



图1 新型物理改性方法图

Fig.1 Diagram of new physical modification method

氢键、二硫键、范德华力、静电和疏水相互作用等,所以可以不同程度地改变蛋白质结构和功能性质^[8]。

超声波处理产生声腔空化现象,进而使体系产生化学效应、机械效应和热效应^[9]。这些效应可以破坏氢键和疏水键等非共价键,导致蛋白质结构展开^[10],同时内部的疏基和疏水基团出现在外部,二级结构的 α -螺旋变成 β -折叠^[11],从而影响蛋白质的构象,增加蛋白间的静电排斥作用,有助于改善蛋白质溶解度^[12]。微波、射频加热技术都是通过电磁和热的作用使蛋白结构展开,电磁场辐射蛋白,引起蛋白中的极性分子发生极化运动、离子的振荡迁移,进而产生能量并转化成热能,引起蛋白从内到外同时加热,加快了升温速度^[13],将疏水基团暴露出来,产生分子间的相互作用,改变蛋白质空间构象,从而引起理化性质和功能特性的改变^[14]。两者原理虽然相类似,但是射频加热的优点在于设备价格低廉且穿透能力强,在蛋白质改性应用中拥有一定的市场潜力。

还有部分研究提出^[15]脉冲电场首先使蛋白质分子在低脉冲电场强度下极化,随着电场强度的增加,疏水性氨基酸暴露在溶剂中。最终,未折叠的蛋白质可以变成由弱键连接的聚集体,在相对较高场强的共价键和非共价键。在一定的脉冲电场强度以上,电弧引起的热效应将在热敏蛋白的变性和聚集中起主要作用^[16]。紫外线照射(UV-C)作为一种新兴的物理技术,也可以改变蛋白质

的二、三级结构^[17]。

1.2 高压处理技术

高压微射流处理技术(HPM)是一种综合了强剪切、气穴、压力瞬时释放和高速撞击等一系列作用力的新兴改性技术,主要适用于流体混合物料的膨化、破碎和均质等。此项处理技术在压力作用下物料可以瞬时通过,压力变化速率较大,产生巨大的压力差,同时物料在通过处理腔时会受到剪切、粉碎等一系列机械力的作用。对物料分子间的结合方式也可能有影响,导致键的破坏和重组,进而对物料的理化性质或结构产生影响,从而使食品的功能特性发生变化^[18-19]。超高压技术(UHP)是一种非热处理技术,在超高压处理过程中,基于液体介质的作用,把物料体积进行压缩,而由超高压所形成的极高静压^[20],不仅对细胞形态造成影响,还会作用于物料的非共价键,如疏水键、离子键、氢键等,改变蛋白质空间结构,引起蛋白质变性。由于UHP对共价键没有破坏作用,所以其能够较好地保留食品中原有的营养成分,也能够更好地保留食品的质构和口感^[21],在食品加工领域方面具有良好的应用前景。

1.3 其它新型物理处理技术

除了上述提到的改性方法,还有低温等离子体、超温粉碎、电离辐射、臭氧(O₃)处理等新型物理改性方法。低温等离子体可利用不同载气系统,经辉光放电、滑动电弧放电和介质阻挡放电等不同方式放电产生^[22]。在低温等离子体体系中,带电粒子可以一直拥有能量,与物料发生碰撞并蚀刻物料,能够使大量活性基团暴露,诱导蛋白的结构由致密变松散,进而修饰改善食品的功能特性^[23]。低温等离子体的优势在于它能够在低温范围内工作,而不会对热敏性食品材料造成重大变化^[24-25],最大限度地减少营养和感官特性退化^[26]。目前在食品加工领域中,介质阻挡放电、辉光放电和电晕放电放电方式较为常见。

超微粉碎是指一项利用机械或流体动力克服固体本身内部存在的聚集力使之发生破碎,从而将固体颗粒粉碎到10~25 μm 之间,甚至可达到1 μm 的处理技术^[27]。超微粉碎能把物料颗粒进行微细化处理,导致物料产生较大的孔隙,同时也增加了其表面积,经过超微粉碎的粉体具有更加良好

