

蛋清蛋白凝胶改性及其在肉制品加工中的应用

Egg white protein gel modification and its application in meat processing

张根生¹ 李 琪¹ 黄昕钰¹

ZHANG Gen-sheng¹ LI Qi¹ HUANG Xin-yu¹

韩 冰¹ 赵洪雷^{1,2} 费英敏³

HAN Bing¹ ZHAO Hong-lei^{1,2} FEI Ying-min³

(1. 哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150028; 2. 渤海大学实验与设备管理中心, 辽宁 锦州 121013; 3. 黑龙江民族职业学院, 黑龙江 哈尔滨 150066)

(1. College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin, Heilongjiang 150028, China; 2. Laboratory and Equipment Management Center, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China; 3. Heilongjiang Vocational College for Nationalities, Harbin, Heilongjiang 150066, China)

摘要:蛋清蛋白具有凝胶性、起泡性、乳化性等功能特性, 生产加工中通常采用改性处理的方法提高蛋清蛋白的凝胶特性及凝胶稳定性。文章综述了蛋清蛋白的改性方法以及改性蛋清蛋白在肉制品加工中应用的研究现状, 并对蛋清蛋白改性方法的创新及应用进行了展望。

关键词:蛋清蛋白; 凝胶性; 改性; 肉制品

Abstract: Egg white protein has gelatinous, foaming, and emulsifying properties. In production and processing, the gelatinous properties and gelatinous stability of egg white protein are usually improved by modifying treatment. This paper reviewed the modification methods of egg white protein and the research status of the application of modified egg white protein in meat processing and prospected the innovation and application of modified egg white protein.

Keywords: egg white protein; gelatinous; modification; meat products

蛋清蛋白(egg white protein, EW)为鸡蛋中包裹在蛋黄外透明的胶状物质, 蛋清中蛋白质含量约为 13%~15%^[1], 主要包括卵白蛋白、卵转铁蛋白、卵类黏蛋白、卵黏蛋白、溶菌酶和卵球蛋白等^[2]。蛋清蛋白不仅有较高的食用价值, 还具有起泡性、乳化性、溶解性和凝胶性等

功能特性, 因此蛋清蛋白在食品领域中具备不同的加工特性^[3]。

蛋清蛋白的凝胶形成过程是一个适度变性的过程, 主要分为变性、聚集、凝胶网络形成 3 个阶段^[4]。蛋清蛋白溶液在加热或其他处理方式作用下, 蛋白质中盘旋折叠的肽链逐渐展开转变为伸展态的小分子肽链, 通过 β -折叠作用小分子肽链形成了大分子的不溶性聚集基团, 再通过疏水相互作用和二硫键使得部分小分子肽链之间相互发生反应, 当溶液的黏度达到形成凝胶点的临界值时, 即可定向生成在三维空间上有序的蛋白质网状, 即凝胶网络结构。凝胶网络结构通常会截留水及其他组分共同形成蛋清蛋白凝胶, 以疏水作用力和二硫键等共价相互作用所形成的凝胶一般是不可逆的^[5-6]。蛋清蛋白的凝胶性主要受加热温度、时间、pH 值、底物浓度等凝胶条件以及糖、盐和大分子物质等添加剂多种因素的影响^[7]。蛋清蛋白的凝胶网络可以吸附水分提高食品的保水性及肉类的嫩度, 吸附风味物质改善肉类风味, 提高食品的黏结性、增稠性等^[8]。但蛋清凝胶本身的稳定性和凝胶特性并不理想。由于蛋白质是不同氨基酸以肽键连接而构成的具有高级空间结构的生物大分子^[9], 其功能特性不但与蛋白质的理化性质息息相关, 且是以蛋白质的结构为基础的, 所以对蛋清蛋白改性要在不损失其营养物质的前提下提高蛋清蛋白的凝胶强度及稳定性。

研究拟从物理、化学、生物 3 个方面论述蛋清蛋白凝胶性的改性方法, 总结蛋清蛋白在肉制品加工中的应用研究进展, 并对改性蛋清蛋白凝胶的研究趋势及其在肉制品加工中的应用前景进行展望, 以期为高凝胶性蛋清蛋白理论研究提供参考。

基金项目:黑龙江省“百千万”工程科技重大专项(编号: 2019ZX07B03-3); 黑龙江省教育科学规划 2022 年度重点课题(编号: ZJB1422210)

