DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260506005
引用格式: 徐睿哲, 范雨暄, 刘召月, 等. 肌原纤维蛋白凝胶特性的改性研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 168–178.
Xu Ruizhe, Fan Yuxuan, Liu Zhaoyue, et al. Research progress on modification of gel properties from myofibrillar proteins [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 168–178. (in Chinese with English abstract).

肌原纤维蛋白凝胶特性的改性研究进展

徐睿哲, 范雨暄, 刘召月, 童　欣, 吴桂婷, 刘　彤, 刘晓涵*

(青岛工学院食品工程学院, 青岛　266000)

摘　要: 肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)是决定肉制品凝胶品质的关键蛋白。由于市场需求持续增长, 凝胶制品在食品工业中的应用前景也日益广阔。然而, 未经改性修饰的肉制品 MP 因自身较弱的凝胶特性而不能满足食品加工行业对高凝胶特性的需求, 因此需通过一系列改性技术提高其凝胶特性。该综述系统阐述肉类蛋白凝胶形成的作用机制, 分析由不同改性手段引发的 α-螺旋解旋、肽链展开、分子间疏水相互作用以及二硫键形成对凝胶网络结构的协同调控作用。在此基础上, 从物理改性、化学改性、生物改性及联合改性 4 个方面入手, 归纳不同改性技术对 MP 结构变化、价键修饰和聚集行为调控提升凝胶特性的规律, 其中联合改性重点综述物理-物理、物理-化学、化学-生物三类协同增效机制。结果表明, 单一改性可定向优化 MP 特定性能, 而联合改性通过多技术协同可更全面地提升 MP 凝胶特性, 是未来凝胶改性技术发展的重要方向。本文可为提高凝胶类肉制品品质提供理论指导和技术支持。

关键词: 肌原纤维蛋白; 凝胶特性; 作用机制; 结构变化; 聚集行为
中图分类号: TS202.2　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)17–0168–11

Research progress on modification of gel properties from myofibrillar proteins

XU Rui-Zhe, FAN Yu-Xuan, LIU Zhao-Yue, TONG Xin, WU Gui-Ting, LIU Tong, LIU Xiao-Han*

(*College of Food Engineering*, *Qingdao Institute of Technology*, *Qingdao* 266000, *China*)

ABSTRACT: Myofibrillar protein (MP) is the main protein that determines the gel quality of meat products. Due to the continuous growth in market demand, the application prospects of gel products in the food industry are becoming increasingly broad. However, the MP are unprocess meat products dissatisfy the high gelling requirements of the food processing industry due to its inherently weak gelling properties. Therefore, it is necessary to improve its gel properties through a series of modification techniques. This review systematically expounded the mechanism of meat protein gel formation, and analyzed the synergistic regulation of α-helix unwinding, peptide chain unfolding, intermolecular hydrophobic interaction and disulfide bond formation on gel network structure caused by different modification methods. On this basis, from the 4 aspects of physical modification, chemical modification, biological modification and

收稿日期: 2026-05-06
基金项目: 青岛工学院大学生创新创业训练计划项目(2026QGPY042)
第一作者: 徐睿哲(2005—), 女, 主要研究方向为水产品加工。E-mail: xrzyffs@163.com
***通信作者:** 刘晓涵(1992—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品加工综合利用。E-mail: lxhxiaohan@163.com

combined modification, it summarized the laws of different modification technologies to improve the gel properties by regulating the structural changes, valence bond modification and aggregation behavior of MP. Among them, the combined modification focused on 3 types of synergistic mechanisms: physical-physical, physical-chemical and chemical-biological. The results showed that single modification optimized the specific properties of MP, while combined modification improved the gel properties of MP more comprehensively through multi-technology coordination, which was an important direction for the development of gel modification technology in the future. This paper provides theoretical guidance and technical support for improving the quality of gel meat products.

KEY WORDS: myofibrillar protein; gel properties; mechanisms underly; conformation change; aggregation behavior

0　引　言

随着全球肉类消费持续增长, 消费者对肉制品的口感、质地、营养价值和加工适用性的需求逐年提升。在肉制品加工过程中, 肌原纤维蛋白(myofibrillar protein, MP)作为形成凝胶的重要蛋白质, 能促进凝胶制品拥有特殊质地和包裹更多水分子[1]。但 MP 自身的功能特性往往无法满足食品工业的高需求, 因此需通过相关技术手段提高其凝胶特性。目前, 已有多种加工技术用于提升 MP 凝胶特性, 如物理改性(热处理、超声波、超高压和冷等离子体等)、化学改性(磷酸化、糖基化和乙酰化等)及生物改性(酶水解、酶交联等)等[1−2]。然而, 若加工技术使用不当, 则会导致蛋白发生过度聚集引起功能特性的弱化[3]。因此, 在肉制品加工领域, 如何有效改善 MP 的凝胶特性已成为一个关键问题。本文系统阐明不同单一改性及联合改性技术提升 MP 凝胶特性的作用机制与规律, 为凝胶类肉制品的品质优化提供理论依据和技术路径。并为解决肉制品在复杂加工贮藏环境下的凝胶劣变问题提供思路, 推动肉制品加工技术的创新与产业升级。

1　MP 的组成

肌肉蛋白根据溶解性不同可分为盐溶性蛋白(MP)、水溶性蛋白(肌浆蛋白)和不溶性蛋白(基质蛋白)[1]。MP 主要存在于动物组织纤维中, 是一组结构复杂的蛋白质, 占总蛋白含量的 55%~65%[4], 主要由肌球蛋白重链、副肌球蛋白、肌动蛋白、原肌球蛋白和肌球蛋白轻链组成, 它们在肌肉纤维内构建高度组织化的肌原纤维丝结构[4]。肌球蛋白是促进 MP 形成凝胶的主要蛋白质, 约占 MP 总量的 50%~55%, 肌球蛋白分子的棒状螺旋尾部相互交织形成粗丝骨架, 而肌球蛋白的球状头部均匀分布在粗丝骨架表面[1,5]。研究表明, 在热凝胶过程中, 肌球蛋白头部的展开暴露出的疏水基团和巯基氧化促进蛋白分子间的聚集与交联, 加速凝胶网络形成[6]。

2　MP 凝胶形成机制

热诱导凝胶是指一定浓度的MP加热使蛋白质分子发生变性聚集, 最终形成具有黏弹性且均匀致密的三维空间网络[7]。MP 凝胶化的本质是蛋白质分子变性聚集形成有序空间网络结构。加热首先破坏其二级结构, 导致 α-螺旋解旋, 肽链展开[7], 使原本在分子内部的疏水基团和巯基基团暴露[8]。疏水基团的暴露使分子间疏水相互作用急剧增强, 驱动蛋白发生聚集; 随后, 暴露的巯基促进分子间二硫键转化, 为三维凝胶网络的形成提供强度[9]。MP 热诱导凝胶形成过程如图 1 所示。肌球蛋白是 MP 形成凝胶的主要蛋白。凝胶形成过程可分为 4 步: (1)在 35 ℃时, 肌球蛋白头部展开并通过头-头交联形成二聚体和寡聚体; (2)在约 40 ℃时, 头部紧密聚集, 而尾部向外放射, 形成蜘蛛网状结构; (3)在约 48 ℃时, 聚集体共价交联, 多个聚集体共存; (4)在 50~60 ℃时, 聚集体进一步聚集, 包括尾-尾交联, 最终形成凝胶网络结构。在上述凝胶过程中, 分子内相互作用的破坏(如维持 α-螺旋的氢键断裂)是前提, 而分子间相互作用(如二硫键、氢键、疏水键)的重建是凝胶网络形成的本质。疏水相互作用主要驱动肌球蛋白头部初步聚集, 是凝胶的启动因素; 而二硫键是通过共价交联的方式为凝胶网络提供强度和刚性[8]。在不同阶段, 这两类作用力贡献不同: 在蛋白聚集阶段, 疏水作用占主导; 进入凝胶成熟稳定阶段后, 二硫键对维持凝胶网络的稳定性的效果更加突出。此外, 氢键和静电相互作用也对凝胶的持水性(water-holding capacity, WHC)和弹性有重要的调节作用。

