

天然多糖提取纯化及生理功能活性研究进展

徐 涵, 刘 云, 阚 欢*

(西南林业大学生命科学学院, 昆明 650224)

摘 要: 多糖是在自然界中广泛分布的糖类大分子物质, 具有多种生理功能和生物活性, 是维持生命活动四大基本物质之一。多糖不仅在食品开发领域备受关注, 在医药保健领域也具有广阔发展空间, 因而受到越来越多的研究者青睐。然而, 多糖的提取纯化困难, 对其生物活性作用机制也缺乏深入的了解, 限制了多糖的应用范围。本文总结了近年来多糖的提取纯化研究并分析了各方法优缺点, 同时总结了多糖生理活性研究及作用机制, 分析了目前存在的问题, 对多糖未来发展趋势进行展望, 以期为深入研究其作用机制并为开发食品、保健品或药品提供参考, 逐步构建并完善生产体系, 促进多糖产品工艺和功能应用的发展。

关键词: 多糖; 提取; 纯化; 生物活性

Research progress on extraction, purification and physiological activity of natural polysaccharides

XU Han, LIU Yun, KAN Huan*

(School of Life Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

ABSTRACT: Polysaccharides are carbohydrate macromolecular substances distribute in the nature widely, with varieties of physiological functions and biological activities, which are one of 4 basic substances for maintaining life activities. Polysaccharides have not only attracted much attention in the realm of food development, but also owned broad space for the development of medicine and health care, which have drawn researchers' close attention. However, the extraction and purification of polysaccharides are difficult, and the in-depth understanding of their biological activity mechanism is also lacking, which limits the application scope of polysaccharides. This article summarized the research on the extraction and purification of polysaccharides in recent years, also analyzed the advantages and disadvantages of each method, simultaneously, summarized the physiological activity research and mechanism of polysaccharides, then analyzed the cases in current, and prospected the development trend of polysaccharides for the future. It is expected to provide important reference for the in-depth study of its mechanism and the development of food, health products or drugs, gradually build and improve the production system, and promote the development of polysaccharide product technology and functional application.

KEY WORDS: polysaccharides; extraction; purification; biological activity

基金项目: 云南省教育厅科学研究基金项目(2020Y0407)

Fund: Supported by the Scientific Research Project of Education Department of Yunnan Province (2020Y0407)

*通信作者: 阚欢, 硕士, 教授, 主要研究方向为农林食品研究与开发。E-mail: 13700650213@163.com

*Corresponding author: KAN Huan, Master, Professor, School of Life Science, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China. E-mail: 13700650213@163.com

0 引言

多糖(polysaccharide)也称为多聚糖,是由10个以上的单糖通过 α -或者 β -糖苷键结合而成的高分子碳水化合物,存在于动植物、微生物和真菌之中,与蛋白质、核苷酸类似,是生物活动中必不可少的大分子。多糖不是单一化合物,而是聚合程度不同的物质组成的混合物,其中由相同单糖结合而成的称为均多糖,不同单糖结合而成的称为杂多糖^[1]。多糖作为生物体组成成分,对生物体的新陈代谢起着重要作用。研究表明,多糖在抗肿瘤、抗氧化、降血压血糖与肠道调节方面具有积极作用^[2-4],不同的提取方法使多糖得率和生物活性有所不同,但提取的粗多糖含有蛋白质、色素等杂质为多糖的生物活性研究带来干扰,因此多糖的提取纯化研究便居于首要位置。多糖作为一种天然物质因其功能性备受研究者关注,本文综述了多糖提取纯化及抗肿瘤、抗氧化、降血压、降血糖和肠道调节等方面的研究进展,旨在为多糖的研究开发利用提供参考。

1 多糖的提取方法

多糖在自然界中分布广泛,但生物体内活性多糖含量并不高,高效的提取法对于多糖研究尤为重要。提取方法主要有水提法、酸碱提法、酶提法、微波提取法、超声波提取法等。在提取多糖时会根据试验材料及多糖的性质采用不同的提取方法,主要区别在于提取剂与辅助仪器的不同。提取过程中不同的提取方法对多糖的结构及生理活性会有影响,随着科学技术的发展,对比不同方法提取的效果也是今后多糖研究的重点。

1.1 水提法

传统的水提醇沉法是以水为溶剂溶解单糖和低聚糖等,利用多糖不溶于高浓度乙醇的性质,在提取液中加入不同浓度的乙醇,分级沉降得到多糖提取液,且水是极性分子利于多糖溶解,不易破坏多糖结构影响其活性。水提法是提取多糖应用最为广泛的一种方法,操作简单、适用性强。林建翠等^[5]通过响应面法试验得出,对蛇六谷多糖提取影响程度的因素从大到小分别为提取温度、料液比和提取时间;在83℃温度下、料液比1:16(g/mL)、提取时间1.6h、提取两次的条件下蛇六谷多糖提取率最高达23.56%。WANG等^[6]对比了水提法、超声辅助热提取和微波辅助热提取3种方法提取出的绞股蓝多糖生理活性,发现水提法得到的多糖抗氧化活性最高,且还能通过提高细胞内抗氧化酶水平,降低氧化产物含量,较好地螯合 Fe^{2+} ,对氧化损伤具有保护作用,同时水提多糖提高单核巨噬细胞吞噬能力效果最佳,但其提取率为三者最低仅为15.34%。水提法设备要求低,没有后续试剂回收的问题,适合工业化大规模生产,但其提取效率低、耗时较多、消耗乙醇溶剂也较多。

1.2 酶解提取法

酶法提取是对细胞壁进行水解,破坏细胞壁从而释放出多糖,常用的酶如果胶酶、纤维素酶、 α -淀粉酶和蛋白酶等,使用酶提取时常采用加入不同酶复合配比的方式以提高提取效率,同时应考虑酶之间的协同关系。丁霄霄等^[7]利用复合酶提取灵芝多糖,结果表明复合酶提取效果优于单酶提取,最佳复合酶用量配比为纤维素酶3.5%、半纤维素酶4.0%和木瓜蛋白酶3.0%,在温度50℃、pH5.7的条件下提取81min可得到最高提取率。LI等^[8]对比热水提取、酶辅助提取、超声波提取和超声波酶辅助提取4种亚侧耳多糖,结果表明超声波辅助酶提取法多糖提取率最高,其次是酶提取法。酶解法反应条件温和、耗能低、反应速度快,提取效率和可重复性高,能分解植物组织的同时而又不对内容物造成影响。但酶价格较高,且容易受外界影响而失活。要使酶解法达到最高提取率,温度、pH、时间、底物浓度等因素需要配合紧密,控制难度较大,因此在酶保存和反应过程中,外界因素需要严格控制^[9]。

1.3 酸碱提取法

酸碱提取法是根据目标多糖的酸碱性质进行提取,具有良好的提取效果。使用稀酸和稀碱浸泡试验材料,破坏材料的细胞壁组织结构,改变细胞通透性从而释放出多糖。裸藻多糖是碱溶性多糖,栗晓庆等^[10]在50℃温度下,用浓度0.6mol/L的NaOH提取裸藻多糖3h,提取率达到42.35%。任秋慧等^[11]用酸法提取苹果渣中的果胶,最佳工艺是在100℃温度下,pH为1.5,料液比1:14(g/mL)条件下提取2h,粗果胶得率达33.12%。王艺涵等^[12]等通过对比酸、碱、酶3种方法提取银耳多糖,发现酸提对细胞壁破坏最大,多糖得率最高,而碱提法得到的多糖含水量低,可能是多糖结构遭到破坏持水力降低。该提取法酸碱调节难度大,且易使多糖糖苷键和结构被破坏,其腐蚀性也带来一系列安全问题,对于工厂还面临酸碱中和、污水排放的问题,因此并不适用于大规模生产。

