

制造过程对可溶性大豆多糖结构和产物起泡性的影响

Effect of processing parameters on the structure of soybean polysaccharide and its foaming properties

张 权 陈 洁 曾茂茂 何志勇

ZHANG Quan CHEN Jie ZENG Mao-mao HE Zhi-yong

(江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

(State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

摘要:通过控制酸水解、碱脱酯和蛋白酶解条件探讨可溶性大豆多糖制造过程对于产物结构和起泡性的影响。可溶性大豆多糖(SSPS)的结构采用单糖组成、重均分子量、酯化度、蛋白含量进行表征,起泡性用泡沫膨胀率(FE)和泡沫稳定性(FS)表征。结果表明,酸水解过程会破坏 SSPS 主链结构进而使分子量逐渐降低,但不影响酯化度和蛋白质含量;随着分子量的降低,SSPS 的 FE 逐渐增大,但 FS 逐渐降低。碱脱酯过程不影响产物分子量,但可以使酯化度和蛋白含量同步降低,产物的 FE 和 FS 也同步下降。将低分子量高甲酯含量 SSPS 采用蛋白酶水解,获得具有相同分子量和酯化度、不同蛋白质含量的 SSPS。起泡性结果显示随着蛋白含量的下降,SSPS 的 FE 和 FS 均同步下降。上述结果说明,相比于酯化度,蛋白质含量和分子量对大豆多糖的起泡性具有更为重要的作用。

关键词:可溶性大豆多糖;分子量分布;酯化度;蛋白含量;起泡性

Abstract: Soluble soy polysaccharides (SSPS) with different structure characteristics were obtained by controlling the conditions of acid hydrolysis, alkaline de-esterification and proteolysis. The effect of processing on the structure characteristics of SSPS and its foaming properties were discussed in details. The structure properties of SSPS were characterized by monosaccharide composition, average molecular weight, degree of esterification (DE), and protein content. The foaming properties of SSPS were expressed by the foam expansion rate (FE) and the foam stability (FS). The results showed that the acidic hy-

drolysis process could degrade the SSPS main chain structure and gradually reduce the molecular weight of SSPS, but could not affect the DE and protein content. With decreasing of molecular weight, the foam expansion rate (FE) of SSPS increased, while the foam stability (FS) decreased. The alkaline de-esterification process did not affect the molecular weight, but reduced the DE and protein content simultaneously. The FE and FS of the product also decreased simultaneously with the decreasing of the DE and protein content. SSPS with different protein content was obtained by proteolysis. Proteolysis did not affect the molecular weight and DE of the product. The results of FE and FS showed the FE and FS of SSPS decreased simultaneously with the decreasing of protein content. All these data suggested that the protein content and average molecular weight of SSPS played a more critical role in its foaming properties compared with the DE. The findings should be of value for the preparation of SPI with good foaming performance.

Keywords: soluble soybean polysaccharide; processing parameters; average molecular weight; degree of esterification; protein content; foaming properties

可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)是从大豆子叶中提取出来的一种阴离子多糖^[1]。工业上一般从脱油、除蛋白后的豆粕中提取 SSPS(其含量占豆粕的 5%左右),从而实现大豆加工副产物的高效再利用。目前工业上存在多种提取 SSPS 的方法,包括酸法提取^[2]、碱法提取、酶法提取^[3]和物理超声法提取^[4]等,而不同方法提取的 SSPS 性质存在着十分显著的差异。

SSPS 的结构与果胶相似,果胶由半乳糖醛酸聚糖和鼠李糖半乳糖醛酸聚糖组成的主链以及半乳糖和阿拉伯聚糖组成的支链构成,与果胶相比,SSPS 的主链相对较短,而侧链较长^[5-6]。SSPS 具有多种功能特性,包括在

作者简介:张权,男,江南大学在读硕士研究生。

通信作者:陈洁(1969—),女,江南大学教授,博士生导师,博士后。E-mail: chenjie@jiangnan.edu.cn

收稿日期:2020-02-13

酸性条件下稳定蛋白的能力、乳化性、起泡性、成膜性和抗氧化性等性质^[7-8]。迄今为止,SSPS 在酸性条件下稳定蛋白能力的研究相对比较多,包括 SSPS 的浓度^[9]、酯化度^[10]、其与果胶的复配作用以及与其他多糖的协同作用^[11]等。由于 SSPS 具有很低的黏度,使用在酸性含蛋白饮料中会带来清爽的口感,这种特殊性质使 SSPS 在酸性乳饮料中得以广泛应用^[12]。

