DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260209006
引用格式: 张博宇, 关博骏, 陈木林, 等. 基于分子间作用力与水分迁移的肌红蛋白对肌原纤维蛋白凝胶性能影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 171–181.
Zhang Boyu, Guan Bojun, Chen Mulin, et al. Study on the influences of myoglobin on the gel properties of myofibrillar protein based on intermolecular forces and water migration [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 171–181. (in Chinese with English abstract).

基于分子间作用力与水分迁移的肌红蛋白对肌原纤维蛋白凝胶性能影响研究

张博宇, 关博骏, 陈木林, 仪淑敏*, 李学鹏, 励建荣
(渤海大学食品科学与工程学院, 锦州 121013)

摘 要: 目的 探究肌红蛋白在未漂洗鱼糜制品加工过程中对肌原纤维蛋白的凝胶劣化机制。**方法** 分析不同漂洗次数对白鲢鱼糜凝胶性能的影响, 确认未漂洗鱼糜中肌红蛋白含量较高且凝胶性能较差; 并以此构建肌红蛋白-肌原纤维蛋白混合体系, 测定蛋白间疏水相互作用、氢键、离子键的变化, 并利用低场核磁共振分析水分分布。**结果** 添加 86 μmol/L 肌红蛋白反应 0 h 后, 疏水相互作用、氢键和离子键分别降低 14.02%、19.86%和 23.24%, 不易流动水(T_{23})峰面积占比下降 3.84%; 反应 24 h 后劣化加剧, 各分子间作用力较 0 h 进一步下降, T_{23} 峰面积占比降至 87.90%, 较同期空白对照组(0 μmol/L 肌红蛋白)下降 4.17%, 凝胶网络由致密均匀变为粗糙松散, 致使持水性显著降低、蒸煮损失增大。**结论** 肌红蛋白通过空间位阻干扰鱼糜蛋白间的分子交联, 削弱分子间作用力, 破坏凝胶网络结构, 进而引发水分迁移与流失。本研究明确了肌红蛋白对肌原纤维蛋白凝胶网络的作用路径与影响规律, 可为未漂洗鱼糜加工中通过调控内源性血红素蛋白来提升凝胶品质提供理论依据。

关键词: 未漂洗鱼糜; 肌红蛋白; 肌原纤维蛋白; 分子间作用力; 水分分布迁移
中图分类号: TS254.4 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0171–11

Study on the influences of myoglobin on the gel properties of myofibrillar protein based on intermolecular forces and water migration

ZHANG Bo-Yu, GUAN Bo-Jun, CHEN Mu-Lin, YI Shu-Min*, LI Xue-Peng, LI Jian-Rong
(*College of Food Science and Engineering*, *Bohai University*, *Jinzhou* 121013, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the mechanism by which myoglobin deteriorates the gelation properties of myofibrillar protein during the processing of unwashed surimi products. **Methods** The effects of different rinsing cycles on the gel properties of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi were analyzed to confirm that unwashed surimi contains a higher level of myoglobin and exhibits poorer gel performance. A myoglobin-myofibrillar protein mixed

收稿日期: 2026-02-09
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32272256); 辽宁省自然基金面上项目(2024010632-JH3/107); 辽宁省教育厅科学技术研究项目(LJ212410167068)
第一作者: 张博宇(2004—), 男, 主要研究方向为水产品加工。E-mail: 819826007@qq.com
***通信作者:** 仪淑敏(1980—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品贮藏加工及质量安全控制方面的研究。E-mail: yishumin@163.com

system was then constructed. Changes in hydrophobic interactions, hydrogen bonds and ionic bonds between proteins were measured, and water distribution was analyzed using low-field nuclear magnetic resonance. **Results** After 0 h of reaction with 86 μmol/L myoglobin, hydrophobic interactions, hydrogen bonds and ionic bonds decreased by 14.02%, 19.86% and 23.24%, respectively, and the proportion of immobilized water (T_{23}) peak area decreased by 3.84%. After 24 h of reaction, the deterioration intensified: all intermolecular forces further decreased compared with those at 0 h, and the T_{23} peak area proportion dropped to 87.90%, a decrease of 4.17% compared with the blank control group (0 μmol/L myoglobin) at the same time point. The gel network changed from dense and uniform to rough and loose, resulting in significantly reduced water-holding capacity and increased cooking loss. **Conclusion** Myoglobin interferes with molecular cross-linking between surimi proteins through steric hindrance, weakens intermolecular forces, disrupts the gel network structure, and consequently induces water migration and loss. This research has clarified the action path and influence rule of myoglobin on myofibrillar protein gel network, which can provide theoretical basis for improving the quality of gel by regulating endogenous heme protein during the processing of unwashed surimi gel.

KEY WORDS: unwashed surimi; myoglobin; myofibrillar protein; intermolecular forces; water migration

0 引 言

白鲢鱼(*Hypophthalmichthys molitrix*)隶属鲤科、鲢属, 广泛分布于亚洲东部, 是我国四大鱼类之一, 在我国淡水渔业产量中占重要地位。白鲢鱼具有生长速率快、养殖成本低、肉质细嫩, 蛋白含量较高等优点, 是加工冷冻鱼糜制品的主要淡水原料[1]。然而, 白鲢鱼糜的凝胶形成能力受原料内源组分的影响较为明显, 其在未漂洗状态下的凝胶劣化问题影响其凝胶品质[2], 这使其成为研究淡水鱼糜凝胶劣化机制的理想原料。

鱼糜是以鱼肉为原料, 通过采肉、漂洗、精滤、脱水、斩拌等工艺制得的中间原料, 具有高蛋白、低脂肪等特点, 市场开发潜力较大[3]。在鱼糜生产过程中, 漂洗除去了多余的脂肪、无机盐、色素和水溶性蛋白, 减缓了鱼糜氧化变质[2], 但同时也造成了水溶性蛋白和部分盐溶性蛋白的流失, 降低了鱼糜的营养价值[4]。目前, 未漂洗鱼糜因其工艺流程简单, 营养物质保留率较高而受到关注[5]。但其内源性成分, 如蛋白酶、水溶性蛋白等多种组分会对肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)的热诱导凝胶化过程产生干扰, 导致产品凝胶强度不足[6]。这些组分中, 内源性蛋白酶通过催化肽键断裂降解肌球蛋白侧链, 从而削弱凝胶网络[7], 该机制已有多篇文献报道[8]; 而肌红蛋白(myoglobin, Mb)作为未漂洗鱼糜中含量最多的水溶性蛋白, 其对 MP 凝胶性能的影响缺乏系统研究。目前研究多注重于外源添加物对未漂洗鱼糜凝胶品质进行改善[9]。而对于鱼肉中天然存在的水溶性蛋白如何从分子层面影响凝胶网络形成的研究较少[10]。因此, 本研究选取 Mb 为对象, 从分子间作用力与水分迁移的角度探究其对 MP 凝胶性能的影响机制。

Mb 是未漂洗鱼糜中的一种水溶性血红素蛋白, 其血红素基团中的铁离子在热处理过程中易被氧化, 可由二价铁形式的氧合 Mb 转化为三价铁形式的高铁 Mb[11], 导致鱼糜制品颜色劣变, 并加速 MP 氧化, 削弱鱼糜凝胶强度和持水性。此外, Mb 分子作为外源蛋白, 在热诱导凝胶化过程中可能与 MP 竞争结合位点, 通过空间位阻效应干扰 MP 分子间的有序聚集[12]。在充分漂洗的鱼糜中, Mb 含量较低, 其对凝胶特性的影响较小; 而在未漂洗鱼糜中, Mb 含量显著提高, 其对鱼糜凝胶网络劣化有显著影响[6]。然而, 目前关于 Mb 在未漂洗鱼糜体系中对 MP 凝胶性能的影响程度及作用途径的研究较少。

MP 作为鱼肉中的核心功能性蛋白, 其疏水相互作用是驱动蛋白质聚集形成凝胶骨架的主要驱动力, 而氢键和离子键则对凝胶网络中水分的维持和结构稳定性起着关键作用[7]。当未漂洗鱼糜中的 Mb 等内源性组分与 MP 相互作用时, Mb 氧化过程中生成的活性氧会攻击 MP 分子中的氨基酸残基[13], 改变其电荷分布与疏水特性, 从而干扰凝胶网络的形成。这意味着, Mb 对 MP 凝胶性能的影响可能并非单一方式。因此, 系统研究 Mb 对 MP 分子间作用力及水分分布的影响, 是明确未漂洗鱼糜凝胶劣化机制的关键。

