

低压均质处理对大豆分离蛋白溶解性及结构的影响

李 杨 李明达 张毅方 江连洲 王中江 滕 飞
(东北农业大学食品学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 通过测定大豆分离蛋白的粒径分布、溶解性、乳化性、三级结构及热稳定性等,分析探讨了低压均质处理(0~40 MPa)对大豆分离蛋白的溶解性及其结构的影响。结果显示,低压均质处理能够降低大豆分离蛋白的粒径,显著改善溶解性,并且溶解度与乳化活性指数、乳化稳定性指数呈正相关;得到了溶解度与乳化活性指数、乳化稳定性指数的线性拟合模型函数,其相关系数分别为0.956 8和0.962 5。荧光光谱分析表明,随着均质压力的增大,大豆分离蛋白结构展开,最大吸收波长红移,内部色氨酸基团暴露,荧光强度增大;30 MPa时,荧光强度最大,均质压力进一步增大时,由于蛋白分子发生聚集,之前暴露的活性基团内卷,导致荧光强度略有降低。热稳定性的分析结果验证了上述结论。

关键词: 大豆分离蛋白; 低压均质; 乳化性; 溶解性

中图分类号: TS214.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)03-0345-07

Effect of Low Pressure Homogenization on Solubility and Structure of Soybean Protein Isolate

LI Yang LI Mingda ZHANG Yifang JIANG Lianzhou WANG Zhongjiang TENG Fei
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: High pressure homogenization is one of the most common physical modification methods in protein processing. However, the pressure of homogenization generally does not exceed 40 MPa in actual production due to the limitation of equipment. Therefore, it is of great importance to study the effect of low pressure homogenization (0~40 MPa) on the solubility and structure of soybean protein isolate. The effects of low-pressure homogenization (0~40 MPa) on the solubility and structure of soybean protein isolate (SPI) were studied by measuring particle size distribution, solubility, emulsification, tertiary structure and thermal stability. The results showed that low-pressure homogenization treatment could reduce the particle size of SPI, significantly improve the solubility, and the solubility was positively correlated with emulsifying ability and emulsifying stability. The linear fitting model functions were obtained, and the correlation coefficients were 0.956 8 and 0.962 5, respectively. Fluorescence spectrum analysis showed that the structure of SPI was expanded with the increase of homogeneous pressure, the maximum absorption wavelength was red-shifted, the internal tryptophan group was exposed, and the fluorescence intensity was increased with the increase of homogeneous pressure. At 30 MPa, the fluorescence intensity was the highest. When homogeneous pressure was further increased, the protein molecules were aggregated, and the former exposed active groups were hided in the inside of SPI with a slight decrease in fluorescence intensity due to inward crimping of active groups. The above results were verified by the analysis results of thermal stability.

Key words: soybean protein isolate; low pressure homogenization; emulsification; solubility

0 引言

大豆分离蛋白(Soybean protein isolate, SPI)是指以低温豆粕为原料、采用碱溶酸沉方法制取的一种蛋白质质量分数高达90%的大豆蛋白制品。为了改善大豆分离蛋白的功能特性,提高其生物利

用率,同时除去某些有害物质,常通过物理改性、化学改性、酶改性等方式对大豆分离蛋白进行修饰。其中,高压均质处理是食品加工中应用最为普遍的一种物理改性方式,且其对大豆蛋白功能性质的影响已被广泛研究。高压均质处理过程中的空化、剪切、湍流和温度上升等同时作用,使蛋白分子之间的非共价键断裂,产生分子间或分子内的重聚集,破坏分子间的疏水作用和静电吸引作用,改变了蛋白质的结构和功能性质^[1]。翟爱华等^[2]研究了 40 MPa 下高压均质处理对大豆蛋白 7S 和 11S 乳化性和溶解性的影响,结果表明,处理后溶解性和乳化性均增大。杨盛楠等^[3]研究发现,大豆分离蛋白经过 0 ~ 55 MPa 的均质处理,溶解性和乳化性也表现出增大的趋势,但对其相关性未做进一步研究。YANG 等^[4]研究发现,经过 207 MPa 压力处理的蚕豆蛋白,其溶解性明显改善,但乳化性却有所降低。YU 等^[5]研究发现,贻贝肌原纤维蛋白经过 0 ~ 100 MPa 均质压力处理后,乳化性和溶解性显著提高,二级结构和三级结构发生了明显变化。目前有很多学者对高压均质处理大豆分离蛋白的溶解性和乳化性进行研究,并发现其存在一定相关性,但没有关于低压均质处理(0 ~ 40 MPa)对大豆分离蛋白的溶解性和乳化性的相关性及其结构影响的报道。

实际生产中,由于受设备的限制,均质处理的压力一般不超过 40 MPa。本文研究低压均质(0 ~ 40 MPa)对大豆分离蛋白溶解性及其结构的影响,并从蛋白质结构变化出发,探讨其作用机理。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