前人^[13]研究结果也显示,SSPS 具有良好的表面活性,浓度为 4% 时其乳化能力甚至高于同浓度的阿拉伯胶。一般认为,SSPS 的表面活性主要来自于其结构中的蛋白质,SSPS 之所以具有良好的乳化性,是由于 SSPS 结构中的疏水多肽链能像锚一样吸附在油滴表面,亲水的多糖结构铺展在油滴表面形成带电的吸附层从而防止油滴互相聚集^[10]。然而影响 SSPS 的表面活性的因素,相对于其在酸性条件下稳定蛋白的能力而言,相对研究得较少,尤其是 SSPS 的单糖组成、主链中的蛋白质含量、分子量、分子量分布以及酯化度等结构要素对于其表面活性的影响研究甚少。

目前,含气泡的苏打饮料或乳酸菌蛋白饮料逐渐兴起,而 SSPS 由于兼具良好的起泡性和较低的黏度,极具应用潜力^[14]。作为一个有效的起泡剂,其结构应满足下列基本要求:具有合适的亲水亲油结构;能快速吸附到气-水界面;吸附到界面的蛋白质分子可以相互作用形成具有一定机械强度和良好黏弹性的界面膜^[15]。从 SSPS 的结构分析,影响其表面活性的结构特征主要包括分子量、酯化度以及 SSPS 中的蛋白含量。试验旨在通过控制酸水解、碱性脱酯和蛋白酶解条件获得不同分子量、酯化度和蛋白含量的 SSPS,并同步测定产物的起泡性,从而探究加工对于 SSPS 的结构以及产物起泡性的影响,进而为工业生产出高起泡性的 SSPS 提供指导依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料与试剂

大豆纤维:大豆纤维的蛋白含量 19.17%,总膳食纤维含量 60%,水分含量 7.85%,灰分 2.44%,平顶山金晶生物科技股份有限公司;

右旋糖酐分子量标准品套装:5.25,13.05,64.65,135.35,300.60,2 000.00 kDa,中国食品药品检定研究院;

盐酸、氢氧化钠、95%乙醇:分析级,国药集团化学试剂有限公司;

试验用水:去离子水(自制)。

1.1.2 仪器与设备

可见分光光度计:UV-5300PC 型,上海元析仪器有限公司;

高效液相色谱系统:WATERS 2695 型,美国 Waters 公司;

凝胶色谱柱:TSK-gel G5000PWXL 型,日本 TOSOH 公司;

高效液相色谱仪:WATERS 600 型,美国 Waters 公司;

自动凯氏定氮仪:KDN-103F 型,上海纤检仪器有限公司;

超声波清洗机:SB-5200 型,宁波新芝生物科技股份有限公司;

冷冻离心机:3K15 型,德国 Sigma 公司;

恒温干燥箱:HY300 型,上海一恒科技有限公司;

振荡水浴锅:SHZ-82 型,金坛市新航仪器厂;

实验室 pH 计:FE20 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

电子分析天平:AL104 型,梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司;

数字式 ULTRA TURRAX 均质器:T18 型,德国 IKA 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 酸水解制备不同分子量 SSPS 样品 在朱昌玲等^[16]酸提取方法的基础上加以修改制备不同分子量的 SSPS。将大豆纤维与去离子水以 1:25 (g/g) 比例混合,混合液 pH 调节至 4.0,并进行不同程度的热处理(100 °C 持续 2.5 h;120 °C 持续 2.5 h;135 °C 持续 1.5 h)以获得高、中、低分子量的可溶性大豆多糖(SSPS),分别被命名为 M1(高分子量 SSPS)、M2(中分子量 SSPS)、M3(低分子量 SSPS)。将反应后的混合液离心(5 400×g) 10 min,收集上清液,并通过旋转蒸发仪浓缩至原体积的 1/10,将所得的浓缩液与 3 倍体积 95% 的乙醇混合,5 400×g 离心 10 min,获得的沉淀物在 60 °C 的烘箱中干燥 24 h,粉碎,过 100 目筛网,获得不同分子量的 SSPS 粉末。

