

# 高压微射流压力对大豆蛋白-大豆多糖体系功能性质的影响

沙小梅<sup>1</sup>, 胡姿姿<sup>1</sup>, 涂宗财<sup>1,2\*</sup>, 王 辉<sup>2</sup>, 黄 涛<sup>2</sup>, 张 露<sup>1</sup>, 杨 萍<sup>1</sup>

(1. 江西师范大学生命科学学院, 南昌 330022; 2. 南昌大学食品科学与技术国家重点实验室, 南昌 330047)

**摘 要:** 为提升大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)的功能性质, 该文引入大豆可溶性多糖(soybean soluble polysaccharides, SSPS), 构建大豆分离蛋白-大豆可溶性多糖体系(SPI-SSPS), 研究动态高压微射流(dynamic high-pressure microfluidization, DHPM)处理对 SPI-SSPS 功能特性的影响。分别采用 0, 60, 100, 140 和 180 MPa 的 DHPM 压力处理 SPI-SSPS, 探究不同压力对 SPI-SSPS 起泡特性、乳化特性、溶解性、粒度分布和表面疏水性的影响。结果表明, DHPM 处理能提高 SPI 的溶解性和起泡特性, 且 SSPS 的存在能显著提高 DHPM 对 SPI 功能性质的改善效果( $P<0.05$ )。100 和 60 MPa 的 DHPM 处理能使 SPI-SSPS 呈现较高的起泡能力和起泡稳定性, 分别为未处理样品的 1.2 和 2.4 倍。140 MPa 的 DHPM 处理使 SPI-SSPS 溶解性较强, 为未处理样品的 1.8 倍。然而, DHPM 处理会显著降低 SPI-SSPS 的乳化特性、粒径和表面疏水性( $P<0.05$ )。随着处理压力的增加, SPI-SSPS 的粒度和表面疏水性逐渐降低, 在 180MPa 的 DHPM 处理下 SPI-SSPS 具有较小的粒径和较低的荧光强度。综上所述, DHPM 结合 SSPS 改性技术可用于改善 SPI 的功能性质(如溶解性、起泡性), 促进 SPI 在食品工业的应用。该文的研究结果可为 SPI 的功能性质改性提供参考。

**关键词:** 蛋白; 压力; 乳化; 大豆可溶性多糖; 溶解性; 起泡特性

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.037

中图分类号: TS214.9

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-17-0281-06

沙小梅, 胡姿姿, 涂宗财, 王 辉, 黄 涛, 张 露, 杨 萍. 高压微射流压力对大豆蛋白-大豆多糖体系功能性质的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(17): 281—286. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.037 <http://www.tcsae.org>  
Sha Xiaomei, Hu Zizi, Tu Zongcai, Wang Hui, Huang Tao, Zhang Lu, Yang Ping. Effect of dynamic high-pressure microfluidization on functional properties of soy protein isolate-soybean soluble polysaccharides system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(17): 281—286. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.17.037 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)是一种重要的高纯度商业大豆蛋白产品, 主要包括大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白, 因具有良好的营养价值和丰富的原料供给, 被广泛应用于食品生产加工<sup>[1-4]</sup>。然而, SPI 的低溶解性和界面性质限制了它的应用范围<sup>[5]</sup>。近年来, 大量技术被用于 SPI 修饰改性, 如超声波<sup>[1]</sup>、微生物发酵<sup>[6]</sup>、动态高压微射流(dynamic high-pressure microfluidization, DHPM)<sup>[5]</sup>、谷氨酰胺转氨酶和美拉德交联反应<sup>[7-8]</sup>、高压脉冲电场<sup>[9]</sup>等。

DHPM 是一种新兴的物理技术, 被广泛用于修饰蛋白质的功能性质和结构特性, 它的作用力集高速撞击、高频振荡、瞬时压力降、强剪切力、气穴作用和超高压于一体<sup>[6]</sup>。近年来, DHPM 已成功用于改善乳清蛋白<sup>[10]</sup>、大米蛋白<sup>[11]</sup>、大豆分离蛋白<sup>[5]</sup>的功能性质, 增加大豆分离蛋白的酶解效率以及水解产物的乳化性<sup>[12]</sup>, 提高植物体

内多酚的提取率<sup>[13]</sup>。课题组前期研究结果也表明, 20~160 MPa 的 DHPM 处理能显著改变 SPI 的溶解性、起泡性和乳化性, 降低平均粒径<sup>[14]</sup>。此外, Martínez 等发现高压均质技术可以增加大豆蛋白-羟丙基甲基纤维素分散体系泡沫溢出特性<sup>[15]</sup>。但目前 DHPM 处理对 SPI-多糖体系功能性质影响的研究并不多见, 有待进一步深入。