1.4 超临界提取法

超临界萃取法以溶解性高、扩散性强的超临界流体为溶剂,根据分子极性、分子质量、沸点高低进行不同成分的分离,与其他提取技术相比,超临界可用于分离热不稳定物质,易穿透提取物,溶剂使用极少,处理时间较短且有较高的提取选择性^[13]。 CO_2 因超临界条件较易达到,常作为超临界萃取剂用于提取非极性或低极性化合物的提取溶剂。用超临界 CO_2 萃取苦丁茶多糖,在50℃温度,萃取压力40MPa,夹带剂流量3.5mL/min的条件下萃取150min可达到最优提取工艺,提取率为7.05%^[14]。常用的二氧化碳萃取剂,临界点较低具有惰性保护作用,还可以加入助溶剂来调节 CO_2 极性^[15],且安全无毒、成本低、减压即可回

收、无残留问题,但提取条件要求高压环境、设备投资复杂成本较高^[16]。

1.5 超声波辅助提取法

超声波是频率高于 20 kHz、波长较短的高能量机械波,能引起周围介质的振动而传递能量。超声波提取法是利用高频振荡、机械剪切效应及空化效应等多种物理机制共同发挥作用,使细胞壁破碎释放多糖或使提取剂快速渗透到细胞中加快物质传递,从而提高多糖成分溶出速度,在减少提取剂的同时提高提取效率。WANG 等^[17]发现在超声功率为 550 W、提取温度为 50 °C、提取时间为 26 min 的条件下,玄参多糖得率可达 13.47%±1.63%,与传统热水提取法提取率 11.5%相比,超声波提取法显著降低了提取温度和时间,提高了提取率。超声波辅助提取对于温度要求不高,但使用超声提取时应注意提取时间,否则超声过久会使多糖断裂而影响多糖的提取率。在研究超声波辅助提取时,常用小型超声设备,工厂生产时还因考虑化工设备放大的问题,在实际生产中超声波在传导中被设备吸收能量及介质间相互摩擦,产生热效应会使设备升温,应做好温度控制和参数优化。

1.6 微波辅助提取法

微波辅助提取法利用频率在 300~300 GHz 的电磁波,依靠其强力的穿透力非接触地将能量穿过细胞壁到达细胞质,将辐射能量转化为热能,使细胞内部升温形成高压,当内部压力到达一定程度时细胞则会破裂,使多糖溶于浸提液中。杨嘉丹等^[18]利用微波辅助法提取银耳多糖,在最佳工艺条件料液比 1:50 (g/mL)、微波功率 400 W、粒度 120 目条件下,提取 2 h 可达到 33.25%±0.14%的提取率。WANG 等^[19]等采用微波辅助双水相提取法对羌活多糖进行提取,结果表明与传统的热热水浸提法相比,微波双水相提取法具有更高的提取率和一步除蛋白能力,此外微波辅助法提取的多糖还具有较强的抗氧化和抗炎活性。微波提取快速、加热均匀、提取效率较高,但对于热不稳定物质则不适宜此法,且微波功率稍高则会出现焦糊状态破坏多

糖结构,提取剂需求量也相对较多。

1.7 其他提取法

多糖的提取主要采取水提取法进行提取,主要因为试验方法简单,不需要配制复杂的提取剂外,试验所需设备普通易得,成本较低,试验条件较易达到。除上述提取方法外,还有很多新提取方法因试验设备、成本要求过高,试验条件不易达到而不常被采用,表 1 列举了几种不常用提取方法及参数条件进行介绍。

2 粗多糖纯化方法

利用水提法、超声波辅助提取、微波辅助提取等方法从试验材料中提取粗多糖,含有蛋白质、色素、脂质等,不仅会影响产品感官,杂质本身可能存在活性,干扰了对多糖活性的研究,同时可能会对多糖的活性存在增强或者削弱的影响,因此会根据多糖的性质进行纯化,得到单一或多个多糖组分。单一方法纯化多糖纯度不高,为得到较高纯度组分,常采用多方法联用以提升纯度。

2.1 除蛋白

蛋白因其携带的电荷会大量吸附杂质和多糖会难以去除分离,加大了多糖的吸湿性,且蛋白质的存在会成为致敏原带来一系列过敏反应,影响了多糖生理活性研究,因此需要将蛋白除去^[27]。去除蛋白质常用的方法有三氯乙酸法(trichloroacetic acid, TCA)、Sevage 法、酶法,3 种方法各有优缺点,且对于不同性质的多糖,其除蛋白效果也有所不同。酶法虽然能除去蛋白,但会引入新物质;Sevage 法不仅消耗有机溶剂较多,重复次数多还会增加多糖损失率,且局限于去除游离蛋白而不适用于结合蛋白^[28]。Sevage 法主要去除的是高相对分子质量(8000~90000)的成分与硫酸根,会使半乳糖、木糖、岩藻糖含量下降,而 TCA 法则更多保留了高相对分子质量的成分和硫酸根,使含有甘露糖和葡萄糖醛酸的多糖含量下降^[29],同时 TCA 法基于酸水解的原理,会因浓度控制不好而导致多糖的水解^[30-31]。

表 1 多糖的其他提取方法
Table 1 Other extraction methods of polysaccharides

原料	方法	参数	提取量	参考文献
茨菇	亚临界水提法	pH 7, 提取温度 170 °C, 料液比 1:30 (g/mL), 时间 16 min	24.57%	[20]
羊肚菌	高压脉冲电场法	电场强度 18 kV/cm, 脉冲数 7 料液比 1:27 (g/mL)	56.03 μg/mL	[21]
香菇	双水相萃取法	乙醇浓度 26%与硫酸铵浓度 19.58%组成双水相, 提取温度 78.7 °C, 提取时间 19.55 min, 料液比 1:50 (g/mL)	上相 2.12% 下相 11.16%	[22]
黑豆皮	蒸汽爆破法	水分含量 15%, 压力水平 1.0 MPa, 处理时间为 80 s	17.49%	[23]
葫芦巴	闪式提取法	液料比 1:27 (g/mL), 提取时间 136 s, 提取温度 58 °C, 电压 140 V	21.23%	[24]
松茸	磁感应电场提取法	电压 1000 V、频率 500 Hz、温度 100 °C, 料液比 1:30 (g/mL), 时间 16 min	14.32%	[25]
山药	低共熔溶剂法	1,4-丁二醇与氯化胆碱的摩尔比为 4:1 水含量为 32.89%, 提取温度 94 °C, 提取时间 44.74 min	15.98%	[26]

在 Seville 法、TCA 法、酶法 3 种除蛋白方法中, 王筱瑜等^[32]在去除银杏落叶多糖中发现酶法效果最好; 在杨培等^[33]试验中, 去除北豆根粗多糖中蛋白最好的则是 TCA 法。为保证蛋白尽可能地除去而保留多糖, 可以将不同除蛋白法联用, 分步骤去除蛋白, 以解决蛋白残留多以及用单一方法使用次数较多而导致多糖损失多的问题^[34-35]。