1.2.2 碱脱酯制备不同酯化度 SSPS 样品 将 1.2.1 中制备的低分子量 SSPS 溶于去离子水中,分别进行不同程度的碱性脱酯处理(pH 12.0、90 °C,2 h; pH 12.5、90 °C,2.5 h)以获得中酯化度(DE)和低酯化度(DE)的 SSPS。将未进行碱性脱酯处理的 SSPS 定义为高酯化度 SSPS,并命名为 M3D1(低分子量高酯化度),将碱性脱酯处理的样品分别命名为 M3D2(低分子量中酯化度)、M3D3(低分子量低酯化度)。将反应后的混合液离心(5 400×g) 10 min,收集上清液,并通过旋转蒸发仪浓缩至原体积的 1/10,将所得的浓缩液与 3 倍体积 95% 的乙醇混合,调节 pH 至 4.0,5 400×g 离心 10 min,获得的沉淀物在 60 °C 的烘箱中干燥 24 h,粉碎,过 100 目筛网,获得低分子量不同酯化度的 SSPS 粉末。

1.2.3 蛋白酶处理制造不同蛋白质含量 SSPS 样品 将 1.2.1 中制备的低分子量 SSPS 溶于去离子水中,添加 3% 的木瓜蛋白酶,在 pH 6.0、50 °C 下分别酶解 1,2 h^[17]。将未进行酶解处理的 SSPS 定义为高蛋白含量的 SSPS,并命名为 M3P1(低分子量高蛋白含量 SSPS),将酶解处理

的样品分别命名为 M3P2 (低分子量中蛋白含量 SSPS)、M3P3 (低分子量低蛋白含量 SSPS)。将反应后的混合液离心(5 400×g)10 min,收集上清液,并通过旋转蒸发仪浓缩至原体积的 1/10,将所得的浓缩液用 3 倍体积 95% 的乙醇混合,调节 pH 至 4.0,将混合液离心(5 400×g)10 min,获得的沉淀物在 60 ℃ 的烘箱中干燥 24 h,干燥后用粉碎机粉碎,过 100 目筛网,获得低分子量不同蛋白含量的 SSPS 粉末。

1.2.4 SSPS 分子量的测定 使用高效液相色谱系统、2414 示差检测器、TSK-gel G5000PWXL 凝胶色谱柱(300 mm×7.8 mm,TSK)测定 SSPS 的分子量。流动相为 pH 6.8、13.097 g/L 磷酸盐缓冲液,流速 0.6 mL/min。取 0.1 g SSPS 溶解于 10 mL 磷酸盐缓冲液中,将 SSPS 溶液过 0.45 μm 水系滤膜然后注入 HPLC 色谱系统。使用葡聚糖标准品(5.25, 13.05, 64.65, 135.35, 300.60, 2 000.00 kDa)绘制多糖分子量(M_w)的标准曲线,曲线方程为: $\lg M_w = -0.268 5t_R + 9.271 4$, $R^2 = 0.997 3$,根据曲线方程计算 SSPS 重均分子量。

1.2.5 SSPS 酯化度的测定 参照 Xiong 等^[10]的滴定法并稍加改进。将 SSPS(500 mg)在 100 mL 乙醇—HCl 混合物(在 100 mL 70%乙醇中的 5 mL 437.5 g/L HCl)中搅拌 10 min,再通过滤纸和玻璃漏斗过滤。收集的 SSPS 用上述乙醇—HCl 混合物洗涤 6 次(每次 20 mL),再用 60%乙醇溶液洗涤,直到滤液中无硝酸银离子为止。将 SSPS 在 60 ℃ 下干燥 24 h。该处理消除了游离糖和盐,将 SSPS 转化为游离酸形式。将干燥的样品(200 mg)用 0.8 mL 乙醇润湿,溶解在 40 mL 无二氧化碳的蒸馏水中,并使用酚酞作为指示剂通过 4 g/L 氢氧化钠(NaOH)溶液滴定。NaOH 的使用体积记录为 V_1 。将 20 g/L NaOH 添加到滴定的样品溶液中进行脱甲基处理。15 min后,将 18.2 g/L 脱甲基 HCl(与脱甲基所用 20 g/L NaOH 的体积相同)添加到滴定的样品溶液中。使用 4 g/L NaOH 滴定样品,并将使用的体积记录为 V_2 。按式(1)计算酯化度。

$$DE = \frac{V_1}{V_1 + V_2} \times 100\%,$$

(1)

