

水溶性大豆多糖与大豆果胶的提取及功能特性研究进展

韩 晴¹, 王 兴², 蔡云霞³, 李 俊^{1*}

(1. 中国农业科学院饲料研究所, 北京 100081; 2. 云南省兽药饲料检测所, 昆明 650201;
3. 北京嘉博文生物饲料科技有限公司, 北京 100085)

摘 要: 大豆作为我国传统作物, 有很长的耕作历史, 但由于国内对大豆的深加工起步较晚, 对于深加工的副产物豆皮、豆渣的研究利用较不充分。而豆皮、豆渣中富含膳食纤维, 是水溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)和大豆果胶(soybean pectin, SP)的良好来源。SSPS 和 SP 结构和性能相似, 在食品工业中具有很高的应用价值。在国外, 对 SSPS 和 SP 的研究较早, 对 SSPS 和 SP 的提取工艺、分子结构组成、流变学性质、乳化性质以及稳定酸性乳饮料的机制等方面已经做了不少的研究。国内起步晚, SSPS 和 SP 的工业化生产始终未成健全体系, SSPS 及 SP 的提取工艺存在不成熟、提取纯度不高及功能性质不稳定等问题。本文对 SSPS 和 SP 的结构、生物活性、以及在食品工业中应用的研究进展进行了综述。

关键词: 水溶性大豆多糖; 大豆果胶; 生物活性

Research progress of extraction and functional characteristics of water soluble soybean polysaccharides and soybean pectin

HAN Qing¹, WANG Xing², CAI Yun-Xia³, LI Jun^{1*}

(1. Feed Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, Beijing 100081, China;
2. Yunnan Testing & Inspection Institute for Veterinary Drugs & Feedstuff, Kunming 650201, China;
3. Beijing Goldenway Bio-Tech. Co. Ltd., Beijing 100085, China)

ABSTRACT: Soybean, as a traditional crop, has a long history of cultivation in China. However, due to the late start of deep processing of soybean in China, the utilization of deep-processed by-products such as soybean hulls and soybean dregs was insufficient. Soybean hulls and soybean dregs are rich in dietary fiber, which is a good source of water-soluble soybean polysaccharide (SSPS) and soybean pectin (SP). The structure and performance of SSPS and SP are similar, and they have high application values in the food industry. The researches on SSPS and SP are earlier abroad, and many researches have been done on the extraction process of SSPS and SP, molecular structure composition, rheological properties, emulsifying properties and the mechanism of stable acidic milk beverage. The domestic researches started late, SSPS and SP industrial productions have not yet a sound system, and the researches of SSPS and SP have problems such as immature extraction process, low extraction purity and unstable functional properties. This review summarized the structures, bioactivities and applications of SSPS and SP in food industry.

KEY WORDS: soluble soybean polysaccharides; soybean pectin; bioactivity

*通讯作者: 李俊, 博士, 研究员, 研究方向为植物活性多糖的研究与开发。E-mail: lijun08@caas.cn

*Corresponding author: LI Jun, Ph.D, Professor, Feed Research Institute, Chinese Academy of Agriculture Sciences, No.12, Zhongguancun South Road, Haidian District, Beijing 100081, China. E-mail: lijun08@caas.cn

1 引 言

大豆的营养价值丰富，是蛋白质和油脂的重要来源^[1]。目前市场上除传统的油制品及豆制品之外，还出现了越来越多的新型大豆制品，如大豆组织蛋白、大豆分离蛋白、浓缩蛋白、素肉、速溶豆粉等^[2]。且随着对大豆及其制品的深入研究，大豆的生理和生物活性不断被人们认识和了解，其综合利用开发也越来越受关注。目前，我国大豆类食品较多，因此大豆的消耗量也很高，产生了大量的大豆加工副产物，如：豆渣、豆粕、豆皮等，豆粕主要作为动物饲料原料被利用^[3]，豆渣常作为油炸及烘焙食品的辅料^[4]，而豆皮绝大多数当作饲料或作为废料弃掉^[5]。豆渣和豆皮没有的到充分和有效的利用，造成资源的浪费和环境的污染。因此，寻找更好的利用途径成为研究热点。

豆渣和豆皮是目前在大豆加工过程中产量极高的 2 种副产物，均含有丰富的纤维素及其他营养物质^[6,7]。其中纤维素是很好的糖源，通过一定的提取工艺可以制备出具有优良特性的水溶性大豆多糖(soluble soybean polysaccharides, SSPS)和大豆果胶(soybean pectin, SP)^[8,9]。

本研究从水溶性大豆多糖和大豆果胶的提取工艺、结构、生物活性及应用等方面，对国内外研究情况进行了总结概述并对其发展前景进行展望。

2 水溶性大豆多糖和大豆果胶的结构分析

2.1 水溶性大豆多糖和大豆果胶的提取

水溶性大豆多糖和大豆果胶的提取是结构分析前的

重要步骤。水溶性大豆多糖提取的主要操作是将提取原料中的水溶性半纤维素组成性糖分的糖醛酸上的甲基化羧基去甲基化。目前，对 SSPS 比较常用的去甲基化提取方法主要是热水浸提法^[10]、超声/微波辅助提取法^[11,12]和酶法^[13]。经过提取得到的多糖为混合多糖，进一步分离纯化可以得到较为均一的多糖。SP 在原料中一般以不溶于水的原果胶和果胶酸盐的形式存在，因此需要用酸、螯合剂等处理，使不溶性果胶转化为可溶性果胶分散到提取液中，目前国内常用的提取方法有酸法提取^[14]和酶法提取^[15]。

