

物理改性在蛋清蛋白功能特性改善中的应用

Application of physical modification in the improvement of functional properties of egg white protein

吴永艳¹ 王 怡¹ 段文珊¹ 张玉凤¹ 黄 群^{1,2}

WU Yong-yan¹ WANG Qia¹ DUAN Wen-shan¹ ZHANG Yu-feng¹ HUANG Qun^{1,2}

(1. 福建农林大学食品科学学院, 福建 福州 350002; 2. 贵州医科大学食品科学学院, 贵州 贵阳 550025)

(1. College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China;

2. College of Food Science, Guizhou Medical University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

摘要: 文章对近年蛋清蛋白物理改性研究成果进行了综述, 阐述了物理改性方式对蛋清蛋白功能提升的作用, 分析了各种改性方式在提升蛋清蛋白不同功能特性中的特点。

关键词: 蛋清蛋白; 物理改性; 功能特性

Abstract: This paper reviewed the research results of physical modification of egg white protein in recent years, described the role of physical modification methods on the function improvement of egg white protein, and analyzed the characteristics of various modification methods in improving the functional properties of egg white protein.

Keywords: egg white protein; physical modification; functional properties

中国是禽蛋生产大国, 近些年来, 无论是全国居民人均蛋品消费量还是中国的禽蛋产量, 都呈现出可观的增长趋势。1984 年中国产蛋量成为世界第一^[1], 从此在产蛋量方面中国开始位居榜首, 领跑世界 30 余年^[2]。在中国的禽蛋生产中, 鸡蛋占有量最多, 约为 70%^[3]。鸡蛋中含有人体必需的 8 种氨基酸, 其蛋白质消化吸收率高达 98%, 具有极高的营养价值^[4]。但目前鸡蛋的消费以鲜蛋为主, 其加工制品较少^[5]。与国外蛋品市场相比, 中国的蛋品加工企业在生产工艺和技术手段以及产品的市场竞争力等方面都有极大的提升空间^[6]。

鸡蛋由蛋清、蛋黄、蛋壳 3 部分组成, 其中蛋清蛋白质占蛋清重量的 9%~11%^[7]。蛋清蛋白的起泡性、乳化性、凝胶性和溶解性等特性优良使得蛋清在食品工业中

被广泛应用^[8], 如作为烘焙产品^[9]、饮料^[10]、冰激凌^[11]、肉制品^[12]的加工原料。蛋白质改性可以获得功能特性和营养特性更好的蛋白质。目前蛋白质改性的方法包括物理、化学和酶法改性 3 种。化学改性的过程中化学试剂残留会引发安全问题, 并且改性过程产生的副产物较多难以去除^[13], 对食品的质量没有保障; 酶法改性因所用酶的种类较少而受到限制^[14]; 而物理改性虽传统的热处理时间较长且部分改性方法成本较高, 但在实际生产应用的过程中可以选择性地避免这些缺点, 而且相比于化学改性和酶法改性, 物理改性具有能耗低、效率高、产品品质高且安全等优点^[15]。

Jambrak 等^[16-17]研究发现大豆蛋白和乳清蛋白经过 20 kHz 的超声波处理后, 蛋白质溶解性会明显提高; Ibanolu 等^[18]研究发现 300 MPa 压力下处理乳清蛋白会提高其泡沫稳定性; 王丽娟^[19]研究发现菜籽蛋白经过高压脉冲电场处理后溶解度会显著提高; 阎乃珺^[20]研究了动态高压微射流处理浓度为 4% 的小麦面筋蛋白, 结果表明适度的微射流处理可以提高小麦面筋蛋白的溶解度、乳化性、乳化稳定性和泡沫稳定性; Sun 等^[21]研究发现乳清蛋白经球磨处理后表面疏水性和泡沫稳定性提高。目前物理改性方法已被广泛应用于多种蛋白质功能特性的提升, 同样, 通过物理改性的方法来提升蛋清蛋白的功能特性具有良好的发展前景。文章拟对近年蛋清蛋白物理改性研究成果进行综述, 以期对蛋清蛋白功能特性改善的后续研究提供参考。

1 传统物理改性方式对蛋清蛋白功能提升的影响

1.1 热处理

热处理作为一种常用的蛋白质改性方式, 会使蛋白质高级结构的构象发生不可逆的改变, 从而改变蛋白质的理化性质^[22], 使其功能特性得到改善。刘超^[3]12-20 研

