

DOI: 10.12161/j.issn.1005-6521.2025.03.026

# 可溶性大豆多糖的制备、功效及在食品中应用研究进展

路新如<sup>1,2,3</sup>, 李怀宇<sup>2,3</sup>, 李燕<sup>2,3</sup>, 吴琳<sup>4</sup>, 曹乐乐<sup>2,3\*</sup>, 郭兴峰<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. 聊城大学 农业与生物学院, 山东 聊城 252000; 2. 聊城大学 药学与食品工程学院, 山东 聊城 252000; 3. 大分子药物与规模化制备全国重点实验室, 山东 聊城 252000; 4. 山东聚源生物科技有限公司, 山东 聊城 252300)

**摘要:** 可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)是大豆加工副产物——豆渣纤维水解制备的新型食品配料, 在多种食品中有着广泛应用。该文结合国内外研究内容, 综述可溶性大豆多糖的多种制备工艺及功效, 并介绍可溶性大豆多糖在各食品中的具体应用, 以期为 SSPS 的制备及其在食品中的应用提供参考。

**关键词:** 可溶性大豆多糖; 制备技术; 分离纯化; 功效; 应用现状

## Research Progress on Preparation, Efficacy, and Application in Food of Soluble Soybean Polysaccharides

LU Xinru<sup>1,2,3</sup>, LI Huaiyu<sup>2,3</sup>, LI Yan<sup>2,3</sup>, WU Lin<sup>4</sup>, CAO Lele<sup>2,3\*</sup>, GUO Xingfeng<sup>1,2,3,4\*</sup>

(1. College of Agriculture and Biology, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China; 2. School of Pharmaceutical Science and Food Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252000, Shandong, China; 3. National Key Laboratory of Macromolecular Drug Development and Manufacturing, Liaocheng 252000, Shandong, China; 4. Shandong Juyuan Biotechnology Co., Ltd., Liaocheng 252300, Shandong, China)

**Abstract:** Soluble soybean polysaccharides (SSPS) are a new type of food ingredient prepared by hydrolysis of soybean processing by-products, namely soybean residue fibers, and they have been widely used in various foods. The Chinese and foreign research content was reviewed, and various preparation processes and the efficacy of SSPS were summarized. The specific applications of SSPS in various foods were introduced, so as to provide a reference for the preparation of SSPS and their application in food.

**Key words:** soluble soybean polysaccharides; preparation technology; separation and purification; efficacy; application status

引文格式:

路新如, 李怀宇, 李燕, 等. 可溶性大豆多糖的制备、功效及在食品中应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 203-210.

LU Xinru, LI Huaiyu, LI Yan, et al. Research Progress on Preparation, Efficacy, and Application in Food of Soluble Soybean Polysaccharides[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 203-210.

可溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)是水溶性多糖, 脱脂、脱蛋白后大豆加工的副产物豆渣纤维作为主要原料, 经预处理、酸解或酶解、分

离、脱色、灭菌、浓缩、干燥等工艺精制而成, 具有黏度低、稳定性高、分散性和黏附功能好等特点, 在多种食品中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>。SSPS 主要由半乳糖、阿拉伯

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2022TZX0033); 山东省食用菌产业技术体系建设项目(SDAIT-07-17); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2023TSGC0386、2023TSGC0362); 山东省高等学校青创科技支持计划项目(2019KJF028)

作者简介: 路新如(2002—), 女(汉), 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与副产物高值化利用。

\*通信作者: 曹乐乐(1990—), 女(汉), 讲师, 博士, 研究方向: 农产品加工与副产物高值化利用; 郭兴峰(1983—), 男(汉), 副教授, 博士, 研究方向: 农产品加工与副产物高值化利用。

糖、木糖和半乳糖醛酸等单糖组成,也有少量其他单糖残基,如葡萄糖、岩藻糖等。目前,我国 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》中规定,SSPS 可以在 9 类食品(脂肪类甜品、冷冻饮品、大米制品、小麦粉制品、淀粉制品、方便米面制品、冷冻米面制品、焙烤食品、饮料类等)中作为增稠剂、乳化剂、被膜剂、抗结剂使用<sup>[2]</sup>。本文对 SSPS 的制备工艺、功效和应用进行综述,以期对 SSPS 的制备及其在食品中

的应用研究和推广提供参考。

## 1 可溶性大豆多糖的提取工艺

### 1.1 单一提取方法

SSPS 的制备方法有水热提取法、酸浸提法、碱浸提法、酶法辅助提取(复合酶法、纤维素酶法、植物复合水解酶法)、超声波辅助法、微波辅助法、亚临界水提法等,具体制备方法、工艺条件和特点见表 1。

表 1 SSPS 的常用制备方法  
Table 1 Common preparation methods of SSPS

提取方法	特点	最优工艺	参考文献
水热法	未添加化学试剂,装置和操作均比较简单,但需要较长的提取时间	料液比 1:20 (g/mL),温度 110 °C,pH4.5,提取时间 3 h,所得粗多糖产率 52.4%	[3]
酸浸提法	提取 pH 值较低,需要外加酸溶液调整 pH 值,容易破坏多糖的空间结构	pH3.0,固液比为 1:25 (g/mL),时间为 1.5 h 时,提取率 4% 左右	[4]
碱浸提法	条件较为温和,提取率较高,存在脱甲氧基等问题,所需时间较长	料液比为 1:20 (g/mL),pH 值为 11,反应时间 2 h,提取温度为 120 °C,得率最高为 16.24%	[5]
纤维素酶法	优点是条件平和,操作简单;缺点是耗时太长	酶解时间 90 min,温度 60 °C,pH5.0,纤维素酶添加量 1.0%,料液比 1:20 (g/mL),得率 14.92%	[6]
复合酶法	条件较温和,添加试剂无毒无害,能耗比较低,得率较高	纤维素酶与果胶酶和中性蛋白酶添加量 5.0%,得率 24.21%	[7]
超声波辅助法	优点是用时较少,流程较简单且得率较高;缺点是对设备的要求高	料液比为 1:24 (g/mL),时间 60 min,温度 65 °C,得率 11.86%	[8]
微波辅助法	缩减了提取的时间,提取率有所提高,但对于设备的要求较高,不利于工业生产	提取 2 次,功率 700 W,时间 4 min,液料比为 40:1 (g/mL),SSPS 得率为 6.64%	[9]
亚临界水提法	提取时间减少,提取率有了很大提升,但其反应温度较高,对提取设备要求更高	亚临界水温度 140 °C,液料比 30:1 (mL/g),时间 7 min,压力 1.2 MPa,盐酸添加量 6 mL,还原糖得率达到 57.2%	[10]