从 20 世纪 60 年代开始，关于 SSPS 和 SP 的提取方法及结构方面的报道越来越多^[16-24]。很多研究者采取不同的提取方法从不同的大豆副产物中提取 SSPS 和 SP，并对 SSPS 和 SP 的结构及相关性质进行研究。不同提取方法得到的 SSPS 和 SP 见表 1 及表 2。

2.2 水溶性大豆多糖的结构分析

SSPS 是一种从大豆子叶中提取的酸性多糖。由半乳糖(galactose, Gal)、阿拉伯糖(arabinose, Ara)、半乳糖醛酸(galacturonic acid, GalA)、鼠李糖(rhamnose, Rha)、岩藻糖(fucose, Fuc)、木糖(xylose, Xyl)和葡萄糖(glucose, Glu)等组成^[25]。

Nakamura 等^[26,27]通过分步酶水解法，对 SSPS 的结构进行了详细分析。结果显示 SSPS 是结构与果胶类似的酸性多糖。其分子量范围主要在 5000~1000000 U 之间，其中 3 种主要组分的分子量分别为 5000、25000、550000 U。SSPS 的主链包含聚半乳糖醛酸(polygalacturonic acid, GN)及鼠李半乳糖醛酸聚糖(rhamnogalacturonan, RG)。GN 链由

表 1 水溶性大豆多糖的提取
Table 1 Extraction of soluble soybean polysaccharide

研究者	提取材料	提取方法	相关特性	应用
涂宗财等 ^[16]	豆渣	亚临界水提取	流变学特性	作为添加剂应用于低黏度乳酸饮料和含糖饮料等食品中
朱昌玲等 ^[17]	豆渣	酶法提取	抗氧化活性	作为天然抗氧化剂及功能食品
谭静等 ^[18]	湿豆渣	酸法提取	蛋白稳定性	作为酸乳饮料稳定剂
王伏超等 ^[19]	豆渣	酸法提取	成膜性	作为涂膜保鲜材料，应用于食品保鲜技术
刘玮 ^[20]	豆渣	六偏磷酸钠辅助酸法	凝胶性	作为增稠剂添加于水溶液分散体系、乳液及悬浮液中

表 2 大豆果胶的提取
Table 2 Extraction of soybean pectin

研究者	提取材料	提取方法	相关特性	应用
朱丹实等 ^[21]	大豆皮	酸法提取	成膜性	作为果蔬保鲜复合膜
刘贺等 ^[22]	大豆皮	酸法提取	凝胶性	制成球状凝胶，应用制药、食品行业
刘佳等 ^[23]	豆渣	酸法辅助酶法提取	蛋白稳定性	作为酸乳饮料稳定剂
刘贺等 ^[24]	大豆皮	酸法提取	流变学特性	应用于食品生产如果冻、果酱、酸奶

-4)- α -D-GalA-(1-结构组成,由15、28或100个糖苷重复单元组成,其聚合度在4~10个GalA残基。在SSPS还原末端的聚半乳糖醛酸短链的聚合度约有7~9个残基。且部分聚半乳糖醛酸短链被半乳糖醛酸酯的C-3位点上的木糖残基所修饰。鼠李半乳糖醛酸聚糖(RG),由-4)- α -GalA-(1 $\rightarrow$ 2)- α -Rha-(1-二糖基重复单元组成,其长度大约是15、28和100个糖苷重复单位,其组分通过聚半乳糖醛酸链间的相互作用连接。RG链的中性侧链由半乳糖基和阿拉伯糖基组成,通过鼠李糖与鼠李糖半乳糖醛酸结合,半乳糖体侧链的分子聚合度约为43~47,由海藻糖和阿拉伯糖修饰,阿拉伯糖连接在RG链鼠李糖残基的C-4位置上。RG链的中性侧链比半乳糖醛酸主链更长,且靠近聚鼠李糖半乳糖醛酸长链主干位点上的半乳糖短链被阿拉伯糖、戊糖、海藻糖和葡萄糖修饰。

研究表明,随着提取原料的不同,多糖组分略有差异。Aspinall等^[28]对大豆皮进行了SSPS提取研究,得到了半乳甘露聚糖以及一系列酸性多糖组分,如木聚糖和甘露聚糖。且大豆皮中提取的酸性多糖组分通过部分酸水解或者部分乙酰化,表征了一部分低聚糖的结构。而Kikuchi等^[29]从酱油中分离纯化出2种不同分子量的酸性多糖,2种酸性多糖均含有大量的半乳糖醛酸。对大豆细胞壁进行提取同样可以得到这2种酸性多糖,且细胞壁中得到的酸性多糖与酱油中分离得到多糖的单糖组成相同,由此推测酱油中多糖来自于大豆细胞壁。此外,Huisman等^[30]从豆粕中分离得到一种多糖组分,其单糖组成为半乳糖醛酸、阿拉伯糖和葡萄糖,该多糖组分同样为细胞壁多糖。