脱脂豆粕,哈高科大豆食品有限责任公司;一级大豆色拉油,九三集团哈尔滨惠康食品有限公司;氢氧化钠、盐酸等为国产分析纯试剂。

1.2 仪器与设备

FD-1C 型冷冻干燥机,北京德天佑科技发展有限公司;FJ-200 型高速分散均质机,上海标本模型厂;实验型高压均质机,英国 Stansted Fluid Power 公司;LGR20-W 型台式高速冷冻离心机,北京京立离心机有限公司;PALS 型激光粒度分析仪,美国布鲁克海文仪器公司;F-4500 型荧光分光光度计,日本 HITACHI 公司;Netzsch-DSC 204-F 型差示扫描量热仪(Differential scanning calorimetry, DSC),德国 Netzsch 公司。

1.3 方法

1.3.1 SPI 制备

称取 1 600 g 脱脂豆粕,分散在 12 L 去离子水

中,用 2 mol/L 的 NaOH 调 pH 值至 7.5,在 55℃ 下搅拌 1 h,离心(4 500 r/min, 20 min)取上清液;在沉淀中加入 9.6 L 去离子水搅拌并重复上述离心操作,取上清液。将两次上清液合并,在水浴 50℃ 下,调 pH 值至 4.5,离心(3 000 r/min, 10 min)取沉淀,即为蛋白凝乳,加少量水洗涤 3 次后调 pH 值至 7.0,配成 11% 的 SPI 溶液,分为 5 份,分别在压力 10、20、30、40 MPa 下均质改性,与对照样品一起冷冻干燥,贮存。

1.3.2 粒度测定

参照张媛等^[6]的测定方法,采用激光粒度分析仪测定 SPI 的粒径分布。用 50 mmol/L 的磷酸盐缓冲液(pH 值 7.0)将 SPI 样品稀释为 1 mg/mL 的蛋白溶液,于室温(20℃)条件下进行测量。

1.3.3 溶解性测定

参照王辰等^[7]的测定方法,称取 100 mg SPI 样品分散于 10 mL 去离子水中,磁力搅拌 30 min, 20℃、12 000 g 离心 20 min。上清液经适度稀释,采用 Lowry 法测定蛋白质含量,以牛血清白蛋白为标准物绘制标准曲线。蛋白质的溶解度表示为上清液蛋白质量浓度占总蛋白质量浓度的百分比。

1.3.4 乳化活性及乳化稳定性测定

参照 TANG 等^[8]的方法,测定 SPI 的乳化活性指数(Emulsifying activity index, EAI)和乳化稳定指数(Emulsion stability index, ESI)。将处理后的 SPI 样品稀释到 2 mg/mL,处理后 SPI 样品与大豆油以体积比 3:1 混合,以 10 000 r/min 高速乳化 1 min,迅速吸取底部乳液 50 μL 加入到 5 mL 0.1% 十二烷基硫酸钠(SDS)溶液中,在漩涡混合器上混合均匀。分别测定 0 min 和 10 min 吸光度,检测波长 500 nm 下的吸光度,计算公式为

$$E_{Ai} = \frac{2TA_0V}{10\,000C\Phi}$$
 (1)

$$E_{Si} = \frac{A_{10}}{A_0} \times 100\%$$
 (2)

- 式中 E_{Ai} ——乳化活性指数, m^2/g
 E_{Si} ——乳化稳定性指数, %
 T ——反应速率常数,取 2.303
 V ——稀释倍数
 A_0 ——零时刻的吸光度
 A_{10} ——静止 10 min 的吸光度
 C ——蛋白质量浓度, g/mL
 Φ ——乳化液中油的体积分数, %

1.3.5 荧光光谱测定

参照唐传核等^[9]的方法,低压均质的 SPI 内源性荧光光谱(色氨酸荧光光谱)采用 F-4500 型荧

光分光光度计测定。将 SPI 样品用 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH 值为 7.0) 配制成质量浓度为 0.20 mg/mL 的蛋白溶液。SPI 内部的色氨酸基团为荧光探针分析荧光发射光谱, 激发波长设定为 290 nm, 发射波长扫描范围为 300 ~ 400 nm, 激发狭缝宽度为 5 nm, 同样发射狭缝宽度也为 5 nm。重复扫描 3 次。

1.3.6 三维荧光光谱测定

参照 ZHANG 等^[10]的方法, 采用荧光光谱仪将不同低压均质处理条件下的 SPI 样品, 用 0.01 mol/L 的磷酸盐缓冲液 (pH 值为 7.0) 配制成质量浓度为 0.15 mg/mL 的蛋白溶液。激发波长扫描范围为 200 ~ 350 nm, 发射波长扫描范围为 200 ~ 500 nm, 激发狭缝宽度为 10 nm, 同样发射狭缝宽度也为 10 nm, 重复扫描 3 次。

