

# 蛋白添加剂增强肉制品凝胶性研究进展

李志杰<sup>1</sup>, 闫睿思<sup>1</sup>, 汪秀娟<sup>2</sup>, 胡中海<sup>3</sup>, 蔡天赐<sup>4</sup>, 甄宗圆<sup>1,\*</sup>

(1.安徽科技学院食品工程学院, 安徽 滁州 233100; 2.霍邱县动物卫生监督所, 安徽 六安 237400;  
3.六安龙翔美食王禽业有限公司, 安徽 六安 237400; 4.安徽杨府锦调味食品股份有限公司, 安徽 淮北 235000)

**摘要:** 凝胶性作为肉类食品的重要特性之一, 是影响肉制品外观、风味、质构的重要因素, 增强肉制品的凝胶性对于改善肉制品的工艺和品质具有重要意义。肉制品加工中蛋白质形成聚集体的含量、结构、聚集速率等都会影响肉制品的凝胶性, 而蛋白质添加剂可在一定程度上替代肌原纤维蛋白的凝胶和乳化作用, 优化产品的感官和营养特性, 并降低成本, 成为肉制品研发和工艺优化的研究热点。本文对肌原纤维蛋白凝胶形成机理的研究进行汇总, 并综述目前主要蛋白添加剂的性质和应用, 以及蛋白添加剂与多糖胶体、酶制剂、磷酸盐进行复配增强肉制品凝胶性的研究进展, 为凝胶肉制品的提质增效提供参考。

**关键词:** 肉制品; 凝胶性; 蛋白添加剂; 复配; 凝胶机理

## Research Progress on Protein Additives for Enhancing Gel Properties of Meat Products

LI Zhijie<sup>1</sup>, YAN Ruisi<sup>1</sup>, WANG Xiujuan<sup>2</sup>, HU Zhonghai<sup>3</sup>, CAI Tianci<sup>4</sup>, ZHEN Zongyuan<sup>1,\*</sup>

(1. College of Food Engineering, Anhui Science and Technology University, Chuzhou 233100, China; 2. Huoqiu County Animal Health Supervision Institute, Lu'an 237400, China; 3. Lu'an Longxiang Gourmet Poultry Co. Ltd., Lu'an 237400, China; 4. Anhui Yangfu Jin Seasoning Food Co. Ltd., Huaibei 235000, China)

**Abstract:** Gelation, an important quality attribute of meat products, significantly influences the appearance, flavor, and texture of meat products. Enhancing gelation in meat products holds immense importance in improving the production process and the quality. The gel properties of meat products are influenced by the content and structure of protein aggregates and the aggregation rate during processing. Protein additives have the potential to partially replace myofibrillar proteins in gelation and emulsification properties, leading to cost reduction, and therefore have attracted much research interest for the development of new meat products and the optimization of the processing technology. This paper summarizes recent studies on the gelation mechanism of myofibrillar proteins, and reviews the properties and applications of the major protein additives as well as recent progress in using protein additives combined with polysaccharide colloids, enzymes or phosphates to enhance the gelation of meat products. This review may serve as a valuable reference for enhancing the quality of gel-type meat products.

**Keywords:** meat products; gel properties; protein additives; combination; gelation mechanism

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230729-327

中图分类号: TS251.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2024) 07-0348-10

引文格式:

李志杰, 闫睿思, 汪秀娟, 等. 蛋白添加剂增强肉制品凝胶性研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(7): 348-357. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230729-327. <https://www.spkx.net.cn>

LI Zhijie, YAN Ruisi, WANG Xiujuan, et al. Research progress on protein additives for enhancing gel properties of meat products[J]. Food Science, 2024, 45(7): 348-357. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230729-327. <https://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2023-07-29

基金项目: 安徽省高等学校科学研究项目(2022AH051637); 安徽科技学院横向项目(880502; 880759);

大学生创新创业训练计划项目(S202110879132); 安徽科技学院引进人才项目SPYJ202101(200182)

第一作者简介: 李志杰(2000—)(ORCID: 0009-0005-0262-7426), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品科学。

E-mail: yjs2022278@ahstu.edu.cn

\*通信作者简介: 甄宗圆(1978—)(ORCID: 0000-0002-7443-5598), 男, 副教授, 博士, 研究方向为畜产品贮藏与加工。

E-mail: zongyuanzhen@163.com

凝胶是介于固、液相之间的中间相,是一种非稳定流体的稀释体系,其本质是胶体颗粒或者高聚物分子相互连接形成的具有空间网络结构的体系,它是食品蛋白质形成独特的质构、感官及风味的重要功能性性质之一<sup>[1]</sup>。在肉类食品中,肌原纤维蛋白是影响肉制品凝胶性的主要原因。肉制品形成特殊的口感和风味是由于在加工过程中蛋白质会发生变性、折叠及形成三维网络结构<sup>[2]</sup>。生产中通常使用外源添加剂改善肉制品的凝胶特性,如蛋白质、淀粉、胶体和盐类。其中,在肉类食品中常用的蛋白类添加剂有大豆分离蛋白、乳清蛋白及多种动物血浆蛋白等。近年来,随着添加剂在增强肉制品凝胶性方面研究的不断深入,更高效、安全、健康的复配添加剂逐渐成为了研究热点。本文对肌原纤维蛋白凝胶形成机理进行汇总,详细介绍大豆分离蛋白、花生蛋白、小麦蛋白、乳清蛋白、蛋清蛋白、血浆蛋白等蛋白添加剂的性质以及目前在肉制品中的应用,并且综述蛋白类添加剂与多糖胶体、酶制剂、磷酸盐等复配方面的研究。蛋白添加剂及其复配添加剂在起到凝胶增强和保水作用的同时,又具备一定营养价值、安全性较高且便于控制成本,在肉制品工业中起到举足轻重的作用。

## 1 肌肉凝胶形成机理

蛋白质凝胶的形成可以定义为蛋白质分子的聚集现象。Ferry<sup>[3]</sup>认为凝胶的形成顺序为:天然蛋白质-变性蛋白质(长链)-蛋白质聚集体(连接的网路),这也是比较经典的解释凝胶形成的理论。在肉制品加工过程中,经过斩拌工艺的剪切作用,肌原纤维的结构被破坏,增加了蛋白质与细胞外液和添加水的接触。在适合的离子浓度或其他条件下,肌球蛋白、肌动蛋白、肌球蛋白等盐溶性蛋白溶出并发生交联,形成网络结构,固定水分、脂肪于网络中。热处理是肉制品中形成蛋白质凝胶立体网络结构必不可少的条件,主要原因是热处理后分子暴露的功能基团间形成了稳定的非共价键<sup>[3-4]</sup>。温度升高造成肌原纤维蛋白内部疏水基团的暴露,有利于二硫键的形成或交换,大量疏水基团和二硫键的存在能够加强分子间的网络结构,形成热不可逆凝胶。在加热过程中,温度达到35℃左右,肌球蛋白分子重链(头部)发生解聚,产生头-头聚集或尾-尾聚集(肌球蛋白微氧化)<sup>[5]</sup>;随着温度升高到40℃左右,轻链(尾部)发生解链形成球状聚集体;在50~65℃,聚集体通过尾部交联或头部连接进一步交联形成凝胶微粒;当温度达到65~80℃,形成最终的凝胶结构。只有当蛋白质分子的聚集速率低于其展开速率时,凝胶才会形成有序的网络结构<sup>[6]</sup>。疏水相互作用和二硫键是蛋白质发生凝聚的主要分子间作用力,而静电相互作用不参与头部凝

聚作用,其主要是参与肌球蛋白分子尾部缠绕作用<sup>[7]</sup>。图1为热诱导凝胶形成过程示意图。

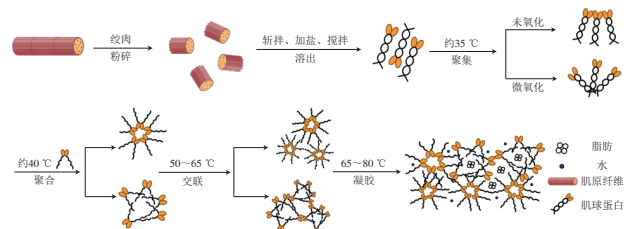


图1 肌原纤维蛋白热诱导凝胶形成过程

Fig. 1 Flow chart of heat-induced gelation of myofibrillar proteins

肉制品形成弹性凝胶体的主要成分是肌原纤维蛋白,它具有热诱导凝胶的功能性质,其凝胶特性如硬度、保水性、黏着性等与肉制品的质地密切相关<sup>[8]</sup>。在一定的温度下,一方面凝胶形成的速率会随着盐浓度、蛋白质含量、聚集体大小的增加而增加,凝胶的强度随着蛋白质含量增加而呈指数递增,但是不依赖于盐浓度和聚集体的大小<sup>[9]</sup>,所以增强凝胶强度可以通过增加肌球蛋白等有关蛋白质的含量实现。另一方面,通过加酶加盐等方式促进肌原纤维蛋白三维结构的展开,以及疏水基团的暴露和氢键的形成,也可以增加凝胶效果<sup>[10]</sup>,如高温处理能加快凝胶的形成就是通过促进二硫键的形成或交换,使分子间的网络结构得到加强<sup>[11]</sup>。

