

杨茂会, 周欣, 谯政文, 等. 黄精多糖提取、分离纯化及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(12): 407–416. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060142

YANG Maohui, ZHOU Xin, QIAO Zhengwen, et al. Recent Advances in *Polygonatum* Polysaccharides: Extraction, Isolation, Purification and Bioactivities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(12): 407–416. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060142

· 专题综述 ·

黄精多糖提取、分离纯化及生物活性研究进展

杨茂会^{1,2}, 周欣^{1,2}, 谯政文³, 赵超^{1,2}, 龚小见^{1,2}, 邓青芳^{1,2}, 陈华国^{1,2,*}

(1. 贵州师范大学, 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵州贵阳 550001;

2. 贵州师范大学, 贵州省药物质量控制及评价技术工程实验室, 贵州贵阳 550001;

3. 贵阳德昌祥药业有限公司, 贵州贵阳 550201)

摘要: 黄精属于百合科黄精属的草本植物, 具有补气养阴, 健脾, 润肺, 益肾等功效。多糖是黄精主要的活性成分之一, 且含量丰富。黄精多糖作为一种药食两用的天然产物资源, 其复杂的结构和丰富的生物活性成为食品、医药等领域开发和研究的热点之一。本文主要从黄精多糖的提取、分离纯化、结构分析、生物活性等方面的研究进行综述, 并对黄精多糖的研究方向与应用前景进行展望, 以期为进一步开发利用黄精多糖提供理论参考。

关键词: 黄精多糖, 提取, 分离纯化, 结构分析, 生物活性

中图分类号: TS201.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)12-0407-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021060142

本文网刊:



Recent Advances in *Polygonatum* Polysaccharides: Extraction, Isolation, Purification and Bioactivities

YANG Maohui^{1,2}, ZHOU Xin^{1,2}, QIAO Zhengwen³, ZHAO Chao^{1,2}, GONG Xiaojian^{1,2}, DENG Qingfang^{1,2}, CHEN Huaguo^{1,2,*}

(1. Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

2. Guizhou Engineering Laboratory for Quality Control & Evaluation Technology of Medicine, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China;

3. Guiyang dechangxiang Pharmaceutical Co., Ltd., Guiyang 550201, China)

Abstract: *Polygonatum* is a herbaceous plant of *Polygonatum* in *Liliaceae*, which has the functions of tonifying Qi, nourishing Yin, strengthening spleen, moistening lung and benefiting kidney. *Polygonatum* polysaccharide is one of the main components of *Polygonatum* and *Polygonatum* is rich in polysaccharides. *Polygonatum* polysaccharide is a kind of natural product resource used as medicine and food, in which complex structure and rich biological activity have become one of the hot spots in the development and research of food, medicine and other fields. In this paper, the extraction, purification, structure analysis and bioactivities of *Polygonatum* polysaccharides are reviewed. The research direction and application prospect of *Polygonatum* polysaccharides are prospected in order to provide theoretical reference for further development and utilization of *Polygonatum* polysaccharides.

Key words: *Polygonatum* polysaccharide; extraction; purification; structure analysis; biological activity

收稿日期: 2021-06-18

基金项目: 贵州省高层次创新人才培养项目(黔科合人才[2015]4033号); 贵州师范大学培育项目(黔科合平台人才[2018]5769)。

作者简介: 杨茂会(1996-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 药用植物开发与利用, E-mail: 1651102239@qq.com。

* 通信作者: 陈华国(1981-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 中药质量控制、药物体内代谢以及药品、保健食品开发, E-mail: chenhuaguo1981@163.com。

