

# 蛋白质改性对禽蛋粉加工性能影响的研究进展

## Research progress of the effects of protein modification on the processing properties of poultry egg powder

何伟明 叶劲松 师洁

HE Wei-ming YE Jin-song SHI Jie

(四川农业大学, 四川 雅安 625014)

(Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014, China)

**摘要:**介绍了国内外采用物理法、化学法和酶法 3 种蛋白质改性方法对蛋粉加工性能影响的研究进展,分析比较了各种改性方式的特点,并对蛋粉加工中蛋白质改性的未来研究方向进行了展望。

**关键词:**蛋粉;蛋白质;改性

**Abstract:** In this review, the effects of egg powder were summarized from the aspects of physical method, chemical method and enzymatic modification, and the traits of these methods were analyzed and compared. Moreover, the future development of egg powder was prospected, so as to enhance the processing property of egg powder and expand the application range.

**Keywords:** egg powder; protein; modification

中国作为产蛋大国,禽蛋产量在全球占比达 40% 以上,世界排名第一,但蛋品加工率仅为 5%~7%<sup>[1]</sup>。鸡蛋作为中国主要的禽蛋,其产量占比约 80%<sup>[2]</sup>,每年有近 3 000 亿元的产业规模。中国居民鸡蛋消费结构比较单一,鲜蛋消费量占鸡蛋总产量的 90%<sup>[3]</sup>。禽蛋粉作为一种重要的现代蛋制品<sup>[3]</sup>,不仅是适应人们快节奏工作和生活的营养产品,还因其复水后具有乳化性、发泡性,以及凝胶性而作为营养添加剂和品质改良剂广泛应用于食品加工领域<sup>[4]</sup>,而且在加工过程中对这些性能的需求也在不断提升。

蛋白质改性作为提高蛋粉加工特性的重要手段,一直受到业界重视。目前对禽蛋蛋白改性的研究主要是在物理、化学、和酶法改性中寻找新的改性方法和对改性机理的探究,对一些复合改性法也有研究,且效果较好。同时也存在一些问题,如高温处理下改性效果与食品安全之间的平衡、高压处理下-SH 基团暴露和氧化所需温度的矛盾、化学改性过

程中副产物的引入和试剂残留、适合蛋清蛋白(EWP)改性的酶较少以及对一些改性机理研究不够透彻。目前解决这些问题与寻找新的改性方法和使已有的改性方法更为显著有效,仍是改性禽蛋蛋白质的关键所在。

本文介绍了目前改性禽蛋蛋白的主要方法:物理改性、化学改性和酶法改性,分析了每种改性方式的优点与不足以及一些改性过程中亟需解决的问题,以期提高蛋粉的加工特性、扩大应用范围。

### 1 物理改性

物理改性通过外界条件改变作用于蛋白质,使其二级或更高级结构破坏、分子表面电荷分布改变和某些基团的暴露,产生静电排斥力、引力和疏水相互作用,改变蛋白质的界面特性。因成本考虑和技术限制,目前所研究的物理改性方法主要包括加热法、高压处理法、电磁辐射法和添加亲水性物质等方法。

#### 1.1 热处理

热处理是研究较早的物理改性方式,在热处理过程中蛋白质分子聚集和化学键改变,影响蛋白质的表面性质,进而影响蛋粉的起泡性、凝胶性和乳化性等。

在 20 世纪 70 年代有研究表明<sup>[5]</sup>将蛋粉在 58~60 °C 下放置 10~14 d,既可提高起泡性能又能达到杀菌目的;Ibanoglu 等<sup>[6]</sup>发现过度热处理不利于 EWP 泡沫形成。这是因为轻度热处理暴露出疏水基团和-SH 基团,使表面疏水性提高,利于泡沫形成,过度热处理则使蛋白质聚集,降低起泡性和乳化性<sup>[7]</sup>。Lechevalier 等<sup>[8]</sup>发现干燥温度会影响蛋粉乳化稳定性,60 °C 加热干燥时,乳化稳定性因溶解度损失而降低;干燥温度在 70 °C 以上时,乳化稳定性随着干燥强度的加强而增加;90 °C 加热 5~10 d 时,乳化稳定性因蛋白质溶液液滴尺寸减小显著提高。对凝胶强度而言,一定程度加热会使 EWP 变性聚集,提高其凝胶强度<sup>[9]</sup>;而高湿度下加热不仅使蛋白质变性聚集,还提高了蛋清的 pH 值和电导

**作者简介:**何伟明,男,四川农业大学在读硕士研究生。

**通信作者:**叶劲松(1967—),男,四川农业大学副教授,硕士。

E-mail: yjsh529@163.com

**收稿日期:**2018-04-02

率<sup>[10-11]</sup>,结果进一步提升其凝胶质地。

加热处理作为一种常见的改性方式,适度热处理不仅能改性 EWP,还可以达到脱敏和杀菌效果,其作用效果与时间和湿度有较大关系,过度热处理则影响蛋粉品质,因此在热处理过程中进一步寻找研究蛋粉质量与食品安全的平衡点尤为重要。

### 1.2 加压处理

高压处理作为食品加工和保存的重要技术,可以对大分子物质的氢键、离子键、疏水键等非共价键作用,使酶失去活性,杀死微生物,从而达到保藏食品的和促使组织变性得到新型食品的目的<sup>[12]</sup>。高压诱导蛋白质变性的作用取决于压力、蛋白质的种类和浓度、pH 及温度等。

Brand 等<sup>[13]</sup>发现在低于 100 MPa 的压力下蛋清不会形成聚集体,但会破坏卵黏蛋白—溶菌酶(LY)复合物,导致黏度和光密度降低。Panozzo 等<sup>[14]</sup>发现在 150 MPa 以上的压力下,EWP 发生聚集,黏度和光密度增加,颜色由黄变白,且 EWP 过敏性降低。