## 2 蛋白添加剂在肉制品凝胶性中的应用

目前,增强凝胶性的蛋白添加剂有大豆分离蛋白、花生蛋白、小麦蛋白、乳清蛋白、蛋清蛋白以及多种动物的血浆蛋白等非肌肉蛋白<sup>[12]</sup>。这些蛋白添加剂都可以有效地提高肉制品的凝胶强度,但机理有所不同。一般认为蛋清蛋白、乳清蛋白、大豆蛋白等对肉制品凝胶的改良作用主要是通过其自身的凝胶作用实现。动物血浆蛋白对凝胶的改良作用则主要是因为血浆蛋白中含有多种酶蛋白抑制剂和谷氨酰胺转氨酶(transglutaminase, TGase)<sup>[12]</sup>。

### 2.1 大豆分离蛋白

大豆分离蛋白是一种植物蛋白,具有胆固醇含量低、营养价值高以及生产成本低等优势。大豆分离蛋白的蛋白质量分数在90%以上,其中7S和11S球蛋白是主要组分,对大豆分离蛋白的加工特性起主导作用<sup>[13-14]</sup>。7S和11S球蛋白都具有形成凝胶的能力,但在形成过程中11S球蛋白形成较多的二硫键,所以其形成凝胶的能力更强,更具有韧性<sup>[15-16]</sup>。蛋白质含量是凝胶能否形成的关键因素,蛋白质量分数在8%以上才能形成硬质凝胶,而低于8%时仅加热不能形成凝胶,但是通过改变离子强度、pH值、改性等手段可以使大豆分离蛋白形成凝

胶的浓度发生改变<sup>[17]</sup>。此外,在大豆分离蛋白中加入不同类型和含量的脂质,添加的脂质作为蛋白凝胶的填充颗粒,会与蛋白质聚集体发生相互作用,促进蛋白质凝集<sup>[17]</sup>。大豆分离蛋白热致凝胶形成过程分为3步:第1步,大豆分离蛋白变性去折叠;第2步,变性的大豆分离蛋白聚集;第3步,大豆分离蛋白聚集体交联形成网状结构<sup>[18]</sup>。在热诱导中,二硫键是维持大豆分离蛋白凝胶网络结构的主要作用力<sup>[19]</sup>。适量大豆分离蛋白能提高凝胶强度和保水性,维持产品风味,改善肉制品保水保湿性<sup>[20-21]</sup>,如在木质化鸡肉中添加适量大豆分离蛋白可以改变其蛋白结构,有效改善凝胶的质构和保水性<sup>[22]</sup>。但大量添加易引起产品质构变软,产生不良风味。过量的大豆分离蛋白会黏附在肌球蛋白凝胶网络上,形成厚的丝和孔,阻碍肌球蛋白的交联<sup>[23]</sup>。pH值会影响氨基酸侧链电荷的数量及分布情况,改变蛋白质的分子结构及蛋白质间的疏水相互作用,进而改变蛋白质功能特性,所以pH值对大豆分离蛋白凝胶网络结构的形成具有较大的影响<sup>[24]</sup>。在研究pH值对11S球蛋白凝胶的影响时发现,pH 3以下以及pH 4.4~6.4时均无法形成凝胶,且酸性和碱性条件下形成的凝胶外观和内部结构均有差异<sup>[25]</sup>。

大豆分离蛋白在自由状态下分子间的相互作用比较弱,因此纯大豆分离蛋白一般不能直接使用,需要采用一定的改性手段或方法满足需求<sup>[26]</sup>。在加工过程中可以先对大豆分离蛋白进行处理,目前对于大豆分离蛋白预处理方面的研究主要在超声波处理、机械剪切、热处理、化学处理等方面。研究发现,超声波具有产生空穴效应、机械剪切作用及热作用的特性,能够破坏大豆分离蛋白分子中维持高级结构的次级键,使肽链变得疏松,提高蛋白质-水相互作用<sup>[27]</sup>。有学者研究超声结合大豆分离蛋白处理对鱼糜凝胶特性的影响,发现鱼糜的硬度、凝胶强度和保水性显著提高,并且超声处理后的鱼糜凝胶孔洞更小,网络结构更加致密、稳定<sup>[28-29]</sup>。化学处理主要采用聚乙二醇对大豆分离蛋白进行改性,能极大提高自身的凝胶性<sup>[26]</sup>。此外,为提高大豆分离蛋白的凝胶特性,可以将其与胶体<sup>[30]</sup>、TGase<sup>[31]</sup>、淀粉<sup>[32]</sup>等进行复配。随着大豆分离蛋白研究的深入,其用途不再局限于肉制品方面的应用,在果蔬保鲜、鸡蛋涂膜保鲜及抗油脂氧化等方面都具有较好的应用前景<sup>[33-34]</sup>。

## 2.2 花生蛋白

花生是四大油料作物之一,其蛋白质含量仅次于大豆,为22%~30%,包括2种主要成分:花生球蛋白和伴花生球蛋白<sup>[14,35-37]</sup>。花生蛋白的功能特性类似于大豆蛋白,具有出色的保水性、乳化性和凝胶性等特性<sup>[38]</sup>,这些特性既受蛋白质本身性质(如分子结构、分子质量)的影响,也与环境因素相关,如蛋白质热处理、pH值、离子强度、加热时间、超高压、超声处理等。

研究表明,随着花生蛋白的添加,蛋白分子间的作用增强,形成均匀、紧密的网络结构。当花生蛋白添加量为2.5%或3.0%时,蛋白凝胶效果最好<sup>[39]</sup>。pH值为3时,花生蛋白凝胶具有最大的凝胶硬度、持水性和储能模量,疏水作用在凝胶形成过程中发挥主要作用<sup>[40]</sup>。然而,若花生蛋白添加量过多,凝胶效果反而会受到影响,这种现象可能是由于盐溶蛋白凝胶中较多的水抵消因花生蛋白添加所带来的凝胶效应增强<sup>[41]</sup>。常规花生蛋白制品的功能性质无法满足食品加工的需求,因此,对花生蛋白的深度开发离不开花生蛋白改性研究。目前研究较多的改性技术包括酶<sup>[42]</sup>、超高压<sup>[43]</sup>、超声<sup>[44]</sup>等。碱性蛋白酶水解可以提高花生球蛋白的热稳定性,并且在酶解的过程中,巯基减少,二硫键迅速增加,从而极大提高了花生分离蛋白的溶解度和凝胶性能<sup>[45]</sup>。超高压处理主要对蛋白质三、四级结构产生影响<sup>[46]</sup>,40 MPa压力条件下,均质处理对花生蛋白的水溶性产生显著影响,导致蛋白质的水溶性、发泡性和持水性均显著增强<sup>[47]</sup>。花生蛋白经超声处理得到的偶联物中 $\alpha$ -螺旋偏少、 $\beta$ -折叠偏多,由于三级结构整体较为松散,因此其表面疏水性较高<sup>[44,48]</sup>。改性后的花生蛋白比直接添加具有更好的效果,可以显著改善猪肉肌原纤维凝胶体系的凝胶强度、保水性能和流变特性<sup>[49]</sup>。

## 2.3 小麦蛋白

小麦蛋白主要组成是醇溶蛋白和麦谷蛋白,其总质量分数约为小麦蛋白的80%。醇溶蛋白结构紧密,主要靠氢键、疏水键、分子内二硫键相互作用形成球形三维结构,延展性大但缺乏弹性<sup>[50]</sup>;麦谷蛋白之间通过链间二硫键形成聚合物,是影响弹性的决定性因素<sup>[51]</sup>,二者共同作用时,赋予小麦蛋白和其他植物蛋白相比独特的黏弹性。小麦蛋白具有与其他蛋白不同的独特黏弹性和延展性,正是这2种特性的存在才使小麦蛋白在凝胶类食品加工中发挥作用<sup>[52]</sup>。然而,小麦蛋白具有高度疏水性,在溶液体系中容易发生黏性聚集,限制了其在乳液凝胶体系中的应用<sup>[53]</sup>。小麦蛋白含有较多巯基,加热会使巯基与二硫键相互转化,从而使二硫键含量增加、作用增强,形成网状结构<sup>[54]</sup>。研究添加小麦蛋白的猪肉熏香肠发现,添加6%小麦蛋白的产品胶着性显著高于其他处理组,并且小麦蛋白的添加对产品的黄度值和红度值影响较大<sup>[55]</sup>。

## 2.4 乳清蛋白

乳清蛋白是牛乳清蛋白中一种营养价值较高的优质蛋白,其必需氨基酸种类齐全、含量较高且比例适当。乳清蛋白具有凝胶性、乳化性、发泡性、配体结合和多糖复合等多种性质,在改善食品的加工条件、质构、风味等方面具有重要作用<sup>[56]</sup>。

乳清蛋白增强肉制品的凝胶性主要是通过其自身的凝胶性实现。乳清蛋白的凝胶特性主要由蛋白质的电荷



密度及疏水平衡决定。研究表明, pH 4.6~5.8时, 乳清蛋白最容易形成凝胶。乳清蛋白中主要的蛋白为 $\beta$ -乳球蛋白, 其结构和分子质量决定了乳清蛋白的功能特性。适当的物理或化学方法改进可以进一步提高和改善其功能特性, 扩大其应用范围, 但化学方法涉及化学试剂, 潜在毒性不适合应用于食品工业中, 影响其在食品中的安全性。

