

蛋白质物理改性的研究进展

郭超凡, 王云阳*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 杨凌 712100)

摘要: 蛋白质是食品中的重要组分之一, 其功能特性对食品的品质至关重要。蛋白质改性主要包括化学法、酶法、物理法以及基因工程等。相对于其他改性方法, 蛋白质的物理改性方法具有廉价、安全、处理时间短以及对产品营养性能影响较小等优点。而新兴的物理改性方法又具有低能耗、低温处理、产品品质高以及低消耗等优点。本文介绍了超高压、脉冲电场、超声、辐照、微波和射频处理等几种新的物理改性方法以及改性对蛋白功能性的影响, 以及各种方法亟需解决的问题等。目前, 新兴的物理改性方法还处于实验室阶段, 未广泛应用于食品工业中, 并且关于部分方法改性机理研究较少, 研究材料种类较少, 还需进一步扩展相关知识从而为蛋白质改性加工提供新思路。

关键词: 蛋白质改性; 超高压; 脉冲电场; 超声; 辐照; 微波; 射频

Research progress on physical modification methods of protein

GUO Chao-Fan, WANG Yun-Yang*

(College of Food Science & Engineering, Northwest Agriculture & Forestry University, Yangling 712100, China)

ABSTRACT: Protein is one of the most important components of food, and its functional properties are very important to the quality of food. The main protein modification methods mainly include chemical, enzyme, physical and genetic engineering, *etc.* Compared with other methods, physical modification has lots of advantages such as low cost, safety, short treatment time and smaller effects on nutrition. Moreover, novel Physical modification methods have advantages such as low energy cost, low treatment temperature, high product quality and low consumption in protein functionality. This paper summarized several novel physical modification techniques, such as high pressure treatment, pulsed electric field, ultrasonic, irradiation, microwave and radio frequency, as well as their effects on functional properties of protein and each pressing problems. Nowadays, the novel physical modification methods are still in the laboratory stage, not widely used in food industry. There is less information about the mechanism of some novel modification methods and materials types used in these methods. So we still need to furtherly extend knowledge so as to provide new ideas for protein modification processing.

KEY WORDS: protein modification; high pressure treatment; pulsed electric field; ultrasonic; irradiation; microwave; radiofrequency

基金项目: 国家自然科学基金项目(31371854)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (31371854)

*通讯作者: 王云阳, 博士, 教授, 主要研究方向为食品工程新技术、食品安全控制技术、传统食品工业化。E-mail: wyy10421@163.com

*Corresponding author: WANG Yun-Yang, Ph.D, Professor, College of Food Science & Engineering, Northwest A & F University, No.22, Xinong Road, Yangling 712100, China. E-mail: wyy10421@163.com

1 引言

蛋白质是食品中的重要组成部分之一。蛋白质的功能特性是指食品体系在加工、贮藏、制备和消费过程中影响蛋白质在食品体系中性能的物理性质和化学性质^[1]。蛋白质的功能特性主要体现在 3 个方面: (1)水合特性: 溶解性、分散性、持水性、增稠性、溶胀性、润湿性及脱水收缩作用等; (2)乳化特性: 主要受蛋白质表面活性影响, 包括乳化性、发泡性、持水性及持油性等; (3)流变和质构特性: 主要受蛋白质结构(构型、粒径和氨基酸组成)影响, 主要包括凝胶性、弹性、内聚性和咀嚼性等^[2]。蛋白质的功能特性能够反映蛋白质的组成、结构、构象、理化性质等因素与食品中其他组分及环境的相互作用^[3]。

蛋白质改性是通过改变蛋白质一个或几个理化性能以加强或改善蛋白质功能性、抑制酶活性以及消除物料中的有害物质, 从而实现除去异味和提高营养利用率等目的。目前, 关于蛋白改性的研究主要集中在物理改性、化学改性、酶法改性和基因工程改性等方面^[4,5]。其中, 酶法成本较高, 基因工程改性蛋白的食品安全性短时间内难以知晓, 化学改性可能会产生或引入有毒物质或影响食品风味的物质。相较于其他改性方法, 物理改性蛋白法具有廉价、安全、处理时间短以及对产品营养性能破坏小等优点, 越来越受到关注^[6]。