大豆可溶性多糖(soybean soluble polysaccharides, SSPS)是从大豆加工副产物豆渣中提取的生物聚合物, 具有以鼠李半乳糖醛酸和高聚半乳糖醛酸为主链, 半乳糖和阿拉伯糖为侧链结合组成的近似球状的结构<sup>[16-17]</sup>。SSPS 可以通过静电和疏水相互作用与蛋白质连接, 进而稳定溶液中的蛋白-多糖复合物<sup>[18]</sup>。因此, 构建 SPI-SSPS 体系可能是一种有效提高 SPI 功能性质和大豆应用价值的方式。

基于上述现状, 本文利用 DHPM 在 60~180MPa 下处理 SPI-SSPS 体系, 研究 DHPM 处理对体系中 SPI 溶解性、起泡特性、乳化特性、疏水特性及粒径分布的影响, 为改善 SPI 的功能性质提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

SPI, 购自广州仟和商贸有限公司, 蛋白质质量分数为 91.2%; 新鲜豆渣, 购自江西省南昌市江大南路青山湖市场, 含水率 7.8%、灰分质量分数 2.1%、蛋白质质量分

收稿日期: 2015-11-11 修订日期: 2016-06-15

基金项目: 国家自然科学基金(31460395); 江西省青年科学基金(20142BAB213016)

作者简介: 沙小梅, 女, 江西奉新人, 讲师, 博士, 主要从事绿色食物资源的高值化利用研究。南昌 江西师范大学生命科学学院, 330022。

Email: shaxiaomei1987@sina.com

\*通信作者: 涂宗财, 男, 江西靖安人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事绿色食物资源的高值化利用研究。南昌 江西师范大学生命科学学院, 330022。Email: tuzc\_mail@aliyun.com

数 16.0%、脂肪质量分数 2.0%、糖类物质质量分数 72.1%；5,5'-二硫基-双(2-硝基苯甲酸) (5,5'-dithio bis-(2-nitrobenzoic acid), DTNB)、2,4,6-三硝基苯磺酸 (2,4,6-trinitrophenyl sulphonic acid, TNBS)、8-苯胺基-1-萘磺酸 (1,8-anilinonaphthalenesulfonate, ANS) 购自美国 sigma 公司。其他所用试剂均为分析纯。

M-700 型微射流均质机 (美国 Microfluidics 公司)；TGL-10C 离心机 (上海安亭科学仪器厂)；T25 高速分散机 (德国 IKA 公司)；Nicomp 380/ZLS 纳米激光粒度仪 (美国 Particle Sizing Systems 公司)；F-7000 荧光光谱仪 (日本日立公司)。

## 1.2 SSPS 的提取

根据 Nakamura 等<sup>[19]</sup>的方法，从豆渣中提取 SSPS。用胶体磨对豆渣进行细化处理，采用去离子水洗豆渣以去除残存的蛋白质。然后将预处理后的豆渣 (含水率约为 85%) 按照以下工艺提取 SSPS：料液比 1:3 g/mL、pH 值 3.0、提取温度 120 °C、提取时间 2 h。提取结束后，采用离心的方式 (离心速度 4 000 r/min、离心时间 15 min) 去除不溶物，上清液通过透析 (透析袋的截留分子量为 8 000 Da) 脱盐后经喷雾干燥 (进风温度 180 °C、出风温度 90 °C) 即得到了 SSPS。

## 1.3 SPI-SSPS 体系的制备

用去离子水分别将 SPI 和 SSPS 配制成 0.1 和 0.02 g/mL 的溶液，将上述两种溶液以 1:1 (体积比) 混合后，采用盐酸将其 pH 值调至 7.0 即得到了 SPI-SSPS 体系，此时体系中 SPI 质量浓度为 0.05 g/mL，SPSS 质量浓度为 0.01 g/mL。采用均质机以 20 MPa 的压力对 SPI-SSPS 体系进行预处理以充分混匀溶质。接着，将 SPI-SSPS 溶液置于室温 (约 25 °C) 下 2 h 左右以形成稳定体系。

## 1.4 DHPM 处理 SPI-SSPS 体系

采用 M-7125 微射流设备分别在 0、60、100、140、180 MPa 压力下处理 SPI-SSPS 体系两次，所得样品分别表示为对照组、60、100、140 和 180 MPa。所有的样品置于 4 °C 冰箱存储备用。