1.3.7 DSC 测定

参照王中江等^[11]的方法, 称取不同低压均质处理条件下 SPI 样品 5 mg 与 10 μ L 的 0.01 mol/L 磷酸缓冲溶液 (pH 值为 7.0) 混合放入铝盒中, 压盘密封, 室温条件下放置 8 h。将经过平衡处理的样品铝盒放入到 DSC 操作台左侧, 空白铝盒放置在右侧。以 10 $^{\circ}$ C/min 升温速率在 20 ~ 110 $^{\circ}$ C 范围内扫描。将此过程中记录 SPI 的变性温度 (T_d) 和变性焓变 (ΔH)。重复测定 3 次取平均值以减少实验误差。

1.3.8 统计分析

图表制作采用 OriginPro 8.5 软件, 使用 SPSS 19.0 进行 ANOVA 差异显著性分析和方差分析 ($P < 0.05$ 为显著性差异)。每个实验重复 3 次, 结果表示为平均值 $\pm$ 标准差。

2 结果与分析

2.1 粒径分布

近年来, 激光光散射技术广泛应用于高分子和胶体科学研究中, 包括静态 (经典) 和动态两部分。本文应用动态光散射技术表征 SPI 在不同均质压力条件下的溶液行为。

由图 1 可知, 均质压力由 0 MPa 增大至 30 MPa 时, SPI 溶液的粒径分布逐渐向小粒径方向移动, 主要分布在 50 ~ 1 000 μ m 之间。毕爽等^[12]研究发现, 大豆蛋白-磷脂酰胆碱复合体系经过高压均质机后在狭小的空间内被撞击, 造成复合体系颗粒的解聚、破碎, 所以粒径较小。而当均质压力达到 40 MPa 时, 大豆分离蛋白的粒径分布则表现出向右平移的趋势, 主要分布在 100 ~ 1 000 μ m 之间。这可能是均质压力进一步增大时, 大豆分离蛋白分子之间相互作用加强, 促进了蛋白质聚集体的形成, 从而使平

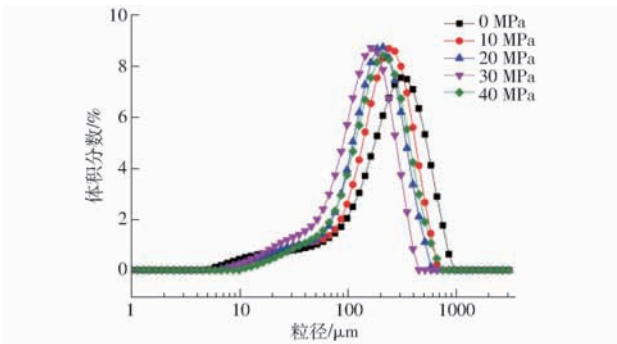


图 1 低压均质对大豆分离蛋白粒径分布的影响
Fig.1 Effect of low pressure homogenization on particle size distribution of SPI

均粒径有所提高。YU 等^[5]得出了相似的结果, 贻贝肌原纤维蛋白的粒径分布宽度随着均质压力的增大而减小, 但 100 MPa 下发现更宽的粒径分布, 推测可能是形成了更大的聚集体。

2.2 溶解度

由图 2 可知, 未经均质处理的样品溶解度为 46.8%, 随着均质压力的逐渐增大, 溶解度逐渐增大, 30 MPa 时, 相对于未处理样品, 溶解度提高了 11 个百分点, 这主要是由于低压均质过程中, SPI 受到剪切力和冲击力作用, 粒径降低, 比表面积增大, 增大了蛋白与水的接触面积, 水溶性得到提高。与文献[13 - 15]的结论一致, 即粒径减小时, 蛋白质分子的表面区域变大, 分子活性基团暴露, 其通过氢键与水相互作用从而提高了溶解度。姜梅等^[16]的研究则认为高压均质使得大豆蛋白的紧密结构逐渐展开, 使得球状蛋白质内部的极性基团和疏水基团暴露, 蛋白质分子 (颗粒) 的表面电荷分布加强, 围绕新暴露的极性基团的结合水也增多, 蛋白质的水化作用增强, 进一步提高溶解性。

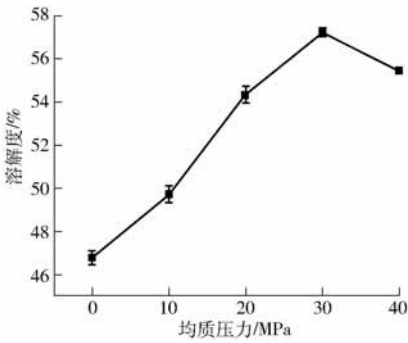


图 2 低压均质对大豆分离蛋白溶解度的影响
Fig.2 Effects of low pressure homogenization on solubility of SPI