其他新型的蛋白去除方法还有冻融法、双醛纤维素法、磁性壳聚糖微球法、氯化钙法、树脂吸附法和醋酸铅法等^[36]。

2.2 膜分离

膜分离技术的原理是根据分子量大小的不同, 在截留不同分子量的膜两侧加推动力, 使样液选择性地通过膜, 从而分离某一分子量区间的多种物质。膜两侧的推动力可以是压力差、电位差、浓度差等, 根据膜孔径大小可分为微滤、超滤、纳滤和反渗透^[37]。膜分离技术可以进行多组分分离, 且纯度高损失少, 同时根据推动力的不同可以分离出不同化学性质及分子特性的组分。武忠伟等^[38]用超滤膜法分离蝙蝠蛾拟青霉发酵液中胞外多糖, 分离出 3 个不同分子质量的多糖组分, 且在最优膜分离工艺条件下, 胞外多糖 800 ku 组分的纯度可达到 89.7%、损失率仅为 2.98%。AI 等^[39]通过超滤膜和逐步醇沉的方法, 分离出 5 个不同化学性质和分子特性的组分, 并筛选出了具有优异乳化性能的组分。膜分离技术是一项高效节能, 无污染低成本的高新技术, 随着材料技术的发展, 膜分离技术水平也进一步提高。

2.3 沉淀分离

沉淀法是根据不同分子量的多糖在不同溶剂中溶解度的不同而析出沉淀, 通过溶解度的分级进行多糖组分的分离, 常用溶剂有有机溶剂和盐溶液。有机溶剂常用乙醇进行沉淀分离, 通过逐渐增加乙醇浓度而使多糖分子按照其分子量由大到小的析出沉淀。而在提取液中加入中性盐则称为盐析法, 通过逐渐增加盐浓度, 多糖组分按照溶解度由小到大析出沉淀, 常用的盐析剂有 NaCl、KCl、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 、 CaCl_2 等。FENG 等^[40]用不同浓度的乙醇进行醇沉分离出 4 种多糖 60%-HSP、70%-HSP、80%-HSP 和 90%-HSP, 结果显示 4 种 HSP 多糖呈不规则聚集形态, 且均具有良好的抗氧化和抗癌活性。张欣萌等^[41]对比 5 种无机盐的对苹果渣果胶的盐析效果, 结果表明硫酸铝盐析苹果渣果胶效果最佳, 同时确定了沉淀温度 74 °C、pH 为 5.0、料液比 1:17 (g/mL)、保温时间 69 min 的最佳盐析工艺条件, 在此工艺条件下果胶得率高达 15.59%。

2.4 柱层析法

柱层析法有大孔树脂柱层析、离子交换柱层析、凝胶

柱层析等。大孔树脂常用于多糖的纯化和脱色, 通过物理吸附有选择性的纯化多糖, 具有吸附容量大、吸附速度快和选择性好等优点, 可以极大程度地提高多糖组分的纯度。离子交换柱法根据多糖组分极性不同和电荷性质的差异进行分离, 适用于酸性、中性及黏多糖的分离, 其原理是当不同浓度的洗脱液经过离子交换柱时, 流动相的离子与离子交换剂中的离子交换而分离出残存的杂质。凝胶常为葡聚糖凝胶、琼脂糖凝胶, 该方法是根据凝胶分子之间的间距和组分之间分子量大小的不同而进行分离, 其原理是直径较大的大分子物质顺凝胶之间的缝隙流出, 而直径小的小分子物质则进入凝胶颗粒的内部缓慢流出, 常按照多糖结构大小及对树脂的亲疏性先后流出层析柱^[42-44]。孙伟等^[45]选用 D-101 型大孔树脂在最佳工艺下将桑白皮多糖的纯度从 16.12% 提升到 74.45%, XU 等^[46]用聚酰胺柱层析进行藤椒籽油饼多糖纯化, 在最佳柱层析条件下, 纯度从 48.52%±2.76% 提升至 93.76%±2.06%。闻志莹等^[47]用离子交换层析柱纯化得到了 4 个多糖组分, 总回收率达到 75.19%。

3 多糖的生物活性

随着与疾病的抗争不断深入, 传统的治疗方法对正常细胞也有毒性, 对免疫系统有害^[48]。多糖复杂的理化性质可以用作医药材料、药物释放剂等, 还可以利用多糖生物活性来制备具有抗肿瘤、抗原性的新药或者疫苗且副作用较小, 一些动植物和微生物已成为了开发新药的潜在资源^[49]。

3.1 抗肿瘤活性

已有研究证明多糖在抗肿瘤方面效果突出, 能有效抑制肿瘤细胞的增殖及扩散, 且毒副作用小, 其抗肿瘤的机制一般为间接和直接作用细胞两种方式。间接方式通过激活巨噬细胞活力, 提升人体免疫活性, 直接方式则通过抑制癌细胞的生长和增殖及调控细胞生命周期。动物多糖主要通过抑制肿瘤细胞生长、诱导凋亡和增强免疫来发挥抗肿瘤作用, 而植物多糖和微生物多糖主要通过抑制肿瘤生长、诱导凋亡、增强免疫功能和协同化疗药物等途径影响多种肿瘤细胞^[50]。张锦锦等^[51]发现灵芝 β -葡聚糖可以激活巨噬细胞抗原传递的功能, 提高巨噬细胞的吞噬能力, 还能促进巨噬细胞吞噬其本身, 持续发挥刺激免疫反应而达到抗肿瘤的作用, 且同时促进小鼠脾淋巴细胞的增殖。袁华等^[52]试验研究表明, 苦瓜多糖能够抑制细胞周期素 D1、Ki67 蛋白的表达, 进而抑制人乳腺癌 MDA-MB-231 细胞的增殖, 同时抑制血管内皮生长因子表达, 以减少新生毛细血管的形成而降低营养物质输送, 达到抑制细胞生长的效果, 且促进凋亡基因、诱导细胞凋亡的核心蛋白表达, 抑制 MMP-9 蛋白酶的表达而降低癌细胞的迁移能力。CHEN 等^[53]从桑枝多糖中

得到一种水溶性多糖 RMP1, 试验表明 RMP1 对 SGC-7901 和 HeLa 细胞具有明显的抗肿瘤作用, 且对 HEK-293 和 RAW264.7 细胞无细胞毒性作用, 同时发现 RMP1 对 SGC-7901 细胞凋亡具有促进作用, 并诱导细胞周期阻滞在 S 期。ZHANG 等^[54]的研究发现平菇硒多糖 Se-POP-3 在癌细胞和正常细胞系的体外试验中, Se-POP-3 能诱导癌细胞凋亡, 抑制癌细胞迁移, 潜在的抗癌机制是 Se-POP-3 可以破坏促进凋亡基因 *Bax*、抑制基因 *Bcl-2* 两种比例, 而 *Bax/Bcl-2* 基因的比值是决定细胞凋亡抑制程度的关键因素, 同时抑制癌细胞上皮间充质转化, 且 Se-POP-3 对正常细胞系的生长无显著影响。

