子强度; 肌原纤维蛋白; 表观粘度; 乳化稳定性

文章编号: 1673-9078(2025)05-222-229

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.5.0200

Effect of Ionic Strength and Heat Treatment on the Stability of Myofibrillar Protein Solutions and Emulsions

YU Yan^{1,2}, WANG Jie^{1,2}, HAO Meng², WANG Lan², XU Ning^{1*}, SHI Liu^{2*}

(1. School of Life and Health Sciences, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)
(2. Key Laboratory of Cold Chain Logistics Technology for Agro-product, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Institute of Agro-product Processing and Nuclear Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences; Agro-product Processing Research Sub-center of Hubei Innovation Center of Agriculture Science and Technology, Wuhan 430064, China)

引文格式:

余焱,王杰,郝梦,等.热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液与乳液稳定性的比较[J].现代食品科技,2025,41(5): 222-229.

YU Yan, WANG Jie, HAO Meng, et al. Effect of ionic strength and heat treatment on the stability of myofibrillar protein solutions and emulsions [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(5): 222-229.

收稿日期: 2024-02-20

基金项目: 中央引导地方科技发展专项 (2023EGA025); 湖北省技术创新计划项目 (2024BBB079); 湖北省重点研发计划项目 (2023BBB103)

作者简介: 余焱 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学, E-mail: 1755781369@qq.com

通讯作者: 徐宁 (1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品发酵, E-mail: xuningbio@163.com; 共同通讯作者: 石柳 (1988-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 水产品加工与综合利用, E-mail: shiliu@hbaas.com

Abstract: The stability of myofibrillar protein solutions and emulsions is affected by ionic strength and heat treatment. To prepare stable myofibrillar protein emulsions, soybean oil-myofibrillar protein solutions and emulsions were prepared to investigate the effect of ionic strength (sodium chloride concentrations: 0.1, 0.3, 0.6 mol/L) and heat treatment (85 °C, 10 min) on protein composition, particle size distribution, zeta potential, viscosity, and microstructure (as revealed by scanning electron microscopy and optical microscopy). The results showed that the particle size of myofibrillar protein increased with heating owing to aggregation. In heat-treated solutions and emulsions prepared from 0.1 mol/L sodium chloride, the particle size increased from 32 nm to 4 043 nm (in solution), whereas the particle size decreased from 768 nm to 79 nm (in emulsion), indicating an improved stability of myofibrillar protein emulsions. Myofibrillar protein solutions experienced a decrease in apparent viscosity and the absolute value of the zeta potential (from 7.47 mV to 6.72 mV) with increasing ionic strength; however, after heating, the absolute value of the zeta potential increased. In contrast, the absolute value of the zeta potential of emulsions decreased after heating. Heating increased the number of droplets in myofibrillar protein emulsions while reducing droplet size, thus enhancing the dispersity and emulsification activity of droplets and improving the stability of myofibrillar protein emulsions. In conclusion, an ionic strength of 0.6 mol/L, together with heat treatment, resulted in the most stable myofibrillar protein emulsion. This study serves as a reference for the preparation of stable myofibrillar protein emulsions.

Key words: heat treatment; ionic strength; myofibrillar protein; apparent viscosity; emulsification stability

肉类能提供许多人体所需的基本营养,如脂肪、蛋白质以及维生素与矿物质等微量元素^[1],是人类饮食中不可或缺的一部分。肌原纤维蛋白为肌肉的主要蛋白,约占总蛋白质含量的一半^[2],但由于肌原纤维蛋白本身分子量较大,制备乳液时稳定性较差,需要使用物理或化学方法使蛋白改性,以求获得良好的乳化性能,然而,温度、离子强度等因素都会影响肌原纤维蛋白的乳化性能。

热处理会影响肌原纤维蛋白的乳化性。肌原纤维蛋白在热处理过程中会发生聚集,疏水相互作用、静电相互作用、共价键、氢键和范德华力均会对其热聚集产生影响^[3-6]。郑云芳等^[7]发现在 30~90 °C 范围内,随着温度的升高,肌原纤维蛋白乳化性和稳定性先增后减。郝梦等^[8]的研究表明,热处理会使肌原纤维蛋白的乳化性与乳液稳定性增强。热处理会导致肌原纤维蛋白变性,蛋白质内部空间结构展开,暴露出更多的疏水基团。离子强度能影响盐溶性蛋白溶解,在热诱导下发生聚集。王海帆等^[9]研究发现,NaCl 在 0.1~0.3 mol 内,离子强度的增加能够促进肌原纤维蛋白溶液的稳定性,引起肌原纤维蛋白分子组成的变化。郝子娜等^[10]的研究结果表明增加亚硝酸钠的浓度会使鲑鱼的肌原纤维蛋白氧化速率大幅增加,45 kDa 以上的蛋白组分含量下降,蛋白发生聚集现象。这些研究都分别探讨了温度与离子强度对肌原纤维蛋白的影响,但是,研究热处理与离子强度的协同作用对肌原纤维蛋白性质影响的报道较少。

