

# 外源性分子调控肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的机制与应用研究进展

杜佩霓, 马楚函, 范雯清, 王蕙颖, 商文畅, 淑英\*

河北农业大学食品科技学院, 河北 保定

收稿日期: 2026年3月19日; 录用日期: 2026年4月29日; 发布日期: 2026年5月12日

## 摘要

肌原纤维蛋白作为肉类中的核心功能蛋白, 其热诱导凝胶特性直接决定肉糜制品的质构、保水性和感官品质。天然肌原纤维蛋白热诱导凝胶普遍存在网络结构不均、持水性不足等问题, 限制了高端肉制品的开发。在健康饮食理念推动下, 以添加天然外源性分子替代传统化学改良剂成为行业共识, 其通过与肌原纤维蛋白形成复合体系, 调控分子作用力平衡、蛋白构象转变及三维网络构建, 实现热诱导凝胶品质的定向优化。本文系统综述肌原纤维蛋白的分子结构与热诱导凝胶形成机制, 重点阐述多糖类、蛋白类、多酚类及其他四类物质对肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的调控效果及分子机制, 为肉类热诱导凝胶制品的品质精准调控提供理论支撑与技术参考。

## 关键词

肌原纤维蛋白, 热诱导凝胶, 质构特性, 分子作用力, 蛋白相互作用

# Research Progress on Mechanisms and Applications of Exogenous Molecules Regulating Heat-Induced Gel Properties of Myofibrillar Proteins

Peini Du, Chuhan Ma, Wenqing Fan, Huiying Wang, Wenchang Shang, Ying Shu\*

College of Food Science and Technology, Hebei Agricultural University, Baoding Hebei

Received: March 19, 2026; accepted: April 29, 2026; published: May 12, 2026

\*通讯作者。

文章引用: 杜佩霓, 马楚函, 范雯清, 王蕙颖, 商文畅, 淑英. 外源性分子调控肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的机制与应用研究进展[J]. 食品与营养科学, 2026, 15(3): 211-219. DOI: 10.12677/hjfn.2026.153024

## Abstract

Myofibrillar protein, as the key functional protein in meat, has heat-induced gelation properties that directly determine the texture, water-holding capacity, and sensory quality of meat products. Heat-induced gels prepared from natural myofibrillar proteins generally suffer from problems such as uneven network structure and insufficient water retention, which restrict the development of high-end meat products. Driven by the concept of a healthy diet, it has become an industrial consensus to replace traditional chemical modifiers with natural exogenous molecules. These molecules regulate the balance of molecular interactions, protein conformational transitions and three-dimensional network construction by forming composite systems with myofibrillar proteins, thereby achieving targeted optimization of heat-induced gel quality. This paper systematically reviews the molecular structure of myofibrillar proteins and the formation mechanism of heat-induced gels, focusing on the regulatory effects and molecular mechanisms of polysaccharides, proteins, polyphenols and other four types of substances on the heat-induced gelation properties of myofibrillar proteins, aiming to provide theoretical support and technical reference for the precise quality regulation of meat-based heat-induced gel products.

## Keywords

Myofibrillar Proteins, Heat-Induced Gel, Textural Properties, Molecular Forces, Protein-Protein Interactions

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

肉类是人类膳食中摄入蛋白质的主要来源, 伴随现代食品工业的稳步发展, 肉制品加工领域正逐步突破传统初级加工的发展模式, 向高附加值产品的研发与生产方向转型升级, 其中肌原纤维蛋白(Myofibrillar protein, MP)热诱导凝胶类产品的开发成为研究热点[1]。MP作为肌肉中含量最高的盐溶性蛋白, 其热诱导凝胶化是肉制品加工的核心环节。加热过程中, MP分子发生构象展开, 疏水基团与巯基暴露, 通过二硫键、氢键、疏水相互作用及静电相互作用交联形成三维网络, 该结构直接决定产品的弹性、多汁性和货架稳定性[2]。然而, 天然MP热诱导凝胶常存在网络结构不均、保水性差、对加工条件敏感等固有缺陷, 限制了其在高端肉制品中的应用[3]。外源性分子因来源广泛、作用温和、功能多样等优势, 已成为调控MP热诱导凝胶特性的主流手段, 不同类型添加物通过差异化分子机制与MP相互作用, 可显著改善热诱导凝胶的综合性能[4]。基于此, 本文聚焦多糖类[5]、蛋白类[6]、多酚类[7]及其他[8]四类物质核心外源性分子, 系统梳理其对MP热诱导凝胶特性的调控效果与作用机制, 为肉类加工行业开发高品质、健康化凝胶类肉制品提供科学依据。