为明确 Mb 是否主要影响了未漂洗鱼糜凝胶性能的下降, 本研究首先分析不同漂洗次数鱼糜的凝胶性能差异, 建立了 Mb 残留量与凝胶品质之间的对应关系; 进而提取并纯化白鲢鱼肌肉中的 Mb 和 MP, 构建了 Mb-MP 混合体系, 考察不同浓度 Mb 及反应时间对 MP 凝胶性能、分子间作用力及水分分布迁移的影响, 从分子间作用力与水分迁移的角度阐明 Mb 干扰 MP 凝胶网络形成的具体方式, 为未漂洗鱼糜加工过程中凝胶品质的改善提供理论依据, 并为同类水溶性蛋白对鱼糜凝胶性能影响的研究提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

白鲢鱼[重量(2000±50) g, 锦州市科技路水产市场]。

氯化钠(NaCl)、三羟甲基氨基甲烷(tromethamine, Tris)、乙二胺四乙酸(ethylenediamine tetraacetic acid, EDTA)、Triton X-100、磷酸氢二钠、磷酸二氢钠、山梨糖醇、蔗糖、*β*-巯基乙醇、尿素、无水乙醇、戊二醛(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 考马斯亮蓝快速染色液、双缩脲法蛋白浓度测定试剂盒(含硫酸铜、酒石酸钾钠等)、苏木素-伊红(hematoxylin-eosin, HE)染色液(北京索莱邦科技有限公司)。

1.2　仪器与设备

YC200 采肉机、XJT-JL200 精滤机(诸城市凯成良才机械厂); UMC5 真空冷冻斩拌机(德国 Stephen 公司); FA-1004 电子天平(精度 0.01 mg, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司); ZD-9556 脱色摇床(常州市凯航仪器有限公司); DSC Q2000 差示热量扫描仪、Discovery HR-1 流变仪(美国 TA 公司); TA-XT Plus 物性测试仪(英国 Stable Micro Systems 公司); HH-4 数显恒温水浴锅(常州国华电器有限公司); MesoMR23-040H-I 低场核磁共振仪(苏州纽迈分析仪公司); CM 1850 冷冻切片机(德国 Leica 公司); 80-i 正置光学显微镜(日本 Nikon 公司); S-4800 场发射扫描电子显微镜(日本 HitachiI 公司); E-1045 镀金仪(日本日立高新技术公司); GL-21M 落地式高速冷冻离心机(湘仪湖南离心机仪器有限公司); UV-2550 紫外可见光分光光度计(日本岛津仪器有限公司); T18 高速均质机(德国 IKA 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　不同漂洗次数对白鲢鱼糜凝胶特性的分析

(1)不同漂洗次数白鲢鱼糜的制备

对白鲢鱼进行预处理, 依次通过采肉机与精滤机进行加工。随后向鱼肉中添加复合抗冻剂(4%山梨糖醇与 4%蔗糖), 充分混匀后真空包装, 并于–80 ℃条件下冻藏。实验设置的处理组如下: 未漂洗鱼糜(W0): 精滤后的鱼糜; 一次漂洗鱼糜(W1): 精滤后的鱼糜加入 5 倍体积的纯净水(0 ℃)漂洗 15 min, 脱水 15 min; 二次漂洗鱼糜(W2): 一次漂洗后的鱼糜加入 5 倍体积 0.15%的盐水(0 ℃)漂洗 15 min, 脱水 15 min; 3 次漂洗鱼糜(W3): 二次漂洗的鱼糜加入 5 倍体积 0.15%的盐水(0 ℃)漂洗 15 min, 脱水 15 min。

(2)鱼糜凝胶的制备

将冷冻鱼糜解冻并切块后, 在真空度–0.6 bar、温度 0~4 ℃的高速斩拌机中进行斩拌。依次经历空斩、加盐(2.5%, *m*:*m*)斩拌及补水至 80%水分含量斩拌, 各步骤持续 3 min。将鱼糜灌注于直径 32 mm 的尼龙肠衣中, 随后进行二阶段加热处理: 40 ℃加热 30 min, 接着升温至 90 ℃再加热 20 min, 使鱼糜形成凝胶。凝胶制成后经冷却处理, 置于 4 ℃环境下过夜保存, 以备后续测试。

(3) Mb 的提取及含量的测定

Mb 含量的测定参照郑娅等[14]建立的方法进行, 记录吸光度值并计算含量。分别称取经 3 次漂洗的鱼糜、未漂洗鱼糜及白鲢鱼心脏组织, 经绞碎处理后, 按重量体积比 1:3 加入预冷的提取缓冲液(成分: 10 mmol/L Tris-HCl, 1 mmol/L EDTA, 25 g/L Triton X-100, pH 8.0)进行均质。匀浆液于 4 ℃、8000 r/min 条件下离心 15 min, 所得上清液经 Whatman 1 号滤纸过滤后, 使用紫外可见分光光度计测量其吸光度, 并依此计算各样品浓度。样品中浓度的计算如公式(1)、(2)所示。

$$C_1=0.086A_{565}+0.088A_{545}+0.099A_{525}-0.166A_{572} \quad (1)$$

$$C_{Mb}=C_1\times 17.5 \quad (2)$$

式中: A_{525}、A_{545}、A_{565}、A_{572} 分别为样品液在波长 525、545、565、572 nm 处测得的吸光度; 0.086、0.088、0.099、0.166 分别为各波长对应的校正系数; C_1 为提取液中 Mb 的浓度, μmol/mL; C_{Mb} 为提取液中 Mb 的质量浓度, mg/mL。

(4)鱼糜凝胶持水性和蒸煮损失的测定

持水性的测定参照 Jin 等[15]的方法并调整。取制备好的凝胶, 切成厚度约 3 mm 的薄片, 称其质量, 记录为 W_1 (g)。随后将薄片用 3 层滤纸包好, 置于离心管内, 在 4 ℃、5000 r/min 条件下离心 15 min。离心完成后取出样品再次称重, 记为 W_2 (g)。样品持水性计算如公式(3)所示。

$$\text{持水性}/\%=W_2/W_1\times 100\% \quad (3)$$

蒸煮损失的测定参照 Yang 等[16]的方法并作调整。取制备好的凝胶, 切成厚度约 3 mm 的薄片, 称量其质量, 记为 G_1 (g)。将薄片转移至蒸煮袋中, 置于 90 ℃水浴内加热 20 min。加热完成后取出薄片, 吸去表面水分, 再次称量, 记为 G_2 (g)。蒸煮损失计算如公式(4)所示。

$$\text{蒸煮损失}/\%=(G_1-G_2)\times 100\% \quad (4)$$

(5)鱼糜凝胶分子间相互作用力的测定

用均质机将 2 g 凝胶样品分散于以下溶液: A 液(0.05 mol/L NaCl); B 液(0.6 mol/L NaCl); C 液(0.6 mol/L NaCl、1.5 mol/L 尿素); D 液(0.6 mol/L NaCl、8 mol/L 尿素); E 液(0.6 mol/L NaCl、8 mol/L 尿素、0.05 mol/L *β*-巯基乙醇), 得到的混合溶液在 4 ℃反应 1 h, 随后在 10000 r/min 条件下离心 15 min[17]。最后采用考马斯亮蓝法测定各上清液的蛋白质浓度, 并通过计算不同提取液间的蛋白浓度差值来量化各类化学相互作用的强度。

(6)动态流变学特性的测定

用流变仪测鱼糜的动态流变特性, 采用温度扫描模式记录储能模量(G')和损耗模量(G'')。具体参数: 温度从 20 ℃升到 90 ℃, 升温速率为 2 ℃/min, 应变 1%, 频率 0.1 Hz, 每个温度点保温 1 min。

1.3.2　Mb 对白鲢鱼 MP 凝胶特性的分析

(1) MP 的制备

将白鲢鱼鱼糜搅碎, 加入 3 倍体积的 20 mmol/L 磷酸盐缓冲液(pH 7.5)进行均质, 以 8000 r/min 离心 20 min, 收集沉淀, 重复该清洗步骤两次。沉淀再经过 0.1 mmol/L NaCl 溶液溶解、离心, 再以含 0.1 mmol/L NaCl 的磷酸盐

缓冲液清洗、离心, 最终所得沉淀即为 MP, 蛋白质浓度采用双缩脲法进行测定[18]。

(2)混合蛋白热诱导凝胶样品的制备

将 Mb 溶液(0、32、126、172 μmol/L)与 MP 沉淀等体积混合, 获得浓度分别为 0、16、63、86 μmol/L 的样品。其中, 16 μmol/L 和 86 μmol/L 分别对应漂洗 3 次鱼糜和未漂洗鱼糜中实际测得的 Mb 含量, 63 μmol/L 为中间浓度, 用于确定最佳反应浓度。随后, 使用指定的磷酸盐缓冲液将所有样品的 MP 质量浓度调节至 100 mg/mL。这些样品在 4 ℃避光孵育 0 h 和 24 h 后, 取固定体积经过二段加热程序(40 ℃ 30 min, 随后 90 ℃ 20 min)诱导形成凝胶[19]。选择 24 h 作为反应时间, 是因为 Mb 中的二价铁在此时间点已大量氧化为高铁 Mb[20], 氧化反应趋于稳定。制成的凝胶经冷却后于 4 ℃贮存过夜, 每个处理组均进行 3 次平行实验。