本文以冷冻白鲢鱼糜为原料,探索在不同离子强度条件下,经热处理后,肌原纤维蛋白的结构、粒径、电位、微观结构的变化关系,旨在制备具有较高稳定性的肌原纤维蛋白乳液体系提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

金龙鱼大豆油,益海嘉里金龙鱼粮油食品股份有限公司;冷冻鱼糜,荆州井力水产食品有限公司;三羟甲基氨基甲烷,广州赛国生物科技有限公司;8-苯胺基-1-萘磺酸,美国默克有限公司;磷酸氢二钠、氯化钾、十二烷基硫酸钠、磷酸二氢钠、 $\phi=95\%$ 乙醇、硫酸铜、酒石酸钾钠、盐酸、氯化钠,国药集团化学试剂有限公司;牛血清蛋白(BSA),深圳辉诺生物科技有限公司。

AR2000ex 流变仪,美国 TA 仪器有限公司;FE20 pH 计,梅特勒-托利多仪器有限公司;ZS Nano 粒径电位分析仪,英国马尔文仪器有限公司;722N 分光光度计,上海仪电分析有限公司;CR-400/410 色彩色差仪,美能达(中国)投资有限公司;FSH-2A 型均质机,常州越新仪器制造有限公司;Nicolet iS 50 傅里叶变换红外光谱仪,美国热电;DYY-6C 电泳仪,北京六一生物科技有限公司;DF-101S 恒温加热磁力搅拌器,郑州长城科工贸有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 提取肌原纤维蛋白

肌原纤维蛋白的提取方法参考 Liu 等^[11], 搅碎适量鱼糜, 添加 3 倍鱼糜体积的 4 ℃ 预冷 Tris-HCl 缓冲液 (0.2 mol/L, pH 值 7.0), 高速均质 3 min, 冰箱 4 ℃ 浸提 1 h, 无明显杂质后于 4 ℃ 下离心 10 min (9 000 r/min), 取上清作为为本实验母液, 4 ℃ 保藏待用。

1.2.2 制备肌原纤维蛋白乳液

控制 1.2.1 制备所得肌原纤维蛋白原液的离子强度分别为 0.1、0.3、0.6 mol/L, 使用磷酸二氢钾溶液 (pH 值 7.0, 含 10 mmol/L KH_2PO_4), 80 ℃ 条件下加热, 搅拌 10 min, 使用冰水进行冷却, 待冷却后高速均质 3 min, 即为本实验所使用肌原纤维蛋白溶液。加入 60 wt.% 的金龙鱼大豆油, 高速均质 10 min, 获得本实验肌原纤维蛋白乳液。实验温度均保持在 10 ℃ 下进行, 热处理组记为 MPA (Myofibrillar Protein Aggregate), 未热处理组记为 MP (Myofibrillar Protein)。

1.2.3 SDS-PAGE凝胶电泳

参考 Zhang 等^[12]的方法, 吸取 100 μL 的样品, 随即再添加 50 μL 上样缓冲液进行点样, 选择分离胶质量分数为 12%, 浓缩胶质量分数为 4% 且浓缩胶设置电压为 80 V, 进入分离胶后电压调节为 120 V; 再加入适量考马斯亮蓝染液, 染色 2 h, 结束后开始脱色处理, 添加适量的 50% 甲醇和 10% 冰乙酸, 待到各个条带清晰且没有明显杂色时结束脱色。

1.2.4 粒径和电位

粒径和电位的测定方法参照 Zhang 等^[13]进行适宜修改。添加 Tris-HCl 缓冲液, 调整蛋白质量浓度为 5 mg/mL, 选择 Zeta sizer 仪器于 $\lambda=633\text{ nm}$ 处进行电位和粒径测定。

1.2.5 粘度测定

参考宿华林等^[14]的方法且适当修改。实验椎板板间距为 1 000 μm , 直径为 40 mm, 锥角 2°, 剪切速率为 0.01~100 s^{-1} 。

1.2.6 光学显微结构

参考朱雪峰^[15]的方法, 添加 1% (φ) 罗丹明染液 B 对实验组进行染色, 添加染液 50 μL , 样液吸取 1 mL, 震荡均匀后于光学显微镜下进行观察, 放大倍数为 100 倍。

1.2.7 SEM图像

适量肌原纤维蛋白冻干粉末, 平铺在导电胶样品盘, 清理松散不牢固粉末, 将样品盘置入离子溅射仪中, 喷金处理 2 min, 随后进行扫描电子显微镜观察。

1.2.8 乳化活性和乳化稳定性的测定

参考李可等^[16]的方法, 将得到的新鲜乳液用体积分数 0.1% SDS 溶液稀释, 在 500 nm 处测定其吸光度 A_0 。根据公式计算其乳化活性。计算公式如下:

$$EAI = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \times N}{C \times 10000 \times \varphi} \quad (1)$$