## 2.5 蛋清蛋白

蛋清蛋白主要存在于蛋清液中, 在生活中主要以蛋清粉的形式存在, 具有多种功能性质(如凝胶性、起泡性、乳化性等), 其中凝胶性广泛应用于肉制品中<sup>[57]</sup>。禽蛋蛋清固形物中90%以上为蛋白质, 丰富的蛋白质组成为其凝胶的形成提供了物质基础<sup>[58]</sup>。由于蛋清蛋白良好的凝胶性能, 其对相关食品的质构、形态、持水力、稠度和黏结性等方面都会产生影响<sup>[59-61]</sup>。

蛋清蛋白和大豆分离蛋白、乳清蛋白增强肉制品凝胶性的机理类似, 都是通过改变自身凝胶性间接实现。蛋清蛋白受到物理或化学因素的作用会发生变性, 分子聚集到一定程度后就会形成凝胶网络。超声预处理会使蛋白质分子发生聚集, 超声辅助喷雾干燥蛋清蛋白的二级结构中 $\alpha$ -螺旋与 $\beta$ -折叠均有所增加, 表现出更好的凝胶性<sup>[62]</sup>。目前, 对于蛋清蛋白国内外的研究比较少, 大多数研究侧重于对蛋清蛋白进行改性, 以提高肉制品的凝胶性能<sup>[63]</sup>。目前常用的方法是强碱处理, 在碱性条件下, 随着溶液pH值的升高, 蛋白分子变性, 相互交联形成凝胶体, 蛋白分子浓度升高, 分子间的相互作用增加, 形成的凝胶质构更好、黏性更大、网络结构更有序<sup>[64-66]</sup>。然而, 近期有学者研究超声波与磷酸化处理二者结合对蛋清蛋白凝胶特性的影响发现, 超声波150 W、5 min, 三聚磷酸钠添加量0.8%、时间2 h、温度45 °C、pH 9时, 凝胶硬度提升最为显著, 并且在一定程度上提高了溶液的稳定性<sup>[67]</sup>。

## 2.6 血浆蛋白

血浆蛋白是一种经济廉价的营养蛋白资源, 能与肌肉共同作用形成优质凝胶, 从而显著改善肉制品的品质<sup>[68]</sup>。近年来, 关于血浆蛋白加工特性的研究备受关注, 如改善肉制品的质构<sup>[69]</sup>。欧美许多国家在乳化香肠、猪肉糜中添加血浆蛋白, 在冷却和加热, 甚至杀菌时的高温处理过程中, 产品凝胶结构比不添加血浆蛋白更加稳定<sup>[70]</sup>。

哺乳动物血浆可以提高蛋白的凝胶特性主要是由于其含有蛋白酶抑制剂和TGase。蛋白酶抑制剂, 如半胱氨酸蛋白酶抑制剂、肌球蛋白重链降解酶抑制剂, 可以抑制蛋白酶的活性, 避免其降解蛋白质<sup>[71]</sup>, 从而增加蛋白含量, 增强凝胶性。TGase是一种硫醇酶, 能够促进蛋白质分子间交联以及蛋白质和氨基酸之间的交联。热诱导对于血浆蛋白增强肉制品凝胶性尤为重要, 有研究证明, 血浆蛋白可以显著提高肌原纤维蛋白的凝胶强度, 在加热的过程中形成热诱导凝胶, 促进蛋白形成更加致

密的三维网络结构, 这种质构改善在保持水分和改善风味方面有较好的效果<sup>[72]</sup>。高温处理的鱼糜制品随着羊血浆蛋白的添加, 体系中氢键和非二硫共价键的含量以及凝胶品质均得到提高<sup>[73]</sup>。随着血浆蛋白浓度的增加, 形成的凝胶强度也随之增强<sup>[74]</sup>。牛血浆蛋白形成凝胶的最低质量分数为4.0%, 随着牛血浆蛋白质量分数的升高, 分子间接触的几率增大, 更易产生凝胶作用<sup>[75]</sup>。蛋白质的组成也对血浆蛋白的凝胶性具有重要影响。血浆是由多种蛋白质构成的混合物, 这些蛋白质包括血清白蛋白、多种球蛋白和纤维蛋白原等, 血清蛋白在凝胶剂的形成过程中起关键作用。除增强凝胶强度外, 将经美拉德反应修饰后的猪血浆蛋白水解物添加到生猪肉糜中能够抑制脂肪氧化、延长肉类的保质期, 从而起到抗氧化剂的效果, 同时提高产品的营养和安全性<sup>[76-77]</sup>。

主要蛋白添加剂性质比较见表1。

表1 主要蛋白添加剂加工特性对比

蛋白添加剂种类	加工特性	应用
大豆分离蛋白	含量和组成是能否形成凝胶的决定性因素, 蛋白质量分数8%以上才能形成硬凝胶; 在90 °C条件下, 酸性条件下形成凝胶的最适pH值为3.0, 碱性条件下形成凝胶的最适pH值为9.0	鸡胸肉 <sup>[22]</sup> 、虾肉 <sup>[70]</sup> 、猪肉 <sup>[13,79-81]</sup> 、鱼肉 <sup>[28-29,80]</sup>
花生蛋白	蛋白含量是影响凝胶形成的主要因素, 形成凝胶的蛋白质量分数控制在8%~24%; pH值为3时凝胶具有最大的硬度、持水性和储能量	猪肉 <sup>[80,82-83]</sup> 、鸡肉 <sup>[84-85]</sup> 、鱼肉 <sup>[86]</sup>
小麦蛋白	蛋白中的面筋分子多以二硫键交联, 热敏感性较差, 加热到80 °C时才会发生凝胶作用, 在120~130 °C形成极强的凝胶	猪肉 <sup>[55]</sup> 、鱼肉 <sup>[87]</sup> 、肉味香精 <sup>[88]</sup>
乳清蛋白	蛋白质量分数9%~12%时才会产生凝胶或沉淀; pH 4.6~5.8时蛋白最容易形成凝胶; 其凝胶性可以改变食品的硬度和弹性	猪肉 <sup>[89]</sup> 、鱼肉 <sup>[90-91]</sup>
蛋清蛋白	pH值、蔗糖、盐等对凝胶的形成有影响, pH 4.5~8.0会降低凝胶的持水性, 盐和蔗糖可以提高凝胶的硬度和弹性	猪肉 <sup>[92-94]</sup> 、鱼肉 <sup>[57,95-98]</sup>
血浆蛋白	猪血质量分数为80%~90%时, 凝胶弹性和触感较好; 当温度在85 °C以上时猪血蛋白形成的凝胶较稳定; 最适加热时间为15~20 min	猪肉 <sup>[96]</sup> 、鱼肉 <sup>[75,97]</sup>

## 3 复配蛋白添加剂增强肉制品凝胶性的研究

### 3.1 蛋白添加剂复配

复配添加剂与单体食品添加剂相比具有节约原料、改善品质、降低风险、促进新品研发等优势, 在食品工业中应用越来越广泛<sup>[33]</sup>。当单体蛋白添加剂效果没有达到理想效果时, 可以根据产品的特征选择合适的蛋白添加剂种类以及合理的添加量进行复配, 以提高产品的品质<sup>[80,86,98]</sup>。例如, 在研究大豆分离蛋白、乳清蛋白、蛋清蛋白对混合虾糜的影响时发现, 乳清蛋白对改善凝胶强度、弹性及流变学特性方面效果较好, 大豆分离蛋白在改善持水力、硬度方面效果较好, 而蛋清蛋白可以提高混合虾糜的蛋白质变性温度, 并且可以改善变性后的稳定性, 3种蛋白添加剂复配可以更好地提高产品的品质<sup>[98]</sup>。对卵白蛋白和大豆分离蛋白复配对香肠制品的影响进行研究, 结果表明, 与卵白蛋白组相比, 复配添加剂组的硬度和保水性均呈上升趋势, 而弹性显著下降; 与大豆分离蛋白组相比, 复配添加剂组的质构、保水性和蒸煮得率均显著上升; 而且复配效果与2种添加剂

的质量比有显著相关性,当卵白蛋白与大豆分离蛋白的质量比为1:1时,产品的弹性、保水性及感官品质明显优于其他组<sup>[94]</sup>。

有些蛋白添加剂复配时需要添加一些物质来达到最优效果,例如,乳清蛋白和小麦蛋白进行复配时,蛋白容易降解,CaCl<sub>2</sub>作为抗降解离子添加到复合凝胶中可以提供最佳的保护作用<sup>[99]</sup>。另外需要注意的是,由于不同蛋白添加剂形成凝胶的机理不同,所以不同蛋白添加剂复配时既会出现协同也会出现拮抗作用,因此可能会使凝胶形成更致密的网络结构,也有可能使网络结构更脆弱<sup>[100]</sup>。