## 2. 肌原纤维蛋白的结构与热诱导凝胶形成机制

### 2.1. 肌原纤维蛋白分子结构特征

MP是肌肉组织中关键的功能性蛋白复合体, 由收缩蛋白、调节蛋白和结构支撑蛋白三类构成。肌球蛋白作为核心收缩蛋白, 头部为球状结构, 尾部由两条 $\alpha$ -螺旋缠绕形成超螺旋杆状结构, 尾部相

互缠绕构成肌球蛋白粗丝骨架[9]；肌动蛋白以球状单体形式存在，可聚合形成纤维状肌动蛋白，两条纤维状肌动蛋白以右手螺旋缠绕成细丝。此外，原肌钙蛋白复合体、原肌球蛋白等调节蛋白及肌联蛋白等结构支撑蛋白，共同维持肌节结构完整性与弹性，为 MP 热诱导凝胶形成过程中的构象转变提供结构基础。

## 2.2. 肌原纤维蛋白热诱导凝胶稳定性的分子机制

MP 热诱导凝胶的形成是一个多步骤动态过程，核心始于蛋白质热致变性展开与解聚延伸，肌球蛋白内部疏水基团暴露后，通过疏水相互作用驱动分子间凝集与交联，最终形成特定拓扑结构的三维网络[10]。但肌球蛋白头部和尾部的热诱导凝胶形成能力存在显著区域差异，这种差异直接决定了热诱导凝胶微观结构与宏观质构性能。热诱导凝胶稳定性受内源性因素与外源性因素双重调控[11]，在内源性因素中，热致变性诱导的构象重排及二硫键共价交联、疏水微区缔合、静电相互作用等化学作用力的动态平衡，是维持热诱导凝胶结构稳定的核心。在外源性因素中，pH 值、化学变性剂、超声处理[12]、加热条件等通过调控蛋白质表面电荷分布、溶剂化效应及分子扩散动力学，显著影响 MP 聚集态行为[13]。

## 3. 外源性分子的应用效果与作用机制

外源性分子通过与 MP 发生特异性相互作用，实现热诱导凝胶品质的定向改良，核心机制均围绕诱导蛋白构象转变、调控分子作用力、填充热诱导凝胶孔隙展开，按类型可分为四类且各有侧重[14]。多糖类含天然多糖与纤维素类，通过诱导肌球蛋白二级结构转变、重组分子作用力、物理截留水分等，优化热诱导凝胶保水性与结构稳定性，适配低盐低脂加工需求[5]。蛋白类包括动物源与植物源，前者通过交联强化与活性填充提升热诱导凝胶强度、保水性[15]，后者兼具脂肪替代功能，契合健康饮食趋势[16]。多酚类以植物提取物为来源，凭借酚羟基实现“交联强化 + 氧化防护”双重功能，效果受种类与浓度影响[17]。此外，脂类、无机化合物、多价阳离子等其他添加剂为调控提供新方向，通过疏水/静电作用、离子交联等多机制优化热诱导凝胶性能，为高品质肉制品开发提供多元支撑。

### 3.1. 多糖类添加物的应用效果与作用机制

多糖是由 10 个及以上单糖单元通过糖苷键连接形成的高分子聚合物，部分多糖因具备独特结构与功能特性，引入 MP 热诱导凝胶体系后，可在加热过程中使 MP 三维骨架更致密[5]。不同来源的多糖因分子结构和功能特性存在显著差异，其调控 MP 热诱导凝胶性能的具体路径也有所不同，可通过诱导肌球蛋白二级结构转变、重组分子间作用力、填充 MP 热诱导凝胶内部孔隙以及发挥物理阻隔作用等方式，实现对热诱导凝胶质构、持水性及稳定性的优化改善[18]。故分为天然成分多糖与纤维素类多糖分别进行论述。

#### 3.1.1. 天然成分多糖

天然多糖由植物、真菌等破除其细胞壁结构，利用其溶解性提取制得。植物阴离子多糖常见于  $\kappa$ -卡拉胶，核心调控效应体现在其可凭借强水合能力锁定体系中的自由水，并均匀分散于 MP 基质形成均一体系，经加热处理后能构建出无水分通道的致密三维凝胶网络[19]。在高盐环境胁迫下，魔芋葡甘聚糖的氢键数量会明显增多，可诱导肌球蛋白发生  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠的构象重排，为蛋白质分子的有序聚集提供结构支撑[20]。源于植物种子的天然多糖如亚麻籽胶加入 MP 热诱导凝胶体系后，可促进肌球蛋白链与肌动蛋白链在有序聚集前充分舒展，同时通过与肌球蛋白形成静电相互作用、提升二级结构中  $\beta$ -折叠的比例以及物理截留水分等途径，增加热诱导凝胶中结合水的含量，最终提升热诱导凝