式中:

C ——乳化前蛋白质的质量浓度, g/mL;

φ ——油脂体积分数;

N ——稀释倍数。

1.3 数据处理

数据分析使用 SPSS 26, 绘图使用 GraphPad Prism。所有试验均进行 3 次平行, 图表中显示误差均为标准误差。

2 结果与分析

2.1 肌原纤维蛋白溶液

2.1.1 肌原纤维蛋白溶液蛋白组成

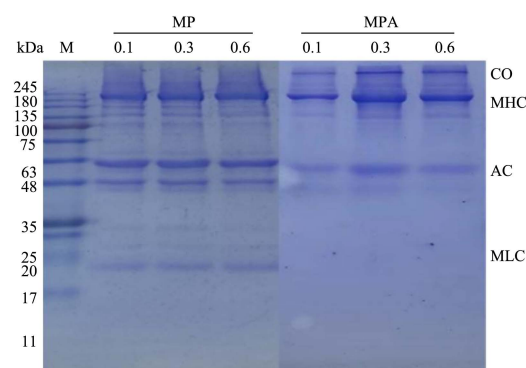


图 1 不同离子强度的 MP 组和 MPA 组肌原纤维蛋白溶液的 SDS-PAGE 图谱

Fig.1 SDS-PAGE electrophoretic profiles of myofibrillar protein solutions from MPA groups with varying ion strength

通过外源手段添加 NaCl, 肌肉蛋白会发生系列变化, 如促进肌球蛋白与肌动蛋白的结合聚集^[17]。如图 1 所示, 热处理对肌原纤维蛋白组成有显著影响。MP 组的蛋白质组成主要有肌球蛋白重链 (Myosin Heavy Chain, MHC), 肌动蛋白 (Actin, AC), 肌球

蛋白轻链 (Myosin Light Chain, MLC)。添加 NaCl 后, MHC 条带加深, 且离子浓度到 0.6 mol/L 时条带颜色最深, AC 条带变化不明显, 部分小分子蛋白条带减弱或消失。经加热处理后, AC 和其他小分子蛋白条带较 MP 组明显消失, 推测是小分子蛋白参与了肌动球蛋白的生成^[18], 随着离子强度增加, MHC 条带颜色加深变粗, MHC 含量增加, 即蛋白质发生了聚集, 类似的, Ko 等^[19]报道小分子蛋白超过 45 °C 的热处理诱导, 会发生聚集形成肌动球蛋白。

2.1.2 肌原纤维蛋白溶液粒径

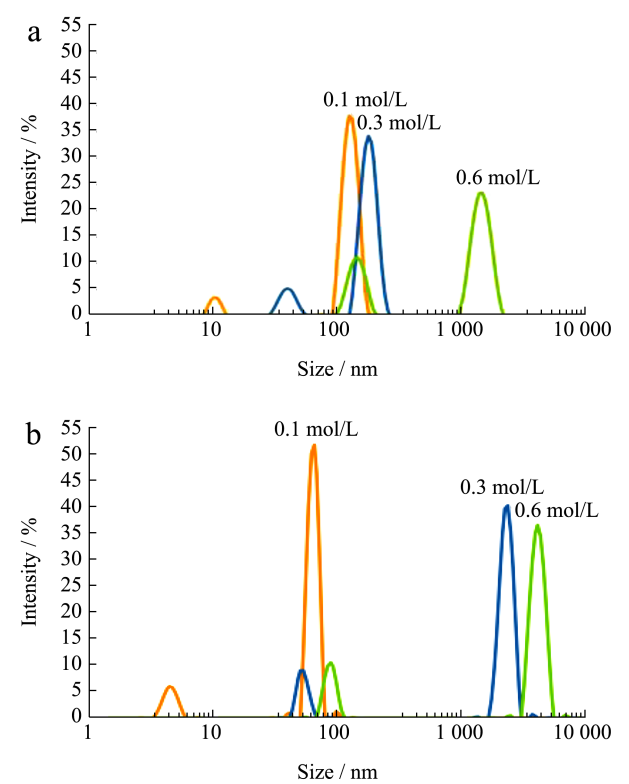


图 2 热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液粒径的影响
Fig.2 Impact of heat treatment of myofibrillar protein solution at different ion strength on the particle size

粒径对蛋白质功能性有重要影响, 是表征蛋白质的聚集程度的方法之一^[20]。如图 2 所示, 肌原纤维蛋白的粒径呈双峰分布, MP 与 MPA 组粒径大小与离子强度成正比。当离子强度为 0.6 mol/L 时粒径最大, MP 最大为 1 406 nm, 而加热后, 粒径峰向右偏移, MPA 组粒径最大为 4 043 nm; 类似的, 盖静^[21]研究发现, 加热后肌球蛋白之间交联强度上升, 聚集体体积增大。这表明加热与高离子强度 (0.6 mol/L) 均能影响肌原纤维蛋白的聚集性, 使蛋白簇粒径增大, 推测是盐离子使蛋白质产生的电