2.3 大豆果胶的结构分析

果胶(pectin)存在于高等植物细胞壁中,是由半纤维素、木纤维素等纤维素共价结合形成的,由半乳糖醛酸、阿拉伯糖、半乳糖和鼠李糖等组成^[31]。Gnanasambandam等^[32]在1999年首次探讨了利用大豆皮提取果胶的可能性,而后Kalapathy等^[33]及Monsoor等^[34]对SP提取的条件、表面结构及功能性质进行了进一步研究。

关于果胶,最常用的生物化学定义是富含半乳糖醛酸(GalA)的多糖组。GalA以2种主要形式存在于3个多糖区域,且所有类型的果胶都含有这3种区域,分别为同聚半乳糖醛酸(homogalacturonan acid, HGA)^[35],鼠李半乳糖醛酸聚糖-I(rhamnogalacturonan-I, RG-I)^[36]和鼠李半乳糖醛酸聚糖-II(rhamnogalacturonan-II, RG-II)^[37]。HGA是由通过 α -1,4连接D-半乳糖醛酸组成的线性同聚物,包含100~200个GalA残基。其中约有70%~80%的GalA残基被甲基酯化。并且HGA上的GalA残基可以发生O-乙酰化,这种乙酰化会发生在C-3位置上,但在C-2位置上也时有发生。HGA的GalA残基可以被木糖残基取代,形成XGA区域^[38]。

RG-I包含1个以重复二糖单元[$\rightarrow$ 4)-D-GalpA-(1 $\rightarrow$ 2)- α -L-Rhap-(1 $\rightarrow$)]所构成的主链,这些二糖单元由半乳糖醛酸和鼠李糖组成。RG-I与HGA通过糖苷键相连,这可能表明了聚半乳糖醛酸主链之间存在生物合成转换。在大多数情况下,RG-I上有20%~80%的鼠李糖残基被中性糖残基取代,因为中性残基大小的不同,导致多糖组的分化程度较大^[39]。RG-II与RG-I结构不同,RG-II的主链由9个左右的1,4-连接的 α -D-半乳糖醛酸组成,且主链的部分半乳糖醛酸的C-3位置上常连接有不同结构的二糖。RG-II侧链包含11种不同的糖,是果胶中唯一没有明显结构分化的区域。

3 水溶性大豆多糖和大豆果胶的生物活性

3.1 水溶性大豆多糖的生物活性

研究表明,植物多糖具有抗氧化、增强免疫力、抗肿瘤、抗病毒、抗辐射、降血脂、降血糖、抗衰老等功效^[40-42]。SSPS作为食品添加剂已经得到了较广泛的应用,根据对已有多糖生物活性的研究,SSPS可能具有如下生物活性。首先,SSPS具有膳食纤维的功能特性,可以有效改善人体肠道微生物群落组成,通过改变pH值来改善双歧杆菌、乳酸菌等的繁殖环境^[43]。这对抑制腐生菌生长,维持维生素供应具有重要意义。其次,张秀娟等^[44]发现,SSPS可以有效调节免疫细胞的增殖生长,尤其是T淋巴细胞,并能促进相关细胞因子的分泌,从而发挥抗肿瘤的作用。其他研究还表明^[45],SSPS具有抗氧化活性,可以抑制或清除生物体内自由基的产生,还可以提高超氧化物歧化酶的活性,从而增强对自由基的清除能力。

3.2 大豆果胶的生物活性

目前,国内的商品果胶主要是柑橘果胶,其次是苹果果胶,对大豆果胶生物活性的研究较少,但基于对不同来源果胶生物活性的研究结果,可以推测,大豆果胶可能具有抗氧化、抑菌、抑制肿瘤细胞生长等功能。马丽苹等^[46]的研究表明,苹果果胶可以有效清除DPPH自由基、羟自由基和超氧自由基,并且这种清除能力会随着苹果果胶的改性手段而发生改变。金山^[47]通过对山楂果胶寡聚糖的抗氧化效果的研究发现,山楂果胶寡聚糖对中波紫外线辐射后人角质形成细胞的氧化损伤和光老化具有保护作用。还有研究表明^[48],果胶通过破坏细菌细胞膜的通透性和完整性,致使内容物外漏进而影响细菌代谢活性,从而抑制细菌生长,因此果胶可作为天然防腐剂,延长食品货架期。此外,张燕燕^[49]的研究发现,甘薯果胶可显著抑制肺细胞肿瘤生长,使肿瘤组织中细胞凋亡率显著上升。