Singh 等<sup>[15]</sup>发现在蛋白浓度 9.6 mg/mL,550 MPa 高压处理 20 min 时,由 S—S 氧化和 SS—SH 交换形成可溶性聚集体,在 96 mg/mL 浓度(天然蛋清)下,550 MPa 处理 15 min 则诱导 S—S 键交联形成半透明凝胶。

Vander 等<sup>[16]</sup>研究了高压处理(400~700 MPa,10~60 ℃)对两种不同 pH 值(pH 7.6 和 pH 8.8)蛋清液(蛋白浓度为 9.6 mg/mL)的影响,发现在 pH 8.8 时,大量蛋白质暴露并伴随一定程度的溶解,使蛋清液的起泡性增加;而 pH 7.6 时,大量蛋白质暴露而溶解度却大幅降低,增加了泡沫稳定性和密度。结果表明发泡能力部分由巯基含量和蛋白质柔性决定,高压处理后蛋白质—蛋白质之间的相互作用有助于提升 EWP 的泡沫性能。

Vander 等<sup>[17]</sup>发现高压对—SH 的影响与温度有较大关系,与较高温度(40~60 ℃,500 MPa)相比,在较低温度(10 ℃,500 MPa)下,—SH 基团的暴露更快;在氧化方面,—SH 氧化敏感程度由大到小的条件依次是:高压高温(40~60 ℃,500 MPa)、高压低温(500 MPa,10~25 ℃)、常压高温(101.3 kPa,70~85 ℃)。因此,高压下—SH 基团暴露和氧化所需温度相矛盾,而—SH 基团暴露量和氧化程度直接关系到聚集体的形成,进一步影响 EWP 的功能性质。

目前研究高压处理主要改善蛋粉的起泡性和凝胶性,而对乳化性影响的研究较少。一般将高压技术与蛋粉凝胶作用结合起来改善食物的口感与风味。常将高压与温度结合使用,因此在高压处理下寻找—SH 基团暴露和氧化所需温度的平衡点尤为重要,另一方面,在处理过程中蛋白质的构象改变与蛋粉功能特性的变化之间的关系也需进一步研究和完善。

### 1.3 电磁辐射处理

电磁辐射由低频率到高频率,主要分为:无线电波、微波、红外线、可见光、紫外线、X 射线和  $\gamma$  射线等。电磁辐射改性蛋白质需要一定的能量,因此用于蛋白质改性的则主要是微波、紫外线、超声、电离辐射、脉冲电场等<sup>[18-19]</sup>。

1.3.1 微波处理 微波处理会改变蛋白质分子极性和非极性残基所带电荷分布,同时降低蛋白质表面的电荷密度,使空气—水界面处蛋白质的表面活性降低<sup>[20]</sup>,这对起泡性和乳化性的影响较大。Wang 等<sup>[21]</sup>使用超声预处理结合新型脉冲喷射床微波冷冻干燥(PSMFD)和常规冷冻干燥(CFD)生产出鸭蛋清粉,比较发现 PSMFD 蛋清粉比 CFD 蛋清粉起泡能力低,但具有更高泡沫稳定性;这与真空微波冷冻干燥鸭蛋清粉的起泡性能研究结果一致<sup>[22]</sup>。而 PSMFD 蛋清粉的乳化活性比 CFD 蛋清粉高,乳化稳定性相反。PSMFD 蛋清粉因为干燥的温度较低、时间较短,EWP 的变性程度不及 CFD 蛋清粉,PSMFD 蛋清粉凝胶强度也就较 CFD 蛋清粉低。而车永真等<sup>[23]</sup>认为微波辐射后蛋白质变性导致蛋白质的疏水性提高和—SH 的暴露,使蛋清粉的凝胶强度迅速提高。

1.3.2 紫外线辐射 紫外线辐射主要是在通过两种方式对 EWP 改性,第 1 种<sup>[24]</sup>是诱导 LY 中色氨酸氧化,使 S—S 断裂形成—SH,新的—SH 可以形成分子间的 S—S,导致在辐照过程中形成聚集体。第 2 种<sup>[25]</sup>是诱导卵白蛋白(OVA)中埋藏的一SH 的暴露,促进分子间 S—S 的交联,而形成聚集体。聚集体形成增加了 EWP 的浊度和表观黏度<sup>[24]</sup>。Kuan 等<sup>[26]</sup>发现紫外线处理的 EWP 表现出更高的泡沫稳定性和乳化稳定性。

1.3.3 超声处理 高强度超声包含高能机械波(20~100 kHz),可以导致蛋白质变性和聚集<sup>[27]</sup>,超声还会增加电荷量、蛋白质表面疏水性和小分子蛋白质的浓度,降低—SH 含量和表观黏度<sup>[28]</sup>。Wang 等<sup>[29]</sup>发现经过超声预处理后,鸭蛋清粉泡沫稳定性提高。超声处理时,起泡性能与 pH 有较大关系,Stefanovic 等<sup>[30]</sup>发现在 pH 7 时(超声频率 20 kHz,时间 20 min,蛋白浓度为 10 mg/mL),形成大的聚集体会降低 EWP 起泡性。而在 pH 9 时,形成聚集体较小,对泡沫体积没有不利影响。