不同蛋白添加剂复配机理及效果研究见表2。

表2 蛋白添加剂复配机理及效果对比

蛋白添加剂种类	研究对象	质量比	机理	效果
大豆分离蛋白+蛋清蛋白	蛋白凝胶	/	增加二硫键含量	改善硬度和持水性 <sup>[100-101]</sup>
大豆分离蛋白+小麦蛋白	蛋白凝胶	/	大豆分离蛋白减少凝胶中水分的损失,防止凝胶受热使蛋白质变性	增加凝胶保水性 <sup>[102]</sup>
大豆分离蛋白+豌豆分离蛋白	蛋白凝胶	3:1	二硫键含量高	凝胶微观结构致密、有序,持水率高,凝胶强度高 <sup>[103]</sup>
大豆分离蛋白+卵白蛋白	蛋白凝胶	/	二硫键增加, $\alpha$ -螺旋和 $\beta$ -折叠结构的比例最低	显著提高凝胶的硬度、弹性和保水性 <sup>[104]</sup>
大豆分离蛋白+大米分离蛋白	蛋白凝胶	/	蛋白质结合物占据肌原纤维蛋白的结合位点,削弱网络结构	凝胶产生更多的孔隙,结构更加粗糙 <sup>[54]</sup>
乳清蛋白+蛋清蛋白	蛋白凝胶	1:1	交联紧密的网络结构可以抵抗外部应力,并通过毛细效应捕获更多的水,从而提高凝胶强度和保水性	增强凝胶强度和保水性,凝胶网络孔径小,分布规则,凝胶结构致密均匀 <sup>[105]</sup>
小麦蛋白+绿豆蛋白	蛋白凝胶	/	增强二硫键作用力,蛋白 $\beta$ -折叠含量升高	凝胶网络结构致密 <sup>[106]</sup>
大豆分离蛋白+卵白蛋白	香肠	1:1	脂肪聚集最小	改善硬度,弹性稳定并达到最大值,可接受度最佳 <sup>[24]</sup>
大豆分离蛋白+蟋蟀蛋白	鱼糜	/	大豆分离蛋白促进疏水作用,蟋蟀蛋白促进二硫键的形成	形成更光滑、致密的凝胶网络结构 <sup>[107]</sup>

注:/文献未说明。下同。

### 3.2 辅助成分与蛋白添加剂复配

有些外源辅助成分与蛋白添加剂进行复配添加,可以提高黏聚力和弹性,间接提高肉制品的凝胶性。这些成分通常以产品单一添加剂形式与蛋白添加剂一起使用,或者以组分形式出现在复配蛋白添加剂产品中。目前,主要有胶体类、TGase、磷酸盐类等。

#### 3.2.1 蛋白添加剂与胶体复配

亲水胶体是一类由多糖或蛋白质组成的大分子物质,如卡拉胶、果胶、海藻酸钠等。亲水胶体经常作为增稠剂或水分稳定剂添加到肌原纤维蛋白中,从而减少凝胶网络中水分通道的出现,促进肌原纤维蛋白分子间的相互作用,从而形成更加紧密的凝胶网络结构<sup>[108]</sup>。鱼糜凝胶特性的主要指标为破断强度、凝胶强度、凹陷度(凝胶强度=破断强度×凹陷度)。添加卵清蛋白能提高鱼糜的破断强度和凝胶强度,凹陷度随花生蛋白的添加变化不明显;添加卡拉胶鱼糜的凝胶强度显著提高,高于添加卵清蛋白的最高凝胶强度,凹陷度没有明显变化;将花生蛋白与卡拉胶进行复配时,凹陷度略低于单独添加组,但凝胶强度仍高于单独添加卵清蛋白及卡拉

胶组<sup>[109]</sup>。卡拉胶的分子结构中含有强阴离子性硫酸酯基团,能与游离水形成额外的氢键,加热时表现出保水性和凝胶性,减少肉制品汁液的流失,保持良好的韧性和弹性。在灌肠制品中使用最多的是 $\kappa$ -卡拉胶<sup>[110]</sup>。果胶一般在酸性条件下用作凝胶剂和稳定剂,果胶分子上带电荷越多,相互排斥越严重,凝胶就越难形成<sup>[111]</sup>。海藻酸盐是一种天然的食品添加剂,海藻酸钠的主要作用是凝胶化,其次是增稠作用和成膜性,其形成的凝胶不可逆<sup>[112]</sup>。大多数植物源胶体类物质的主要成分为多糖,多糖和蛋白添加剂相互作用研究一直是食品领域的研究热点<sup>[113-114]</sup>。多糖能与蛋白质分子发生相互作用,从而影响食品的质构、色泽等特性。多糖与蛋白质分子复配会使凝胶结构更加稳定,蛋白质-多糖凝胶具有良好的稳定性和机械强度,在稳定和传递生物活性物质、营养强化剂方面的应用前景广阔<sup>[115]</sup>。蛋白添加剂与胶体复配的研究见表3。

表3 蛋白添加剂与胶体复配机理及效果对比

蛋白添加剂种类	胶体种类	质量比	机理	效果
大豆分离蛋白	卡拉胶	95:5	促进网络内分子疏水作用力及氢键的形成	增加盐溶性蛋白的凝胶强度和保水性 <sup>[100]</sup>
大豆分离蛋白	卡拉胶	/	在凝胶形成的过程中能吸收大量水分,将游离的水分子束缚进凝胶网络中	无较多较大的孔洞,网络结构致密均匀,网络细小,蛋白质间形成明显交联 <sup>[79,116-117]</sup>
大豆分离蛋白	纳豆胶	10:1	静电斥力增大了大豆分离蛋白分子间的距离,使分子间作用力减弱,使谷氨酸残基与蛋白质分子发生较大程度的交联	形成的球状空隙凝胶尺寸较小且均一;凝胶的持水性较强,具有较大的硬度,黏弹性模量达到最大 <sup>[9]</sup>
大豆分离蛋白	仙草胶	7:3	复合形成的凝胶产生协同增效的作用,当仙草胶含量增加时其碱性使疏水基团暴露,减弱了分子间作用力	凝胶强度、凝胶弹性和内聚性最大,凝胶色泽均匀 <sup>[118]</sup>
大豆分离蛋白	亚麻籽胶	100:1	较小的粒径增强蛋白质分子与添加组分间的相互作用,当亚麻胶添加量增加会使粒径变大,形成的聚集体会减少	蛋白质的化学稳定性显著增强,提高热稳定性、保水性,增强凝胶网络结构强度 <sup>[19,30]</sup>
大豆分离蛋白	黄原胶	/	黄原胶的加入导致蛋白质的相互作用和蛋白质聚集的改变	提高凝胶的热稳定性,缓解高温对凝胶网络结构的破坏 <sup>[121]</sup>
花生蛋白	果胶	5:2	果胶可以使聚集体的形态更加均匀、稳定	凝胶色泽均匀,质地较硬 <sup>[122]</sup>
花生蛋白	魔芋葡甘露聚糖	/	静电作用会导致氢键和共价键的形成以及蛋白质含量的增加,氢键与花生蛋白相互作用,填充孔隙	凝胶网络结构更致密,提高肉糜的黏度 <sup>[24]</sup>
乳清蛋白	卡拉胶	8:1	通过静电作用形成网络结构,卡拉胶会降低混合体系的表面张力	凝胶结构更加稳定 <sup>[123]</sup>
乳清蛋白	果胶	1:1	在乳清蛋白降解温度之上进行热定型,热定型处理可以提高复合物的热稳定性及减小粒径分布范围	增强凝胶强度和稳定性 <sup>[115]</sup>
乳清蛋白	海藻酸钠	5:1	蛋清蛋白热处理后会与海藻酸钠发生交联	凝胶的凝聚性、黏性较好 <sup>[62]</sup>
蛋清蛋白	魔芋胶	150:1	凝胶表面微观结构由疏松多孔转为平滑均匀,总巯基含量减少,分子间的相互作用增强	显著改善凝胶的强度、持水性、色泽及表面微观结构 <sup>[24]</sup>
蛋清蛋白	黄原胶	/	蛋白质分子间的网络结构被打断,抵抗力降低,降低凝胶强度	质量分数为0.2%的黄原胶能降低凝胶强度和硬度,提高保水性 <sup>[124]</sup>
蛋清蛋白	明胶	100:3	分子间相互作用增强,存在较多的氢键	显著提高凝胶硬度、持水性,增强凝胶强度 <sup>[125]</sup>
蛋清蛋白	结冷胶	/	pH 4时蛋白质分子间的静电斥力较低,使更多的蛋白质分子发生相互作用,有利于形成致密的网络结构	pH值为4时,凝胶硬度好,提高保水性,凝胶网络结构致密 <sup>[127]</sup>
小麦蛋白	海藻酸钠	/	蛋白质无规卷曲,相对含量明显降低	黏性提高63.5%,弹性降低29.2%,纤维状组织结构更加紧密 <sup>[112]</sup>



### 3.2.2 蛋白添加剂与酶制剂复配

酶制剂具有反应条件温和、针对性强等特点而广受关注。在肉制品加工过程中使用的酶制剂有TGase、葡萄糖氧化酶（glucose oxidase, GOD）等，目前主要使用的是TGase。

TGase广泛存在于人体、高级动物、植物和微生物中，能够催化蛋白质分子间或分子内的交联、蛋白质和氨基酸之间的连接以及蛋白质分子内谷氨酰胺残基的水解。TGase是常用的凝胶增强剂，能捕获更多的游离水，减少水分等物质流失，降低蒸煮过程中的损失，提高产品的弹性和紧实度。利用TGase在温和的条件下使大豆分离蛋白暴露出分子内的疏水基团，是大豆分离蛋白改性的手段之一。TGase交联大豆分离蛋白后，其结构特征发生变化，表面疏水基团暴露，表面疏水性提高35.9%，表面疏基含量降低24.8%，二硫键含量增加10.3%，游离氨基含量降低73.8%，表面疏水性和二硫键有利于提高凝胶强度<sup>[128]</sup>。并且TGase预交联对大豆分离蛋白乳状液的盐诱导凝胶行为有显著影响，可以促进产生 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰)赖氨酸键、二硫键等共价键与 $\epsilon$ -( $\gamma$ -谷氨酰)赖氨酸键交联，形成凝胶网络结构<sup>[129-130]</sup>。超声联合TGase也可以显著提高凝胶的强度和持水性能，超声处理促进蛋白质结构展开，暴露出更多的赖氨酸残基等基团，有利于TGase发生交联作用，形成更加致密、均匀的网络结构<sup>[131]</sup>。