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(编号: 31871732)

作者简介: 吴永艳, 女, 福建农林大学在读硕士研究生。

通信作者: 黄群(1977—), 男, 福建农林大学副教授, 博士后。

E-mail: huangqunlaoshi@126.com

收稿日期: 2020-11-03

究发现热处理的温度和时间对蛋清蛋白的起泡性有不同的影响作用;质量浓度为 3 g/100 mL 的蛋清蛋白溶液于 30 °C 处理 20 min 后其起泡性会得到明显改善,这是因为热改性使蛋清蛋白质的柔韧性和表面疏水性增加;此前,Kato 等^[23]研究发现蛋白质的柔韧性与发泡性密切相关。热改性效果与蛋清液浓度、加热温度和加热时间密切相关。Plancken 等^[24]研究发现在 50~85 °C 下加热蛋清蛋白液,会使蛋白质的结构展开。这可能会改善蛋清蛋白液的发泡特性^[25],50~85 °C 加热处理不仅能提高蛋清蛋白起泡性还具有杀菌的效果。有研究^[26]发现在适当的热处理过程中,蛋白质的亲水基团与疏水基团保持平衡,所以热改性不会显著改变蛋清蛋白的溶解性。但是 Wu 等^[27]研究发现,在 61 °C 下加热处理蛋清蛋白溶液 4 min 后,其可溶性蛋白的含量将减少 23.95%,而当温度改为 70 °C 加热处理相同时间后,可溶性蛋白减少率达到 29.78%,表明较高温度下处理蛋清蛋白溶液不利于提升蛋清蛋白的溶解度,所以在改善某个功能性质的同时也要考虑不降低其他功能性质。热处理改性时不适合的温度会显著降低蛋清蛋白的溶解性能,所以利用热改性蛋白质时要严格控制加热温度。Chang 等^[28]研究发现热改性会提高蛋清蛋白的乳化性,因为热处理后蛋白质表面会暴露出更多的疏水性氨基酸和净电荷,使蛋白质能更好地吸附在油水界面。热处理不但可以提升蛋清蛋白的起泡性和乳化性,也能改善蛋清蛋白的凝胶性。Kato 等^[29]研究发现,在 80 °C 下将蛋清蛋白热干燥近 10 d 后,其发泡能力、乳化性和凝胶性均得到很大提升;乳化性的提高是由于热处理后蛋白质的表面疏水性增加,凝胶性的提高是由于热处理过程中蛋白质内部的巯基被暴露并且可以与氧气结合发生氧化,导致部分巯基转变成二硫键^[30];此种处理方式所需时间较长,目前很少应用。由于蛋白质变性的程度受温度影响较大,所以利用热处理来改善蛋清蛋白功能特性时,要控制好加热温度和时间,否则可能会产生相反的效果^[31],除此之外,也要考虑过度热处理可能引发的食品安全问题。热处理改性蛋白质具有易操作、应用广泛等优点,但此方法的效率低、能耗大等缺点也不可避免。

1.2 冷冻处理

蛋白质的冷冻改性是指冻藏条件下会破坏蛋白质分子紧密、稳定的立体结构,导致蛋白质的理化性质和功能特性发生改变。胥伟等^[32]研究经巴氏杀菌(59.5 °C、4.5 min)预处理的蛋清液在-18 °C 冷冻处理后功能性质的改变,发现蛋清蛋白的起泡性呈先降低后升高但总体降低的趋势;蛋清蛋白的泡沫稳定性呈先降低后升高但总体升高的趋势;凝胶性随冷冻时间的延长而升高;冷冻贮藏 21 d 后,蛋清蛋白的泡沫稳定性甚至可达 100%,凝胶硬度由最初的 198 g 增高至 291 g,此种处理条件在提高蛋清蛋白的泡沫稳定性和凝胶性的同时也降低了起泡