1.3.4 电离辐射 电离辐射是一种新兴的非热技术,在可控条件下将食品暴露于放射性同位素(Co-60 或 Cs-137)产生的  $\gamma$  射线或电子加速器产生的电子束或 X 射线来破坏其中可能存在的微生物,同时会影响其中的大分子物质如蛋白质等<sup>[31]</sup>。Song 等<sup>[32]</sup>用 Co-60  $\gamma$  射线(1,2,5 kGy)处理蛋清液和蛋清粉,二者的 pH 均无显著变化,两者的起泡性与辐照剂量呈正相关,但蛋清粉起泡性改善不及蛋清液。他们<sup>[32]</sup>认为辐射可使蛋清液中的肽键断裂,从而黏度降低、疏水性增加,提高起泡性;而蛋清粉起泡性提高是因为辐照使蛋白质二级结构从  $\alpha$  螺旋到无规则卷曲的变化引起,蛋清粉经辐照后生产出蛋糕的硬度、咀嚼性、黏度都显著降低,其颜色更加明亮,同时会提高面包产品的起泡力和质量。而近来研究<sup>[33]</sup>表明蛋清蛋白通过一定剂量(1.08,3.24,5.40 kGy)的电离辐射处理后,经扫描电镜和中红外光谱观察到该剂量的电离辐射不会破坏 EWP 的二级结构,但蛋白颗粒的微观表面出现穿孔,且穿孔率会随辐射剂量增加而增多,利于提高蛋清蛋白水解。因此蛋清粉起泡性能的改善与电离辐射之间的关系还需进一步研究。

1.3.5 脉冲电场处理 脉冲电场加工是在短时间内使用外部电场(中等或高强度)对食品巴氏灭菌的新兴技术<sup>[34]</sup>。脉冲电场处理通过诱导 EWP 聚集而达到改性目的,脉冲电场影响 EWP 的聚集取决于处理强度和蛋白质种类<sup>[35-36]</sup>。

Wu 等<sup>[35]</sup>发现 20 kV/cm(800  $\mu$ s)处理时,OVA 不会形成聚集体;而 25 kV/cm(800  $\mu$ s)以上会导致部分 OVA 展开,并使—SH 基团暴露,该过程通过—SH 氧化和分子之间 SH—SS 交联而形成小的可溶性聚集体。对 LY 而言,则由两种机制形成不溶性聚集体(pH 7~9, 25~30 kV/cm, 600~800  $\mu$ s, 18~20  $^{\circ}$ C),第 1 种是脉冲电场加速蛋白质运动,通过带正电荷的 LY 和带负电荷的 OVA 和卵转铁蛋白(OVT)之间的静电引力形成;第 2 种是脉冲电场诱导 OVA 和 OVT 分子部分暴露,与 LY 通过非共价作用形成<sup>[36]</sup>。

赵伟等<sup>[37]</sup>使用 25~35 kV/cm 脉冲电场处理 EWP 100~800  $\mu$ s,发现 EWP 的起泡和乳化功能提高。而随着脉冲电场处理电场强度和时间的增加,其溶解度、起泡和乳化功能均降低。范金波等<sup>[38]</sup>发现脉冲电场处理蛋清液,可以提高其黏度,但降低了凝胶强度。

1.3.6 高频电场 近年高频电场也被应用于蛋白质改性中<sup>[39]48</sup>,蛋白质分子中的正负电荷在高速交变的电场作用下,产生往复极化,蛋白质分子受到强烈的拉伸、撞击、摩擦等作用并产生极化效应使蛋白质分子空间结构改变,产生分子改性现象。所以高频电场也可能适合应用禽蛋蛋白质的改性。

辐照改性 EWP 的种类多,改性范围广,但一些改性机理需进一步研究。与传统食品加工处理方法相比,辐照技术则有低温、高效、能耗少和安全性高等更符合环保的特点,且辐照处理穿透能力强、均匀、短时,对其辐照过程也可以进行准确控制。

#### 1.4 添加亲水性物质

亲水性物质有良好的溶解特性,可以降低蛋白质体系的表面张力等,从而改善蛋粉的功能性质<sup>[40]</sup>,其中亲水性胶体、小分子糖类、淀粉具有良好的溶解特性和黏度,而被添加入禽蛋液用于改性蛋白。

1.4.1 添加亲水性胶体 Yang 等<sup>[41-42]</sup>研究表明在蛋清中添加羧甲基纤维素(CMC)、瓜尔胶和黄原胶可以提高蛋清的起泡性。而 Huang 等<sup>[43]</sup>先用亚临界水(在高压下,100~374  $^{\circ}$ C 高温下保持液态的热水)预处理后生产出蛋粉,后加入鱼鳞明胶,结果显示亚临界水可以提高发泡能力,但明显降低了蛋清粉的泡沫稳定性,加入鱼鳞明胶可以降低泡沫的表面张力,形成机械性能更强的膜,使亚临界水处理蛋清粉的泡沫能力和泡沫稳定性提高,显示出更高的泡沫性能。Koc 等<sup>[40]</sup>通过在喷雾干燥前向全蛋液中加入明胶,发现其不仅增加了全蛋粉的起泡性能,还提高了凝胶性能。

1.4.2 添加小分子糖类 小分子糖类可以提高蛋白溶液的黏度,赋予溶液增稠效果,将乳液絮凝和聚集形式稳定化<sup>[40]</sup>。Yang 等<sup>[41]</sup>研究表明在蛋清中添加蔗糖可以提高蛋清的黏度,提高泡沫稳定性,但起泡沫力下降;宋俊俊等<sup>[44]</sup>研究了 NaCl 浓度、多糖以及小分子乳化剂对全蛋粉乳化性质

的影响,结果表明多糖浓度对全蛋粉的乳化性影响最大;于滨等<sup>[45]</sup>进一步研究发现乳糖添加量为 6%时 OVA 的乳化性最好。

1.4.3 添加淀粉 Koc 等<sup>[40]</sup>发现添加支链淀粉的全蛋粉起泡性能高,乳化活性也最大,他们分析是因为淀粉的纤维结构具有较强的结合油能力,而达到增稠乳液的效果;但其凝胶性(凝胶硬度和持水力)较普通蛋粉低。而王燕等<sup>[46]</sup>发现在鱼糜中添加淀粉后,淀粉会在加热过程中吸水变成淀粉凝胶,并填充在蛋白质凝胶的网络结构中,使得鱼糜凝胶的网络结构更加紧密,从而提高了鱼糜的凝胶强度。Koc 等<sup>[40]</sup>分析添加支链淀粉的全蛋粉凝胶强度降低的原因是均质过程造成 EWP 机械损伤。

