

淮山多糖结构、生物活性 及理化性质研究进展

张锦钰¹, 王 锋^{1,*}, 苏小军^{1,2}, 李清明¹, 郭时印¹, 郭红英¹, 邓朝阳¹, 石柱¹, 唐兰芳¹

(1. 湖南农业大学食品科学与技术学院, 湖南长沙 410128;

2. 湖南省作物种质创新与资源利用重点实验室, 湖南长沙 410128)

摘 要: 淮山多糖是淮山块茎中重要的营养和活性成分, 具有抗氧化、维持肠道稳态、免疫调节、降血糖、保护肝脏等生理功能, 易被机体消化、代谢, 无毒副作用。在一定条件下, 淮山多糖还可表现出良好的乳化性和流变学特性, 展现出广阔的应用前景。本文从结构、功能、理化性质方面对国内外关于淮山多糖的研究进展进行综述, 列举了多种淮山多糖的分子量、单糖组成、糖苷键类型等, 介绍了淮山多糖生物活性的作用机制以及理化性质的影响因素, 并对淮山多糖可开发的产品类型和未来的研究方向进行展望, 以期对淮山多糖的进一步研究与应用提供参考。

关键词: 淮山多糖, 结构, 生物活性, 乳化性, 流变学特性

Research Progress on Structure, Biological Activity and Physicochemical Properties of Yam Polysaccharides

ZHANG Jin-yu¹, WANG Feng^{1,*}, SU Xiao-jun^{1,2}, LI Qing-ming¹, GUO Shi-yin¹,
GUO Hong-ying¹, DENG Chao-yang¹, SHI Zhu¹, TANG Lan-fang¹

(1. College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;

2. Key Laboratory for Crop Germplasm Innovation and Utilization of Hunan Province, Changsha 410128, China)

Abstract: Yam (*Dioscorea opposita* Thunb.) polysaccharide, the major nutrient and bioactive substances in the yam, has various physiological functions including anti-oxidation, maintenance of intestinal homeostasis, immunomodulation, hypoglycemia and liver protection. Yam polysaccharide is easy to be metabolized and has no toxic side effects. Under certain conditions, the polysaccharides can also exhibit better emulsification and rheological properties, showing broad application prospects. In this paper, the structure, function and physicochemical properties of yam polysaccharides are introduced. This review enumerates various yam polysaccharides' the molecular weight, monosaccharide composition, glycosidic bond type, etc. It also introduces the mechanism of biological activity and the influence factors of physical and chemical properties, meanwhile the product development and further investigation directions of yam polysaccharides are prospected. This paper might provide some references for the further research and application of yam polysaccharides in the future.

Key words: yam polysaccharide; structure; biological activity; emulsification properties; rheological properties

中图分类号: TS255.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2019)12-0364-05

doi:10.13386/j.issn1002-0306.2019.12.059

引文格式: 张锦钰, 王锋, 苏小军, 等. 淮山多糖结构、生物活性及理化性质研究进展[J]. 食品工业科技, 2019, 40(12): 364-368.

淮山 (*Dioscorea opposita* Thunb.), 又称山药、怀山药、薯蓣等, 是一年或多年生的缠绕草质藤本植物的块根^[1]。淮山具有治疗脾虚食少、久泻不止、肺虚喘咳、肾虚遗精、带下、尿频及虚热消渴等疾病的功能^[2], 已被列入国家卫健委《既是食品又是药品的物品名单》, 是药、菜、粮兼用作物。据估计, 全国淮山种植面积已达 20 万 hm² 以上, 产量一般能达到 11 ~

30 t/hm^{2[3]}, 折算成粮食为 2.02~6 t/hm², 与国家统计局公布的 2017 年我国薯类 (马铃薯和甘薯) 单位面积产量 (3825 Kg/hm²) 相当^[4]。

淮山含有丰富的人体所需的营养成分, 如淀粉、多糖、尿囊素、胆碱、皂苷、矿物质等^[5], 其中, 多糖被认为是其主要的活性物质, 含量达到 0.5%~10.0% (DW)^[6-7]。生物活性多糖大多具有较强的药理作