由表 1 可知,单一提取方法各有各的优点和不足,如复合酶法耗时长,超声波辅助法和微波辅助法对设备要求高等,将两种或多种制备方法相结合并优化其相关制备工艺,可以在一定程度上弥补单一方法的不足,提高 SSPS 的得率和品质。

### 1.2 复合提取方法

#### 1.2.1 高压脉冲电场配合超声提取法

高压脉冲电场能够瞬时产生高电压使细胞产生电穿孔,促进细胞内容物释放。超声能够产生空化效应,瞬间使细胞破裂使胞内多糖等物质快速溶出。利用高压脉冲电场的高电压原理以及超声的空化效应来提取 SSPS,与传统水提法相比,实现了常温提取并且得率高出 6~10%,提取时间缩短了 1/2~3/4<sup>[11]</sup>。

#### 1.2.2 发酵法与微波处理相结合

豆渣等原料经过混合菌发酵后,性质得到改善,结构更加蓬松并可以产生特定酶来增加 SSPS 的含量。微波处理豆渣是利用微波的强穿透性、高加热效率和破坏细胞壁来提取 SSPS。Lin 等<sup>[12]</sup>利用乳酸菌和粗糙脉孢菌混合发酵并通过微波处理来改善豆渣性质。经过混合发酵后,豆渣膳食纤维的微观结构变得更加蓬松,提取率为 7.09%。乳酸菌发酵使一些不溶性纤维

被分解;粗糙脉孢菌可产生纤维素酶,同时能降解纤维素并增加可溶性糖含量的半纤维素酶,再进行微波处理,SSPS 提取率达到 7.69%。

#### 1.2.3 超声波与纤维素酶法相结合

纤维素酶是外源酶的一种,可以高度选择性地降解植物细胞壁,减少细胞内活性物质溶出时的阻碍,从而提高 SSPS 的提取率。田瑞红等<sup>[13]</sup>采用超声波辅助纤维素酶法制备 SSPS,通过单因素和正交试验得出超声波协同纤维素酶法提取 SPSS 的最佳工艺条件为液固比 28:1 (mL/g),时间 1.5 h,酶解温度 45 °C,纤维素酶用量 0.4%,pH4.0,在此条件下,超声波协同酶法提取 SPSS 的提取率为 25.92%。与单一超声波法的 SPSS 得率(11.51%)相比,提取率提高了 14.41%。

#### 1.2.4 超声波辅助热水法

单一热水浸提法提取时间长且提取率低,将超声波法和热水法相结合来提取可以弥补热水法的缺点。田瑞红等<sup>[14]</sup>用超声波辅助热水法来提取,经过超声波处理再经热水浸提豆渣粉,反复抽真空过滤,离心后取上清液,减压条件下浓缩至原体积的 25%,再醇沉离心,洗涤干燥得到 SSPS 粗品。在功率 150 W,温度 88 °C,时间 17 min,液固比 28:1 (mL/g),六偏磷酸钠

溶液质量浓度 2 g/100 mL 时,与单一热水浸提工艺的提取率 $[(5.28\pm 0.07)]\%$ 相比,超声波法与热提法相结合后的提取率为 11.52%。

### 1.2.5 纤维素酶法与热水浸提法相结合

相比于传统热水浸提的制备方法,纤维素酶与热水浸提法相结合虽工艺较复杂,但是反应条件温和,提高了多糖的提取率和利用率。才子嘉等<sup>[15]</sup>采用两者方法相结合,研究得出 SSPS 得率为 9.54% 时的工艺为时间 1 h,温度 60 °C,pH5.0,酶用量 1.0%。

## 2 SSPS 的分离纯化

SSPS 的纯度会影响其生物活性,提取得到的粗多糖往往含有非多糖杂质(蛋白质、色素、单糖等成分),因此,有必要分离和纯化粗多糖。

### 2.1 除蛋白

#### 2.1.1 Sevag 法

Sevag 法是基于蛋白在不同试剂中的溶解度差异,通过选择性沉淀或透析等技术,将蛋白质从混合物中分离。Sevag 试剂一般按照氯仿和正丁醇体积比 4:1 配制,加入粗样品溶液中进行充分摇晃,将游离蛋白变性为不溶性物质并离心去除,可达到去除 SPSS 中蛋白质的目的。Sevag 法条件温和,对多糖结构的影响小,但效率较低,需要多次重复才能达到预期效果,一般应用于实验室中。

#### 2.1.2 三氯乙酸法

三氯乙酸法是一种常用的蛋白质沉淀方法,通过三氯乙酸(trichloroacetic acid,TCA)能够与蛋白质反应形成不溶性沉淀,实现去除蛋白质的目的。该方法因操作简单、效果稳定,被广泛应用于多糖样品中蛋白质的分离和纯化。穆娜等<sup>[16]</sup>得出 TCA 法去除苜蓿多糖中 81.71% 的蛋白时,最优条件为 TCA 添加量 3.3%,时间 59 min,温度 27 °C。