黄精(*Polygonatum*)为百合科黄精属(*Polygonatum*)草本植物,该属的中草药在我国有 31 种^[1]。2020 版中国药典收录了 3 种黄精药材分别为滇黄精(*Polygonatum kingianum* Coll.et Hemsl., PK)、黄精(*Polygonatum sibiricum* Red., PS)、多花黄精(*Polygonatum cyrtonema* Hua., PC)^[2]。黄精根茎为药食同源的传统药材,其功效始载于晋代《名医别录》“其味甘,平,无毒。主补中益气,除分湿,安五脏,久服轻身、延年、不饥”^[3]。药典记载了黄精具有补气养阴、健脾、润肺、益肾的功效^[2]。现代研究表明,多糖是黄精主要的天然活性成分之一,且在黄精中含量最高^[4]。黄精多糖作为一种药食两用的天然产物资源,具有免疫调节、抗肿瘤、抗炎作用、降血糖、抗氧化等多种生物活性^[5-9]。因各实验室研究方法的不同,黄精多糖的获得方法以及结构特点均存在差异。本文对黄精多糖的提取、纯化与结构分析以及生物活性研究现状进行综述,以期对黄精多糖的深入研究提供科学依据。

1 黄精多糖的提取

提取黄精多糖前需要对黄精药材进行预处理,清洗黄精、切片、脱水干燥、粉碎、脱脂。脱脂试剂选用石油醚^[10]等非极性溶剂或 80% 乙醇^[11]等半极性溶剂脱脂,脱脂预处理主要脱去脂溶性物质,还可以脱除部分脂溶性色素^[12]。黄精多糖提取基本流程:黄精粉(脱脂)→提取→浓缩→乙醇沉淀→除蛋白、色素→乙醇沉淀→有机溶剂洗涤→冷冻干燥。多糖提取率受到料液比、提取次数、提取温度、提取时间、pH 等提取因素的影响,多糖的种类取决于结构类型,并与生物活性密切相关^[13]。目前,黄精多糖提取方法已有较全面的研究,传统的黄精多糖提取方法有水提法^[10, 14-15]、稀碱提取法^[16],物理强化提取方法包含超高压提取法^[17]、减压提取法^[18]、闪式提取法^[19]。

同时,微波辅助法^[20]、超声波提取法^[21]等新型辅助提取方法在黄精多糖提取中得到应用。相对于以上提取方法,酶解法通过酶解反应使细胞壁解离,从而加速植物细胞中有效成分的溶出,提高多糖的提取率^[22]。在实际应用中,为了获得提取率及活性较高的多糖成分,会将两种及以上的提取方法进行协同使用,充分发挥每种提取方法的优点。具体方法及结果见表 1。

1.1 溶剂提取法

目前,黄精多糖溶剂提取方法主要采用水提法、稀碱提取法。水提法是黄精多糖常用且简单的提取方法,粗黄精多糖提取率一般在 10% 以上^[14]。王毅等^[10]采用热水提取法,料液比 1:20、温度:80 ℃、提取时间:2 h、提取次数:3 次,黄精多糖的提取率为 19.87%。

水提法具有安全环保、操作简单、应用范围广的优点,但也存在耗时长、浸出率低、提取液用量大的缺点。

碱性条件有利于酸性多糖浸出,提高酸性多糖得率。但多糖在碱性溶液下糖苷键发生部分水解,造成多糖的损失。赵瑞萌等^[16]采用 3% NaOH 溶液提取黄精多糖,在此条件下黄精多糖的提取率为 11.89%。由于稀碱易使部分多糖发生水解,因此,稀碱液提取结束后要迅速将提取液 pH 调至中性,以免造成多糖大量损失。碱提法具有缩短提取时间、获得酸性多糖的优点,但也具有造成多糖损失、引入离子等小分子杂质、增加纯化难度的缺点。

1.2 物理强化提取法

物理强化提取方法有超高压提取法、减压提取法、闪式提取法^[17-19]。物理强化提取方法不会破坏热敏性活性物质,是一种快速高效制备黄精多糖的方法。超高压提取方法通过升压,使系统内部的压力处