(3)凝胶强度的测定

采用质构仪配备 P/5S 探头进行凝胶强度测试。样品制备为 25 mm 高的圆柱体, 测试条件: 探头移动速率(测前、测试、测后)均为 1 mm/s, 压缩距离 15 mm, 起始触发力 15 *g*。每组样品平行测定不少于 6 次, 凝胶强度计算如公式(5)所示。

$$凝胶强度/(g \cdot cm) = 破断强度(g) \times 破断距离(cm) \quad (5)$$

(4)鱼糜凝胶光学显微镜和扫描电子显微镜的测定

将样品黏在样品盘上, 在–80 ℃条件下冷冻 30 min。随后在冷冻切片机上制备成 8 μm 厚的切片, 贴附于载玻片后进行 HE 染色。样品的微观结构最终在放大倍数为 40 倍的光学显微镜下进行观察。

将制备好的凝胶样品置于 2.5% (*V*:*V*)戊二醛溶液(pH 6.8)中浸泡过夜, 以完成固定处理。随后, 样品用 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液冲洗 3 次, 每次 10 min。冲洗后的样品依次经由体积分数为 50%、60%、80%、90%和 100%的乙醇溶液进行梯度脱水。最终样品经冷冻干燥和喷金处理后, 使用扫描电子显微镜在 2000×与 5000×放大倍数下观察其微观结构[21]。

(5)凝胶水分迁移的测定

采用低场核磁共振仪分析蛋白凝胶的水分分布与组成。精确称取 7.00 g 样品置于取样器, 利用 CPMG 序列在 25 ℃下进行测定。主要参数包括: 质子共振频率 21 MHz, 等待时间 4500 ms, 采样频率 250 kHz, 反演迭代 100000 次, 扫描 4 次[22]。每个样品平行测定 3 次。

(6)凝胶氢质子成像的测定

MP 凝胶的氢质子密度成像通过低场核磁共振仪来测定。设置参数为: 视野 80.0 mm×80.0 mm, 层宽 3.00 mm, 层间距 0.50 mm, 读取尺寸 256, 相位尺寸 192, 重复时间(repetition time, TR) 1600 ms, 回波时间(echo time, TE) 20.0 ms[23]。

1.4 数据处理

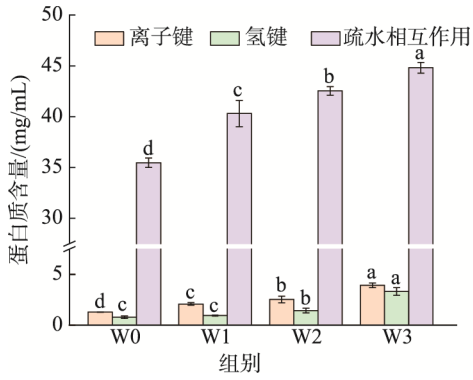
所有实验至少做 3 组平行, 本研究所有数据采用 SPSS 22.0 软件和 Origin Pro 2024 软件进行数据处理和实验数据的显著性分析, $P<0.05$。结果采用平均值±标准偏差形式表达, 差异显著表示方法采用标记字母法。利用 Origin Pro 2024 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 漂洗对鱼糜凝胶性能的影响

2.1.1 漂洗对鱼糜凝胶分子间作用力的影响

分子间作用力在促进蛋白质交联以及形成稳定的三维凝胶网络方面起到重要作用[24]。由图 1 可知, 整体上疏水相互作用、氢键与离子键随着漂洗次数的增加而显著增强($P<0.05$)。W3 组的离子键、氢键、疏水相互作用的蛋白质含量均达到最高, 分别为 3.93、3.32 和 44.82 mg/mL。其中, 疏水相互作用是凝胶形成的主要作用力, 其增强表明了漂洗为蛋白质疏水基团的暴露与结合提供了较为有利的环境[25]。氢键与离子键的增强则有利于提升鱼糜凝胶的持水能力[26]。W0 组各类分子间作用力均处于最低水平, 这主要是因为未漂洗鱼糜中残留的水溶性蛋白及可溶性杂质的干扰。其中, Mb 是未漂洗鱼糜中含量较高的水溶性蛋白。其通过空间位阻来阻碍肌球蛋白尾部间的有序交联, 导致 MP 较难形成紧密的凝胶网络结构, 进而降低疏水相互作用力。此外, 未漂洗鱼糜中含有少量脂质氧化物, 其会与蛋白质网络发生交联反应, 阻碍了疏水基团的正常结合[27], 导致 W0 组未漂洗鱼糜中疏水相互作用、氢键和离子键均含量低于漂洗组别。



注: 不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$), 图 2、4~5、8~9 同。

图 1 不同漂洗次数白鲢鱼糜凝胶的分子间相互作用

Fig.1 Intermolecular interaction of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi gel with different washing times

2.1.2 漂洗对鱼糜凝胶持水性和蒸煮损失的影响

鱼糜凝胶的网络结构影响其持水能力和抗蒸煮损失能力。由图 2 可知, 随着漂洗次数的次数增加, 鱼糜凝胶的持水能力逐渐增强, 而蒸煮损失逐渐下降。其中 W3 组蒸煮损失最低, 持水性最高, 分别为 7.80%和 92.66%。大量水溶性蛋白酶、Mb 均存在于未漂洗鱼糜中。蛋白酶在

热诱导凝胶聚集过程中会降解 MP[6]，加剧凝胶网络的劣化，导致其水分保留能力变差，进而导致未漂洗组持水性仅为 77.84%。随着漂洗次数增加，鱼糜中的水溶性蛋白酶、脂质及 Mb 被逐步去除，减少了对蛋白交联的干扰，使 MP 有序地聚集在一起，形成均匀、致密的三维凝胶网络[28]。而经过 3 次漂洗后，鱼糜凝胶持水性显著提高为 92.66%。与 W0 组别相比，持水性提高了 14.82%，蒸煮损失降低了 5.92%，这一结果说明漂洗处理能有效提升热诱导凝胶聚集过程中凝胶网络对水分的束缚能力。3 次漂洗后增加了 MP 的相对含量，有助于形成良好的凝胶网络结构，增强对水分的截留能力，降低蒸煮损失[29]。

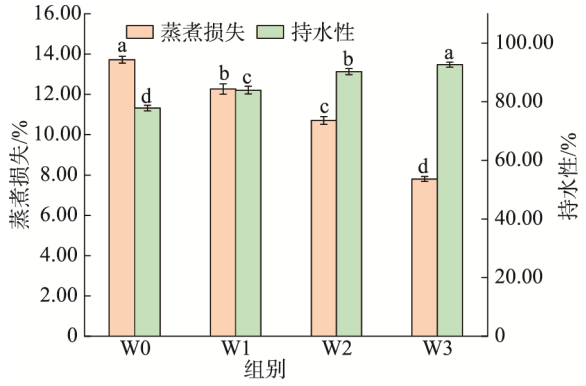


图 2　不同漂洗次数白鲢鱼糜凝胶持水性和蒸煮损失

Fig.2　Water holding capacity and cooking loss of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi gel with different washing times

2.1.3　漂洗对鱼糜动态流变学特性的影响

G'反映了鱼糜凝胶强度有关的数值大小的凝胶储存弹性形变能量的能力[30]。由图 3 可知，随温度的升高，鱼糜的 *G*'先下降，然后在 48 ℃左右上升，最后在 70 ℃附近趋于平缓，*G*'的下降可能是内源蛋白酶降解初始凝胶网络引起的凝胶劣化。随后 *G*'的增加是因为肌球蛋白和肌动球蛋白的变性形成了紧密的凝胶网络。随漂洗次数的增加，鱼糜样品的 *G*'增加，表明随着漂洗次数的增加，鱼糜的凝胶强度增强[31]。

损耗模量(*G*")表示鱼糜凝胶的黏性特性。由图 3 可知，*G*"在 20~35 ℃范围内逐渐增加，并在 35 ℃时达到最大，表明蛋白质通过氢键形成较弱的蛋白凝胶结构[32]。其在 35~50 ℃范围内下降，并在 50 ℃达到最低，这是因为肌球蛋白结构域逐渐解离，分子流动性增强，导致鱼糜凝胶网络出现暂时劣化[33]。*G*"在 50 ℃后又呈上升趋势直至 67 ℃，这可能是随着温度升高，蛋白质分子逐渐展开，疏水相互作用力增强，进而形成紧密的弹性网络[34]。67 ℃后缓慢下降并趋于稳定，表明鱼糜凝胶网络此时已基本形成，蛋白质网络中蛋白分子间的摩擦力逐渐减少。*G*"从大到小顺序为 W3>W2>W1>W0，与 *G*'的顺序相同，其中 *G*'远远大于 *G*"。这表明漂洗能提升鱼糜凝胶的弹性和黏性。而未漂洗鱼糜 W0 组别的 *G*'和 *G*"在温度升高过程中始终低于其他组别，这表明未漂洗鱼糜凝胶中的水溶性蛋白会干扰 MP 的交联[26]。进而证明了，漂洗主要通过减少水溶性蛋白对 MP 的影响，来提升鱼糜凝胶的品质。