胶的持水力与热稳定性[21]。此外,瓜尔豆胶可通过分子中的羟基与 MP 形成氢键,协同抑制 MP 的异常聚集,保障热诱导凝胶体系的稳定性。车前子壳多糖的调控效应具有浓度依赖性,低添加量时可填充 MP 热诱导凝胶网络,促进蛋白-蛋白相互作用,高添加量时则形成 MP-多糖互穿网络,显著提升热诱导凝胶的持水性与粘附性,但过量添加会阻碍 MP 网络的正常构建,导致热诱导凝胶性能劣变[22]。

### 3.1.2. 纤维素类多糖

纤维素类多糖可由植物组织与农业副产品提取而来,因来源广泛、生物相容性好,在低盐、低脂肉制品加工中具有独特优势。柑橘纤维(Citrus fiber, CF)的亲水基团快速吸附并锁定体系内的自由水,减少加热过程中因水分迁移导致的热诱导凝胶收缩与出水现象,纤维状结构作为“骨架支撑”嵌入 MP 热诱导凝胶网络中,通过氢键与肌球蛋白分子形成稳定结合,提升凝胶机械强度与韧性,同时,CF 中少量果胶的极性官能团还可与 MP 形成静电相互作用,进一步调控肌球蛋白的聚集行为,避免过度聚集导致的热诱导凝胶粗糙,协同提升热诱导凝胶质构的均匀性[23]。甘蔗不溶性纤维(Sugarcane insoluble fiber, SIF)的多孔结构可通过物理截留作用固持大量自由水,抑制加热过程中的水分迁移与流失[24]。其疏松的纤维结构可均匀分散于 MP 基质中,在加热凝胶化过程中嵌入 MP 热诱导凝胶的孔隙,形成“MP-纤维”复合网络结构,有效提升热诱导凝胶网络的致密性与稳定性。此外,SIF 分子中的羟基可与肌球蛋白形成氢键相互作用,促进蛋白质分子的有序交联,减少无序聚集导致的热诱导凝胶缺陷。燕麦水不溶性膳食纤维(Insoluble dietary fiber, IDF)可将水分保留在 MP 热诱导凝胶网络的“网眼”内并加速热诱导凝胶基质中的水分从游离水转变为不易流动水[25]。同时, IDF 的活性基团可通过提高蛋白质之间的相互作用力来促进蛋白质之间的相互作用。从而使原始热诱导凝胶中不规则的水通道转变为小水孔,形成紧凑有序的热诱导凝胶网络结构。

## 3.2. 蛋白类添加物的应用效果与作用机制

蛋白质是动植物组织中广泛存在的生物大分子,外源性蛋白作为添加剂加入 MP 热诱导凝胶体系,可通过两大核心机制调控凝胶性能。一方面,协同调控凝胶内非共价键与共价二硫键构成的分子网络,优化凝胶交联强度与稳定性;另一方面,依托自身特性减少网络缺陷并提升结构均匀性。不同来源的外源性蛋白结构与功能存在固有差异,可特异性干预 MP 构象转变与分子组装,靶向调控凝胶质构、持水性及稳定性。基于蛋白-蛋白相互作用的 MP 凝胶改性策略,可明晰外源性蛋白调控机制,搭建“添加剂-凝胶特性-肉制品品质”关联体系,为高品质肉制品开发提供技术与理论支撑。蛋白质对肌原纤维蛋白凝胶特性的调控机制见图 1。