收稿日期: 2018-10-09

作者简介: 张锦钰 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 植物源性食品保鲜与加工, E-mail: zhangjin4127@163.com。

* 通讯作者: 王锋 (1978-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 果品蔬菜保鲜与加工, E-mail: wangfeng@hunau.edu.cn。

基金项目: 湖南省科技计划项目 (2016NK2113)。

用,如抗肿瘤、降血糖、抗炎、增强免疫力等,是保健品和药品开发的重要原料^[8]。多糖还具有胶凝、乳化等特性,作为增稠剂、乳化剂、悬浮剂、胶凝剂、持水剂在食品工业、化妆品等领域被广泛应用^[9],如阿拉伯胶、瓜尔豆胶、黄原胶、果胶等均是常用食品添加剂^[10-13]。大量研究表明,淮山多糖不仅具有抗氧化、维持肠道稳态、免疫调节、降血糖、保护肝脏等生理功能,还有独特的乳化性和流变学特性,应用前景十分广阔^[14-15]。本文拟归纳和综述国内外关于淮山多糖基本结构、药理活性、理化性质的研究进展,以期对淮山多糖的进一步研究、开发和应用提供思路。

1 淮山多糖的结构

多糖是由10个或10个以上单糖基通过糖苷键连接而成的直链或支链的聚糖。自然界单糖种类有200多种,在聚合成多糖时,它们可以通过多种不同的结合位点连接,这些造成了多糖结构的多样性和复杂性。多糖具有明确的三维空间结构,可以分为一级、二级、三级和四级结构。

解析多糖结构,需要明确多糖的单糖组成和各种单糖的连接方式、确定多糖有无支链及分支位置。高效凝胶渗透色谱法、薄层层析法、HPLC、GC-MS等常用于测定多糖一级结构,而IR、NMR、高碘酸氧化法和Smith降解法等用于检测多糖的二级结构。淮山多糖包括均多糖、杂多糖和糖蛋白,均多糖主要由葡萄糖构成,杂多糖包括葡萄糖、半乳糖、甘露糖、鼠李糖等单糖,糖蛋白中含有天冬氨酸、苏氨酸、丝氨酸等19种氨基酸^[15],分子量分布从几千到几千万不等。许多淮山多糖都含有一个吡喃环,呈 α -构型或 β -构型,但糖苷键类型及连接方式多样,主链和侧链各异,而且,多糖结构的不同导致其生物活性各有侧重,体现了多糖结构与功能的紧密联系。利用透射电镜观察各种淮山多糖表面形态,可发现不同品种来源的淮山多糖差异很大,有分支、直棒、不规则、网络或球形结构,表面呈粗糙或光滑等形态^[16]。淮山多糖结构的多样性主要与淮山的品种繁多有关,而且提取工艺、制备过程、测定方法等也会对多糖的结构造成一定的影响^[17-19]。淮山多糖的基本结构,包括单糖组成、分子量、化学结构详见表1。

2 淮山多糖的生物活性及作用机制

2.1 抗氧化

过量的自由基积累会损害人体的细胞、组织、甚至器官,引起炎症、肿瘤等疾病。体外研究证实,淮山多糖具有清除超氧阴离子自由基、ABTS自由基、羟自由基、抑制脂质过氧化反应的能力^[20],表现出良好的抗氧化性。同时,多糖也可通过提高体内抗氧化酶的活性,减缓细胞衰老。钟灵等^[21]用高、中、低浓度的淮山多糖对老年性痴呆小鼠进行灌胃处理,测定小鼠血清中SOD和CAT活性、脑系数以及脑组织中MDA的含量,发现各剂量组淮山多糖均可以提高机体的抗氧化能力。

淮山多糖的抗氧化性与其一级结构密切相关。Zhao等发现分子量低且醛基含量高的多糖,能表现出较强的抗氧化能力^[19],不过也有研究者认为,多

糖的分子量越高越有利于生物活性的维持,因为高分子量有利于空间结构的稳定^[22]。虽然多糖分子量和分子结构中糖醛基含量对其抗氧化能力的具体影响大小及作用机制目前尚不清楚,但均证明了两者可影响多糖的生物活性。