#### 2.1.3 酶法

各种蛋白酶可以将复杂的蛋白质分解成肽链和氨基酸,从而实现酶解作用去除蛋白质。王乐等<sup>[17]</sup>确定桑枝多糖酶法蛋白脱除率为 78.75% 时,最优工艺为 2.5% 的木瓜蛋白酶,pH7.0,温度 60 °C,酶解 2.5 h。酶法除蛋白的优点是专一性及速率较高,条件温和,但是酶的价格比较贵。将酶法与 Sevag 法联合,去蛋白效果更明显。于晓红等<sup>[18]</sup>研究结果表明酶结合 Sevag 法除蛋白率高于单一的 Sevag 法、三氯乙酸法、酶法。

### 2.2 脱色

#### 2.2.1 活性炭法

利用活性炭的特殊孔结构和表面吸附能力,将污染物质与媒介分子分离吸附,达到脱色净化的目的,结合硅藻土作为过滤助剂抽滤除去活性炭。活性炭法高效、环保、使用方便,但是使用过程中会吸附多糖。

#### 2.2.2 双氧水法

利用过氧化氢的氧化性质,将多糖分子中的色素氧化分解而失去颜色。该方法工艺操作简便,成本低,但是反应速度比较慢。黄丽金等<sup>[19]</sup>研究表明,苦胆草多糖脱色最优条件为温度 55 °C,时间 209 min,双氧水体积分数 2.73%,脱色 1 次,脱色率为 72.43%。

#### 2.2.3 树脂吸附法

大孔吸附树脂是一类不含交换基团且有较大孔结构的高分子吸附树脂,它主要依靠和被吸附的分子间的范德华引力,通过物理吸附从而达到分离提纯的目的。溶液经过树脂来吸附所需组分,因树脂内部孔径存在差异,溶液进入时,会留下不同的离子。将大孔树脂进行洗脱回收来提取、分离、提纯所需离子。曾杰等<sup>[20]</sup>确定最优参数为 D301 型大孔吸附树脂,pH4.2,温度 32 °C,树脂用量 4 g/50 mL,上样质量浓度 5.5 mg/mL,时间 2 h 时的无花果粗多糖脱色率为 86.18%。

### 2.3 纯化

#### 2.3.1 乙醇分级沉淀法

SSPS 作为一种水溶性多糖,可溶于水,但并不溶于乙醇。在提取 SSPS 的过程中,可使用乙醇作为溶剂降低溶液的介电常数。当乙醇溶液中的介电常数降低时,SSPS 会因为脱水而发生沉淀从而实现 SSPS 的提取和纯化。

#### 2.3.2 层析法

多糖的纯化通常分两个步骤进行:初步纯化时经过阴离子交换柱来进行,而后经过凝胶柱(根据多糖分子尺寸或分子量大小)进一步纯化。在阴离子色谱柱中,常用的带有正电荷的介质有二乙氨基乙基(diethylaminoethyl,DEAE)纤维素、DEAE-琼脂糖凝胶、DEAE-葡萄糖凝胶。阴离子多糖在不同浓度的盐溶液洗脱(如 NaCl)时,因其含有负电荷,在静电作用下能够与填料结合,而其他类型的多糖则不与填料结合,从而起到纯化目的。在凝胶柱分离时,常用的凝胶有葡聚糖凝胶和琼脂糖凝胶<sup>[21]</sup>。分子量大的物质比分子量小的先洗脱出来,因为大的物质不可以进入凝胶内部,所以流程比小分子物质要短,保留时间也较短。

段雪莹等<sup>[22]</sup>在研究丹凤牡丹花蕊水溶性多糖的纯化中,先用 DEAE-52 纤维素柱层析纯化得到 3 个水溶性多糖组分,后采用葡聚糖凝胶 G-100 凝胶色谱法对多糖组分进一步纯化。沈晓静等<sup>[23]</sup>对梁王茶粗多糖进行纯化时也是将 DEAE-52 纤维素柱层析和凝胶分离技术相结合。

## 3 SSPS 的功效

### 3.1 抗氧化

自由基是加速人体衰老和导致疾病的原因之一,常见的自由基有 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-di-

phenyl-2-picryl-hydrazyl radical, DPPH) 自由基、羟基自由基( $\cdot\text{OH}$ )等。抗氧化是指抗氧化自由基的简称。韩晴等<sup>[24]</sup>证明了 SSPS 具有还原力、清除 DPPH $\cdot$  和  $\cdot\text{OH}$  能力,且随着 SSPS 分子量的减小,其还原力和清除  $\cdot\text{OH}$  能力具有增加的趋势。

### 3.2 抗菌

SSPS 抗菌的主要机制是利用其良好的成膜性、附着性改变细胞膜通透性并阻断细菌所必需营养物质的吸收。Gao 等<sup>[25]</sup>合成 SSPS 铁[SSPS-Fe(III)]并证明 SSPS-Fe(III)在较高浓度范围内能够抑制大肠杆菌生长,在任何浓度下可抑制金黄色葡萄球菌生长,并可以促进地衣芽孢杆菌生长,增强地衣芽孢杆菌的益生作用。

### 3.3 保护肾脏

在一定程度上,血尿素氮和肌酐等能够反映肾小球滤过功能的损害程度,转化生长因子则能够调节细胞增殖分化、细胞迁移等。Hou 等<sup>[26]</sup>研究表明 SSPS 可以改善慢性肾功能衰竭小鼠的肾功能。SSPS 能够改变血尿素氮、肌酐、总蛋白和白蛋白的浓度,减少慢性肾衰小鼠肾组织中胶原纤维的面积;增加转化生长因子- $\beta$ 、Smad3 和 P-Smad3 的表达,减少  $\alpha$  平滑肌肌动蛋白的表达,从而影响小鼠肾功能。

### 3.4 防治泌尿系结石

尿结石是泌尿系统的一种常见疾病,在尿液中形成结石的盐是过度饱和的。多种要素会造成尿结石,其中主要原因有两个:缺乏抑制结石晶体形成的物质和尿液中核基质的存在。肖治均等<sup>[27]</sup>制备大豆多糖颗粒茶,证明了其可以抑制草酸钙结晶活性。