表 1 黄精多糖提取方法与结果

Table 1 Methods and results of extraction of polysaccharides from *Polygonatum*

提取方法	黄精种类	提取条件	粗多糖提取率(%)	参考文献
水提取法	黄精	料液比: 1:20, 提取温度: 85 ℃, 提取时间: 2 h	12.50	[14]
	滇黄精	料液比: 1:20, 提取温度: 80 ℃, 提取时间: 2 h	13.34	[15]
碱提取法	黄精	料液比: 1:15, 粒度: 60 目, 碱液: 3%NaOH 溶液	11.89	[16]
超高压提取法	黄精	料液比: 1:17, 粒径: 40 目, 压力: 255 MPa, 提取温度: 常温, 保压时间 9.5 min, 提取溶剂: 水	25.01	[17]
减压提取法	黄精	液料比: 1:14, 提取温度 75 ℃, 提取时间 8 min, 提取次数: 2 次, 提取压力 -0.074 MPa	20.00	[18]
闪式提取法	黄精	料液比: 1:18, 提取时间: 40 s, 提取次数: 1 次, 提取电压: 50 V	14.99	[19]
微波提取法	黄精	料液比: 1:50, 浸泡时间: 60 min, 微波功率: 450 W, 提取时间: 5 min	11.82	[20]
超声提取法	滇黄精	料液比: 1:20, 提取温度: 80 ℃, 提取时间: 60 min, 提取次数: 3 次	14.09	[21]
	多花黄精	料液比: 1:47.6, 提取温度: 63.8 ℃, 提取时间: 36.9 min、超声功率: 225 W	24.61	[23]
单一酶解法	黄精	料液比: 1:22.4, 纤维素酶酶添加量: 3%, 酶解 pH: 4.6, 酶解温度: 54.8 ℃, 酶解时间: 99 min	11.22	[24]
	黄精	料液比: 1:20, 纤维素酶与木瓜蛋白酶质量比 3:7, pH: 5.0, 酶解温度: 50 ℃, 酶量: 5%, 酶解时间: 2 h	22.00	[11]
复合酶解法	黄精	料液比: 1:20, 酶解温度 50 ℃, 纤维素酶、木瓜蛋白酶加入 0.45、1.05 g/dL, pH 5.0, 酶解 2 h 后, 浸提 2 h	21.55	[25]
超声波辅助酶法	黄精	料液比: 1:30, 复合酶添加量: 6%, 酶解温度: 65 ℃, 酶解时间: 55 min	25.63	[26]
超声-微波提取法	黄精	超声功率: 50 W, 超声频率: 40 kHz, 料液比: 1:32, 微波功率: 300 W, 提取时间: 80 s	11.19	[27]

于超高压状态,不会破坏热敏性活性物质。魏炜等^[17]优化提取工艺:压力 255 MPa、保压时间 9.5 min、常温,黄精多糖提取率为 25.01%。黄精多糖提取率明显高于其他提取方法得到的多糖提取率。超高压提取方法具有提取率高、杂质少、提取速度快的优点,但设备承受压力要求较高。减压提取法采用少量解吸剂(40%及以上乙醇溶液)润湿物料,然后加入温度高于解吸剂沸点的热溶剂(热水),同时降低操作压强,使解吸剂沸腾,产生对流,强化有效成分的扩散。杨军宣等^[18]通过优化相应的工艺参数:60%乙醇解吸液,75℃热水溶剂,解吸 30 min,提取压力-0.074 MPa,提取时间 8 min,黄精多糖提取率达到 20%。减压内部沸腾提取法具有提取速度快、杂质少的优点,但存在设备、操作条件要求较高的缺点。闪式提取技术应用高速机器剪切力和分子渗滤原理,使提取剂浓度可以迅速达到平衡,数秒内完成提取过程,很大程度地保存黄精中的有效成分。陈艳等^[19]通过闪式提取法,使得多糖提取率达到 14.99%。相较于传统的提取方法,该系列提取方法具有较好的提取率;但实际操作中,对于设备、操作条件要求较高,在黄精多糖研究中较为少见。

1.3 辅助提取法

微波辅助提取法是通过微波具有较强的穿透能力,使得溶剂分子进入植物细胞后,使细胞内温度上升、压力变大。当压力超过细胞壁最大承受能力时,细胞壁发生破裂,从而释放出细胞内的有效成分。胡芳等^[20]采用微波辅助制取黄精粗多糖,在料液比为 1:50,浸泡时间:60 min,微波功率:450 W,提取时间为 5 min,提取率仅为 11.82%;而 Zhang 等^[22]用微波提取黄精多糖,提取率高达 21.5%。两者都同是采用微波法,但二者提取率却相差甚大,究其原因可能与提取温度、提取时间、微波功率、料液比、黄精种类不同有关。微波辅助提取法具有时间短、提取率高的优点,但也存在温度分布不均,提取料液比高的缺点。