## 1.5 溶解度的测定

在 Shen 等<sup>[5]</sup>的方法基础上进行一定程度的修改，将 DHPM 处理前后的 SPI-SSPS 溶液分别稀释 5 倍，即体系中 SPI 浓度为 0.01 g/mL。采用磁力搅拌器混匀稀释后的 SPI-SSPS 溶液 30 min，然后借助 TGL-10C 离心机以 8 000 g 的速度将混合液离心 20 min。收集上清液，用 Lowry 法测其蛋白质含量，平行测定 3 次。溶解度按照以下公式进行计算

$$\text{溶解度} = \frac{\text{上清液的蛋白质量}}{\text{混合体系中的蛋白总量}} \times 100\% \quad (1)$$

## 1.6 起泡性的测定

参考 Ogunwolu 等<sup>[20]</sup>的方法并稍作修改，进行 SPI-SSPS 起泡性的测定。分别取 DHPM 处理前后的 SPI-SSPS 样品 100 mL 于烧杯中，用分散机以 9 500 r/min 的速度搅打 2 min，迅速倒入 250 mL 的量筒中，记录样品溶液的体积，静置 10 min 后，再次记录溶液体积。

SPI-SSPS 的起泡性 (foaming ability index, FAI, %) 和起泡稳定性 (foaming stability index, FSI, %) 计算公式如下

$$\text{FAI} = \frac{V_0 - V}{V} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{FSI} = \frac{V_{10} - V}{V_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中  $V$  是样品溶液的体积，mL； $V_0$  是搅打之后立刻记录的总体积，mL； $V_{10}$  是搅打之后 10 min 记录的总体积，mL。

## 1.7 乳化性的测定

采用 Shen 等<sup>[5]</sup>的方法测定 SPI-SSPS 的乳化性。取 30 mL 稀释 50 倍的 SPI-SSPS (SPI、SSPS 的质量浓度分别为 0.001 和 0.0002 g/mL)，加入 10 mL 的大豆油，分散机以 10 000 r/min 的速度分散 2 min。立刻从烧杯底部吸取 50  $\mu$ L 的乳液，5 min 后再次从烧杯底部吸取 50  $\mu$ L 溶液，分别加入 5 mL 的 0.1% SDS 溶液中，立即漩涡 10 s，并于 500 nm 处测其吸光值。乳化活性 (emulsifying activity index, EAI,  $\text{m}^2/\text{g}$ ) 和乳化稳定性 (emulsifying stability index, ESI, %) 计算公式如下

$$\text{EAI} = \frac{2 \times 2.303 \times A_0 \cdot DF}{C \cdot \phi \cdot (1 - \theta)} \quad (4)$$

$$\text{ESI} = \frac{A_0}{A_5 - A_5} \times 100\% \quad (5)$$

式中  $A_0$  是均质之后立即取样测得的吸光度； $A_5$  是均质之后 5 min 取样测得的吸光度； $DF$  是稀释因子； $C$  是蛋白质浓度，g/mL； $\phi$  是光程，0.01 m； $\theta$  是乳液中油所占比例，%。

## 1.8 粒径分布

采用去离子水将 DHPM 处理前后的 SPI-SSPS 稀释 400 倍后，采用纳米激光粒度仪 NICOMP 380/ZLS 测定 SPI-SSPS 体系的粒度分布和平均粒径。

## 1.9 表面疏水性

根据 Hu 等<sup>[21]</sup>的方法稍加修改，测定 SPI-SSPS 体系的表面疏水性 ( $H_0$ )。将 DHPM 处理前后的 SPI-SSPS 溶液置于离心机中以 10 000 g 的速度离心 30 min，取上清液用 Lowry 法测定其蛋白质浓度。用 0.1 mol/L、pH 值 7.0 的磷酸盐缓冲液稀释 SPI-SSPS 上清液，直到 SPI 质量浓度为 0.0005 g/mL。取稀释后的样品 4.0 mL，加入 20  $\mu$ L 的 8 mmol/mL ANS 溶液 (采用 0.1 mol/L、pH 值 7.0 的磷酸盐缓冲液配制)，混匀后在暗室放置 30 min。用 F-7000 荧光分光光度计分别在 370、470 nm 的激发和发射波长下测定样品的荧光强度。该荧光强度直接用于反映 SPI-SSPS 体系的表面疏水性。

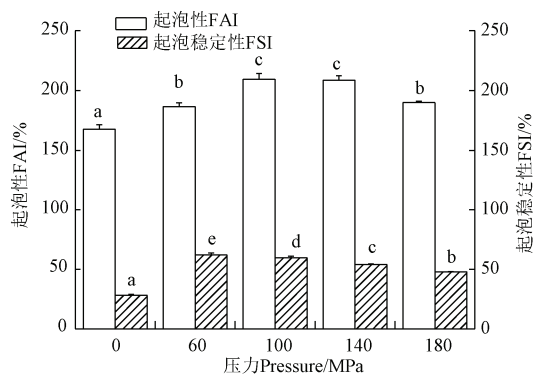
## 1.10 统计分析

所有试验数据都是来源于 3 个平行样测得的结果取平均值，数据通过 SPSS 17.0 软件进行分析，选取 Duncan's test 用于显著性分析 ( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 DHPM 处理对 SPI-SSPS 体系起泡特性的影响