物理法改性蛋白是指利用加热、机械作用、声波以及电磁场等方式定向改变蛋白质的高级结构和蛋白质分子间聚集方式, 一般不改变蛋白质的一级结构。本文主要介绍了新兴的几种蛋白质物理改性方法, 如超高压、脉冲电场、超声波、伽马射线辐照、微波和射频处理, 综述了改性对蛋白功能特性的影响, 并且对比介绍了其仍然存在的问题。

2 传统物理改性方法

目前传统的物理加工方法如加热、挤压、冷冻以及冻融等蛋白质改性方法已经广泛应用于食品加工中。其中, 热处理能够改变蛋白质的二级结构并且使蛋白质通过疏水作用、静电键以及二硫键形成聚集体^[7], 从而提高蛋白质的溶解性、起泡性和乳化性^[8]。Zhao 等^[9]发现经过 3~5 次冷冻-融解处理, 大豆分离蛋白的乳化性和乳化稳定性均得到显著提升。刘永等^[10]发现经挤压处理后, 大豆分离蛋白的三级和四级结构由折叠状变为直线状、二硫键增多, 从而促进大豆分离蛋白组织化。

相较于传统物理改性方法, 新的物理改性方法如超高压处理、脉冲电场、微波、伽马射线辐照、超临界流体挤压和超声波等具有低能耗、低温处理、产品品质高以及低消耗等优点。

3 超高压改性

超高压技术(ultra-high pressure treatment, UHP)是指

以水或其他流体为传递压力的媒介, 物料被置于超高压容器中以大于 100 MPa 的压力, 在一定温度下处理适当时间, 从而改变物料性质的一项高新技术^[11]。在超高压条件下, 蛋白质的离子键、氢键、疏水作用等非共价键被破坏或形成, 疏水结合以及离子结合等因体积缩小而被切断或重新形成, 蛋白质三级和四级结构发生改变以至于使蛋白质功能性质发生变化^[12]。Sun 等^[13]使用超高压装置处理玉米醇溶蛋白的 70%乙醇-水溶液, 发现经超高压处理后玉米醇溶蛋白的粒径减小, 紫外光谱的吸收值和荧光强度增大, 热稳定性增强。Puppo 等^[14]发现超高压处理会使大豆蛋白表面疏水性升高, 游离巯基减少, 部分 7S 和 11S 组分分解折叠。Zhang 等^[15]使用 100~500 MPa 的超高压系统处理肌原纤维蛋白, 发现随着压力升高, 肌原纤维蛋白逐渐展开并暴露出疏水基团和巯基, 并且使二级结构发生了变化。

超高压处理能够提高蛋白质部分功能性。Tang 等^[16]提出蛋白质的溶解性受压力影响, 在相对较低的压力下(200 MPa)溶解性较低, 而在相对高的压力下(600 MPa)溶解性显著升高。Qin 等^[12]发现核桃分离蛋白的溶解性在 300~600 MPa 的压力下显著升高, 其疏水性降低, 并且蛋白之间发生交联导致分子粒径变大。王章存等^[17]使用 100 MPa 的压力处理大米蛋白 20 min, 发现其溶解性由 6.89% 增加至 9.60%。压力和处理时间均对蛋白质的起泡性有影响, 并且在 150~300 MPa 下, 处理时间的影响更明显^[18]。Ibano 等^[19]发现处理压力为 300 MPa 时, 乳清蛋白的泡沫稳定性增大, 但在 300 MPa 以上降低。刘坚等^[20]研究了超高压(100~600 MPa)对鹰嘴豆分离蛋白功能性的影响, 发现随着压力的增大和处理时间延长, 鹰嘴豆分离蛋白的溶解性有不同程度下降, 表面疏水性、乳化性和起泡性都显著提高。但当压力大于 400 MPa 时乳化性降低, 大于 500 MPa 时起泡性、表面疏水性降低。处理时间大于 10 min 时, 鹰嘴豆分离蛋白的上述蛋白功能性质分别降低。