在凝胶形成过程中, 蛋白分子间的相互作用涉及疏水相互作用、静电相互作用、氢键、二硫键等。加热有利于蛋白质结构的展开与内部基团的暴露, 促进凝胶形成。常用的凝胶制备方法分为一步加热法和两步加热法(表 1), 一步加热法是将 MP 样品从初始温度直接、连续加热至最终核心温度并保持一定时间。加热过程中蛋白质变性、聚集、凝胶化等多个步骤同时发生、相互竞争, 容易导致网络结构不均匀, 凝胶强度、WHC 难以达到最优效果。两步

加热法是采用“低温预凝胶化+高温热定型”的分段式加热方式。(1)在相对低温的状态下(40 ℃左右)保持一段时间，使肌球蛋白头部充分展开暴露内部基团，促进二硫键形成，增强蛋白分子的交联作用；(2)随温度升高(约 65~90 ℃)进一步促进蛋白质的变性和尾部聚集[7,9]。与一步加热法相比，两步加热法通常能形成更致密、均匀、孔隙更小的网络结构，从而显著提升凝胶的强度、弹性和持水能力等[10–11]。热诱导虽是 MP 凝胶化的核心驱动力，但最终凝胶的品质并非仅由热处理条件决定。MP 的凝胶特性还受蛋白浓度、离子强度、pH、盐浓度、加热速率及氧化程度等多种因素的显著调控。这些因素本质上是通过影响分子内构象变化与分子间交联发挥作用。例如：(1) pH 与离子强度主要通过改变蛋白表面电荷密度，影响分子间的静电斥力与疏水相互作用的平衡[12]；(2)氧化程度通过改变巯基的氧化状态，直接影响分子间二硫键形成的效率[13]；(3)加热速率则通过调控肌球蛋白尾部 α-螺旋的解旋速率，影响蛋白展开与聚集的动力学匹配度[14]等。经过上述因素的综合作用，最终决定了 MP 凝胶的微观结构、强度及持水性能。

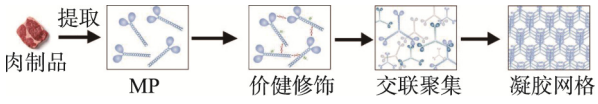


图 1 MP 热诱导凝胶形成过程

Fig.1 Process of MP heat-induced gel formation

表 1 MP 改性及凝胶作用机制

Table 1 Mechanism of MP modification and gelation

MP 来源	改性方法	凝胶制备	作用机制	凝胶特性表征	参考文献
罗非鱼	物理改性	两段式加热：第一阶段：45 ℃加热 60~120 min；第二阶段：90 ℃加热 30 min	真空热处理促进 MP 结构伸展，增强蛋白质分子间的离子键与疏水相互作用，减少凝胶内部大空腔的形成，从而形成更有序、更有弹性的凝胶网络	热处理修饰后的 MP 内聚性提高 8.06%，弹性提高 19.29%，凝胶强度提高 31.25%，咀嚼性降低 6.32%	[10]
秘鲁鱿鱼	化学改性	两段式加热：第一阶段：40 ℃加热 60 min；第二阶段：90 ℃加热 30 min	蛋清蛋白与 MP 发生静电相互作用，占据 MP 分子间的关键结合位点，改变凝胶过程中分子间作用力以及促进三维网络结构的形成	蛋清蛋白(添加比例为鱼糜的 10%)的最佳凝胶性能：硬度为 645.524，弹性为 1.258，蒸煮得率提高了 27%，WHC 提高到 80%	[11]
虾蛄	化学改性	一段式加热法：100 ℃加热 20 min	磷酸盐通过共价修饰 MP 改变其电荷分布，促进 MP-水的相互作用和有序聚集，形成更稳定的三维凝胶网络	凝胶硬度提升至 8453.27；弹性为 0.91	[12]
牛肉	化学改性	一段式加热法：80 ℃加热 35 min	白藜芦醇通过诱导 MP 结构展开、增强分子间作用力，构建更致密均匀的三维凝胶网络，提升凝胶的质构特性和保水性	MP 凝胶硬度、弹性、咀嚼性随白藜芦醇添加量增多而上升，白藜芦醇添加量为 0.2%时凝胶效果最好，凝胶孔隙更小、更均匀	[13]
猪肉	生物改性	一段式加热法：90 ℃加热 10 min	蛋白质-谷氨酰胺酶(protein-glutaminase, PG)催化脱酰胺反应改变 MP 的电荷与构象，影响蛋白分子的聚集行为，促进由非共价交联主导的热可逆凝胶网络的形成	在 30~40℃范围内实现“溶胶-凝胶”的多次可逆转变；凝胶 WHC 从 30.21%提升至超 80%，形成纳米纤维网络	[14]
罗非鱼	联合改性	两段式加热：第一阶段：45 ℃加热 60 min；第二阶段：90 ℃加热 30 min	热处理促进 MP 结构伸展，谷蛋白中的谷氨酰胺等基团填充在凝胶网络中，形成更具有弹性、刚性和 WHC 的凝胶网络	修饰后的 MP 弹性提高了 5.47%，凝胶强度提高了 37.5%。硬度降低了 14.1%，咀嚼性降低了 5.32%	[10]

3 MP 凝胶的改性方法

3.1 物理改性

物理改性依托温度、声波、压力、电场等外部物理条件，驱动 MP 构象发生改变。其核心在于通过物理能量传输，促使蛋白质分子内部疏水基团外露，强化分子间相互作用，以此优化蛋白凝胶性、乳化性及起泡性等功能指标[15]。根据处理温度特征，可将物理改性分为热加工与非热加工两类技术，两者调控 MP 凝胶作用机制，实际应用优缺点差异显著。热加工依靠高温实现蛋白变性交联，设备成

本低廉、工艺化成熟, 但是容易造成营养物质流失。非热加工技术包含超声波(ultrasonic treatment, US)、超高压(ultra high pressure, UHP)、冷等离子体(cold atmospheric plasma, CAP)、脉冲电场(pulse electric field, PEF)等处理方式。该类技术操作流程简便、能源消耗较低, 可最大程度保留食品原有营养成分与风味, 在食品加工领域应用场景不断拓展, 是近年关于 MP 改性研究的热点。

3.1.1　热处理

热处理是提升 MP 凝胶性能的常用物理方式, 核心作用机制为推动蛋白分子结构解折叠。常用热处理方式包含水浴、蒸煮等传统加热, 以及微波(microwave, MV)加热、射频(radio frequency, RF)加热。这类新型加热手段可调控 MP 分子价键修饰、构象转换与聚集状态, 实现功能特性的定向优化。畅鹏等[16]设置 30~90 ℃温度区间与 0~60 min 保温时长, 分析镜鲤鱼 MP 热聚集规律。研究发现, 温度上升过程中, 蛋白的 α-螺旋结构逐步向 β-折叠转化, 温度高于 40 ℃时, 巯基发生氧化反应生成二硫键, 推动蛋白分子交联, 造成蛋白溶解度下降、体系浊度上升, 进而促进了凝胶强度的形成, 凝胶破碎力同步增大。70 ℃条件下保温 30 min, 镜鲤鱼 MP 凝胶强度达到 1.07 N 的峰值。相比传统加热, 新型加热技术在效率与均匀性上更具优势。MV 效率更高、受热均匀性优于传统加热, 处理效果受蛋白种类、浓度、微波功率与处理时间等因素影响[17]。Wei 等[18]采用 MV 处理鸡肉 MP, 观测到 α-螺旋向 β-折叠转变的现象, 提升微波功率可进一步促使蛋白结构舒展, 内部基团暴露量增加, 表面疏水性提升, 二硫键形成速率加快。Wang 等[19]利用 RF 处理草鱼 MP, 蛋白二级结构由 α-螺旋向无规则卷曲转变, 分子间疏水作用与二硫键交联增强, 最终使得草鱼 MP 凝胶弹性、强度与 WHC 均得到提升。此外, RF 处理可降低凝胶中游离水占比, 提高结合水含量, 强化水分子与蛋白的结合能力, 形成结构致密、分布均匀的三维凝胶网络。综上, 传统水浴、MV、RF 三类热处理均依靠升温调控诱导蛋白解折叠, 依靠二硫键与疏水作用构建凝胶网络。其中, 水浴加热设备购置成本低, MV 与 RF 升温效率、受热均匀更优。但所有热处理手段均存在高温损耗风味的短板, 而非热物理改性技术可有效弥补该缺陷。