式中:

DE——酯化度,%;

V_1 ——第 1 次滴定 NaOH 消耗的体积,mL;

V_2 ——第 2 次滴定 NaOH 消耗的体积,mL。

1.2.6 SSPS 蛋白质含量的测定 凯氏定氮法^[18]。

1.2.7 SSPS 单糖组成的测定 将 500 mg SSPS 样品和 8 mL 218.8 g/L 盐酸置于密闭管中,于 120 ℃ 水解 22 h。水解样品用 400 g/L NaOH 中和,并用蒸馏水稀释至 25 mL。过滤后,将滤液以 12 600×g 离心 30 min。将上清液用 0.22 μm 滤膜过滤,取 10 μL 上高效液相色谱仪测定单糖组成。

1.2.8 SSPS 起泡性能的测定 根据 Kunarayakul 等^[19]的方法加以修改。将 10 mL 的 1 g/100 mL SSPS 溶液转移到 50 mL 塑料量筒中,用匀浆器以 17 500 r/min 的速度搅打 2 min。分别按式(2)、(3)计算泡沫膨胀和泡沫稳定性(FS)。

$$FE = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \times 100\%,$$

(2)

$$FS = \frac{V_2}{V_1} \times 100\%,$$

(3)

式中:

FE——泡沫膨胀率,%;

FS——泡沫稳定性,%;

V_0 ——液体的初始体积,mL;

V_1 ——刚搅打完泡沫的体积,mL;

V_2 ——静置 30 min 后的泡沫体积,mL。

1.2.9 数据分析 除单糖组成和分子量数据外,其余数据均测试 3 次,结果以“平均值±标准偏差”表示。方差分析使用置信区间为 95% 的最小显著性差异检验来比较均值。

2 结果与分析

2.1 酸水解过程热处理程度对于 SSPS 结构性质和起泡性的影响

如表 1 所示,随着 SSPS 提取过程热处理程度的加重,产物分子量不断下降,从 556 kDa 降低至 217 kDa,SSPS 结构中鼠李糖含量逐渐降低,而阿拉伯糖和半乳糖含量并未发生改变。Nakamura 等^[20]曾报道,SSPS 主要由鼠李糖和半乳糖醛酸构成其主链,由半乳糖和阿拉伯糖构成其侧链。因此可推测,随着酸水解程度越来越剧烈,SSPS 分子量逐渐降低,其主链结构可能被逐渐破坏。从表 1 还可以看出,随着酸水解过程热处理程度的加重,

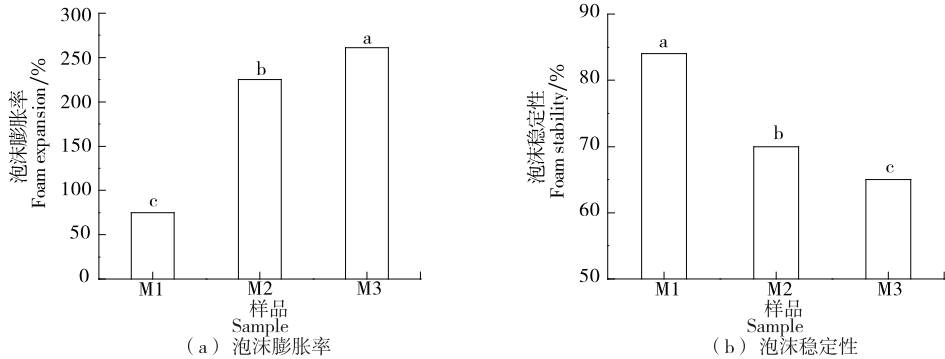
表 1 不同酸水解条件下 SSPS 的重均分子量、酯化度、蛋白含量和单糖组成

Table 1 Molecular weight, degree of esterification, protein content and monosaccharide composition of SSPS under different acid hydrolysis conditions