虽然超高压技术是一项具有美好前景的高新技术, 但是由于该技术在食品工业中应用时间较短, 设备成本较高, 制作技术要求高, 且相关基础研究工作还不够全面深入, 超高压改性蛋白技术在食品工业中应用还存在诸多困难^[21]。

4 脉冲电场改性

脉冲电场技术(pulsed electric field, PEF)是指把脉冲电场(20~80 kV/cm)施加到置于 2 个电极之间的食品上, 以完成对食品的处理, 是最近几年兴起的食品非热处理技术^[22]。脉冲电场能够使蛋白质展开, 使蛋白质内部基团暴露。Xiang 等^[23]使用电场强度分别为 22 和 25 kV/cm, 脉冲数分别为 30、60、90 以及 120 处理大豆分离蛋白, 发现脉冲电场可以改变大豆分离蛋白的结构并且提高其表面疏水性。Qian 等^[24]发现 PEF 能够改变固体卵清蛋白的二级结构并

使二硫键断裂,但是没有改变蛋白质的一级结构。赵伟等^[25]使用 25~35 kV/cm PEF 处理蛋清蛋白 100~800 μ s, 发现处理后蛋白质分子展开, 疏水基团和巯基外露, 蛋清蛋白的起泡和乳化功能提高。而随着 PEF 处理电场强度和时间的增加, 蛋白质表面疏水基团和巯基持续增多, 发生疏水作用和二硫键交联作用, 蛋白质之间形成聚集体, 使其溶解度、起泡和乳化功能均降低。

脉冲电场的强度和时间均对蛋白质的功能性有影响。Li 等^[26]发现大豆分离蛋白的溶解性随着电场强度和时间的增加而增大, 但当电场强度和时间的增加分别大于 30 kV/cm 和 288 μ s 时导致大豆分离蛋白轻微变性和聚集, 从而使溶解性下降。李迎秋等^[27]使用 0~40 kV/cm PEF 处理大豆分离蛋白, 发现大豆分离蛋白的溶解度、乳化性、起泡性和疏水性均随着脉冲电场强度和时间的增加。当脉冲强度或时间大于 35 kV/cm 或 432 μ s 时溶解度降低, 大于 30 kV/cm 或 144 μ s 时乳化性降低, 大于 35 kV/cm 或 432 μ s 时起泡性降低, 大于 30 kV/cm 或 288 μ s 时疏水性降低。吴新等^[28]研究了脉冲电场对酪蛋白功能性的影响。研究发现, 随着脉冲强度和脉冲处理时间的增加, 酪蛋白的溶解度下降, 乳化性、起泡性及疏水性均增加。当脉冲电场强度或时间大于 25 kV/cm 或 144 μ s 时, 部分功能性下降。

脉冲电场技术具有成本低廉、效率高等特点, 并且在生产线中引入脉冲电场处理单元较容易。但是, 不同介电性质的食品组分会对不均一的产品性状产生不同的影响, 所以相较于简单的悬浮体系, 脉冲电场应用于复杂的食品体系中具有一定的挑战^[21]。

5 超声改性

超声波(ultrasound)是频率大于 20 kHz 的声波, 具有波动与能量的双重属性。超声波能够产生自由基、微流束效应以及空穴效应, 使蛋白质展开并破坏蛋白质分子内键, 从而对蛋白质分子结构产生影响^[29]。Jambrak 等^[30]使用 20 和 40 kHz 的超声处理乳清蛋白, 发现超声对乳清蛋白的作用主要是通过分子间氢键改变, 而非肽键或二硫键。Arzeni 等^[31]和 Sun 等^[32]分别提出超声能够使卵蛋白和牛奶浓缩蛋白的疏水基团暴露到蛋白质分子或者聚合物表面。Hu 等^[33]使用 20 kHz 的超声系统在 200、400 和 600 W 的功率下分别处理大豆分离蛋白 15 和 30 min, 结果表明, 超声处理使蛋白发生聚集, 其溶解性、巯基含量和表面疏水性升高, 二级结构发生改变。