不同 DHPM 处理压力对 SPI-SSPS 起泡性和起泡稳定性的影响结果如图 1 所示。DHPM 处理能显著改善 SPI-SSPS 的 FAI 和 FSI ( $P<0.05$ )。经过 DHPM 处理的所有样品均呈现比对照组更高的 FAI 和 FSI。而且,随着 DHPM 处理压力的增加, SPI-SSPS 的 FAI 和 FSI 均呈现先增加后降低的趋势。当压力达到 100 和 140 MPa 时, SPI-SSPS 的起泡性达到最大, 分别为 209.58% 和 208.95%, 且二者间不存在显著性差异 ( $P>0.05$ )。上述结果表明合适压力的 DHPM 处理有助于提高 SPI-SSPS 的起泡性。当处理压力为 60 MPa 时, SPI-SSPS 的 FSI 达到最大值 (61.84%), 继续增大压力, FSI 反而减小, 但仍然大于未经处理的样品 (26.23%)。



注：同一指标不同上标字母表示存在显著性差异 ( $P<0.05$ )；下同。  
Note: Different letters in the same index denote significant difference ( $P<0.05$ ); Same below.

图 1 DHPM 处理对 SPI-SSPS 起泡性和起泡稳定性的影响

Fig.1 Effect of DHPM treatment on foaming ability index (FAI) and foaming stability index (FSI) of SPI-SSPS

课题组前期研究结果显示, DHPM 处理能增加 SPI 的起泡特性, 可能与 DHPM 处理增加 SPI 溶解性、增强 SPI 分子扩散并促使其吸附于空气/水界面从而降低界面张力有关<sup>[14]</sup>。而本文中, DHPM 处理结合 SSPS 的介入, 使得 SPI 起泡特性进一步增强, 可能是 SSPS 与 SPI 的相互作用促使 SPI 表面的亲水性氨基酸或基团暴露, 进而能更稳定地分散于溶液中, 导致其起泡特性的提升。然而, 当 DHPM 处理压力达到一定数值 (140 MPa) 后, 进一步增加压力可能引起分散的蛋白质分子重新聚集<sup>[10]</sup>, 从而导致 SPI 亲水基团被包裹, 起泡特性降低。

### 2.2 DHPM 处理对 SPI-SSPS 体系乳化特性的影响

DHPM 处理压力对 SPI-SSPS 乳化特性的影响结果如图 2 所示, DHPM 处理会显著性降低 SPI-SSPS 的 EAI 和 ESI ( $P<0.05$ ), 未经处理的 SPI-SSPS 呈现出最高的 EAI 和 ESI, 分别为 13.15% 和 10.86%。Liu 等报道了类似的结果, 即 DHPM 会降低乳清蛋白的乳化性<sup>[10]</sup>。

DHPM 处理压力对 SPI-SSPS 的 EAI 和 ESI 影响趋势呈现出一致性。DHPM 处理压力从 60 MPa 增加到

100 MPa 时, SPI-SSPS 的 EAI 和 ESI 呈现出增加的趋势。然而, 随着压力的进一步增加, SPI-SSPS 的 EAI 和 ESI 表现出降低的趋势。课题组前期研究结果显示, 在 150 MPa 以下, 随着 DHPM 处理压力的增加, SPI 的乳化性逐渐降低<sup>[14]</sup>, 原因是 DHPM 处理会增强蛋白质的亲水性, 降低其表面疏水性<sup>[10]</sup>。而本文中, 在 100 MPa DHPM 处理下, SPI-SSPS 的 EAI 和 ESI 出现增加趋势可能是 DHPM 处理和蛋白质-多糖相互作用的联合效应造成的。SPI 和 SSPS 之间的相互作用可能导致 SPI 结构发生一定程度的改变, 进而限制疏水性基团的去折叠, 使得此压力下 SPI-SSPS 乳化特性有所增加。相关研究报道显示了类似的结果, 即 SPI 和糖的相互作用可以提高 SPI 的乳化性<sup>[22]</sup>。

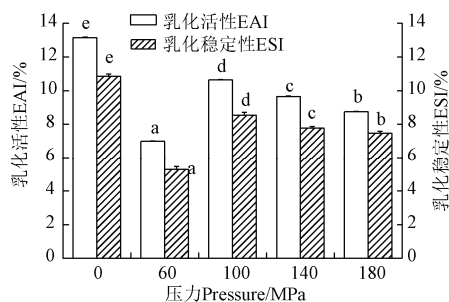


图 2 DHPM 处理对 SPI-SSPS 乳化活性和乳化稳定性的影响  
Fig.2 Effect of DHPM treatment on emulsifying ability index (EAI) and emulsifying stability index (ESI) of SPI-SSPS