2.2 免疫调节

免疫是人体破坏和清除机体异物,维持健康的一种生理功能,包括非特异性免疫和特异性免疫。淮山多糖作为一种植物活性多糖,可通过调节细胞因子、淋巴细胞和抗体水平来实现对机体免疫功能的调节作用^[23]。许效群等^[24]用低、中、高浓度的淮山多糖灌胃小鼠3周,小鼠的粒廓清指数和吞噬指数相比对照组显著升高;谭春爱^[25]用淮山多糖喂食黄鸡,结果发现淮山多糖组的IgA、IgM、IgG的含量明显高于对照组。淮山多糖的免疫调节作用可能与多糖主链中具有活性的 β -(1 $\rightarrow$ 3)糖苷键有关^[26]。

2.3 维持肠道稳态

病原菌能够识别动物肠壁细胞上的“特异性糖类”受体,一旦侵入机体消化道,便与之结合,破坏肠道菌群的平衡从而导致肠道疾病的发生。而多糖能够吸附病原菌,抑制病原菌在肠壁上的滋生,改善肠道菌群多样性^[27]。同时,淮山多糖也能够促进双歧杆菌和乳酸杆菌的生长、抑制肠杆菌和肠球菌的增殖。高启禹等^[28]研究了不同浓度的淮山多糖对小鼠盲结肠菌群的影响,发现淮山多糖组的肠杆菌与肠球菌的生长受到明显的抑制,而双歧杆菌与乳酸杆菌相比对照组,菌群数量在盲结肠内的增殖有明显的统计学意义。

2.4 保护肝脏

肝脏是人体内以代谢功能为主的器官,担负着机体重要的生命活动,具有生物转化、解毒等重要功能。用淮山多糖处理由CCl₄致急性肝损伤的大鼠或小鼠,结果发现多糖可在一定程度上修复受损肝细胞、提高T-SOD和GSH含量、降低转氨酶活力、抑制脂质过氧化反应,对肝脏能起到较好的保护作用^[29-30]。淮山多糖还可与金属离子结合作用,其效果比单组分有所提高。孙设宗等^[31]研究探讨了镁离子和淮山多糖对CCl₄肝损伤的保护作用,发现淮山多糖和镁离子结合作用可以更有效地降低肝脏中MDA和NO的含量,降低肝脏指数,提高谷胱甘肽的含量从而起到保护肝脏的作用。

2.5 降血糖

糖尿病是一种慢性、多发病,死亡率仅次于肿瘤和心血管疾病,其发病机理还不完全清楚,主要表现为胰岛 β 细胞受损从而导致胰岛素分泌减少或胰岛素缺乏。已有研究表明,淮山多糖既能够在一定程度上修复受损的胰岛细胞,又能促进肝糖元和心肌糖元的合成,抑制 α -淀粉酶或 α -葡萄糖苷酶的活性,阻止葡萄糖生成,从而降低机体内的血糖浓度^[32-35]。淮山多糖也可能通过提高糖代谢过程中己糖激酶、琥珀酸脱氢酶和苹果酸脱氢酶的活性,增强糖代谢能力^[36],促进血糖的利用。此外,贺凯等通过研究淮山多糖的降糖作用,发现淮山多糖还能够清

表1 淮山多糖的单糖组成、分子量、化学结构及生物活性

Table 1 Monosaccharide composition, molecular weight, chemical structure and biological activity of yam polysaccharides