4 水溶性大豆多糖和大豆果胶在食品工业中的应用

4.1 水溶性大豆多糖在食品工业中的应用

4.1.1 膳食纤维补充剂

SSPS 中膳食纤维含量超过 70%^[50], 是良好的膳食纤维来源。除了具有葡聚糖、抗性糊精等水溶性膳食纤维的生理功能外, 还可以预防和治疗动脉粥样硬化和冠心病^[51]。SSPS 作为膳食纤维摄入人体后, 可以有效调节肠道菌群活力, 促进肠道蠕动, 预防便秘及结肠癌^[52]。此外, 作为一种耐酸、热、盐的膳食纤维, SSPS 还可以缓解农药的毒害作用, 有效吸附重金属离子, 加快钙、镁离子的吸收。因此, 将 SSPS 作为膳食纤维的补充剂具有很好的发展前景。

4.1.2 稳定水包油型乳剂系统

SSPS 具有与变性淀粉相同的乳化性和乳化稳定性, 且其乳化稳定性不受溶液中离子的干扰, 在较宽的 pH 范围内都可以维持乳液的稳定性^[53]。研究发现^[54], SSPS 可以在水包油乳化剂中形成稳定的油水界面, 使水层和油层均匀的混合在一起。Nakamura 等^[55]通过验证不同酶处理对 SSPS 乳化性能的影响, 认为 SSPS 结构中的 β -半乳糖和 α -阿拉伯聚糖组成的中性糖链, 在 SSPS 乳化性能中发挥主要作用。因此 SSPS 作为香色素的载体, 被广泛应用于乳化香料、植物油脂等, 且添加量较少, 是阿拉伯胶、黄原胶和变性淀粉等乳化稳定剂的有效替代品^[56]。

4.1.3 稳定酸性牛乳饮料

SSPS 在较宽的酸性范围下, 可以有效阻止蛋白质颗粒的凝集, 且不会增加溶液的黏度^[57]。在实际生产过程中, 含蛋白的酸乳饮料会随着贮藏时间的延长出现蛋白质聚集和沉淀的现象。目前市场上已有的稳定剂虽然可以防止蛋白质沉淀, 但会增加饮料的黏度, 影响饮料的口感。将 SSPS 添加到酸性牛乳饮料中, SSPS 会吸附到蛋白质表面, 带负电荷的聚半乳糖醛酸链、半乳糖链和阿拉伯聚糖链伸入到水相通过空间排阻作用来阻止颗粒聚集。添加 SSPS 作为饮料的稳定剂, 可以使酸性饮料口感清爽、黏度适中, 保留原有风味^[58,59]。研究表明^[60], 如果用聚半乳糖醛酸酶或鼠李半乳糖醛酸酶消化掉 SSPS 的聚半乳糖主链, SSPS 稳定能力变化甚微, 但如果用酶水解掉 SSPS 阿拉伯聚糖、半乳糖侧链后, SSPS 的稳定能力将大大降低, 这表明, SSPS 的中性侧链在稳定酸性乳饮料中起重要作用。

4.1.4 作为可降解膜用于食品保鲜及包装

随着食品精加工程度的提高, 超市中越来越多的水果蔬菜采用保鲜膜进行包装, 但常规的保鲜膜无法降解, 污染环境。因此, 研究可降解的无毒无害食品保鲜材料成为一种趋势。有实验证明, 在不添加任何成分的情况下, SSPS 可以很好地成膜, 且膜张力可以与直链淀粉媲美^[61]。另外, 王伏超^[62]用改性的 SSPS 对鸡蛋进行涂膜保鲜, 结

果表明改性的 SSPS 可以有效地封闭鸡蛋表面的气孔, 延长鸡蛋的货架期。

4.1.5 抑制油脂氧化

SSPS 还可以有效防止油脂氧化, 经过 SSPS 包被的高油脂食品, 在较长时间的贮藏后, 大部分脂质不会被氧化^[63]。因此将 SSPS 应用于高油脂食品的保鲜贮藏, 可以延长食品货架期, 维持食品品质。

4.2 大豆果胶在食品工业中的应用

4.2.1 作为胶凝剂

SP 作为胶凝剂添加到果酱、果冻和果胶软糖中, 赋予此类食品特殊的质构与口感。研究表明^[64], 不同的果胶凝胶条件不同, 可根据此特性应用于不同的食品中。高酯果胶需要在高糖的条件下形成凝胶, 而低酯果胶需在钙离子存在的条件下才能发生胶凝。Fu 等^[65]的研究表明, 随着果胶浓度和糖含量的增加, 体系的储存模量也随之增加, 因此果胶和糖对凝胶的形成和稳定有重要影响。

4.2.2 作为稳定剂

虽然与 SSPS 稳定蛋白颗粒的机制不同, SP 也具有较好的蛋白颗粒稳定性, 能够利用羧基上带有的电荷与蛋白颗粒结合, 通过空间位阻作用防止蛋白颗粒之间的絮凝沉淀^[66]。因此, SP 常作为稳定剂应用于乳制品中。还有实验表明^[67], 增加离子强度会增加果胶对蛋白颗粒的吸附能力, 提高 SP 的稳定性。

4.2.3 作为包埋剂或成膜剂

果胶具有很好的成膜性, 因此常作为包埋剂或成膜剂应用于食品工业中。近年来, 有研究通过将果胶溶液加入阳离子溶液制作凝胶球, 并将特定物质包埋于凝胶球中, 使果胶以凝胶的形式对功能因子和芳香类物质进行控制释放^[68]。SP 还常用于果蔬原料的保鲜, 通过抑制果蔬的呼吸作用, 阻止果蔬水分散失, 产生类似气调包装的作用^[69]。