荷发生屏蔽作用, 水化层结构被打乱, 肌原纤维蛋白表面疏水作用受到影响, 蛋白分子间斥力减小, 发生聚集成簇, 导致蛋白粒径增大, 同时加热会打开肌原纤维蛋白的二级结构, 使蛋白分子间疏水作用增强, 蛋白质聚集程度和展开速率变快, 粒径更大。

2.1.3 肌原纤维蛋白溶液Zeta电位

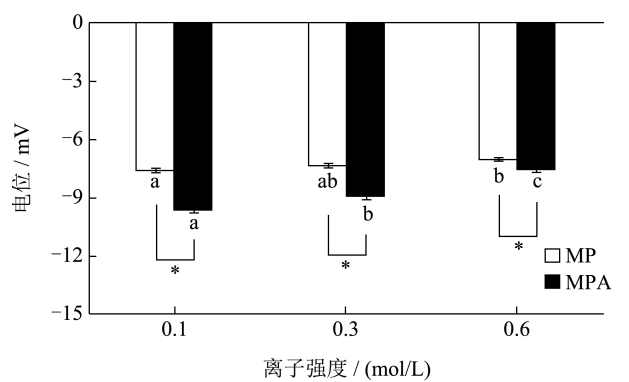


图 3 热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液电位的影响
Fig.3 Impact of heat treatment and NaCl concentration on the potential of myofibrillar protein solution

注: 小写字母表示 MPA 与 MP 组不同离子强度下差异性显著 ($P < 0.05$); * 表示同等离子强度下 MP 与 MPA 组差异性显著 ($P < 0.05$)。图 10 同。

Zeta 电位的绝对值能反应分散体系的稳定性, 通常条件下, 电位的绝对值越大, 溶液体系的稳定性越高, 颗粒之间静电斥力越强^[22]。如图 3 所示, 肌原纤维蛋白自身带负电荷, 电位的绝对值与离子强度成反比, MP 组电位值范围约为 -6~-7 mV, MPA 组电位值范围约为 -7~-9 mV。MPA 组电位绝对值比 MP 大, 即加热处理后液滴之间的静电斥力增强, 这可能是因为高温下蛋白质的氢键和疏水力等分子间作用力受到影响, 肌原纤维蛋白发生变性, 电位增强。而当离子强度为 0.6 mol/L 时电位值最低, 0.1 mol/L 时电位绝对值最高。较高的离子强度会与肌原纤维蛋白中的带电氨基酸侧链形成盐桥, 侧链之间的相互作用增强, 肌原纤维蛋白分子紧密排列, 电位降低。Ma 等^[23]的研究表明, 75 °C 加热处理后的卵白蛋白 Zeta 电位也从 -17.03 mV 下降至 -19.77 mV, 绝对值变大, 与本文研究结果类似。

2.1.4 肌原纤维蛋白溶液表观粘度

图 4 为不同 NaCl 条件下 MP 与 MPA 组的肌原纤维蛋白溶液表观粘度, 表观粘度均随着剪切速率

的增加而减小，表现出剪切稀变现象^[24]。粘度随离子强度的增加而降低，这可能是 NaCl 中和了蛋白质表面的电荷，从而减弱静电相互作用，导致粘度的下降；热处理后肌原纤维蛋白溶液粘度呈下降趋势，这可能是温度过高而破坏或抑制了肌原纤维蛋白非共价键和共价键的形成，其疏水基团被破坏，表面静电斥力大于引力，从而导致肌原纤维蛋白溶液粘度降低^[25]。

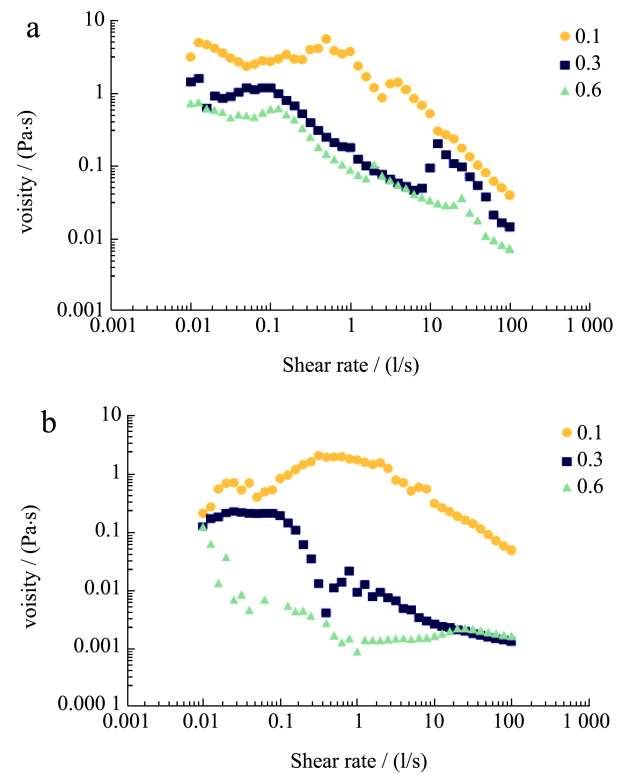


图 4 热处理与离子强度对肌原纤维蛋白溶液表观粘度的影响
Fig.4 Impact of heat treatment and ion strength on apparent viscosity of myofibrillar protein solution