随着漂洗次数的增加，鱼糜凝胶的分子间作用力、持水性、蒸煮损失和动态流变学特性均增加。其中 3 次漂洗处理组在各项指标中均达到最高。表明随着漂洗次数的增加，鱼糜的凝胶性能逐渐提升。综上，3 次漂洗达到较好的凝胶品质。

2.2　Mb 对白鲢鱼 MP 凝胶特性的分析

2.2.1　Mb 对 MP 凝胶强度的影响

根据漂洗对鱼糜凝胶分子间作用力、持水性和蒸煮损失、动态流变学特性，构建 Mb-MP 复合蛋白体系，其凝胶强度可以直观表现 Mb 对 MP 凝胶的劣化作用。分析图 4 可知，反应 0 h 时，破断力在加入 16 μmol/L Mb 后，凝胶强度无显著变化(P>0.05)；添加 63 μmol/L、86 μmol/L 的 Mb 后，破断力逐渐下降，破断距离也随着 Mb 的添加量的增加而降低。这可能是 0 h 时，氧化发生不充分，而随着 Mb 浓度上升时，高浓度的 Mb 限制了 MP 的正常交联[35]。当反应时间延长至 24 h 时，破断力和破断距离呈同样的变化趋势，均在添加量为 16 μmol/L 时达到最高，而添加 63 μmol/L、86 μmol/L 的 Mb 后，均逐渐下降。这是因为 16 μmol/L 的 Mb 能对 MP 进行有限的氧化修饰，使 MP 分子适度展开。而添加过量的 Mb 后，蛋白结构大量伸展，疏水基团暴露在分子表面形成较多的二硫键及其他化合物，不利于形成致密的蛋白凝胶结构[36]。

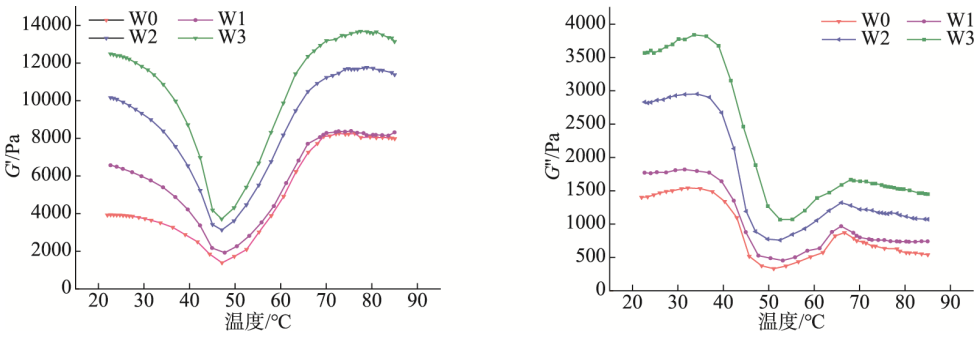


图 3　不同漂洗次数白鲢鱼糜储能模量与损耗模量的影响

Fig.3　Effects of different washing times on the storage modulus and loss modulus of *Hypophthalmichthys molitrix* surimi gel

分析图 5 可知，当 Mb 与 MP 的反应时间为 0 h 时，Mb 添加量在 0~16 μmol/L 对 MP 凝胶强度无显著影响(P>0.05)，是 Mb 中二价铁离子未氧化成三价铁离子，对 MP 氧化能力较小，因此该添加量范围内凝胶强度无明显变化。当添加量为 63~86 μmol/L 时，凝胶强度呈显著下降趋势(P<0.05)，原因是高添加量下鱼糜凝胶中高铁 Mb 含量增加，导致 MP 发生氧化，阻碍其形成均匀、致密的凝胶网络[37]。当 Mb 与 MP 的反应时间延长至 24 h 后，凝胶强度较反应 0 h 均有所下降，其中空白对照组的凝胶强度下降 42.17 g • cm，表明 Mb 中二价铁已完全氧化成三价铁，使 MP 发生氧化，导致维持蛋白质空间结构的离子键、氢键等分子间作用力遭到破坏[38]，进而影响热诱导凝胶过程中蛋白分子间的交联作用，最终造成凝胶强度降低。添加量为 16 μmol/L Mb 时，鱼糜凝胶的凝胶强度较未添加 Mb 组增加了 18.62 g • cm。这是 Mb 对 MP 适度氧化增加了蛋白质之间的交联性，提升了凝胶强度。而当 Mb 添加量继续增加时，MP 凝胶强度逐渐下降，表明过量 Mb 会引发蛋白凝胶体系的品质劣化，这可能一方面是 Mb 的氧化作用，使 MP 之间形成了不溶性的聚集体[35]。另一方面，过量的 Mb 之间发生氧化聚集，形成的聚集体会阻碍 MP 分子间的交联，进而使凝胶强度下降。

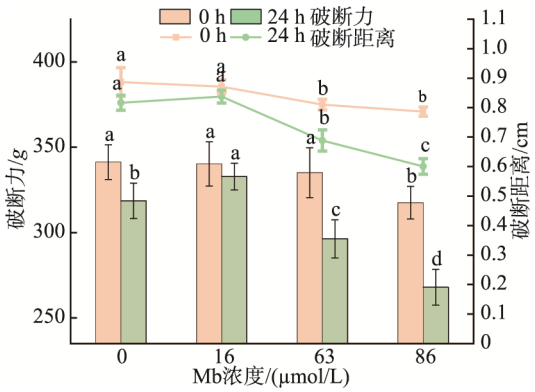
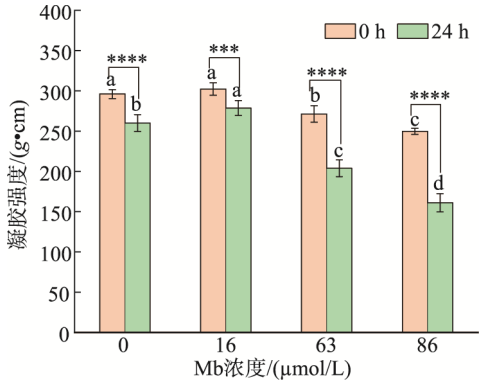


图 4 Mb 对凝胶破断力和破断距离的影响

Fig.4 Effects of Mb on gel breaking force and breaking distance



注: ***表示差异强极显著(P<0.001); ****表示差异极高显著(P<0.0001)。

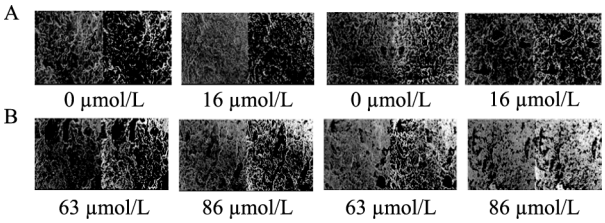
图 5 Mb 对凝胶强度的影响

Fig.5 Effects of Mb on gel strength

2.2.2 Mb 对 MP 凝胶微观结构的影响

分析图 6 可知，MP 凝胶中存在明显的凝胶网络结构，当添加低浓度 Mb 时，MP 凝胶的三维网状结构表面平整，孔隙间隔较小且聚集度较高，有利于水分的物理截留与储存。添加高浓度 Mb 的蛋白凝胶的网络结构逐渐粗糙。MP 在放置 24 h 后的凝胶结构较为无序。这是过度氧化使部分蛋白质发生交联，破坏了凝胶网络结构[39]。添加同浓度 Mb 的 MP 凝胶放置 24 h 后比未放置处理组的蛋白凝胶的网络结构更不连续且表面粗糙，孔洞大小不均。

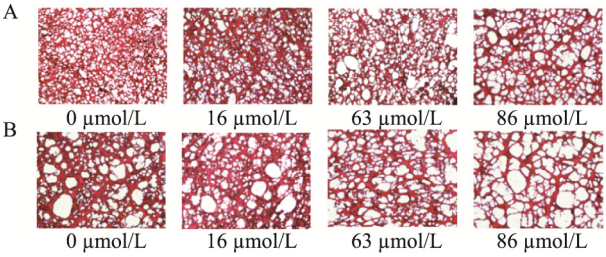
HE 染色是一种通过光学显微镜观察蛋白凝胶微观结构的技术手段，能有效呈现凝胶内部的组织形态与致密程度[40]。分析图 7 可知，天然 MP 凝胶存在明显的凝胶网络结构，孔洞较为均匀，当添加低浓度 Mb 时，MP 凝胶的三维网状结构表面平整，形状规则，结构致密；当添加高浓度 Mb 后凝胶结构出现孔洞分布不均。放置 24 h 后，MP 凝胶结构孔洞变大，当添加高浓度 Mb 时，凝胶三维网络更为粗糙松散，孔洞较大。这一结果表明 MP 与高浓度的 Mb 反应后发生变性，蛋白结构过度展开[41]。