4.2.4 作为保健食品

SP 对于维持血液中正常的胆固醇含量也具有较好的效果, 可以利用 SP 降低人体血液中的胆固醇含量^[70], SP 还具有很强的吸水能力, 使人产生饱腹感, 减少食品利用率, 可用于减肥纤体。此外, SP 具有良好的吸附作用, 可以作为天然物质防止有毒阳离子中毒, 能够有效的除去人体肠道和呼吸道中的铅和汞。

5 总结与展望

在食品工业中, 水溶性大豆多糖和大豆果胶都具有很大的发展前景。目前对水溶性大豆多糖及大豆果胶的研究主要集中于各自提取方法的选择、优化以及功能性质的考察, 而关于不同来源水溶性大豆多糖、大豆果胶的性质比较, 及同时提取相同来源的水溶性大豆多糖和大豆果胶的研究较少。而对其性质的深入研究有利于水溶性大豆多糖和大豆果胶的针对性应用, 不仅促进大豆加工副产物的

有效利用,还可以解决大豆深加工带来的环境问题,带动产业提质增效。

参考文献

- [1] 姚穆,来侃,孙润军,等.大豆和大豆蛋白质组成与结构的研究[J].棉纺织技术,2002,30(9):33-35.
Yao M, Lai K, Sun RJ, *et al.* Components and structure of soybean and soybean protein [J]. Cotton Textile Technol, 2002, 30(9): 33-35.
- [2] 李晓伟,黄红英.大豆利用价值及高产栽培技术[J].安徽农学通报,2011,17(16):209-210.
Li XW, Huang HY. Soybean utilization value and high yield cultivation techniques [J]. Anhui Agric Sci Bull, 2011, 17(16): 209-210.
- [3] 王龙艳.豆渣碱溶多糖的分离纯化、改性及性质研究[D].齐齐哈尔:齐齐哈尔大学,2013.
Wang LY. The separation, purification, modification and properties of alkaline dissolved polysaccharide from bean dregs [D]. Qiqihaer: Qiqihaer University, 2013.
- [4] 谭永辉,王文生,秦玉昌,等.豆渣中水溶性大豆多糖的提取与应用[J].大豆科学,2008,27(1):150-153.
Tan YH, Wang WS, Qin YC, *et al.* Extraction and application of soluble soybean polysaccharides from bean curd waste [J]. Soybean Sci, 2008, 27(1): 150-153.
- [5] 李群飞,安宁,于丹,等.正交试验优化豆皮水溶性多糖中果胶的分离技术[J].食品科学,2015,36(8):92-96.
Li QF, An N, Yu D, *et al.* Optimization by orthogonal array design of pectin separation from soluble soybean-hull polysaccharide [J]. Food Sci, 2015, 36(8): 92-96.
- [6] 李娜,宁正祥,祝子坪,等.豆渣膳食纤维的制备及性能研究[J].食品科学,2009,30(20):251-254.
Li N, Ning ZY, Zhu ZP, *et al.* Preparation and characterization of dietary fibers from soybean dregs [J]. Food Sci, 2009, 30(20): 251-254.
- [7] Mullin WJ, Xu WL. Study of soybean seed coat components and their relationship to water absorption [J]. J Agric Food Chem, 2001, 49: 5331-5335.
- [8] 尹艳,宋冠华,李周玉,等.水溶性大豆多糖溶解性的研究[J].惠州学院学报(自然科学版),2009,29(3):13-16.
Yin Y, Song GH, Li ZY, *et al.* Study on the solubility of soluble soybean polysaccharides [J]. J Huizhou Univ (Nat Sci Ed), 2009, 29(3): 13-16.
- [9] 许旭,杨桃,陈新.响应面法优化大豆种皮果胶的酸提取工艺[J].武汉工业学院学报,2013,32(1):7-10,27.
Xu X, Yang T, Chen X. The optimum acid-extraction conditions of soybean hull pectin by response surface methodology [J]. J Wuhan Polytec Univ, 2013, 32(1): 7-10, 27.
- [10] 桂雨豪.水压热法制备水溶性大豆多糖与其应用研究[D].广州:华南理工大学,2016.
Gui YH. The extraction and application of water-soluble soybean polysaccharides through the high pressure of water vapor [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [11] 李辉,苏翌,冷雪梅.微波辅助提取大豆多糖工艺的研究[J].农业机械,2013,(32):57-60.
Li H, Su G, Leng XM. Study on microwave-assisted extraction of soybean polysaccharides [J]. Farm Mach, 2013, (32): 57-60.