的理化性质,比如超微粉体具有更好的吸附性和溶解性等。电离辐射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 X 射线、 γ 射线和高能电子束来破坏其中可能存在的微生物,同时它可以通过产生羟基和超氧阴离子自由基破坏蛋白质的一级、二级和三级结构^[28]。此外,Davies 等^[28]提出,这些羟基和超氧阴离子自由基可以改变蛋白质的一级结构并颠覆 α -螺旋结构,从而自然影响空间结构。臭氧(O₃)是一种高活性、强氧化剂,其可以诱导蛋白质的多肽氧化、蛋白质-蛋白质交联、肽键断裂,以及与蛋白质反应时氨基酸基团的修饰^[29]。

2 新型物理改性处理对植物蛋白溶解性的影响

溶解性是蛋白质的最基本的物理性质,也是蛋白质其它功能特性的先决条件,溶解性体现了蛋白质与水分子的相互作用能力,蛋白质水合能力越强溶解性越好^[30]。影响蛋白质溶解性的因素包括内部因素和外部因素,如蛋白质的非共价相互作用、蛋白质间的疏水相互作用及盐桥等都会影响蛋白质溶解性^[31]。此外,蛋白质的粉体粒度和表面成分等也会影响蛋白质的溶解性^[32],粉体粒度越小,比表面积就越大,蛋白质越易结块^[33],表面成分的疏水性也会影响蛋白质的水化作用,这两者都不利于粉末的润湿。蛋白质溶解性也与溶液的环境因素有关,例如溶液的 pH 值、温度和离子强度等都会影响蛋白质的结构从而影响其溶解性^[34-35]。对于溶解性高低的判断,表征值有氮溶指数、蛋白分散指数,通过这些值来对比改性前、后的溶解性,再进一步利用傅里叶红外光谱检测等方法检测对比蛋白质的分子的结构和化学键变化,来说明溶解性改变的机理。

物理改性使蛋白质分子发生解聚和亚基伸展,更大程度地暴露蛋白质内部的极性基团和疏水基团,增强蛋白质分子的表面电荷,有助于蛋白质的水合作用,从而提高蛋白质的溶解性^[36]。通常,蛋白质在等电点附近溶解度最低,其原因是在等电点处,蛋白质的净电荷为零,由于分子间静电斥力减小,蛋白质-蛋白质相互作用有利于分子聚集。当体系的 pH 值偏离等电点,它们的溶解度通

常会增强^[37-38]。不同的蛋白质有其独特的溶解机制,因此需要进行深入研究,从而确定其在食品中的潜在应用。

2.1 电磁辐射处理对蛋白溶解性的影响

电磁辐射会使蛋白质之间发生静电相互作用,随着处理强度和时间的增加,蛋白质的溶解性呈先增加后降低的趋势,这是由于大量疏水基团的暴露使蛋白质发生聚集,表面疏水性降低,同时,在电场的作用下更易产生二硫键(S-S),所以处理后的蛋白质表面疏水性高于直接水浴加热后的蛋白质^[39]。

Yang 等^[40]和田然等^[41]分别研究了超声处理球蛋白、米渣蛋白,发现蛋白的水溶性均有一定程度的提高。超声处理使蛋白质的分子结构变得松散,分子间作用力减弱、蛋白从较为有序的状态变为无序的状态,表面疏水性增加,溶解性增加。苏巧艳^[42]利用微波处理藜麦蛋白发现,溶解度随着微波时间呈现先上升后降低的趋势,可能是微波处理破坏了藜麦蛋白的次级键, β -折叠和 α -螺旋发生改变,从而水分子更易进入球蛋白的内部,与其分子发生水和作用。郭超凡等^[43]研究了射频对大豆分离蛋白溶解性的影响,发现大豆分离蛋白的溶解度从未处理的 22.48%提高至 73.47%,与微波加热原理类似,射频处理导致蛋白结构的二硫键、氢键以及静电相互作用作用被打破,导致蛋白质结构展开,蛋白分子与水的相互作用增强,导致溶解度提高。然而,Ling 等^[44]表示,射频诱导加热对溶解度有负面影响,他们认为由于三级结构的改变,表面疏水性的改善和色氨酸荧光的下降可以证明他们的结论。Li^[45]指出脉冲电场对食物蛋白质的结构产生影响,脉冲电场可以提高大豆分离蛋白中 β -折叠的比例,这种现象最终归因于 β -折叠片层结构之间出现氢键而导致的蛋白质聚集。通过二硫键振动峰强度和酪氨酸振动频率的变化,还可以观察到巯基和疏水性的显著变化。

2.2 高压处理蛋白溶解性的影响

有关学者研究表明,高压处理会改变蛋白质的溶解性,这是因为高压处理会破坏蛋白质之间的氢键、疏水相互作用等非共价键,使其分子结构进一步折叠或展开^[46]。高压微射流处理破坏分子间的强氢键,导致结晶度下降,并使结构从松散的