注: A. 0 h; B. 24 h。

图 6 MP 凝胶的扫描的电子显微镜图

Fig.6 Electron microscope image of the scanning of MP gel



注: A. 0 h; B. 24 h。

图 7 MP 凝胶的光学显微镜图

Fig.7 Optical microscope image of MP gel

2.2.3 Mb 对 MP 凝胶分子间相互作用的影响

分析图 8 可知，反应 0 h 时，与未添加 Mb 的对照组相比，添加 16 μmol/L 的 Mb 组别疏水相互作用增加 3.8%，而添加量为 63 μmol/L 与 86 μmol/L 的 Mb 则使疏水相互作用显著降低 7.01%与 14.02% (P<0.05)，离子键与氢键也呈相同的变化趋势，63 μmol/L 与 86 μmol/L 的离子键分别降低 11.17%与 23.24%，氢键分别降低 10.02%与 19.86%。这表

明少量 Mb 通过弱相互作用与 MP 发生结合, 使分子基团中部分疏水基团暴露, 促进疏水相互作用的形成。而随着 Mb 添加量升高, 过量 Mb 会过度氧化 MP, 使其内部疏水基团过早暴露, 形成不溶性聚集体[35], 致使疏水基团减少, 疏水相互作用下降。而离子键含量减少, 是因为 Mb 氧化 MP 后, 其蛋白质表面的净电荷减少[42], 进而减弱蛋白质之间相互作用力。而氢键的降低是因为, 在氧化过程中, 羟自由基会破坏 MP 凝胶结构[43]。反应 24 h 后, 所有组别的分子间作用力均比 0 h 时下降。且 86 μmol/L Mb 组 MP 的离子键、氢键与疏水相互作用分别下降了 33.34%、29.12%和 28.61%。是蛋白质表面净电荷的减少降低了周围的离子强度, 这种静电屏蔽效应的减弱导致分子间静电斥力增加, 破坏了作用力平衡, 使鱼糜凝胶的三维网络结构凝胶性减弱[25]。反应 24 h 后, 16 μmol/L 的 Mb 促进了 MP 凝胶中疏水相互作用, 当其浓度为 63 μmol/L 与 86 μmol/L 时, 蛋白质溶解量分别为 0.27 mg/mL 与 0.22 mg/mL。与天然 MP 相比, 高浓度 Mb 的添加显著减弱了凝胶网络中的疏水相互作用、离子键与氢键(P<0.05), 这与图 1 未漂洗鱼糜中各类分子作用力均处于最低的结果一致。是 Mb 通过干扰 MP 凝胶形成过程中的分子间作用力, 破坏了凝胶网络的稳定性。

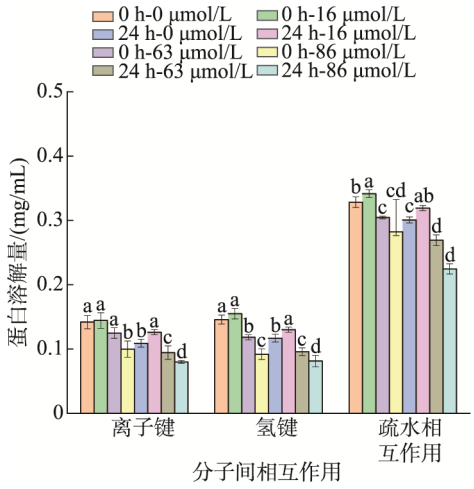


图 8　Mb 对 MP 凝胶分子间作用力的影响

Fig.8　Effects of Mb on intermolecular forces of MP gel

2.2.4　Mb 对 MP 凝胶持水性和蒸煮损失的影响

分析图 9 可知, 在反应 0 h 时, 随着 Mb 浓度的升高, MP 的持水性逐渐下降, 蒸煮损失则逐渐上升。而高浓度的 Mb 使凝胶网络粗糙松散, 孔洞较大。这种网络结构通过物理截留水分的能力降低。且分析 Mb 对 MP 的分子间作用力可知, 氢键和离子键的减弱降低了蛋白质与水分子的亲和力[44]。表现为持水性下降, 蒸煮损失增高。在反应 24 h 后, 天然 MP (0 μmol/L Mb)的持水性由反应 0 h 时的 95.79%降低为 87.75%, 蒸煮损失则由 2.51%增加为 4.26%。添加 16 μmol/L Mb 后, MP 凝胶的持水性增加较小, 蒸煮损失则缓慢降低, 变化不显著(P>0.05)。添加 Mb 浓度为 63 μmol/L、86 μmol/L 后, MP 凝胶持水性分别为 80.06%和 74.83%, 蒸煮损失分别为 11.98%和 15.18%, 与反应 0 h 的对应浓度组相比, 持水性显著降低(P<0.05), 蒸煮损失显著增加(P<0.05)。这可能是凝胶网络过度氧化后释放的活性氧使氧化酶活性增强, 促进 Mb 氧化为高铁 Mb[45], 对凝胶网络进一步破坏。这与图 2 中未漂洗鱼糜持水性最低, 蒸煮损失最高的结果一致。

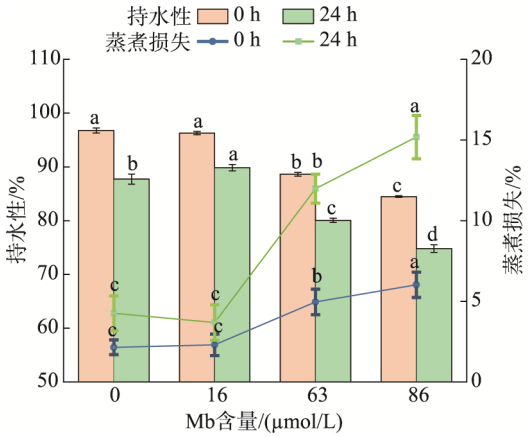


图 9　Mb 对 MP 凝胶的持水性和蒸煮损失的影响

Fig.9　Effects of Mb on water holding capacity and cooking loss of MP gel

2.2.5　Mb 对 MP 凝胶水分分布和氢质子成像的影响

低场核磁共振技术可以分析不同状态水分的比例, 氢质子成像可显示水分空间分布[46]。图 10 是 MP 凝胶的 T_2 弛豫时间变化图, 每个图谱均出现了 4 个峰, 即 T_{21} (0~1 ms)、T_{22} (1~10 ms)、T_{23} (10~100 ms)和 T_{24} (100~1000 ms), 它们分别对应不同存在状态的水分。T_{21} 与 T_{22} 是大分子紧密结合的水, 其中 T_{21} 代表与蛋白质表面基团直接结合的单层水, T_{22} 代表多层吸附水或弱结合水; T_{23} 是凝胶基质中滞留的不易流动的水, 而 T_{24} 则代表了凝胶网络之外存在的自由水[47]。对应的峰面积占比(P_{21}、P_{22}、P_{23}、P_{24})分别表示上述各组分水分占总水分的相对含量。图 11 为水分分布的峰面积所占比例。分析图 10~11 可知。当反应 0 h 时, 天然 MP 的 T_{23} 峰面积占比为 93.59%, 加入的 Mb 浓度为 16、63、86 μmol/L 时, T_{23} 峰面积占比分别为 94.44%、92.06%、89.75%。其中 MP 加入 16 μmol/L Mb 的处理组的 T_{23} 峰面积占比最高, 即蛋白凝胶中不易流动水含量最高。Mb 浓度增加到 63~86 μmol/L 后, T_{23} 峰面积占比显著下降(P<0.05), 这是因为高浓度 Mb 导致原本被截留在凝胶网络内部的不易流动水大量流失, 这与 2.2.4 中鱼糜凝胶持水性下降符合。反应 24 h 后, 当 Mb 浓度为 0、16、63、86 μmol/L 时, T_{23} 峰面积占比分别为 92.07%、93.24%、

89.76%、87.90%，其中 86 μmol/L Mb 组较反应 24 h 的 0 μmol/L Mb 组下降了 4.17%。这可能是适量 Mb 的添加可改善 MP 的凝胶特性，从而增强其与水分子的亲和性，并强化疏水相互作用力。而当 Mb 浓度过高时，会使 MP 过度解螺旋，导致其结构展开失衡[48]。这种构象破坏不仅扰乱了蛋白质分子的正常交联，更阻碍了有序凝胶网络的形成，最终降低了凝胶的持水性。