序号	组分名称	单糖组成	分子量(Da)	化学结构	生物活性	文献
1	S ₁	葡萄糖	6300	[α -D-Glc(1 $\rightarrow$ 4)-] _n 型葡聚糖	-	[53]
2	S ₂	葡萄糖	7400	[α -D-Glc(1 $\rightarrow$ 4)-] _n 型葡聚糖	-	
3	中性多糖	鼠李糖、木糖、甘露糖、半乳糖;摩尔比为:8:16:25:10	15598	含有吡喃糖	-	[54]
4	酸性多糖	鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、甘露糖、半乳糖;摩尔比为:7:3:11:19:18	21500	具有 α -糖苷键构型	-	
5	YPa	阿拉伯糖、甘露糖、葡萄糖	31796.97或42931	-	降血糖; 抗氧化	[17]
6	YPc	木糖、葡萄糖、半乳糖、果糖、少量鼠李糖、阿拉伯糖及甘露糖	48762.05或52979	-		
7	RDPS-I	葡萄糖、甘露糖、半乳糖;摩尔比为:1:0.37:0.11	42000	以 α -D-(1 $\rightarrow$ 3)-Glc _p 为主链,在6-O位有 α -D-(1 $\rightarrow$ 2)-Man _p - β -D-(1)-Gal _p 支链;旋光度为: +188.4°;特性粘度 $[\eta]=16.48\times10^{-3}$ (mL/g)	抗肿瘤; 免疫调节	[55]
8	中性多糖	葡萄糖、甘露糖;摩尔比为:0.56:0.44	-	以 α 型差向异构体为主,组成单糖以吡喃糖形式存在;旋光度为: +162.5°	抗氧化	[56]
9	酸性多糖1	葡萄糖、半乳糖、甘露糖;摩尔比为:0.54:0.02:0.44	-	β 构型;旋光度为: +48°		[57]
10	酸性多糖2	阿拉伯糖、木糖、葡萄糖、甘露糖;摩尔比为:0.07:0.22:0.7:0.01	-	α 型差向异构;旋光度为:-128°		
11	YP ₁	阿拉伯糖、葡萄糖、半乳糖;摩尔比为:1:20.3:5.4	-	主链由葡萄糖以 β -(1 $\rightarrow$ 2)和(β -1 $\rightarrow$ 4)糖苷键相连,半乳糖与阿拉伯糖以 β -(1 $\rightarrow$ 2)或 α -(1 $\rightarrow$ 2)键相连或形成侧链	降血糖	[58]
12	YP ₂	阿拉伯糖、葡萄糖、半乳糖;摩尔比为:1:8.4:1.8	-	-	-	
13	YPa-I	阿拉伯糖、果糖、葡萄糖	65086	-	-	[59]
14	YPa-II	果糖、甘露糖、葡萄糖	20982	-	-	
15	YPa-III	木糖、半乳糖、葡萄糖	34780	-	-	
16	CYPN-I	葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖;摩尔比为:1:1.04:0.22	7907	α -吡喃糖型	维持肠道 稳态	[21]
17	CYPN-II	甘露糖、鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、阿拉伯糖;摩尔比为:1:1.02:1.96:1.98:1.87:1.53	54200	β -吡喃糖型		
18	CYPA-I	鼠李糖、半乳糖醛酸、半乳糖、木糖;摩尔比为:1:1.05:2.57:0.68	60256	β -吡喃糖型		
19	CYPA-II	鼠李糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖;摩尔比为:1:1.22:4.27:1.92:1.10	76913	α -吡喃糖型		
20	CYPA-III	甘露糖、鼠李糖、半乳糖醛酸;摩尔比为:1:2.06:3.55	47753	β -吡喃糖型		
21	CYP	葡萄糖、半乳糖;摩尔比为:1.52:1	16619	存在 β -1,3-葡萄糖、 α -1-半乳糖和 α -1,6-半乳糖	抗氧化; 抑菌	[60]
22	YPn	甘露糖、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖;摩尔比为:1:22.94:0.47:0.38	8850	有 α -构型的吡喃糖环(甘露糖),含有 β -吡喃糖基	抗氧化	[61]
23	蕲山药多糖	木糖、鼠李糖、甘露糖、阿拉伯糖		存在 α -糖苷键	-	[62]
24	HSY-I	葡萄糖醛酸、半乳糖;摩尔比为:1.86:15.19	1.017×10^8	1 $\rightarrow$ 4糖苷键	降血糖	[63]
25	HSY-II	葡萄糖醛酸、鼠李糖、阿拉伯糖、葡萄糖、半乳糖;摩尔比为:0.81:2.35:1.24:66.79:28.81	2.346×10^7	葡萄糖和半乳糖构成主要骨架,部分半乳糖经1 $\rightarrow$ 3类糖苷键键合,葡萄糖醛酸、鼠李糖、阿拉伯糖以第I类中的1 $\rightarrow$ 2、1 $\rightarrow$ 4和第II类糖苷键键合	-	
26	HSY-III	甘露糖、葡萄糖、半乳糖;摩尔比为:13.20:12.79:74.0	1.340×10^6	半乳糖构成主要骨架,部分甘露糖以1 $\rightarrow$ 3类糖苷键键合,葡萄糖和另一部分甘露糖以第I类中的1 $\rightarrow$ 2、1 $\rightarrow$ 4和第II类糖苷键键合	-	
27	UAE	鼠李糖、半乳糖、木糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸;摩尔比为:66.87:10.52:3.66:2.77:15.92	40300	-	抗氧化、 降血糖	[19]
28	CWE	鼠李糖、半乳糖、木糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸;摩尔比为:48.38:8.71:6.46:3.08:32.15	36500	-	抗氧化、 降血糖	
29	WWE	鼠李糖、葡萄糖、半乳糖、木糖、半乳糖醛酸;摩尔比为:79.09:0.46:15.71:0.25:4.21	48700或 1.076×10^6	-	抗氧化	
30	HWE	鼠李糖、半乳糖、木糖、半乳糖醛酸;摩尔比为:81.18:15.10:0.22:2.99	12000或 1.004×10^6	-	抗氧化	