而当均质压力为 40 MPa 时, SPI 的溶解度有所降低, 产生这种现象的原因可能是蛋白质分子在解折叠的过程中, 更快速的剪切力和撞击作用使得展开的分子之间发生强的静电引力而产生部分聚集,

从而降低了 SPI 在水中的溶解性^[17]。

2.3 乳化活性及乳化稳定性

乳化性是指蛋白质导致油与水混合,形成乳液,并使其保持稳定,包括乳化活性和乳化稳定性。由图 3 可知,SPI 的乳化活性和乳化稳定性均随着均质压力的升高而呈先增大后降低的趋势。30 MPa 时,SPI 的乳化活性指数达到 49.5 m²/g,比未处理样品提高了 8.3 m²/g。这可能是由于随着均质压力增大,大分子蛋白受到的剪切作用增强,使得分子平均粒径降低,更多的极性基团吸附到油水界面,从而改善乳化活性和乳化稳定性。郭丽等^[18]得出了相似的结论,即蛋白质分子经过均质处理后在水中进一步伸展,极性侧链基团的水合作用增强,亲水性提高,同时聚集在油-水界面,降低其表面张力,进一步提高乳化活性。文献[19-20]的研究也证实上述结论。而当压力继续增大到 40 MPa 时,乳化性反而降低,可能是由于均质压力的增大进一步降低了蛋白分子粒径,反而提高了分子间的静电引力,从而导致溶解性降低,乳化性也随之降低。LIU 等^[21]研究发现,高压均质对乳清蛋白的乳化活性和乳化稳定性具有负面影响,这可能与界面膜的粘弹性部分降低有关,也可能与可溶性超分子聚集体引起的絮凝效应有关。

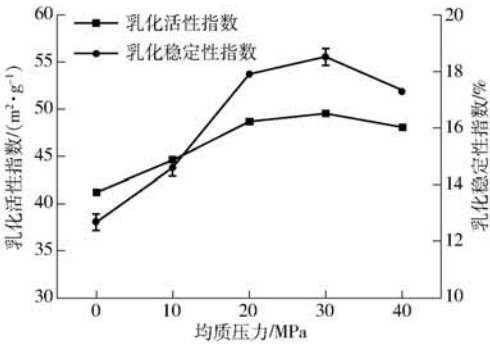


图 3 低压均质对大豆分离蛋白乳化性的影响
Fig.3 Effects of low pressure homogenization on emulsifying of SPI

2.4 蛋白溶解性和乳化性的相关性分析

由图 4、5 可知,随着溶解度的增加,乳化活性指数和乳化稳定性指数均呈递增趋势,具有良好的线性相关关系,其中,SPI 的溶解度与乳化活性指数、乳化稳定性指数的线性拟合模型函数分别为 $y = 0.7888x + 4.8636$ 、 $y = 0.5614x - 13.373$,相关系数分别为 0.9568、0.9625。当均质压力为 30 MPa 时,SPI 的溶解性与乳化性达到最强,并且低压均质处理通过改变蛋白的溶解性,进而影响乳化性和乳化稳定性。

2.5 荧光光谱分析

荧光光谱是分析蛋白质三级局部结构的有效方

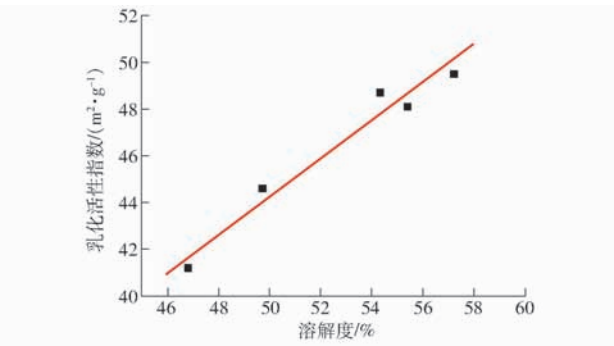


图 4 大豆分离蛋白溶解性和乳化活性的关系
Fig.4 Relationship between solubility and emulsification of SPI

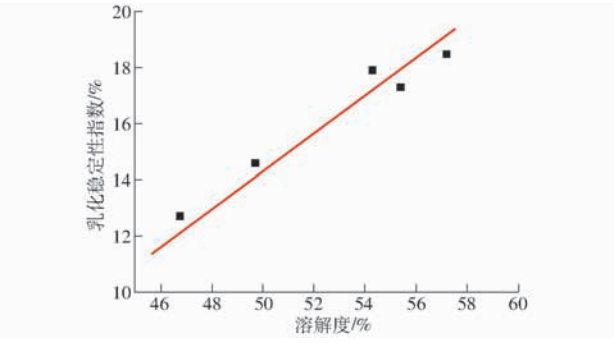


图 5 大豆分离蛋白溶解性和乳化稳定性的关系
Fig.5 Relationship between solubility and emulsification stability of SPI