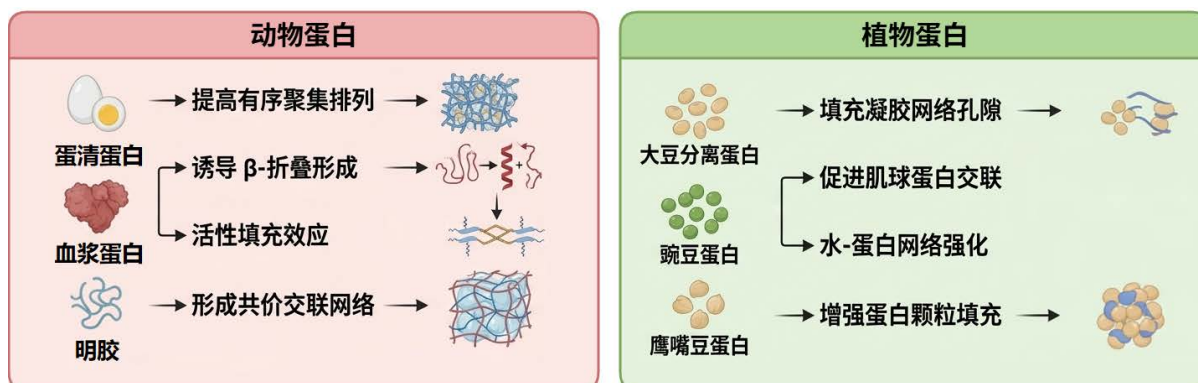


Figure 1. Regulatory mechanism of proteins on the gel properties of myofibrillar proteins

图 1. 蛋白质对肌原纤维蛋白凝胶特性的调控机制

### 3.2.1. 动物源蛋白

动物源蛋白作为高效的外源性添加物，在 MP 热诱导凝胶体系中展现出显著的品质优化作用，其应用效果与作用机制高度协同且靶向明确。蛋清蛋白可显著增强热诱导凝胶机械强度与弹性，通过与 MP 的协同作用使热诱导凝胶硬度提升 30% 以上，同时改善保水性[16]。血浆蛋白通过活性填充效应，使热诱导凝胶网络孔隙更致密均匀，抑制水分迁移、提升热诱导凝胶的乳化稳定性[6]；明胶的共价交联作用可使热诱导凝胶持水力提升 25% 左右，同时增强冻融稳定性。此外，动物源蛋白还能优化热诱导凝胶流变特性，提高储能模量，使热诱导凝胶呈现更优的弹性特征与结构稳定性。其组成与 MP 的氨基酸相似，优异的相容性可减少相分离风险，其添加量通常控制在 1%~3% 时效果最优，过量易导致热诱导凝胶过度交联而降低弹性。

### 3.2.2. 植物源蛋白

大豆分离蛋白可显著增强热诱导凝胶持水力与致密性，80℃ 热处理后与 MP 热诱导凝胶的持水力提高，储能模量大幅提升。豌豆蛋白的优良热诱导凝胶性与持油持水性可填充 MP 热诱导凝胶孔隙并促进蛋白交联，使热诱导凝胶硬度提升 20% 以上[15]；鹰嘴豆蛋白能强化水-蛋白相互作用，形成均质三维结构，显著提高热诱导凝胶储能模量与咀嚼性[26] [27]；藜麦蛋白可改善低盐体系 MP 热诱导凝胶稳定性，减缓冻融过程中水分流失从而降低丸失水率[28]。此外，植物源蛋白还能作为脂肪替代物，降低肉制品热量，契合健康饮食趋势[29]。其添加量通常控制在 20%~50% 时效果最优，过量易因疏水相互作用过强降低热诱导凝胶弹性，适配低脂、低盐肉制品加工需求。

### 3.3. 多酚类添加物的应用效果与作用机制

多酚类添加物以植物提取物为主要来源，凭借酚羟基的化学活性，实现“交联强化 + 氧化防护”的双重功能，同时其无毒、清洁标签及环境友好等特性使其相较于传统外源添加剂更受青睐[7]。研究表明，不同多酚对热诱导凝胶特性的影响存在差异，儿茶素可清除体系内自由基减少 MP 巯基的氧化，同时通过疏水相互作用与 MP 结合调控蛋白聚集行为，与葡聚糖等物质协同作用时，可促进 MP 形成更有序稳定的热诱导凝胶网络，避免高温导致的热诱导凝胶劣化。桑葚多酚通过干预 MP 构象与热诱导凝胶网络形成，可显著缓解 MP 的氧化损伤，减少脂质与蛋白质氧化产物积累[30]。槲皮素可增强热诱导凝胶的强度和持水性，形成致密均匀的微观结构。没食子酸、绿原酸等通过强交联作用提升热诱导凝胶强度[31]。