亲水性物质对蛋白质的作用主要是通过改变蛋白质体系表面张力和溶液的黏度等蛋白质溶液的界面特性,加入过多则会降低单位蛋粉的营养价值,其改性效果也有待提高。目前对亲水性物质的研究主要集中在寻找安全、高效的亲水性物质以及亲水性物质的加入引起蛋液界面特性变化的机理。

## 2 化学改性

化学改性是用化学方法使蛋白质分子中氨基酸残基的侧链基团或多肽链发生断裂、聚合或引入新的基团,导致蛋白质分子空间结构和功能性质发生改变。其实质是通过改变蛋白质的结构、静电荷、疏水基团,从而起到改善各项功能特性,包括溶解度、吸水性、凝胶性及热稳定性等<sup>[39]48-49</sup>。目前蛋白质的化学改性方法包括糖基化、磷酸化、酰化、去酰胺和水解及氧化等<sup>[47]</sup>。

### 2.1 糖基化

蛋白质糖基化修饰是利用分子间共价键将碳水化合物蛋白质分子上的氨基(主要是  $\alpha$ -或  $\epsilon$ -NH<sub>2</sub>)相连接,使产物即糖蛋白既有蛋白质的大分子特性,又具有糖类物质的亲水性<sup>[48]</sup>。Xu 等<sup>[49]</sup>研究了 EWP 与麦芽糖糊精在 80  $^{\circ}$ C 和相对湿度 65%条件下按比例共轭结合 0~14 d,结果表明美拉德反应结束后,凝胶形成的速度降低,但凝胶更加稳定,凝胶的持水力最多能提高 20%,发泡能力最多提高 124%,泡沫稳定性下降到 54%,乳化能力和乳化稳定性分别提高了 196%和 174%。Geng 等<sup>[50]</sup>通过糖基化反应制备 OVA 和 CMC 轭合物,接枝度和褐变指数随反应时间的增加而增加,8 d 是平衡糖基化和褐变的最优反应时间。重量比(OVA:CMC)优化为 4:1, pH 值最优为 7 或 8。糖基化反应后 OVA 的热稳定性得到改善,与 CMC 的分子量和取代度呈正相关,且 OVA 的二级结构受到接枝 CMC 的影响,反应完成后增加了  $\beta$  片层和无规则卷曲,减少了  $\alpha$  螺旋和  $\beta$  转角。进一步丰富了蛋白质和多糖相互作用的理论框架。

### 2.2 磷酸化

磷酸化修饰则是无机磷酸与蛋白质上特定的氧原子或氮原子结合(如:Lys 的  $\epsilon$ -NH<sub>2</sub>, His 咪唑环的 1,3 位 N, Arg 的胍基末端 N)形成—C—O—Pi 或—C—N—Pi 的酯化反应<sup>[51]</sup>,从而使蛋白质的表面性质发生改变而改善大分子物

质的功能特性。

刘丽莉等<sup>[52]</sup>对 EWP 进行磷酸化处理,发现经过适当的磷酸化处理,EWP 的溶解度、乳化性和起泡性都得到一定程度的改善;他们<sup>[53]</sup>还研究将蛋清液在 pH 4.5 下用三聚磷酸钠(STP)磷酸化后分别进行冷冻干燥和喷雾干燥,结果表明磷酸化显著提高了蛋清粉的起泡力、凝胶性和乳化性功能特性;对比 2 种蛋清粉发现:冷冻干燥蛋清粉的溶解性、保水性、乳化性能和热凝胶强度方面较优,喷雾干燥蛋清粉起泡性能较优,而黏度没有显著差异。在凝胶性能方面,胥伟等<sup>[54]</sup>发现磷酸化改性后的全蛋粉,其凝胶强度会大幅提高。

### 2.3 酰化

酰化改性就是蛋白质分子中的亲核基团(氨基、羟基)与酰化试剂中的亲电基团(羰基)相互反应,引入亲水基团,然后在催化剂作用下又引入长碳链亲油基团,使蛋白具有双极性基团。酰化后蛋白质分子表面负电荷增多,多肽链伸展及空间结构发生较大改变,导致分子柔性提高,从而增强蛋白质溶解性、持水性及持油性,主要改善乳化性及起泡性<sup>[55]</sup>。

虽然酰化改性可用于禽蛋蛋白质,但目前酰化改性禽蛋蛋白质的研究较少。王玲等<sup>[56]</sup>以鸭蛋蛋清蛋白为原料,通过琥珀酸酐酰基化改性提高了鸭蛋蛋清蛋白的凝胶强度。

### 2.4 去酰胺基

去酰胺基改性法在食品蛋白质化学改性方法中较为突出,因为自然界中大多数蛋白质含有大量酰胺基基团。通过除去蛋白质酰胺基团,使其溶解度、乳化性及发泡性大大改善。Liao 等<sup>[57]</sup>研究发现使用乙酸去酰基化蛋白质法可降低蛋白质分子量而增加疏水性和表面活性,从而改善蛋白质的溶解性、乳化和起泡性能。因禽蛋蛋白质中也含有大量的酰胺基,该法也可能适用于改善禽蛋蛋白质的功能特性。

化学改性具有操作简单、应用广泛及效果显著等优点,但存在副产物多且难以去除和能耗相对较高等缺陷。如糖基化反应能显著提高蛋粉的凝胶强度,但处理时间比加压和辐照处理的长,且会发生美拉德反应生成副产物,导致蛋粉颜色发生褐变,影响蛋粉感官和品质。