作者简介:张根生, 男, 哈尔滨商业大学教授, 硕士。

通信作者:费英敏(1973—), 女, 黑龙江民族职业学院副教授, 硕士。E-mail: ddhkg@126.com

收稿日期:2023-01-09 **改回日期:**2023-04-12

1 蛋清蛋白凝胶性的改性

1.1 物理改性方法

蛋清蛋白物理改性方法的本质是使蛋白质的空间构象发生改变,引起理化性质发生改变,进而达到功能性改变的目的^[10-11]。通过控制改性条件可实现对蛋清蛋白凝胶性的定向变性。其作用机理主要是改变蛋白质的二、三、四级结构,蛋白质的一级结构一般保持不变^[12-13]。物理改性方法主要有热处理、冷冻处理、微波处理、超声波处理和超高压处理等,各改性方法对蛋清蛋白凝胶性的影响见表 1。

1.2 化学改性方法

蛋清蛋白的化学改性是指经过化学试剂的处理,使蛋白质中某些肽键断裂并引入不同的功能基团,达到改善相应的功能特性目的的过程。经处理后,蛋清蛋白质分子会产生高净电荷,分子间会产生静电斥力,蛋白质分子结构展开,蛋清蛋白的凝胶特性和起泡特性等随之改善^[7]。化学改性方法本质是使蛋白质主链结构及侧链基

团发生改变,主要包括糖基化、磷酸化、酸碱处理、酰化、磺化、氨基酸共价连接、还原烷基化、硫醇化^[27]等。

糖基化处理是指蛋白质上的 α -氨基、 ϵ -氨基与碳水化合物通过共价键的形式结合形成糖基化蛋白质的过程^[28]。由 Flory 凝胶形成理论可知,凝胶形成过程分为预凝胶状态、胶凝点和后凝胶状态 3 个阶段。预凝胶状态,蛋白质单体通过 β -折叠形成有限的高分子质量可溶聚集体胶凝点,在二硫键的作用下,各种蛋白质聚集物均以单体、二聚体或稍大些的聚集体的形式形成连续的分子结构,开始形成不溶性的网状凝胶,到达胶凝点后立即联结在一起形成凝胶。糖基化接枝反应可以增加蛋白质的分子量,有利于形成网络结构,增强空间位阻,因而需要更少的单体。在一定的单体数目情况下,形成的胶体粒子数量更多、空间网络结构更紧密的凝胶结构。研究^[29-30]表明,低分子量还原糖可导致蛋白质共价交联进而提高凝胶强度,还原糖可使蛋白质在较低浓度下形成凝胶,但该反应容易发生褐变。Nakamura等^[31]使用半

表 1 物理改性方法对蛋清蛋白凝胶性的影响

Table 1 Effects of physical modification methods on gel properties of egg white protein

改性方法	原理	结论	参考文献
热处理	通过高温使蛋清蛋白分子的高级空间构象发生不可逆的改变,蛋白质内部的巯基暴露同时与氧气结合发生氧化,部分巯基转变成二硫键,蛋白质分子聚合,进而凝胶性提高	蛋清蛋白于 80 °C 干燥 10 d,凝胶性、起泡性及乳化性均得到了较大的改善	[14-15]
冷冻处理	冻藏处理下,蛋白质稳定的结构发生改变,由于处理后蛋清蛋白质分子间疏水性基团和巯基暴露,分子间疏水相互作用力随之增加,凝胶强度提升	液蛋制品经巴氏杀菌后于-18 °C 冻藏处理 21 d,蛋清蛋白凝胶硬度增加率为 44.5%;同时泡沫稳定性增加,起泡能力下降	[16-17]
微波处理	蛋清粉经微波处理后蛋白质分子内部的基团暴露,分子表面疏水作用力增强,巯基数目增加,同时蛋白质部分巯基转化成二硫键,凝胶强度增强;微波处理后水分含量及迁移情况对凝胶强度有一定影响	微波处理后能够迅速提升鸡蛋蛋清粉的凝胶强度	[18]
超声处理	由于超声波作用的空化及直流作用产生的高温高压,能够改变蛋白质的功能结构,凝胶性发生显著变化;主要被应用于食品加工中的干燥、灭菌、提取、过滤、均质、乳化、嫩化等方面	采用微波真空冷冻干燥法对蛋清蛋白进行处理,所制得蛋清粉的凝胶强度大幅提升 当功率为 200 W 时,蛋清蛋白凝胶强度最高,失水率最低,凝胶结构致密	[19] [20-23]
超高压处理	蛋白质经高压处理后结构特性发生改变,从而起到变性的作用;能够减少食品的营养物质损失,且成本低、操作简单	经超声处理后,蛋清蛋白的凝胶强度得到了提升 随着压力的增大,动态超高压微射流处理蛋清蛋白的凝胶性、成膜性、起泡性、流变性均得到了改善 高压处理后,与未添加保护剂的蛋白质相比,添加蔗糖和氯化钠作为保护剂的蛋白质的凝胶强度和起泡性能均有提升	[24] [25] [26]