样品	重均分子量/ kDa	酯化度/%	蛋白含量/%	单糖组成/mol%						
				甘露糖	木糖	葡萄糖	阿拉伯糖	半乳糖	鼠李糖	半乳糖醛酸
M1	556	62.19±3.09	7.51±0.31	2.73	3.55	22.29	2.08	50.96	16.55	1.84
M2	385	62.48±2.87	7.43±0.35	2.73	4.60	14.55	1.98	61.38	12.89	1.87
M3	217	61.80±2.96	7.49±0.29	2.43	4.23	11.99	2.27	62.29	11.99	2.03

产物 SSPS 的酯化度和蛋白含量并未发生显著改变。该结果提示,SSPS 中的蛋白结构可能主要存在于主链结构上。

如图 1 所示,随着 SSPS 分子量的逐渐降低,其泡沫膨胀率逐渐增大,而泡沫稳定性逐渐减小。分子量的降低有助于提高 SSPS 的起泡能力,这是因为小分子量的 SSPS 能更快地移动到气—水界面,进而更快地产生泡沫。而分子量降低使得 SSPS 的泡沫稳定性下降,可能是由 SSPS 在气—水界面的界面膜黏弹性下降导致。Chivero 等^[21]研究表明,相对分子量的增大会使 SSPS 溶液的黏度增加。另有研究^[22]表明,茶叶多糖随溶液黏度的增大,液膜的表面黏弹性提高,多糖溶液的泡沫稳定性也越好。



字母不同表示不同样品之间存在显著差异($P<0.05$)
图 1 不同分子量 SSPS 的泡沫膨胀率(FE)和泡沫稳定性(FS)

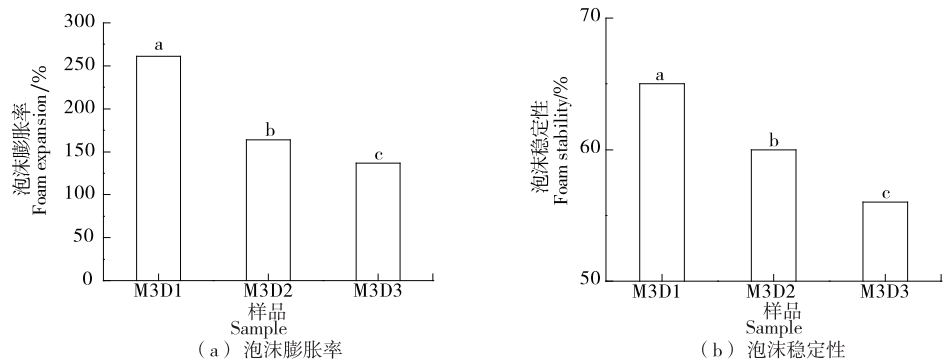
Figure 1 Foam expansion rate (FE) and foam stability (FS) of SSPS with different molecular weights

表 2 不同碱处理条件下 SSPS 的重均分子量、酯化度、蛋白含量和单糖组成[†]

Table 2 Molecular weight, degree of esterification, protein content and monosaccharide composition of SSPS under different alkali treatment conditions

样品	重均分子量/ kDa	酯化度/%	蛋白含量/%	单糖组成/mol%					
				甘露糖	木糖	葡萄糖	阿拉伯糖	半乳糖	鼠李糖
M3D1	217	61.80±2.96 ^a	7.49±0.29 ^a	2.43	4.23	11.99	2.27	62.29	11.99
M3D2	212	35.64±1.54 ^b	5.71±0.23 ^b	2.31	4.22	15.53	2.17	62.85	10.62
M3D3	207	16.84±0.75 ^c	5.02±0.24 ^c	2.51	4.28	15.87	2.22	62.46	10.59

[†] 同列字母不同表示不同样品之间存在显著差异($P<0.05$)。



字母不同表示不同样品之间存在显著差异($P<0.05$)
图 2 不同酯化度 SSPS 的泡沫膨胀率(FE)和泡沫稳定性(FS)

Figure 2 Foam expansion rate (FE) and foam stability (FS) of SSPS with different degree of esterification