3.2 抗氧化活性

人体生理异常或者受到外界环境的影响, 体内会产生过量自由基, 而衰老、癌症及某些疾病都与自由基过量有关, 多糖则具有显著的抗氧化能力, 且不易受外界因素影响, 可通过调节抗氧化的信号通路, 提高防御系统、抗氧化相关酶活性的方式清除自由基, 其抗氧化能力与多糖结构和单糖组成正相关或负相关关系^[55-56]。韦铮等^[57]在研究茶多糖在模拟胃肠消化体系的抗氧化作用时发现, 其抗氧化能力无明显变化, 表明茶多糖抗氧化能力不受 pH、胃蛋白酶、作用时间影响, 而 DPPH 自由基清除率只与浓度有关。王余宸铭等^[58]用分离纯化后的蝉花孢梗束 3 个多糖组分, 对比维生素 C 对羟基自由基(hydroxyl radical, $\cdot\text{OH}$)清除能力, 结果表明 3 个多糖组分对 $\cdot\text{OH}$ 清除率均高于维生素 C 20%以上。DONG 等^[59]研究发现香肉齿菌多糖能降低丙二醛和活性氧水平, 提高 A549 细胞活力, 防止细胞凋亡, 通过 Nrf2/MAPK 信号通路减弱 H_2O_2 诱导的氧化损伤。

3.3 降血糖活性

由于生活水平的提高, 人们的饮食结构与过去大不相同。大量的糖分、油脂和胆固醇的摄入造成了人们的心血管疾病问题, 引发了高血糖、高血压、高血脂、肥胖等一系列反应, 继而对人体构成更多的伤害。解决心血管疾病首要是需要从膳食结构来进行控制, 再加以药物的干预^[60-62], 而目前治疗糖尿病的药物多伴有副作用, 因此研究开发副作用小的天然药物便成了糖尿病医学研究重点。糖尿病主要由胰岛素作用缺陷、分泌不足及胰岛组织受损几个方面引起, 主要通过修复胰岛细胞及抑制葡萄糖苷酶活性等途径来降血糖。马永强等^[63]研究发现甜玉米芯多糖可降低大鼠血糖及改善葡萄糖耐受水平, 同时缓解脏器肿胀并对胰岛组织进行一定修复, 增加了胰岛 B 细胞数量。王梦雅等^[64]发现桦褐孔菌多糖能够抑制 α -葡萄糖苷酶的活性, 减少食物在肠胃中葡萄糖的分解, 达到降低血糖的效果, 同时能够改善胰岛素的抵抗状态, 使细胞增强对葡萄糖的利用。

3.4 降血压活性

高血压是常见的慢性病, 现在正逐渐年轻化病发, 易致死致残, 传统的治疗药物往往带有副作用, 严重则会导致脏器损伤, 且有难治性及顽固性高血压仍然未得到有效的控制, 因此在天然物质中寻找降血压药物则可以为临床治疗提供新的思路^[65]。石斛多糖降血压效果优于治疗高血压药物硝苯地平, 同时具有缓释效果, 作用温和在 4 h 时达到最佳的降压效果^[66]; 梁秋云等^[67]在对比仙人掌果多糖在和降压药卡托普利时, 发现仙人掌果多糖虽然降压速度较卡托普利慢, 但整体降压效果较为缓和持久, 且无明显药物耐受性的特点, 同时对心率没有明显的影响, 降压安全。血管紧张素转换酶可以将无活性的血管紧张素 I 转化为具有收缩血管作用的血管紧张素 II 而使血压升高, 同时使舒缓激肽失活失去血管舒张作用, 抑制酶转换血管紧张素, 防止具有舒张血管作用的舒缓激肽失活, 而红毛藻多糖则对血管紧张素酶具有很好的抑制作用^[68], 同时发现红毛藻多糖对血管紧张素酶的抑制作用为可逆非竞争性抑制。

3.5 肠道调节功能

人体肠道内寄生着数量庞大的微生物群, 这些微生物依靠人体肠道生存, 同时帮助人体完成新陈代谢, 调节人体的生理生化的平衡。而人体摄入的食物则会对肠道内的微生物有着促进作用或者抑制作用, 从而改变肠道环境, 继而改变人体的生理状态。研究表明, 肠道微生物参与人体的大脑发育和免疫调节功能, 也与心血管系统、神经系统、泌尿系统有着很深的联系^[69-71], 当微生物群失调时会引发肥胖、糖尿病、肝脏疾病和炎症性疾病, 甚至会导致多器官衰竭^[72]。

任多多等^[73]研究了西洋参多糖对抗生素相关性腹泻的改善作用, 结果表明西洋参多糖能修复大鼠受损的肠道结构, 增加肠绒毛长度和密度, 并通过调整条件致病菌的相对丰度而达到恢复菌群多样性、修复菌群结构的效果。黄酒多糖可以通过形成亲水凝胶层、疏水黏液层以维护肠道屏障, 上调肠道上皮细胞紧密连接蛋白表达对受损肠屏障进行修复, 以及通过调节肠内菌群比例、改善菌群代谢特征和通过上调机体短链脂肪酸产量, 调控代谢通路方面来达到对便秘症状的缓解作用, 同时还可以通过改善肠内菌群比例及免疫调节和相关蛋白表达以改善炎症性肠病症状^[74]。

3.6 其他功能

单糖种类繁多, 连接方式也千差万别, 造成了多糖极其复杂的结构, 从而影响了多糖的活性, 其取代基、分子量等同样会对活性有所影响。多糖的生物活性是人们研究多糖的最终目的, 也是多糖利用与研究价值的体现, 表 2 还列举了其他几种多糖的活性研究。

表2 多糖的其他活性研究
Table 2 Other activity studies of polysaccharides

原料	作用	机制	参考文献
黄精	抗疲劳	调节骨钙素信号来抵抗疲劳	[75]
玫瑰花蕾	抗衰老	提高抗氧化酶活性,降低丙二醛含量	[76]
三叶青	降血脂	降低总胆固醇、甘油三酯、低密度脂蛋白水平,提高高密度脂蛋白水平	[77]
蝉花虫草	抑菌	破坏细菌细胞壁和细胞膜,增加细胞通透性,损伤结构和释放细胞成分	[78]
五味子	镇咳	抑制气管炎症,形成黏液层降低咳嗽受体敏感性	[79]
肉苁蓉	改善骨质疏松	激活 Wnt/ β -catenin 信号通路,改善骨组织病理损伤,促进新骨形成,影响胶原纤维、软骨细胞和钙沉积	[80]
沙蒿	减肥	减缓脂肪细胞增大、肝脏脂肪变性,增加结肠黏膜厚度	[81]

4 结束语

天然多糖的取材广泛,可以从动植物和微生物中提取,由于多糖是大分子物质,其单糖组成、单糖数量及官能团等因素使得碳链结构更加复杂,造就了多糖种类多样及丰富的生理活性。随着研究深入,多糖的生理功效正受到食品及医药领域的关注,不仅是在食品开发方面显露价值,其保健及医疗价值变得越发重要,物理和化学性质上新的功能及用途正不断得到开发。由于多糖本身是生物体的构成物质之一,因此在利用时对生物体排斥小,安全风险较低。多糖生物活性丰富,对于不同病症有缓解或者治愈的功能,其作用机制将是日后的研究重点。多糖不仅可以用作治疗,还可以用作运动营养品、保健品^[82-83],作为日常服用对身体有益,多糖在营养品、保健品市场中有广阔的价值开发。多糖不仅可以用于人体,同时还可以在饲料中加入,补充动物营养,使动物快速增长带来更多经济效益,或用于动物医学治疗^[84-85]。