### 3.4. 其他添加物的应用效果与作用机制

随着食品科学技术的发展，脂类[8]、无机化合物类[32]、多价阳离子[33]等其他添加物，为 MP 热诱导凝胶调控提供了新方向。脂类作为结构多样的天然有机化合物，可通过疏水/静电作用诱导蛋白二级结构重排、促进巯基-二硫键交换及疏水相互作用，兼具填充相功能优化热诱导凝胶孔隙，平衡分子作用力，优化 MP 热诱导凝胶保水性、质构与微观结构。大黄鱼鱼卵磷脂断裂肌球蛋白  $\alpha$ -螺旋氢键、促蛋白交联，填充热诱导凝胶孔隙减少水分迁移，提升热诱导凝胶弹性与结构均匀性。无机化合物如三聚磷酸盐，通过引入磷酸基团增加 MP 中带负电荷残基，增强离子交联作用的同时提升肌球蛋白负电性以强化分子间静电排斥力，此外，还能诱导肌球蛋白二级结构中  $\alpha$ -螺旋向  $\beta$ -折叠转变，促进蛋白质有序交联[34]。多价阳离子如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{Sr}^{2+}$  都会促进 MP 热诱导凝胶特性优化， $\text{Ca}^{2+}$  通过静电屏蔽、盐桥作用诱导肌球蛋白去折叠并暴露疏水基团，促进分子再聚集，精准优化 MP 热诱导凝胶特性。不同外源性添加剂对肌原纤维蛋白凝胶特性的作用效果见表 1。

**Table 1.** Effects of different exogenous additives on the heat-induced gel properties of myofibrillar proteins  
**表 1.** 不同外源性添加剂对肌原纤维蛋白凝胶特性的作用效果

外源添加剂	细分种类	调控效果
多糖类	$\kappa$ -卡拉胶	强水合锁定自由水, 构建无水分通道的致密三维凝胶网络, 提升保水性[19]
	魔芋葡甘聚糖	高盐下增加氢键, 诱导蛋白构象重排, 为蛋白有序聚集提供结构支撑[20]
	亚麻籽胶	促蛋白链舒展, 提升 $\beta$ -折叠比例, 增加结合水含量, 提升持水力与热稳定性[21]
	瓜尔豆胶	与蛋白形成氢键, 抑制异常聚集, 保障凝胶体系整体稳定性[35]
	车前子壳多糖	低量填充网络促蛋白互作, 高量形成互穿网络提升持水性, 过量则劣化凝胶[22]
	柑橘纤维	亲水锁水减少出水, 纤维骨架增强凝胶强度, 调控蛋白聚集提升质构均匀性[23]
	甘蔗不溶性纤维	物理截留水分, 填充孔隙形成复合网络, 促蛋白有序交联改善质构与热稳定性[24]
	燕麦水不溶性膳食纤维	吸附保留水分并转化为不易流动水, 促蛋白相互作用形成紧凑有序凝胶网络[25]
蛋白类	蛋清蛋白	显著增强凝胶机械强度与弹性, 改善保水性, 减少蒸煮水分流失[16]
	血浆蛋白	活性填充致密凝胶孔隙, 抑制水分迁移, 提升凝胶乳化稳定性[6]
	明胶	降低蒸煮损失, 提升凝胶持水力, 增强冻融稳定性与结构交联度[36]
	大豆分离蛋白	增强凝胶持水力与致密性, 大幅提升储能模量, 优化凝胶流变特性[37]
	豌豆蛋白	填充孔隙促蛋白交联, 提升凝胶硬度, 兼具良好持油持水性[15]
	鹰嘴豆蛋白	强化水-蛋白相互作用, 形成均质三维结构, 提升储能模量与咀嚼性[26] [27]
	藜麦蛋白	改善低盐体系凝胶稳定性, 减缓冻融水分流失, 降低肉制品失水率[28]
多酚类	儿茶素	清除自由基保护巯基, 调控蛋白聚集, 协同其他物质形成稳定凝胶网络[38]
	桑葚多酚	缓解蛋白氧化损伤, 减少氧化产物积累, 部分组分可优化凝胶微观结构[30]
	槲皮素	增强凝胶强度与持水性, 促进形成致密均匀的凝胶微观结构[39]
	没食子酸	通过强交联作用提升凝胶强度, 优化凝胶质构特性[40]
	绿原酸	强化蛋白分子交联, 提升凝胶结构强度, 改善凝胶整体稳定性[40]
其他类	大黄鱼鱼卵磷脂	断裂蛋白氢键促交联, 填充孔隙阻碍水分迁移, 提升凝胶弹性与结构均匀性[41]
	三聚磷酸盐	增加蛋白负电荷残基, 强化离子交联与静电排斥, 诱导蛋白构象转变促有序交联[42]
	$\text{Ca}^{2+}$	静电屏蔽和盐桥作用促蛋白解折叠, 暴露疏水基团并促进分子再聚集, 精准优化凝胶特性[43]
	$\text{Mg}^{2+}$	促进蛋白分子有序聚集与交联, 优化凝胶持水性与质构稳定性[43]
	$\text{Sr}^{2+}$	微量即可改善凝胶空间结构, 提升凝胶整体特性与稳定性[33]