量降低到一定水平时,其起泡能力会大大降低。

2.3 蛋白酶水解对产物 SSPS 结构性质和起泡性的影响

为了探讨影响 SSPS 起泡性的结构要素究竟是酯化度还是蛋白质含量,采用木瓜蛋白酶对相同分子量和酯化度的 SSPS 进行酶解处理。如表 3 所示,随着酶解时间的提升,产物 SSPS 中蛋白含量逐渐降低,SSPS 的重均分子量、单糖组成和酯化度并未发生显著改变。说明蛋白

酶酶解处理并不会破坏 SSPS 的主链和侧链结构,也不会影响其甲酯基结构。

如图 3 所示,随着蛋白含量的逐渐降低,SSPS 的泡沫膨胀率和泡沫稳定性均显著下降。对照分析表 2 和图 2 中不同酯化度 SSPS 及其起泡性的结果可以得出结论,蛋白含量对 SSPS 的起泡性能相比于酯化度而言,有着更为重要的作用。

表 3 不同酶解条件下 SSPS 的重均分子量、酯化度、蛋白含量和单糖组成[†]

Table 3 Molecular weight, degree of esterification, protein content and monosaccharide composition of SSPS under different alkali treatment conditions

样品	重均分子量/ kDa	酯化度/%	蛋白含量/%	单糖组成/mol%						
				甘露糖	木糖	葡萄糖	阿拉伯糖	半乳糖	鼠李糖	半乳糖醛酸
M3P1	217	61.80±2.96	7.49±0.29 ^a	2.43	4.23	11.99	2.27	62.29	11.99	2.03
M3P2	220	62.74±2.78	4.45±0.18 ^b	2.41	4.30	15.52	2.17	62.77	10.64	2.19
M3P3	215	63.02±3.01	2.31±0.11 ^c	2.51	4.28	14.87	2.22	62.46	11.59	2.07

[†] 同列字母不同表示不同样品之间存在显著差异(P<0.05)。

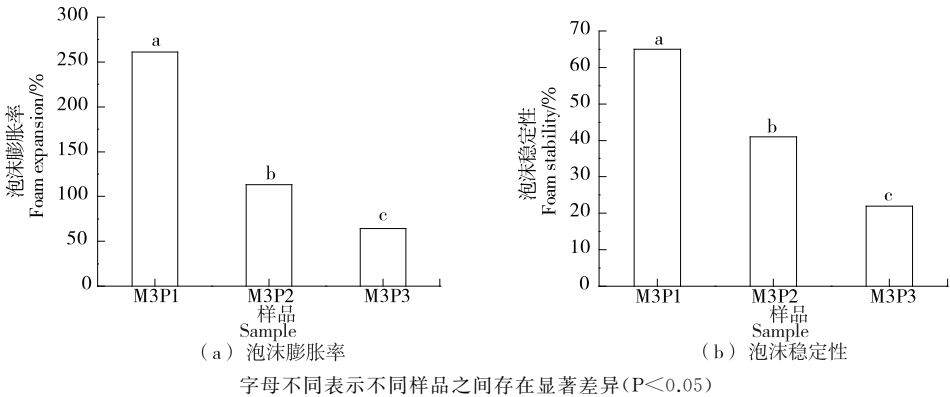


图 3 不同蛋白含量 SSPS 的泡沫膨胀率(FE)和泡沫稳定性(FS)

Figure 3 Foam expansion rate (FE) and foam stability (FS) of SSPS with different Protein Contents

3 结论

试验研究了可溶性大豆多糖制备过程酸水解、碱脱酯和木瓜蛋白酶酶解对产物的单糖组成、分子量、酯化度和蛋白含量等结构性质和起泡性能的影响。结果显示:酸性水解过程会破坏可溶性大豆多糖主链结构进而使分子量逐渐降低;碱脱酯过程对可溶性大豆多糖的主链和侧链结构影响很小,但可以使其结构中的蛋白含量降低;蛋白酶水解可以降低蛋白质含量但不影响分子量和酯化度。随着分子量的降低,可溶性大豆多糖的泡沫膨胀率逐渐增大,但泡沫稳定性逐渐降低;与甲酯化度相比,可溶性大豆多糖结构中蛋白质含量对其起泡性起着更为重要作用。