### 2.3 SPI 的溶解性

溶解性是一个影响 SPI 功能性质的重要因素, 低溶解性限制了 SPI 的商业应用范围。在 SSPS 存在的情况下, DHPM 处理前后 SPI 的溶解性如图 3 所示, DHPM 处理能有效提高 SPI 的溶解性, 当处理压力为 140 MPa 时, 改性后的 SPI 溶解性达到最大值, 为 46.9%。当 DHPM 处理压力从 60 MPa 提升到 140 MPa 时, SPI 的溶解性从 25.7% 增加到 46.9%。随着压力进一步上升到 180 MPa, SPI 溶解性增长效应减缓, 使得此时 SPI 溶解性与 140 MPa DHPM 处理下 SPI 溶解性不存在显著性差异 ( $P>0.05$ )。原因可能是较高压力下 DHPM 处理会引起蛋白质分子聚集, 亲水基团被包裹, 进而降低溶解性的增加趋势<sup>[10]</sup>。

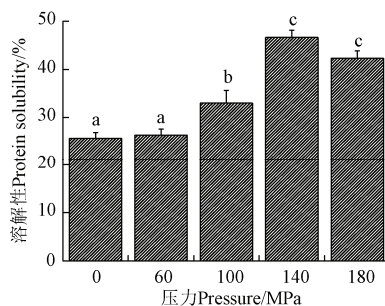


图 3 DHPM 处理对 SPI-SSPS 溶解性的影响  
Fig.3 Effect of DHPM treatment on solubility of SPI-SSPS

DHPM 的机械效应集强剪切力、振荡、高速撞击、高频振荡、瞬时压力降和气穴力等作用力于一体, 可能

使不溶的聚合物变成可溶的解聚体, 进而提高溶解性<sup>[10]</sup>。本文中, DHPM 的作用力可能会引起 SPI 结构的解聚、去折叠或者损坏。因此, SPI 内部的亲水基团暴露到分子表面, 改善了颗粒的分散性和水合特性, 引起了溶解性的增加<sup>[10,23]</sup>。此外, SSPS 能稳定蛋白质, 提高 SPI 的溶解性。Nakamura 等也进行过类似的报道, 即 SSPS 通过包裹酪蛋白, 降低酪蛋白的聚合, 进而发挥稳定酪蛋白的作用<sup>[24,25]</sup>。因此, DHPM 和 SSPS 都能提高 SPI 的稳定性, 进而提高其溶解性。

## 2.4 粒径分布

DHPM 处理会影响 SPI-SSPS 的粒径, 如图 4 所示, SPI-SSPS 的平均粒径随压力的增大而逐渐减小。未经处理的 SPI-SSPS 平均粒径为 592.0 nm, 然而, DHPM 处理后的样品平均粒径均在 200 nm 以下。当 DHPM 处理压力为 60、100、140 和 180 MPa 时, SPI-SSPS 的平均粒径分别为 199.4、196.7、178.7 和 166.6 nm。上述结果表明, 60~180 MPa 的 DHPM 处理能显著性减小 SPI-SSPS 的粒径 ( $P<0.05$ )。然而, Liu 等的研究报道显示, 当 DHPM 的处理压力超过 160 MPa 时, 乳清蛋白的粒径会因蛋白质的聚合而增大<sup>[10]</sup>。上述差异可能是因为乳清蛋白和 SPI 结构不同, 此外, 样品体系也不同。在 SPI 和 SSPS 的混合系统中, SSPS 有稳定蛋白质的作用, 能够阻止 SPI 的聚合。SPI-SSPS 平均粒径的减小, 可以在某种程度上解释蛋白质起泡特性和溶解性增强的原因。