乳甘露聚糖对蛋清蛋白进行糖基化修饰,蛋清蛋白的凝胶性、保水性均有改善。于滨等^[32]研究证明蛋清蛋白经糖基化处理后,其凝胶性、热稳定性、乳化性和起泡性均显著提高,与段汝清等^[33]的研究结论一致。目前,蛋清蛋白凝胶性能改善常用的亲水胶体有黄原胶、卡拉胶、瓜尔豆胶和魔芋胶等,魔芋胶因含有葡甘露聚糖能与蛋白质快速发生交联反应被广泛应用于糖基化反应^[34]。

磷酸化处理是指蛋白质分子上特定的氮原子或氧原子与无机磷酸形成-C-N-Pi 或-C-O-Pi 的酯化反应,蛋白质中引入磷酸根基团后增加了电负性、提高分子间静电斥力,蛋白质分子更易分散,从而起到改善蛋白质凝胶能力的作用。赵薇等^[35]采用三聚磷酸钠(STP)对蛋清粉进行磷酸化改性,当 STP 添加量为 0.5%,反应温度为 35℃,反应时间为 4 h 时,蛋清粉的凝胶强度由 308 g 增加到 730.392 g。磷酸化改性方法成本低廉、绿色安全可靠、蛋白的消化率无明显影响且能实现量产。

利用天然产物茶多酚改性蛋清蛋白也取得了较好的效果,其凝胶强度和持水性随茶多酚添加量的增加逐渐增大,当茶多酚添加量为 0.8% 时,蛋清蛋白的凝胶强度提高了 130.2%,失水率从 29.41% 降至 19.29%^[36-37]。于殿宇等^[38]发明了一种通过电解的阳极氧化处理改性鸡蛋蛋白从而改善蛋清凝胶性能的方法,其处理条件为蛋清溶液 pH 值为 8.5,电流密度 2.0 mA/cm,电解处理时间 65 min。

1.3 生物改性方法

生物改性方法是指通过生物方法对蛋清蛋白进行性质改善,其中酶法改性应用最为广泛。酶法改性是指利用酶催化蛋清蛋白反应,导致蛋白交联或水解,通过改变蛋白质的结构来改善蛋白质的凝胶性、稳定性、乳化性和持水力等功能特性。酶交联法改性可用于提高蛋清蛋白凝胶性,且多使用 TG 酶。TG 酶容易获得且安全性高,常用于酪蛋白、大豆分离蛋白、乳清蛋白、谷朊蛋白等蛋白质改性。有研究^[39]称蛋清蛋白不适用于作为 TG 酶的底物,原因可能在于底物蛋白质构象及热力学相合性的不同。王然等^[40]使用 TG 酶交联蛋清粉,采用响应面分析法优化了最佳反应条件,蛋清粉的凝胶强度提升至 820 g/cm²。陈杰^[41]通过 TG 酶交联蛋清蛋白粉提高了蛋清蛋白凝胶强度。多酚氧化酶^[42]也可被应用于蛋清蛋白的酶交联改性。酶法改性反应条件温和且不会影响蛋白质本身的颜色、pH、风味和营养成分含量,且主要应用 TG 酶交联法改性。

1.4 复合改性方法

食品加工中,一般使用两种或两种以上的方法进行复合改性,复合改性方法被广泛应用于蛋白质改性中。

刘丽莉等^[43]使用酶解协同磷酸化改性的方法对蛋清蛋白进行了处理,结果表明,磷酸化协同酶解卵白蛋白的凝胶强度、乳化活性及乳化稳定性的改善效果较其他两组更好,但起泡性及泡沫稳定性随之降低。刘欣慈^[44]使用低聚糖协同 TG 酶对蛋清蛋白进行改性,结果表明 TG 酶能够提高低聚半乳糖-蛋清蛋白复合物的凝胶强度及弹性。Ywa 等^[45]采用蛋清蛋白粉碎工艺结合糖基化复合改性后,蛋清蛋白的凝胶强度及弹性大幅提高。

2 凝胶型蛋清蛋白在肉制品加工中的应用

2.1 在肉糜制品中的应用

蛋清蛋白在肉制品中的应用主要集中用于肉糜制品中作为黏结剂,特别是用于鱼糜制品中。肉糜制品的凝胶性是影响其品质的重要因素之一,决定了肉糜的组织形态、黏性、保水性、出品率等^[46]。肉糜制品中的肌原纤维蛋白(肌球蛋白和肌动蛋白)是一种盐溶性蛋白,其溶解度和含量直接影响了凝胶强度及形成速度^[47]。肌原纤维蛋白充分溶解后,在热处理下通过离子键、疏水作用力、共价键、氢键等^[48]形成稳定的网状结构,最终形成凝胶。0.6~1.0 mol/L 的高浓度盐溶液会提高肌原纤维蛋白的溶解性,由于在生产过程中盐的添加量受限,肉糜中盐离子浓度低,肌原纤维蛋白的溶解度随之降低,最终影响蛋白质凝胶的形成,对成品的肉糜制品的保水性、多汁性、出品率、嫩度、质地等产生影响^[49]。而通过添加蛋白类、淀粉类、亲水胶体等物质可以改善肉糜制品的凝胶品质。蛋清蛋白对肉糜制品凝胶性的影响见表 2。