2.1.5 肌原纤维蛋白溶液微观结构

图 5 中，和 MP 组相比，MPA 组可明显观察到经热处理后肌原纤维蛋白整体缩小成团状，其表面存在较多不均匀的颗粒，表明肌原纤维蛋白发生了聚集。这可能是因为高温抑制了氢键等化学键的作用，蛋白的结构受到影响^[26]，发生聚集，这与粒径的结果一致。对比不同的离子强度条件，蛋白质的分布也发生不同的变化。在离子强度为 0.6 mol/L 时，盐离子影响了肌原纤维蛋白结构，小聚集体明显数量上升，蛋白质聚集程度增强，这可能是盐离子与蛋白中的氨基酸残基相互作用，改变了蛋白分子之间的相互作用力，产生离子屏蔽现象^[27]，蛋白之间的斥力减弱，发生聚集。

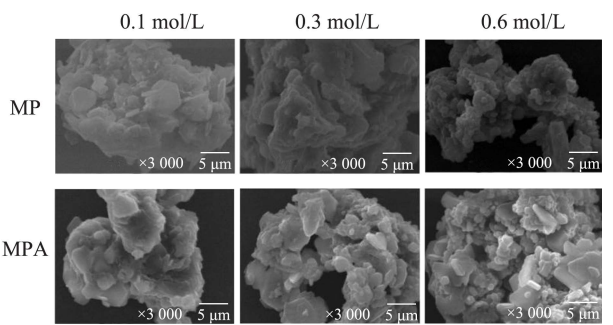


图 5 不同离子强度条件下 MP 与 MPA 组的微观结构
Fig.5 Microstructure of MP and MPA groups under different ionic strength conditions

2.2 肌原纤维蛋白乳液性质的表征

2.2.1 肌原纤维蛋白乳液蛋白组成

如图 6 所示，添加 NaCl 后，MP 组与 MPA 组条带变化不明显，表明 NaCl 对肌原纤维蛋白乳液的蛋白组成无明显影响；而经加热处理后，大分子蛋白条带明显加深，这与加热对肌原纤维蛋白溶液的影响相似，加热后蛋白之间静电作用减弱，蛋白分子聚集形成大分子聚集体。

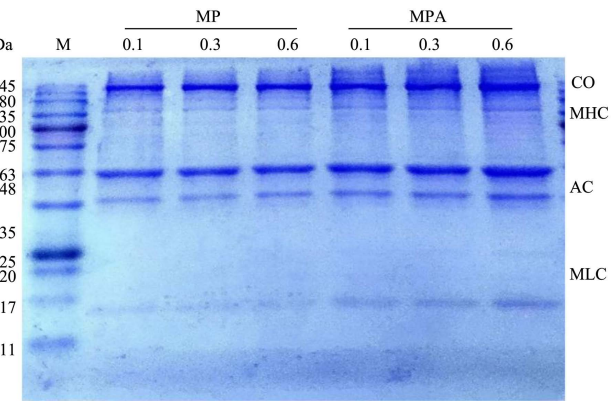


图 6 不同离子强度的 MPA 组和 MPA 组的 SDS-PAGE 图谱

Fig.6 SDS-PAGE electrophoretic profiles of MP and MPA groups under different ionic strength conditions

2.2.2 光学显微镜观察

图 7 为 MP 组和 MPA 组不同离子强度下肌原纤维蛋白乳液液滴的聚集情况。在离子强度较低时，乳液中乳化的油滴数量较少，且油滴的形状不规则。在离子强度为 0.6 mol/L 时，参与乳化的液滴数量最多，分散性较好。热处理使肌原纤维蛋白的乳化性增强，MPA 组较 MP 组油滴明显更大。在高温下，蛋白电荷产生屏蔽作用，表面电荷数减小。与 MP 组相比，MPA 组油滴更加分散，在高温下，蛋白电

荷产生屏蔽作用，表面电荷数减小，乳化稳定性更高。研究表明加热后的蛋白纤维乳液粒径小于未加热的蛋白乳液粒径，推测是热处理增加了蛋白的表面疏水性，增加其吸附在油水界面的能力，蛋白粒径下降^[28]。