团簇变为松散的聚集体和不规则的链,从而使其更容易溶于水^[47]。敬思群等^[48]研究发现动态高压微射流处理大豆分离蛋白,可以使溶解度从20%提升至80%,徐雨佳^[49]同样采用高压微射流处理大米谷蛋白,在中性条件下,80 MPa处理的蛋白溶解性最高,比原大米谷蛋白的溶解度增长76.46%。苏茜^[50]研究发现,超高压处理技术可以使小米蛋白的溶解度提升100%,林素丽^[51]同样采取超高压处理技术处理米糠蛋白使溶解性从22%提升至55%,可能是经过超高压处理后,蛋白质结构展开,从而进行更好的水合作用。同时,蛋白的溶解度与表面疏水性的降低和二级结构的变化有关^[52]。

2.3 其它新型物理改性对蛋白溶解性的影响

低温等离子体处理会释放更多的自由基和活性基团,从而增加了蛋白质聚集体之间的相互作

用^[53]。Mahdavian Mehr等^[54]分析了等离子体处理对草豆分离蛋白溶解性的影响,蛋白质溶解度的增加,可能与蛋白质表面电荷的增加和蛋白质粒径的减小有关;Ji等^[55]研究发现,在经过低温等离子体处理后,豌豆分离蛋白的溶解度增加了12.17%,可能是由于等离子体处理后蛋白质中的结合更松散,表面更粗糙,导致了豌豆分离蛋白的比表面积和表面活性位点的增加;超微粉碎主要通过改变蛋白质的粒径大小,从而影响其溶解性的变化,吴长玲等^[56]研究低温超微粉碎对豆渣蛋白的溶解性的影响发现,溶解度从23.6%提升至27.5%。Liu等^[57]在球磨处理大豆分离蛋白中的研究发现,球磨增加了溶解性和水分分散性,构象结构和颗粒大小的变化可能会影响蛋白质的物理和化学性质。

表1 不同改性方法对蛋白溶解性的影响

Table 1 Influence of different modification methods on protein solubility

改性方法	蛋白种类	结构改变	溶解性(提高)
超声	球蛋白	破坏氢键、削弱蛋白的刚性结构	10.00%
	米渣蛋白		30.96%
微波	藜麦蛋白	次级键, β -折叠和 α -螺旋发生改变	5.00 g/L
射频	大豆分离蛋白	破坏二硫键、氢键以及静电相互作用	50.00%
高压微射流	大豆分离蛋白	β -折叠和 α -螺旋发生改变	60.00%
	大米谷蛋白		5.00%
超高压	小米蛋白	结构展开,亲水基团暴露	10.66%
	米糠蛋白		33.00%
低温等离子体	草豆分离蛋白	表面电荷增加粒径减小	2.96%
	豌豆分离蛋白		12.71%
超微粉碎	豆渣蛋白	颗粒直径减小,破坏氢键、疏水相互作用	3.90%
	大豆分离蛋白		6.50%

虽然大部分改性方法可以使植物蛋白的溶解性得到一定程度的提升,但是同一物理改性提升的效果针对不同的植物蛋白效果也不同。比如:邓爱华等^[58]超声处理葵花籽蛋白,溶解度增加了57.9%,而郑丽慧等^[59]同样采取超声处理米糠蛋白,其溶解度只增加了11.79%。此外郭超凡等^[43]研究了射频对大豆分离蛋白溶解性的影响,发现大豆分离蛋白的溶解度提高了200%,而Ling等^[44]表示,射频诱导加热对米糠蛋白溶解度会产生负面影响。

3 新型物理改性对植物蛋白其它功能特性的影响

3.1 乳化性和乳化稳定性

乳化性是指油相和水相混合形成乳状液的能力。蛋白质的一部分与界面接触后,疏水性氨基酸残基伸向油相部分,同时在界面吸附,可以使液滴产生不易聚集的流变学性质,从而达到乳化的作用。葛艳争等^[60]采用超声处理花生分离蛋白发现,花生分离蛋白的乳化性及乳化稳定性随超声时间均呈先增加后降低的趋势,可能原因是超声暴露