蛋清蛋白具有良好的凝胶性,常常采取直接或与其他物质复配后及对蛋清蛋白进行改性处理后添加到肉糜制品中的方法,对肉糜制品品质进行改良。改性后的高凝胶蛋清蛋白对肉糜制品凝胶强度的提高效果显著,对肉制品的持水性及白度均有增益。

2.2 在肉制品脂肪替代物中的应用

蛋清蛋白因具有良好的凝胶特性可作为脂肪替代物。在不改变食物原有品质的条件下,通过蛋白质加热或者微粒化形成凝胶部分代替或全部代替食物中的脂肪,以达到模拟脂肪口感和降低脂肪的目的,常被应用于乳制品、酱料、冰淇淋、奶油、肉肠等方面。张婷婷^[64]将蛋清蛋白和大豆分离蛋白按不同比例复配,制备了具有高凝胶性的脂肪替代物,并应用于饺子馅中以达到降脂的目的。蛋清蛋白脂肪替代物成分安全,与食物主要原料不发生化学反应^[65];蛋白质会结合风味物质,可能对风味产生有益影响,且蛋清无色不会对肉制品的颜色产生影响,但不适用于油炸食品^[66]。目前蛋清蛋白基脂肪替代物被应用于肉制品加工中,而改性蛋清蛋白的应用仍为空白,有待研究。

表 2 凝胶型蛋清蛋白在肉糜制品中的应用

Table 2 Application of gel egg white protein in meat products

蛋清蛋白添加方式	处理方法	结论	参考文献
直接添加	分别添加蛋清粉及大豆蛋白粉至鱼丸中	添加蛋清粉及大豆蛋白粉均可提升鱼丸的凝胶强度,且蛋清粉对鱼丸的白度无影响	[50]
	分别添加蛋清蛋白和谷朊粉至鲮鱼鱼糜中	蛋清蛋白和谷朊粉均可提升鱼糜的凝胶特性,使其形成致密均一的凝胶网络,蛋清蛋白还可增加其白度	[51]
	分别添加蛋清蛋白、乳清蛋白和大豆蛋白至乳化肠中	添加蛋清蛋白组的乳化肠品质明显优于其他两组,凝胶强度以及黏性显著增加	[52]
	添加蛋清粉至鲑广椒肉丸中	添加蛋清粉的肉丸持水性提高,蛋清粉添加量为 2% 时,鲑广椒肉丸的凝胶强度提升效果最佳	[53]
与其他物质复配后添加	复配添加马铃薯淀粉及蛋清蛋白至鱼糜中并进行加压及热处理	添加蛋清后的鱼糜具有纤维状和均匀的网络结构,鱼糜的持水性显著提高	[54]
	复配添加玉米淀粉、蛋清蛋白、卡拉胶至微山湖四鼻鲤中	当 $m_{\text{卡拉胶}} : m_{\text{蛋清蛋白}} : m_{\text{玉米淀粉}}$ 为 25% : 1.8% : 6% 时,对鲤鱼糜凝胶品质的改善作用最强,且此时鱼肠的硬度、弹性、咀嚼性和黏结性效果最好	[55]
	复配添加淀粉类添加剂(玉米淀粉、地瓜淀粉、马铃薯淀粉)、蛋白类添加剂(蛋清蛋白、花生蛋白)以及卡拉胶至鲤鱼鱼糜中	蛋清蛋白对凝胶强度的改善效果最好,添加花生蛋白会影响凝胶品质;当 $m_{\text{马铃薯淀粉}} : m_{\text{蛋清蛋白}} : m_{\text{卡拉胶}}$ 为 1 : 1 : 1 时,鲤鱼肠的凝胶效果最好	[56]
	复配添加蛋清蛋白和大豆蛋白至猪肉糜中	当 $m_{\text{蛋清蛋白}} : m_{\text{大豆蛋白}}$ 为 1 : 1 时,肉糜的凝胶强度提高最为显著,保水性最佳	[57]
	复配添加水、咸蛋清、复配胶至肉糜中	水添加量为 20%、咸蛋清添加量为 7%、复配胶添加量为 0.5% 时,肉糜的凝胶强度及持水性均有所提升	[58]
	分别添加蛋清粉和干热处理后的蛋清粉至鲢鱼鱼糜中	与未添加蛋清粉的鱼糜制品相比,添加蛋清粉能够显著提高鱼糜的凝胶强度及白度,添加干热处理的蛋清粉的效果更佳,其质地更致密均一	[59]
化学改性后添加	添加蛋清粉及糖基化(葡聚糖)处理后的蛋清粉至鲢鱼鱼糜制品中	当糖基化改性蛋清粉添加量为 2.0% 时,鲢鱼鱼糜的凝胶性与白度分别提高至 684.36 g/cm 和 76.25	[60]
	添加茶多酚处理的蛋清至鱼糜中	添加茶多酚处理后的蛋清,鱼糜的凝胶特性和白度显著提高	[61]
	添加不同质量分数的苹果多酚改性蛋清至鲑鱼鱼糜中	添加苹果多酚改性蛋清后的鱼糜凝胶强度、持水性显著提升	[62]
	分别添加传统蛋清粉、高凝胶强度蛋清粉、蛋清液至太平洋鲑鱼中	当高凝胶强度蛋清粉添加量为 3% 时,鱼糜的凝胶强度最大;当传统蛋清粉添加量为 2% 时,鱼糜的抑制酶活作用最强	[63]