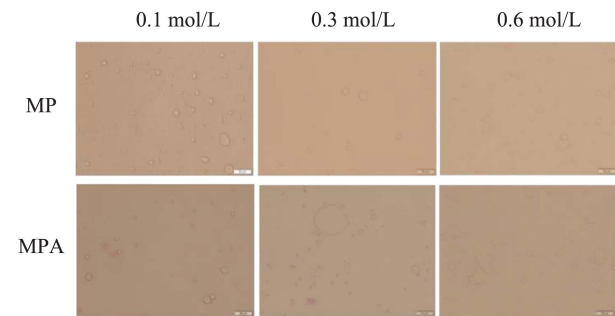


图 7 不同离子强度条件下 MP 组和 MPA 组乳液微观形貌的变化

Fig.7 Effect of different ionic strength on micromorphology of MP and MPA emulsion

2.2.2 肌原纤维蛋白乳液粒径

如图 8 可明显观察到加热与离子强度对肌原纤维蛋白乳液的粒径的影响。两组的粒径均呈单峰分布，表明形成的蛋白簇的大小均匀，乳液体系较为稳定。随着离子强度的上升，两组的粒径均变大，这与溶液粒径的变化结果一致，这可能是产生的离子屏蔽现象所导致，有研究表明，蛋白粒径的变化总是与构象和静电相互作用有关^[29]；而热处理后肌原纤维蛋白乳液的粒径逐渐减小，蛋白之间表面积增加，使蛋白的乳化性能有一定的提升^[30]。

2.2.3 肌原纤维蛋白乳液粘度

图 9 为不同离子强度条件下，MP 组和 MPA 组肌原纤维蛋白乳液粘度与剪切速率的变化曲线。热处理后的肌原纤维蛋白乳液粘度下降，这与图 4 结果一致。当剪切速率变大，各组肌原纤维蛋白乳液的表观粘度均呈现下降趋势。热处理会破坏疏水基团之间结合，抑制共价键和非共价键的生成，导致肌原纤维蛋白乳液的粘度降低，这与包含聚集颗粒的胶体分散体流变学特性一致，如产生剪切变稀、触变性等^[31]。当剪切速率相等时，随着离子强度增加，蛋白颗粒之间相互碰撞的频率增加，乳液稳定状态被破坏，肌原纤维蛋白表观粘度降低。刘炯娜等^[32]发现 NaCl 浓度在 0~400 mmol/L 之间时，随 NaCl 浓度增加，Pickering 乳液液滴发生重排，由无序状态转变为有序，Pickering 乳液稳定性增强，热稳定性降低，乳液内部保持相对稳定的状态。

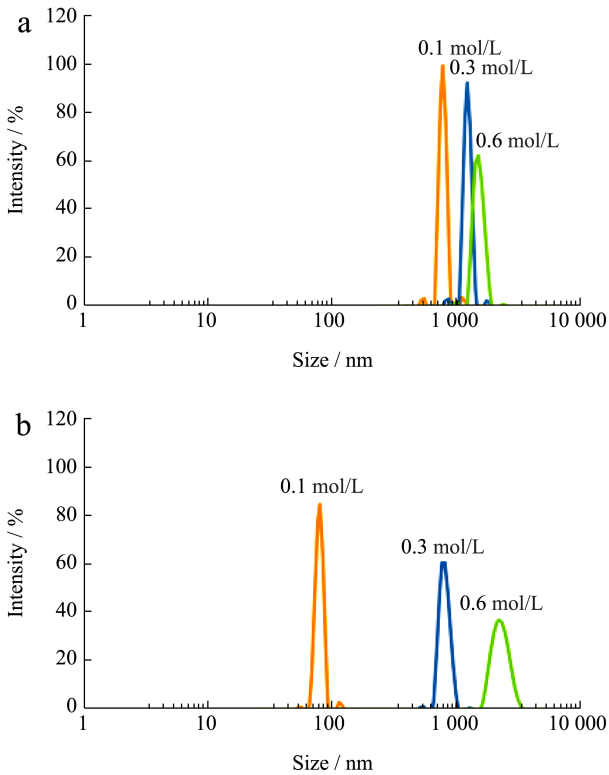


图 8 不同离子强度条件下 MP 组和 MPA 组乳液粒径

Fig.8 Particle size of emulsion in MP and MPA groups under different ion strength