法。本文采用 290 nm 作为激发波长,所得图谱主要是以色氨酸(Try)为发射基团的荧光光谱,表征色氨酸微环境极性的变化,是一种在三级结构水平反映蛋白质构象变化的比较灵敏的技术手段。

由图 6 可知,随着均质压力的增大,SPI 的最大发射波长红移,荧光强度随着均质压力的增大而升高,当均质压力为 30 MPa 时,荧光强度达到最大。可能是 SPI 在低压均质作用下发生了部分结构解折叠,内部疏水性基团逐渐暴露,更多的 Try 残基暴露于蛋白质分子表面,荧光强度增大;王喜波等^[22]研究表明,随着均质压力的增加,SPI 空间结构发生变化,Try 残基暴露于蛋白质分子表面,蛋白质的疏水区域局部改变,发色基团如色氨酸残基所处环境由非极性向极性转化,这可能是高压均质处理导致 SPI 蛋白分子部分解折叠造成的,即随着柔性的增加,SPI 三级结构变得更加舒展。当均质压力为 40 MPa 时,最大发射波长发生蓝移,荧光强度有所降低,这可能与蛋白质在此状态下发生的亚基重聚集行为有关。YU 等^[5]研究了蚕豆蛋白随着压力的增加,发射峰的强度逐渐降低。最大发射波长蓝移,表明蚕豆蛋白的芳香族氨基酸残基从疏水环境转移到更亲水的环境中,与上述结果不同,可能是由于后者的均质压力更高,导致结构变化有所差异。

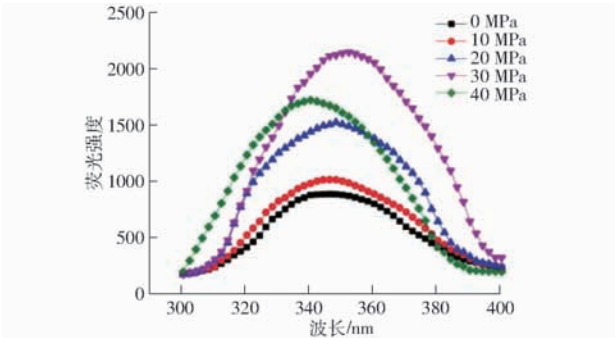


图 6 不同均质压力下大豆分离蛋白荧光光谱
Fig. 6 Fluorescence spectra of SPI under different homogenization pressures