除部分自由基,这可能有利于延缓糖尿病的并发症^[37]。

3 淮山多糖的理化性质

许多天然多糖由于具有良好的乳化性和流变学

特性,在食品加工、医药、化妆品等领域获得了广泛应用^[14,38]。多糖除了能够赋予产品独特的保健功效外,还能改善产品的品质,如将灵芝多糖、枸杞多糖、银耳多糖等作为增稠剂、稳定剂、悬浮剂应用于功能

性饮料的生产,可起到增稠、稳定和提升口感的作用^[39];在面制品中添加海藻酸钠^[40]、海藻酸钙^[41]、魔芋多糖^[42]等面制品改良剂,能够改善传统面制品易断条、混汤等缺点,增加面制品的持水性,促进面筋结构的形成;将胖大海胶^[43]、魔芋胶^[44]等加入到肉制品中,可以增强肉制品的保水性、乳化性,提高肉制品质量;天然多糖也是新型多功能化妆品研发的重要原料,它能强化化妆品的吸湿保水作用,同时达到抑菌、抗衰老、改善微循环等功效。研究淮山多糖的乳化性和流变学特性,将有利于促进淮山多糖的应用与产品开发。

3.1 淮山多糖的乳化性

关于多糖具有乳化性的原因有两种解释,一种认为多糖本身就具有亲水亲油基团;另一种则认为,多糖的乳化性与其所键合的蛋白类物质有关^[45-46]。研究表明,在一定条件下,淮山多糖能够表现出优于阿拉伯胶的乳化性,可作为潜在的天然乳化剂用于产品的稳定、保湿、保型^[17]。淮山多糖的乳化性能与其分子量和浓度密切相关,在溶液中,低分子量和低浓度多糖的移动速度一般高于高分子量和高浓度多糖,能够去更快的到达油水界面,增强乳状液的稳定性^[47]。同时,温度、pH 和金属离子可通过影响多糖或蛋白质的溶解度,削弱或强化油水界面的保护膜,从而影响多糖的乳化能力^[48]。