性。这可能是由于冷冻初期会导致蛋清蛋白中的部分共价键断裂,暴露出疏水基团和巯基,使蛋清蛋白的溶解度降低,进而降低其起泡性^[33];而疏水基团的增多有利于空气—水界面膜的形成,并且蛋清蛋白中各种蛋白质分子之间的相互作用力增强,使之形成更加稳定的二维网状结构^[32],导致泡沫稳定性增高;疏水基团和巯基的暴露使蛋白质分子间疏水相互作用增强,从而提高了凝胶性;随着冷冻时间的延长,蛋清卵黏蛋白(一种抑制蛋清液起泡性^[34],有助于泡沫稳定性^[35]的物质)形成的复合物会逐渐解离出,从而有助于泡沫的形成;疏水基团和巯基的进一步暴露,会使蛋白质分子在非极性键的作用下形成更大的聚集体,降低水—空气界面膜的稳定性,这是蛋清蛋白的泡沫稳定性降低的原因^[36],持续冷冻过程中,蛋清蛋白的内部结构不断发生改变,也将使其功能性质在不同时间段发生不同的变化。利用冷冻的方法对蛋白质进行改性时,要精准把握冷冻时间对其功能性质改善的不同影响,以便确定最佳的冷冻改性条件来达到最优改性效果。冷冻方法改性蛋白质周期较长,并且蛋白质功能性质的改变随冷冻时间的变化规律难以精准掌握,目前已很少有研究者单纯用此方法来改性蛋白质。现在研究较多的是冷冻协同其他方法的蛋白质改性或者将冷冻作为蛋白质改性前的一种预处理方式。

2 新型物理改性方式在蛋清蛋白功能提升中的作用

2.1 超声处理

蛋白质的超声改性是指利用超声波产生的直进流作用和空化作用产生高温高压,从而改变部分蛋白质的空间结构^[37],进而改善功能性质。超声波技术包括低频率高场强超声和高频率低场强超声两种^[38]。高强度超声可使蛋白质变性和聚集^[39]。Sun 等^[40]研究了单、双频高能超声处理对蛋清蛋白功能性质的影响,结果表明,蛋清粉经超声处理后其溶解性和泡沫稳定性得到了显著提升(特别是在 25 °C 双频 20/40 kHz 处理 30 min 时);在单频率 40 kHz、温度 25 °C 下处理 30 min 时,蛋清粉的起泡性提升效果最佳。总之,高能超声处理后蛋清粉的溶解性、发泡性和泡沫稳定性都显著高于未处理的样品,这一发现为蛋清蛋白的改性提供了一个新的思路,但是具体的超声处理条件要视实际生产需求而定。Sheng 等^[41]研究发现经 360 W 功率处理 10 min 后,蛋清蛋白的发泡性能提高至对照组的 4.9 倍。以上结果表明超声处理是显著提升蛋清蛋白起泡性的一个优良方法。经超声处理后蛋白质结构变疏松,同时表面游离巯基和疏水性增加,这些变化对改善蛋白质发泡性是有利的。李弓中等^[42]研究了在超声频率 20 kHz、输出功率 580 W 条件下处理 0~30 min 后蛋清蛋白泡沫稳定性的变化,发现此种超声处理总体降低了蛋清蛋白的泡沫稳定性,与王一博^[35]27-28

研究得到的结果一致,泡沫稳定性降低的原因是蛋清液的黏度降低,从而影响蛋清蛋白质分子间形成稳定的网状结构,所以蛋清液中的泡沫难以稳定的维持形态,较易塌陷。Arzeni等^[43]研究发现在20 kHz, (4.27 ± 0.71) W下超声处理不会改变蛋清蛋白的凝胶性,原因可能是此种处理条件过于温和,对蛋白质结构的影响不大。孙卓等^[44]通过正交试验优化超声处理条件,结果表明在超声功率为120 W的条件下对体积分数为50%的蛋清液处理10 min后再喷雾干燥可以显著提高蛋清粉的速溶性能,即提高了蛋清粉的溶解性,此研究结果在蛋清粉生产工业中有重要意义。超声改性具有环保、能耗低、能很好地保持食品品质等优点,所以在食品工业中应用广泛。选择超声处理对蛋清蛋白进行改性时,要根据生产所需的特定功能性质来选择适当的超声类型和处理条件。