## 3 酶法改性

酶法改性因具有反应条件温和、设备要求低、安全性高和速度快等优点而被应用于提高蛋白质及蛋粉的功能特性。针对不同的性能提升一般需不同的酶,如改善蛋白质的起

性和乳化性需要蛋白酶等;改善凝胶性则用交联性能良好的酶,如:转谷酰胺酶(TGase)、多酚氧化酶(PPO)、过氧化酶(POD)等,其中以 TGase 应用较为广泛<sup>[58]</sup>。

### 3.1 蛋白酶

迟玉杰等<sup>[59-60]</sup>在用蛋白酶提高蛋粉的起泡性方面作了较多研究,发现起泡性能提高是由于轻度酶解使蛋白质分子伸展,表面巯基含量增加,蛋白质分子柔性增大而表面张力降低,更容易扩展和吸附在气-液界面上。涂勇刚等<sup>[61-62]</sup>发现木瓜蛋白酶可改善 EWP 起泡性,但水解过度会产生苦味。Hammershøj 等<sup>[63]</sup>将卵黏蛋白用 4 种蛋白酶(链霉菌蛋白酶 E、碱性蛋白酶、风味蛋白酶、中性蛋白酶)水解 0~24 h 后,发现酶处理卵黏蛋白的溶解度与水解度(DH)成对数增加。风味蛋白酶和中性蛋白酶主要在 0~6 h 时作用,表面疏水性( $S_0$ )增加,但链霉菌蛋白酶 E 和碱性蛋白酶的加入却使  $S_0$  降低。发泡能力在 DH 为 15%~40% 时达到最佳,与表面张力下降密切相关,但酶水解对泡沫稳定性没有显著影响。

### 3.2 TGase

王然等<sup>[64-65]</sup>在研究 TGase 对蛋清凝胶硬度的影响时,发现 TGase 的最适温度为 35 °C;而 Sakamoto 等<sup>[66-67]</sup>研究 TGase 作用于蛋清的最适温度在 50 °C 左右,他们解释是可能由于其他蛋白质的存在保护了 TGase 蛋白质的热稳定性,导致反应最适温度高于酶最适作用温度,其中机理有待进一步研究。徐雅琴等<sup>[68]</sup>发现 TGase 对蛋清粉的作用效果受保温温度的影响较小。Pilar 等<sup>[69]</sup>发现用高压和添加 TGase 得到的蛋白凝胶相比于无酶或加热获得的凝胶,其凝胶质地显著提高,颜色也更深。

酶法改性作为近年 EWP 改性研究的热点,其特点是对改性条件的要求较高,效果明显、安全无副产物。

## 4 各种改性方法的分析比较

各种改性方法的分析比较见表 1。

## 5 展望

近年来蛋粉在其生产、功能研究和应用上已取得较大的进步,但仍然面临诸多挑战。从蛋粉生产到贮藏,影响蛋粉功能性质的因素较多,后期改性则是改善蛋粉功能特性的一种重要手段,而改性方式多样、效果不一。根据国内外研究现状、市场需求和对蛋粉品质影响及对各改性方式的比较,蛋粉未来改性研究方向大概是以下几方面:

表 1 各种改性方法的分析比较

Table 1 Analysis and comparison of various modification methods

改性方法	优点	不足	改性特点
物理改性	产品安全(过度热处理除外),有一定的脱敏和杀菌效果,操作较简单	热处理改性时间一般较长,因设备要求高,高压与辐照处理的成本较大	亲水性物质加入改性主要针对起泡性和乳化性;其他物理改性范围广,对起泡性、凝胶性和乳化性都有影响
化学改性	效果较好,特别是对凝胶的影响较大	引入副产物较多且难以去除,存在化学试剂残留	主要针对凝胶性能的改善
酶法改性	成本低、安全高效、周期短	完全适用 EWP 的酶种类少,限制了酶法改性的应用	改性范围广,对起泡性、凝胶性和乳化性都有影响

(1) 为了获得高特性蛋粉,必须充分研究蛋粉的成分和其中蛋白质的组成与结构,研究蛋粉中主要蛋白质在改性过程中发生的变化以及其相互影响,选择合适的改性方法。

(2) 开发新的化学改性试剂和实施定向化学结构修饰。由于常规化学改性存在专一性差,反应试剂残存以及生成有毒产物等问题,因此,需开发一些环境友好型的化学改性试剂,避免对环境的污染,同时,可基于蛋粉在食品加工体系所需要的功能特性进行化学定向改造。

(3) 利用微生物和基因工程等技术开发出更多条件温和、来源丰富和作用高效的酶,将会对蛋粉行业产生巨大影响,而复合酶法改性则会进一步提升蛋粉品质。

(4) 使用多种改性方式复合的改性方法,如一定量的电离辐射处理可以使蛋白质表面穿孔,这时加入酶可促使其与蛋白质结合,对蛋白质产生更有效的作用。以期该法达到改性需求和脱敏要求,获得高品质蛋粉与食品安全之间的平衡。