蛋白质的功能特性受超声功率的影响。毕爽等^[34]发现经低(100 W)、中功率(300 W)超声处理后, 黑豆分离蛋白的溶解性、乳化性及乳化稳定性明显增强, 但在高功率(450 W)时功能特性下降。杨勇等^[35]发现超声波处理下绿豆蛋白溶解性并未发生显著变化, 但有效地增强了绿豆蛋白的表

面疏水性、乳化性能、起泡性及泡沫稳定性。何秋实^[29]发现超声处理能够增强红豆蛋白的溶解性、表面疏水性和乳化性。杨会丽等^[36]发现, 超声处理能够提高大豆分离蛋白的乳化能力、乳化稳定性、起泡能力和泡沫稳定性, 并分别在 960 W 和 800 W 时, 大豆分离蛋白的起泡能力和泡沫稳定性达到最大值。Sun 等^[32]发现超声处理使乳蛋白的粒径减小, 溶解度、乳化能力和乳化稳定性增加。Arzeni 等^[31]发现超声处理后蛋清蛋白的表面疏水性、泡沫稳定性、乳化稳定性和凝胶特性均显著升高。O'Sullivan 等^[37]研究了超声处理对动物蛋白(骨凝胶、鱼胶和卵清蛋白)以及(豌豆分离蛋白、大豆分离蛋白和米分离蛋白)结构和功能性的影响, 发现超声处理没有改变蛋白质的一级结构, 超声处理降低了骨凝胶、豌豆分离蛋白和卵清蛋白的乳化能力。

目前实验室所使用的超声波处理强度较高, 可能会使食品某些成分和物理性质发生变化, 应进一步展开研究来扩展现有知识以拓展超声波在蛋白质改性中的应用。

6 微波改性

微波(microwave)是指频率为 300 MHz~300 GHz 的电磁波, 能够引起物料分子振动, 从而在分子级对物料产生影响。微波使食品物料中的极性分子在高频电场作用下发生相互摩擦和碰撞, 将微波场能转化为热能, 使物料温度升高。微波对蛋白结构的影响主要有两个方面: 一是热效应, 是指微波能被介质材料吸收而转化为热能的现象; 二是非热效应, 是指当物料吸收电磁能后, 产生不可归属于温度变化的系统响应^[38]。Liu 等^[39]使用 100~500 W 的微波频率处理小麦蛋白 1~5 min, 结果显示微波处理提高了小麦蛋白的结晶度、二硫键以及 α -螺旋的含量。张海华等^[40]使用分别使用 600、800 和 1000 W 微波功率处理小麦面筋蛋白, 并采用傅里叶红外光谱对小麦面筋蛋白的二级结构进行分析, 发现微波处理后面筋蛋白的二级结构随微波功率不同而发生不同变化, 微波处理后面筋蛋白的表面疏水性以及游离巯基含量升高。

微波处理的时间和功率均对蛋白质功能性有影响。Yalcin 等^[41]研究了不同处理时间(1~3 min)以及不同功率微波(350~706 W)处理麦谷蛋白, 结果显示麦谷蛋白的溶解度与微波加热时间呈正相关, 乳化性降低, 乳化稳定性、起泡性和泡沫稳定性轻微增大。蔡建荣等^[42]发现当微波功率为 1000 W 时, 在 0~40 s 大豆分离蛋白的起泡性、乳化性和乳化稳定性均随处理时间延长而增加, 并在 40 s 达到最大值。Liu 等^[43]发现经微波改性后的小麦蛋白纤维具有更好的拉伸强度以及热稳定性。张春红等^[44]研究得出微波改性大豆分离蛋白的最佳条件为微波功率 600 W, 反应时间 2 min, 料液比 1:11, pH 为 10, 相较于未处理的样品, 微波改性后的大豆分离蛋白的溶解性、乳化性、乳化稳定性

分别提高了 32.15%、58.87%和 56.54%。

微波具有操作快速、产品品质高、加热速度快等优点, 现已广泛被人们所接受。但由于微波的穿透深度小, 加热均匀性差, 物料的冷点难预测。微波处理过程中电力使用的收益较低, 并且设备中的微波发生管寿命有限, 增加了成本, 对微波处理的工业化形成阻碍^[21]。