天然多糖虽然分布广泛,但在生物体内含量较少,同时受到提取方法的制约,天然多糖的提取率较低,在实际生产中提取及纯化成本较高,难以投入实际生产当中,但随着不同学科及科学技术的发展,越来越多的新提取方法应用于多糖的提取纯化中,如材料学的发展则为多糖膜法纯化带来便利,新型膜材料不仅过滤效果好,纯化程度高,且对多糖的性质影响小。近年来关于多糖的研究主要集中在提取工艺及生理活性研究,而其结构组成及其药理研究则相对较少。多糖的研究正从宏观到微观方向转移,单糖组成、排序、官能团及侧链的不同、分子量等因素对多糖生物活性影响的研究将会越来越深入,也正从体外到体内的实际应用方向发展,不断推陈出新的科学技术将会为多糖研究开拓新的研究方向和提供便利,为多糖全面的开发利用铺开广阔的道路。

参考文献

[1] ULLAH S, KHALIL AA, SHAUKAT F, et al. Sources, extraction and

biomedical properties of polysaccharides [J]. Foods, 2019, 8(8): 304.

- [2] 张淑杰, 康玉凡. 天然活性多糖研究进展[J]. 食品工业科技, 2017, 38(2): 379-382, 389.
ZHANG SJ, KANG YF. Advances in bio-active polysaccharides [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(2): 379-382, 389.
- [3] 孟庆龙, 金莎, 刘雅婧, 等. 植物多糖药理功效研究进展[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 335-341.
MENG QL, JIN S, LIU YJ, et al. Research progress in pharmacological efficacy of plant polysaccharides [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(11): 335-341.
- [4] 聂少平, 唐炜, 殷军艺, 等. 食源性多糖结构和生理功能研究概述[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 1-12.
NIE SP, TANG W, YIN JY, et al. Research progress on structure and functional activities of food-derived polysaccharides [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2018, 18(12): 1-12.
- [5] 林建翠, 赵琳儒, 花卉, 等. Box-Behnken 响应面法优化蛇六谷多糖的提取工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(8): 3212-3218.
LIN JC, ZHAO LR, HUA H, et al. Optimization of the extraction process of polysaccharide from *Rhizoma Amorphophalli* by Box-Behnken response surface method [J]. J Food Saf Qual, 2021, 12(8): 3212-3218.
- [6] WANG BL, NIU JF, MAI BJ, et al. Effects of extraction methods on antioxidant and immunomodulatory activities of polysaccharides from superfine powder *Gynostemma pentaphyllum* Makino [J]. Glycoconjugate J, 2020, 37(6): 777-789.
- [7] 丁霄霄, 李凤伟, 商曰玲, 等. 灵芝多糖的复合酶法提取工艺优化[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(5): 34-39, 53.
DING XX, LI FW, SHANG YL, et al. Optimization of extraction technology of *Ganoderma lucidum* polysaccharide by enzyme complex [J]. Food Res Dev, 2020, 41(5): 34-39, 53.
- [8] LI XY, WANG L. Effect of extraction method on structure and antioxidant activity of *Hohenbuehelia serotina* polysaccharides [J]. Int J Biol Macromol, 2016, 83: 270-276.
- [9] LIU Y, HUANG GL. Extraction and derivatisation of active polysaccharides [J]. J Enzyme Inhib Med Chem, 2019, 34(1): 1690-1696.
- [10] 栗晓庆, 吕俊平, 刘琪, 等. 裸藻多糖碱提工艺优化及其体外抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2019, 44(9): 209-215.
LI XQ, LV JP, LIU Q, et al. Optimization of alkaline extraction and antioxidant activities of paramylon *in vitro* [J]. Food Sci Technol, 2019, 44(9): 209-215.
- [11] 任秋慧, 卢韵朵, 廖鲜艳, 等. 酸法提取苹果渣中的果胶及其性质分析[J]. 中国酿造, 2018, 37(1): 86-91.
REN QH, LU YD, LIAO XY, et al. Extraction of pectin from apple