了更多的疏水性基团,从而导致了蛋白质与油的相互作用增强,而超声时间过长,蛋白质的重聚现象严重而不利于疏水基团的暴露,导致乳化性及乳化稳定性有所降低。苏巧艳^[42]采用微波分别处理藜麦蛋白,乳化性及其乳化稳定性也得到了提高。可能是蛋白结构展开使更多疏水性基团暴露出来,更易与油脂结合,而极性部分与水相结合,从而使其乳化性及乳化稳定性提高。

3.2 起泡性和起泡稳定性

蛋白质分子具有两亲性,在搅打的过程中,蛋白质的亲水基团、疏水基团分别向液相、气相部分移动。由于疏水基团吸附在气液界面上,降低了表面张力,此外由于在界面处蛋白存在非共价相互作用,会形成一层具有张力的薄膜,有利于泡沫的形成和稳定^[61]。郭超凡等^[43]研究发现射频加热可以提高大豆分离蛋白起泡能力;戴彩霞等^[62]采用超高压技术处理菜籽蛋白,其起泡性和起泡稳定性均得到了提高,分析原因可能是经超高压的蛋白质分子链展开,促使疏水基团充分暴露,链的柔性增加,改善起泡性,其在空气-水界面展开形成致密的网络结构,提高蛋白质和空气结合的能力,从而提高其泡沫稳定性。

3.3 吸水性与吸油性

蛋白质的吸水性与蛋白质-水相互作用位点中极性氨基酸的位置有关,吸油性与蛋白质-油相互作用位点中非极性氨基酸的位置有关^[37],吸水性和吸油性有助于减少水分流失,从而提供食品所需要的质地并起到改善口感的作用。Hassan等^[63]证明,即使在 60 °C 的较低温度下加热,射频处理也能提高玉米蛋白的吸油、吸水能力,可能是非共价键断裂导致的蛋白质部分折叠。He 等^[64]研究发现超高压处理可以显著提高花生分离蛋白的吸油性。

3.4 凝胶特性

蛋白质分子聚集并形成有序的蛋白质网络结构的过程称为凝胶作用。物理处理凝胶类蛋白质会使其分子发生变性而解析折叠和聚集,进而形成三维网状结构的凝胶。Qin 等^[65]报道称微波可以使 TG 酶诱导的大豆蛋白/小麦面筋蛋白凝胶的凝胶强度显著提高,而且凝胶具有更致密、更均匀的显微结构。Boreddy 等^[66]使用射频辅助热风处理蛋

白质,发现其处理能够在更短的时间内增强蛋白质的凝胶特性。Zhang 等^[67]报道称用低温等离子体处理的花生蛋白可以形成具有更大持水能力和机械性能的凝胶,这种凝胶化过程的增强可能归因于表面疏水性和自由巯基的增加。

植物蛋白的功能性质与其理化性质(分子外观、氨基酸的顺序及组成、电荷分布以及分子内与分子间的相互作用、疏水相互作用等)密切相关,同时,还受多种因素的影响,如植物蛋白的凝胶性还与温度、pH 值、离子强度等因素有关。不同的改性方法对植物蛋白的各种功能特性有不同程度的改善,在食品领域加工过程中,针对所需要改善的植物蛋白功能特性,可以选择合适的物理改性方法。

4 结语与展望

作为新兴和有前途的技术,高压微射流、超微粉碎、低温等离子体等新型物理改性技术在改变蛋白质产品的物理和化学功能方面显示了它们的优点,成为揭示食品蛋白质改性领域的一种有效的辅助手段,有望在未来食品的加工和生产中发挥重要的作用。想要制造满足消费者精准需求的未来食品,可采用挤压剪切、3D 打印、纳米组装^[68]等工程化食品加工技术,结合大数据和个性化设计。此外,以蛋白质为原料的 3D 打印技术在食品领域有广泛应用,通过物理手段处理后的植物蛋白性质发生改变,从而有助于改善打印材料的流变性质的效果。

为了促进物理加工在植物蛋白中的应用,还有存在一些问题亟需解决。首先,最突出的挑战是了解物理改性处理后的蛋白质中实际发生的变化,为未来开发新产品提供理论基础;其次,需要了解改性蛋白质食品与其感官特征之间可能存在的相关性,从而预测消费者的可接受性;同时需要加强相关的优化研究,以便以可控的方式将植物蛋白修饰到所需的程度。此外,目前这些技术目前仅在中试或实验室规模上使用,迫切需要工业化应用相关的研究。对上述存在的问题,未来需要进行大量的研究了解新型改性技术及其对植物蛋白结构的影响。