7 辐照改性

辐照技术, 是借助 ⁶⁰Co 所产生的高能量、强穿透性的 γ 射线、电离和激发物质产生的活化分子与原子发生一系列物理、化学与生物化学反应, 使物质发生聚合、交联、降解、并发生改性^[45]。辐照会使蛋白质交联、聚集、氧化以及分解, 并且辐照产生的羟基和过氧化物会影响蛋白质的一级、二级和三级结构^[46,47]。在适合的蛋白质浓度以及氧气存在的情况下, 辐照也会对蛋白质的四级结构产生影响^[48]。

不同剂量的辐照处理使蛋白质结构发生不同程度改变, 进而影响其功能性质。李杨等^[45]研究了不同剂量(1、3、5、7 和 10 kGy)辐照处理对红豆蛋白功能性的影响, 结果表明在低剂量辐照处理时, 红豆蛋白的分子展开, 疏水基团暴露, 功能性有所改善; 但当剂量进一步加大时, 红豆蛋白分子发生聚集, 使吸水性、溶解性、乳化性等功能性质下降。

食品辐照技术是一种通用、有效和安全的处理方法, 但也饱受争议。蛋白质经辐照后会产生辐射产物, 通常是一些小分子物质, 这些物质虽然少, 但对于产品的安全性和感官品质的影响也需要考虑和评估。

8 射频改性

射频加热技术是近 20 年来在国际上引起广泛研究的一种新型加热技术。射频加热系统可以简化为由上、下两极板构成的平行板电容器。被加热物料置于两极板间, 极板间会形成频率为 10~40 MHz、电压 5 kV 以上的交流电磁场, 该电磁场穿透物料, 引起物料中极性分子的极化运动以及离子的振荡迁移而产生能量并转化为热能, 引起物料从内到外同时升温, 加快了加热速度^[49]。射频加热与微波加热原理类似, 但是具有更强的穿透能力。目前关于射频对蛋白质结构影响的研究还未见报道。但是已有一些文章报道了射频加热能够提高蛋白质的部分功能性。Boreddy 等^[50]使用射频辅助热风杀菌蛋白粉, 发现射频辅助热风处理能够在更短的时间提高蛋白粉的凝胶特性; Uemura 等^[51]使用射频闪热(radio-frequency flash heating, RF-FH)系统对豆乳杀菌, 对比传统加热杀菌方式, 使用 RF-FH 杀菌豆乳制成的豆腐具有更高的凝胶强度。

射频加热具有穿透深度大、设备造价低等优点, 在蛋白质改性技术的应用中具有一定的潜力, 但是相关的研究

还比较少, 还需进一步研究。

9 结 论

由于新型物理改性蛋白的方法具有安全、作用时间短、低能耗以及对营养性质影响小等优点, 在食品和生物技术的应用中具有一定的潜力, 是一类可行、安全、温和的改性方法。但是, 目前这些新的物理改性方法还处于实验室阶段, 并没有广泛使用在工业生产中, 每种方法都存在相应的阻碍亟需攻克, 部分新的物理改性方法由于结构影响方面的信息较少以及研究材料种类较少, 还需在未来进一步研究从而为实际应用提供理论支撑。