### 3.5 改善首过代谢

首过代谢是指药物从消化道吸收后,随血流进入肝脏,在肠系膜、肝脏等部位受到酶的作用,被代谢分解并丧失部分药效,导致进入身体循环的药物有效数量减少的过程。这种效应可明显降低高代谢药物的口服生物利用度。对于由左旋肉碱诱导而形成的小鼠小肠首过代谢,李文峰等<sup>[28]</sup>证明 SSPS 能够有效防止该代谢效应。

### 3.6 降血脂

SSPS 是一种水溶性膳食纤维,在降血脂的效果上,水溶性膳食纤维远高于不溶性膳食纤维。胆汁酸具备多种功能:一方面可以促进动物体对脂类物质的消化以及吸收,并且能够调节胆固醇的代谢平衡等<sup>[29]</sup>。He 等<sup>[30]</sup>得出 SSPS 治疗显著降低了高脂肪饮食大鼠的体质量( $P<0.001$ )、肝指数值( $P<0.01$ ),以及血清中甘油三酯、总胆固醇、低密度胆固醇和炎症细胞因子的浓度水平。

### 3.7 $\text{Pb}^{2+}$ 螯合剂

$\text{Pb}^{2+}$ 是一种有害重金属离子,田月月等<sup>[31]</sup>研究表明

SSPS 是一种安全的吸附剂,在去除  $\text{Pb}^{2+}$ 的同时,还可避免有益微量元素  $\text{Zn}^{2+}$ 以及  $\text{Mg}^{2+}$ 的损失。

### 3.8 提高免疫力

SSPS 主要是上调 RAW 264.7 巨噬细胞中相关基因和蛋白的表达,刺激细胞因子:肿瘤坏死因子- $\alpha$ (tumor necrosis factor- $\alpha$ , TNF- $\alpha$ )、肿瘤坏死因子- $\beta$ (tumor necrosis factor- $\beta$ , TNF- $\beta$ )、白细胞介素-6(interleukin-6, IL-6)和白细胞介素-1 $\beta$ (interleukin-1 $\beta$ , IL-1 $\beta$ )的分泌以及一氧化氮(NO)的产生来提高免疫力。

Wang 等<sup>[32]</sup>已经证实,SSPS 可以促进小鼠 RAW264.7 细胞的增殖和胞饮,增加 NO、TNF- $\alpha$ 、IL-1 $\beta$  和 IL-6 的产生。Guan 等<sup>[33]</sup>证明大豆乳清中的可溶性多糖提高了 RAW 264.7 巨噬细胞的生长率和吞噬活性。

此外,对 SSPS 进行改性,如 SSPS 与锌离子的螯合形成 SSPS 锌螯合物(SSPS-Zn),该螯合物具有抗氧化、降血糖、尿素吸附能力等多种功效<sup>[34]</sup>。

## 4 SSPS 在食品中的应用

### 4.1 膳食纤维添加剂

SSPS 含有膳食纤维,可以与其他膳食纤维产品配合使用达到促进肠道益生菌增殖,维护肠道健康的效果。面包具有营养不均衡、高糖高油的问题,解慧等<sup>[35]</sup>将大豆膳食纤维以及高筋面粉复配,制作的膳食纤维面包营养均衡并且低糖低油。SSPS 作为膳食纤维添加剂,能应用于焙烤食品、乳制品、肉制品和饮料等,也可用于需要补充膳食纤维的功能食品中。

### 4.2 稳定剂

果胶作为稳定剂广泛用于酸性饮料中,田浩等<sup>[36]</sup>证明对于直接酸化的 3 种乳蛋白体系(脱脂乳、酪蛋白和乳清蛋白)、发酵酸化乳清蛋白和酪蛋白,SSPS 降低酸化乳蛋白粒径的能力远大于果胶,说明与果胶相比,SSPS 的稳定效果在酸性饮料中更好。若将两种或多种稳定剂复配使用,效果更显著。靳春秋<sup>[37]</sup>研究得出在羧甲基纤维素钠 0.098%、SSPS 0.18%、果胶 0.23% 的复配条件下,椰子耐酸性效果最好,并且稳定性也为较好状态。

有研究发现,高分子量乙酰化 SSPS 具有较高的乳化性、起泡性。运用谷氨酰胺转氨酶来催化酪蛋白和 SSPS,使两者进行糖基化反应,产生的交联产物乳化稳定性显著提升<sup>[38]</sup>。不同酯化度的 SSPS 对于酸性乳饮料的稳定性也是不同的,与高酯化度的 SSPS 相比,低酯化度的 SSPS 具备较高的稳定性,由于其稳定的酪蛋白颗粒具有更多的负电荷,从而在酸性乳饮料中彼此排斥,更有利于饮料的稳定<sup>[39]</sup>。

### 4.3 黏性改良剂、抗氧化剂和品质改良剂等

#### 4.3.1 黏性改良剂

王博文等<sup>[40]</sup>研究证实,SSPS 能够作为一种有效的

黏性改良剂运用在鲜湿米粉的加工中。随着 SSPS 添加量不断增加,提高了米粉的水溶性指数,降低了吸水性指数和糊化黏度;弹性模量和黏性模量得到提升,鲜湿米粉的表面黏性和淀粉溶出量显著降低( $P<0.05$ ),表面更光滑且内部结构更均匀。

#### 4.3.2 抗老化剂

SSPS 主要是通过抑制水分的迁移和淀粉的重结晶来达到抗老化的效果。SSPS 能够与支链淀粉侧链彼此作用,抑制淀粉分子之间通过氢键的交联,阻碍有序结构的形成<sup>[41]</sup>。赵启竹<sup>[42]</sup>已经证明 SSPS 主要是对水分的控制以及与淀粉分子彼此作用来影响糊化,从而抑制淀粉回生。Wang 等<sup>[41]</sup>研究表明 0.2% 的 SSPS 能够有效抑制淀粉回生,可能与淀粉分子竞争吸水,从而提高保水性并限制淀粉回生。