试验研究表明,酸水解条件下的制备过程可能会对可溶性大豆多糖结构造成影响,但具体会如何改变可溶性大豆多糖的结构进而影响其起泡性质,仍需要进一步的研究,例如:利用光散射设备或原子力显微镜进一步分析可溶性大豆多糖的结构;对可溶性大豆多糖表面张力、

临界胶束浓度等方面的界面性质进行研究以进一步解释其起泡性能改变的原因。

参考文献

[1] MAEDA H, NAKAMURA A. Soluble soybean polysaccharide[M]// Handbook of Hydrocolloids. [S.l.]: CRC Press, Woodhead Publishing, 2009: 277-291.

[2] 谭静, 常忠义, 高红亮, 等. 水溶性大豆多糖提取工艺对酸性乳稳定性的影响[J]. 大豆科学, 2013(2): 110-113.

[3] 宋慧, 苗敬芝, 董玉玮. 双酶法提取大豆多糖及其抗氧化性研究[J]. 中国食品添加剂, 2011(5): 62-66.

[4] 陈红, 张波, 刘秀奇, 等. 超声波辅助提取水溶性大豆多糖及纯化工艺[J]. 食品科学, 2011(6): 146-149.

[5] NAKAMURA A, FURUTA H, MAEDA H, et al. Structural studies by stepwise enzymatic degradation of the main backbone of soybean soluble polysaccharides consisting of galacturonan and rhamnogalacturonan[J]. Journal of the Agricultural Chemical Society of Japan, 2002, 66(6): 1 301-1 313.

- [6] IKEDA S, FUNAMI T, ZHANG G. Visualizing surface active hydrocolloids by atomic force microscopy[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 62(2): 192-196.
- [7] NAKAMURA A, FUJI N, TOBE J, et al. Characterization and functional properties of soybean high-molecular-mass polysaccharide complex[J]. Food Hydrocolloids, 2012, 29(1): 75-84.
- [8] 杨晓泉, 齐军茹, 司华静, 等. 大豆多糖的研究进展及在含乳饮料、米面等食品上的应用[J]. 中国食品添加剂, 2008(3): 135-139.
- [9] 杨慧娇, 蔡志祥, 张洪斌, 等. 水溶性大豆多糖的分子表征和溶液流变学性质[J]. 食品科学, 2016, 37(1): 1-5.
- [10] XIONG Xiao-hui, ZHAO Lu-ping, CHEN Ye-ming, et al. Effects of alkali treatment and subsequent acidic extraction on the properties of soybean soluble polysaccharides[J]. Food and Bioproducts Processing, 2015, 94: 239-247.
- [11] FURUTA H, TAKAHASHI T, TOBE J, et al. Extraction of water-soluble soybean polysaccharides under acidic conditions[J]. Bioscience Biotechnology & Biochemistry, 1998, 62(12): 2 300-2 305.
- [12] 李小林, 孙晓燕. 大豆多糖及酶改性磷脂在食品、饮料及酒类中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2009(增刊 1): 237-241.
- [13] NAKAMURA A, YOSHIDA R, MAEDA H, et al. Soy soluble polysaccharide stabilization at oil-water interfaces[J]. Food Hydrocolloids, 2006, 20(2/3): 277-283.
- [14] 卞春, 赵全, 季澜洋, 等. 大豆多糖的功能及应用研究进展[J]. 粮食与油脂, 2015(4): 12-15.
- [15] MURRAY B S. Stabilization of bubbles and foams[J]. Current Opinion in Colloids and Interface Science, 2007, 12(4/5): 232-241.
- [16] 朱昌玲, 孙达峰. 豆渣水溶性多糖的精制及抗氧化活性研究[J]. 中国野生植物资源, 2015(3): 69-71.
- [17] 刘佳维, 周君, 高亚杰, 等. 红参多糖脱蛋白的研究[J]. 食品科技, 2018(7): 188-192.
- [18] LI Wei-wei, ZHAO Hai-bo, HE Zhi-yong, et al. Modification of soy protein hydrolysates by Maillard reaction: Effects of carbohydrate chain length on structural and interfacial properties[J]. Colloids and surfaces B: Biointerfaces, 2015, 138: 70-77.
- [19] KUNARAYAKUL S, THAIPIANIT S, ANPRUNG P, et al. Optimization of coconut protein deamidation using protein-glutaminase and its effect on solubility, emulsification, and foaming properties of the proteins[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 79: 197-207.
- [20] NAKAMURA A, TAKAHASHI T, YOSHIDA R, et al. Emulsifying properties of soybean soluble polysaccharide[J]. Food Hydrocolloids, 2004, 18(5): 795-803.
- [21] CHIVERO P, GOHTANI S, IKEDA S, et al. The structure of soy soluble polysaccharide in aqueous solution[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 35(1): 279-286.
- [22] 李雷, 汪东风, 周小玲, 等. 茶叶多糖食品功能性研究[J]. 茶叶科学, 2006(2): 28-33.
- [23] AN Ya-ping, CUI Bing, WANG Yun-tao, et al. Functional properties of ovalbumin glycosylated with carboxymethyl cellulose of different substitution degree[J]. Food Hydrocolloids, 2014, 40: 1-8.
- [24] XU Yao, YANG Nan, YANG Ji-xin, et al. Protein/polysaccharide intramolecular electrostatic complex as superior food-grade foaming agent[J]. Food Hydrocolloids, 2019, DOI: 10.1016/j.foodhyd.2019.105474.