参 考 文 献

- [1] AKHARUME F U, ALUKO R E, ADEDEJI A A. Modification of plant proteins for improved functionality: A review[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2021, 20(1): 198–224.
- [2] 宋旻, 刘影. 微波辅助糖基化对大豆分离蛋白乳化性的影响[J]. *食品发酵工业*, 2020, 46(6): 82–88. SONG Y, LIU Y. Effect of microwave assisted glycosylation on emulsification of soybean protein isolate[J]. *Food Fermentation Industry*, 2020, 46(6): 82–88.
- [3] SHI A M, JIAO B, LIU H Z, et al. Effects of proteolysis and transglutaminase crosslinking on physicochemical characteristics of walnut protein isolate[J]. *Food Science & Technology*, 2018, 97: 662–667.
- [4] LIU Y F, OEY I, BREMER P, et al. Modifying the functional properties of egg proteins using novel processing techniques: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2019, 18(4): 986–1002.
- [5] DE VRIES H, MIKOLAJCZAK M, SALMON J M, et al. Small-scale food process engineering – Challenges and perspectives[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2018, 46: 122–130.
- [6] ARYEE A N A, AGYEI D, UDENIGWE C C. 2 – Impact of processing on the chemistry and functionality of food proteins [M]// YADA R Y ed. *Proteins in Food Processing (Second Edition)*. Cambridge: Woodhead Publishing, 2018: 27–45.
- [7] MIRMOGHATAIE L, SHOJAEE ALIABADI S, HOSSEINI S M. Recent approaches in physical modification of protein functionality[J]. *Food Chem*, 2016, 199: 619–627.
- [8] HAN Z, CAI M J, CHENG J H, et al. Effects of electric fields and electromagnetic wave on food protein structure and functionality: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2018, 75: 1–9.
- [9] 李振源, 刘伯业, 张静思, 等. 小麦面筋蛋白改性技术的研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2021, 34(5): 17–20. LI Z Y, LIU B Y, ZHANG J S, et al. Research progress of wheat gluten protein modification technology[J]. *Grain and Fat*, 2021, 34(5): 17–20.
- [10] MA W C, WANG J M, XU X B, et al. Ultrasound treatment improved the physicochemical characteristics of cod protein and enhanced the stability of oil-in-water emulsion[J]. *Food Res Int*, 2019, 121: 247–256.
- [11] STATHOPOULOS P B, SCHOLZ G A, HWANG Y M, et al. Sonication of proteins causes formation of aggregates that resemble amyloid[J]. *Protein Science*, 2004, 13(11): 3017–3027.
- [12] LIU R, LIU Q, XIONG S B, et al. Effects of high intensity ultrasound on structural and physicochemical properties of myosin from silver carp[J]. *Ultrason Sonochem*, 2017, 37: 150–157.
- [13] SOSA-MORALES M E, 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 Engineering*, 2009, 103(3): 287–296.
- [14] 冯建慧, 曹爱玲, 陈小强, 等. 微波对食品蛋白凝胶性和结构影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2017, 38(18): 317–322. FENG J H, CAO A L, CHEN X Q, et al. Research progress of effect of microwave heating on gelation properties and structure of food protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2017, 38(18): 317–322.
- [15] ZHAO W, YANG R J. Effect of high-intensity pulsed electric fields on the activity, conformation and self-aggregation of pepsin[J]. *Food Chemistry*, 2009, 114(3): 777–781.
- [16] HERMAWAN N, EVRENDILEK G A, DANTZER W R, et al. Pulsed electric field treatment of liquid whole egg inoculated with *Salmonella enteritidis* [J]. *Journal of Food Safety*, 2004, 24(1): 71–85.
- [17] MANZOCCO L. Photo-induced modification of food protein structure and functionality[J]. *Food Eng Rev*, 2015, 7(3): 346–356.
- [18] 豆玉新. 动态超高压微射流均质对卵清蛋白改性机理的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2008. DOU Y X. Study on modification mechanism of ovalbumin by dynamic ultra-high pressure microjet homogenization[D]. Nanchang: Nanchang University, 2008.
- [19] 李志. 动态超高压微射流对甘薯叶黄酮提取、结构以