GOD是一种相对安全的食品添加剂，目前在面制品中的应用较多，它可以催化葡萄糖和氧气反应生成葡萄糖内酯和过氧化氢，在鱼糜制品中过氧化氢会被残留的亚铁离子还原成羟自由基，氧化鱼糜蛋白<sup>[132]</sup>。有研究证明添加适量的GOD可以改善鱼糜制品的凝胶特性<sup>[133-134]</sup>，但与蛋白添加剂复配的研究还鲜有报道。酶制剂与蛋白添加剂复配的研究见表4。

表4 蛋白添加剂与TGase复配研究  
Table 4 Effects of mixtures of protein additives and TGase

蛋白添加剂种类	研究对象	效果
小麦蛋白	阿拉斯加鳕鱼糜	TGase促进了鱼肉蛋白间、鱼肉蛋白与小麦蛋白、面筋蛋白分子间的交联作用，优化了面筋的网络结构，形成更加致密的网络结构，改善口感并且提高黏弹性 <sup>[87,135]</sup>
血浆蛋白	猪血浆蛋白	显著提高猪血浆蛋白凝胶弹性，增加凝胶的硬度 <sup>[36]</sup>
大豆分离蛋白+玉米淀粉	黄姑鱼糜	提高鱼糜制品的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性，凝胶网络致密，无大的孔洞 <sup>[37]</sup>
大豆分离蛋白+木薯淀粉	鲢鱼糜	增加鱼糜的持水性，降低其蒸煮损失，且不会使鱼糜带有大豆分离蛋白的淡黄色，同时提高鱼糜的凝胶强度 <sup>[138]</sup>
蛋清蛋白+马铃薯淀粉	鲢鱼-鳕鱼复合鱼糜	显著提高鱼糜的咀嚼性、黏结性、破碎力与破碎距离，凝胶网状结构较为致密，凝胶孔隙较小 <sup>[139]</sup>
$\gamma$ -聚谷氨酸	鸡肉糜	凝胶硬度、弹性和保水性都达到最大值 <sup>[40]</sup>

### 3.2.3 蛋白添加剂与磷酸盐复配

复合磷酸盐呈碱性，会使pH值偏离蛋白质的等电点，电荷之间相互排斥，在蛋白质之间产生更大的空间，使肉组织可以包容更多的水分，从而提高凝胶的持水性；磷酸盐还可以螯合钙离子、镁离子等金属离子，

使肌原纤维结构趋于松散，可以溶入更多水分；磷酸盐也能解离肌动球蛋白，蛋白质分子结合水分提高持水能力。复合磷酸盐的最佳质量比在大部分肉制品（如猪肉火腿、牛肉、鱼糜）中为2:2:1（三聚磷酸钠:焦磷酸钠:六偏磷酸钠），但是不同产品的最佳使用量差别极大。蛋白添加剂与磷酸盐复配的研究见表5。

表5 蛋白添加剂与磷酸盐复配效果对比  
Table 5 Effects of mixtures of protein additives and phosphates

蛋白添加剂种类	复合磷酸盐质量比	效果
0.3%复合磷酸盐+7.0%蛋清蛋白+0.4% TGase	焦磷酸钠:三聚磷酸钠=1:1	海杂鱼糜的流变学特性、质构特性、水分分布、微观结构均显著改善 <sup>[141]</sup>
0.23%复合磷酸盐+6%大豆分离蛋白+0.10% TGase	/	草鱼肉乳化肠结构紧密，凝胶强度高，失水率低，弹性好 <sup>[142]</sup>
0.3%复合磷酸盐+3%大豆分离蛋白+0.6% TGase	/	鸭肉火腿黏聚力、弹性最强，感官品质佳 <sup>[143]</sup>
0.25%复合磷酸盐+0.75%大豆分离蛋白	偏磷酸钠:焦磷酸钠:三聚磷酸钠=1:1:1	草鱼肌原纤维蛋白凝胶嫩度大、持水性好、结构平整有序 <sup>[144]</sup>

## 4 结语

肉制品加工中蛋白质形成聚集体的含量、结构、聚集速率等都会在一定程度上影响肉制品的凝胶性，了解蛋白质聚集行为的机理及与蛋白质功能特性之间的联系，对于肉制品的发展具有重要的指导作用。本文在介绍蛋白质凝胶机理的基础上，综述常用的蛋白添加剂的性质和应用，以及蛋白添加剂与胶体、酶制剂、磷酸盐进行复配的研究进展。虽然蛋白添加剂在增加肉制品凝胶性方面的研究已经广泛开展，但也存在一些不足，主要体现在：1) 微观角度分析蛋白质的聚集及互作机理还需进一步深入；2) 蛋白添加剂种类繁多，目前的研究多针对于单一的蛋白添加剂，而复配蛋白添加剂对肉制品凝胶性的机理研究相对较少；3) 目前研究的多为大豆分离蛋白为主体的植物蛋白添加剂对其凝胶性的影响，动物蛋白添加剂研究较为匮乏。蛋白添加剂的研究未来可以向微观层面深入，使复配蛋白添加剂的机理进一步完善，并且加强对动物蛋白添加剂的挖掘，以提高血液等动物源食品加工副产物的综合利用率。蛋白添加剂的研究有助于推动肉制品加工行业的提质增效，推动社会的可持续高质量发展。

## 参考文献:

- [1] YANG X, LI A Q, LI D, et al. Applications of mixed polysaccharide-protein systems in fabricating multi-structures of binary food gels: a review[J]. Trends in Food Science and Technology, 2021, 109: 197-210. DOI:10.1016/j.tifs.2021.01.002.
- [2] 肖雄, 史可夫, 吴双双, 等. 线性与非线性多糖对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. 肉类研究, 2015, 29(1): 1-5. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201501001.
- [3] FERRY J D. Protein gels II supported in part by the research committee of the graduate school of the university of wisconsin from