3.2 淮山多糖的流变学特性

掌握淮山多糖的流变学特性,可以预测其凝胶性和增稠特性,对于多糖类产品的设计和开发、质量控制、感官评价、保质期估算具有重要意义^[49]。研究显示,淮山多糖具有剪切稀释性,即随着剪切速率的升高,多糖黏度下降^[16]。因此,将淮山多糖用于糖果点心、面包、饮料等食品的加工,既能增强产品的营养保健功效,又能赋予产品独特的口感。淮山多糖的流变性能取决于多糖的组成、结构和与其他物质的相互作用。多糖浓度、温度、pH 和淀粉、蛋白质等杂质可以通过改变糖链间的相互作用影响多糖的粘度、热稳定性和抗极性环境的能力,从而影响多糖的流变学特性^[50-51]。金属离子、氧化剂和抗氧化剂也有可能通过改变多糖的结构影响多糖的流变性能^[52],所以,在具体的应用中要对生产条件严加控制。

4 展望

多糖的结构、功能及其作用机制是糖生物学的核心研究内容之一,其理论和研究方法的进步将带动生物医药、功能性食品等产业的发展,以医药和保健品为例,在全球现已开发的多糖药物和保健品中,多糖类产品每年产生的价值近千亿元^[64]。目前,淮山多糖的抗氧化、增强免疫力、降血糖等功能活性已经得到证实,对其作用机制的研究也逐步深入。为拓展淮山多糖的新功能及明确淮山多糖药物定量使用原则,仍需进行大量药理和毒理学试验,并加强对淮山多糖空间结构、构效关系和量效关系的研究。同时,为开拓淮山多糖在食品、化妆品等领域的用途,必须深入研究淮山多糖作为增稠剂、凝胶剂、乳

化剂等与蛋白质的作用机制,促进其在酸奶、浓缩果汁、复合果酒、蛋糕、冰淇淋等加工中的应用。由于不同品种的淮山多糖含量差异明显,因此可考虑选育高产淮山多糖新品种以及研究高效栽培方式,为淮山多糖开发提供优质原料,并大幅降低多糖的生产成本,提高经济效益。

参考文献

- [1] 裴鉴,等.中国植物志(第16卷,第1分册)[M].北京:科学出版社,1985.
- [2] 国家药典委员会.中华人民共和国药典一部[M].北京:化学工业出版社,2010:27.
- [3] 韦本辉.我国淮山药产业发展现状及对策[J].现代农业科技,2012(3):352-354.
- [4] 中华人民共和国国家统计局.中国统计年鉴[M].北京:中国统计出版社,2013.
- [5] 宋永刚,胡晓波,王震雷.山药的活性成分研究概况[J].江西食品工业,2007(4):45-48.
- [6] 丁玲,王东,张中林,等.不同商品地山药多糖含量的分析[J].辽宁中医药大学学报,2009,11(4):187-188.
- [7] 华树妹,陈芝华,贺佩珍,等.福建山药种质资源多糖含量评价[J].三明农业科技,2016,29(1):651-656.
- [8] 张志勇.植物活性多糖的药理作用及应用研究进展[J].华西医学,2009(1):250-252.
- [9] 王恒禹,刘玥,姜猛,等.多糖在食品工业中的应用现状[J].食品科学,2013,34(21):431-438.
- [10] Ma F, Bell A E, Davis F J, et al. Effects of high hydrostatic pressure and chemical reduction on the emulsification properties of gum arabic[J]. Food Chemistry, 2015, 173:569-576.
- [11] 黄洁,安秋凤.瓜尔豆胶研究进展[J].食品研究与开发,2011,32(1):144-147.
- [12] 刘秀敏,陈利梅,李德茂.黄原胶流变学特性的研究[J].中国酿造,2011,30(3):115-118.
- [13] 王勇,王春晓,相光明,等.果胶的胶凝性质及应用[J].中国果菜,2017,37(8):13-15.
- [14] Cho H M, Yoo B. Rheological characteristics of cold thickened beverages containing xanthan gum - based food thickeners used for dysphagia diets[J]. Journal of the Academy of Nutrition & Dietetics, 2015, 115(1):106-111.
- [15] Ma F, Zhang Y, Wen Y, et al. Emulsification properties of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb [J]. Food Chemistry, 2017, 221:919-925.
- [16] Ma F, Bell A, Kannan B, et al. Rheological properties of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb [J]. Food Chemistry, 2017, 221:919-925.
- [17] 王震雷.山药多糖的提取、分离、功能性及其功能食品工艺研究[D].南昌:南昌大学,2005:46-47.
- [18] 张海燕.山药多糖提取、结构鉴定及对肠道菌群影响的初步研究[D].佳木斯:佳木斯大学,2014:41-62.
- [19] Zhao C, Li X, Miao J, et al. The effect of different extraction techniques on property and bioactivity of polysaccharides from *Dioscorea hemsleyi* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 102:847-856.
- [20] Liu N, Zhang L, Zhang K, et al. Primary characterization and in vitro antioxidant activities of polysaccharides from yam peel