- 及抗氧化性的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.
- LI Z. Effects of dynamic ultra-high pressure microjet on extraction, structure and antioxidant activity of flavonoids from sweet potato leaves[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.
- [20] 牛淑萍, 艾麦提·巴热提. 超高压技术在蛋白质食品加工中的应用分析[J]. 现代食品, 2021(20): 125-127.
- NIU S P, AMATI B. Application analysis of ultra-high pressure technology in protein food processing[J]. *Modern Food*, 2021(20): 125-127.
- [21] 周蓓蓓, 陈小雷, 鲍俊杰, 等. 超高压加工工艺对小龙虾仁品质影响的初步研究[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 154-160.
- ZHOU B B, CHEN X L, BAO J J, et al. Preliminary study on the effect of ultra-high pressure processing technology on the quality of small lobster[J]. *Food Science and Technology*, 2018, 43(6): 154-160.
- [22] SHARMA S, SINGH R K. Cold plasma treatment of dairy proteins in relation to functionality enhancement[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 102: 30-36.
- [23] 季慧, 陈野. 常压低温等离子处理提高花生分离蛋白水合性质的研究[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(8): 61-65, 72.
- JI H, CHEN Y. Study on improving hydration properties of peanut protein isolate by atmospheric plasma treatment at low temperature[J]. *Journal of the China Cereals and Oils Society*, 2019, 34(8): 61-65, 72.
- [24] SUROWSKY B, SCHLÜTER O, KNORR D. Interactions of non-thermal atmospheric pressure plasma with solid and liquid food systems: A review[J]. *Food Eng Rev*, 2014, 7(2): 82-108.
- [25] THIRUMDAS R, SARANGAPANI C, ANNAPURE U S. Cold plasma: A novel non-thermal technology for food processing[J]. *Food Biophysics*, 2014, 10(1): 1-11.
- [26] LIAO X Y, LIU D H, XIANG Q S, et al. Inactivation mechanisms of non-thermal plasma on microbes: A review[J]. *Food Control*, 2017, 75: 83-91.
- [27] 肖旭霖. 食品机械与设备[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 170-180.
- XIAO X L. *Food machinery and equipment*[M]. Beijing: Science Press, 2006: 170-180.
- [28] DAVIES K J, DELSIGNORE M E, LIN S W. Protein damage and degradation by oxygen radicals. II. Modification of amino acids[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1987, 262(20): 9902-9907.
- [29] OBADI M, ZHU K X, PENG W, et al. Effects of ozone treatment on the physicochemical and functional properties of whole grain flour[J]. *Journal of Cereal Science*, 2018, 81: 127-132.
- [30] 吴海波, 张麒, 邱硕, 等. 均质/加热条件下组分缺失型原料豆乳理化特性研究[J]. 农业机械学报, 2021, 52(8): 374-385.
- WU H B, ZHANG Q, QIU S, et al. Physicochemical properties of soymilk prepared from component deficient soybean under homogenization or heating conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(8): 374-385.
- [31] WU S, FITZPATRICK J, CRONIN K, et al. The effect of pH on the wetting and dissolution of milk protein isolate powder[J]. *Journal of Food Engineering*, 2019, 240: 114-119.
- [32] FOURNAISE T, BURGAIN J, PERROUD - THOMASSIN C, et al. Impact of the whey protein/casein ratio on the reconstitution and flow properties of spray-dried dairy protein powders[J]. *Powder Technology*, 2021, 391: 275-281.
- [33] 张爱琴, 齐凤敏, 赵爱萍, 等. 谷氨酰胺转氨酶改性核桃谷蛋白的结构表征分析[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(11): 38-44.
- ZHANG A Q, QI F M, ZHAO A P, et al. Structural characterization of walnut gluten modified by glutamine transaminase[J]. *Chinese Journal of Cereals and Oils*, 2019, 34(11): 38-44.
- [34] TIAN Y, TAHA A, ZHANG P P, et al. Effects of protein concentration, pH, and NaCl concentration on the physicochemical, interfacial, and emulsifying properties of β -conglycinin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 118: 106784.
- [35] GURALNICK J R, PANTHI R R, BOT F, et al. Pilot - scale production and physicochemical characterisation of spray - dried nanoparticulated whey protein powders[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2021, 74(3): 581-591.
- [36] 李佳笑, 石爱民, 刘红芝, 等. 植物蛋白酸性条件下溶解性提高的改性方法及应用研究进展[J]. 中国油脂, 2019, 44(9): 59-65.
- LI J X, SHI A M, LIU H Z, et al. Research progress on modification methods and application of