3.1.2　超声波处理

US 处理在肉制品与水产品 MP 的加工改性中应用频繁, 具备高效、安全、环保、适用范围广等优势。按照频率与强度差异, US 可分为高频与低频两种类型。高频超声频率高于 100 kHz, 部分可达 1 MHz 以上, 多用于食品加工与贮藏过程中组分与理化指标监测, 为产品品质调控提供支撑。低频超声频率处于 20~100 kHz 区间, 依托空化效应完成提取、冷冻、干燥等加工操作, 处理过程不会破坏原料营养成分, 同时借助机械效应、空化效应、热效应与化学效应的协同作用, 实现 MP 结构与功能的精准调控[20–21]。其中, 低频高强度超声在蛋白改性领域应用更广泛。肉制品加工中, 超声主要在蛋白结构修饰, 分子交联增强, WHC 提升 3 个维度改善凝胶特性。Li 等[22]对南美白对虾 MP 进行 US 处理, 结果显示蛋白羰基含量、游离氨基含量、表面疏水性与荧光强度均随超声功率提升显著上升, α-螺旋逐步向 β-折叠转化, 说明 US 处理可拉伸并展开蛋白分子结构, 改善蛋白流变特性与凝胶强度。20 kHz、400 W 的高强度超声处理, 可改变冷冻南美白对虾 MP 的结构、粒径与聚集程度, 增强凝胶相关性能[23]。适度 US 处理可减小猪肉 MP 粒径, 分解蛋白聚集体, 推动 α-螺旋与无规卷曲向 β-折叠和 β-转角转化。活性巯基、表面疏水性与二硫键含量提升, 有助于形成稳定的凝胶结构, 凝胶 WHC、强度与储能模量显著提高, 三维网络结构更加致密均匀[24]。相较于高温热处理易造成蛋白过度聚集变性、风味挥发的问题, 适度低频超声可温和舒展蛋白结构, 在提升凝胶保水性与质地均匀度的同时, 完整保留水产原料固有的风味。

3.1.3　超高压处理

UHP 是以水或其他流体作为传导介质, 对密封容器中的食品或其他物质施加一定的压力(100~1000 MPa)并维持一定时间的非热加工技术[25]。与热处理依靠热能不同, UHP 可引起蛋白适度解折叠、聚集以及变性, 促进基团暴露, 增强分子间相互作用, 诱导蛋白质发生有序的聚集与交联, 从而提升其凝胶特性。在具体的结构修饰与凝胶网络构建方面, 多项研究证实了压力的作用。Liu 等[26]对泥鳅 MP 进行 UHP 处理, UHP 可诱导 α-螺旋和 β-折叠向无规卷曲转变, 表面疏水性增强, 巯基暴露并转化为二硫键。结果确定经 300 MPa 处理 9 min 时, 泥鳅 MP 具有最高的凝胶强度、凝胶硬度、咀嚼性和 WHC (83.60%)。Shi 等[27]通过 UHP 诱导克氏原螯虾 MP 的 α-螺旋与无规则卷曲逐渐向 β-折叠和 β-转角转变, 巯基及羰基含量随压力升高显著增加, 适度 UHP 处理(≤300 MPa)可通过调节蛋白构象(蛋白结构发生解折叠, 增强 MP 的分子间作用力)和水分分布(固定水和自由水含量升高), 进而诱导形成均匀致密的凝胶网络, 从而改善 MP 的凝胶特性。但在实际应用中, 单一 UHP 技术面临设备成本高、稳定性差等挑战。因此, 近年来已有研究集中于 UHP 与其他技术或外源添加物质协同应用, 如 UHP-超声[28], UHP-加盐[29], UHP-磁场[30]等联合使用, 这种技术既可实现对肌肉蛋白及凝胶性能的更优调控, 也能一定程度上解决成本、工艺稳定性和产品接受度等关键问题, 是未来非热加工领域的重要发展方向。

3.1.4　冷等离子体

CAP 作为一类新兴的非热加工技术, 由电子、离子、自由基等组成的电离气体体系, 整体呈电中性[31]。其形成源于气体在高电压或其他能量形式的激发下发生电离[32]。其具有绿色清洁、操作安全, 且有助于保持原食品品质与

营养价值等优势。常用的方式主要包括介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)、常压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ)[33]。等离子体处理溶液时, 高能粒子与液相分子相互作用可生成具有独特理化特性的等离子体活化水(plasma-activated water, PAW), 通过调控蛋白质分子间作用力实现蛋白质功能的提升。在 MP 的凝胶改良方面, CAP 主要通过诱导适度氧化与构象重排来发挥作用。Li 等[34]采用 PAW 处理鳙鱼 MP, PAW 可促进 MP 结构发生解折叠, 使 α-螺旋和无规卷曲向 β-折叠和 β-转角转变, 离子键减弱并增强疏水相互作用, 促进 MP 的聚集和凝胶形成, 经 PAW 处理可提升鳙鱼 MP 凝胶强度和 WHC 及形成更致密的凝胶网络。Li 等[35]对鲢鱼 MP 进行 PAW 处理可诱导蛋白氧化促进热诱导聚集, α-螺旋向 β-折叠转化, 酪氨酸被氧化成二硫键和二酪氨酸, 二者作为共价交联键显著强化凝胶网络结构。经适当 PAW 修饰(60 s)能加速 MP 聚集与交联, 呈现最致密均匀的交联状态, 而过度 PAW 修饰(120~240 s)会因蛋白过度氧化导致聚集形态松散, 凝胶特性减弱。除了液相处理, 气相等离子体射流同样有效。大气压等离子体射流处理可促使鸡肉 MP 结构展开, 二级结构由有序向无序转变, 疏水基团与内部巯基暴露, 储能模量、损耗模量与动态流变学特性显著提升, 表明该技术在强化 MP 凝胶性能方面效果显著[36]。陈姑等[37]采用低温等离子体处理罗非鱼 MP, 蛋白羰基含量与疏水性上升, 巯基含量下降, Zeta 电位降低, α-螺旋逐步向 β-折叠与 β-转角转化。上述变化说明低温等离子体可加速蛋白氧化, 推动凝胶变性, 影响凝胶致密性与稳定性。CAP 对蛋白的修饰仅停留在分子表面基团, 蛋白主体无明显解折叠, 相较于 US、UHP, 其对凝胶整体质构的改善较弱, 多用于简单优化蛋白界面特性。

3.1.5 PEF

PEF 在微秒至毫秒级时间内, 向食品物料施加 0.1~80 kV/cm 的高强度电场, 通过电穿孔、极化等效应促使 MP 结构展开, 增强分子间疏水作用与二硫键交联, 优化凝胶三维网络结构, 改善凝胶质构、WHC 与流变特性[38]。处理效果与电场强度、处理时间、体系环境等因素密切相关。Dong 等[39]设置 8~18 kV/cm PEF 处理鸡胸肉 MP, 凝胶强度随电场强度提升逐步上升, 结合水占比增加, 游离水占比降低。18 kV/cm 处理条件下凝胶性能最优, 蛋白粒径更小, 凝胶网络均匀稳定。电场强度提升至 28 kV/cm 时, 凝胶结构出现破损。适度 PEF 处理可促进氢键形成, 缩小蛋白回旋半径, 提升蛋白结构稳定性, 使蛋白包裹更多水分子, 优化质构指标。Wang 等[40]在猪肉 MP 研究中得到相似结论, 5.0 kV/cm、60 s 的 PEF 处理可诱导蛋白展开, α-螺旋向 β-折叠、β-转角与无规卷曲转化, 总巯基含量下降, 推动形成致密均匀的凝胶网络, 凝胶强度与 WHC 显著提升。电场强度超过 7.5 kV/cm 或处理时间超过 60 s, 易引发蛋白过度聚集, 凝胶性能出现下降。PEF 依靠瞬时电场实现蛋白温和展开, 改性强度介于 CAP 与 UHP 之间; 整体来看, 各类物理改性依靠外力调控蛋白构象, 但无法从分子共价键层面永久修饰蛋白, 化学改性可通过共价结合实现长效蛋白结构优化。