- funds supplied by the wisconsin alumni research foundation[M]// ANSON M L, EDSALL J T. *Advances in protein chemistry*. Salt Lake City: Academic Press, 1948: 1-78. DOI:10.1016/S0065-3233(08)60004-2.
- [4] 周绪霞, 陈红, 陈婷, 等. 脂质对食品中蛋白质凝胶特性的影响及其作用机制[J]. *核农学报*, 2018, 32(9): 1808-1813. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2018.09.1808.
- [5] XIONG Y L, BLANCHARD S P, OOI ZUMI T, et al. Hydroxyl radical and ferryl-generating systems promote gel network formation of myofibrillar protein[J]. *Journal of Food Science*, 2010, 75(2): C215-C221. DOI:10.1111/j.1750-3841.2009.01511.x.
- [6] NICOLAI T. Gelation of food protein-protein mixtures[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2019, 270: 147-164. DOI:10.1016/j.cis.2019.06.006.
- [7] 韩敏义, 徐幸莲, 周光宏. 肌球蛋白及其凝胶特性[J]. *江苏农业科学*, 2003(3): 67-70. DOI:10.3969/j.issn.1002-1302.2003.03.026.
- [8] 王芝妍, 周果, 杨文鸽, 等. 添加剂对秘鲁鱿鱼肌原纤维蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. *核农学报*, 2016, 30(8): 1568-1576. DOI:10.11869/j.issn.100-8551.2016.08.1568.
- [9] CHEN N N, CHASSENIUEUX C, NICOLAI T. Kinetics of NaCl induced gelation of soy protein aggregates: effects of temperature, aggregate size, and protein concentration[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 66-74. DOI:10.1016/j.foodhyd.2017.09.021.
- [10] CANDO D, HERRANZ B, BORDERÍAS A J, et al. Different additives to enhance the gelation of surimi gel with reduced sodium content[J]. *Food Chemistry*, 2016, 196: 791-799. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.10.022.
- [11] 穆硕, 鹿瑶, 高彦祥, 等. 果胶和热处理对蛋白质乳液凝胶结构特性和复合维生素稳定性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(18): 29-34. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201818005.
- [12] 孔文俊, 刘鑫, 薛勇, 等. 不同蛋白添加剂对秘鲁鱿鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(14): 119-122. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.14.015.
- [13] 康壮丽, 李斌, 马汉军, 等. 大豆分离蛋白添加方式对猪肉凝胶特性的影响[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(6): 220-224. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.6.035.
- [14] GE Q F, WU Y H, YUAN N, et al. Effect of high-pressure homogenization-modified soy 11S globulin on the gel and rheological properties of pork myofibrillar protein[J]. *Foods*, 2023, 12(4): 810. DOI:10.3390/foods12040810.
- [15] 李先保, 程千赫. 大豆分离蛋白对兔肉盐溶蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(5): 133-139. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.2010.05.015.
- [16] MENG S, CHANG S, GILLEN A M, et al. Protein and quality analyses of accessions from the USDA soybean germplasm collection for tofu production[J]. *Food Chemistry*, 2016, 213: 31-39. DOI:10.1016/j.foodchem.2016.06.046.
- [17] MOLINA ORTIZ S E, PUPPO M C, WAGNER J R. Relationship between structural changes and functional properties of soy protein isolates-carrageenan systems[J]. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18(6): 1045-1053. DOI:10.1016/j.foodhyd.2004.04.011.
- [18] 刘冉, 曾庆华, 王振宇, 等. 超声波处理对大豆分离蛋白凝胶流变性和凝胶形成的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(21): 87-92; 98. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020020155.
- [19] 王可尧, 任仙娥, 杨锋, 等. 大豆和豌豆分离蛋白复合热促凝胶特性的研究[J]. *中国调味品*, 2022, 47(10): 7-11. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2022.10.002.
- [20] MATSUMIYA K, MURRAY B S. Soybean protein isolate gel particles as foaming and emulsifying agents[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 60: 206-215. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.03.028.
- [21] 朱佳倩, 张顺亮, 赵冰, 等. 大豆分离蛋白对肌原纤维蛋白加热过程中结构及流变特性的影响[J]. *肉类研究*, 2019, 33(9): 1-7. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190802-170.
- [22] 赵泽润, 邢通, 赵雪, 等. 大豆分离蛋白添加量对低盐木质化鸡肉糜凝胶特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(6): 49-56. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210417-242.
- [23] 刘珍, 王金厢, 李学鹏, 等. 大豆分离蛋白与金线鱼肌球蛋白的相互作用对其凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(16): 122-130. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022110207.
- [24] 陈艾霖, 刘曼曼, 周春霞, 等. pH值对罗非鱼蛋白-大豆蛋白混合热凝胶特性及体外消化性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(5): 38-45. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2021.05.007.
- [25] 张红娟, 陈振昌, 周瑞宝. pH值对11S球蛋白结构与凝胶性的影响[J]. *食品科技*, 2003(5): 26-28; 31. DOI:10.3969/j.issn.1005-9989.2003.05.008.
- [26] 刘杰, 周浩, 黄郁芳, 等. 聚乙二醇化学改性的大豆分离蛋白凝胶[J]. *高等学校化学学报*, 2018, 39(2): 390-396. DOI:10.7503/cjcu20170449.
- [27] CHEN L, CHEN J S, REN J Y, et al. Effects of ultrasound pretreatment on the enzymatic hydrolysis of soy protein isolates and on the emulsifying properties of hydrolysates[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(6): 2600-2609. DOI:10.1021/jf103771x.
- [28] ZHANG P P, HU T, FENG S L, et al. Effect of high intensity ultrasound on transglutaminase-catalyzed soy protein isolate cold set gel[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2016, 29: 380-387. DOI:10.1016/j.ulsonch.2015.10.014.
- [29] ZHANG X H, GUO Q Y, SHI W Z. Ultrasound-assisted processing: changes in gel properties, water-holding capacity, and protein aggregation of low-salt *Hypophthalmichthys molitrix* surimi by soy protein isolate[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 92: 106258. DOI:10.1016/j.ulsonch.2022.106258.
- [30] 仵军红, 齐蕾, 谢新华, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸对大豆分离蛋白凝胶特性的影响[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(6): 70-74. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000149.
- [31] 臧学丽, 陈光. 转谷氨酰胺酶对大豆蛋白凝胶特性及结构的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(1): 86-94. DOI:10.13207/j.cnki.jnwf.2018.01.012.
- [32] 赵城彬, 尹欢欢, 鄢健楠, 等. 超声处理的大豆分离蛋白/麦芽糊精混合物酸诱导凝胶性质研究[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(3): 156-163. DOI:10.16429/j.1009-7848.2020.03.020.
- [33] RANI P, YU X, LIU H T, et al. Material, antibacterial and anticancer properties of natural polyphenols incorporated soy protein isolate: a review[J]. *European Polymer Journal*, 2021, 152: 110494. DOI:10.1016/j.eurpolymj.2021.110494.
- [34] YAO Y X, HE W M, XU B J. Physicochemical characteristics, and sensory properties of plant protein isolates-konjac glucomannan compound gels[J]. *Food Science and Nutrition*, 2023, 11(9): 5063-5077. DOI:10.1002/fsn3.3471.
- [35] YU J M, AHMEDNA M, GOKTEPE I, et al. Enzymatic treatment of peanut kernels to reduce allergen levels[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(3): 1014-1022. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.074.
- [36] HAN X X, ZHAO Y L, MAO S N, et al. Effects of different amounts of corn silk polysaccharide on the structure and function of peanut protein isolate glycosylation products[J]. *Foods*, 2022, 11(15): 2214. DOI:10.3390/foods11152214.
- [37] ZHANG S B, JIANG Y S, ZHANG S Y, et al. Physical properties of peanut and soy protein-based emulsion gels induced by various coagulants[J]. *Gels*, 2022, 8(2): 79. DOI:10.3390/gels8020079.

- [38] LI J X, SHI A M, LIU H Z, et al. Effect of hydrothermal cooking combined with high-pressure homogenization and enzymatic hydrolysis on the solubility and stability of peanut protein at low pH[J]. *Foods*, 2022, 11(9): 1289. DOI:10.3390/foods11091289.
- [39] 吴振, 杨传玉, 孙京新, 等. 不同添加剂对鸡肉盐溶蛋白质热诱导凝胶性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2012, 12(8): 60-66. DOI:10.16429/j.1009-7848.2012.08.019.
- [40] 李侠, 章绍兵. pH值对水剂法提取花生蛋白凝胶特性的影响[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2019, 40(5): 53-58. DOI:10.16433/j.cnki.issn1673-2383.2019.05.009.
- [41] SHAND P J, YA H, PIETRASIK Z, et al. Physicochemical and textural properties of heat-induced pea protein isolate gels[J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(4): 1119-1130. DOI:10.1016/j.foodchem.2006.06.060.
- [42] JIANG S, ZHANG J T, LI S H, et al. Effect of enzymatic hydrolysis on the formation and structural properties of peanut protein gels[J]. *International Journal of Food Engineering*, 2021, 17(3): 167-176. DOI:10.1515/ijfe-2018-0356.
- [43] GONG K J, CHEN L R, XIA H Y, et al. Driving forces of disaggregation and reaggregation of peanut protein isolates in aqueous dispersion induced by high-pressure microfluidization[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 130: 915-921. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.02.123.
- [44] LI C, XUE H R, CHEN Z Y, et al. Comparative studies on the physicochemical properties of peanut protein isolate-polysaccharide conjugates prepared by ultrasonic treatment or classical heating[J]. *Food Research International*, 2014, 57: 1-7. DOI:10.1016/j.foodres.2013.12.038.
- [45] ZHAO G L, LIU Y, ZHAO M M, et al. Enzymatic hydrolysis and their effects on conformational and functional properties of peanut protein isolate[J]. *Food Chemistry*, 2011, 127(4): 1438-1443. DOI:10.1016/j.foodchem.2011.01.046.
- [46] HE X H, LIU H Z, LIU L, et al. Effects of high pressure on the physicochemical and functional properties of peanut protein isolates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 36: 123-129. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.08.031.
- [47] DONG X H, ZHAO M M, YANG B, et al. Effect of high-pressure homogenization on the functional property of peanut protein[J]. *Journal of Food Process Engineering*, 2011, 34(6): 2191-2204. DOI:10.1111/j.1745-4530.2009.00546.x.
- [48] ZHANG Q T, TU Z C, XIAO H, et al. Influence of ultrasonic treatment on the structure and emulsifying properties of peanut protein isolate[J]. *Food and Bioprocess Processing*, 2014, 92(1): 30-37. DOI:10.1016/j.fbp.2013.07.006.
- [49] 吴萌萌, 栗俊广, 孙芳菲, 等. 改性花生分离蛋白对猪肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(2): 200-204.
- [50] WANG P, TAO H, WU F F, et al. Effect of frozen storage on the foaming properties of wheat gliadin[J]. *Food Chemistry*, 2014, 164: 44-49. DOI:10.1016/j.foodchem.2014.05.010.
- [51] GUO X H, BI Z G, WU B H, et al. ChAy/Bx, a novel chimeric high-molecular-weight glutenin subunit gene apparently created by homoeologous recombination in *Triticum turgidum* ssp. *dicoccoides*[J]. *Gene*, 2013, 531(2): 318-325. DOI:10.1016/j.gene.2013.08.073.
- [52] 王瑞红, 孙小红, 王莺颖, 等. 大豆蛋白和小麦蛋白结构与功能对比研究[J]. *粮食加工*, 2016, 41(3): 32-36.
- [53] 魏皎皎, 陆紫薇, 刘兴训, 等. 小麦蛋白-柑橘果胶复合颗粒疏水性调控对乳液凝胶结构及流变学行为的影响研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(12): 8-14. DOI:10.19804/j.issn1006-2513.2022.12.002.
- [54] 吕一鸣, 田潇凌, 王晓曦, 等. 小麦蛋白质研究与开发现状[J]. *粮食加工*, 2022, 47(3): 8-13.
- [55] 张秋会, 刘昶, 赵莉君, 等. 小麦蛋白对钾盐替代猪肉熏煮香肠综合品质的调控作用[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(23): 79-85. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2022020077.
- [56] 孙欣瑶, 赵晓, 倪艳, 等. 热处理对浓缩乳清蛋白起泡性的影响及其在咖啡奶盖中的应用[J]. *中国乳品工业*, 2023, 51(3): 35-40. DOI:10.19827/j.issn1001-2230.2023.03.006.
- [57] 胥伟, 黄迪, 许亚彬. 干热处理蛋清粉改善鲢鱼鱼糜凝胶性的研究[J]. *食品工业*, 2016, 37(3): 213-215.
- [58] MINE Y. Recent advances in egg protein functionality in the food system[J]. *World's Poultry Science Journal*, 2002, 58(1): 31-39. DOI:10.1079/WPS20020005.
- [59] 许亚彬, 胥伟, 黄迪. 蛋清液与蛋清粉对鲢鱼鱼糜凝胶性的改良效果比较[J]. *中国家禽*, 2016, 38(4): 34-37. DOI:10.16372/j.issn.1004-6364.2016.04.008.
- [60] 周阳, 胥伟, 陈季旺, 等. 蛋清蛋白粉与大豆分离蛋白粉对鱼丸品质的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(4): 299-302. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.04.054.
- [61] 米叶, 刘肖庆, 冯隽野, 等. 蛋清蛋白对酸奶品质的影响及工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(21): 228-232; 237. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.21.035.
- [62] 张予心, 蔡丹, 宋秋梅, 等. 乳清蛋白与海藻酸钠复合物凝胶特性的影响因素[J]. *中国食品学报*, 2017, 17(5): 40-48. DOI:10.16429/j.1009-7848.2017.05.006.
- [63] CHILDS J L, YATES M D, DRAKE M A. Sensory properties of meal replacement bars and beverages made from whey and soy proteins[J]. *Journal of Food Science*, 2007, 72(6): S425-S434. DOI:10.1111/j.1750-3841.2007.00429.x.
- [64] HANDA A, TAKAHASHI K, KURODA N, et al. Heat-induced egg white gels as affected by pH[J]. *Journal of Food Science*, 1998, 63(3): 403-407. DOI:10.1111/j.1365-2621.1998.tb15752.x.
- [65] CHEN Z Y, LI J K, TU Y G, et al. Changes in gel characteristics of egg white under strong alkali treatment[J]. *Food Hydrocolloids*, 2015, 45: 1-8. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.10.026.
- [66] 陈晓, 郭善广, 周伦, 等. 温度对蛋清碱诱导凝胶形成的影响及机理研究[J]. *食品工业*, 2017, 38(12): 196-200.
- [67] 刘俊锋, 樊睿, 魏海燕, 等. 超声波结合磷酸化改性对蛋清凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9): 201-206. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.034573.
- [68] RODRIGUEZ-FURLAN L T, RINALDONI A N, PADILLA A P, et al. Assessment of functional properties of bovine plasma proteins compared with other protein concentrates, application in a hamburger formulation[J]. *American Journal of Food Technology*, 2011, 6(9): 717-729. DOI:10.3923/ajft.2011.717.729.
- [69] 孔保华, 张立娟, 刁新平. 影响猪血浆蛋白热诱导凝胶质构特性及持水性因素的研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(7): 75-80.
- [70] 邵秀芝, 宁维颖. 血浆蛋白的功能特性及其在食品中的应用[J]. *肉类工业*, 2004(3): 24-26. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2004.03.010.
- [71] PARK J W. Functional protein additives in surimi gels[J]. *Journal of Food Science*, 1994, 59(3): 525-527. DOI:10.1111/j.1365-2621.1994.tb05554.x.
- [72] 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. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.005.
- [73] 于楠楠, 李景敏, 汤楚琦, 等. 羊血浆蛋白对高温杀菌鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 32-36; 42. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.16.006.
- [74] 倪娜, 王振宇, 陈立娟, 等. 血浆蛋白对羊肌原纤维蛋白热诱导凝胶性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2015, 15(10): 26-34. DOI:10.16429/j.1009-7848.2015.10.004.