超声波辅助提取法是由于超声波的机械效应、热效应和空化效应作用,增大固体颗粒与萃取溶剂之间的接触面积,加快目的物从固相转移到液相的传质速率,从而缩短了提取时间。通过超声辅助提取法获得的多花黄精多糖提取率为 24.61%^[23]。黄精种类也对粗多糖的提取率产生影响。杜泽飞等^[21]以滇黄精为原料,采用超声波提取法制取粗多糖,所得提取率为 14.09%。超声提取方法具有提取率较高、提取温度低的优点。但其所需设备复杂,超声波功率控制不当,会对粗多糖的提取率产生影响。

1.4 酶解提取法

酶具有选择性、专一性的特点。酶解法通过酶解反应解离植物细胞壁,从而加速植物细胞中有效成分的溶出。不会对多糖结构造成破坏,提高多糖提取率。酶解法可采取单一酶解法和复合酶解法提取黄

精多糖。酶解法常用的酶主要有纤维素酶、木瓜蛋白酶。杨德等^[24]采用纤维素酶提取黄精多糖,黄精多糖提取率为 11.22%。单一酶解法虽然具有选择性、专一性的特点,但多糖的提取率相对较低。复合酶的种类、配比对黄精多糖的提取产生影响,苑璐等^[25]采用复合酶解法,通过优化纤维素酶、木瓜蛋白酶配比用量,使得黄精多糖提取率可达 21.55%,是水提法得率的 2.75 倍,比单一酶提取还高出 12.06%。酶解法具有提取温度温和、效率高、酶的用量较少、专一性强、不易破坏黄精多糖的空间结构、黄精多糖产率高的优点。但为了维持酶的活性,酶解提取法对操作条件要求高。

1.5 协同提取法

超声波提取可以提高有效成分提取率,缩短提取时间,并且还可避免高温对提取成分的影响。现在的协同提取方法较多是基于超声波提取为基础,再结合其他的提取方法。充分利用超声波振动效应和其他提取方法的优点,使得协同提取速度快、能耗小,有利于极性和热不稳定性组分的提取。刘日斌等^[26]采用超声波辅助酶法,可以充分加速酶解反应,促进有效成分的溶出。超声波辅助酶法的多糖提取率明显要比常规酶法、超声波辅助提取法高,产率达到 25.63%。周桃英等^[27]将超声波和微波提取方法结合,利用超声波振动效应及微波的高能作用,黄精多糖提取率达到 11.19%。

2 黄精多糖的分离纯化

经过提取的黄精粗多糖,其中会存在蛋白质、色素等杂质,需要进一步分离纯化得到高纯度的黄精多糖。黄精粗多糖中常用脱除蛋白方法有 Sevag 法(氯仿-正丁醇的配比)、三氯乙酸法、酶法。Sevag 法是最为常用的一种脱蛋白方法,具有适用范围广、成本低、检测速率快的优点,却也存在多糖损失量大、多糖生物活性破坏大以及色素干扰多糖含量测定等缺点^[28]。三氯乙酸脱蛋白过程需要多次进行,直到黄精多糖溶液没有沉淀析出为止。三氯乙酸法具有脱蛋白效果好、三氯乙酸用量少的优点,但也会引起黄精多糖损失^[28-29]。木瓜蛋白酶法脱蛋白,然后乙醇醇沉浓缩液形成沉淀,分子质量相对较小的多肽和氨基酸则保留于溶液中,因此,酶法是黄精多糖脱蛋白较好的方法^[28]。黄精粗多糖干燥后颜色会加深,黄精多糖的脱色方法含有树脂吸附法、活性炭吸附法、氧化法。采用树脂对黄精多糖中的色素进行脱除,主要考虑到其较强的吸附能力,同时可以减少吸附黄精成分造成的损失^[30]。活性炭对大分子物质具有较强的吸附性,在吸附色素的同时会吸附大量的黄精多糖;采用 H₂O₂ 法脱色,脱色效果与活性炭无差异不显著,而黄精多糖损失率显著低于活性炭^[31]。