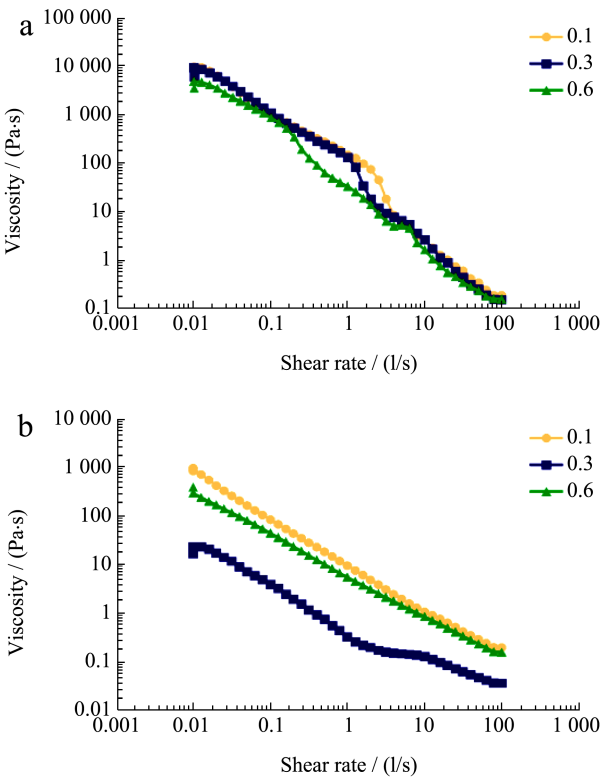


图 9 不同离子强度条件下 MP 组和 MPA 组的表观粘度变化

Fig.9 Changes of apparent viscosity of MP group and MPA group under different ionic strength conditions

2.2.4 肌原纤维蛋白乳液乳化活性

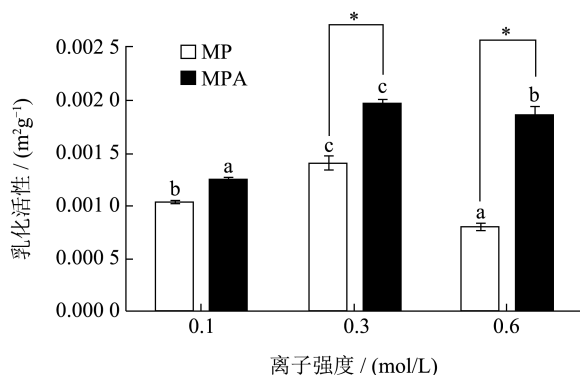


图 10 不同离子强度条件下 MP 组和 MPA 组的乳化活性
Fig.10 Emulsifying activity of MP and MPA groups under different ionic strength conditions

乳化活性是评价蛋白质乳化特性的常用指标,可以表征乳化体系中蛋白质在一定离子强度下对脂肪的吸附能力。蛋白质的乳化性能与表面电荷有密切的关系,乳化活性越高,乳液越稳定。由图 10 可知,随着离子强度的增加,肌原纤维蛋白的乳化活性指数不断增加,这是因为界面蛋白与油脂的相互作用增加^[33]。而加热后乳液的乳化活性增加的幅度大于未加热的乳液,这可能是因为加热之后蛋白质之间的相互作用增加^[34]。

3 结论

本研究以冷冻白鲢鱼糜为原料,通过蛋白组成、粒径、电位、微观结构、粘度、乳化活性的变化,探讨了热处理与不同离子强度所引起的肌原纤维蛋白性质变化。研究表明,经加热处理的肌原纤维蛋白溶液中的蛋白之间发生聚集,并且随离子强度的增加(0.1~0.6 mol/L),蛋白粒径增大,聚集性加强,表观粘度下降,电位绝对值减小;肌原纤维蛋白乳液的表观粘度随离子强度升高而减小,粒径随着离子强度增加而减小,乳液的稳定性与离子强度呈正相关,且经加热后的肌原纤维蛋白乳液乳化活性提高。本研究明确了在加热与不同离子强度下肌原纤维蛋白溶液及乳液性质变化,在离子强度为 0.6 mol/L 时,进行 85 °C 热处理所获得的肌原纤维蛋白稳定性最高。

参考文献

[1] ROWAN E S, WU J P. Are novel plant-based meat alternatives

the healthier choice? [J]. Food Research International, 2024, 183: 114184.

- [2] WANG K, LI Y, ZHANG Y M et al. Improving physicochemical properties of myofibrillar proteins from wooden breast of broiler by diverse glycation strategies [J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132328.
- [3] 祝超智,陈画,张秋会,等.NaCl对热诱导牛肉肌原纤维蛋白氧化及消化率的影响[J].食品安全质量检测学报, 2023,14(14):77-84.
- [4] 徐一宁,曹传爱,贺俊杰,等.亲水胶体调控肌原纤维蛋白热诱导凝胶形成机制的研究进展[J].食品科学,2024, 45(6):285-293.
- [5] 胡爱军,卢秀丽,郑捷,等.不同频率超声对鲢鱼肌原纤维蛋白结构的影响[J].现代食品科技,2014,30(3):23-27.
- [6] LI L Y, CAI R Y, WANG P, et al. Manipulating interfacial behavior and emulsifying properties of myosin through alkali-heat treatment [J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 69-74.
- [7] 郑云芳,李晨,张芳,等.热处理对鲈鱼肌原纤维蛋白结构及功能特性的影响[J].福州大学学报(自然科学版),2022, 50(1):139-146.
- [8] 郝梦,毛书灿,周志,等.热处理和蛋白浓度对肌原纤维蛋白乳液的稳定性和流变特性的影响[J].食品工业科技, 2022,43(23):56-63.
- [9] 王海帆,熊哲民,王玉洁,等.氯化钠对猪肉肌原纤维蛋白构像及其与辣椒素相互作用的影响[J].食品安全质量检测学报,2023,14(5): 101-107.
- [10] 郝子娜,张古龙,马雅楠,等.亚硝酸钠对鲢鱼鱼肉组织及肌原纤维蛋白结构的影响[J].食品工业,2022,43(11):179-183.
- [11] LIU S L, ZHAO P C, ZHANG J J, et al. Physicochemical and functional properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myofibrillar protein glycosylated with konjac oligo-glucoside [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 67: 216-223.
- [12] ZHANG S Q, ZHOU P C, HAN P, et al. Formation of N^ε-carboxymethyl-lysine and N^ε-carboxyethyl-lysine in heated fish myofibrillar proteins with glucose: relationship with its protein structural characterization [J]. Foods, 2023, 12(5): 1039.
- [13] ZHANG Z Y, YANG Y L, ZHOU P, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678-686.
- [14] 宿华林,吴迪,孙爽,等.高强度超声辅助乳化对金鲢鱼蛋白-茶皂苷复合乳液性质的影响[J].中国油脂,2024, 49(1):35-42.
- [15] 朱雪峰.大豆分离蛋白热聚集颗粒稳定Pickering乳液的冻融稳定性[D].广州:华南理工大学,2017.