2.2 高压脉冲电场处理

高压脉冲电场作为一种非热杀菌技术,能够很好地保持食品品质,所以在食品工业中得到了广泛应用^[45]。目前,利用高压脉冲电场处理蛋清蛋白从而提升其功能特性的研究已有报道。张铁华等^[46]研究发现高压脉冲电场处理特别是脉冲强度大于35 kV/cm时会显著降低蛋清蛋白的溶解度;而脉冲强度为30 kV/cm时能最大程度地提高蛋清蛋白的乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性。赵伟等^[47]发现经高压脉冲电场处理后蛋清蛋白的溶解度下降,虽然下降程度受处理参数的影响,但与未处理组相比,总体呈下降趋势,这势必会对蛋清蛋白的其他功能性质造成影响,此结果与张铁华等^[46]的研究结果一致;35 kV/cm高压脉冲电场处理300 μ s时,蛋清蛋白的起泡性、泡沫稳定性、乳化性和乳化稳定性都得到最大提升,分别是未处理组的1.30, 1.43, 1.60, 1.28倍,究其原因,可能是适当的高压脉冲电场处理使得蛋清蛋白中原本比较紧密的蛋白质结构发生改变,结构展开,从而提升了起泡性和泡沫稳定性;乳化功能的提高是由于疏水基团和疏基的外露;35 kV/cm高压脉冲电场处理300 μ s可以作为高压脉冲电场改性蛋清蛋白的一个很好选择,但是改性过程中不能忽略此条件对溶解性能的不利影响。Wu等^[48]研究发现25 kV/cm的高压脉冲电场处理后蛋清蛋白的溶解度降低,且随处理时间的延长降低程度增大,可能是高压脉冲电场处理过程中形成了聚集物,从而导致可溶性蛋白含量减少。从高压脉冲电场处理对蛋清蛋白不同方面功能特性的影响来看,如果单纯以提高蛋清蛋白的溶解性为目的,高压脉冲电场处理显然不是最佳选择,但是可以用高压脉冲电场处理蛋清蛋白来提高其乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性。在改性过程中最好能探索出一种既有效提高蛋清蛋白其他方面功能特性,又对其溶解性影响较小的条件。

2.3 超高压处理

超高压技术是一种在食品工业中应用广泛并被誉为

世界十大尖端科技之一的非热加工技术^[49]。利用超高压对蛋白质进行改性不仅不会破坏蛋白质的共价键,还能很好地保留蛋白质的营养品质,并且具有能耗低,操作简单等优点^[50]。超高压技术包括静态超高压和动态超高压均质。涂宗财等^[51]利用动态超高压均质的方法处理质量分数为80%(蛋清/溶液)的蛋清液,研究发现20 mL蛋清液经160 MPa的高压压力处理后,其泡沫高度可提高至原来的2.35倍,经研究发现此种处理条件会促使蛋清中不同组分的蛋白质进一步接触,从而提高了蛋清液的起泡性。Plancken等^[52]在10~60 $^{\circ}$ C下采用400~700 MPa的静态超高压处理蛋清蛋白并对其起泡性的变化进行研究,结果表明处理后的蛋清蛋白更加湿润滑腻,泡沫也更加致密,极大程度上提高了蛋清蛋白的起泡性,分析原因可能是适度的超高压处理破坏了蛋白质分子表面疏水性和静电相互作用^[53],并且作用温度较为温和,不会对其他功能性质产生较大的不利影响。总之,两种类型的超高压处理方式都会提高蛋清蛋白的起泡性。此外,Plancken等^[24]研究发现,在不同的温度和压力下,超高压处理蛋白溶液后其发泡能力都得到了提高,因为处理后蛋白质—蛋白质之间的相互作用增强有利于蛋清蛋白起泡性的提高。此外,Iametti等^[54]在以NaCl或蔗糖作为保护剂的条件对蛋白质进行高压处理,结果发现添加保护剂后蛋白质的凝胶强度和起泡性比未添加保护剂的理想;吴溪^[55]采用超高压辅助木瓜蛋白酶来改善大豆分离蛋白的起泡性,这些都可以为利用超高压处理来改性蛋清蛋白功能性质的未来研究提供新思路。

2.4 球磨处理

球磨处理通过不同尺寸的研磨球与物料颗粒间产生碰撞与摩擦的作用,改变蛋白质的分子结构进而改变其功能性质^[56],有干法球磨和湿法球磨两种方式。目前,球磨法在化工领域的应用研究较多,但其凭借绿色、快捷、成本低等优点,被广泛应用于食品加工领域^[57]。近年来学者开始利用球磨法来改善蛋白质的功能性质。Liu等^[58]研究发现,对大豆分离蛋白进行适当球磨处理可以提高其持水性和凝胶特性。Sun等^[59]研究发现,乳清蛋白浓缩物经过球磨处理后提高了其泡沫稳定性。Zhang等^[60]研究发现,球磨处理可以提高食品蛋白质的乳化性。Li等^[61-62]研究发现,经24 h球磨处理之后,卵白蛋白溶液的表面疏水性提高至原来的1.5倍以上,而表面疏水性的变化会影响其起泡性能;此外,卵白蛋白是蛋清液中含最高的一种蛋白质^[63],它的存在可能对蛋清液的起泡性有很大影响。谭文等^[64]研究了球磨处理对蛋清蛋白起泡性的影响,发现对蛋清蛋白粉进行球磨处理后,其溶液的起泡性未发生明显变化,但是在球磨时间为40 min时蛋清蛋白液的泡沫稳定性比处理前的样品增加了4.187 5倍,分析原因,适当的球磨处理改善了蛋白质的分子柔性,使更多的蛋白参与泡沫的形成,从而更好地维持