#### 参考文献

- [1] 迟玉杰. 浅析中国蛋品加工行业现状及发展方向[J]. 中国家禽, 2014, 36(12): 2-4.
- [2] 虞华, 袁立林, 徐文军. 2017 年我国禽蛋生产形势回顾及 2018 年走势分析[J]. 饲料广角, 2018(2): 21-23, 42.
- [3] 李清清. 我国蛋及蛋制品行业质量调研报告[J]. 质量与标准化, 2013, 4(9): 42-45.
- [4] ASGHARI A K, NORTON I, MILLS T, et al. Interfacial and foaming characterisation of mixed protein-starch particle systems for food-foam applications[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 53: 311-319.
- [5] TALANSIER E, LOISEL C, DELLAVALLE D, et al. Optimization of dry heat treatment of egg white in relation to foam and interfacial properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 496-503.
- [6] IBANOGLU E, ERCELEBI E A. Thermal denaturation and functional properties of egg proteins in the presence of hydrocolloid gums[J]. Food Chemistry, 2007, 101(2): 626-633.
- [7] NICORESCU I, VIAL C, TALANSIER E, et al. Comparative effect of thermal treatment on the physicochemical properties of whey and egg white protein foams[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(4): 797-808.
- [8] LECHEVALIER V, GUÉRIN-DUBIARD C, ANTON M, et al. Effect of dry heat treatment of egg white powder on its functional, nutritional and allergenic properties[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 195: 40-51.
- [9] KATO A, IBRAHIM H R, WATANABE H, et al. Structural and gelling properties of dry-heated egg white protein[J]. J Agric Food Chemistry, 1990, 38(1): 32-37.
- [10] HAMMERSHØJ M, RASMUSSEN H C, CARSTENS J H, et al. Dry-pasteurization of egg albumen powder in a fluidized bed. II. Effect on functional properties: gelation and foaming[J]. Food Science and Technology International, 2006, 41(3): 263-274.
- [11] KATEKHONG W, CHAROENREIN S. Changes in physical and gelling properties of freeze-dried egg white as a result of temperature and relative humidity[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2016, 96(13): 4423-4431.
- [12] 李沛生. 超高压处理蛋白质和多糖胶体特性的变化及其机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 1997: 1-2.
- [13] BRAND J, PICHLER M, KULOZIK U. Enabling egg white protein fractionation processes by pre-treatment with high-pressure homogenization[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 132(2): 48-54.
- [14] PANOZZO A, MANZOCCO L, CALLIGARIS S, et al. Effect of high pressure homogenisation on microbial inactivation, protein structure and functionality of egg white[J]. Food Research International, 2014, 62(8): 718-725.
- [15] SINGH A, SHARMA M, RAMASWAMY H S. Effect of high pressure treatment on rheological characteristics of egg components[J]. International Journal of Food Properties, 2015, 18(3): 558-571.
- [16] VAN Der Plancken I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E. Foaming properties of egg white proteins affected by heat or high pressure treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1410-1426.
- [17] VAN Der Plancken I, VAN LOEY A, HENDRICKX M E. Changes in sulfhydryl content of egg white proteins due to heat and pressure treatment[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(14): 5726-5733.
- [18] GHARBI N, LABBAFI M. Effect of processing on aggregation mechanism of egg white proteins[J]. Food Chemistry, 2018, 252: 126-133.
- [19] ODUEKE O B, FARAG K W, BAINES R N, et al. Irradiation applications in dairy products: a review[J]. Food & Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 1-17.
- [20] PHILLIPS L G, WHITEHEAD D M, KINSELLA J E. Structure-function properties of food proteins[J]. Food Science & Technology International[M]. Salt Lake City: Academic Press, 1994: 251-265.
- [21] WANG Yu-chuan, ZHANG Min, ADHIKARI B, et al. The application of ultrasound pretreatment and pulse-spouted bed microwave freeze drying to produce desalted duck egg white powders[J]. Drying Technology, 2013, 31(15): 1826-1836.
- [22] ZHOU Bin, ZHANG Min, FANG Zhong-xiang, et al. A combination of freeze drying and microwave vacuum drying of duck egg white protein powders[J]. Drying Technology, 2014, 32(15): 1840-1847.
- [23] 车永真. 高凝胶性蛋清粉的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 25-32.
- [24] MANZOCCO L, PANOZZO A, NICOLI M C. Effect of ultraviolet processing on selected properties of egg white[J]. Food Chemistry, 2012, 135(2): 522-527.
- [25] MENDES S P, BRIVIBA K, MÜLLER A, et al. Cytotoxic and oxidative effects of a continuous UV-C treatment of liquid egg products[J]. Food Chemistry, 2013, 138(2/3): 1682-1688.
- [26] KUAN Y H, BHAT R, KARIM A A. Emulsifying and foaming properties of ultraviolet-irradiated egg white protein