为进一步研究黄精多糖的单糖组成、平均分子量、糖苷键构型及特征,需要在脱蛋白、脱色素基础上,对黄精多糖进一步分离纯化。纯化多糖目的是获

得相对分子量均一的多糖。黄精多糖常用的分离纯化方法是离子交换层析法和凝胶层析分离法^[22,32-35]。离子交换层析以离子交换剂(DEAE-52、DEAE-Sephrose、DEAE-cellulose)为固定相,以不同浓度的NaCl溶液或者pH缓冲溶液为流动相进行洗脱,使不同浓度的流动相的离子与离子交换剂上的离子进行交换,从而将黄精多糖溶液中残存的蛋白、核酸与多糖进行分离,获得纯度较高的多糖。凝胶层析以三维网状结构的凝胶颗粒(Sephrose CL-6B、Sephadex G-200、Sephadex G-100)为固定相。在洗脱过程中,黄精多糖等大分子流经凝胶柱,由于直径大于凝胶网孔,只能沿着空隙随流动相流出。无机盐等小分子进入凝胶颗粒内部,流程长而移动速度慢。从而将黄精多糖与小分子进行分离,获得纯度更高的多糖。Wang等^[6]采用水提醇沉获得黄精粗多糖,用去离子水、0.05、0.2和0.5 mol/L氯化钠溶液洗脱,经DEAE-Sephrose Fast Flow (2.6×30 cm)分离纯化后,获得四种黄精多糖组分为PSP1、PSP2、PSP3和PSP4。Zhang等^[22]采用微波辅助提取法以提取多糖,经DEAE-52分离纯化,也获得四种多糖组分分别为P-1、P-2、P-3、P-4。王艳等^[32]采用碱提法,通过Sevag法脱蛋白得水溶性粗多糖(PSP),经DEAE-52纤维素层析柱洗脱,再经Sephrose CL-6B色谱柱进行纯化得黄精多糖组分PSP-1a。张庭廷等^[33]采用水提醇沉法,经DEAE-52进行分离纯化,再经Sephadex G-100纯化,得到黄精多糖组分PCP。Li等^[34]采用水提法提取滇黄精多糖,经过DEAE-Sephrose-FF进行分离纯化,然后再经Sephadex G100进行纯化,获得纯化的PKPs-1级分。

3 黄精多糖的结构分析

多糖具有分子质量大、结构复杂、化学活性不明显,因而对多糖结构分析的研究难度较大。黄精多糖的结构特征研究主要集中在单糖组成、糖链构型、链接方式、支链结构的一级结构。多糖的结构分析方法有仪器分析方法和化学方法,现代常用的仪器分析

方法为高效空间排阻色谱(high performance size exclusion chromatography, HPSEC)^[6,33]、高效液相凝胶色谱法(high performance gel filtration chromatography, HPGPC)^[22,34-35]进行平均分子量的测定;气质联用(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、高效液相色谱法(high performance liquid chromatography, HPLC)高效阴离子交换色谱法(high performance anion exchange chromatography-pulsed amperometric detector, HPAEC-PAD)进行纯度、单糖组成测定;红外光谱(infrared spectroscopy, IR)、核磁共振(nuclear magnetic resonance, NMR)对主链构型、糖链分支的结构进行分析^[6,22,32-35]。但黄精多糖结构分析的主要化学方法为甲基化反应,可以识别多糖中连接类型及其比例^[34]。不同提取、分离纯化方法及不同种类的黄精多糖平均分子量、化学特征呈现出不同的结果(表2)。