参考文献

- [1] Kinsella JE, Melachouris N. Functional properties of proteins in foods: A survey [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 1976, 7(3): 663-670.
- [2] 怀宝东, 张东杰, 钱丽丽, 等. 大豆分离蛋白改性技术的研究与发展趋势[J]. *中国酿造*, 2014, 33(6): 13-16.
- [3] Huai BD, Zhang DJ, Qian LL, *et al.* Research and development trend of modification technology of soy protein isolate [J]. *China Brew*, 2014, 33(6): 13-16.
- [4] Klompong V, Benjakul S, Kantachote D, *et al.* Antioxidative activity and functional properties of protein hydrolysate of yellow stripe trevally (*Selaroides leptolepis*) as influenced by the degree of hydrolysis and enzyme type [J]. *Food Chem*, 2007, 102(4): 1317-1327.
- [5] Kumar R, Choudhary, Mishra SK, *et al.* Adhesives and plastics based on soy protein products [J]. *Ind Crops Prod*, 2002, 16(3): 155-172.
- [6] Mo XQ, Hu J, Sun SS, *et al.* Compression and tensile strength of low-density straw-protein particleboard [J]. *Ind Crops Prod*, 2001, 14(1): 1-9.
- [7] 杨敏, 田少君, 周瑞宝, 等. 大豆浓缩蛋白物理改性研究进展 [J]. *粮油食品科技*, 2007, 15(6): 42-45.
- [8] Yang M, Tian SJ, Zhou RB, *et al.* Review on advance of physically-modified concentrated soy protein [J]. *Grain Oil Food Sci Technol*, 2007, 15(6): 42-45.
- [9] Barac M, Stanojevic SP, Jovanovic S, *et al.* Soy protein modification: A review [J]. *Acta Period Technol*, 2004, 35(35): 3-16.
- [10] Wang CY, Johnson LA. Functional properties of hydrothermally cooked soy protein products [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2001, 78(2): 189-195.
- [11] Zhao JY, Dong FJ, Li YY, *et al.* Effect of freeze-thaw cycles on the emulsion activity and structural characteristics of soy protein isolate [J]. *Process Biochem*, 2015, 50(10): 1607-1613.
- [12] 刘永, 周家华, 曾颢, 等. 大豆蛋白的挤压组织化及其应用[J]. *食品科技*, 2002, (6): 13-15.
- [13] Liu Y, Zhou JH, Zeng H, *et al.* Soy protein texturized by extrusion and its applications [J]. *Food Sci Technol*, 2002, (6): 13-15.
- [14] 董新红, 赵谋明, 蒋跃明. 超高压技术在蛋白质食品加工中的应用 [J]. *食品工业科技*, 2012, (02): 451-454.
- [15] Dong XH, Zhao MM, Jiang YM. Application of ultra-high pressure technique in protein food industry [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2012, (02): 451-454.
- [16] Qin ZH, Guo XF, Lin Y, *et al.* Effects of high hydrostatic pressure on