- [12] 管晓,陈姿含.低湿豆粕中水溶性多糖的超声萃取技术研究[J].大豆科学,2013,32(6):825-829.
Guan X, Chen ZH. Optimization on the ultrasonic extraction technique of soluble polysaccharides from low temperature soybean meal [J]. Soybean Sci, 2013, 32(6): 825-829.
- [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].食品工业科技,2011,32(11):305-308.
Tian RH, Jiang LZ, Hu SX, *et al.* Preparation of water soluble soybean polysaccharides from soybean residue produced by ultrasonic-enzymatic extraction [J]. Sci Technol Food Ind, 2011, 32(11): 305-308.
- [14] 张庆轩,杨普江,杨国华.酸提取大豆种皮果胶的工艺优化[J].食品科学,2005,26(12):156-159.
Zhang QX, Yang PJ. The optimum acid-extraction conditions of soy hull pectin [J]. Food Sci, 2005, 26(12): 156-159.
- [15] 任庆荣.酶法制备豆皮低聚糖[D].广州:暨南大学,2007.
Ren QR. Enzymatic preparation of soybean oligosaccharides [D]. Guangzhou: Jinan University, 2017.
- [16] 涂宗财,刘益东,王辉,等.亚临界水提取的水溶性大豆多糖的流变特性[J].食品科学,2011,32(17):37-40.
Tu ZC, Liu YD, Wang H, *et al.* Subcritical water soluble soybean polysaccharides rheological property viscosity [J]. Food Sci, 2011, 32(17): 37-40.
- [17] 朱昌玲,孙达锋.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,2015,34(3):69-71.
Zhu CL, Sun DF. Refining water-soluble polysaccharides from bean dregs and their antioxidant activity [J]. Chin Wild Plant Resour, 2015, 34(3): 69-71.
- [18] 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,2013,32(2):242-245.
Tan J, Chang ZY, Gao HL, *et al.* Effect of soluble soybean polysaccharides extraction process on the stability of acid dairy beverages [J]. Soybean Sci, 2013, 32(2): 242-245.
- [19] 王伏超,李军国,李俊,等.多糖及改性多糖作为涂膜保鲜材料的研究进展[J].食品科学,2012,33(5):299-304.
Wang FC, Li JG, Li J, *et al.* Research progress of application of polysaccharides and modified polysaccharides infilm coatings for food preservation [J]. Food Sci, 2012, 33(5): 299-304.
- [20] 刘玮.大豆多糖胶的制备及其凝胶性研究[D].南昌:南昌大学,2012.
Liu W. Study of preparation and gelation capacity of soybean polysaccharide gel [D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.
- [21] 朱丹实,郭晓飞,刘昊东,等.可食性大豆皮果胶膜的制备及膜性质研究[J].食品科学,2011,32(8):116-120.
Zhu DS, Guo XF, Liu HD, *et al.* Preparation and physiochemical prosperities of soy hull pectin-based edible film [J]. Food Sci, 2011, 32(8): 116-120.
- [22] 刘贺,郭晓飞,王雪,等.低酯大豆皮果胶球状凝胶水分吸附与解吸行为[J].中国食品学报,2012,12(9):62-66.
Liu H, Guo XF, Wang X, *et al.* Water sorption and desorption behaviour in low methoxyl soy hull pectin spherical gel [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2012, 12(9): 62-66.
- [23] 刘佳,张书文,宋广巍,等.五种不同来源果胶类多糖的提取及其蛋白质稳定性测定[J].中国食品添加剂,2016,(5):157-163.
Liu J, Zhang SW, Song GW, *et al.* Extraction of polysaccharides from five kinds of different sources and research of protein stability [J]. China Food