- pomace by acid and analysis of its property [J]. *China Brew*, 2018, 37(1): 86–91.
- [12] 王艺涵, 吴琴, 迟原龙, 等. 酸碱法和酶法辅助提取银耳粗多糖的特性研究[J]. *食品科技*, 2019, 44(4): 200–204.
WANG YH, WU Q, CHI YL, *et al.* Properties of crude polysaccharides extracted from *Tremella fuciformis* by acid, alkali and enzyme-assisted methods [J]. *Food Sci Technol*, 2019, 44(4): 200–204.
- [13] GALLEGO R, BUENO M, HERRERO M. Sub-and supercritical fluid extraction of bioactive compounds from plants, food-by-products, seaweeds and microalgae-An update [J]. *TrAC Trend Anal Chem*, 2019, 116: 198–213.
- [14] 韦晓洁, 银慧慧, 孟菲, 等. 超临界 CO₂ 流体萃取苦丁茶多糖的工艺优化[J]. *广西植物*, 2018, 38(5): 590–595.
WEI XJ, YIN HH, MENG F, *et al.* Supercritical CO₂ fluid extraction process optimization for polysaccharides from *Ilex Kudingcha* [J]. *Guihaia*, 2018, 38(5): 590–595.
- [15] SARAVANA PS, ETACHEW GAT, CHO YJ, *et al.* Influence of co-solvents on fucoxanthin and phlorotannin recovery from brown seaweed using supercritical CO₂ [J]. *J Supercrit Fluid*, 2017, 120: 295–303.
- [16] HERNANDEZ JES, AVELLANEDA ZE, IQBAL HMN, *et al.* State-of-the-art extraction methodologies for bioactive compounds from algal biome to meet bio-economy challenges and opportunities [J]. *Molecules*, 2018, 23(11): 2953.
- [17] WANG JA, HUANG LF, REN Q. Polysaccharides of *Scrophularia ningpoensis* Hems! : Extraction, antioxidant, and anti-inflammatory evaluation [J]. *Evid-Based Compl Alt*, 2020, 2020: 1–13.
- [18] 杨嘉丹, 刘婷婷, 张闪闪, 等. 微波辅助提取银耳多糖工艺优化及其流变、凝胶特性[J]. *食品科学*, 2019, 40(14): 289–295.
YANG JD, LIU TT, ZHANG SS, *et al.* Optimization of microwave-assisted extraction and rheological and gelling properties of polysaccharide from *Tremella fuciformis* [J]. *Food Sci*, 2019, 40(14): 289–295.
- [19] WANG WX, LIU JJ. Efficient extraction, antioxidant activities and anti-inflammation of polysaccharides from *Notopterygium franchetii* Boiss [J]. *Carbohydr Polym*, 2020. DOI: 10.1016/j.carbpol.2020.116783
- [20] ZHANG JX, WEN CT, CHEN M, *et al.* Antioxidant activities of *Sagittaria sagittifolia* L. polysaccharides with subcritical water extraction [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 134: 172–179.
- [21] LIU C, SUN YH, MAN Q, *et al.* Characteristics and antitumor activity of *Morchella esculenta* polysaccharide extracted by pulsed electric field [J]. *Int J Mol Sci*, 2016, 17(6): 986.
- [22] LIN YY, ZENG HY, WANG K, *et al.* Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of diverse polysaccharides from *Lentinus edodes*: Process optimization, structure characterization and antioxidant activity [J]. *Int J Biol Macromol*, 2019, 136: 305–315.
- [23] MENG S, GE YF, KANG ZY, *et al.* Yield and physicochemical properties of soluble dietary fiber extracted from untreated and steam explosion-treated black soybean hull [J]. *J Chem-NY*, 2019, 2019: 1–9.
- [24] 陶陶, 贺凡, 姬小明, 等. 响应面法优化闪式提取葫芦巴多糖及其保润性能研究[J]. *精细化工*, 2016, 33(6): 666–673.
TAO T, HE F, JI XM, *et al.* Response surface methodology for optimization of flash extraction for fenugreek (*Trigonella foenum-graecum* L.) polysaccharides and research of its humectant properties [J]. *Fine Chem*, 2016, 33(6): 666–673.
- [25] 孟嫚, 张延杰, 杨哪, 等. 磁感应电场提取松茸多糖工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(1): 143–148.
MENG M, ZHANG YJ, YANG N, *et al.* Efficient extraction of *Tricholoma matsutake* polysaccharide by magneto-induced electric field and its process optimization [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(1): 143–148.
- [26] ZHANG LJ, WANG MS. Optimization of deep eutectic solvent-based ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Dioscorea opposita* Thunb [J]. *Int J Biol Macromol*, 2017, 95: 675–681.
- [27] 叶强, 张丹, 郭力. 附子多糖提取纯化工艺研究[J]. *中药与临床*, 2013, 4(2): 29–31.
YE Q, ZHANG D, GUO L. Research on polysaccharide extraction and purification process of Fuzi [J]. *Pharm Clin Chin Mater Med*, 2013, 4(2): 29–31.
- [28] 刘波, 王庆奎, 邢克智, 等. 当归多糖除蛋白质前后抗氧化活性比较[J]. *天津农学院学报*, 2017, 24(3): 46–49.
LIU B, WANG QK, XING KZ, *et al.* Compare of antioxidant activity of *Angelica sinensis* polysaccharide before and after protein removing [J]. *J Tianjin Agric Univ*, 2017, 24(3): 46–49.
- [29] 辛泉伯, 罗薇, 孙可澄, 等. 除蛋白方式对湛江等鞭金藻多糖的组成、结构特征和体外抗肿瘤活性的影响[J]. *大连海洋大学学报*, 2019, 34(3): 428–435.
XIN QB, LUO W, SUN KC, *et al.* Compositional characteristics and *in vitro* antitumor activities of polysaccharides from alga *IsochrYSIS zhanjiangensis* treated with different deproteinizing methods [J]. *J Dalian Ocean Univ*, 2019, 34(3): 428–435.
- [30] 李洁琼, 刘红全, 袁莎. 微藻多糖的研究进展[J]. *现代化工*, 2016, 36(6): 60–62.
LI JQ, LIU HQ, YUAN S. Research progress of microalgae polysaccharide [J]. *Mod Chem Ind*, 2016, 36(6): 60–62.
- [31] YU XH, LIU Y, WU XL, *et al.* Isolation, purification, characterization and immunostimulatory activity of polysaccharides derived from American ginseng [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 248: 116783.
- [32] 王筱瑜, 季子非, 萨日娜, 等. 银杏落叶粗多糖除蛋白方法的筛选及优化[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(10): 232–237.
WANG XY, JI ZF, SA RN, *et al.* Screen and optimization of the methods for removing protein from crude polysaccharide in *Ginkgo biloba* leaves [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(10): 232–237.
- [33] 杨培, 张瑞, 翟阳, 等. 响应面法优化北豆根粗多糖的除蛋白工艺及其神经保护活性研究[J]. *天然产物研究与开发*, 2019, 31(4): 579–586.
YANG P, ZHANG R, ZHAI Y, *et al.* Optimization of deproteinization process by response surface method and the neuroprotective activity study of *Rhizoma menispermis* crude polysaccharide [J]. *Nat Prod Res Dev*, 2019, 31(4): 579–586.
- [34] 谢飞, 曹纯洁, 陈美珍, 等. 响应面法优化水坛紫菜多糖除蛋白工艺及其抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2016, 37(22): 77–84.
XIE F, CAO CJ, CHEN MZ, *et al.* Optimization of deproteinization process of polysaccharides extracted from abandoned *Porphyra haitanensis* and their antioxidant activity [J]. *Food Sci*, 2016, 37(22): 77–84.
- [35] 李泽珍, 狄建兵, 陈敏. 莽蓝胶多糖的分离纯化和理化性质研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(6): 52–56.
LI ZZ, DI JB, CHEN M. Isolation, purification and physicochemical properties of the polysaccharides from *Camelina sativa* gum [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2016, 31(6): 52–56.
- [36] 何美佳, 刘晓, 唐翠翠, 等. 多糖脱蛋白方法的研究进展[J]. *中国海洋药物*, 2019, 38(3): 82–86.
HE MJ, LIU X, TANG CC, *et al.* Research progress on the methods for deproteinization of polysaccharide [J]. *Chin J Mar Drug*, 2019, 38(3): 82–86.
- [37] 杨方威, 冯叙桥, 曹雪慧, 等. 膜分离技术在食品工业中的应用及研究进展[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 330–338.
YANG FW, FENG XQ, CAO XH, *et al.* Application in the food industry