复合抗老化剂比单一的抗老化剂能够更有效地发挥抗老化作用,如添加 3 种抗老化剂(0.217% 卡拉胶、0.067% SSPS、0.176% 低聚果糖)的方便米饭的老化程度达到最低值<sup>[43]</sup>。将 SSPS 和酸性条件相协同,可以延缓小麦面包老化<sup>[44]</sup>。

#### 4.3.3 品质改良剂

鲜湿豆丝是以大米和豆类为原料,磨浆后经热处理制备而成,口味独特、营养丰富,但是在贮藏过程中会有持水性差、水分散失快、质地变硬等问题。徐平等<sup>[45]</sup>研究表明,SSPS 能够作为品质改良剂用于鲜湿豆丝的贮藏,当 SSPS 的质量分数为 0.8% 时,鲜湿豆丝贮藏过程中的持水性得到有效提高,硬度也降低。添加 3% 的 SSPS 使米粉具备较好的感官品质,较低的蒸煮损失率、断条率和黏附性,较高的吸水能力、合适的硬度<sup>[46]</sup>。

将多种可以作为品质改良剂的多糖进行复配使用,如 2.0% 低聚木糖、1.2% SSPS、0.6% 壳聚糖可以改善全麦面粉的粉质特性以及制成成品后面条的食用品质<sup>[47]</sup>。

#### 4.4 助干剂

助干剂又称干燥助剂,是指有助于提升产品干燥品质、使干燥过程顺利进行的一类物质的总称,包括表面活性剂、抗结剂等。吴慧清等<sup>[48]</sup>研究表明,SSPS 作为助干剂,可以提高南瓜消渴苷果粉的集粉率、改善色度、减小粉体粒径和聚集状况,有效提高果粉的品质。加入 SSPS 后,与无助干剂组相对比,发现集粉率提高 2.72 倍; $L^*$ 值明显增加为 86.49~88.97,提升了粉体的颜色品质;粒径值为 4.3  $\mu\text{m}$ ,较空白组的 52.09  $\mu\text{m}$  显著降低( $P<0.05$ )。

#### 4.5 冷冻鱼糜食品防冻剂

冷冻鱼糜因品质劣化现象,制约冷冻鱼糜行业的发展。叶瑞森<sup>[49]</sup>证明 SSPS 能够作为一种新型健康的鱼糜蛋白抗冻剂。添加 SSPS 能够使鱼糜有效维持蛋

白多肽主链原有空间构型;延缓蛋白二级构造中  $\alpha$ -螺旋结构含量降低趋势;酪氨酸以及色氨酸更少地暴露在极性环境;减缓二硫键振动信号的增强趋势;拥有更强的 C—H 振动信号。在 SSPS、山梨醇和磷酸盐的添加量分别为 4.85%、2.00% 和 0.75% 时,冷冻鱼糜综合评分(盐溶性蛋白含量和蒸煮损失,综合加权平均法)达到  $19.30\pm 0.06$  ( $n=3$ ),为最优配比。Gao 等<sup>[50]</sup>也证明 SSPS 通过保持  $\alpha$ -螺旋含量、减少极性基团暴露和减少 SH 基团氧化成二硫键来实现减轻冷冻鱼糜蛋白质变性的能力。

#### 4.6 新型包装材料

SSPS 作为新型包装材料,可以广泛用于食品包装,但是单一的 SSPS 膜具有坚硬、易碎的性质。将 SSPS 和其他物质相结合,如葡萄皮花青素提取物和氧化石墨烯<sup>[51]</sup>、纳米氧化锌和茶树精油<sup>[52-53]</sup>、增塑剂<sup>[54]</sup>、锦葵提取物<sup>[55]</sup>、姜黄素和明胶<sup>[56-57]</sup>等,不仅增强膜的抗菌和抗氧化等性能,而且还可用作新鲜度指示剂。

#### 4.7 微胶囊壁材

当表没食子儿茶素没食子酸酯(epigallocatechin gallate, EGCG)暴露于自然环境时,易被环境应激元素(光、热和氧气)氧化,其生物活性会降低甚至丧失。阳离子 SSPS 的纳米颗粒可以提高 EGCG 的封装效率和持续的生物活性、提高 EGCG 的持续抗氧化和抗菌活性<sup>[58]</sup>。

## 5 展望

SPSS 作为大豆纤维的下游精深加工产品在食品、药品、化妆品及农业中的应用越来越广泛。经国内外学者对可溶性大豆多糖的持续深入研究,已经对其结构、功能、生理活性特点有较为全面的认识,并对其制备工艺对组成结构的影响进行了各种探究。随着 SPSS 应用研究的深入,其制备工艺与分子结构及应用特性之间的相关性成为后续研究重点,SPSS 品类将更加精细化,应用范围将更加广泛,不同应用场景的专用型可溶性大豆多糖产品可得到研发、生产和推广。

#### 参考文献:

- [1] MAEDA H, NAKAMURA A. Soluble soybean polysaccharide[M]// Handbook of Hydrocolloids. Amsterdam: Elsevier, 2009: 693-709.
- [2] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品添加剂使用标准: GB 2760—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 49.  
National Health and Family Planning Commission of PRC. National standards for food safety Standards for the use of food additives: GB 2760—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015: 49.
- [3] 桂雨豪, 郭嵩明, 杨锦杰, 等. 从豆渣中提取水溶性大豆多糖的工艺优化研究[J]. 中国酿造, 2015, 34(9): 71-74.  
GUI Yuhao, GUO Aiming, YANG Jinjie, et al. Optimization technology of water-soluble soybean polysaccharides extraction from