3.2 化学改性

化学改性是指通过化学修饰手段(糖基化、磷酸化、乙酰化等)使蛋白质(或其他生物大分子)的侧链基团、化学键发生共价结合或重组, 进而改变其结构, 最终提升其凝胶特性。化学改性具有成本低廉、重复性好及效率高等优点。与物理改性主要依赖非共价键作用不同, 化学修饰主要通过引入新功能基团或去除特定组分而诱导蛋白发生交联反应, 最终提升其凝胶特性[41]。然而, 化学修饰也存在操作难把控, 使用过程中易产生有害物质, 易引发食品清洁标签等隐患。

3.2.1 糖基化

糖基化是通过还原糖的羰基与蛋白质游离氨基发生接枝反应并修饰蛋白质结构来改善其凝胶特性的方法。参与该反应的蛋白质游离氨基主要是赖氨酸和精氨酸。用于糖基化修饰的糖可以是单糖、双糖、低聚糖或多糖。温度是影响糖基化效率的重要因素之一。温度越低, 反应时间越长, 控制反应条件越困难; 而温度较高, 越易导致美拉德反应在中末期发生[42]。根据反应体系含水量不同, 糖基化分为干热糖基化和湿热糖基化, 其反应进程与效果受内外因素精密调控。内部因素主要包括糖的类型、糖的分子量以及蛋白与还原糖比例。外部因素则取决于反应温度、pH 和离子强度等。糖基化通过共价键引入亲水糖链, 破坏蛋白质内部氢键, 促使结构由无序转为有序, 暴露疏水基团和巯基基团, 同时利用糖链的空间位阻抑制蛋白分子的无序热聚集。这最终导致形成孔径小且结构致密均匀的三维凝胶网络, 从而全面提升其凝胶强度、弹性、保水性和流变特性等。Liu 等[43]以鲢鱼 MP 与魔芋葡甘露低聚糖(konjac oligo-glucomannan, KOG)进行糖基化接枝反应, KOG 的亲水基团与空间位阻效应促使蛋白结构展开, 疏水基团暴露, 随 KOG 与 MP 的共价交联增强, 热稳定性提升至 84%, 同时抑制热变性导致的凝胶劣变。Liu 等[44]选择 5 种不同碳数与结构的单糖(赤藓糖、木糖、葡萄糖、半乳糖、果糖)与牡蛎 MP 进行糖基化修饰, 适度单糖接枝能改变牡蛎 MP 结构(分子量增加、形成稳定的三级结构、降低表面疏水性、增加巯基和二硫键含量), 减弱交联聚集行为(溶解度增高、粒径变小且粒径分布均匀), 从而获得良好的凝胶性能(凝胶强度增加、高持水能力、水分迁移率提高、良好的流变性能和均匀致密的凝胶网络)。经葡萄糖改性牡蛎 MP 的凝胶强度提高 51.76%, WHC 增加 28.27%。确定碳原子数是决定凝胶性能的关键因素, 空间位阻、分子间

相互作用和非共价键在单糖辅助牡蛎 MP 形成凝胶的过程中起着重要作用。Liu 等[45]探究不同分子量的低聚糖与牡蛎 MP 糖基化修饰后, 通过空间位阻在一定程度上抑制蛋白质间相互作用, 延缓聚糖糖基化后 MP 的自聚集行为, 显著提升其凝胶特性。糖基化依靠多糖亲水链段阻隔蛋白无序聚集, 侧重提升凝胶 WHC 与热稳定性。

3.2.2　磷酸化

磷酸化是指无机磷与蛋白质或多肽分子中特定氨基酸残基上的活性基团(如丝氨酸、苏氨酸的羟基或赖氨酸的氨基)发生共价结合, 形成磷酸酯键(-C-O-P)或磷酰胺键(-C-N-P), 从而改变蛋白的结构和功能特性[12]。该过程可增加蛋白质分子间静电斥力、改变其空间结构, 进而改善其溶解性、乳化性和凝胶性等[12]。磷酸盐的种类、添加量、反应条件等对 MP 凝胶特性的调控存在差异。Zhang 等[46]采用三聚磷酸钠(sodium tripolyphosphate, STPP)、三偏磷酸钠(sodium trimetaphosphate, STMP)、多聚磷酸钠(sodium polyphosphate, STTP)和焦磷酸钠(sodium pyrophosphate, SPP)对蛏子 MP 进行磷酸化修饰。SPP 介导的磷酸化修饰, 能够使 MP 平均粒径降至 255.83 nm, 溶解度提升至 81%, 蛋白整体结构更趋稳定有序。磷酸化能够强化蛋白体系内离子相互作用、疏水相互作用与二硫键交联水平, 使凝胶硬度提升至 19.01 N, WHC 与储能模量同步改善, 推动形成致密均一的三维凝胶网络结构。Jia 等[47]研究证实, 磷酸基团的引入可使螳螂虾 MP 发生解折叠, 带动内部功能基团暴露, 依托离子作用、疏水作用与二硫键交联, 提升凝胶强度、弹性、储能模量与 WHC, 推动凝胶网络有序组装。Shan 等[48]系统考察 SPP、STPP、六偏磷酸钠(sodium hexametaphosphate, HMP)及复合磷酸盐(compound phosphate, CP)对鸡胸肉 MP 凝胶特性的影响。CP 可调节体系离子强度, 推动 α-螺旋向 β-折叠转变, 强化离子键与疏水键作用, 优化蛋白交联网络, 使凝胶硬度、弹性与结合水比例上升, 储能模量相应提高。高温条件下, CP 可对凝胶网络起到稳定保护作用。整体来看, CP 的协同修饰效果优于单一磷酸盐。Huang 等[49]证实 SPP 与 STPP 可改善草鱼 MP 的凝胶弹性、凝胶强度与 WHC, 通过强化离子与疏水相互作用, 促使弱结合水向强结合水转化。Li 等[50]在银鲤鱼 MP 研究中发现, SPP 能够有效缓解冻融循环带来的凝胶性能衰减, 维持冻融后凝胶结构与功能稳定。磷酸盐通过引入负电基团提升分子静电斥力, 更适合改善高盐水产蛋白的凝胶强度, 但无法像糖基化一样同步提升体系热稳定性。

3.2.3　乙酰化

乙酰化是针对蛋白质赖氨酸残基的典型共价修饰方式, 通过乙酰基与赖氨酸残基 ε-氨基的共价结合, 中和残基正电荷, 引发蛋白构象舒展, 进而改善蛋白功能特性, 在生物过程调控与蛋白功能优化中具有重要应用价值[51]。乙酰化与琥珀酰化均属于酰化修饰, 乙酰化以乙酸酐为修饰试剂, 使蛋白表面电荷由正电转为中性; 琥珀酰化以琥珀酸酐为试剂, 使蛋白携带负电。两种修饰带来的电荷状态差异会改变分子间静电排斥强度, 琥珀酰化对蛋白构象的影响幅度通常高于乙酰化[41]。影响酰化修饰效率的因素主要包括体系 pH、反应时间、试剂与蛋白配比及反应介质环境等。乙酰基接入后会引发 MP 结构解折叠与适度聚集, 促进氢键形成, 弱化分子间过度作用, 提升蛋白亲水性与溶解能力[41]。酰化过程中, 酰基与蛋白氨基共价结合, 降低表面电荷密度[51], 引发局部结构舒展, 疏水基团与交联位点暴露量增加, 功能特性随之提升。经过乙酰化修饰的 MP 在凝胶形成阶段分散性更好, 凝胶网络孔径分布更均一[52], 可满足肉制品加工中低蒸煮损失、高凝胶质构的应用要求。