泡沫的形态,使其保持更高的泡沫稳定性,可见此方法对蛋清蛋白起泡性和泡沫稳定性的改善都是有利的。此外,球磨处理还可以显著提高蛋清蛋白的水解度,这一改变可能会降低其致敏性^[65],这是利用球磨工艺对蛋清蛋白进行改性的显著优点之一。目前应用球磨工艺对蛋清蛋白进行改性的研究尚未透彻,在对蛋清蛋白的乳化性、乳化稳定性、凝胶性和溶解性方面的影响以及影响机理仍存在诸多空白,值得后续研究。

2.5 动态高压微射流处理

动态高压微射流是一种新兴的均质化技术,在食品工业上属于一种“绿色”技术^[66],已被广泛应用于蛋白质的改性^[67]。它凭借产生的高速流体撞击、热力、气穴、振荡和涡旋等综合作用^[68],使蛋白质的结构发生改变而引起蛋白质功能性质的改变。涂宗财^[69]研究了动态高压微射流处理对蛋清蛋白功能性质的影响,结果表明,对于质量分数为 6% 和 8% (蛋清/溶液) 的蛋清蛋白溶液来说,处理压力为 160 MPa 时蛋白液的起泡性最好,而对于质量分数为 4% (蛋清/溶液) 的蛋清蛋白溶液,处理压力为 100 MPa 时起泡性最佳,说明在蛋白质改性的过程中,针对不同浓度的蛋清蛋白溶液,要灵活改变处理条件进行改性;对乳化性的影响方面,动态高压微射流处理质量分数为 2% 和 4% (蛋清/溶液) 的蛋清蛋白溶液时,其乳化性呈先升高后降低的趋势,但是对于质量分数为 6% 和 8% (蛋清/溶液) 的蛋清蛋白溶液来说,乳化性整体呈降低趋势,所以无法通过动态高压微射流处理来改善这两种蛋清蛋白溶液的乳化性。总体来看,动态高压微射流处理对蛋清蛋白乳化性没有很好的改善效果,所以该法不是提升蛋清蛋白溶液乳化特性的很好选择;由于不同的处理条件会产生不同的改性效果,所以在实际生产应用中,要探究最优处理条件,以期达到最佳改性效果。迟玉杰等^[70]研究发现动态高压微射流处理蛋清蛋白可以降低其致敏性并提高消化效率,降低致敏性是因为处理后提高了蛋清蛋白的水解度,这一发现有助于推广动态高压微射流处理在改性蛋清蛋白功能性质中的应用。关于动态高压微射流对其他种类蛋白质改性的研究,Liu 等^[71]研究发现,经压力分别为 80 MPa 和 120 MPa 的动态高压微射流处理后,卵清蛋白的起泡性和乳化性均有所提高。Shen 等^[72]研究发现,动态高压微射流处理未加热和预热大豆蛋白分离物后,其溶解度、乳化性、二硫键和表面疏水性均被提高。Chen 等^[73]研究发现动态高压微射流处理可以提高 β -乳清蛋白的消化率并降低其抗原性。动态高压微射流方法在多种蛋白质的改性方面都表现出很大优势,不仅可以作为一种有效的蛋白质改性方法,还可以作为一种降低蛋白质致敏性并提高其消化率的技术手段。

3 结论

文章综述了 7 种传统或新型的蛋白质改性方法在蛋

清蛋白功能特性提升中的作用。其中,热处理可以用来改善蛋清蛋白的起泡性、泡沫稳定性、乳化性和凝胶性。冷冻处理可以提升蛋清蛋白的泡沫稳定性和凝胶特性。超声处理可以提高蛋清蛋白的溶解性、起泡性和泡沫稳定性。高压脉冲电场处理能够提高蛋清蛋白的乳化性、乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性。超高压和动态高压微射流处理对蛋清蛋白起泡性的提高效果显著。球磨处理会显著提高蛋清蛋白溶液的泡沫稳定性以及水解度。在选择物理方法对蛋白质进行改性时,要考虑不同的处理方法对蛋白质不同方面功能特性的影响,以便选用到最合适的改性方法从而达到最优的改性效果。