- soybean residue[J]. China Brewing, 2015, 34(9): 71-74.
- [4] 李银峰, 赵亚奇, 李霞, 等. 豆渣中可溶性大豆多糖的提取工艺研究[J]. 河南城建学院学报, 2021, 30(1): 87-92.  
LI Yinfeng, ZHAO Yaqi, LI Xia, et al. Extraction technology of soluble soybean polysaccharide from soybean dregs[J]. Journal of Henan University of Urban Construction, 2021, 30(1): 87-92.
- [5] 孟岳成, 邱蓉, 张学兵. 碱法提取可溶性大豆多糖的工艺[J]. 食品研究与开发, 2009, 30(11): 83-86.  
MENG Yuecheng, QIU Rong, ZHANG Xuebing. Studies on the extraction of soybean polysaccharides from okara by alkali-extraction[J]. Food Research and Development, 2009, 30(11): 83-86.
- [6] 范文奇, 要志宏, 申丽媛, 等. 豆粕多糖的酶法提取工艺研究[J]. 中国调味品, 2017, 42(5): 65-68, 83.  
FAN Wenqi, YAO Zhihong, SHEN Liyuan, et al. Study on the enzymatic extraction process of polysaccharides from bean pulp[J]. China Condiment, 2017, 42(5): 65-68, 83.
- [7] 魏雅婷, 张进, 潘静, 等. 复合酶提取豆粕多糖的工艺研究[J]. 天津农学院学报, 2022, 29(2): 27-31.  
WEI Yating, ZHANG Jin, PAN Jing, et al. Study on extraction technology of soybean meal polysaccharide by compound enzyme[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2022, 29(2): 27-31.
- [8] 刘月蓉, 吴燕蓉, 裴晓宇, 等. 超声波法提取可溶性大豆多糖工艺研究[J]. 农业科技与装备, 2012(5): 50-53.  
LIU Yuerong, WU Yanrong, PEI Xiaoyu, et al. Research on ultrasonic extraction of soluble soybean polysaccharides[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2012(5): 50-53.
- [9] 任花. 微波辅助法提取豆渣中大豆多糖的工艺研究[J]. 轻工科技, 2015, 31(12): 21-22, 25.  
REN Hua. Study on microwave-assisted extraction of soybean polysaccharide from soybean residue[J]. Light Industry Science and Technology, 2015, 31(12): 21-22, 25.
- [10] 韩业辉. 亚临界水水解豆渣多糖工艺条件的研究[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(35): 151-152, 175.  
HAN Yehui. Study on process conditions of polysaccharide in sub-critical water hydrolysis of soybean residue[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(35): 151-152, 175.
- [11] 高文宏, 吴昕如, 曾新安, 等. 一种利用高压脉冲电场协同超声提取豆渣中水溶性大豆多糖的方法: CN113354749A[P]. 2021-09-07.  
GAO Wenhong, WU Xinru, ZENG Xin'an, et al. Method for extracting water-soluble soybean polysaccharide in bean dregs by utilizing high-voltage pulsed electric field and ultrasonic waves: CN11335-4749A[P]. 2021-09-07.
- [12] LIN D R, LONG X M, XIAO L J, et al. Study on the functional properties and structural characteristics of soybean soluble polysaccharides by mixed bacteria fermentation and microwave treatment[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 157: 561-568.
- [13] 田瑞红, 江连洲, 胡少新, 等. 超声波酶法提取豆渣中水溶性多糖条件的优化[J]. 大豆科技, 2019(S1): 179-183.  
TIAN Ruihong, JIANG Lianzhou, HU Shaoxin, et al. Preparation of water soluble soybean polysaccharides from soybean residue produced by ultrasonic - enzymatic extraction[J]. Soybean Science & Technology, 2019(S1): 179-183.
- [14] 田瑞红, 江连洲, 李丹. 水酶法提取豆渣中水溶性多糖的工艺优化[J]. 大豆科技, 2019(S1): 218-222, 228.  
TIAN Ruihong, JIANG Lianzhou, LI Dan. Optimization of ultrasonic-assisted extraction process for water-soluble soybean polysaccharides from soybean residues[J]. Soybean Science & Technology, 2019(S1): 218-222, 228.
- [15] 才子嘉, 毕红梅, 高金玲, 等. 酶法提取大豆多糖的研究[J]. 饮食科学, 2018(24): 270-271.  
CAI Zijia, BI Hongmei, GAO Jinling, et al. Study on enzymatic extraction of soybean polysaccharide[J]. Diet Science, 2018(24): 270-271.
- [16] 穆娜, 李凤伟, 柳晓晨, 等. 苜蓿多糖脱蛋白工艺及其对鼠李糖乳杆菌增殖作用研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(3): 99-105.  
MU Na, LI Fengwei, LIU Xiaochen, et al. Alfalfa polysaccharides deproteinization and its effect on the proliferation of *Lactobacillus rhamnosus*[J]. China Food Additives, 2022, 33(3): 99-105.
- [17] 王乐, 靳学远, 霍智文. 桑枝多糖酶法脱蛋白工艺优化及理化特性研究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(7): 136-143.  
WANG Le, JIN Xueyuan, HUO Zhiwen. Optimization of enzymatic deproteinization and study on physicochemical property of polysaccharides from *Ramulus mori* L[J]. China Food Additives, 2022, 33(7): 136-143.
- [18] 于晓红, 吴宪玲, 付薇, 等. 西洋参多糖脱色脱蛋白方法研究[J]. 中国食品学报, 2017, 17(11): 145-149.  
YU Xiaohong, WU Xianling, FU Wei, et al. Decoloration and deproteinization of polysaccharides from American ginseng[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2017, 17(11): 145-149.
- [19] 黄丽金, 李自霖, 陈贵元. 响应面法优化苦胆草多糖脱色工艺[J]. 安徽农学通报, 2023, 29(9): 157-160, 170.  
HUANG Lijin, LI Zilin, CHEN Guiyuan. Optimization of decolorization process of *Radix gentianae* polysaccharides by response surface method[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2023, 29(9): 157-160, 170.
- [20] 曾杰, 房海灵, 梁呈元, 等. 无花果粗多糖脱色工艺优化及其吸附性能研究[J]. 中成药, 2022, 44(2): 537-542.  
ZENG Jie, FANG Hailing, LIANG Chengyuan, et al. Optimization of decolorization process of *Ficus carica* polysaccharide and study on its adsorption performance[J]. Chinese Traditional Patent Medicine, 2022, 44(2): 537-542.
- [21] 刘赵, 沈海军, 周凌晨, 等. 可溶性大豆多糖的提取及在食品中的应用研究进展[J]. 中国调味品, 2023, 48(6): 199-208.  
LIU Zhao, SHEN Haijun, ZHOU Lingchen, et al. Research progress on the extraction of soluble soybean polysaccharides and their application in food[J]. China Condiment, 2023, 48(6): 199-208.
- [22] 段雪莹, 罗磊, 李瀚妹, 等. 丹凤牡丹花蕊水溶性多糖纯化、理化性质及抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 83-89.  
DUAN Xueying, LUO Lei, LI Hanshu, et al. Purification, physicochemical properties and physiological activity of water-soluble polysaccharides from stamens of *Paeonia suffruticosa*[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 83-89.
- [23] 沈晓静, 周绍琴, 王秋萍, 等. 梁王茶多糖的纯化及体外抗氧化作用研究[J]. 化学研究与应用, 2023, 35(6): 1350-1355.  
SHEN Xiaojing, ZHOU Shaoqin, WANG Qiuping, et al. Study on purification and antioxidant activity of polysaccharide from *Nothopanax delavayi*[J]. Chemical Research and Application, 2023, 35(6): 1350-1355.
- [24] 韩晴, 李军国, 蔡云霞, 等. 不同来源水溶性大豆多糖功能特性及基本结构的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(9): 2870-2877.  
HAN Qing, LI Junguo, CAI Yunxia, et al. Comparative study on functional properties and basic structure of soluble soybean polysaccharides from different sources[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(9): 2870-2877.
- [25] GAO W H, JIANG L Y, WAN Z Z, et al. Antibacterial and probiotic promotion potential of a new soluble soybean polysaccharide-