3.1 平均分子量

要测定黄精多糖的平均分子量,首先要对黄精多糖的纯度进行鉴定。目前,黄精多糖纯度鉴定与平均分子量测定普遍使用HPSEC^[6]和HPGPC^[22]。Wang等^[6]测得4个不同的黄精多糖级分PSP1、PSP2、PSP3、PSP4,平均分子量分别为4.415、2.236、7.743和6.467 kDa。Zhang等^[22]采用微波提取方法,通过分离纯化后,获得4个黄精多糖级分P-1、P-2、P-3、P-4的纯度都在70%以上;用HPGPC研究4个不同组分的均匀性,所测定的平均分子量大致在1~500 kDa。此外,Li等^[34]提取滇黄精中的多糖,通过DEAE-Sephrose-FF与Sephadex G100进行两次分离纯化,得到一种多糖组分PKPs-1,PKPs-1纯度达到80%。通过HPGPC测定PKPs-1平均分子量大小为14.05 kDa。王坤等^[35]对多花黄精多糖的分级提取中,通过分离纯化后,获得5个不同的级分PCP1、PCP2、PCP3、PCP4和PCP5,5个多糖纯度在60%~80%,平均分子量为2.09、38.6、42.6、34.3和24.1 kDa。在黄精多糖平均分子量的测定中,黄

表2 黄精多糖的结构特征

Table 2 Structural characteristics of *Polygonatum* polysaccharides

黄精种类	组分	相对分子质量(kDa)	单糖组成	物质的量比	糖苷键构型	参考文献
黄精	PSP1	4.415	Man:Glu:Gal	14.96:2.13:82.91	β -Glc残基构型	[6]
黄精	PSP2	2.236	Rha:Glu:Gal:Xyl	20.54:2.06:74.37:3.03	β -Rhap残基构型	[6]
黄精	PSP3	7.743	Gal:Rha:Man:Glu:Xyl	1.38:57.69:2.02:37.17:1.74	β -Gal残基构型	[6]
黄精	PSP4	6.467	Gal:Rha:Man:Xyl	2.00:72.63:20.74:4.63	β -Gal残基构型	[6]
黄精	P-1	—	Glc:Gal:Ara:Xyl:Rha	—	β -吡喃糖苷键	[22]
黄精	P-2,3,4	—	Glc:Gal:Ara:Xyl:Rha:Gluc	—	β -吡喃糖苷键	[22]
黄精	PSP	8.912	Fru:Glc	8.7:1	β -Fruc,Glc残基构型	[34]
滇黄精	PKPs-1	14.05	Glc:Man:GalA:Gal:GluA:Ara	7.22:1:0.16:0.11:0.05:0.02	β -1,2-Glc糖苷键	[35]
多花黄精	PCP1	2.09	Ara:Gal:Glu:Man:GluA:GalA	2.1:24:20.7:33.5:0.5:19.3	以 β -糖残基型为主,含有少量 α -糖残基型	[35]
多花黄精	PCP3	42.6	Ara:Gal:Glu:Man:Xyl:GluA:GalA	22.2:58.7:3.9:4.9:0.5:8.5:1.5	异头碳构型为 α 型	[35]

注: Glc, 葡萄糖; Gal, 半乳糖; Ara, 阿拉伯糖; Man, 甘露糖; Fru, 果糖; Rha, 鼠李糖; Xyl, 木糖; Gluc, 葡萄糖醛酸; GalA, 半乳糖醛酸; Glcp, 吡喃葡萄糖; Rhap, 吡喃鼠李糖; Fruc, 吡喃果糖; —表示无相关数据。