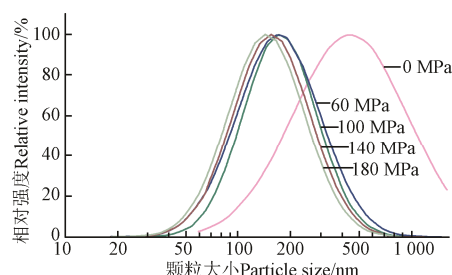


图 4 DHPM 处理对 SPI-SSPS 粒度分布的影响

Fig.4 Effect of DHPM treatment on particle size distribution of SPI-SSPS

## 2.5 表面疏水性

ANS 通常能特异性地连接在蛋白质分子暴露的疏水基团上, 因此使用 ANS 作为荧光探针, 测定经 DHPM 处理的 SPI-SSPS 表面疏水性, 直接运用荧光强度表示蛋白质的表面疏水性。DHPM 处理对 SPI-SSPS 表面疏水性的影响如图 5 所示。经 DHPM 处理, SPI-SSPS 的表面疏水性急剧降低。DHPM 处理压力越大, SPI-SSPS 的表面疏水性越小。静高压处理 SPI 也得到了类似的结论<sup>[26]</sup>。然而, Liu 等报道显示, 随着 DHPM 压力增大, 乳清蛋白的表面疏水性先减小, 后增大。当压力达到 120 和 160 MPa 时, 乳清蛋白的表面疏水性比原样大<sup>[10]</sup>。Shen 等研究表明, DHPM 能使蛋白质发生去折叠、暴露内部疏水基团, 从而大大提高 SPI 的表面疏水性<sup>[5]</sup>。而本文中, DHPM 处理降低 SPI 表面疏水性的原因可能是 SSPS 的添加提高 SPI 的去聚合, 导致亲水基团发生去折叠, 疏水基团折叠。

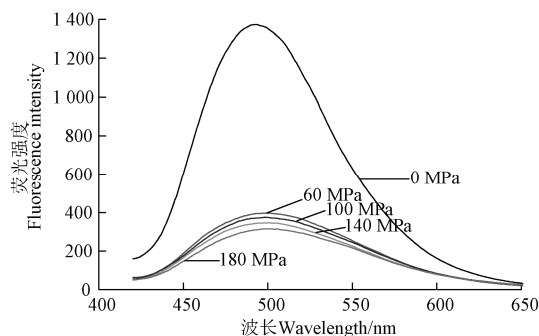


图 5 DHPM 处理对 SPI-SSPS 表面疏水性的影响

Fig.5 Effect of DHPM treatment on surface hydrophobicity of SPI-SSPS

表面疏水性的降低可在一定程度上解释起泡特性的提升和乳化特性的降低。蛋白质需要在空气-水界面迁移, 去折叠和重排, 才能呈现出良好的起泡性。伴随着表面疏水性的降低, 更多的亲水基团暴露出来, 使蛋白能更好地与水分子接触, 并在空气-水界面形成薄膜, 进而能提高起泡特性。对于乳化特性而言, 表面疏水性能够影响蛋白质吸附于油水界面中油侧的能力。低疏水性会导致蛋白质的弱吸附能力, 从而产生较差的乳化性。然而, 本文中, DHPM 不同压力处理下, SPI 表面疏水性和乳化特性或起泡特性的变化趋势并未呈现出高度一致性, 表明表面疏水性可能并非导致乳化特性或起泡特性变化的唯一因素。

## 3 结论

本文研究了动态高压微射流 (dynamic high-pressure microfluidization, DHPM) 对大豆分离蛋白-大豆可溶性多糖体系 (soy protein isolate-soybean soluble polysaccharides, SPI-SSPS) 溶解性、起泡性和乳化性的影响。DHPM 能显著性提高 SPI-SSPS 的溶解性、起泡性和起泡稳定性 ( $P<0.05$ ), 降低乳化性、乳化稳定性、粒径和表面疏水性。当 DHPM 处理压力为 60、100、140 MPa 时, SPI-SSPS 体系分别呈现出最大的起泡稳定性 (61.84%)、起泡性 (209.58%) 和溶解性 (46.9%)。随着处理压力的增大, SPI-SSPS 的粒径和表面疏水性明显减小。当 DHPM 处理压力为 180 MPa 时, 粒径和荧光强度达到最低。上述研究表明 DHPM 处理能显著性影响 SPI-SSPS 的溶解性和界面性质。但 DHPM 处理影响 SPI-SSPS 界面性质的机理还有待进一步探究。

### [参考文献]

- [1] Tang C H, Wang X Y, Yang X Q, et al. Formation of soluble aggregates from insoluble commercial soy protein isolate by means of ultrasonic treatment and their gelling properties[J]. Journal of Food Engineering, 2009, 92(4): 432-437.
- [2] López-Castejón M L, de la Fuente J, Ruiz M, et al. Influence of the presence of monoglyceride on the interfacial properties of soy protein isolate[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92(13): 2618-2623.
- [3] Su J F, Huang Z, Yuan X Y, et al. Structure and properties of carboxymethyl cellulose/soy protein isolate blend edible