3 结语

高压、糖基化、酶处理等改性方法可以改变蛋清蛋白的分子结构或者催化交联反应,通过改变凝胶的微观结构,提高蛋白的凝胶强度、弹性及持水性。单一改性方法的研究及应用目前较为完善,复合改性方法改性效率高但研究较少,缺乏对两种改性方法联用的变化规律及机理研究。对蛋清蛋白进行改性时需有针对性地选择改性方法,以获得生产加工中所需要特定提高的功能特性,同

时下一步可继续研究高凝胶性蛋清蛋白在肉制品脂肪替代物中的应用,在保证食品安全的前提下,拓宽蛋清蛋白凝胶在肉制品中的应用范围。

参考文献

- [1] PHILIPPE B W. Recent advances in avian egg science: A review[J]. Poultry Science, 2017, 96(10): 3 747-3 754.
- [2] 畅柯飞. 热处理对蛋清蛋白聚集行为及界面性质调控作用机制研究[D]. 长春: 吉林大学, 2021: 1-3.

- CHANG K F. Study on the mechanism of regulation of egg albumin aggregation behavior and interface properties by heat treatment[D]. Changchun: Jilin University, 2021: 1-3.
- [3] 吴永艳, 王怡, 段文珊, 等. 物理改性在蛋清蛋白功能特性改善中的应用[J]. 食品与机械, 2021, 37(3): 195-200.
- WU Y Y, WANG Q, DUAN W S, et al. Application of physical modification in improvement of functional properties of egg white protein[J]. Food & Machinery, 2021, 37(3): 195-200.
- [4] YOSHINORI M. Recent advances in the understanding of egg white protein functionality [J]. Trends in Food Science & Technology, 1995, 7(6): 225-232.
- [5] 唐聪敏. 三聚磷酸钠对蛋清蛋白-多糖复合体系凝胶特性影响研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 1-3.
- TANG C M. Effect of sodium tripolyphosphate on gel characteristics of egg albumin-polysaccharide composite system[D]. Changchun: Jilin University, 2022: 1-3.
- [6] 徐保立. 鸡蛋清蛋白凝胶特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010: 2-3.
- XU B L. Study on gel characteristics of egg white protein [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010: 2-3.
- [7] 邹凯, 王玲, 王晨帆, 等. 蛋清蛋白凝胶性能的影响因素分析[J]. 粮食科技与经济, 2012, 37(2): 57-60.
- ZOU K, WANG L, WANG C F, et al. Analysis of influencing factors of egg white protein gel performance[J]. Food Science and Technology and Economy, 2012, 37(2): 57-60.
- [8] 叶钰, 高金燕, 陈红兵, 等. 超声波加工对蛋清蛋白质结构和凝胶特性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 45-52.
- YE Y, GAO J Y, CHEN H B, et al. Effects of ultrasonic processing on egg white protein structure and gel properties[J]. Food Science, 2018, 39(21): 45-52.
- [9] 黄友如, 华欲飞. 大豆分离蛋白化学改性及其对功能性质影响[J]. 粮食与油脂, 2003(4): 17-19.
- HUANG Y R, HUA Y F. Chemical modification of soybean protein isolate and its effect on functional properties[J]. Grain and Oil, 2003 (4): 17-19.
- [10] MONTERO P, FERNÁNDEZ-DÍAZ M D, GÓMEZ-GUILLÉN M C. Characterization of gelatin gels induced by high pressure[J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(3): 197-205.
- [11] BHAT R, KARIM A A. Ultraviolet irradiation improves gel strength of fish gelatin[J]. Food Chemistry, 2009, 113(4): 1 160-1 164.
- [12] VILLAMIEL M, CORZO N, MARTÍNEZ-CASTRO I, et al. Chemical changes during microwave treatment of milk[J]. Food Chemistry, 1996, 56(4): 385-388.
- [13] 管军军, 白新鹏, 方希修, 等. 微波合成大豆蛋白-糖接枝物理化性质的研究[J]. 食品科学, 2007(6): 30-35.