参考文献

- [1] 张冰. 我国禽蛋生产、贸易及国际竞争力研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2005: 1.
- [2] 张华智. 当前我国禽蛋加工的主要方式与未来发展的几点建议[J]. 广西畜牧兽医, 2016, 32(4): 213-215.
- [3] 刘超. 蛋清蛋白的改性及其起泡特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2008.
- [4] CHEN Chen, CHI Yu-jie. Antioxidant, ACE inhibitory activities and functional properties of egg white protein hydrolysate[J]. Journal of Food Biochemistry, 2012, 36(4): 383-394.
- [5] 许美玉, 王希希, 黄群, 等. 酶法改善卵白蛋白乳化性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(8): 150-155.
- [6] 郑平. 关于加快禽蛋加工业发展的思考[J]. 台湾农业探索, 2011(3): 46-49.
- [7] 胡书蒙, 温佳奇, 苏亮, 等. 蛋清加工利用及蛋清活性肽的研究进展[J]. 食品科技, 2017, 42(12): 261-264.
- [8] 王希希, 许美玉, 林超, 等. 湿法糖基化改善卵白蛋白的起泡性[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, 46(5): 595-600.
- [9] SADAHIRA Mitie S, RODRIGUES Maria I, AKHTAR Mahmood, et al. Influence of pH on foaming and rheological properties of aerated high sugar system with egg white protein and hydroxypropylmethylcellulose [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 89: 350-357.
- [10] HUANG Tao, TU Zong-cai, WANG Hui, et al. Promotion of foam properties of egg white protein by subcritical water pre-treatment and fish scales gelatin[J]. Physicochemical and Engineering Aspects, 2017, 512: 171-177.
- [11] 李鑫. 基于界面特性解析蛋清蛋白体系泡沫性质及其调控机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020: 1.
- [12] 李俐鑫, 迟玉杰, 于滨. 蛋清蛋白凝胶特性影响因素的研究[J]. 食品科学, 2008, 29(3): 46-49.
- [13] 李玉珍, 肖怀秋, 赵谋明, 等. 花生蛋白质改性机理及应用研究进展[J]. 粮食科技与经济, 2016, 41(5): 65-69.
- [14] 何伟明, 叶劲松, 师洁. 蛋白质改性对禽蛋粉加工性能影响的研究进展[J]. 食品与机械, 2018, 34(10): 185-190, 195.
- [15] 郭超凡, 王云阳. 蛋白质物理改性的研究进展[J]. 食品安全