- iron(III) complex[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 163: 2306-2313.
- [26] HOU G H, JIN M Z, YE Z Y, et al. Ameliorate effects of soybean soluble polysaccharide on adenine-induced chronic renal failure in mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 149: 158-164.
- [27] 肖治均, 张特, 潘婷婷. 大豆多糖颗粒剂的制备及对草酸钙晶体生长调控的研究[J]. 科技与创新, 2019(2): 24-26, 29.  
XIAO Zhijun, ZHANG Te, PAN Tingting. Study on preparation of soybean polysaccharide granules and its regulation on crystal growth of calcium oxalate[J]. Science and Technology & Innovation, 2019(2): 24-26, 29.
- [28] 李文峰, 陶雯, 陈露红, 等. 可溶性大豆多糖改善左旋肉碱诱导的小鼠小肠首过代谢[J]. 食品科学, 2019, 40(13): 187-194.  
LI Wenfeng, TAO Wen, CHEN Luhong, et al. Soluble soybean polysaccharides ameliorate L-carnitine-induced first-pass metabolism in the small intestine of mice[J]. Food Science, 2019, 40(13): 187-194.
- [29] 王改玲, 丁保安. 胆汁酸盐在日粮中的应用效果[J]. 兽医导刊, 2019(18): 247-250.  
WANG Gailing, DING Bao'an. Application effect of bile acid salt in diet[J]. Veterinary Orientation, 2019(18): 247-250.
- [30] HE H Y, CHEN C, ZHAO W. Soybean soluble polysaccharide prevents obesity in high-fat diet-induced rats via lipid metabolism regulation[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222(Pt B): 3057-3065.
- [31] 田月月, 胡沁蕊, 孔祥珍, 等. 水溶性大豆多糖体外吸附 Pb<sup>2+</sup> 的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2018, 37(4): 380-384.  
TIAN Yueyue, HU Qinrui, KONG Xiangzhen, et al. *In vitro* binding of lead by soybean soluble polysaccharides[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2018, 37(4): 380-384.
- [32] WANG M X, FU C Y, ZHANG M C, et al. Immunostimulatory activity of soybean hull polysaccharide on macrophages[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2022, 23(6): 389.
- [33] GUAN X F, WANG Q, LIN B, et al. Structural characterization of a soluble polysaccharide SSPS1 from soy whey and its immunoregulatory activity in macrophages[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 217: 131-141.
- [34] 姜莉媛. 水溶性大豆多糖与锌离子螯合反应机理与产物性质研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
JIANG Liyuan. Study on the chelation mechanism of soluble soybean polysaccharides with zinc ion and the properties of the products[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.
- [35] 解慧, 沈晓溪, 徐坚, 等. 大豆膳食纤维面包的研制及配方优化[J]. 食品工程, 2021(4): 19-22, 62.  
XIE Hui, SHEN Xiaoxi, XU Jian, et al. Development and formula optimization of soybean dietary fiber bread[J]. Food Engineering, 2021(4): 19-22, 62.
- [36] 田浩, 何志勇, 王召君, 等. 可溶性大豆多糖与果胶对酸化乳饮料的稳定机制对比[J]. 食品与生物技术学报, 2022, 41(5): 66-73.  
TIAN Hao, HE Zhiyong, WANG Zhaojun, et al. Comparison of stabilization mechanism of acidified milk beverage stabilized by soluble soybean polysaccharides and pectin[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2022, 41(5): 66-73.
- [37] 靳春秋. 不同稳定剂对椰子饮料稳定性及耐酸性影响[J]. 食品工业, 2023, 44(4): 78-82.  
JIN Chunqiu. The influence of different stability on the stability and acid resistance of coconut beverage[J]. The Food Industry, 2023, 44(4): 78-82.
- [38] 刘郁琪, 覃小丽, 阚建全, 等. 酪蛋白与可溶性大豆多糖的酶促糖基化产物制备及其性能分析[J]. 食品科学, 2020, 41(19): 74-82.  
LIU Yuqi, QIN Xiaoli, KAN Jianquan, et al. Preparation and properties of enzymatic glycosylation products of casein with soluble soybean polysaccharide[J]. Food Science, 2020, 41(19): 74-82.
- [39] CAI Z X, WEI Y, GUO Y L, et al. Influence of the degree of esterification of soluble soybean polysaccharide on the stability of acidified milk drinks[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 108: 106052.
- [40] 王博文, 胡蝶, 袁洁瑶, 等. 可溶性大豆多糖对鲜湿米粉表面黏性的影响[J]. 中国粮油学报, 2022, 37(12): 22-27.  
WANG Bowen, HU Die, YUAN Jieyao, et al. Effects of soluble soybean polysaccharides on surface viscosity of fresh rice noodles[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2022, 37(12): 22-27.
- [41] WANG J, HE Y T, LI X Y, et al. Effect of soluble soybean polysaccharides on the short- and long-term retrogradation properties of instant rice[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2023, 103(10): 4850-4857.
- [42] 赵启竹. 可溶性大豆多糖对淀粉老化的抑制及影响因素研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
ZHAO Qizhu. Inhibition of soluble soybean polysaccharides on starch retrogradation and influencing factors[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [43] 王馨然, 何余堂, 李心萌, 等. 三种抗老化剂对方便米饭老化性能的影响[C]// 西安: 中国食品科学技术学会第十七届年会摘要集, 2020: 379-380.  
WANG Xinran, HE Yutang, LI Ximeng, et al. The influence of three anti-aging agents on the aging performance of instant rice[C]// Xi'an: The abstract of the 17th annual meeting of China Food Science and Technology Society, 2020: 379-380.
- [44] HONG T T, WANG L L, XU Y, et al. Comparative study of soluble soybean polysaccharides on bread staling under acidic conditions[J]. Food Chemistry, 2023, 400: 133950.
- [45] 徐平, 王月慧, 陈磊, 等. 可溶性大豆多糖对鲜湿豆丝货架期内贮藏品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(17): 144-152.  
XU Ping, WANG Yuehui, CHEN Lei, et al. Effect of soluble soybean polysaccharide on storage quality of fresh wet bean thread during shelf life period[J]. Food Science, 2023, 44(17): 144-152.
- [46] GUAN C M, LIU J J, GAN S L, et al. Effects of soluble soybean polysaccharide on cooking and eating quality of dry rice noodles under single- and twin-screw extrusions[J]. LWT-Food Science and Technology, 2023, 187: 115352.
- [47] 高维, 贺虹, 李小鹏, 等. 天然多糖对全麦面粉粉质特性及面条品质的影响[J]. 粮食与油脂, 2022, 35(3): 67-71.  
GAO Wei, HE Hong, LI Xiaopeng, et al. Effects of natural polysaccharides on flour properties and noodle quality of whole wheat flour[J]. Cereals & Oils, 2022, 35(3): 67-71.
- [48] 吴慧清, 陈邱缘, 马芝丽, 等. 助干剂对南瓜消渴果粉品质改善探究[J]. 中国食品添加剂, 2022, 33(8): 129-135.  
WU Huiqing, CHEN Qiuyan, MA Zhili, et al. Study on the improvement of the quality of pumpkin Xiaoke glycoside fruit powder with drying agent[J]. China Food Additives, 2022, 33(8): 129-135.
- [49] 叶瑞森. 水溶性大豆多糖改善冷冻鱼糜品质及其高光谱检测的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.  
YE Ruisen. Soluble soybean polysaccharide improves the quality of frozen surimi and its hyperspectral non-destructive testing[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [50] GAO W H, WU X R, YE R S, et al. Analysis of protein denaturation, and chemical visualization, of frozen grass carp surimi containing soluble soybean polysaccharides[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2022, 57(8): 5504-5513.