- Addit, 2016, (5): 157–163.
- [24] 刘贺, 庚平, 王俊, 等. 商业橘皮果胶与大豆果胶流变性质的比较[J]. 食品科学, 2014, 35(21): 26–30.
- Liu H, Geng P, Wang J, *et al.* Comparison of rheological properties between citrus pectin and soy hull pectin [J]. Food Sci, 2014, 35(21): 26–30.
- [25] Maedah. Soluble soybean polysaccharide [M]. Japan: Fuji Oil Co., Ltd. 1999.
- [26] 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]. J Agric Chem Soc Jpn, 2002, 66(6): 1301–1313.
- [27] Nakamura A, Furuta H, Maeda H, *et al.* Analysis of structural components and molecular construction of soybean soluble polysaccharides by stepwise enzymatic degradation [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2001, 65(10): 2249.
- [28] Aspinalli G, Whyte J. Polysaccharides of soy-beans. Part I. galactomannans from the hulls [J]. J Chem Soc, 1964(DEC): 5058–5063.
- [29] Kikuchi T, Yokotsuka T. Studies on the polysaccharides from soy sauce: Part I. purification and properties of two acidic polysaccharides [J]. Agric Biol Chem, 1972, 36(4): 544–550.
- [30] Huisman M, Schols H, Voragen A. Enzymatic degradation of cell wall polysaccharides from soybean meal [J]. Carbohydr Polym, 1999, 38(4): 299–307.
- [31] 谢明勇, 李精, 聂少平. 果胶研究与应用进展[J]. 中国食品学报, 2013, 13(8): 1–14.
- Xie MY, Li J, Nie SP. A review about the research and applications of pectin [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2013, 13(8): 1–14.
- [32] Gnanasambandam R, Proctor A. Preparation of soy hull pectin [J]. Food Chem, 1999, 65(4): 461–467.
- [33] Kalapathy U, Proctor A. Effect of acid extraction and alcohol precipitation conditions on the yield and purity of soy hull pectin [J]. Food Chem, 2015, 73(4): 393–396.
- [34] Monsoor MA, Proctor A. Preparation and functional properties of soy hull pectin [J]. J Am Oil Chem Soc, 2001, 78(7): 709.
- [35] O'Neill MA, Albersheim P, Darvill A. The pectin polysaccharides of primary cell walls [J]. Methods Plant Biochem, 1990, 2: 415–441.
- [36] Albersheim P, Davill AG, O'Neill MA, *et al.* An hypothesis: the same six polysaccharides are components of the primary cell walls of all higher plants [J]. Prog Biotechnol, 1996, 14: 47–55.
- [37] Mohnen D. Biosynthesis of pectins and galactomannans [M]. Comprehensive Natural Products Chemistry, 1999.
- [38] Riledy BL, O'Neill MA, Mohnen D, *et al.* Pectins: structure, biosynthesis and ligogalacturonide-related signaling [J]. Phytochem, 2001, 57: 929–967.
- [39] Caffall KH, Mohnen D. The structure, function and biosynthesis of plant cell wall pectic polysaccharides [J]. Carbohydr Res, 2009, 334(14): 1879–1900.
- [40] Zhang JP, Qian DH. Antitumor activity and tumor necrosis factor production of Phytolaccaacinos polysaccharides I in mice [J]. Acta Pharm Sin, 1993, 14(6): 542–545.
- [41] 马红樱, 张德禄, 胡春香, 等. 植物活性多糖的研究进展[J]. 西北师范大学学报(自然科学版), 2004, 40(3): 112–117.
- Ma HY, Zhang DL, Hu CX, *et al.* Progress on active polysaccharides from plants [J]. J Northwest Nor Univ (Nat Sci), 2004, (3): 112–117.
- [42] Gollapudi S, Sharma HA, Aggarwal SL, *et al.* Isolation of a previously unidentified polysaccharide (MAR-10) from Hyssop officinalis that exhibits strong activity against human immunodeficiency virus type [J]. Biochem Biophys Res Commun, 1995, 210(1): 145–151.
- [43] 张树和, 韩羿斌, 金双喜, 等. 大豆多糖对双歧杆菌及人肠道菌群生长的影响[J]. 中国微生态学杂志, 2008, 20(2): 135–136.
- Zhang SH, Han YB, Jin SX, *et al.* Impact of soybean polysaccharides on the growth of Bifidobacterium and human intestinal flora [J]. Chin J Microecol, 2008, 20(2): 135–136.
- [44] 张秀娟, 刘斌, 孙宇婷, 等. 大豆多糖对 S180 荷瘤小鼠抗肿瘤作用的免疫机制研究[J]. 食品工业科技, 2012, (2): 389–392.
- Zhang XJ, Liu B, Sun YT, *et al.* Effects of soybean polysaccharide on antitumor and immunological mechanism of mice bearing S180 [J]. Sci Technol Food Ind, 2012, (2): 389–392.
- [45] 何瑞雪. 水溶性大豆多糖铁配合物的制备、性质及结构研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- He RX. Studies on the preparation, properties and structure of soluble soybean polysaccharide iron complexes [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
- [46] 马丽苹, 焦昆鹏, 罗磊, 等. 改性苹果果胶性质及抗氧化活性[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 121–128.
- Ma LP, Jiao KP, Luo L, *et al.* Characterization and antioxidant activity of modified apple pectin [J]. Food Sci, 2017, 38(23): 121–128.
- [47] 金山. 山楂果胶寡糖的分离制备及其抗菌特性的研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2008.
- Jin S. Studies on isolation and antibacterial activity of pectic oligosaccharides from haw pectin [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2008.
- [48] 郭砚, 孙娟, 王丽雯. 藏雪莲多糖对 UVB 辐射 HaCaT 细胞氧化损伤的保护作用[J]. 药物分析杂志, 2015, (6): 1016–1021.
- Guo X, Sun J, Wang LW. Protective effect of saussureatridactyla Sch. -Bip. polysaccharide against oxidative damage caused by UVB radiation on HaCaT cells [J]. Chin J Pharm Anal, 2015, (6): 1016–1021.
- [49] 张燕燕. 改性甘薯果胶抑制癌细胞增殖与转移活性研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Zhang YY. Study of effects of anti-proliferation and anti-metastasis of modified sweet potato pectins on cancer cells [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [50] 杨海军. 功能性食品配料-水溶性膳食纤维[J]. 中国食物与营养, 2003, (9): 29–31.
- Yang HJ. Functional food ingredient-water-soluble dietary fibre [J]. Food Nutr China, 2003, (9): 29–31.
- [51] Nakamura A, Takahashi T, Yoshida R, *et al.* Emulsifying properties of soybean soluble polysaccharide [J]. Food Hydrocolloid, 2004, 18(5): 795–803.
- [52] 云影, 杨居荣, 刘虹. 大豆及其制品的重金属污染[J]. 农业环境科学学报, 2001, 20(1): 1–3.
- Yun Y, Yang JZR, Liu H. Heavy metal pollutants in soybean and soybean products [J]. J Agro-Environ Sci, 2001, 20(1): 1–3.
- [53] Nakamura A, Yoshida R, Maeda H, *et al.* Soy soluble polysaccharide stabilization at oil-water interfaces [J]. Food Hydrocolloid, 2006, 20(2): 277–283.