- 质量检测学报, 2017, 8(2): 428-433.
- [16] JAMBRAK A R, LELAS V, MASONT J, et al. Physical properties of ultrasound treated soy proteins[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 93(4): 386-393.
- [17] JAMBRAK A R, MASON T J, LELAS V, et al. Effect of ultrasound treatment on solubility and foaming properties of whey protein suspensions[J]. Journal of Food Engineering, 2008, 86(2): 281-287.
- [18] IBANOLU E, KARATAS S. High pressure effect on foaming behaviour of whey protein isolate[J]. Journal of Food Engineering, 2001, 47(1): 31-36.
- [19] 王丽娟. 脉冲电场处理对双低油菜出油率及油脂和蛋白质性质的影响[D]. 扬州: 扬州大学, 2016: 53-54.
- [20] 阎乃珩. 动态高压微射流对小麦面筋蛋白质性质和结构的影响[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 15-26.
- [21] SUN Chan-chan, LIU Rui, WU Tao, et al. Effect of superfine grinding on the structural and physicochemical properties of whey protein and applications for microparticulated proteins[J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(5): 1 637-1 643.
- [22] 吴雯倩, 左姣丽, 肖冰, 等. 热处理对蛋白质的影响[J]. 食品安全导刊, 2015(36): 45.
- [23] KATO Akio, FUJIMOTO Kumiko, MATSUDOMI Naotoshi, et al. Protein flexibility and functional properties of heat-denatured ovalbumin and lysozyme[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1986, 50(2): 417-420.
- [24] PLANCKEN Iesal Van der, LOEY Ann Van, HENDRICKX Marc E. Foaming properties of egg white proteins affected by heat or high pressure treatment[J]. Journal of Food Engineering, 2006, 78(4): 1 410-1 426.
- [25] MANZOCCO Lara, PANOZZO Agnese, NICOLI Maria Cristina. Effect of pulsed light on selected properties of egg white[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2013, 18: 183-189.
- [26] 迟玉杰, 鲍志杰, 程缘. 蛋清蛋白质热处理改性及其热聚集行为的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 3 951-3 954.
- [27] 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 and Agriculture, 2016, 96(10): 3 334-3 341.
- [28] CHANG Cui-hua, NIU Fu-ge, SU Yu-jie, et al. Characteristics and emulsifying properties of acid and acid-heat induced egg white protein[J]. Food Hydrocolloids, 2016, 54: 342-350.
- [29] KATO A, IBRAHIM H R, WATANABEH, et al. New approach to improve the gelling and surface functional properties of dried egg white by heating in dry state[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1989, 37(2): 433-437.
- [30] DUAN Xiang, LI Mei, SHAO Jing, et al. Effect of oxidative modification on structural and foaming properties of egg white protein[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 75: 223-228.
- [31] KATO Akio, OSAKO Yukiko, MATSUDOMI Naotoshi, et al. Changes in the emulsifying and foaming properties of proteins during heat denaturation[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1983, 47(1): 33-37.
- [32] 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.
- [33] 潘珂. 冷冻工艺对面筋起泡特性的影响[J]. 粮油加工, 2008(8): 81-82.
- [34] 张立斌, 陈小侠, 吴汉东. 鸡蛋清卵黏蛋白分离工艺研究[J]. 饲料研究, 2017(5): 27-29, 43.
- [35] 王一博. 高起泡性蛋清液制备与应用研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.
- [36] 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.
- [37] SHRIVER Sandra K, YANG Wade W. Thermal and non-thermal methods for food allergen control[J]. Food Engineering Reviews, 2011, 3(1): 26-43.
- [38] SORIA Ana Cristina, VILLAMIEL Mar. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 21(7): 323-331.
- [39] ODUEKE Oluwakemi B, FARAG Karim W, BAINES Richard N, et al. Irradiation applications in dairy products: A review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2016, 9(5): 751-767.
- [40] SUN Jun, MU Yao-yao, JING Hui, et al. Effects of single- and dual-frequency ultrasound on the functionality of egg white protein [J]. Journal of Food Engineering, 2020, 277: 109902.
- [41] SHENG Long, WANG Yi-bo, CHEN Jia-hui, et al. Influence of high-intensity ultrasound on foaming and structural properties of egg white[J]. Food Research International, 2018, 108: 604-610.
- [42] 李弓中, 赵英, 王俊彤, 等. 超声处理对蛋清蛋白结构性质及蛋清液起泡性的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 68-75.
- [43] ARZENI C, MARTÍNEZ K, ZEMA P, et al. Comparative study of high intensity ultrasound effects on food proteins functionality[J]. Journal of Food Engineering, 2012, 108(3): 463-472.
- [44] 孙卓, 李佩珊, 盛龙, 等. 超声处理对蛋清粉速溶性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(21): 78-86.
- [45] LI Xiang, FARID Mohammed. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies[J]. Journal of Food Engineering, 2016, 182: 33-45.
- [46] 张铁华, 殷涌光, 刘静波. 高压脉冲电场(PEF)对蛋清蛋白功能特性的影响[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 98-102.
- [47] 赵伟, 杨瑞金, 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.