- and development of membrane separation technology [J]. Food Sci, 2014, 35(11): 330–338.
- [38] 武忠伟, 张明霞, 陆隽雯, 等. 超滤分离蝙蝠蛾拟青霉胞外多糖工艺优化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(10): 175–182.
- WU ZW, ZHANG MX, LU JW, *et al.* Process optimization of exopolysaccharides from the fermentation broth of *Paecilomyces hepiali* by ultrafiltration [J]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(10): 175–182.
- [39] AI C, MENG HC, LIN JW, *et al.* Combined membrane filtration and alcohol-precipitation of alkaline soluble polysaccharides from sugar beet pulp: Comparison of compositional, macromolecular, and emulsifying properties [J]. Food Hydrocolloid, 2020, 109: 106049.
- [40] FENG YN, ZHANG XF. Polysaccharide extracted from *Huperzia serrata* using response surface methodology and its biological activity [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 157: 267–275.
- [41] 张欣萌, 吕春茂, 孟宪军, 等. 盐析法制备寒富苹果渣果胶及其抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(8): 170–176, 183.
- ZHANG XM, LV CM, MENG XJ, *et al.* Study on pectin from Hanfu apple pomace by salting out method and the antioxidation of pectin [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(8): 170–176, 183.
- [42] 吴梦琪, 夏玮, 徐志珍, 等. 植物多糖的分离纯化、结构解析及生物活性研究进展[J]. 化学世界, 2019, 60(11): 737–747.
- WU MQ, XIA W, XU ZZ, *et al.* Review on isolation and purification, structural elucidation and biological activity of botanical polysaccharides [J]. Chem World, 2019, 60(11): 737–747.
- [43] 肖瑞希, 陈华国, 周欣. 植物多糖分离纯化工艺研究进展[J]. 中国中医药信息杂志, 2018, 25(5): 136–140.
- XIAO RX, CHEN HG, ZHOU X. Research progress in separation and purification of plant polysaccharides [J]. Chin J Inform Tradit Chin Med, 2018, 25(5): 136–140.
- [44] 黄越燕, 王露露, 季慧. 植物多糖纯化分离方法研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2016, 34(3): 671–674.
- HUANG YY, WANG LL, JI H. Research process in purification and separation method of plant polysaccharide [J]. Chin Arch Tradit Chin Med, 2016, 34(3): 671–674.
- [45] 孙伟, 叶润, 蔡静, 等. 大孔树脂纯化桑白皮多糖的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(14): 129–133.
- SUN W, YE R, CAI J, *et al.* Purification of polysaccharide from mori cortex by macroporous resin [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 41(14): 129–133.
- [46] XU DP, WANG CX, ZHUO ZH, *et al.* Extraction, purification and antioxidant activity of polysaccharide from cold pressed oil cake of ‘Tengjiao’ seed [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 163: 508–518.
- [47] 闻志莹, 蔡为荣, 丁伯乐. 香椿籽多糖的分离纯化及其体外抗凝血活性[J]. 食品科技, 2020, 45(2): 225–230.
- WEN ZY, CAI WR, DING BL. Separation, purification and anticoagulant activity *in vitro* of polysaccharides from seeds of *Toona sinensis* [J]. Food Sci Technol, 2020, 45(2): 225–230.
- [48] LEGARDA XL, ECHAVARRIA CA, SALDIVAR RP, *et al.* Biotechnological production, characterization and *in vitro* antitumor activity of polysaccharides from a native strain of *Lentinus crinitus* [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 164: 3133–3144.
- [49] REN L, ZHANG J, ZHANG TH. Immunomodulatory activities of polysaccharides from *Ganoderma* immune effector cells [J]. Food Chem, 2021, 340: 127933.
- [50] YU Y, SHEN MY, SONG QQ, *et al.* Biological activities and pharmaceutical applications of polysaccharide from natural resources: A review [J]. Carbohydr Polym, 2018, 183: 91–101.
- [51] 张锦锦, 陈菲菲, 严展鹏, 等. 灵芝 β -葡聚糖的碱提取及其抗肿瘤免疫调节研究[J]. 药学学报, 2020, 55(3): 512–521.
- ZHANG JJ, CHEN FF, YAN ZP, *et al.* Alkali extraction of *Ganoderma lucidum* β -glucan and its anti-tumor immune regulation [J]. Acta Pharm Sin, 2020, 55(3): 512–521.
- [52] 袁华, 陈尚锋, 李辉. 苦瓜多糖对人乳腺癌 MDA-MB-231 细胞生物学行为的影响[J]. 临床和试验医学杂志, 2019, 18(22): 2392–2397.
- YUAN H, CHEN SF, LI H. Effects of *Momordica charantia* polysaccharide on biological behavior of human breast cancer MDA-MB-231 cells [J]. J Clin Exp Med, 2019, 18(22): 2392–2397.
- [53] CHEN YJ, JIANG X, XIE HQ, *et al.* Structural characterization and antitumor activity of a polysaccharide from *Ramulus mori* [J]. Carbohydr Polym, 2018, 190: 232–239.
- [54] ZHANG YS, ZHANG ZM, LIU H, *et al.* Physicochemical characterization and antitumor activity *in vitro* of a selenium polysaccharide from *Pleurotus ostreatus* [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 165: 2934–2946.
- [55] 吴艳丽, 邵珠领, 张宇, 等. 南瓜均一多糖的分离纯化及其抗氧化活性的研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(23): 62–70.
- WU YL, SHAO ZL, ZHANG Y, *et al.* Isolation, purification and antioxidant activity of pumpkin homogeneous polysaccharide [J]. Food Res Dev, 2019, 40(23): 62–70.
- [56] 李京凌, 滕左, 韩芳, 等. 四大产区商品蔬菜多糖组成及抗氧化活性分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(1): 262–268.
- LI JL, TENG Z, HAN F, *et al.* Analysis of polysaccharide components and antioxidant activity of commodity *Brasenia schreberi* from four production areas [J]. Food Dev Ferment Ind, 2020, 46(1): 262–268.
- [57] 韦铮, 贺燕, 郝麒麟, 等. 茶多糖在模拟胃肠消化体系的抗氧化作用[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(10): 109–117.
- WEI Z, HE Y, HAO QL, *et al.* Study on the antioxidant effect of tea polysaccharides under the conditions of simulating gastrointestinal digestion *in vitro* [J]. Food Dev Ferment Ind, 2020, 46(10): 109–117.
- [58] 王余宸铭, 黄快乐, 黄留瑶, 等. 蝉花孢梗束多糖的抗氧化及对环磷酰胺致肝损伤小鼠的保护作用[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 45–50.
- WANG YCM, HUANG KL, HUANG LY, *et al.* Antioxidant and hepatoprotective effect of polysaccharides from synnemata of *Cordyceps cicadae* against cyclophosphamide-induced liver injury in mice [J]. Sci Technol Food Ind, 2019, 40(24): 45–50.
- [59] DONG HB, YANG JL, WANG Y, *et al.* Polysaccharide SAFF from *Sarcodon aspratus* attenuates oxidative stress-induced cell damage and bleomycin-induced pulmonary fibrosis [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 164: 1215–1236.
- [60] 中国心血管病风险评估和管理指南编写联合委员会. 中国心血管病风险评估和管理指南[J]. 中国循环杂志, 2019, 34(1): 4–28.
- Joint Committee on the Preparation of Guidelines for Cardiovascular Risk Assessment and Management in China. Guideline on the assessment and management of cardiovascular risk in China [J]. Chin Circ J, 2019, 34(1): 4–28.
- [61] 杨玉红, 陈利芬, 杨仲毅. 心血管疾病风险评估研究现状[J]. 现代临床护理, 2019, 18(5): 74–78.
- YANG YH, CHEN LF, YANG ZY. Current status of nursing risk assessment for cardiovascular diseases [J]. Mod Clin Nurs, 2019, 18(5): 74–78.
- [62] 沈逸枫, 吴炯, 郭玮, 等. 心血管疾病风险评估系统研究进展[J]. 检验医学, 2018, 33(2): 163–169.
- SHEN YF, WU J, GUO W, *et al.* Research progress of cardiovascular disease risk assessment system [J]. Lab Med, 2018, 33(2): 163–169.
- [63] 马永强, 张凯, 王鑫, 等. 甜玉米芯多糖对糖尿病大鼠的降血糖作用[J]. 食品科学, 2020, 41(13): 169–173.
- MA YQ, ZHANG K, WANG X, *et al.* Hypoglycemic effect of sweet corn cob polysaccharide on diabetic rats [J]. Food Sci, 2020, 41(13): 169–173.