黄琳琳等[53]的研究证实, 赖氨酸乙酰化通过调控宰后肌肉的蛋白结构, 直接改善凝胶的 WHC 与弹性, 最终改善肉的嫩度。此外, 乙酰化还可与其它修饰手段协同作用。Ren 等[54]研究了糖酵解酶的乙酰化与磷酸化对羊肉品质的协同调控作用。结果表明, 己糖激酶的乙酰化与磷酸化与其活性呈显著正相关, 而磷酸果糖激酶的两种修饰则与其活性呈显著负相关且与剪切力显著相关。慢糖酵解组羊肉表现出更高的剪切力, 以及更低的红绿值, 说明乙酰化与磷酸化的协同作用可通过调控代谢酶活性和蛋白质功能, 共同影响肉的嫩度、WHC 与色泽等。总体而言, 乙酰化仅中和蛋白表面电荷、优化分散性, 对凝胶网络交联强度提升有限, 相较于生物改性, 其仍需外源化学试剂参与, 安全性考量更为严格。

3.3　生物改性

生物改性通常是指利用酶或微生物的作用, 对蛋白质进行特定酶解、酶交联等反应, 有利于蛋白质构象变化和改善其功能特性。生物改性具有反应速度快、安全性高、条件温和、时间短、成本低等优点, 被广泛应用于食品工业[55]。目前常用的生物改性技术包括酶法水解、酶法交联和微生物发酵等。

3.3.1　酶法水解

酶法水解是利用酶对蛋白质进行水解, 生成多肽和较短的氨基酸序列, 水解后分子质量降低、粒径减小、蛋白质疏水基团和巯基基团暴露并向二硫键转化, 从而改变蛋白质的功能特性[14]。目前已有关于谷氨酰胺转氨(transglutaminase, TG)酶催化的酶法交联, 而对于酶法水解的研究相对较少, 酶法水解主要是通过适当的水解度(degree of hydrolysis, DH)改性 MP, 低 DH 能引起肽键的部分断裂, 使 MP 的空间结构展开, 疏水基团暴露进而改善凝胶的 WHC 和储能模量[55]。梁恽红等[56]研究发现鳙鱼内源组织蛋白酶能够水解 MP, 而羟自由基氧化处理又抑制组织蛋白酶 B、L 的活性。但在 0.1~50 mmol/L H_2O_2 氧化条件下, 两种蛋白酶仍可持续降解 MP。内源酶引发的蛋白

水解会改变分子间作用力, 使其凝胶强度与持水力下降。表明适度的氧化和水解有利于提升凝胶特性, 过度的水解或氧化均会使凝胶特性变差。酶法水解是提高 MP 凝胶网络结构的有效方法。

3.3.2 酶法交联

酶法交联是生物改性中最常用的改性手段, 选用有特定催化活性的酶对蛋白质分子间或蛋白质分子内部进行交联修饰, 可以显著提升蛋白质凝胶特性。TG 酶是较为常见的生物酶, 它能够特异性催化谷氨酰胺残基的 γ-羧酰胺基与赖氨酸残基 ε-氨基间的酰基转移反应, 诱导蛋白质分子之间形成交联, 增强分子间相互作用力, 从而改善凝胶特性[57]。Chen 等[58]利用 TG 酶对冷冻凡纳滨对虾 MP 进行处理, 二级结构从 α-螺旋转变为 β-折叠和 β-转角, 并且适量的添加 TG 酶还能促进二硫键的形成, 使凝胶强度、WHC、储能模量显著提升以及构建稳定的三维空间结构。实验结果表明, 当TG酶添加量为0.4%时凝胶效果最佳(凝胶强度提高 5.51 倍、WHC 提升至约 80%)。此外, TG 酶可以降低蛋白质疏水作用, 增强蛋白交联并且避免过度聚集, TG 酶的添加还能使猪肉 MP 的凝胶硬度、弹性、储能模量和 WHC 显著提高, 水分分布更加均匀, 形成均匀致密的凝胶网络[59]。杨明柳等[60]发现适量添加 TG 酶能有效改善鳜鱼鱼糜的凝胶特性, 二级结构中的 α-螺旋含量减少, β-折叠含量增加, 当添加 0.6 U/g TG 酶时, WHC 达到 86.27%且因 TG 酶的交联形成大量多聚体使三维凝胶网络更加稳定, 胶黏性、咀嚼性、硬度和弹性均显著提高。

3.3.3 微生物发酵

微生物发酵则主要是指微生物通过自身的生长、繁殖和代谢产生代谢产物(如有机酸、胞外酶等)[61], 并对 MP 的疏水相互作用、二硫键等进行修饰, 使 MP 形成更致密、稳定的凝胶网络结构。刘宇[62]利用有强抗氧化的乳酸片球菌株无细胞发酵提取物以及乳酸菌发酵液(cell-free supernatant, CFS)处理猪肉 MP, 研究不同浓度的无细胞提取物对氧化条件下猪肉 MP 凝胶特性的影响。发现 MP 凝胶特性随着乳酸菌 CFS 的增加而呈现先增强后降低的趋势, 在 4%、6%较低浓度时, 凝胶强度、WHC 和白度得到显著改善, 且储能模量呈现典型的“几”字型, 有较为稳定的凝胶网络结构, 而氧化则会使 MP 凝胶网络变差。这也表明微生物发酵改性技术要准确控制改性条件及用量才能对 MP 凝胶结构发挥良好的改性效果。

3.4 联合改性

联合改性技术是通过组合多种单一改性方法, 对蛋白质进行协同处理的技术(如物理改性、化学改性和生物改性中的两种或多种技术相结合)。其优势在于能弥补单一改性方法的局限, 更高效、更全面的提升蛋白凝胶特性[63]。

3.4.1 基于物理-物理的联合改性

物理改性具有操作简单, 能耗低, 能保持营养成分等优点, US、UHP 等单一物理改性技术对分子相互作用力、WHC 等有突出优势, 将两种物理改性手段结合, 能多方面的改善 MP 凝胶特性, 改性效果较单一改性显著[55]。孙家会等[10]通过探究真空热处理与谷蛋白联合处理对罗非鱼 MP 的质构变化、WHC、水分分布、微观结构等凝胶特性的影响, 将两者复配后发现经 2 h 真空热处理并添加谷蛋白能促使罗非鱼 MP 的离子键与疏水键增加, 促进蛋白结构伸展, 形成黏弹性更高、孔径更小且致密均匀的三维凝胶网络。US 作为一种非热加工技术与热处理协同有利于构建 MP 凝胶网络。Wang 等[64]已有研究确定 US 辅助热处理可促进蛋白质-蛋白质相互作用, 助力更致密均匀的凝胶网络形成。且经过一定程度的 US 处理可促进凝胶网络中的游离水转化为固定化水, 包裹更多水分子于凝胶网络中。疏水相互作用和二硫键的显著增加有助于提升凝胶强度、WHC 且易于形成致密均匀、孔隙更小的凝胶。确定中等强度超声波辅助热处理可显著提升猪肉 MP 的凝胶特性。US 联合燕麦不溶性膳食纤维(insoluble dietary fiber, IDF)改变牛肉 MP 结构并提升其凝胶特性。US 处理导致部分蛋白结构解体和溶解, 可促进 α-螺旋解折叠并转化为 β-折叠。实验确定经 US 联合 IDF 处理显著提升其凝胶硬度、咀嚼性、WHC 及形成致密均匀的三维凝胶网络[65]。超声-MV 联合处理可增加固定化水的比例, 破坏分子间氢键与离子键, 并增强疏水相互作用与二硫键含量。α-螺旋逐渐向 β-折叠转变, 并改变蛋白质间的相互作用, 降低溶解度并促进凡纳滨对虾虾糜 MP 形成致密凝胶网络[66]。