2.6 三维荧光光谱分析

三维荧光光谱是解析蛋白结构特征的重要方式之一。图 7a~7e 分别表示经过 0~40 MPa 均质处理的 SPI 的三维荧光光谱。图中,峰 a 为瑞利一级散

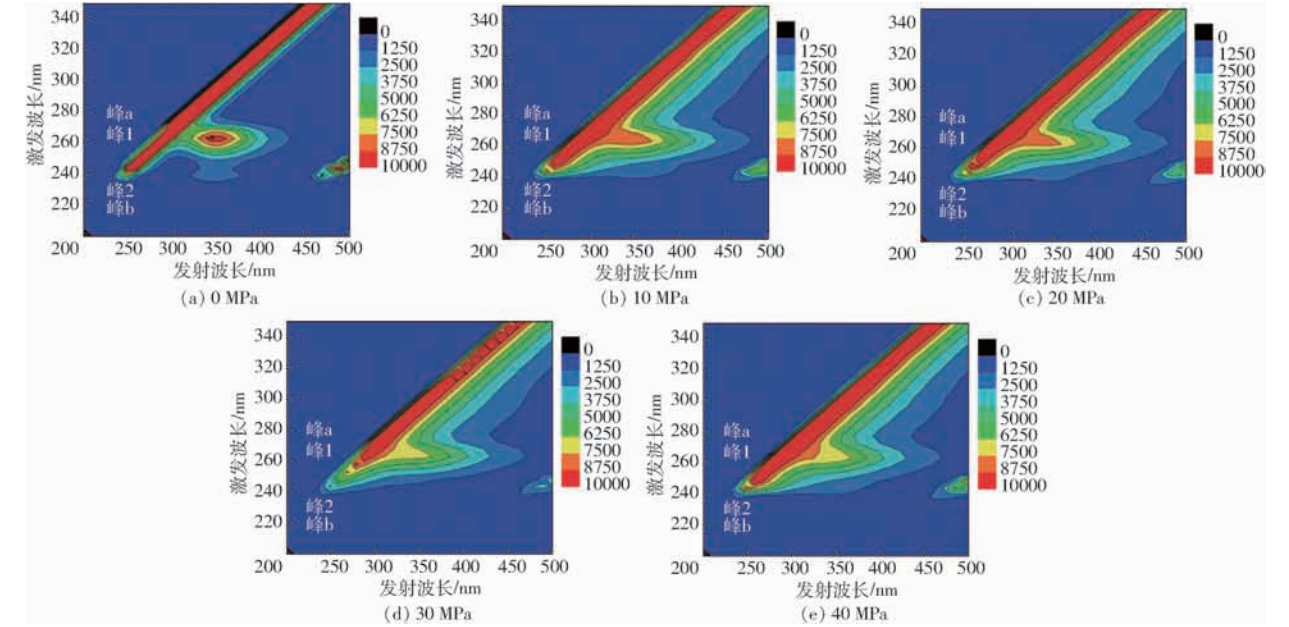


图 7 低压均质处理大豆分离蛋白的三维荧光光谱
Fig. 7 Three-dimensional fluorescence spectrum analysis diagrams of SPI treated by low pressure homogenization

用料少等特点,被大量应用于蛋白质热变性研究领域。在 DSC 谱图中,通过最大峰对应的温度和峰面积可分别确定变性温度 (T_d) 及焓变 (ΔH)。变性温度代表蛋白质的热稳定性,而焓变则反映蛋白质分子的疏水性和/或亲水性,同时也反映蛋白质分子的

射峰,峰 b 为二级散射峰。经过均质处理后的 SPI,光散射作用增强,荧光强度增大。图中峰 1 表示色氨酸和酪氨酸产生的特征峰^[23],经过均质处理后,峰 1 的颜色变浅,颜色越浅表示荧光强度越低,表明 SPI 经过低压均质压力处理后,荧光强度显著降低,等高线变稀疏,可能是由于更多的酪氨酸和色氨酸残基包埋于蛋白的疏水区域中。峰 2 表示多肽链骨架结构产生的特征峰^[24],随着均质压力升高,此区域面积减少,表示均质处理使得蛋白质多肽链的骨架伸展,蛋白结构发生变化;当均质压力达到 40 MPa 时,峰 2 所在区域的面积有所增大,侧面证明了蛋白聚集体的形成。

2.7 DSC 分析

差示扫描量热法(DSC)是用于测量样品热力学特性的一种热分析技术,具有分辨能力强、灵敏度

聚集程度^[25]。如表 1 所示,不同均质条件处理后大豆蛋白的峰形相似,均有两个变性峰,即为 SPI 中两种主要的蛋白: β -伴球蛋白(7S)和球蛋白(11S)。未经处理的 SPI 的 7S 和 11S 的变性温度分别为 76.87℃和

表 1 低压均质处理后大豆分离蛋白的 DSC 分析				
Tab. 1 DSC analysis of SPI after low pressure homogeneous treatment				
均质压力/ MPa	7S		11S	
	$T_d/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$	$T_d/^\circ\text{C}$	$\Delta H/(\text{J}\cdot\text{g}^{-1})$
0	(76.87 ± 0.15) ^a	(1.296 ± 0.01) ^a	96.18 ^b	(8.441 ± 0.01) ^a
10	(74.29 ± 0.05) ^c	(0.833 ± 0.01) ^d	95.22 ^c	(8.073 ± 0.01) ^b
20	(74.17 ± 0.11) ^d	(0.669 ± 0.06) ^b	(94.52 ± 0.01) ^d	(7.82 ± 0.01) ^c
30	(73.23 ± 0.15) ^e	(0.420 ± 0.02) ^e	(94.24 ± 0.05) ^e	(6.23 ± 0.02) ^d
40	(76.21 ± 0.13) ^b	(0.621 ± 0.10) ^c	(96.32 ± 0.22) ^a	6.98 ^e

注:同一列中不同字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)。

96.18℃。与对照样品相比,经 10~30 MPa 均质处理后 SPI 的变性温度得到一定程度的降低,这表明均质处理改变了 SPI 的空间构象,但当均质压力继续升高至 40 MPa 时,7S 和 11S 的变性温度均表现出上升趋势,FLOURY 等^[26]的研究表明,高压均质可使大豆蛋白的变性温度升高,加大了大分子结构的稳定性。文献[27-28]也表明高压均质可使天然蛋白质变性并产生紧密的内部结构以增强热稳定性。上述结论证明均质压力 40 MPa 下,部分分离的 7S、11S 组分重新结合形成更稳定聚集体。

焓变可以评定蛋白质的变性程度,焓变越小,则表示其变性越大,相反,焓变越大,表明变性越小。ZHOU 等^[29]研究发现焓变的降低表明蛋白质中有序结构的减少,CHEN 等^[30]认为高压均质对蛋白内部和分子间疏水键有破坏作用,使其暴露于分子表面,因此蛋白结构中完全热解折叠所需的能量减少,从而焓变降低。由上述结论可得,均质压力为 30 MPa 时,焓变最小,说明 SPI 的变性程度较大,影响其内部结构,从而改善溶解性和乳化性。这之前荧