(上接第 32 页)

- [2] 张安丰, 刘春波, 申钦鹏, 等. 烟草保润剂的物理保润性能研究[J]. 江西农业学报, 2016, 28(7): 73-77.
- [3] 阮晓明, 王青海, 徐海涛, 等. 新型天然保润剂 PDS 在卷烟中的应用[J]. 烟草科技, 2006(9): 8-10.
- [4] RODGMAN A. Some studies of the effects of additives on cigarette mainstream smoke properties II: Casing materials and humectants[J]. Beiträge zur Tabakforschung International, 2014, 20(4): 279-299.
- [5] CARMINES E L, GAWORSKI C L. Toxicological evaluation of glycerin as a cigarette ingredient[J]. Food & Chemical Toxicology, 2005, 43(10): 1 521-1 539.
- [6] LAINO T, TUMA C, MOOR P, et al. Mechanisms of propylene glycol and triacetin pyrolysis[J]. Journal of Physical Chemistry A, 2012, 116(18): 4 602-4 609.
- [7] 韩聘. 卷烟吸湿规律及机制研究[D]. 无锡: 江南大学, 2014: 10-26.
- [8] 谢玉龙, 朱先约, 翟玉俊, 等. 6 种西北地区植物多糖对卷烟主流烟气水分含量及 pH 的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(22): 189-191.
- [9] 雷声, 刘秀明, 李源栋, 等. 不同植物多糖对烟丝吸湿性和保润性的影响及其作用机制[J]. 食品与机械, 2019, 35(8): 49-54.
- [10] 马伟伟. 海葵子褐藻多糖硫酸酯的分离纯化及生物功能研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2013: 35-58.
- [11] 蔡冰娜, 陈纯馨, 陈忻, 等. 抗氧化钝顶螺旋藻多糖的分离纯化[J]. 食品科学, 2013, 34(23): 83-87.
- [12] 徐迎波, 陈开波, 徐志强, 等. 卷烟烟丝食用蜡复配保润剂的保润性能及应用[J]. 食品与机械, 2017, 33(2): 179-182.
- [13] 殷春燕, 徐志强, 汪华, 等. 贮藏过程中不同保润剂对烟丝保润效果及水分散失动力学的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 96-101.
- [14] 黄锋, 陈清, 王乐, 等. 片烟增湿与干燥的薄层动力学模型[J]. 中国烟草学报, 2014, 20(6): 34-40.
- [15] 楼佳颖, 沙云菲, 吴达, 朱等. 一种烟草保润性能的测试方法: 中国, 105842103 A[P]. 2018-09-25.
- [16] 韩聘, 田兆福, 王宏生, 等. 基于低场核磁共振和环境扫描电镜的卷烟吸湿机制研究[J]. 食品与机械, 2015, 31(4): 14-18.
- [17] 李国富. 烟草油分物质基础研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2015: 3-27.