3.4.2 基于物理-化学的联合改性

化学改性反应速率快、效率高, 对于提高 MP 凝胶稳定性效果显著, 但可用于改善 MP 凝胶特性的化学修饰手段相对比较单一, 因此, 将物理改性与化学改性联用是提升凝胶特性的有效手段[67]。Gao 等[68]发现 US 与魔芋葡甘聚糖(konjac glucomannan, KGM)协同作用可显著影响秦川牛肉 MP 的凝胶特性。单一 KGM 或 US 修饰导致蛋白质展开程度有限, 且凝胶中分子间作用力相对较弱。US 结合 KGM 修饰可促进蛋白质展开及发生适度热聚集, 改善脂肪族残基的疏水相互作用, 促进分子内氢键的形成, 从而显著改善复合凝胶的流变性与凝胶强度, 通过二硫桥的反式-反式构象比例最高, 使 MP 形成更具延展性和柔性的结构。此外, 分子动力学模拟与分子对接分析表明, 经 US 处理后蛋白质与 KGM 间的氢键长度缩短, 这是分子间相互作用增强的基础。二者协同能促进形成孔径更小、分布更均匀的三维凝胶网络。超声辅助海藻酸钾(ultrasound-assisted potassium alginate, UPA)对鸡胸肉 MP 的结构与凝胶特性的影响。UPA 减弱 MP 的粒径尺寸并提高其溶解度。在凝胶化过程中, 肌球蛋白头部聚集减弱, 肌球蛋白尾部与 UPA 分子的交联通过疏水相互作用增强。UPA 进一步抑制肌球蛋白头部二硫键的形成, 疏水相互作

用和氢键的增强, 提高凝胶强度、弹性模量和凝胶网络的有序排列[69]。Lin 等[70]探究 κ-卡拉胶(κ-carrageenan, KC)在加热过程中通过调控不同氯化钠浓度增强猪肉 MP 的凝胶特性。KC 的加入显著提高 MP 在不同氯化钠浓度下的 WHC, 密切调控 MP-KC 凝胶的形成。在初始加热阶段, KC 通过暴露原本埋藏的疏水基团, 促进蛋白质二级和三级结构的展开。随着温度升高, 二硫键和疏水相互作用在热处理过程中作为主要驱动力, 促进肌球蛋白分子在较低温度下发生头-头聚集, 随后形成尾-尾交联。通过流变行为和分子作用力最终促使 MP 形成更致密均匀且不可逆的三维凝胶网络结构。

3.4.3　基于化学-生物的联合改性

生物改性中常用的 TG 酶是用于蛋白质改性较为普遍的酶, 通过酰基转移反应有效改善凝胶质构, 近年来, TG 酶与其他改性手段的联用已经成为蛋白改性的重要手段, 能突破单一改性的局限, 充分发挥各自优势, 以最大程度改善 MP 凝胶特性[67]。Zhang 等[71]将原花青素 B_2 (procyanidin B_2, PCB_2)与 TG 酶结合提升猪肉 MP 凝胶特性。TG 酶和 PCB_2 联用使 MP 的表面疏水性和 α-螺旋含量增加, 荧光强度降低, 并促使 MP 形成致密的网络结构, 且包裹更多水分子。*L*-赖氨酸与 TG 酶联用能显著改善猪肉 MP 的结构并增强其凝胶特性。添加赖氨酸显著提高 MP 的 α-螺旋含量, 同时粒径减小, 并提升蒸煮得率和 MP 凝胶的断裂强度。*L*-赖氨酸与 TG 酶联合处理展现出增效作用, 最终形成细腻、光滑且致密的凝胶网络[72]。李保玲等[73]探究 SPP 与 TG 酶协同修饰对猪肉 MP 凝胶性能的改善, 研究表明, SPP 与 TG 酶协同作用显著提升其 MP 的凝胶强度和 WHC, 并形成致密均匀的凝胶网络结构。

4　结束语

本文系统阐述 MP 凝胶形成的机制, 以及综述物理、化学、生物及联合改性等手段并深度剖析 MP 在结构变化、价键修饰、聚集行为等对凝胶特性的影响。单一改性主要通过适度修饰充分发挥 MP 优势, 适配肉制品加工需求, 提升其凝胶特性; 联合改性主要是将两种或多种改性技术相结合产生协同增效的优势, 全面、高效促进 MP 形成更致密均匀稳定的三维凝胶网络, 旨在为凝胶类肉制品的加工提供更全面改性手段。此外, MP 改性领域仍面临许多问题与挑战。目前多数研究聚焦于改性效果的表象分析, 对改性技术调控 MP 凝胶结构的分子动力学机制、协同作用原理研究比较浅显。同时, 对于酶法水解、微生物发酵等改性技术的研究不够深入。对于复杂加工、复杂储藏环境的肉制品, 蛋白凝胶的稳定性很难保证, 缺乏具体的差异化改性方案。

针对以上问题, 未来可重点开展针对性研究。利用高精度检测技术, 揭示 MP 改性的分子构象演变与凝胶形成机制。重点开发 CAP、PEF 等绿色环保的新型物理改性技术, 研究酶法及微生物发酵等改性技术, 弥补生物改性方面的不足, 并推动其与生物、化学改性的联合应用, 同时提升技术与工业化适配性。并解决肉制品在复杂环境下的凝胶劣变等问题。综上, MP 作为决定肉制品品质的关键蛋白, 具有重要的研究价值和商业发展前景, 通过改性技术提升凝胶类产品的创新, 进一步推动肉制品市场发展。

参考文献

[1] Hu Xia, Zhang Ziyi, Liu Haotian, et al. Advances in molecular dynamics simulation of meat protein and small molecule interactions: insights into mechanisms and applications [J]. Trends in Food Science & Technology, 2026, 169: 105556.

[2] 师希雄, 王建忠, 陈敬敬, 等. 超高压处理对藏羊肉肌原纤维蛋白特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(16): 169–174.
Shi Xixiong, Wang Jianzhong, Chen Jingjing, et al. Influences of ultra-high pressure on the properties of myofibrillar proteins from Tibetan sheep meat [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(16): 169–174.

[3] Yang Nan, Liang Xiaolong, Cao Jinxuan, et al. Denaturation manner of sarcoplasmic proteins in Pale, Soft and Exudative meat determines their positive impacts on myofibrillar water-holding capacity [J]. Meat Science, 2022, 185: 108723.

[4] Wang Haifeng, Yang Zhi, Yang Huijuan, et al. Comparative study on the rheological properties of myofibrillar proteins from different kinds of meat [J]. LWT, 2022, 153: 112458.

[5] Gong Honghong, Liu Jiao, Wang Limei, et al. Strategies to optimize the structural and functional properties of myofibrillar proteins: physical and biochemical perspectives [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(13): 4202–4218.

[6] Pearce K L, Rosenvold K, Andersen H J, et al. Water distribution and mobility in meat during the conversion of muscle to meat and ageing and the impacts on fresh meat quality attributes: a review [J]. Meat Science, 2011, 89(2): 111–124.

[7] Anqi G, Xiong Y L. Myoprotein–phytophenol interaction: implications for muscle food structure-forming properties [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 2801–2824.

[8] Zhang Ziye, Yang Yuling, Zhou Peng, et al. Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein [J]. Food Chemistry, 2017, 217: 678–686.

[9] Sun Xiang dong, Holley R A. Factors influencing gel formation by myofibrillar proteins in muscle foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2011, 10(1): 33–51.

[10] 孙家会, 房佳琪, 杨维, 等. 真空热处理与谷蛋白添加对罗非鱼肌原纤维蛋白凝胶性能的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 45–53.
Sun Jiahui, Fang Jiaqi, Yang Wei, et al. Effect of vacuum heat treatment and gluten gddition on the gel properties of tilapia myofibrillar protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(1): 45–53.

[11] 张斌. 鸡蛋清蛋白对秘鲁鱿鱼鱼糜凝胶过程的影响及其作用机制研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2023: 9, 15–17.
Zhang Bin. Effect of egg white on the gel process of Peruvian squid surimi and its mechanism [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2023:

9, 15–17.

[12] 尚坤, 陈金玉, 张坤生, 等. 虾蛄肌原纤维蛋白磷酸化工艺及其在虾蛄肉制品中的应用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 12–20.
Shang Kun, Chen Jinyu, Zhang Kunsheng, et al. Phosphorylation of myofibrillar protein from *Mantis shrimp* and its application in *Mantis shrimp* meat products [J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(8): 12–20.

[13] 李昕怡, 杨啸吟, 刘昀阁, 等. 白藜芦醇对牛肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 1–12.
Li Xinyi, Yang Xiaoyin, Liu Yunge, et al. Effect of resveratrol on the structure and gel properties of beef myofibrillar protein [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 1–12.