## 4. 工业化应用现状与挑战

### 4.1. 工业化应用现状

目前,天然外源性分子调控 MP 热诱导凝胶特性的研究已形成多元体系并取得阶段性成果,多糖类、蛋白类、多酚类及纳米级、农业副产物提取物等新型添加物均展现出显著调控价值,其中 $\kappa$ -卡拉胶、血浆蛋白、豌豆蛋白等已在香肠、肉丸等肉制品中实现初步应用,可有效改善热诱导凝胶保水性、质构及稳定性,植物源蛋白作为脂肪替代物,在低脂肉制品中的应用逐步扩大,尤其在欧美市场的清洁标签产品中占比提升[44]。多酚类添加物(如茶多酚、桑葚多酚)因“天然抗氧化”标签优势,在高端冷冻肉制品

中应用增加,但受限于苦涩味等风味影响,添加量仍较低。

#### 4.1.1. 核心问题

虽然目前在调控 MP 热诱导凝胶方面已展开广泛的研究,但仍存在一些问题尚待深入探讨。分子层面的调控机制解析不充分,对 MP 与外源性分子的动态互作及热诱导凝胶形成过程中蛋白结构演化追踪不足,且化学作用力研究侧重二硫键,对氢键、疏水相互作用等关注较少[45];现有研究多聚焦 MP 单一体系,对实际生产中多组分共混体系的协同与拮抗效应探讨不足,且研究对象局限于常见多酚与畜类 MP,特殊环境下的共价相互作用机制尚未明确。同时在工业化生产中,复合体系调控精度较难把控,原料特性的波动会影响 MP 活性,导致外源性分子的调控效果不稳定,现有技术难以实现动态适配。

#### 4.1.2. 应对策略

未来研究应重点针对极端加工条件,深入挖掘其与不同外源性分子组合的协同调控效应,靶向介入并优化 MP 热诱导凝胶的核心特性。同时系统探索多组分外源性分子复配体系,结合电磁场辅助、超高压处理等新型物理场技术,构建“物理场 + 外源功能分子”的协同调控模式,明确多外源分子耦合不同凝胶诱导条件对 MP 凝胶的交互作用机制,弥补单一调控手段的效果局限。

## 5. 结语

MP 热诱导凝胶特性是凝胶类肉制品质构与保水性的核心决定因素,天然 MP 热诱导凝胶存在的网络不均、持水性不足等问题,可通过外源性分子定向优化。多糖类、蛋白类、多酚类添加物虽调控路径各异,但核心均围绕诱导蛋白构象转变、调控分子作用力、填充热诱导凝胶孔隙展开,分别以保水填充、交联营养、抗氧化交联及低量多功能为优势,适配不同加工需求。当前研究虽已明确各类添加物的基础调控效果,但部分分子互作机制尚未厘清,复杂多组分体系适配性及极端加工条件下的调控规律仍需探索,新型添加物工业化面临成本与安全性评估挑战。未来需聚焦多组分协同机制、智能化调控模型构建、天然绿色调控剂挖掘及功能化制品开发,推动理论研究向工业化应用转化,为高品质健康肉制品生产提供支撑。

## 基金项目

河北省现代农业产业体系肉禽创新团队肉品加工及品质评价(HBCT2024270206);河北省高等教育教学改革研究与实践项目(2023GJJG115, 2023GJJG095),河北农业大学线上线下混合式一流课程建设项目(2024~2026);河北农业大学第十二批教改项目(202359)。

## 参考文献

- [1] 张蕾,孙海磊,毛衍伟,等.影响肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的机制研究进展[J].食品科学,2025,46(18):393-404.
- [2] 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.
- [3] 张紫媛,王琳,田佳奇,等.天然提取物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J].中国食品学报,2025,25(6):413-424.
- [4] 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/OL].食品科学,1-17. <https://www.spkx.net.cn/CN/Y2026/V47/I4/377>,2026-01-27.
- [5] 薛山,罗娟.多糖添加对兔肌原纤维蛋白 Pickering 乳液稳定性及凝胶特性的影响[J].食品工业科技,2023,44(13):21-29.
- [6] 张洁,吴香,张万刚,等.血浆蛋白对调理猪排品质特性的影响[J].食品工业科技,2020,41(17):24-31.
- [7] 郑红梅,王少英,史新娥.植物多酚的抗氧化作用及其改善肉质的机制[J].动物营养学报,2020,32(5):2037-