- [48] WU Li, ZHAO Wei, YANG Rui-jin, et al. Effects of pulsed electric fields processing on stability of egg white proteins[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 139: 13-18.
- [49] 许世闯, 徐宝才, 奚秀秀, 等. 超高压技术及其在食品中的应用进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2016, 37(5): 111-117.
- [50] LULLIEN-PELLERIN V, BALNY C. High-pressure as a tool to study some proteins' properties: Conformational modification, activity and oligomeric dissociation[J]. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2002, 3(3): 209-221.
- [51] 涂宗财, 豆玉新, 刘成梅, 等. 动态超高压均质对蛋清蛋白溶液的起泡性、成膜性的影响[J]. *食品工业科技*, 2008, 29(6): 77-78, 81.
- [52] PLANCKEN Iesal Van der, GRAUWET Tara, OEY Indrawati, et al. Impact evaluation of high pressure treatment on foods: Considerations on the development of pressure-temperature-time integrators (pTTIs) [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2007, 19(6): 337-348.
- [53] CHAPLEAU N, DE LAMBALLERIE-ANTON M. Improvement of emulsifying properties of lupin proteins by high pressure induced aggregation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2003, 17(3): 273-280.
- [54] 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.
- [55] 吴溪. 超高压辅助木瓜蛋白酶改善大豆分离蛋白起泡性及其应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017: 8.
- [56] RAMADHAN Kurnia, FOSTER Tim J. Effects of ball milling on the structural, thermal, and rheological properties of oat bran protein flour[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 229: 50-56.
- [57] HE Sheng-hua, QIN Yi-bing, WALID Elfalleh, et al. Effect of ball-milling on the physicochemical properties of maize starch[J]. *Biotechnology Reports*, 2014, 3: 54-59.
- [58] LIU Bo-hui, WANG Hui, HU Tan, et al. Ball-milling changed the physicochemical properties of SPI and its cold-set gel [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 158-165.
- [59] SUN Chan-chan, LIU Rui, WU Tao, et al. Effect of superfine grinding on the structural and physicochemical properties of whey protein and applications for microparticulated proteins[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2015, 24(5): 1 637-1 643.
- [60] ZHANG Qin-jun, YANG Lu, HU Shu-ting, et al. Consequences of ball-milling treatment on the physicochemical, rheological and emulsifying properties of egg phosphatidylcholine[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 95: 418-425.
- [61] LI Mei, LI Meng-meng, TAN Wen, et al. Effects of ball-milling treatment on physicochemical and foaming activities of egg ovalbumin[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 261: 158-164.
- [62] LIU Fu-guo, ZHANG Shu-han, LI Jun-yi, et al. Recent development of lactoferrin-based vehicles for the delivery of bioactive compounds: Complexes, emulsions, and nanoparticles[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 79: 67-77.
- [63] 黄群, 杨万根, 金永国, 等. 卵白蛋白起泡性影响因素研究[J]. *食品与机械*, 2014, 30(5): 54-56, 63.
- [64] 谭文, 张钦俊, 万鹏宇, 等. 球磨处理对鸡蛋蛋清蛋白结构、性质及起泡性的影响[J/OL]. *食品科学*. [2020-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20200924.1333.002.html>.
- [65] TONG Ping, GAO Jin-yan, CHEN Hong-bing, et al. Effect of heat treatment on the potential allergenicity and conformational structure of egg allergen ovotransferrin[J]. *Food Chemistry*, 2012, 131(2): 603-610.
- [66] GUO Xiao-juan, CHEN Ming-shun, LI Yu-ting, et al. Modification of food macromolecules using dynamic high pressure microfluidization: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 100: 223-234.
- [67] ZHONG Jun-zhen, LIU Wu, LIU Cheng-mei, et al. Aggregation and conformational changes of bovine β -lactoglobulin subjected to dynamic high-pressure microfluidization in relation to antigenicity[J]. *Journal of Dairy Science*, 2012, 95(8): 4 237-4 245.
- [68] 刘伟. 动态高压微射流技术对酶的活性与构象变化的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2009: 11.
- [69] 涂宗财. 蛋白质动态超高压微射流改性研究及机理初探[D]. 南昌: 南昌大学, 2007: 98-115.
- [70] 迟玉杰, 李胤楠, 赵英. 动态高压微射流对蛋清蛋白致敏性及体外消化的影响[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 312-318.
- [71] LIU Guang-xian, TU Zong-cai, WANG Hui, et al. Monitoring of the functional properties and unfolding change of Ovalbumin after DHPM treatment by HDX and FTICR MS: Functionality and unfolding of Oval after DHPM by HDX and FTICR MS[J]. *Food Chemistry*, 2017, 227: 413-421.
- [72] SHEN Lan, TANG Chuan-he. Microfluidization as a potential technique to modify surface properties of soy protein isolate MS: Functionality and unfolding of Oval after DHPM by HDX and FTICR MS[J]. *Food Research International*, 2012, 48(1): 108-118.
- [73] CHEN Hao, HONG Qi-tong, ZHONG Jun-zhen, et al. The enhancement of gastrointestinal digestibility of β -LG by dynamic high-pressure microfluidization to reduce its antigenicity[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 2019, 54(5): 1 677-1 683.