[14] 张炎云. 猪肉肌原纤维蛋白可逆凝胶机制及应用初探[D]. 无锡: 江南大学, 2025: 27–39.
Zhang Yanyun. Preliminary study on the mechanism and application of reversible gel of pork myofibrillar protein [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2025: 27–39.

[15] Goyal N, Thakur R, Yadav B K. Physical approaches for modification of vegan protein sources: a review [J]. Food and Bioprocess Technology, 2024, 17(12): 4405–4428.

[16] 畅鹏, 谢艳英, 王浩, 等. 热处理温度及时间对镜鲤鱼肌原纤维蛋白热聚集行为的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 101–107.
Chang Peng, Xie Yanying, Wang Hao, et al. Effects of heat treatment temperature and time on thermal aggregation behavior of myofibrillar proteins from mirror carp (*Cyprinus carpio*) [J]. Food Science, 2021, 42(1): 101–107.

[17] 冯建慧, 曹爱玲, 陈小强, 等. 微波对食品蛋白凝胶性和结构影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(18): 317–322.
Feng Jianhui, Cao Ailing, Chen Xiaoqiang, et al. Research progress of effect of microwave heating on gelation properties and structure of food protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2017, 38(18): 317–322.

[18] Wei Sumeng, Yang Yuling, Feng Xiao, et al. Structures and properties of chicken myofibrillar protein gel induced by microwave heating [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(7): 2691–2699.

[19] Wang Limei, Wang Xian, Ma Jing, et al. Effects of radio frequency heating on water distribution and structural properties of grass carp myofibrillar protein gel [J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128557.

[20] 李逍燕, 左硕静, 刘晓涵, 等. 超声处理对牡蛎肌原纤维蛋白溶解性的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(7): 8–14.
Li Xiaoyan, Zuo Shuojing, Liu Xiaohan, et al. Effects of ultrasonic treatment on solubility of oyster myofibrillar protein [J]. Meat Research, 2024, 38(7): 8–14.

[21] Téllez-Morales J A, Hernández-Santo B, Rodríguez-Miranda J. Effect of ultrasound on the techno-functional properties of food components/ingredients: a review [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2020, 61: 104787.

[22] Li Na, Zhang Kexin, Du Jiayi, et al. High-intensity ultrasound improved the physicochemical and gelling properties of Litopenaeus vannamei myofibrillar protein [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106217.

[23] Li Jiao, Dai Zechuan, Chen Zhaohui, et al. Improved gelling and emulsifying properties of myofibrillar protein from frozen shrimp (*Litopenaeus vannamei*) by high-intensity ultrasound [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 135: 108188.

[24] Shi Yuyao, Qiu Zehui, Zheng Yao, et al. Ultrasound-assisted vacuum impregnation of antifreeze proteins inhibits freeze-thaw-induced myofibrillar protein aggregation in *Patinopecten yessoensis* adductor muscle: a multiscale analysis of function and molecular structure [J]. Food Chemistry, 2026, 511: 148707.

[25] Zhang Kexin, Li Na, Wang Zonghan, et al. Recent advances in the color of aquatic products: evaluation methods, discoloration mechanism, and protection technologies [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137495.

[26] Liu Qiaoyu, Lin Zeqian, Chen Xiaomei, et al. Characterization of structures and gel properties of ultra-high-pressure treated-myofibrillar protein extracted from mud carp (*Cirrhinus molitorella*) and quality characteristics of heat-induced sausage products [J]. LWT, 2022, 165: 113691.

[27] Shi Liu, Xiong Guangquan, Yin Tao, et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the protein denaturation and water properties of red swamp crayfish (*Procambarus clarkia*) [J]. LWT, 2020, 133: 110124.

[28] 王世哲, 黄琪, 刘栋银, 等. 超声与超高压处理对翘嘴鲌肌原纤维蛋白结构和风味结合能力的影响[J]. 肉类研究, 2024, 38(12): 26–33.
Wang Shizhe, Huang Qi, Liu Dongyin, et al. Effect of ultrasound or ultra-high pressure treatment on the structure and flavor-binding capacity of *Culter alburnus* myofibrillar protein [J]. Meat Research, 2024, 38(12): 26–33.

[29] Liu Xiaohan, Tian Guifang, Zhao Jinrong, et al. Integrated ultra-high pressure and salt addition to improve the *in vitro* digestibility of myofibrillar proteins from scallop mantle (*Patinopecten yessoensis*) [J]. Food Chemistry, 2024, 447: 138985.

[30] Zhu Chen, Chen Lihang, Zeng Xinyao, et al. Effects of ultra high pressure-magnetic field treatment on protein properties and quality characteristics of stored shrimp (*Litopenaeus Vannamei*) [J]. LWT, 2022, 170: 114070.

[31] Khumsupan D, Lin S P, Hsieh C W, et al. Current and potential applications of atmospheric cold plasma in the food industry [J]. Molecules, 2023, 28(13): 4903.

[32] 樊润泽, 祁苗, 张新颖, 等. 冷等离子体对肉蛋白的影响及其在肉品保藏加工中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(7): 250–259.
Fan Runze, Qi Miao, Zhang Xinying, et al. Effect of cold plasma on meat protein and its applications in meat processing and preservation: a comprehensive review [J]. Food Science, 2023, 44(7): 250–259.

[33] Misra N N, Jo C. Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry [J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 64: 74–86.

[34] Li Mengzhe, Shi Tong, Wang Xin, et al. Plasma-activated water promoted the aggregation of *Aristichthys nobilis* myofibrillar protein and the effects on gelation properties [J]. Current Research in Food Science, 2022, 5: 1616–1624.

[35] Li Mengzhe, Wang Xin, Shi Tong, et al. Mechanism of plasma-activated water promoting the heat-induced aggregation of myofibrillar protein from silver carp (*Aristichthys Nobilis*) [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2024, 91: 103555.

[36] 李可, 李燕, 康超娣, 等. 常压等离子体射流对鸡肉肌原纤维蛋白结构和流变特性的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 124–131.

Li Ke, Li Yan, Kang Chaodi, et al. Effect of atmospheric pressure plasma jet on structural and rheological properties of chicken myofibrillar protein [J]. Food Science, 2020, 41(19): 124–131.

[37] 陈姑, 姜竹茂, 位正鹏, 等. 低温等离子体处理加速罗非鱼肌原纤维蛋白的氧化及结构改变[J]. 食品工业科技, 2023, 44(4): 88–95.
Chen Gu, Jiang Zhumao, Wei Zhengpeng, et al. Cold plasma treatment accelerated the oxidation and structural changes of myofibrillar in tilapia [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(4): 88–95.

[38] Wang Rui, Wang Langhong, Wen Qinghui, et al. Combination of pulsed electric field and pH shifting improves the solubility, emulsifying, foaming of commercial soy protein isolate [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 134: 108049.

[39] Dong Ming, Tian Huixin, Xu Yujuan, et al. Effects of pulsed electric fields on the conformation and gelation properties of myofibrillar proteins isolated from pale, soft, exudative (PSE)-like chicken breast meat: a molecular dynamics study [J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128306.

[40] Wang Qingling, Wei Ranran, Hu Juan, et al. Moderate pulsed electric field-induced structural unfolding ameliorated the gelling properties of porcine muscle myofibrillar protein [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2022, 81: 103145.

[41] Ye Sangjin, Park H J, Baik M Y. Modification of plant proteins as alternatives to animal proteins: a review [J]. Food Science and Biotechnology, 2025, 34(2): 349–363.

[42] Zhang Zhaoli, Hu Haochen, Chen Silu, et al. Dual-frequency ultrasound-assisted glycation modulates beef myofibrillar protein gels and inhibits lysinoalanine formation [J]. Gels, 2026, 12(8): 669.

[43] Liu Shulai, Zhao Peicheng, Zhang Jingjing, et al. Physicochemical and functional properties of silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) myofibrillar protein glycated with konjac oligo-glucomannan [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 67: 216–223.

[44] Liu Xiaohan, Tian Guifang, Hou Yakun, et al. Monosaccharide-induced glycation enhances gelation and physicochemical properties of myofibrillar protein from oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. Food Chemistry, 2023, 428: 136795.