- [75] 孟晓霞, 彭增起, 靳红果, 等. 牛血浆蛋白凝胶特性研究[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(5): 157-160. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2012.05.045.
- [76] SEO H W, JUNG E Y, GO G W, et al. Optimization of hydrolysis conditions for bovine plasma protein using response surface methodology[J]. Food Chemistry, 2015, 185: 106-111. DOI:10.1016/j.foodchem.2015.03.133.
- [77] 李菁, 耿蕊, 卢岩, 等. 经美拉德修饰的猪血浆蛋白水解物在肉糜中的应用[J]. 食品工业, 2014, 35(10): 150-155.
- [78] 杨林莘, 王冰冰, 尹雅岚, 等. 加热方式对南美白对虾虾肉糜及其大豆分离蛋白复合物凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 201-206. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.013423.
- [79] GAO X Q, HAO X Z, XIONG G Y, et al. Interaction between carrageenan/soy protein isolates and salt-soluble meat protein[J]. Food and Bioproducts Processing, 2016, 100: 47-53. DOI:10.1016/j.fbp.2016.06.014.
- [80] 熊可心, 熊哲民, 王子凌, 等. 3种植物蛋白及不同添加量对乳化香肠品质特性的影响[J]. 食品科技, 2023, 48(3): 132-139. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2023.03.015.
- [81] 李艳青, 陈洪生, 俞龙浩, 等. 氧化大豆分离蛋白对法兰克福香肠品质的影响[J]. 肉类工业, 2018(3): 38-40. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2018.03.010.
- [82] 杜娟, 左丁. 花生蛋白粉灌肠配方的研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(2): 51-54. DOI:10.16210/j.cnki.1007-7561.2016.02.012.
- [83] 高浩源, 赵春波, 李苗云, 等. 基于主成分分析花生蛋白对低盐香肠品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(21): 219-224. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.028754.
- [84] SUN J X, WU Z, XU X L, et al. Effect of peanut protein isolate on functional properties of chicken salt-soluble proteins from breast and thigh muscles during heat-induced gelation[J]. Meat Science, 2012, 91(1): 88-92. DOI:10.1016/j.meatsci.2011.12.010.
- [85] 冯婷, 孙京新, 吴振, 等. 花生浓缩蛋白对鸡胸肉盐溶蛋白热诱导凝胶性能的影响[J]. 现代食品科技, 2015, 31(10): 97-102; 128. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.10.017.
- [86] 崔旭海, 毕海丹, 崔晓莹, 等. 不同食用蛋白的添加对鲤鱼鱼糜流变和凝胶特性的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(16): 195-200; 225. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.16.035.
- [87] 于繁千惠, 孔文俊, 韦依依, 等. 小麦蛋白和谷氨酰胺转氨酶对120℃高温处理鱼糜凝胶特性影响的研究[J]. 食品工业科技, 2016, 37(21): 81-85. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.21.007.
- [88] 田怀香, 肖作兵, 徐霞, 等. 电子鼻技术结合多元统计方法在鸡肉香精开发中的应用[J]. 中国调味品, 2011, 36(6): 61-65. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2011.06.014.
- [89] 阮仕艳, 彭新颜, 张淑荣, 等. 乳清抗氧化肽对冷藏猪肉糜肌原纤维蛋白功能性及品质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(21): 265-271. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201721042.
- [90] BENJAKUL S, YARNPAKDEE S, VISESSANGUAN W, et al. Combination effects of whey protein concentrate and calcium chloride on the properties of goatfish surimi gel[J]. Journal of Texture Studies, 2010, 41(3): 341-357. DOI:10.1111/j.1745-4603.2010.00228.x.
- [91] 石径, 罗永康, 黄辰, 等. 乳清蛋白与凝胶化条件对鱼糜凝胶特性的影响[J]. 渔业现代化, 2011, 38(3): 35-38; 44. DOI:10.3969/j.issn.1007-9580.2011.03.008.
- [92] 孔保华, 刘迪迪, 刘赛, 等. 添加不同非肉蛋白对乳化肠品质特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(7): 145-150.
- [93] 王强, 邹金, 王玉荣, 等. 添加蛋清粉对鲑鱼丸品质的影响[J]. 肉类研究, 2020, 34(7): 53-57. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20200226-053.
- [94] 杨玲玲, 蒋艳, 涂勇刚, 等. 复合卵白蛋白-大豆分离蛋白对肉糜凝胶特性和微观结构的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(18): 22-27. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20200810-134.
- [95] ZHOU X X, CHEN T, LIN H H, et al. Physicochemical properties, and microstructure of surimi treated with egg white modified by tea polyphenols[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 90: 82-89. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.07.031.
- [96] 蔡景周, 张立娟, 孔保华, 等. 猪血浆蛋白与大豆蛋白在乳化肠中的应用[J]. 食品研究与开发, 2010, 31(11): 44-47. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2010.11.012.
- [97] 李景敏, 于楠楠, 李芮洋, 等. 羊血浆蛋白对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(19): 84-89. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.021125.
- [98] 杨琪, 唐善虎, 韦婕妤. 不同钙盐、植物蛋白、膳食纤维对牦牛肉糜质构特性的影响[J]. 食品科技, 2018, 43(11): 142-148. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.11.024.
- [99] YANG N, LUAN J, ASHTON J, et al. Effect of calcium chloride on the structure and *in vitro* hydrolysis of heat induced whey protein and wheat starch composite gels[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 42: 260-268. DOI:10.1016/j.foodhyd.2014.02.022.
- [100] SU Y J, DONG Y T, NIU F G, et al. Study on the gel properties and secondary structure of soybean protein isolate/egg white composite gels[J]. European Food Research and Technology, 2014, 240(2): 367-378. DOI:10.1007/s00217-014-2336-3.
- [101] 杨娟, 罗玮倩, 何曼源. 大豆蛋白/蛋清蛋白复合凝胶性能的影响因素[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(18): 128-133. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.031999.
- [102] TIAN T, TONG X H, REN K Y, et al. Influence of protein ratios on the structure and gel properties of soybean-wheat co-precipitated proteins[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 170: 114045. DOI:10.1016/j.lwt.2022.114045.
- [103] 王可尧, 任仙娥, 杨锋, 等. 大豆和豌豆分离蛋白的葡萄糖酸- $\delta$ -内酯促凝胶特性研究[J]. 食品科技, 2021, 46(12): 251-257. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.12.040.
- [104] 唐婷婷, 杨玲玲, 蒋艳, 等. 卵白蛋白和分离蛋白相互作用对凝胶结构及性质的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(4): 31-37. DOI:10.3969/j.issn.1673-1689.2022.04.005.
- [105] PU X, ZHANG M Y, LIN X D, et al. Development and characterization of acid-induced whey protein concentrate and egg white protein composite gel[J]. LWT-Food Science and Technology, 2022, 164: 113624. DOI:10.1016/j.lwt.2022.113624.
- [106] 陶阳, 陈洪生, 王长远, 等. 改性绿豆蛋白与小麦蛋白相互作用对其凝胶特性的影响[J]. 中国粮油学报, 2023, 38(6): 60-69. DOI:10.20048/j.cnki.issn.1003-0174.000091.
- [107] SOMJID P, PANPIPAT W, CHEONG L Z, et al. Comparative effect of cricket protein powder and soy protein isolate on gel properties of Indian mackerel surimi[J]. Foods, 2022, 11(21): 3445. DOI:10.3390/foods11213445.
- [108] 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/OL]. 食品科学[2023-06-21]. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20230305-039.
- [109] 陈海华, 薛长湖. 不同添加物对鲤鱼鱼糜蛋白凝胶品质改良的研究[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(10): 79-84.
- [110] LU Z, LEE P R, YANG H. Kappa-carrageenan improves the gelation and structures of soy protein isolate through the formation of hydrogen bonding and electrostatic interactions[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 140: 108585. DOI:10.1016/j.foodhyd.2023.108585.
- [111] 孙晓洋, 耿军凤, 潘春梅, 等. 果胶对花生蛋白凝胶流变特性和微观结构的影响[J]. 中国油脂, 2023, 48(11): 38-44. DOI:10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220556.
- [112] 杨文, 秦新生, 马叶胜, 等. 添加剂对组织化小麦蛋白结构的影响[J]. 中国粮油学报, 2017, 32(10): 1-7; 15. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.10.001.