- films crosslinked by Maillard reactions[J]. Carbohydrate Polymers, 2010, 79(1): 145—153.
- [4] 陈振家, 施小迪, 杜昱蒙, 等. 不同热处理大豆分离蛋白凝胶冻藏特性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 283—289. Chen Zhenjia, Shi Xiaodi, Du Yumeng, et al. Gel properties of soybean isolate protein with different heat treatments during frozen storage[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 283—289. (in Chinese with English abstract)
- [5] Shen L, Tang C H. Microfluidization as a potential technique to modify surface properties of soy protein isolate[J]. Food Research International, 2012, 48(1): 108—118.
- [6] Tu Z, Chen L, Wang H, et al. Effect of fermentation and dynamic high pressure microfluidization on dietary fibre of soybean residue[J]. Journal of food science and technology, 2014, 51(11): 3285—3292.
- [7] Gan C Y, Cheng L H, Easa A M. Evaluation of microbial transglutaminase and ribose cross-linked soy protein isolate-based microcapsules containing fish oil[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2008, 9(4): 563—569.
- [8] 王梦萍, 陈燕琼, 王金梅, 等. 糖接枝处理改善大豆蛋白纤维聚集泡沫稳定性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(4): 249—255. Wang Mengping, Chen Yanqiong, Wang Jinmei, et al. Improvement of foam stability of soy protein on fibrillar aggregate by glycosylation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(4): 249—255. (in Chinese with English abstract)
- [9] 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 Yingqiu, Chen Zhengxing. Effect of high intensity pulsed electric field on the functional properties of protein isolated from soybean[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(8): 194—198. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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.
- [11] 万红霞, 孙海燕, 刘冬. 动态超高压微射流均质对大米蛋白功能特性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 155—161. Wan Hongxia, Sun Haiyan, Liu Dong. Effects of dynamic high-pressure microfluidization on functional properties of rice protein[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 155—161. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陈林, 吴克刚, 柴向华, 等. 微射流均质预处理提高大豆分离蛋白酶解效率及酶解产物乳化性能[J]. 农业工程学报, 2015, 31(5): 331—338. Chen Lin, Wu Kegang, Chai Xianghua, et al. Microfluidization pretreatment improving enzymatic hydrolysis of soy isolated protein and emulsifying properties of hydrolysates[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(5): 331—338. (in Chinese with English abstract)
- [13] Zhang L, Tu Z C, Wang H, et al. Comparison of different methods for extracting polyphenols from Ipomoea batatas leaves, and identification of antioxidant constituents by HPLC-QTOF-MS 2[J]. Food Research International, 2015, 70: 101—109.
- [14] 汪菁琴. 动态超高压均质对大豆分离蛋白改性的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2007. Wang Jingqin. Study of the High Pressure Microfluidization on Modification of Soy Protein Isolate[D]. Nanchang: College of Life Science, Nanchang University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [15] Martínez K D, Ganesan V, Pilosof A M, et al. Effect of dynamic high-pressure treatment on the interfacial and foaming properties of soy protein isolate-hydroxypropylmethylcelluloses systems[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(6): 1640—1645.
- [16] 严红梅, 袁嘉瑞, 孙娥, 等. 可溶性大豆多糖在银杏颗粒中应用的初步研究[J]. 中华中医药杂志, 2015, 30(9): 3263—3265. Yan Hongmei, Yuan Jiarui, Sun E, et al. Preliminary study on application of soluble soybean polysaccharides in ginkgogranules[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2015, 30(9): 3263—3265. (in Chinese with English abstract)
- [17] Tran T, Rousseau D. Stabilization of acidic soy protein-based dispersions and emulsions by soy soluble polysaccharides[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 382—392.
- [18] Yin B, Deng W, Xu K, et al. Stable nano-sized emulsions produced from soy protein and soy polysaccharide complexes[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2012, 380(1): 51—59.
- [19] Nakamura A, Takahashi T, Yoshida R, et al. Emulsifying properties of soybean soluble polysaccharide[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(5): 795—803.
- [20] Ogunwolu S O, Henshaw F O, Mock H P, et al. Functional properties of protein concentrates and isolates produced from cashew (*Anacardium occidentale* L.) nut[J]. Food Chemistry, 2009, 115(3): 852—858.
- [21] Hu H, Wu J, Li-Chan E C, et al. Effects of ultrasound on structural and physical properties of soy protein isolate (SPI) dispersions[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(2): 647—655.
- [22] Li R, Hettiarachchy N, Rayaprolu S, et al. Improved functional properties of glycosylated soy protein isolate using D-glucose and xanthan gum[J]. Journal of food science and technology, 2015, 52(9): 6067—6072.
- [23] 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.
- [24] Nakamura A, Yoshida R, Maeda H, et al. The stabilizing behaviour of soybean soluble polysaccharide and pectin in acidified milk beverages[J]. International Dairy Journal, 2006, 16(4): 361—369.
- [25] Nakamura A, Furuta H, Kato M, et al. Effect of soybean soluble polysaccharides on the stability of milk protein under acidic conditions[J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(3): 333—343.
- [26] Wang X S, Tang C H, Li B S, et al. Effects of high-pressure treatment on some physicochemical and functional properties of soy protein isolates[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(4): 560—567.