- physicochemical and functional properties of walnut (*Juglans regia L.*) protein isolate [J]. *J Sci Food Agric*, 2013, 93(5): 1105–1111.
- [13] Sun C, Dai L, Liu F, *et al.* Simultaneous treatment of heat and high pressure homogenization of zein in ethanol-water solution: Physical, structural, thermal and morphological characteristics [J]. *Innovat Food Sci Emerg Technol*, 2016, 34: 161–170.
- [14] Puppo C, Chapleau N, Speroni F, *et al.* Physicochemical modifications of high-pressure-treated soybean protein isolates [J]. *J Agric Food Chem*, 2004, 52(6): 1564–1571.
- [15] Zhang Z, Yang Y, Zhou P, *et al.* Effects of high pressure modification on conformation and gelation properties of myofibrillar protein [J]. *Food Chem*, 2016, 217: 678–686.
- [16] Tang CH, Ma CY. Effect of high pressure treatment on aggregation and structural properties of soy protein isolate [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2009, 42(2): 606–611.
- [17] 王章存, 崔胜文, 田卫环, 等. 高压处理对大米蛋白溶解性及其分子特征的影响[J]. *中国粮油学报*, 2012, 27(06): 1–4.
Wang ZC, Cui SW, Tian WH, *et al.* Effect of high-pressure on the solubility and molecular character of rice protein [J]. *J Chin Cere Oils Associat*, 2012, 27(06): 1–4.
- [18] Bouaouina H, Desrunaux A, Loisel C, *et al.* Functional properties of whey proteins as affected by dynamic high-pressure treatment [J]. *Int Dairy J*, 2006, 16(4): 275–284.
- [19] Ibano lu E, Karatas S. High pressure effect on foaming behaviour of whey protein isolate [J]. *J Food Eng*, 2001, 47(1): 31–36.
- [20] 刘坚, 江波, 张涛, 等. 超高压对鹰嘴豆分离蛋白功能性质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2006, 32(12): 64–68.
Liu J, Jiang B, Zhang T, *et al.* Effect of ultra-high pressure on the functional properties of chickpea protein isolate [J]. *Food Ferment Ind*, 2006, 32(12): 64–68.
- [21] 卡诺维斯, 塔皮亚, 卡农张. 新型食品加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2010.
GustavoVBC, Maria ST, M.Pilar Cano. Novel food processing technologies [M]. Beijing: China Light and Industry Press, 2010.
- [22] 张若兵, 陈杰, 肖健夫, 等. 高压脉冲电场设备及其在食品非热处理中的应用 [J]. *高电压技术*, 2011, 37(3): 777–786.
Zhang RB, Chen J, Xiao JF, *et al.* Pulsed electric fields system and its application in non-thermal food processing [J]. *High Volt Eng*, 2011, 37(3): 777–786.
- [23] Xiang BY, Ngadi MO, Simpson BK, *et al.* Pulsed electric field induced structural modification of soy protein isolate as studied by fluorescence spectroscopy [J]. *J Food Proc Preserv*, 2011, 35(5): 563–570.
- [24] Qian J, Ma L, Wang L, *et al.* Effect of pulsed electric field on structural properties of protein in solid state [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2016, 74: 331–337.
- [25] 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.
Zhao W, Yang RJ, Zhang WB, *et al.* Changes in functional properties and structure of egg white proteins induced by pulsed electric fields [J]. *Food Sci*, 2011, 32(9): 91–96.
- [26] Li YQ, Chen ZX, Mo HZ. Effects of pulsed electric fields on physicochemical properties of soybean protein isolates [J]. *Lwt-Food Sci Technol*, 2007, 40(7): 1167–1175.
- [27] 李迎秋, 陈正行. 高压脉冲电场对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(8): 194–198.
Li YQ, Chen ZX. Effect of high intensity pulsed electric field on the functional properties of protein isolated from soybean [J]. *Transact Chin Soc Agric Eng*, 2006, 22(8): 194–198.
- [28] 吴新, 陈正行, 丁开宇. 脉冲电场对牛奶酪蛋白功能性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2009, (5): 85–88.
Wu X, Chen ZX, Ding KY. Effects of pulsed electric fields (PEF) on the functional properties of casein [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2009, (5): 85–88.
- [29] 何秋实. 超声处理对红豆蛋白结构及功能性影响的研究 [J]. *中国粮油学报*, 2014, 29(7): 49–53.
He QS. Effect of ultrasonic treatment on the structure and functional properties of red bean protein [J]. *J Chin Cere Oils Associat*, 2014, 29(7): 49–53.
- [30] Jambrak AR, Mason TJ, Lelas V, *et al.* Effect of ultrasound treatment on particle size and molecular weight of whey proteins [J]. *J Food Eng*, 2014, 121(1): 15–23.
- [31] Arzeni C, Perez OE, Pilosof AMR. Functionality of egg white proteins as affected by high intensity ultrasound [J]. *Food Hydrocoll*, 2012, 29(29): 308–316.
- [32] Sun YJ, Chen JH, Zhang SW, *et al.* Effect of power ultrasound pre-treatment on the physical and functional properties of reconstituted milk protein concentrate [J]. *J Food Eng*, 2014, 124(4): 11–18.
- [33] Hu H, Wu JH, Li C, *et al.* Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions [J]. *Food Hydrocoll*, 2013, 30(2): 647–655.
- [34] 毕爽, 齐宝坤, 隋晓楠, 等. 超声处理对黑豆蛋白结构和功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(6): 153–160.
Bi S, Qi BK, Sui XN, *et al.* Effects of ultrasound on the structure and physical properties of black soybean isolate [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2016, 16(6): 153–160.
- [35] 杨勇, 毕爽, 王中江, 等. 超声波处理对绿豆蛋白结构及功能特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(9): 69–73.
Yang Y, Bi S, Wang ZJ, *et al.* Effect of ultrasonic treatment on the structure and functional properties of mung bean protein [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2016, 37(9): 69–73.
- [36] 杨会丽, 马海乐. 超声波对大豆分离蛋白物理改性的研究[J]. *中国酿造*, 2009, 28(5): 24–27.
Yang HL, Ma HL. Physical modification of protein isolate by ultrasound [J]. *China Brew*, 2009, 28(5): 24–27.
- [37] O'Sullivan J, Murray B, Flynn C, *et al.* The effect of ultrasound treatment on the structural, physical and emulsifying properties of animal and vegetable proteins [J]. *Food Hydrocoll*, 2015, 1: 141–154.
- [38] Banik S, Bandyopadhyay S, Ganguly S. Bioeffects of microwave—a brief review [J]. *Bioresource Technol*, 2003, 87(2): 155–159.
- [39] Liu CQ, Ma XJ. Study on the mechanism of microwave modified wheat protein fiber to improve its mechanical properties [J]. *J Cere Sci*, 2016, 70: 99–107.
- [40] 张海华, 朱科学, 陈晔, 等. 微波处理对小麦面筋蛋白结构的影响 [J]. *食品科学*, 2011, 32(5): 65–69.
Zhang HH, Zhu KX, Chen Y, *et al.* Effect of microwave treatment on structure of wheat gluten protein [J]. *Food Sci*, 2011, 32(5): 65–69.