- [113] QI P X, XIAO Y, WICKHAM E D. Stabilization of whey protein isolate (WPI) through interactions with sugar beet pectin (SBP) induced by controlled dry-heating[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 67: 1-13. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.12.032.
- [114] 许晶, 齐宝坤, 赵青山, 等. 乳清蛋白- $\beta$ -葡聚糖美拉德产物热凝胶流变性的研究[J]. *现代食品科技*, 2016, 32(1): 111-115; 209. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2016.1.018.
- [115] LAM R S H, NICKERSON M T. The properties of whey protein-carrageenan mixtures during the formation of electrostatic coupled biopolymer and emulsion gels[J]. *Food Research International*, 2014, 66: 140-149. DOI:10.1016/j.foodres.2014.08.006.
- [116] 康伟. 大豆分离蛋白、卡拉胶与肌原纤维蛋白间的相互作用[J]. *食品研究与开发*, 2018, 39(8): 30-35. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2018.08.006.
- [117] XU Y Q, YU J, X Y, et al. Enhancing gel performance of surimi gels via emulsion co-stabilized with soy protein isolate and  $\kappa$ -carrageenan[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 135: 108217. DOI:10.1016/j.foodhyd.2022.108217.
- [118] 贾涛. 大豆分离蛋白与仙草胶混合体系凝胶特性的研究[J]. *轻工科技*, 2019, 35(4): 8-9.
- [119] BI C H, CHI S Y, WANG X Y, et al. Effect of flax gum on the functional properties of soy protein isolate emulsion gel[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2021, 149: 111846. DOI:10.1016/j.lwt.2021.111846.
- [120] CHEN C S, MA P P, JIANG S Y, et al. Effect of flaxseed gum on the textural, rheological, and tribological properties of acid-induced soy protein isolate gels[J]. *Polymers*, 2023, 15(13): 2834. DOI:10.3390/polym15132834.
- [121] 刘冉, 曾庆华, 梁明, 等. 黄原胶对大豆分离蛋白凝胶流变特性和微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(4): 65-72. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021060103.
- [122] 丁玲, 唐艺华, 张丽芬, 等. 花生蛋白-果胶复合乳液凝胶的流变学特性和微观结构[J]. *食品科学*, 2022, 43(16): 46-52. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20211014-136.
- [123] WAGONER T B, FOEGEDING E A. Whey protein-pectin soluble complexes for beverage applications[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63: 130-138. DOI:10.1016/j.foodhyd.2016.08.027.
- [124] 谭芦兰, 唐宏刚, 杨慧娟, 等. 魔芋胶对咸蛋清蛋白热诱导凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(8): 70-77. DOI:10.16429/j.1009-7848.2019.08.008.
- [125] KHEMAKHEM M, ATTIA H, AYADI M A. The effect of pH, sucrose, salt and hydrocolloid gums on the gelling properties and water holding capacity of egg white gel[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 11-19. DOI:10.1016/j.foodhyd.2018.07.041.
- [126] BABAEI J, MOHAMMADIAN M, MADADLOU A. Gelatin as texture modifier and porogen in egg white hydrogel[J]. *Food Chemistry*, 2019, 270: 189-195. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.07.109.
- [127] BABAEI J, KHODAIYAN F, MOHAMMADIAN M. Effects of enriching with gellan gum on the structural, functional, and degradation properties of egg white heat-induced hydrogels[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 128: 94-100. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2019.01.116.
- [128] 臧学丽, 陈光. 转谷氨酰胺酶交联大豆分离蛋白的结构变化与凝胶强度的相关性[J]. *吉林农业大学学报*, 2021, 43(6): 685-689. DOI:10.13327/j.jjlau.2021.1426.
- [129] LUO K Y, LIU S T, MIAO S, et al. Effects of transglutaminase pre-crosslinking on salt-induced gelation of soy protein isolate emulsion[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 263: 280-287. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2019.07.008.
- [130] 史乾坤, 王心雅, 甄诺, 等. 超高压预处理对TGase交联的大豆分离蛋白凝胶的影响[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(9): 94-100. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2021.09.016.
- [131] 李杨, 马召蕾, 郑丽, 等. 超声联合酶处理下TG酶交联大豆分离蛋白凝胶特性研究[J]. *农业机械学报*, 2022, 53(4): 394-402. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2022.04.041.
- [132] 程梦颖, 张海萍, 刘友明, 等. 葡萄糖氧化酶对鲢鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(9): 101-107. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021080329.
- [133] OMURA F, TAKAHASHI K, OKAZAKI E, et al. A novel and simple non-thermal procedure for preparing low-pH-induced surimi gel from Alaska pollock (*Theragra chalcogramma*) using glucose oxidase[J]. *Food Chemistry*, 2020, 321: 126722. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126722.
- [134] 付璐璐, 黄建联, 赵建新, 等. 葡萄糖氧化酶对金线鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(8): 59-64. DOI:10.16429/j.1009-7848.2016.08.009.
- [135] 孙撬撬, 王凯强, 罗水忠, 等. 理化复合预处理对TGase改性小麦蛋白性质的影响[J]. *中国粮油学报*, 2017, 32(6): 15-20; 26. DOI:10.3969/j.issn.1003-0174.2017.06.003.
- [136] 王芳, 贾万利, 李会珍. 谷氨酰胺转氨酶对猪血浆蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(8): 52-56. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2013.08.014.
- [137] 陈瑜, 张小军, 丁国芳, 等. 外源添加剂对日本黄姑鱼鱼糜制品凝胶特性的影响[J]. *食品科技*, 2018, 43(12): 149-153. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.12.028.
- [138] 沈晓蕾, 李向红, 俞健, 等. 大豆分离蛋白、木薯淀粉与转谷氨酰胺酶组合对鲢鱼鱼糜凝胶品质的影响[J]. *食品与机械*, 2019, 35(9): 26-31. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2019.09.006.
- [139] 张一鸣, 李思仪, 沈晓溪, 等. 外源添加剂对鲢鱼-鳕鱼复合鱼糜凝胶性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 197-203. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2021010006.
- [140] 白登荣, 刘根, 贺雪华, 等.  $\gamma$ -聚谷氨酸复合TGase对鸡肉肌原纤维蛋白凝胶特性的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(1): 104-112. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014690.
- [141] 梁光灿, 范鑫, 袁方, 等. 外源添加剂对海杂鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(2): 50-56; 65. DOI:10.12161/j.issn.1005-6521.2023.02.008.
- [142] 黄晓霞, 游云, 刘巧瑜, 等. 添加不同外源物质对鲑鱼肉肠凝胶特性与失水率的影响[J]. *肉类工业*, 2022(12): 14-22. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2022.12.004.
- [143] 聂晓开, 邓绍林, 周光宏, 等. 复合磷酸盐、谷氨酰胺转氨酶、大豆分离蛋白对新型鸭肉火腿品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(17): 256-261. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.17.044.
- [144] 张钰嘉, 万杨卓群, 石尚轩, 等. 磷酸盐-大豆分离蛋白联合处理对草鱼肌原纤维蛋白凝胶化的影响[J]. *肉类研究*, 2022, 36(2): 21-26. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20210527-157.