图 12 则通过氢质子密度成像呈现了水分在凝胶中的空间分布情况。在伪彩图中，信号强度与水分子氢质子密度正相关，红色区域标示水分富集，蓝色区域则表示水分相对匮乏[49]。由图 12 可知，天然 MP 凝胶的图像显示均匀的红色，表明水分分布均一。而随着 Mb 浓度增加，图像中开始出现蓝色区域，且信号均匀性下降，表明水分分布变得不均，出现了干涩区域。这种水分分布的不均匀与 2.2.2 中微观结构观察到的粗糙、松散及大孔洞结构一致。

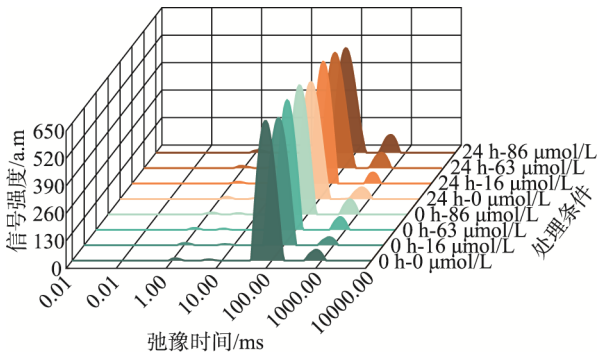


图 10 MP 凝胶的 T_2 弛豫时间

Fig.10 T_2 relaxation time of MP gel

2.2.6 Mb 对 MP 动态流变学特性的影响

分析图 13 可知，添加不同浓度的 Mb，MP 的 G'与 G''的变化趋势相似，且 G'大于 G''。表明在鱼糜凝胶化的过程中，弹性占据主体部分[50]。分析图 13，随温度的升高，鱼糜的 G'先下降，然后在 48 ℃左右上升，且在 52 ℃附近出现一个峰值。这可能是随着温度升高，蛋白质分子发生解离，鱼糜凝胶网络发生暂时劣化。随后 G'的增加是因为肌球蛋白重链，疏水相互作用增强，使蛋白质形成致密的凝胶网络[51]。而 G'在 52 ℃到 58 ℃逐渐下降，是因为鱼糜凝胶在此范围内发生重排，部分交联点出现暂时解离，进而使 G'逐渐下降[52]。而随温度继续上升，G'也逐渐上升，最后趋于平缓。表明了鱼糜凝胶已基本形成。反应 0 h 时，添加 16 μmol/L Mb 在 50~70 ℃区间的 G'高于未添加 Mb 的对照组。这表明适量 Mb 能通过促进疏水基团暴露，增强蛋白质间交联[53]。而添加 63 μmol/L 和 86 μmol/L Mb 的组别 G'均明显低于对照组。这表明高浓度 Mb 过度氧化 MP，削弱了疏水相互作用的形成。而反应 24 h 后，各组 G'较 0 h 均有所下降，且添加高浓度 Mb 的组别下降明显。这是因为 Mb 诱使二价铁完全氧化成三价铁，使 MP 发生氧化，进而导致凝胶网络中氢键和离子键显著降低[27]。

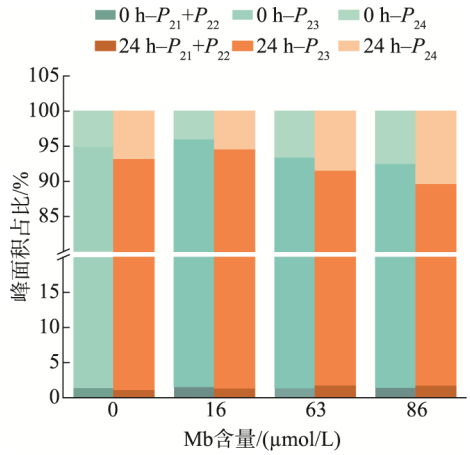
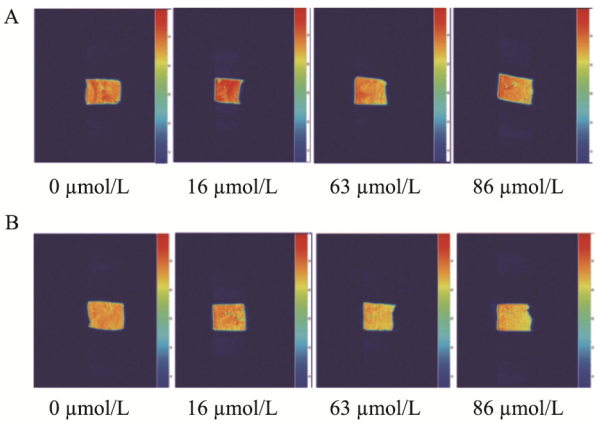


图 11 Mb 对 MP 凝胶水分分布的峰面积占比

Fig.11 Effects of Mb on peak area ratio of water distribution of MP gel



注：A. 0 h；B. 24 h。

图 12 MP 凝胶的氢质子成像

Fig.12 Hydrogen proton imaging of MP gel

G''在 20~40 ℃逐渐下降，并在 53 ℃附近出现峰值，在 60 ℃趋于平缓后逐渐增加。加入 Mb 后，MP 的 G''逐渐升高，低浓度 Mb 处理后，G''增加缓慢，当 Mb 浓度增加至 63 μmol/L 时，G''逐渐下降，且放置 24 h 后下降显著(P<0.05)。表明蛋白质发生变性导致黏性降低，热诱导凝胶过程中蛋白质巯基暴露和不规则解折叠导致无序且粗糙的凝胶网络结构[54]，与 2.2.2 节中微观结构所观察的结果一致。

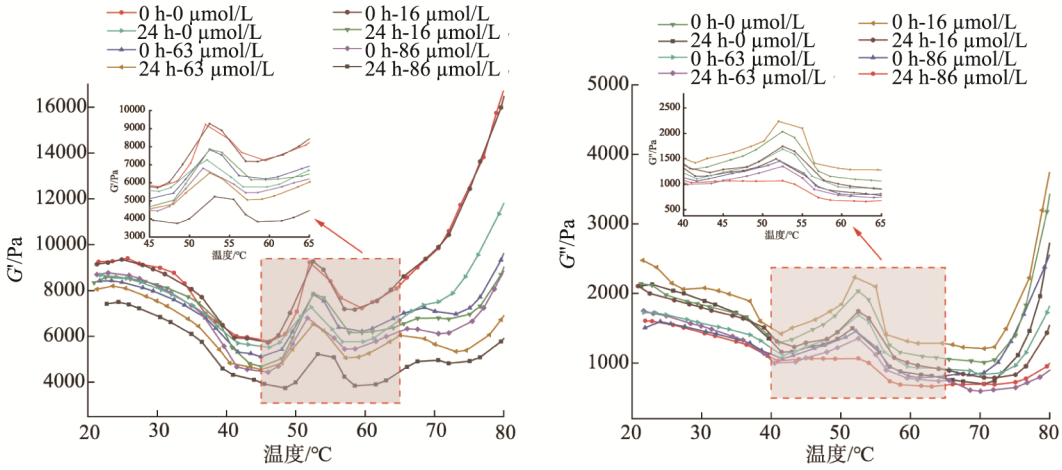


图 13　Mb 对 MP 的 *G'*与 *G''*的影响

Fig.13　Effects of Mb on *G'* and *G''* of MP

3　结　论

本研究分析了不同漂洗次数对白鲢鱼凝胶性能的影响, 确认了 Mb 的残留量与鱼糜凝胶劣化存在正相关性。在此基础上构建的 Mb-MP 混合体系结果表明, 高浓度 Mb (86 μmol/L)可通过氧化修饰和空间位阻干扰 MP 的交联, 表现为反应 0 h 时, 显著削弱疏水相互作用、氢键和离子键, 导致 MP 凝胶网络受损;随着反应时间延长至 24 h, 上述劣化进一步增强, 凝胶网络结构由致密均匀逐渐变化为粗糙松散, 对水分的物理截留能力持续下降。综上, Mb 对 MP 凝胶网络的作用主要在于减弱维持凝胶骨架的分子间作用力, 破坏蛋白质的有序聚集, 进而诱发水分迁移与流失。本研究从分子间作用力与水分分布迁移的角度, 为未漂洗鱼糜加工过程中通过调控内源性 Mb 等血红素蛋白来改善凝胶品质提供了实验依据。

参考文献

[1] 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 Fang, Jiang Shu, Hu Manzi, 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.

[2] 王梦宇, 马兴胜, 张智铭, 等. 温度和加热方式对未漂洗鱼糜凝胶特性和风味的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(2): 304–316.
Wang Mengyu, Ma Xingsheng, Zhang Zhiming, et al. Effects of temperature and heating method on gel and flavor characteristics of unwashed surimi [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(2): 304–316.