- improved solubility of plant protein under acidic conditions[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(9): 59–65.
- [37] BESSADA S M F, BARREIRA J C M, OLIVEIRA M B P P. Pulses and food security: Dietary protein, digestibility, bioactive and functional properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 93: 53–68.
- [38] SHEVKANI K, SINGH N, CHEN Y, et al. Pulse proteins: Secondary structure, functionality and applications[J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 56(6): 2787–2798.
- [39] CAO H W, JIAO X D, FAN D M, et al. Microwave irradiation promotes aggregation behavior of myosin through conformation changes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 96: 11–19.
- [40] YANG X, WANG L, ZHANG F, et al. Effects of multi-mode S-type ultrasound pretreatment on the preparation of ACE inhibitory peptide from rice protein[J]. *Food Chemistry*, 2020, 331: 127216.
- [41] 田然, 冯俊然, 隋晓楠, 等. 高强度超声处理对大豆 7S 和 11S 球蛋白结构和理化性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2022, 43(5): 87–97.
- TIAN R, FENG J R, SUI X N, et al. Effects of high intensity ultrasonic treatment on structure and physicochemical properties of soybean 7S and 11S globulin[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2022, 43(5): 87–97.
- [42] 苏巧艳. 微波处理对藜麦蛋白功能特性的影响[J]. *食品工程*, 2021(2): 33–37.
- SU Q Y. Effects of microwave treatment on functional properties of Quinoa protein[J]. *Food Engineering*, 2021(2): 33–37.
- [43] 郭超凡, 张振娜, 刘艳, 等. 射频加热对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. *中国食品学报*, 2019, 19(3): 42–48.
- GUO C F, ZHANG Z N, LIU Y, et al. Effects of radio frequency heating on functional properties of soybean protein isolate[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2019, 19(3): 42–48.
- [44] LING B, OUYANG S H, WANG S J. Effect of radio frequency treatment on functional, structural and thermal behaviors of protein isolates in rice bran[J]. *Food Chem*, 2019, 289: 537–544.
- [45] LI Y Q. Structure changes of soybean protein isolates by pulsed electric fields[J]. *Physics Procedia*, 2012, 33: 132–137.
- [46] APINUNJARUPONG S, LAPNIRUN S, THEERAKULKAIT C. Preparation and some functional properties of rice bran protein concentrate at different degree of hydrolysis using bromelain and alkaline extraction[J]. *Prep Biochem Biotechnol*, 2009, 39(2): 183–193.
- [47] LIU H Z, BAI W Q, HE L, et al. Degradation mechanism of *Saccharomyces cerevisiae* β -D-glucan by ionic liquid and dynamic high pressure microfluidization[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 241: 116123.
- [48] 敬思群, 王德萍, 周苗苗, 等. 动态高压微射流对大豆分离蛋白性质和结构的影响[J]. *食品工业*, 2021, 42(12): 318–322.
- JING S Q, WANG D P, ZHOU M M, et al. Effects of dynamic high pressure microjet on properties and structure of soybean protein isolate[J]. *Food Industry*, 2021, 42(12): 318–322.
- [49] 徐雨佳. 基于光谱法和分子模拟研究动态高压微射流改性前后大米谷蛋白和小分子天然活性物质间的相互作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- XU Y J. Study on the interaction between rice gluten and small molecular active substances before and after modification by dynamic high pressure micro-jet based on spectroscopy and molecular simulation[D]. Nanchang: Nanchang University, 2019.
- [50] 苏茜. 超高压处理对小米蛋白质功能特性的影响[D]. 太原: 山西农业大学, 2020.
- SU Q. Effects of high pressure treatment on protein functional properties of millet[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.
- [51] 林素丽. 超高压处理对米糠蛋白功能及结构特性的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- LIN S L. Effects of ultrahigh pressure treatment on functional and structural properties of rice bran protein[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [52] 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.
- [53] SHARAFODIN H, SOLTANIZADEH N. Potential application of DBD plasma technique for modifying structural and physicochemical properties of soy pro-