光光谱拟合的大豆蛋白三级结构的变化相吻合。

3 结束语

低压均质处理对 SPI 的粒径分布、溶解性、乳化活性、乳化稳定性、三级结构和热稳定性均产生了显著的影响,尤其是在 30 MPa 时,溶解性和乳化性均取得最大值。实验发现:SPI 的溶解度与乳化活性指数、乳化稳定性指数具有正相关性,其线性拟合模型函数分别为 $y = 0.7888x + 4.8636$ 、 $y = 0.5614x - 13.373$,相关系数分别为 0.9568、0.9625。此时,蛋白质的三级结构展开,变性程度最大。荧光光谱结果表明,随着均质压力的增大,SPI 结构展开,色氨酸基团暴露,荧光强度增大,40 MPa 时,蛋白分子可能发生亚基聚集,疏水基团内卷,从而使荧光强度降低。DSC 的结果表明,随着均质压力的增大,变性温度和焓变降低,SPI 中的有序结构减少,表明蛋白质结构松散;当均质压力增大到 40 MPa 时,由于形成蛋白聚集体,提高了分子结构的稳定性,充分验证了荧光光谱拟合的大豆蛋白三级结构变化。

参 考 文 献

- [1] 江连洲. 食用蛋白质柔性化加工技术概述[J]. 中国食品学报,2015,15(8):1-9.
JIANG Lianzhou. An introduction of the flexible processing technology of edible protein[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology,2015,15(8):1-9. (in Chinese)
- [2] 翟爱华, 杨盛楠. 高压均质对大豆蛋白 7S 和 11S 组分功能性质的影响[J]. 食品科技,2015(6):208-211.
ZHAI Aihua, YANG Shengnan. The influence of high pressure homogenization on the functional properties of 7S and 11S[J]. Food Science and Technology,2015(6):208-211. (in Chinese)
- [3] 杨盛楠, 翟爱华. 高压均质对大豆分离蛋白功能性质的影响[J]. 中国酿造,2014,33(12):89-93.
YANG Shengnan, ZHAI Aihua. Effect of high pressure homogenization on functional properties of soy protein isolate[J]. Chinese Brewing, 2014, 33(12):89-93. (in Chinese)
- [4] YANG J, LIU G, ZENG H, et al. Effects of high pressure homogenization on faba bean protein aggregation in relation to solubility and interfacial properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 83(1):275-284.
- [5] YU C, WU F, YUE C, et al. Effects of high-pressure homogenization on functional properties and structure of mussel (*Mytilus edulis*) myofibrillar proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 118, Part A: 741-746.
- [6] 张媛, 姜帆, 刘筹, 等. 超高压均质对大豆分离蛋白乳化特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(1):1-5.
ZHANG Yuan, JIANG Fan, LIU Qian, et al. The changes of emulsify properties of soybean protein isolate induced by ultra high pressure homogenization[J]. Food Research and Development, 2017, 38(1):1-5. (in Chinese)
- [7] 王辰, 江连洲, 魏冬旭, 等. 不同品种大豆分离蛋白结构与表面疏水性的关系[J]. 食品科学, 2012, 33(9):54-57.
WANG Chen, JIANG Lianzhou, WEI Dongxu, et al. Relationship between structure and surface hydrophobicity of soybean protein isolates from different varieties[J]. Food Science, 2012, 33(9):54-57. (in Chinese)
- [8] TANG S, HETTIARACHCHY N S, HORAX R, et al. Physicochemical properties and functionality of rice bran protein hydrolyzate prepared from heat-stabilized defatted rice bran with the aid of enzymes[J]. Journal of Food Science, 2003, 68(1):152-157.
- [9] 唐传核, 杨晓泉, 陈中, 等. MTGase 聚合大豆蛋白及其改性机理(Ⅲ) MTGase 聚合改性大豆蛋白机理[J]. 中国粮油学报, 2004, 19(3):42-46.
TANG Chuanhe, YANG Xiaoquan, CHEN Zhong, et al. MTGase polymerization of soybean protein and its modification mechanism (Ⅲ) mtgase polymerization modified soy protein mechanism [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2004, 19(3): 42-46. (in Chinese)
- [10] ZHANG H M, WANG Y Q, JIANG M L. A fluorimetric study of the interaction of C. I. Solvent Red 24 with haemoglobin[J]. Dyes & Pigments, 2009, 82(2):156-163.
- [11] 王中江, 张潇元, 隋晓楠, 等. 热处理大豆蛋白体外消化产物结构特征分析[J]. 食品科学, 2017, 38(1):20-26.