## Effect of dynamic high-pressure microfluidization on functional properties of soy protein isolate-soybean soluble polysaccharides system

Sha Xiaomei<sup>1</sup>, Hu Zizi<sup>1</sup>, Tu Zongcai<sup>1,2\*</sup>, Wang Hui<sup>2</sup>, Huang Tao<sup>2</sup>, Zhang Lu<sup>1</sup>, Yang Ping<sup>1</sup>

(1. College of Life Science, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;

2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Nanchang University, Nanchang 330047, China)

**Abstract:** Soy protein isolate (SPI) is an important highly purified commercial soy protein product, and has been widely used in food manufacturing owing to its good nutrition and abundant availability. However, application of SPI is still restricted due to its poor solubility and interfacial properties. Dynamic high-pressure microfluidization (DHPM) is an emerging physical technology widely used to modify the functional properties and structure of protein. It is an available method using the combined forces of high-velocity impact, high-frequency vibration, instantaneous pressure drop, powerful shear, cavitation force and ultra-high pressures. In recent years, DHPM has been successfully used for improving the functional properties of whey protein, rice protein, SPI, as well as used to increase the enzymatic hydrolysis of soy isolated protein and the emulsifying properties of hydrolysates, and improve the extraction yield of polyphenols and polysaccharides from plant materials. Our previous research indicated that DHPM treatment at 20-160 MPa could significantly change the solubility, foaming and emulsifying properties, and decrease the average particle size of SPI. Moreover, DHPM could promote the glycation reaction between bovine serum albumin and glucose. In addition, it was found that high pressure homogenization could improve the foam overrun of soy protein isolate – hydroxypropyl methyl celluloses dispersed systems and potentially create new functional aggregates. Soybean soluble polysaccharides (SSPS) could bind with protein via electrostatic and hydrophobic interactions, and stabilize the protein-polysaccharide complexes in aqueous solution. Therefore, for improving functional properties of SPI, the influence of DHPM in various pressures on the functional properties of SPI in the presence of SSPS, namely SPI-SSPS system, was investigated in this work. The SPI-SSPS was processed at 0, 60, 100, 140 and 180 MPa of DHPM treatment, respectively. The foaming and emulsifying properties, as well as solubility, particle size distribution and surface hydrophobicity of SPI-SSPS were detected to evaluate the influence. The results indicated that DHPM treatment improved the solubility and foaming properties of SPI, and the presence of SSPS greatly strengthened these effects ( $P<0.05$ ). Samples subjected to 100 and 60 MPa treatments showed the best foaming ability and foaming stability, which were 1.2 and 2.4 folds of that from untreated sample, respectively. DHPM treatment at 140 MPa yielded the highest solubility, which was 1.8 folds of that from control. However, DHPM processing significantly decreased emulsifying properties, particle size distribution and surface hydrophobicity of SPI-SSPS ( $P<0.05$ ). With DHPM pressure increasing, average particle size and surface hydrophobicity of SPI-SSPS gradually declined. Moreover, the smallest average particle size and the lowest fluorescence intensity were obtained at 180 MPa treatment. In some way, the reduced surface hydrophobicity could be used to explain the increased foaming properties and the decreased emulsifying properties. To show good foaming, the protein must be capable of migrating at the air-water interface, unfolding and rearranging at the interface. With surface hydrophobicity decreasing, more hydrophilic groups were unmasked, causing that the protein was kept better touching with water molecule and developed to strong film at the air-water interface. For emulsifying properties, surface hydrophobicity was able to influence the ability of the protein to be adsorbed to the oil side of the oil-water interface. Lower hydrophobicity of the protein led to weaker adsorption with consequent worse emulsion capacities. However, in this work, the surface hydrophobicity was not highly correlated with the emulsifying or forming properties as suggested by the different changing trends of them under the varying pressure of DHPM. It indicated that surface hydrophobicity may not be the only factor that causes the changes in the emulsifying or forming properties. Above findings suggest that DHPM processing combined with SSPS is a potential alternative to modify certain functional properties including solubility and foaming properties of SPI to extend its application in food industry. The results in this study can give the reference for the functional modification of SPI. However, further research is needed to elucidate the detailed mechanism of DHPM processing on the interfacial properties of SPI-SSPS, as well as the interaction between SPI and SSPS.

**Keywords:** protein; pressure; emulsification; soybean soluble polysaccharides; solubility; foaming properties