- [16] 李可,李三影,张瑞,等.超声辅助碱法提取对类PSE鸡肉蛋白提取率 and 功能特性的影响[J].肉类研究,2021,35(10):1-7.
- [17] 陈正冬,郑婉婷.肌球蛋白的解离研究进展[J].现代食品科技,2023,39(3):356-363.
- [18] 汤晓艳,周光宏,徐幸莲,等.高浓度CaCl₂溶液对某些肌原纤维蛋白的作用研究[J].食品科学,2007,12:117-121.
- [19] KO W C, YU C C, KUO C H, et al. Changes in conformation and sulfhydryl groups of tilapia actomyosin by thermal treatment [J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(8): 1316-1320.
- [20] KANG Z L, ZHANG X H, LI X, et al. The effects of sodium chloride on proteins aggregation, conformation and gel properties of pork myofibrillar protein Running Head: Relationship aggregation, conformation and gel properties [J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58: 2258-2264.
- [21] 盖静.不同加热温度对鳙鱼肌球蛋白聚集行为的影响及其机理研究[D].镇江:江苏大学,2016.
- [22] ZOU H N, ZHAO N, SUN S, et al. High-intensity ultrasonication treatment improved physicochemical and functional properties of mussel sarcoplasmic proteins and enhanced the stability of oil-in-water emulsion [J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 589: 124463.
- [23] MA Y Q, ZHAO Y, JIANG Y Q, et al. Effect of dry heating on the aggregation behaviour and aggregate morphologies of ovalbumin [J]. Food Chemistry, 2019, 285: 296-304.
- [24] GUILHERME D F F, RICARDO N C P, ANTONIO A V, et al. Cold gel-like emulsions of lactoferrin subjected to ohmic heating [J]. Food Research International, 2018, 103: 371-379.
- [25] AHMED S E. Newtonian viscosity behavior of dilute solutions of polymerized whey proteins. Would viscosity measurements reveal more detailed molecular properties? [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 200-205.
- [26] 王天泽,杨平,黄峰,等.热处理过程中肌肉蛋白与蒽类化合物相互作用机制[J].农业工程学报,2023,39(17):286-294.
- [27] 孟嘉璐,许树荣,邓莎,等.食盐液浓度对鸡肉肌原纤维蛋白氧化及交联的影响[J].食品科技,2022,47(8):81-88.
- [28] 殷静霖,熊舟翼,熊汉国.热聚合卵白蛋白自组装纤维及其稳定乳液的研究[J].中国调味品,2021,46(10):1-7.
- [29] CAO C W, XIAO Z C, GE C R, et al. Animal by-products collagen and derived peptide, as important components of innovative sustainable food systems-A comprehensive review [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2022, 62(31): 8703-8727.
- [30] THAMMARAT K, SOOTTAWAT B, WONNOP V. Effect of NaCl on thermal aggregation of egg white proteins from duck egg [J]. Food Chemistry, 2011, 125(2): 706-712.
- [31] BAIESI M, CARLON E, PARMEGGIANI A. Fundamental problems in statistical physics XIII special issue [J]. Physica A, 2015, 418: 1-5.
- [32] 刘炯娜,张恒瑄,蒋雨心,等.pH和NaCl浓度对核桃蛋白纳米颗粒Pickering乳液稳定性的影响[J].中国油脂,2024,49(11):120-127.
- [33] 张桂艳.食盐和加热对肌原纤维蛋白与 I 型胶原蛋白乳化的影响[D].郑州:河南农业大学,2022.
- [34] ASADUZZAMAN M, Mahomud M S, HAQUE M E. Heat-induced interaction of milk proteins: impact on yoghurt structure [J]. Hindawi Limited, 2021, 10: 5569917.