- [51] KAFASHAN A, JOZE-MAJIDI H, KAZEMI-PASARVI S, et al. Nanocomposites of soluble soybean polysaccharides with grape skin anthocyanins and graphene oxide as an efficient halochromic smart packaging[J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 38: e00755.
- [52] LIU J, WANG Y W, LIU Y C, et al. Synergistic effect of nano zinc oxide and tea tree essential oil on the properties of soluble soybean polysaccharide films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124361.
- [53] LIU J, LIU C, ZHENG X J, et al. Soluble soybean polysaccharide/nano zinc oxide antimicrobial nanocomposite films reinforced with microfibrillated cellulose[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 159: 793-803.
- [54] DONG Y T, LI Y J, MA Z X, et al. Effect of polyol plasticizers on properties and microstructure of soluble soybean polysaccharide edible films[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 35: 101023.
- [55] JAFARIAN M, TAGHINIA P, SEDAGHATI S. Development and characterization of a new active and intelligent packaging system based on soluble soybean polysaccharide-*Malva sylvestris* extract[J]. Journal of Food Science and Technology, 2023, 60(7): 1944-1951.
- [56] DONG Y T, RAO Z L, LIU Y C, et al. Soluble soybean polysaccharide/gelatin active edible films incorporated with curcumin for oil packaging[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2023, 35: 101039.
- [57] SALARBASHI D, TAFAGHODI M, BAZZAZ B S F, et al. pH-sensitive soluble soybean polysaccharide/SiO<sub>2</sub> incorporated with curcumin for intelligent packaging applications[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(4): 2169-2179.
- [58] ZHOU X H, WU Y, ZHOU X J, et al. Elaboration of cationic soluble soybean polysaccharides - epigallocatechin gallate nanoparticles with sustained antioxidant and antimicrobial activities[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(36): 11353-11366.

加工编辑:孟琬星  
收稿日期:2023-12-19