- [M] Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2015: 567-578.
- [21] 钟灵, 王振富. 山药多糖对老年性痴呆小鼠抗氧化能力的影响[J]. 中国应用生理学杂志, 2015, 31(1): 42-43.
- [22] Ji X, Qiang P, Yuan Y, et al. Isolation, structures and bioactivities of the polysaccharides from jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.): A review[J]. Food Chemistry, 2017, 227: 349-357.
- [23] Li J, Zhong Y, Li H, et al. Enhancement of *Astragalus* polysaccharide on the immune responses in pigs inoculated with foot-and-mouth disease virus vaccine[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 49(3): 362.
- [24] 许效群, 刘志芳, 霍乃蕊, 等. 山药多糖的体外抗氧化活性及对正常小鼠的免疫增强作用[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(7): 42-46.
- [25] 谭春爱. 山药多糖对1-21日龄宁都黄鸡生长及免疫性能的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2014: 55-56.
- [26] Wasser S P. Medicinal mushrooms as a source of antitumor and immunomodulating polysaccharides[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2002, 60(3): 258-274.
- [27] Kong X F, Zhang Y Z, Wu X. Fermentation characterization of chinese yam polysaccharide and its effects on the gut microbiota of rats[J]. International Journal of Microbiology, 2009, 2009(1687-918X): 598152.
- [28] 高启禹, 赵英政, 张凌波, 等. 山药多糖对昆明种小鼠生长性能及肠道菌群的影响[J]. 中国老年学杂志, 2015, 35(20): 5685-5687.
- [29] 王丹. 山药多糖脂质体的制备及抗肝损伤作用研究[D]. 佳木斯: 佳木斯大学, 2016: 45-49.
- [30] 滕杨, 谷娜, 罗时旋, 等. 山药甾多糖对CCl₄诱导小鼠急性肝损伤的保护作用[J]. 食品工业科技, 2015, 36(15): 362-364.
- [31] 孙设宗, 赵杰, 官守涛, 等. 山药多糖对CCl₄肝损伤小鼠自由基、TNF- α 含量的影响[J]. 山西医科大学学报, 2011, 42(6): 452-454.
- [32] 朱明磊, 唐微, 官守涛. 山药多糖对糖尿病小鼠降血糖作用的实验研究[J]. 现代预防医学, 2010, 37(8): 1524-1527.
- [33] 舒思洁, 胡宗礼, 洪爱蓉, 等. 山药对糖尿病小鼠组织丙二醛含量的影响[J]. 咸宁医学院学报, 1999, 13(3): 156-158.
- [34] 李培. 山药多糖对 α -葡萄糖苷酶抑制作用动力学研究[J]. 食品与机械, 2016(7): 14-17.
- [35] 黄绍华, 胡晓波, 王震宙. 山药多糖对 α -淀粉酶活力的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2006, 27(9): 94-95.
- [36] 杨宏莉, 张宏馨, 李兰会, 等. 山药多糖对2型糖尿病大鼠降糖机理的研究[J]. 河北农业大学学报, 2010, 33(3): 100-103.
- [37] 贺凯, 杨勇, 李学刚. 糖尿病的抗氧化治疗及问题[J]. 广东医学, 2013, 34(4): 640-643.
- [38] Danalache F, Mata P, Moldão-Martins M, et al. Novel mango bars using gellan gum as gelling agent: Rheological and microstructural studies[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 62(1): 576-583.
- [39] 韩璠, 吴正钧, 高彩霞, 等. 功能性多糖饮料的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2015(8): 115-119.
- [40] 海藻酸钠-卓越的面制品改良剂[J]. 食品工业科技, 2013(17): 30.