- GUAN J J, BAI X P, FANG X X, et al. Study on the physical and chemical properties of microwave synthesis of soybean protein-sugar grafting[J]. Food Science, 2007(6): 30-35.
- [14] LIU X, WANG J, HUANG Q, et al. Underlying mechanism for the differences in heat-induced gel properties between thick egg whites and thin egg whites: Gel properties, structure and quantitative proteome analysis [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 106: 105873.
- [15] KATO A, IBRAHIM H R, WATANABE H, et al. New approach to improve the gelling and surface functional properties of dried egg white by heating in dry state[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1989, 37(2): 433-437.
- [16] 于滨, 王喜波. 鸡蛋品质与蛋白凝胶性的相关性研究[J]. 食品工业, 2012, 33(9): 13-16.
- YU B, WANG X B. Correlation between egg quality and protein gelability[J]. Food Industry, 2012, 33(9): 13-16.
- [17] 胥伟, 代钰, 王宏勋, 等. 冷冻处理对蛋清液起泡性与凝胶性的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(5): 96-98.
- XU W, DAI Y, WANG H X, et al. Effects of freezing on foaming and gelling properties of egg white liquid[J]. Food Industry, 2019, 40(5): 96-98.
- [18] 车永真, 范大明, 陆建安, 等. 微波法快速提高蛋清凝胶强度及其机理的研究[J]. 食品工业科技, 2008(8): 79-81, 86.
- CHE Y Z, FAN D M, LU J N, et al. Study on rapid improvement of gel strength of egg white powder by microwave method and its mechanism[J]. Science and Technology of Food Industry, 2008(8): 79-81, 86.
- [19] 刘丽莉, 张孟军, 代晓凝, 等. 蛋清粉微波真空冷冻干燥条件优化及凝胶特性分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49(7): 126-133, 144.
- LIU L L, ZHANG M J, DAI X N, et al. Optimization of microwave vacuum freeze-drying conditions and analysis of gel characteristics of egg white powder[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2021, 49(7): 126-133, 144.
- [20] 荆卉, 孙俊, 牟瑶瑶, 等. 超声波物化效应及其对蛋白质改性的应用研究进展[J]. 中国食品学报, 2021, 21(6): 321-330.
- JING H, SUN J, MOU Y Y, et al. Research progress on ultrasonic physicochemical effects and its application to protein modification [J]. Journal of Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(6): 321-330.
- [21] ZHENG L Y, SUN D W. Innovative applications of power ultrasound during food freezing processes: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17(1): 16-23.
- [22] CHEMAT F, ZILL-E-HUM A, KHAN M K. Applications of ultrasound in food technology: Processing, preservation and extraction[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2011, 18(4): 813-835.
- [23] 李媛媛, 刘丽莉, 杨晓盼, 等. 超声功率对鸡蛋清蛋白聚集行为的影响[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2021, 42(4): 83-90, 96, 9-10.
- LI Y Y, LIU L L, YANG X P, et al. Effect of ultrasonic power on egg albumin aggregation behavior[J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 42 (4): 83-90, 96, 9-10.
- [24] YE Y, GAO J Y, CHEN H B, et al. Effect of ultrasonic processing