- [64] 王梦雅, 赵喆祺, 薛娇, 等. 桦褐孔菌纯化多糖体外降血糖活性研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(10): 316–320, 326.
WANG MY, ZHAO ZZ, XUE J, *et al.* Hypoglycemic activity of purified polysaccharides from *Inonotus obliquus* *in vitro* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2020, 41(10): 316–320, 326.
- [65] 曹小倩, 张毅, 卢新政. 降压药的研究进展[J]. 心血管病学进展, 2020, 41(10): 1031–1035.
CAO XQ, ZHANG Y, LU XZ. Novel anti-hypertensive drugs [J]. *Adv Card Dis*, 2020, 41(10): 1031–1035.
- [66] 王再花, 叶庆生, 李杰, 等. 4种石斛的多糖对高血压大鼠降压的影响[J]. 热带作物学报, 2017, 38(9): 1764–1767.
WANG ZH, YE QS, LI J, *et al.* Antihypertensive effects of polysaccharides from four *Dendrobium* species on hypertensive rats [J]. *Chin J Trop Crop*, 2017, 38(9): 1764–1767.
- [67] 梁秋云, 刘华钢, 黄慧学, 等. 仙人掌果多糖对自发性高血压大鼠血压的调节及机制[J]. 中国试验方剂学杂志, 2010, 16(6): 167–170.
LIANG QY, LIU HG, HUANG HX, *et al.* The regulating effect and its mechanism of polysaccharides of cactus pear fruit for blood pressure in spontaneous hypertension rat [J]. *Chin J Exp Formulae*, 2010, 16(6): 167–170.
- [68] 宋田源, 陈艳红, 倪辉, 等. 红毛藻多糖对血管紧张素转换酶活性的抑制作用[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2017, 22(5): 24–30.
SONG TY, CHEN YH, NI H, *et al.* Inhibitory effect of a polysaccharide fraction prepared from red seaweed *Bangia fusco-purpurea* on angiotensin converting enzyme [J]. *J Jimei Univ (Nat Sci Ed)*, 2017, 22(5): 24–30.
- [69] 罗晓雅, 杨志宏. 肠道菌群与心血管疾病相关性的研究进展[J]. 中国药理学通报, 2018, 34(8): 1037–1041.
LUO XY, YANG ZH. Research progress on correlation between intestinal flora and cardiovascular diseases [J]. *Chin Pharma Bull*, 2018, 34(8): 1037–1041.
- [70] 杨群芳, 刘承云, 郑华波. 肠道菌群与血管疾病相关性的研究进展[J]. 临床心血管病杂志, 2017, 33(10): 931–933.
YANG QF, LIU CY, ZHENG HB. Advances in studies on the relationship between intestinal flora and cardiovascular disease [J]. *J Clin Card*, 2017, 33(10): 931–933.
- [71] 刘家奇, 武琥琮, 任文凯, 等. 肠道微生物菌群调节中枢神经系统发育及相关疾病的研究进展[J]. 中国科学, 2020, 50(3): 329–337.
LIU JQ, WU HC, REN WK, *et al.* Regulation of development of central nervous system and related diseases by gut microflora [J]. *Sci Sin*, 2020, 50(3): 329–337.
- [72] YIN CM, NORATTO GD, FAN XZ, *et al.* The impact of mushroom polysaccharides on gut microbiota and its beneficial effects to host: A review [J]. *Carbohydr Polym*, 2020, 250: 116942.
- [73] 任多多, 邵紫君, 刘松鑫, 等. 西洋参多糖对克林霉素磷酸酯诱导的抗生素相关性腹泻的改善作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 354–361.
REN DD, SHAO ZJ, LIU SX, *et al.* Ameliorative effect of *Panax quinquefolius* polysaccharides on antibiotic-associated diarrhea induced by clindamycin phosphate [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(12): 354–361.
- [74] 史瑛, 冯欣静, 周志磊, 等. 黄酒多糖对炎症性肠病及便秘作用机制的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 275–283.
SHI Y, FENG XJ, ZHOU ZL, *et al.* Research progress on the mechanism of Huangjiu polysaccharides on inflammatory bowel disease and constipation [J]. *Food Dev Ferment Ind*, 2021, 47(9): 275–283.
- [75] SHEN WD, LI XY, DENG YY, *et al.* Polygonatum cyrtoneura Hua polysaccharide exhibits anti-fatigue activity via regulating osteocalcin signaling [J]. *Int J Biol Macromol*, 2021, 175: 235–241.
- [76] TANG Y, ZHU ZY, LIU Y, *et al.* The chemical structure and anti-aging bioactivity of an acid polysaccharide obtained from rose buds [J]. *Food Funct*, 2018, 9(4): 2300–2312.
- [77] RU Y, CHEN X, WANG J, *et al.* Polysaccharides from *Tetrastigma hemsleyanum* Diels et Gilg: Extraction optimization, structural characterizations, antioxidant and antihyperlipidemic activities in hyperlipidemic mice [J]. *In Biol Macromol*, 2018, 125: 1033–1041.
- [78] ZHANG Y, WU YT, ZHENG W, *et al.* The antibacterial activity and antibacterial mechanism of a polysaccharide from *Cordyceps cicadae* [J]. *J Funct Foods*, 2017, 38: 273–279.
- [79] ZHONG S, LIU X, NIE Y, *et al.* Antitussive activity of the *Schisandra chinensis* fruit polysaccharide (SCFP-1) in guinea pigs models [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 194: 378–385.
- [80] WANG FJ, TU PF, ZENG KW, *et al.* Total glycosides and polysaccharides of *Cistanche deserticola* prevent osteoporosis by activating Wnt/ β -catenin signaling pathway in SAMP6 mice [J]. *J Ethnopharmacol*, 2021, 271: 113899.
- [81] LI JJ, J H, YAN XM, *et al.* The anti-obesity effects exerted by different fractions of *Artemisia sphaerocephala* Krasch polysaccharide in diet-induced obese mice [J]. *Int J Biological Macromol*, 2021, 182: 825–837.
- [82] 梁金孟, 张焱超. 香菇多糖食品改善运动员肠道功能的作用探索[J]. 中国食用菌, 2019, 38(12): 30–33.
LIANG JM, ZHANG YC. Effect of *Lentinus edodes* food on improving intestinal function of athletes [J]. *Edible Fungi China*, 2019, 38(12): 30–33.
- [83] YANG X, JI HY, FENG YY, *et al.* A novel optimization of water-soluble compound polysaccharides from Chinese herbal medicines by quantitative theory and study on its characterization and antioxidant activities [J]. *Chem Biodivers*, 2021, 18(1): e2000688.
- [84] 陈福艳, 欧阳贤华, 黎建斌, 等. 酵母多糖-中药复合制剂对罗非鱼生长、非特异性免疫及肠道结构的影响[J]. 西南农业学报, 2019, 32(11): 2712–2718.
CHEN FY, OUYANG XH, LI JB, *et al.* Effects of zymosan-Chinese herbal compound preparation on growth, non-specific immunity and intestinal structure of tilapia [J]. *Southwest China J Agric Sci*, 2019, 32(11): 2712–2718.
- [85] 董金金, 高艳霞, 李妍, 等. 酵母多糖对哺乳犊牛胃肠道发育及消化酶活性的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(12): 5247–5254.
DONG JJ, GAO YX, LI Y, *et al.* Effects of yeast polysaccharide on gastrointestinal development and digestive enzyme activity of sucking calves [J]. *Chin J Anim Nutr*, 2018, 30(12): 5247–5254.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

作者简介



徐 涵, 硕士研究生, 主要研究方向为农林食品研究与开发。
E-mail: 457525790@qq.com



阚 欢, 硕士, 教授, 主要研究方向为农林食品研究与开发。
E-mail: 13700650213@163.com