- and sodium caseinate [J]. *Journal of Agricultural & Food Chemistry*, 2011, 59(8): 4 111-4 118.
- [27] ODUEKE O B, FARAG K W, BAINES R N, et al. Irradiation applications in dairy products: a review[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2016, 9(5): 1-17.
- [28] ARZENI C, PEREZ O E, PILOSOFF A M. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound[J]. *Food Hydrocolloids* 2012, 29(2): 308-316.
- [29] WANG Yu-chuan, ZHANG Min, ADHIKARI B, et al. The application of ultrasound pretreatment and pulse-spouted bed microwave freeze drying to produce desalted duck egg white powders[J]. *Drying Technology*, 2013, 31(15): 1 826-1 836.
- [30] STEFANOVIĆ A, JOVANOVIĆ J, DOJCINOVIĆ M, et al. Impact of high-intensity ultrasound probe on the functionality of egg white proteins[J]. *Journal of Hygienic Engineering & Design*, 2014, 6: 215-224.
- [31] ODUEKE O B, FARAG K W, BAINES R N, et al. Irradiation applications in dairy products: a review[J]. *Food & Bioprocess Technology*, 2016, 9(5): 1-17.
- [32] SONG H P, KIM B, CHOE J H. et al. Improvement of foaming ability of egg white product by irradiation and its application[J]. *Radiation Physics & Chemistry*, 2009, 78(3): 217-221.
- [33] JIN Yan, LIANG Rong, LIU Jing-bo, et al. Effect of structure changes on hydrolysis degree, moisture state, and thermal denaturation of egg white protein treated by electron beam irradiation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 77: 134-141.
- [34] YOGESH K. Pulsed electric field processing of egg products: a review[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2016, 53(2): 934-945.
- [35] WU Li, ZHAO Wei, YANG Rui-jin, et al. Pulsed electric field (PEF)-induced aggregation between lysozyme, ovalbumin and ovotransferrin in multi-protein system[J]. *Food Chemistry*, 2015, 175: 115-120.
- [36] WU Li, ZHAO Wei, YANG Rui-jin, et al. Aggregation of egg white proteins with pulsed electric fields and thermal processes[J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2016, 96(10): 3 334-3 341.
- [37] 赵伟, 祥瑞金, 张文斌, 等. 高压脉冲电场作用下蛋清蛋白功能性质和结构的变化[J]. *食品科学*, 2011, 32(9): 91-96.
- [38] 范金波, 王瑞环, 周素珍, 等. 不同杀菌方法对蛋清物化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(11): 143-146.
- [39] 李维平. 蛋白质工程[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [40] KOÇ M, KOÇ B, SUSYAL G, et al. Improving functionality of whole egg powder by the addition of gelatine, lactose, and pullulan[J]. *Journal of Food Science*, 2011, 76(9): S508-S515.
- [41] YANG Xin, FOEGEDING E A. The stability and physical properties of egg white and whey protein foams explained based on microstructure and interfacial properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2011, 25(7): 1 687-1 701.
- [42] 王宇, 郑泽慧, 滕月斐, 等. 亲水胶体对鸡蛋清起泡性的影响[J]. *食品科技*, 2012, 37(2): 273-277.
- [43] HUANG Tao, TU Zong-cai, WANG Hui, et al. Promotion of foam properties of egg white protein by subcritical water pretreatment and fish scales gelatin[J]. *Colloids & Surfaces A Physicochemical & Engineering Aspects*, 2017, 512: 171-177.
- [44] 宋俊俊, 迟玉杰. NaCl 浓度、多糖以及小分子乳化剂对全蛋粉乳化性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(6): 22-27.
- [45] 于滨, 迟玉杰. 糖基化对卵白蛋白分子特性及乳化性的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(7): 2 499-2 504.
- [46] 王燕. 低值淡水鱼鱼糜及其制品品质的改良和质地评价研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2013: 29-30.
- [47] 赵卉双, 陈丽娇, 梁鹏, 等. 不同改性方法对蛋白质功能性质的影响研究[J]. *食品工业*, 2015, 36(12): 223-226.
- [48] ZHANG Xi, QI Jun-ru, LI Kang-kang, et al. Characterization of soy  $\beta$ -conglycinin-dextran conjugate prepared by Maillard reaction in crowded liquid system [J]. *Food Research International*, 2012, 49(2): 648-654.
- [49] XU Wei, CHI Yu-jie, CHEN Chen. Improvement of egg albumen powder functional properties by the Maillard reaction in a dry state [J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2012, 10(2): 186-189.
- [50] GENG Xiao-peng, CUI Bing, LI Yan. Preparation and characterization of ovalbumin and carboxymethyl cellulose conjugates via glycosylation [J]. *Food Hydrocolloids*, 2014, 37(37): 86-92.
- [51] MATHEIS G. Phosphorylation of food proteins with phosphorus oxychloride-Improvement of functional and nutritional properties: A review[J]. *Food Chemistry*, 1991, 39(1): 13-26.
- [52] 刘丽莉, 向敏, 康怀彬, 等. 鸡蛋清蛋白磷酸化改性及功能性质的研究[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(6): 154-158.
- [53] LIU Li-li, WANG Huan, REN Guang-yue, et al. Effects of freeze-drying and spray drying processes on functional properties of phosphorylation of egg white protein[J]. *International Journal of Agricultural & Biological Engineering*, 2015, 8(4): 116-123.
- [54] 胥伟, 迟玉杰, 陈晨. 磷酸化改性提高全蛋粉蛋白凝胶性的研究[J]. *中国家禽*, 2011, 33(19): 17-19.
- [55] 姚玉静, 杨晓泉, 邱礼平, 等. 食品蛋白质化学改性研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2006(7): 10-12.
- [56] 王玲, 郑优, 陈厚荣, 等. 提高鸭蛋蛋清蛋白凝胶强度的酰化改性工艺优化[J]. *食品科学*, 2012, 33(10): 39-44.
- [57] LIAO Lan, ZHAO Hai-feng, REN Jiao-yan, et al. Effect of acetic acid deamidation-induced modification on functional and nutritional properties and conformation of wheat gluten [J]. *Journal of the Science of Food & Agriculture*, 2010, 90(3): 409-417.
- [58] 蔡杰, 张倩, 雷苗, 等. 蛋清粉凝胶特性改性研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(13): 395-399.
- [59] 迟玉杰, 胥伟, 李鸿健. 酶法提高蛋清粉起泡功能及其机理的研究[J]. *中国家禽*, 2011, 33(24): 16-19.
- [60] 于翠, 迟玉杰, 胥伟, 等. 酶法改性提高全蛋粉起泡性能的研究[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(21): 214-217.
- [61] 涂勇刚, 聂旭亮, 徐明生, 等. 响应曲面法优化木瓜蛋白酶改善蛋清蛋白起泡性能工艺[J]. *食品科学*, 2011, 32(20): 84-88.

(下转第 195 页)