- on protein structure and gel properties of egg white [J]. *Food Science*, 2018, 39(21): 45-52.
- [25] 王辉. 蛋清蛋白动态超高压电射流改性研究及机理初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 12-30.
WANG H. Study on modification of dynamic ultra-high pressure microjet of egg white protein and preliminary study on its mechanism[D]. Nanchang: Nanchang University, 2007: 12-30.
- [26] IAMETTI S, DONNIZZELLI E, PITTIA P, et al. Characterization of high-pressure-treated egg albumen[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1999, 47(9): 3 611-3 616.
- [27] SOLÁ R J, AL-AZZAM W, GRIEBENOW K. Engineering of protein thermodynamic, kinetic, and colloidal stability: Chemical glycosylation with monofunctionally activated glycans [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2006, 94(6): 1 072-1 079.
- [28] 张根生, 徐旖梦, 刘欣慈, 等. 湿法糖基化改性对蛋清蛋白凝胶特性及微观结构的影响[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(6): 105-112.
ZHANG G S, XU Y M, LIU X C, et al. Effects of wet glycosylation on gel properties and microstructure of egg white protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 105-112.
- [29] RICH L M, FOEGEDING E A. Effects of sugars on whey protein isolate gelation[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2000, 48(10): 5 046-5 052.
- [30] MITCHELL J R, HILL S E. The use and control of chemical reactions to enhance the functionality of macromolecules in heat-processed foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1995, 6(7): 219-224.
- [31] NAKAMURA S, KATO A. Multi-functional biopolymer prepared by covalent attachment of galactomannan to egg-white proteins through naturally occurring Maillard reaction[J]. *Nahrung*, 2000, 44(3): 201-206.
- [32] 于滨, 迟玉杰. 糖基化改善蛋清蛋白功能性的研究[J]. *中国家禽*, 2009, 31(7): 15-18.
YU B, CHI Y J. Study on improvement of egg white protein functionality by glycosylation [J]. *China Poultry*, 2009, 31(7): 15-18.
- [33] 段汝清, 苏宇杰, 王俊伟, 等. 瓜尔豆胶酶解液改性蛋清蛋白凝胶性质的研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2018, 37(7): 714-721
DUAN R Q, SU Y J, WANG J W, et al. Study on the properties of egg white protein gel modified by guar gum digest[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2018, 37(7): 714-721.
- [34] 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.
TAN L L, TANG H G, YANG H J, et al. Effect of konjac gum on thermally induced gel properties of salted egg white protein[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2019, 19(8): 70-77.
- [35] 赵薇, 迟玉杰. 磷酸化改性提高蛋清粉凝胶性的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2011, 37(9): 79-83.
ZHAO W, CHI Y J. Study on phosphorylation modification to improve the gelatinity of egg white powder [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2011, 37(9): 79-83.
- [36] 周绪霞, 陈婷, 吕飞, 等. 茶多酚改性对蛋清蛋白凝胶特性的影响及机理[J]. *食品科学*, 2018, 39(16): 13-18.
ZHOU X X, CHEN T, LV F, et al. Effect and mechanism of tea polyphenol modification on gel characteristics of egg white protein [J]. *Food Science*, 2018, 39(16):13-18.
- [37] ZHOU X, CHEN T, FEI L, et al. Effect and mechanism of modification with tea polyphenols on the gel properties of egg white protein[J]. *Food Science*, 2018, 39(16): 13-18.
- [38] 于殿宇, 张欣, 陈俊, 等. 一种通过电解处理改性鸡蛋蛋清及改善其凝胶性能的方法: CN112335847A[P]. 2021-02-09.
YU D Y, ZHANG X, CHEN J, et al. Method for modifying egg white by electrolysis and improving its gel properties: CN112335847A[P]. 2021-02-09.
- [39] CHRISTENSEN B M, SØRENSEN E S, HØJRUP P, et al. Localization of potential transglutaminase cross-linking sites in bovine caseins[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1996, 44(7): 1 943-1 947.
- [40] 王然, 迟玉杰. 转谷氨酰胺酶提高蛋清粉凝胶性能的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2010, 36(2): 109-113.
WANG R, CHI Y J. Study on gel performance of egg white powder by transglutaminase[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2010, 36(2): 109-113.
- [41] 陈杰. 高凝胶性蛋清蛋白粉生产技术的研发[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008: 23-36.
CHEN J. Research on production technology of high gelatinous egg white protein powder [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2008: 23-36.
- [42] 刘珂. 多酚氧化酶催化鸡蛋卵白蛋白交联对其结构与功能性质的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2018: 49-59.
LIU K. Effect of egg albumin cross-linking catalyzed by polyphenol oxidase on its structure and functional properties[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018: 49-59.
- [43] 刘丽莉, 李玉, 王焕, 等. 酶解—磷酸化协同改性对卵白蛋白特性与结构的影响[J]. *食品与机械*, 2017, 33(6): 17-20, 52.
LIU L L, LI Y, WANG H, et al. Effects of enzymatic hydrolysis-phosphorylation synergistic modification on characteristics and structure of ovalbumin[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(6): 17-20, 52.
- [44] 刘欣慈. 低聚糖及 TG 酶改性蛋清蛋白热诱导凝胶结构研究及应用鸡[D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2022: 24-35.
LIU X C. Study on thermally induced gel structure of oligosaccharides and TG enzyme modified egg white protein in chicken[D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2022: 24-35.
- [45] YWA B, YZA B, WDA B, et al. Ball-milling is an effective pretreatment of glycosylation modified the foaming and gel properties of egg white protein[J]. *Journal of Food Engineering*, 2022, 319: 110908.