- 2045.
- [8] Absalimova, M., Lee, J., Xiong, Y.L., Song, H., Kim, S., Jo, Y., *et al.* (2025) Impact of Solid-To-Liquid Lipid Ratio on the Gelation and Emulsion Properties of Lamb Myofibrillar Protein Gels. *Food Research International*, **208**, Article 116261. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2025.116261>
- [9] Huang, C.Y., Hou, C.L., Ijaz, M., *et al.* (2020) Proteomics Discovery of Protein Biomarkers Linked to Meat Quality Traits in Post-Mortem Muscles: Current Trends and Future Prospects: A Review. *Trends in Food Science & Technology*, **105**, 416-432. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.030>
- [10] 李越佳, 王琛, 李潇, 等. 不同加热条件对梅花鹿腿肉品质及其肌原纤维蛋白特性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-12. <https://link.cnki.net/doi/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.043166>, 2026-03-20.
- [11] 徐幸莲, 周光宏, 黄鸿兵, 等. 蛋白质浓度、pH 值、离子强度对兔骨骼肌肌球蛋白热凝胶特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2004(3): 159-163.
- [12] Wang, Y.Y., Rashid, M.T., Yan, J.K., *et al.* (2021) Effect of Multi-Frequency Ultrasound Thawing on the Structure and Rheological Properties of Myofibrillar Proteins from Small Yellow Croaker. *Ultrasonics Sonochemistry*, **70**, Article 105352. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105352>
- [13] Li, K., Fu, L., Zhao, Y., Xue, S., Wang, P., Xu, X., *et al.* (2020) Use of High-Intensity Ultrasound to Improve Emulsifying Properties of Chicken Myofibrillar Protein and Enhance the Rheological Properties and Stability of the Emulsion. *Food Hydrocolloids*, **98**, Article 105275. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105275>
- [14] 张炎云. 猪肉肌原纤维蛋白可逆凝胶机制及应用初探[D]: [硕士学位论文]. 无锡: 江南大学, 2025.
- [15] 计红芳, 李莎莎, 张令文, 等. 豌豆蛋白的添加对猪肉盐溶蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2019, 40(14): 31-36+41.
- [16] 牛付阁, 蔡枫桦, 温娅, 等. 蛋清蛋白对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白热稳定性及热聚集的影响[J]. 中国食品学报, 2025, 25(10): 25-36.
- [17] 李嘉琦, 潘德胤, 马金明, 等. 不同浓度丁香酚对肌原纤维蛋白结构和乳液凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(1): 144-151.
- [18] 周凤超, 陈伟娇, 辜银环, 等. 多糖替代动物脂肪与肌原纤维蛋白相互作用的研究现状[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(14): 283-288.
- [19] Chen, Z., Luo, C., Wang, K., Chen, Y. and Zhuang, X. (2023) Insight into the Mechanism of Porcine Myofibrillar Protein Gel Properties Modulated by  $\kappa$ -Carrageenan. *Foods*, **12**, Article 1444. <https://doi.org/10.3390/foods12071444>
- [20] 夏南, 徐丹鹤, 付文军, 等. 魔芋葡甘聚糖对南湾鲷鱼丸凝胶特性和贮藏品质的影响[J]. 保鲜与加工, 2025, 25(8): 19-24.
- [21] 郭冬雪, 唐月利, 贾娜, 等. 亚麻籽胶对肌原纤维蛋白乳液界面特性及稳定性的影响[J]. 肉类研究, 2026, 40(3): 1-8.
- [22] 曹涓泉, 李心悦, 徐静, 等. 圆苞车前子壳粉对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶特性和蛋白结构的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 100-107.
- [23] 扶庆权, 吴迪, 杨金堂, 等. 柑橘纤维对低盐条件下鸡肉肌原纤维蛋白乳液稳定性的影响[J]. 食品工业科技, 2026, 47(2): 77-83.
- [24] 庄昕波, 陈银基, 周光宏. 改性甘蔗膳食纤维对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 中国农业科学, 2021, 54(15): 3320-3330.
- [25] 卢亚东, 张成楠, 李秀婷, 等. 不同干燥方式燕麦蛋白的性质及对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(6): 53-63.
- [26] Li, J.G., Chen, Y.H., Dong, X.P., *et al.* (2021) Effect of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) Protein Isolate on the Heat-induced Gelation Properties of Pork Myofibrillar Protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **101**, 2108-2116. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10833>
- [27] 韩雪, 姚力丹, 崔冰冰, 等. 糖基化鹰嘴豆分离蛋白对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J/OL]. 现代食品科技, 1-10. <https://link.cnki.net/doi/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.9.0857>, 2026-01-30.
- [28] 蒙志明, 刘莹, 席越阳, 等. 藜麦蛋白对低钠盐体系中猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2023, 37(5): 31-38.
- [29] 崔悦, 杨棚辉, 李晓丹, 等. 藜麦蛋白 Pickering 乳液替代脂肪对牛肉丸冻融稳定性的影响[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(13): 48-54.
- [30] 候雨雪, 李登龙, 林伟玲, 等. 氧化胁迫下桑椹多酚及其微胶囊对肌原纤维蛋白结构及凝胶性能的调控[J]. 现代