- [54] 阙丽娇, 胡婕伦, 聂少平. 豆类水溶性多糖研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2015, (5): 1750–1757.
Kan LJ, Hu JL, Ni SP. Advances in soluble polysaccharides from legumes [J]. J Food Saf Qual, 2015, (5): 1750–1757.
- [55] Nakamura A, Maeda H, Corredig M. Influence of heating on oil-in-water emulsions prepared with soybean soluble polysaccharide [J]. J Agric Food Chem, 2007, 55(2): 502–509.
- [56] 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): 8–11.
Bian C, Zhao Q, Ji LY, et al. Function and application of soybean soluble polysaccharides(SSPS) [J]. J Cere Oils, 2015, (4): 8–11.
- [57] 李小林, 何莹. 可溶性大豆多糖在功能性低蛋白饮料中的应用[J]. 现代食品科技, 2010, 26(3): 303–305.
Li XL, He Y. Application of the soybean soluble polysaccharide in low-protein beverage [J]. Mod Food Sci Technol, 2010, 26(3): 303–305.
- [58] Nakamura A, Yoshida R, Maeda H, et al. The stabilizing behaviour of soybean soluble polysaccharide and pectin in acidified milk beverages [J]. Int Dairy J, 2006, 16(4): 361–369.
- [59] 张学兵. 水溶性大豆多糖的提取及其在酸性乳饮料中的应用研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2009.
Zhang XB. Extraction of water-soluble soybean polysaccharides and their application in acidic milk drinks [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2009.
- [60] 马殿君, 张永泰. 水溶性大豆多糖的制备及其在酸性乳饮料中的应用[J]. 饮料工业, 2007, 10(7): 19–21.
Ma DJ, Zhang YT. Preparation of soluble soybean polysaccharide and use of it in acidic milk beverages [J]. Beverage Ind, 2007, 10(7): 19–21.
- [61] 谭静. 水溶性大豆多糖的生产工艺研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2013.
Tan J. Study on Production technology of soluble soybean polysaccharides [D]. Shanghai: East China Normal University, 2013.
- [62] 王伏超. 改性水溶性大豆多糖对鸡蛋涂膜保鲜效果的比较研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
Wang FC. Comparison study on the fresh-keeping effect of modified soluble soybean polysaccharides coating on eggs [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012.
- [63] Fang X, Watanabe Y, Adachi S, et al. Microencapsulation of linoleic acid with low- and high-molecular-weight components of soluble soybean polysaccharide and its oxidation process [J]. Biosci Biotechnol Biochem, 2003, 67(9): 1864–1869.
- [64] 曾瑞琪, 张明政, 张甫生, 等. 高酯果胶对酸化大豆蛋白凝胶流变及质构特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(1): 113–120.
Zeng RQ, Zhang MZ, Zhang PS, et al. Effects of high-ester pectin on rheological and texture properties of acidified soybean protein gel [J]. Food Ferment Ind, 2018, 44(1): 113–120.
- [65] Fu JT, Rao MA. Rheology and structure development during gelation of low-methoxyl pectin gels: the effect of sucrose [J]. Food Hydrocolloid, 2001, 15(1): 93–100.
- [66] 徐伟, 马力. 高甲氧基果胶对酸奶饮料的稳定作用[J]. 中国乳品工业, 2005, 33(8): 38–40.
Xu W, Ma L. Effect of highly methoxylated pectin on stability of yogurt drink [J]. Chin Dairy Ind, 2005, 33(8): 38–40.
- [67] 杨惠. 不同脱酯方法制备低酯果胶及其对大豆蛋白溶液的稳定化作用[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
Yang H. Preparation of low methoxyl pectin de-esterified by different methods and its stabilization effect on soybean protein solution [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [68] Tripathi S, Mehrotra GK, Dutta PK. Preparation and physicochemical evaluation of chitosan/poly(vinyl alcohol)/pectin ternary film for food packaging applications [J]. Carbohydr Polym, 2010, 79(3): 711–716.
- [69] 刘季善. 大豆种皮果胶的提取技术研究[D]. 北京: 石油大学(华东), 2003.
Liu JS. Study on extraction arts of soybean hull pectin [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2003.
- [70] 张燕. 果胶在发酵型酸性乳饮料中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(12): 45–47.
Zhang Y. The application of pectin in yogurt drink [J]. Food Ferment Ind, 2002, 28(12): 45–47.

(责任编辑: 姜 珊)

作者简介

韩 晴, 硕士研究生, 主要研究方向为功能食品与生物活性物质。
E-mail: hanqingcaas@163.com

李 俊, 博士, 研究员, 主要研究方向为植物活性多糖的研究与开发。
E-mail: lijun08@caas.cn