[3] 张玉洁, 张金闯, 陈琼玲, 等. 鱼糜蛋白制品及其加工技术[J]. 中国食品学报, 2022, 22(1): 389–400.
Zhang Yujie, Zhang Jinchuang, Chen Qiongling, et al. Surimi protein products and its processing technology [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(1): 389–400.

[4] Harrysson H, Swolin B, Axelsson M, et al. A trout (*Oncorhynchus mykiss*) perfusion model approach to elucidate the role of blood removal for lipid oxidation and colour changes in ice-stored fish muscle [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(6): 2462–2471.

[5] 童胜男, 王金梅, 马兴胜, 等. 芹菜可溶性膳食纤维的性质及其协同 TG 酶改善未漂洗金线鱼鱼糜凝胶特性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 52–64.
Tong Shengnan, Wang Jinmei, Ma Xingsheng, et al. Properties of celery soluble dietary fiber and its synergistic effect with TG enzyme to improve gel properties of *Nemipterus virgatus* unrinsed surimi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 52–64.

[6] 江祥瑶, 戴新佳, 何斌, 等. 抗冻/抗氧化双效肽对不漂洗鱼糜冻藏品质的调控[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 297–305.
Jiang Xiangyao, Dai Xinjia, He Bin, et al. Regulatory effect of dual-functional peptides with antifreeze and antioxidant activity on the quality of unwashed silver carp surimi [J]. Food Science, 2025, 46(20): 297–305.

[7] 谈婷, 郑娅, 胡生海, 等. 肌原纤维蛋白氧化程度对肉蛋白功能特性的影响及天然调控措施研究进展[J/OL]. 现代食品科技, 2026-04-10. https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.11.0969.
Tan Ting, Zheng Ya, Hu Shenghai, et al. Research progress on the influence of myofibrillar protein oxidation degree on the functional characteristics of meat protein and natural regulation measures [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-04-10. https: //doi. org/10. 13982/j. mfst. 1673-9078. 2026. 11. 0969.

[8] 吴宝森, 孙玥晖, 刘姝韵, 等. 发酵肉制品中脂肪、蛋白质水解氧化与微生物的关系[J]. 食品安全质量检测学报, 2017, 8(3): 832–837.
Wu Baosen, Sun Yuehui, Liu Shuyun, et al. Relationship between hydrolysis and oxidation of fat and protein with microorganisms in fermented meat products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(3): 832–837.

[9] 邱诗榆, 黄卉, 郝淑贤, 等. 基于功能性添加物的罗非鱼鱼糜的品质改良及营养功能调控[J/OL]. 食品工业科技, 2026-06-22. https: //doi. org/10. 13386/j. issn1002-0306. 2026020045.
Qiu Shiyu, Huang Hui, Hao Shuxian, et al. Quality improvement and nutritional function regulation of tilapia surimi based on functional additives [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-06-22. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2026020045.

[10] 张建, 赵雪琴, 张稳刚, 等. 醇溶蛋白复合胶体颗粒在稳定 Pickering

乳液制备中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2022, 43(23): 394–400.
Zhang Jian, Zhao Xueqin, Zhang Wengang, et al. A review on prolamin-based colloidal particles for the formation of Pickering emulsion and applications [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(23): 394–400.

[11] Du Ningning, Sun Yanchun, Chen Zhongxiang, et al. Effects of multiple freeze-thaw cycles on protein and lipid oxidation, microstructure and quality characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Fishes, 2023, 8(2): 108.

[12] 崔文斌, 宋艳艳, 李明华, 等. 高铁肌红蛋白氧化对牦牛肉肌原纤维蛋白生化特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(12): 77–83.
Cui Wenbin, Song Yanyan, Li Minghua, et al. Effect of metmyoglobin oxidation on biochemical characteristics of myofibrillar protein in yak meat [J]. Food Science, 2020, 41(12): 77–83.

[13] 布鑫荣, 王惠惠, 宋艳艳, 等. 羟自由基和高铁肌红蛋白氧化体系对牦牛肉肌原纤维蛋白氨基酸含量变化的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(5): 1–10.
Bu Xinrong, Wang Huihui, Song Yanyan, et al. Effect of iron-catalyzed and metmyoglobin oxidizing systems on amino acid changes of yak myofibrillar protein [J]. Food Science, 2022, 43(5): 1–10.

[14] 郑娅, 胡生海, 何元翔, 等. 牛肉肌红蛋白提纯及其协同脂质氧化效应分析[J]. 食品科技, 2019, 44(12): 111–116.
Zheng Ya, Hu Shenghai, He Yuanxiang, et al. Extractation and purification of myoglobin in beef and its synergistic oxidation effect with lipid [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(12): 111–116.

[15] Jin S K, Kim I S, Kim S J, et al. Effect of muscle type and washing times on physico-chemical characteristics and qualities of surimi [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 81(3): 618–623.

[16] Yang Zhen, Wang Wei, Wang Haiyan, et al. Effects of a highly resistant rice starch and pre-incubation temperatures on the physicochemical properties of surimi gel from grass carp (*Ctenopharynodon idellus*) [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 212–219.

[17] 赵洪雷, 郭汪松, 吕亚楠, 等. 乳液凝胶对金线鱼肌原纤维蛋白凝胶化性能的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(12): 67–74.
Zhao Honglei, Guo Wangsong, Lv Yanan, et al. Effect of emulsion gel on gelation performance of *Nemipterus virgatus* myofibrillar protein [J]. Food Science, 2025, 46(12): 67–74.

[18] 杨冠杰, 叶伟建, 陈江平, 等. 蛋清对南美白对虾-高品质等级白鲢鱼糜复合凝胶性能的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(18): 22–28.
Yang Guanjie, Ye Weijian, Chen Jiangping, et al. Effects of egg white on gel properties of compound *Penaeus vannamei*-high-quality silver carp surimi [J]. Food Research and Development, 2025, 46(18): 22–28.

[19] 杜洪振, 陈倩, 杨振, 等. 预热处理大豆蛋白对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶和流变学特性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(12): 55–61.
Du Hongzhen, Chen Qian, Yang Zhen, et al. Effect of preheated soy proteins on gelling and rheological properties of common carp myofibrillar protein [J]. Food Science, 2019, 40(12): 55–61.

[20] 於慧利, 徐宝才, 李景军, 等. 脂肪含量和包装方式对法兰克福香肠贮藏品质的影响[J]. 食品与机械, 2012, 28(4): 47–52.
Yu Huili, Xu Baocai, Li Jingjun, et al. Evaluation of the quality of Frankfurters as affected by fat content and packaging method during storage [J]. Food & Machinery, 2012, 28(4): 47–52.

[21] 赵洪雷, 郭汪松, 吕亚楠, 等. 豌豆分离蛋白-可得然胶基乳液凝胶对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(8): 197–207.
Zhao Honglei, Guo Wangsong, Lyu Yanan, et al. Effect of pea protein isolate-curdlan based emulsion gels on the gel quality of *Nemipterus virgatus* surimi [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(8): 197–207.

[22] Zhou Yunuo, Lu Shanshan, Chen Hongyuan, et al. Potential freezing resistance of collagen peptide-fish oil high internal phase emulsion: enhancing freeze-thaw stability of 3D-printed surimi [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 112001.

[23] 韦芳, 颜子恒, 杨佳华, 等. 超声波对鲟鱼鱼糜热诱导凝胶特性的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(1): 262–272.
Wei Fang, Yan Ziheng, Yang Jiahua, et al. Effect of ultrasonic treatment on heat-induced gel properties of sturgeon surimi [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2025, 25(1): 262–272.

[24] 罗颖莹, 黄卉, 李来好, 等. 免漂洗罗非鱼鱼糜凝胶品质改良及机理分析[J]. 南方水产科学, 2025, 21(2): 164–173.
Luo Yingying, Huang Hui, Li Laihao, et al. Quality improvement and mechanism analysis of non-rinsing tilapia surimi gel [J]. South China Fisheries Science, 2025, 21(2): 164–173.

[25] Zhang Zhongli, Xiong Zhouyi, Walayat N, et al. Effects of the mixture of xylooligosaccharides and egg white protein on the physicochemical properties, conformation, and gel-forming ability of *Culter alburnus* myofibrillar protein during multiple freeze-thaw cycles [J]. Foods, 2021, 10(9): 2007.

[26] 阳胜男, 牟黠, 赵世林, 等. 电场辅助漂洗对鲢鱼糜组分溶出及凝胶性能的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 233–242.
Yang Shengnan, Mou Xia, Zhao Shilin, et al. Effect of electric field-assisted washing on the dissolution of components and gel properties of silver carp surimi [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 233–242.

[27] 严丽娟, 仪淑敏, 侯玉, 等. 茶多酚鱼肉香肠的体外消化特性及其对小鼠免疫调节作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(23): 388–395.
Yan Lijuan, Yi Shumin, Hou Yu, et al. *In vitro* digestion properties of tea polyphenol fish sausage and its immunomodulatory effect in mice [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(23): 388–395.