食品科技, 2022, 38(4): 147-154.

- [31] Guo, X., Wei, Y., Liu, P., Deng, X., Zhu, X., Wang, Z., *et al.* (2024) Study of Four Polyphenol-*Coregonus peled* (*C. peled*) Myofibrillar Protein Interactions on Protein Structure and Gel Properties. *Food Chemistry: X*, **21**, Article 101063. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2023.101063>
- [32] Choi, J.S. and Chin, K.B. (2024) Influence of NaCl and Phosphate on Gelation Properties of Chicken Breast Myofibrillar Protein Gels and Its Application to *in Vitro* Digestion Model. *Food Chemistry*, **460**, Article 140638. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.140638>
- [33] Zhao, B., Zhang, Y., Sun, B., Wang, S., Zang, M., Wang, H., *et al.* (2023) Insights into the Trace Sr<sup>2+</sup> Impact on the Gel Properties and Spatial Structure of Mutton Myofibrillar Proteins. *Food Research International*, **164**, Article 112298. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112298>
- [34] Yang, B.R., Liu, J., Lan, M., *et al.* (2025) Unravelling the Enhancement of Myofibrillar Protein Gel Properties Induced by Marine Phospholipids: A Structure, Water State and Intermolecular Interactions Study. *LWT*, **223**, Article 117681.
- [35] 高惟衍, 权楚尧, 邱继尧, 等. 不同带电多糖对大豆分离蛋白凝胶特性的影响研究[J]. 食品科技, 2025, 50(12): 115-122.
- [36] 李子妍, 陈泽凡, 汤佳佳, 等. 热压鲟鱼软骨明胶对冻藏虾糜品质的改善及肌原纤维蛋白的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(19): 336-346.
- [37] 蒋桂丽, 陈俊韬, 陈佳柔, 等. 大豆分离蛋白对金线鱼鱼糜凝胶品质的影响[J/OL]. 现代食品科技, 1-9. <https://link.cnki.net/doi/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.7.0436>, 2026-02-11.
- [38] 贾娜, 金伯阳, 刘丹, 等. 儿茶素对肌原纤维蛋白氧化、结构及凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(4): 13-19.
- [39] 贾娜, 孙嘉, 刘丹, 等. 槲皮素对氧化条件下猪肉肌原纤维蛋白结构及凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(10): 45-51.
- [40] 张典. 没食子酸和绿原酸对磷酸化鸡胸肉肌原纤维蛋白性质的作用研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商业大学, 2019.
- [41] 杨波若. 大黄鱼鱼卵磷脂对猪肉糜凝胶品质的影响及其机制研究[D]: [博士学位论文]. 福州: 福建农林大学, 2025.
- [42] Li, R., Li, X.Q., Wang, C., Zhang, G.M., *et al.* (2024) The Improved Gel Properties of Myofibrillar Protein under Low Salt Condition by Ultrasound-Assisted Sodium Tripolyphosphate. *Meat Science*, **220**, Article 109712. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2024.109712>
- [43] Zhao, S.M., Liu, Y., Yang, L., *et al.* (2024) Low-Frequency Alternating Magnetic Field and CaCl<sub>2</sub> Influence the Physicochemical, Conformational and Gel Characteristics of Low-Salt Myofibrillar Protein. *Food Chemistry: X*, **22**, Article 101341.
- [44] 赵宏蕾, 常婧瑶, 刘美月, 等. 基于清洁标签理念的新型加工技术在低磷肉制品中应用的研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(1): 83-91.
- [45] 陈李, 周存六. 化学干预调控肉及肉制品嫩度的研究进展[J]. 肉类研究, 2021, 35(3): 53-59.