- tivity and down-regulation of on inflammatory genes [J]. *Journal of Leukocyte Biology*, 2004, 75(6): 1 156-1 165.
- [34] 钱丽红, 陶研, 谢晶. 茶多酚对金黄色葡萄球菌和铜绿假单胞菌的抑菌机理[J]. *微生物学通报*, 2010, 37(11): 1 628-1 633.
- [35] 王慧敏, 朱军莉, 陆海霞, 等. 茶多酚抑制腐败希瓦氏菌机理研究[J]. *茶叶科学*, 2014, 34(2): 149-155.
- [36] 董璐, 代增英, 韩晴, 等. 茶多酚对大肠杆菌抑菌机理的研究[J]. *生物学杂志*, 2015, 32(1): 72-75.
- [37] YI Shu-min, ZHU Jun-li, FU Ling-lin, et al. Tea polyphenols inhibit *Pseudomonas aeruginosa* through damage to the cell membrane[J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2010(144): 111-117.
- [38] LIU Dan, PANG Wen-cong, DING Li-jun, et al. An insight into the inhibitory activity of dihydromyricetin against *Vibrio parahaemolyticus*[J]. *Food Control*, 2016, 67: 25-30.
- [39] 杨楠, 王静, 余友恒, 等. 生姜活性提取物对铜绿假单胞菌的抑制机理研究[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(20): 95-97.
- [40] DIAO Ming-ming, QI Dan-ping, XU Miao-miao, et al. Antibacterial activity and mechanism of monolauryl-galactosylglycerol against *Bacillus cereus* [J]. *Food Control*, 2018 (85): 339-344.
- [41] LIU Ming, LIU Yi-xiang, CAO Min-jie, et al. Antibacterial activity and mechanisms of depolymerized fucoidans isolated from *Laminaria japonica* Ming [J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017(172): 294-305.
- [42] 王巍, 牟德华, 李丹丹. 山楂果胶寡糖的抑菌性能及机理[J]. *食品科学*, 2018, 39(3): 110-116.
- [43] FATMA Gizem Avci, NIHAT Alpugu Sayar, BERNA Sariyar Akbulut. An OMIC approach to elaborate the antibacterial mechanisms of different alkaloids[J]. *Phytochemistry*, 2018, 149: 123-131.
- [44] 朱礼芳. 黄花菜中秋水仙碱的提取及其抑菌性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 75-79.
- [45] LEE Young-seob, HAN Sin-hee, LEE Su-hwan, et al. The mechanism of antibacterial activity of tetrandrine against *Staphylococcus aureus* [J]. *Foodborne Pathog Dis*, 2012, 9 (8): 686.
- [46] 郑翠萍, 权美平, 康莉娜, 等. 茜草丙酮提取物抑菌活性及机制的研究[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(9): 116-119.
- [47] 谢丽玲, 彭齐, 蔡链纯, 等. 黄芩醇提取物对副溶血性弧菌抑制机制的研究[J]. *生物技术通报*, 2015, 31(8): 159-165.
- [48] ZHOU Hai-xu, REN Jia-li, LI Zhong-hai. Antibacterial activity and mechanism of pinosresinol from *Cinnamomum Camphora* leaves against food-related bacteria[J]. *Food Control*, 2017, 79: 192-199.
- [49] YONG Ann-li, OOH Keng-fei, ONG Hean-chooi, et al. Investigation of antibacterial mechanism and identification of bacterial protein targets mediated by antibacterial medicinal plant extracts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 186: 32-36.
- [50] 侯伟峰, 谢晶, 蓝蔚青, 等. 植酸对大肠杆菌抑菌机理的研究[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(2): 443-447.
- [51] 谢晶, 侯伟峰, 汤毅, 等. 植酸对腐败希瓦氏菌的抑菌机理[J]. *食品工业科技*, 2011, 32(10): 85-88.
- [52] ABDO Hassoun, OZLEM Emir Çoban. Essential oils for antimicrobial and antioxidant applications in fish and other seafood products[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2017, 68: 26-36.
- [53] ARANCIBIA M, GIMENEZ B, LOPEZ-CABALLERO M E, et al. Release of cinnamon essential oil from polysaccharide bilayer films and its use for microbial growth inhibition in chilled shrimps[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59: 989-995.
- [54] 赵宏强, 蓝蔚青, 张皖君, 等. 超高压技术在水产品杀菌保鲜中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(22): 369-373.
- [55] 黄锦炉, 李爱华, 钱雪桥, 等. 允饲植物源复方制剂对草鱼 (*Ctenopharyngodon idellus*) 的免疫增强作用研究[J]. *海洋与湖沼*, 2017, 48(3): 576-582.
- [56] 刘唤明, 张文滔, 吴燕燕, 等. 脂肽和茶多酚对副溶血弧菌的协同抑菌效应和机理[J]. *食品科学*, 2017, 38(13): 14-19.
- [57] 蓝蔚青, 谢晶, 侯伟峰, 等. 复合生物保鲜剂对腐败希瓦氏菌的抑菌机理[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(1): 186-192.
- [58] 蓝蔚青, 谢晶, 毛锋, 等. 复合生物保鲜剂对金黄色葡萄球菌的抑菌作用研究[J]. *食品与生物技术学报*, 2014, 33(8): 814-820.
- [59] 蓝蔚青, 车旭, 谢晶, 等. 复合生物保鲜剂对荧光假单胞菌的抑菌活性及作用机理[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(8): 159-165.
- [60] AURELIA Magdalena Pisoschi, ANETA Pop, CECILIA Georgescu, et al. An overview of natural antimicrobials role in food[J]. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 2018, 143: 922-935.

(上接第 190 页)

- [62] LEE W C, CHEN Tian-Chi. Functional characteristics of egg white solids obtained from papain treated albumen[J]. *J Food Eng*, 2002, 51(4): 263-266.
- [63] HAMMERSHØJ M, NEBEL C, CARSTENS J H. Enzymatic hydrolysis of ovomucin and effect on foaming properties[J]. *Food Research International*, 2008, 41(5): 522-531.
- [64] 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.
- [65] 雷明辉, 叶劲松, 张铭容, 等. 谷氨酰胺转氨酶对鸡蛋蛋白热凝固性的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(13): 143-149.
- [66] SAKAMOTO H, KUMAZAWA Y, MOTOKI M. Strength of protein gels prepared with microbial transglutaminase as related to reaction conditions[J]. *J Food Sci*, 1994, 59(4): 866-871.
- [67] 徐东红. 酶法制备高特性蛋清蛋白粉工艺研究[D]. 南昌: 江西农业大学, 2013: 20.
- [68] 徐雅琴. 鸡蛋蛋白粉的凝胶性质改性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2005: 16.
- [69] PILAR T, REYES P. Synergistic action of transglutaminase and high pressure on chicken meat and egg gels in absence of phosphates [J]. *Food Chemistry*, 2007, 104(4): 1 718-1 727.