- [41] 刘海燕. 面制品改良剂的新选择—海藻酸钙[J]. 食品工业科技, 2016, 37(15): 28.
- [42] 何鑫磊. 魔芋多糖/生物大分子复合物对面粉改良作用的研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2010: 44-48.
- [43] 皮鹤珍. 胖大海胶物性及其在肉制品中的应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013: 74.
- [44] 黄明发, 鲁兴容, 刁兵, 等. 魔芋胶的功能特性及其在肉制品中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2012(1): 186-190.
- [45] 李雅娴, 刘成龙, 陈复生. 天然多糖乳化性质及应用研究进展[C]// 北京: 中国食品科学技术学会年会, 2016.
- [46] Chikamai B N, Banks W B, Anderson D M W, et al. Processing gum arabica and some new opportunities[J]. Food Hydrocolloids, 1996, 10(3): 309-316.
- [47] 刘楠华. 怀山药多糖铁补血活性及怀山药多糖乳化和流变性研究[D]. 开封: 河南大学, 2016: 4.
- [48] 李飞, 任清, 李超. 苦荞多糖提取工艺优化及其对橄榄油乳化性的研究[J]. 食品科技, 2016(1): 147-153.
- [49] Shaker R R. Rheological behavior of concentrated yogurt (Labneh) [J]. International Journal of Food Properties, 2000, 3(2): 207-216.
- [50] Ma F, Bell A E, Davis F J, et al. Effects of high hydrostatic pressure and chemical reduction on the emulsification properties of gum arabic[J]. Food Chemistry, 2015, 173: 569-546.
- [51] Phillips G O, Williams P A. Handbook of hydrocolloids[M]. CRC Press, 2000.
- [52] 高春燕, 卢跃红, 田呈瑞. 枸杞多糖流变学特性研究[J]. 食品科学, 2009, 30(21): 28-31.
- [53] 乔善义, 王立岩, 赵毅民, 等. 山药多糖的提取分离和结构测定[J]. 中国天然药物, 2003, 1(3): 155-157.
- [54] 吴丹. 山药多糖提取工艺优化及结构分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004: 42-52.
- [55] Zhuo G, Kan J, Li Z, et al. Structural features and immunological activity of a polysaccharide from *Dioscorea opposita* Thunb roots[J]. Carbohydrate Polymers, 2005, 61(2): 125-131.
- [56] 顾林, 姜军, 孙婧. 山药多糖的分离纯化及其结构鉴定[J]. 食品科技, 2007(5): 109-112.
- [57] 姜军. 山药多糖的分离纯化及其化学结构的初步研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2007: 48-58.
- [58] 周燕平. 山药多糖的提取分离与结构初步解析[D]. 无锡: 江南大学, 2011: 21-25.
- [59] 陈运中, 廖晓铃, 陈莹艳. 佛手山药多糖的分离纯化及组分结构分析[J]. 湖北中医药大学学报, 2013, 15(4): 33-37.
- [60] Yang W, Wang Y, Li X, et al. Purification and structural characterization of Chinese yam polysaccharide and its activities[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117(5): 1021.
- [61] 陈俊彰. 佛手山药中性多糖的结构分析及体外抗氧化活性研究[D]. 武汉: 湖北中医药大学, 2015: 27-31.
- [62] 刘远河. 红外光谱法在蕲山药多糖分析中的应用(英文)[J]. Agricultural Science & Technology, 2016, 17(8): 1941-1943, 1951.
- [63] 李倩. 怀山药糖类物质和有效成分的分离纯化结构鉴定及活性评价[D]. 广州: 华南理工大学, 2016: 113-124.
- [64] 丁侃. 中药多糖结构与功能及其机制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.