- [41] Yalcin E, Sakiyan O, Sumnu G, *et al.* Functional properties of microwave-treated wheat gluten [J]. *Eur Food Res Technol*, 2008, 227(5): 1411–1417.
- [42] 蔡建荣, 张银志, 孙秀兰. 微波处理对大豆分离蛋白功能特性的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2009, 37(2): 453–454, 489.
Cai JR, Zhang YZ, Sun XL. Effects of microwave treatment on functional properties of soy protein isolate [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, 37(2): 453–454, 489.
- [43] Liu C, Ma X. Study on the mechanism of microwave modified wheat protein fiber to improve its mechanical properties [J]. *J Cere Sci*, 2016, 70: 99–107.
- [44] 张春红, 王欣. 微波处理对大豆分离蛋白某些功能性的影响 [J]. *中国酿造*, 2008, 24: 75–77.
Zhang CH, Wang X. Effect of microwave process on some functionality of soy bean protein isolate [J]. *China Brew*, 2008, 24: 75–77.
- [45] 李杨, 王晶, 陈勇, 等. 伽马射线辐照对红豆分离蛋白功能性质的影响 [J]. *食品工业科技*, 2014, 35(21): 82–85.
Li Y, Wang J, Chen Y, *et al.* Effect of different irradiation dose on functional properties of red bean protein isolates [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2014, 35(21): 82–85.
- [46] Lee S, Lee S, Song KB. Effect of gamma-irradiation on the physicochemical properties of porcine and bovine blood plasma proteins [J]. *Food Chem*, 2003, 82(4): 521–526.
- [47] Davies KJ, Delsignore M. Protein damage and degradation by oxygen radicals III Modification of secondary and tertiary structure [J]. *J Biol Chem*, 1987, 262(20): 9908–9913.
- [48] Lee W, Clark S, Swanson B. Functional properties of high hydrostatic pressure-treated whey protein [J]. *J Food Process Preserv*, 2006, 30(4): 488–501.
- [49] Sosa-morales ME, Tiwari G, Wang S, *et al.* Dielectric heating as a potential post-harvest treatment of disinfesting mangoes, Part II: Development of RF-based protocols and quality evaluation of treated fruits [J]. *Biosystems Eng*, 2009, 103(3): 287–296.
- [50] Boreddy SR, Thippareddi H, Froning G, *et al.* Novel radiofrequency-assisted thermal processing improves the gelling properties of standard egg white powder [J]. *J Food Sci*, 2016, 81(3): E665–E671.
- [51] Uemura K, Takahashi C, Kobayashi I. Inactivation of *Bacillus subtilis* spores in soybean milk by radio-frequency flash heating [J]. *J Food Eng*, 2010, 100(4): 622–626.

(责任编辑: 姚 菲)

作者简介



郭超凡, 硕士, 主要研究方向为食品工程新技术。

E-mail: guochaofanfan@outlook.com



王云阳, 博士, 教授, 主要研究方向为食品工程新技术、食品安全控制技术、传统食品工业化。

E-mail: wyy10421@163.com