- WANG Zhongjiang, ZHANG Xiaoyuan, SUI Xiaonan, et al. Structural characteristics of in vitro digestion products of heat-treated soybean protein[J]. Food Science, 2017, 38(1):20–26. (in Chinese)
- [12] 毕爽, 李杨, 隋晓楠, 等. 高压均质对大豆蛋白-磷脂复合体系结构及理化/功能性质的影响[J]. 食品科学, 2017, 38(5):148–153.
- BI Shuang, LI Yang, SUI Xiaonan, et al. Effect of high pressure homogenization on structural, physicochemical and functional properties of soybean protein-lecithin composite system [J]. Food Science, 2017, 38(5):148–153. (in Chinese)
- [13] SHILOASGREE B G, ARORA S, CHAWLA P, et al. Succinylation of sodium caseinate and its effect on physicochemical and functional properties of protein[J]. LWT—Food Science and Technology, 2015, 64(2):1270–1277.
- [14] CHEN C, CHI Y J. Comparisons on the functional properties and antioxidant activity of spray-dried and freeze-dried egg white protein hydrolysate[J]. Food & Bioprocess Technology, 2012, 5(6):2342–2352.
- [15] SIDDIQUE M, MARESCA P, PATARO G, et al. Effect of pulsed light treatment on structural and functional properties of whey protein isolate[J]. Food Research International, 2016, 87:189–196.
- [16] 姜梅, 董明盛, 芮昕, 等. 高压均质和热处理对豆乳蛋白质溶解性的影响[J]. 食品科学, 2013, 34(21):125–130.
- JIANG Mei, DONG Mingsheng, RUI Xin, et al. Effect of high pressure homogenization and heat treatment on protein solubility in soymilk [J]. Food Science, 2013, 34(21):125–130. (in Chinese)
- [17] 孙燕婷, 黄国清, 肖军霞, 等. 超声处理对大豆分离蛋白溶解性和乳化活性的影响[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(7):22–26.
- SUN Yanting, HUANG Guoqing, XIAO Junxia, et al. Effects of ultrasonic treatment on solubility and emulsifying activity of soybean protein isolate [J]. Chinese Journal of Grain and Oil, 2011, 26(7):22–26. (in Chinese)
- [18] 郭丽, 王鹏, 赵东江, 等. 高压均质对大豆 β -伴球蛋白结构及功能特性的影响[J]. 食品科学, 2011, 32(19):83–87.
- GUO Li, WANG Peng, ZHAO Dongjiang, et al. Effect of high-pressure homogenization on structure and functional properties of soybean β -conglycinin[J]. Food Science, 2011, 32(19):83–87. (in Chinese)
- [19] BAIER D, SCHMITT C, KNORR D. Changes in functionality of whey protein and micellar casein after high pressure-low temperature treatments[J]. Food Hydrocolloids, 2015, 44:416–423.
- [20] DISSANAYAKE M, VASILJEVIC T. Functional properties of whey proteins affected by heat treatment and hydrodynamic high-pressure shearing[J]. Journal of Dairy Science, 2009, 92(4):1387–1397.
- [21] LIU C M, ZHONG J Z, LIU W, et al. Relationship between functional properties and aggregation changes of whey protein induced by high pressure microfluidization[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(4):E341–E347.
- [22] 王喜波, 徐晔晔, 于洁, 等. 高压均质对大豆蛋白柔性和乳化性的影响及其相关性分析[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(6):362–367.
- WANG Xibo, XU Yeye, YU Jie, et al. Effect of high pressure homogenization on flexibility and emulsifying properties of soy protein isolate and correlation analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6):362–367. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180643&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.043. (in Chinese)
- [23] FRIEDMAN M, BRANDON D L. Nutritional and health benefits of soy proteins[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2001, 49(3):1069–1086.
- [24] DING F, LIU W, LI N, et al. Complex of nicosulfuron with human serum albumin: a biophysical study[J]. Journal of Molecular Structure, 2010, 975(1):256–264.
- [25] MORAS B, REY S, VILAREM G, et al. Pressurized water extraction of isoflavones by experimental design from soybean flour and soybean protein isolate[J]. Food Chemistry, 2017, 214:9–15.
- [26] FLOURY J, DESRUMAUX A, LARDIERES J. Effect of high-pressure homogenization on droplet size distributions and rheological properties of model oil-in-water emulsions[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2000, 1(2):127–134.
- [27] CHEN X, ZHOU R, XU X, et al. Structural modification by high-pressure homogenization for improved functional properties of freeze-dried myofibrillar proteins powder[J]. Food Research International, 2017, 100, Part 1:193–200.
- [28] 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]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2016, 34:161–170.
- [29] ZHOU D, PAN Y, YE J, et al. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolate and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil[J]. LWT—Food Science and Technology, 2017, 83:292–297.
- [30] CHEN X, XU X, HAN M, et al. Conformational changes induced by high-pressure homogenization inhibit myosin filament formation in low ionic strength solutions[J]. Food Research International, 2016, 85:1–9.