[28] 李尚慧, 梁鹏, 林婉媚. 外源添加物调控鱼糜制品品质的研究进展[J/OL]. 食品工业科技, 2026-03-12. https: //doi. org/10. 13386/j. issn1002-0306. 2025120367.
Li Shanghui, Liang Peng, Lin Wanmei. Research progress on quality control of surimi products by exogenous additives [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-03-12. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025120367.

[29] Baxter S R, Skonberg D I. Gelation properties of previously cooked minced meat from Jonah crab (Cancer *Borealis*) as affected by washing treatment and salt concentration [J]. Food Chemistry, 2008, 109(2): 332–339.

[30] 李慧, 付鑫, 任元海, 等. 黄原胶对流质配方食品流变特性的影响[J]. 食品工业, 2020, 41(3): 45-49.
Li Hui, Fu Xin, Ren Yuanhai, et al. Effects of xanthan gum on rheological properties of liquid formula food [J]. Food Industry, 2020, 41(3): 45–49.

[31] Cando D, Herranz B, Borderías A J, et al. Effect of high pressure on reduced sodium chloride surimi gels [J]. Food Hydrocolloids, 2015, 51: 176–187.

[32] Tang Honggang, Tan Lulan, Chen Yifan, et al. Effect of *κ*-carrageenan addition on protein structure and gel properties of salted duck egg white [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2021, 101(4): 1389–1395.

[33] 曾泽政, 徐明伟, 曹扬洪, 等. 海红米粉对未漂洗花鲈鱼糜理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(8): 227–237.
Zeng Zezheng, Xu Mingwei, Cao Yanghong, et al. Effects of sea red rice powder on physicochemical properties and antioxidant activity of unwashed sea bass (*Lateolabrax maculatus*) surimi [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(8): 227–237.

[34] Liu Ru, Zhao Siming, Xiong Shanbai, et al. Role of secondary structures in the gelation of porcine myosin at different pH values [J]. Meat Science, 2008, 80(3): 632–639.

[35] 邓小蓉, 雷用东, 刘娟, 等. 芬顿氧化体系处理对白斑狗鱼肌原纤维蛋白结构和功能特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 27–33.
Deng Xiaorong, Lei Yongdong, Liu Juan, et al. Effect of Fenton oxidation treatment on structural and functional properties of myofibrillar proteins in *Esox lucius* muslce [J]. Food Science, 2022, 43(6): 27–33.

[36] Liu Qian, Geng Rui, Zhao Juyang, et al. Structural and gel textural properties of soy protein isolate when subjected to extreme acid pH-shifting and mild heating processes [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(19): 4853–4861.

[37] 舒丽枝, 张牧焓, 徐为民, 等. 卟啉类化合物对鸡胸肉品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 24–29.
Shu Lizhi, Zhang Muhan, Xu Weimin, et al. Effect of porphyrin compounds on quality of chicken breast [J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 24–29.

[38] 陈凤莲, 吉语宁, 贺殷媛, 等. 基于凝胶特性的蛋白改性方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(2): 190–195.
Chen Fenglian, Ji Yuning, He Yinyuan, et al. Research progress on protein modification methods based on gel properties [J]. Food Research and Development, 2023, 44(2): 190–195.

[39] Nyaisaba B M, Liu Xinxin, Zhu Shichao, et al. Effect of hydroxyl-radical on the biochemical properties and structure of myofibrillar protein from Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) [J]. LWT, 2019, 106: 15–21.

[40] Osgood W R. Stress-strain formulas [J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1946, 13(1): 45–48.

[41] Chen Huimin, Wu Jiulin, Chen Meizhen, et al. Evaluation and relationship analysis of pea protein on structure and heat-induced gel performance of myofibrillar protein [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(5): 2502–2511.

[42] 常海军, 石源伟, 伯朝英, 等. 氧化条件下姜黄素对猪肉肌原纤维蛋白理化和凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 63–71.
Chang Haijun, Shi Yuanwei, Bo Zhaoying, et al. Effect of curcumin on physicochemical and gel properties of pork myofibrillar proteins under oxidative condition [J]. Food Science, 2024, 45(8): 63–71.

[43] 杨天, 耿文豪, 郑志红, 等. 褐藻寡糖对鲢鱼鱼糜稳定性、分子间作用力及肌原纤维蛋白结构的影响[J]. 肉类研究, 2021, 35(7): 1–8.
Yang Tian, Geng Wenhao, Zheng Zhihong, et al. Effects of alginate oligosaccharides on the stability, intermolecular forces and myofibrillar protein structures of silver carp surimi [J]. Meat Research, 2021, 35(7): 1–8.

[44] Li Wenzheng, Wang Wenxuan, Fan Maomei, et al. Study the stability mechanism of Nano freezing-thawing on myofibrillar proteins in Atlantic salmon [J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 148: 410–420.

[45] 程秀峰, 孙艺倾, 王莉, 等. 反复冻融对多浪羊肉品质特性的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(16): 176–184.
Cheng Xiufeng, Sun Yiqing, Wang Li, et al. Impact of repeated freeze-thaw cycles on quality characteristics of Duolang mutton [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(16): 176–184.

[46] 蔡静静, 郑帅帅, 雷萌萌, 等. 不同菊粉质量分数对冻融循环下冷冻粽子品质特性的影响[J]. 食品科学, 2026, 47(14): 326-334.
Cai Jingjing, Zheng Shuaishuai, Lei Mengmeng, et al. Effects of different inulin mass fractions on quality characteristics of frozen zongzi under freeze-thaw cycles [J]. Food Science, 2026, 47(14): 326–334.

[47] Jiang Suisui, Ma Yuyang, Wang Yahui, et al. Effect of *κ*-carrageenan on the gelation properties of oyster protein [J]. Food Chemistry, 2022, 382: 132329.

[48] 龙门, 张文豪, 郑素玲, 等. 基于低场核磁共振技术的咸鸭蛋腌制过程水分及质构特性变化[J]. 食品与机械, 2019, 35(2): 21–26, 106.
Long Men, Zhang Wenhao, Zheng Suling, et al. Study on changes of gel moisture characteristic and texture properties of duck eggs during salting period by low-field nuclear magnetic resonance [J]. Food and Machinery, 2019, 35(2): 21–26, 106.

[49] 樊易卓, 张立彦, 涂政, 等. 定量卤制与传统卤汤卤制工艺对盐焗鸡肉品质的影响[J/OL]. 食品工业科技, 2026-03-14. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025120228.
Fan Yizhuo, Zhang Liyan, Tu Zheng, et al. Effects of quantitative marinating and traditional marinating techniques on the quality of salted chicken meat [J/OL]. China Industrial Economics, 2026-03-14. https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025120228.

[50] 朱宏星, 高田毅, 黄杨, 等. 肌红蛋白血红素辅基氧化修饰对肌球蛋白功能特性及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 1–8.
Zhu Hongxing, Gao Tianyi, Huang Yang, et al. Effect of oxidative modification of myoglobin hemin prosthetic group on the functional properties and gel properties of myosin [J]. Food Science, 2022, 43(8): 1–8.

[51] 刘骁, 司书广, 王婷, 等. 亚麻籽胶协同微波处理对低盐鱼糜凝胶特性的影响[J]. 中国调味品, 2025, 50(10): 15–21.
Liu Xiao, Si Shuguang, Wang Ting, et al. Effect of flaxseed gum combined with microwave treatment on gel properties of low-salt surimi [J]. China Condiment, 2025, 50(10): 15–21.

[52] 母学琴, 黑生花, 章玲萍, 等. 外源性分子介入对肌原纤维蛋白凝胶特性调控机制的研究进展[J]. 食品科学, 2026, 47(4): 377–386.
Mu Xueqin, Hei Shenghua, Zhang Lingping, et al. Research progress on the regulatory mechanisms of exogenous molecular intervention on the gel properties of myofibrillar proteins [J]. Food Science, 2026, 47(4): 377–386.

[53] 普关坤翁, 张锐, 王琪, 等. 碱性氨基酸种类及浓度对牦牛肉肌原纤维蛋白氧化与凝胶特性的构象调控机制[J]. 食品工业科技, 2026, 47(9): 51–62.
Pu Guankunweng, Zhang Rui, Wang Qi, et al. Conformational regulatory mechanism of types and concentrations of basic amino acids on oxidation and gel properties of yak meat myofibrillar proteins [J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(9): 51–62.

[54] 郭娜, 宋苗苗, 徐忠东, 等. 高酰基结冷胶对乳清分离蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(3): 72–77.
Guo Na, Song Miaomiao, Xu Zhongdong, et al. Effect of high acyl gellan gum on the characterization of heat-induced gelation of whey protein isolate [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(3): 72–77.

(责任编辑: 曹岱琳　韩晓红)