[45] Liu Xiaohan, Tian Guifang, Fu Kexin, et al. Molecular structural modification of myofibrillar protein from oyster (*Crassostrea* gigas) with oligosaccharides for improving its gel properties [J]. Food Chemistry, 2024, 455: 139884.

[46] Zhang Qing, Hou Yakun, Liu Xiaohan, et al. Improvement in the gelling properties of myofibrillar protein from the razor clam (*Sinonovacula constricta*) through phosphorylation and structural characterization of the modified protein [J]. Food Chemistry: X, 2023, 20: 101006.

[47] Jia Beibei, Chen Jinyu, Yang Gongru, et al. Improvement of solubility, gelation and emulsifying properties of myofibrillar protein from *Mantis shrimp* (*Oratosquilla oratoria*) by phosphorylation modification under low ionic strength of KCl [J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134497.

[48] Shan Lingyue, Li Yan, Wang Qiumin, et al. Profiles of gelling characteristics of myofibrillar proteins extracted from chicken breast: effects of temperatures and phosphates [J]. LWT, 2020, 129: 109525.

[49] Huang Jingjing, Bakry A M, Zeng Shuwei, et al. Effect of phosphates on gelling characteristics and water mobility of myofibrillar protein from grass carp (*Ctenopharyngodon* idellus) [J]. Food Chemistry, 2019, 272: 84–92.

[50] Li Jun, Feng Ruonan, Shen Jiandong, et al. Influence of sodium chloride and sodium pyrophosphate on the physicochemical and gelling properties of silver carp myofibrillar proteins sol subjected to freeze-thaw cycles [J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 170: 114055.

[51] Ali I, Conrad R J, Verdin E, et al. Lysine acetylation goes global: from epigenetics to metabolism and therapeutics [J]. Chemical Reviews, 2018, 118(3): 1216–1252.

[52] Hu Gan, Zhang Jiemin, Wang Qi, et al. Succinylation modified ovalbumin: structural, interfacial, and functional properties [J]. Foods, 2022, 11(18): 2724.

[53] 黄琳琳, 张一敏, 朱立贤, 等. 蛋白质氧化和翻译后修饰对肉品质的影响及机制研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(9): 241–247.
Huang Linlin, Zhang Yimin, Zhu Lixian, et al. Advances in research of the effects and mechanisms of protein oxidationand post-translational modification on meat quality [J]. Food Science, 2021, 42(9): 241–247.

[54] Ren Chi, Li Xin, Bai Yuqiang, et al. Phosphorylation and acetylation of glycolytic enzymes cooperatively regulate their activity and lamb meat quality [J]. Food Chemistry, 2022, 397: 133739.

[55] Zhang Xinyu, Wang Qiang, Liu Zhe, et al. Plant protein-based emulsifiers: mechanisms, techniques for emulsification enhancement and applications [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 109008.

[56] 梁恽红. 氧化条件下内源组织蛋白酶对鳙鱼糜凝胶特性的影响[D]. 石家庄: 河北经贸大学, 2023: 14–20.
Liang Yunhong. Effects of cathepsin on gel properties of bighead surimi under oxidation condition [D]. Shijiazhuang: Hebei University of Economics and Business, 2023: 14–20.

[57] 符馨予. 六偏磷酸钠对猪肉肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2025: 7–8.
Fu Xinyu. The effect of sodium hapetaphosphate on the heat-induced gel properties of pork myofibrin [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2025: 7–8.

[58] Chen Zhaohui, Dai Zechuan, Liu Chunhui, et al. Microbial transglutaminase promotes cross-linking for enhancing gelation of myofibrillar protein in frozen *Litopenaeus vannamei* through deamination reaction [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 147: 109332.

[59] Chang Jinyang, Yang Xu, Li Jing, et al. Improvement of physicochemical and gel properties of chlorogenic acid-modified oxidized myofibrillar proteins by transglutaminase [J]. LWT, 2023, 178: 114582.

[60] 杨明柳, 周迎芹, 方旭波, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鳜鱼鱼糜凝胶的品质影响[J]. 食品科学, 2021, 42(12): 37–44.
Yang Mingliu, Zhou Yingqin, Fang Xubo, et al. Effect of transglutaminase on the quality of Mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) surimi gel [J]. Food Science, 2021, 42(12): 37–44.

[61] 刘锋. 微生物发酵工程对食品营养及保健功能的影响[J]. 食品安全导刊, 2024(14): 179–182.
Liu Feng. Effects of microbial fermentation engineering on nutrition and health function of food [J]. China Food Safety Magazine, 2024(14): 179–182.

[62] 刘宇. 乳酸片球菌 S_1 发酵液对猪肌原纤维蛋白氧化及凝胶特性的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2021: 27–29.
Liu Yu. Cell-free supernatants from *Pediococcus acidilactici* S_1 present antioxidant and gelling properties of pork myofibrillar protein [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2021: 27–29.

[63] 李依伦. 多酚-葡聚糖-肌原纤维蛋白三元复合酶解物的制备及其乳液体系对叶黄素的包载作用研究[D]. 喀什: 喀什大学, 2023: 9–10.
Li Yilun. Preparation of polyphenol-glucan-myofibrin ternary complex enzymatic hydrolysate and study on the encapsulation effect of its emulsion system on lutein [D]. Kashi: Kashi University, 2023: 9–10.

[64] Wang Qingling, Gu Chen, Wei Ranran, et al. Enhanced gelling properties of myofibrillar protein by ultrasound-assisted thermal-induced gelation process: give an insight into the mechanism [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 94: 106349.

[65] Wu Danxuan, Wang Hengpeng, Guo Xiuyun, et al. Insight into the mechanism of enhancing myofibrillar protein gel hardness by ultrasonic treatment combined with insoluble dietary fiber from oat [J]. LWT, 2023, 178: 114539.

[66] Zhang Tong, Wang Jie, Feng Jiaqi, et al. Effects of ultrasonic–microwave combination treatment on the physicochemical, structure and gel properties of myofibrillar protein in *Penaeus vannamei* (*Litopenaeus vannamei*) surimi [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 90: 106218.

[67] He Ni, Li Tongshuai, Li Lin, et al. Mechanistic insight into polysaccharides and ultrasound synergistic enhancement of the quality of low-salt surimi gels [J]. Food Chemistry, 2026, 35: 103763.

[68] Gao Yongfang, Hu Yunpeng, Wang Jiakuan, et al. Modification of low-salt myofibrillar protein using combined ultrasound pre-treatment and konjac glucomannan for improving gelling properties: intermolecular interaction and filling effect [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 250: 126195.

[69] Shi Haibo, Zhou Ting, Wang Xin, et al. Effects of the structure and gel properties of myofibrillar protein on chicken breast quality treated with ultrasound-assisted potassium alginate [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129873.

[70] Lin Shiwen, Liu Yutong, Li Cheng, et al. Underlying the regulatory mechanism of κ-carrageenan on improving the water holding capacity of myofibrillar protein gels at different NaCl levels: emphasis on aggregation behaviour and molecular docking during heating process [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 174: 112339.

[71] Zhang Daojiu, Yang Xu, Wang Yichun, et al. Proanthocyanidin B2 and transglutaminase synergistically improves gel properties of oxidized myofibrillar proteins [J]. Food Chemistry, 2022, 391: 133262.

[72] Cao Yungang, Li Baoling, Fan Xin, et al. Synergistic recovery and enhancement of gelling properties of oxidatively damaged myofibrillar protein by l-lysine and transglutaminase [J]. Food Chemistry, 2021, 358: 129860.

[73] 李保玲, 李颖, 范鑫, 等. 焦磷酸钠与谷氨酰胺转氨酶对氧化损伤肌原纤维蛋白凝胶性能的协同改善效应[J]. 中国农业科学, 2021, 54(16): 3527–3536.
Li Baoling, Li Ying, Fan Xin, et al. Synergistic enhancement of gelling properties of oxidatively damaged myofibrillar protein by sodium pyrophosphate and transglutaminase [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(16): 3527–3536.

(责任编辑: 曹岱琳 安香玉)