- tein isolate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 122: 107077.
- [54] MAHDAVIAN MEHR H, KOOCHEKI A. Effect of atmospheric cold plasma on structure, interfacial and emulsifying properties of Grass pea (*Lathyrus sativus* L.) protein isolate [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 106: 105899.
- [55] JI H, HAN F, PENG S L, et al. Behavioral solubilization of peanut protein isolate by atmospheric pressure cold plasma (ACP) treatment[J]. *Food Bioprocess Technol*, 2019, 12(12): 2018–2027.
- [56] 吴长玲, 田甜, 王冬梅, 等. 低温超微粉碎对豆渣蛋白结构及功能性质的影响[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(23): 50–55.
- WU C L, TIAN T, WANG D M, et al. Effects of superfine comminution of low temperature on the structural and functional properties of soy dregs protein[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(23): 50–55.
- [57] LIU B H, WANG H, HU T. et al. Ball-milling changed the physicochemical properties of SPI and its cold-set gels [J]. *Journal of Food Engineering*, 2017, 195: 158–165.
- [58] 邓爱华, 汤须崇, 王云, 等. 超声波对葵花籽蛋白功能特性的影响[J]. *食品科技*, 2022, 47(2): 90–94.
- DENG A H, TANG X C, WANG Y, et al. Effects of ultrasound on functional properties of sunflower seed protein [J]. *Food Science and Technology*, 2022, 47(2): 90–94.
- [59] 郑丽慧, 周晓瑞, 汪洋, 等. 不同处理方式对米糠蛋白溶解性的影响研究[J]. *现代面粉工业*, 2021, 35(1): 29–32.
- ZHENG L H, ZHOU X R, WANG Y, et al. Effects of different treatments on protein solubility of rice bran[J]. *Modern Flour Industry*, 2021, 35(1): 29–32.
- [60] 葛艳争, 石爱民, 任广跃, 等. 超声预处理对花生分离蛋白微凝胶颗粒结构及其 Pickering 乳液特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 95–101.
- GE Y Z, SHI A M, REN G Y, et al. Effects of ultrasonic pretreatment on particle structure and Pickering emulsion properties of peanut protein isolate microgel[J]. *Food Science*, 2022, 43(20): 95–101.
- [61] NARSIMHAN G, XIANG N. Role of proteins on formation, drainage, and stability of liquid food foams[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2018, 9: 45–63.
- [62] 戴彩霞, 何荣. 超高压和加热处理对菜籽蛋白功能性质和结构的影响研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(7): 68–74.
- DAI C X, HE R. Effects of high pressure and heat treatment on functional properties and structure of rapeseed protein[J]. *China Oils and Fats*, 2019, 44(7): 68–74.
- [63] HASSAN A B, VON HOERSTEN D, MOHAMED AHMED I A. Effect of radio frequency heat treatment on protein profile and functional properties of maize grain[J]. *Food Chem*, 2019, 271: 142–147.
- [64] 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.
- [65] QIN X S, LUO S Z, CAI J, et al. Effects of microwave pretreatment and transglutaminase crosslinking on the gelation properties of soybean protein isolate and wheat gluten mixtures[J]. *J Sci Food Agric*, 2016, 96(10): 3559–3566.
- [66] BOREDDY S R, THIPPAREDDI H, FRONING G, et al. Novel radiofrequency-assisted thermal processing improves the gelling properties of standard egg white powder[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(3): E665–E671.
- [67] ZHANG S, HUANG W, FEIZOLLAHI E, et al. Improvement of pea protein gelation at reduced temperature by atmospheric cold plasma and the gelling mechanism study[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2021, 67: 102567.
- [68] LIU Z, MCCLEMENTS D J, SHI A, et al. Janus particles: A review of their applications in food and medicine [J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 69(29): 10093–10104.

Research Progress of Novel Physical Modification Techniques to Improve Processing Properties of Plant Proteins

Li Shanshan¹, Liu Zhe¹, Zhi Lanyi¹, Tian Yanjie^{1,3}, Liu Hongzhi^{1,2,3}, Shi Aimin^{1,2*}, Wang Qiang^{1,2,3}

(¹Institute of Food Science and Technology, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Agro-Products Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193

²College of Food Science and Engineering, Nanjing University of Finance and Economics/Collaborative Innovation Center for Modern Grain Circulation and Safety, Nanjing 210023

³College of Food Science and Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, Shandong)

Abstract Compared with animal-derived protein, plant protein is more healthy and easier to be digested and absorbed by the human body, thus gaining a large market demand. However, the low solubility and other functional properties of plant proteins limit their application in food. The increasing demand for proteins with better functional properties requires the application of physical processing techniques of different heat treatments and non-heat treatments to modify plant proteins. New physical processing technology can replace low energy efficiency and high intensity heat treatment in modification of plant proteins. In this paper, the mechanism and effect of new physical modification methods on the functional modification of plant proteins were reviewed in order to provide theoretical reference for enhancing the added value of plant proteins in subsequent industrial processing.

Keywords plant protein; new physical modification; solubility; features