- [46] HERMANSSON A M. Gel characteristics: Structure as related to texture and waterbinding of blood plasma gels[J]. *Journal of Food Science*, 1982, 47(6): 1 965-1 972.
- [47] CHEN X, TUME R K, XU X, et al. Solubilization of myofibrillar proteins in water or low ionic strength media: Classical techniques, basic principles, and novel functionalities[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2017, 57(15): 3 260-3 280.
- [48] MARTÍN-SÁNCHEZ A M, NAVARRO C, PÉREZ-ÁLVAREZ J A, et al. Alternatives for efficient and sustainable production of surimi: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2009, 8(4): 359-374.
- [49] 朱卫星. 猪肉肌原纤维蛋白氧化及其凝胶特性的变化研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2012: 2-6.
ZHU W X. Study on oxidation of pork myofibrillar protein and its gel characteristics[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2012: 2-6.
- [50] 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.
ZHOU Y, XU W, CHEN J W, et al. Effects of egg white protein powder and soybean protein isolate powder on the quality of fish balls[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(4): 299-302.
- [51] 周爱梅, 曾庆孝, 刘欣, 等. 两种蛋白类添加剂对鲮鱼鱼糜凝胶特性的改良[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2005(4): 87-91.
ZHOU A M, ZENG Q X, LIU X, et al. Improvement of gel characteristics of bighead carp surimi by two protein additives[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2005(4): 87-91.
- [52] 孔保华, 刘迪迪, 刘骞, 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.
KONG B H, LIU D D, LIU Q, et al. Effects of different non-meat protein additions on quality characteristics of emulsified intestinal materials[J]. *Food Science*, 2011, 32(7): 145-150.
- [53] 王强, 邹金, 王玉荣, 等. 添加蛋清粉对鲜广椒肉丸品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(7): 53-57.
WANG Q, ZOU J, WANG Y R, et al. Effect of egg white powder on quality of meatballs of queguang pepper[J]. *Meat Research*, 2020, 34(7): 53-57.
- [54] TABILO-MUNIZAGA G, BARBOSA-CÁNOVAS G V. Pressurized and heat-treated surimi gels as affected by potato starch and egg white: Microstructure and water-holding capacity[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2005, 38(1): 47-57.
- [55] 孟娟, 魏勋, 吴广州, 等. 不同添加剂对微山湖四鼻鲤鱼糜凝胶性的影响[J]. *中国渔业质量与标准*, 2016, 6(2): 20-22.
MENG J, WEI X, WU G Z, et al. Effects of different additives on gellatinity of surimi four-nosed carp in weishan lake[J]. *China Fishery Quality & Standard*, 2016, 6(2): 20-22.
- [56] 陈海华, 薛长湖. 不同添加剂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.
CHEN H H, XUE C H. Study on gel quality improvement of carp surimi protein gel by different additives [J]. *Food and Fermentation Industry*, 2008, 34(10): 79-84.
- [57] 杨玲玲, 蒋艳, 涂勇刚, 等. 复合卵白蛋白一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.
YANG L L, JIANG Y, TU Y G, et al. Effects of compound ovalbumin-soybean protein isolate on gel characteristics and microstructure of minced meat[J]. *Food Science*, 2021, 42(18): 22-27.
- [58] 史梅莓, 王洋, 周贤波, 等. 水分、咸蛋清和复配胶对肉糜制品品质的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(3): 167-172.
SHI M B, WANG Y, ZHOU X B, et al. Effects of moisture, salted egg white and compound gum on the quality of minced meat products[J]. *Food Industry*, 2021, 42(3): 167-172.
- [59] 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.
XU W, HUANG D, XU Y B. Study on improvement of surimi gelability of silver carp with dry heat treatment egg white powder [J]. *Food Industry*, 2016, 37(3): 213-215.
- [60] 许亚彬, 胥伟, 黄迪. 糖基化改性蛋清粉提高鲢鱼鱼糜凝胶性的研究[J]. *现代农业科技*, 2015(22): 278-280.
XU Y B, XU W, HUANG D. Study on improvement of surimi gelability of surimi by glycation modified egg white powder[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(22): 278-280.
- [61] 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.
- [62] 孙科, 闫方华, 许晓敏, 等. 苹果多酚改性蛋清改善鲢鱼鱼糜的凝胶性质[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(10): 210-217, 164.
SUN K, YAN F H, XU X M, et al. Improvement of gel properties of surimi by apple polyphenol modified egg white [J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(10): 210-217, 164.
- [63] HUNT A, PARK J W, HANDA A. Effect of various types of egg white on characteristics and gelation of fish myofibrillar proteins [J]. *Journal of Food Science*, 2009, 74(9): C683-C692.
- [64] 程婷婷. 脂肪模拟物一大豆分离蛋白与蛋清蛋白复合物的制备与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016: 8-37.
CHENG T T. Preparation and application of adimimic-soybean protein isolate and egg white protein complex [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016: 8-37.
- [65] YOUNG V R, FUKAGAWA N K, PELLETT P L. Nutritional implications of microparticulated protein [J]. *Journal of the American College of Nutrition*, 1990, 9(4): 418-426.
- [66] 张慧. 蛋清蛋白基脂肪替代品的研究及其在冰淇淋中的应用[D]. 南昌: 江西农业大学, 2019: 2-3.
ZHANG H. Research on egg white protein-based fat substitutes and their application in ice cream [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2019: 2-3.