精多糖的种类、提取方法、测定方法的不同对黄精多糖平均分子量的测定都有影响。

3.2 结构特征

多糖的结构特征包括单糖组成、糖链构型、链接方式、支链构成。目前,黄精多糖结构分析主要在单糖组成、糖链构型方面。Wang 等^[6]分离纯化出 4 个 PSPs 组分,4 个 PSPs 组分是由半乳糖、鼠李糖、甘露糖、葡萄糖和木糖按照不同比例组成,经 IR、NMR 仪器分析 PSPs 以 β -吡喃糖残基构型存在。王艳等^[32]在碱提 PSP 基础上,分离纯化得 1 个组分 PSP-1a。PSP-1a 主要是由鼠李糖组成的杂多糖,其中含有半乳糖、葡萄糖、甘露糖。同时,PSP-1a 也存在阿拉伯糖。经 IR、NMR 仪器分析 PSP-1a 以 β -糖苷键为主链相连的杂多糖。张庭廷等^[33]对黄精多糖进行纯化后,通过外标法测得组成单糖的物质质量比为果糖:葡萄糖=8.7:1。IR 分析表明,PCP2 存在 β -吡喃糖苷键结构。王坤等^[35]采用热水和不同浓度 NaOH 溶液分步提取多花黄精多糖,用 80% 乙醇沉淀多糖得到 5 个不同组分 PCP,5 个样品都含有阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、甘露糖和半乳糖醛酸,以及少量的木糖和葡萄糖醛酸,虽单糖组成相同但含量不同。IR 分析表明,5 个不同组分的单糖是以吡喃糖环多糖的形式存在。¹³C NMR 分析表明,PCP1 糖残基构型主要是 β -糖残基构型,有少量 α -糖残基构型。碱提得到 PCP3 和 PCP5 糖残基构型主要是 α -糖残基构型。

除对黄精多糖单糖组成、糖链构型研究外,关于黄精多糖的链接方式、支链构成进入初步研究阶段。目前,主要采用甲基化分析黄精多糖链接方式、支链构成的主要位点。Li 等^[34]经 2 次纯化后获得滇黄精多糖 PKPs-1。PKPs-1 经酸水解后用 HPAEC-PAD 法测定单糖组成。PKPs-1 主要由葡萄糖、甘露糖、半乳糖醛酸、半乳糖、葡萄糖醛酸和阿拉伯糖组成,摩尔比为 7.22:1.0:0.16:0.11:0.05:0.02。其中 PSP-1a 主要是由葡萄糖组成的杂多糖。IR 光谱分析表明,PKPs-1 存在 β -糖残基构型。通过甲基化分析表明滇黄精多糖是以葡萄糖为主链链接,支链结构以(1 $\rightarrow$ 2)、(1 $\rightarrow$ 4)和(1 $\rightarrow$ 6)连接葡萄糖以及(1 $\rightarrow$ 2)连接甘露糖形成的链接方式且具有一定的重复分支结构。其次,经(1 $\rightarrow$ 3,4,6)糖苷键结合方式,还连接少量半乳糖、阿拉伯糖。

4 黄精多糖的生物活性

目前,国内外学者研究黄精多糖的生物活性主要在免疫调节、抗氧化、降血糖、抗炎、抗肿瘤等方面。黄精多糖纯度存在差异,导致黄精多糖的使用剂量不尽相同。同时,黄精多糖内存在少量杂质。这类杂质是否具有增强黄精多糖的生物活性尚不明确,给研究黄精多糖生物活性的分子机制带来很大困难。因此,研究者通过不同提取、分离纯化方法提高黄精

多糖纯度,从而更好地阐述黄精多糖的生物活性及其作用机制。

4.1 免疫调节

黄精多糖对免疫调节具有较好的作用,通过多种免疫调节途径来调控生物机体的免疫系统。Liu 等^[36]研究黄精多糖激活 RAW264.7 巨噬细胞免疫调节功能,促进溶血素的形成,增强机体的免疫调节作用;同时,研究黄精多糖(PSP)对环磷酰胺(cyclophosphamide, Cy)所诱导体内免疫调节的影响;结果表明 PSP3 可以恢复 Cy 诱导的免疫低下小鼠的脾和胸腺指标以及 T、B 淋巴细胞免疫反应。此外,Chen 等^[37]研究发现 PSP 不仅增加胸腺和脾脏指数、单核巨噬细胞的吞噬功能,而且还能增强 Cy 处理小鼠的脾淋巴细胞中白介素-2(interleukin-2, IL-2)和肿瘤坏死因子- α (tumor necrosis factor- α , TNF- α)的表达;表明黄精多糖参与 Cy 诱导小鼠的免疫抑制保护。Shu 等^[38]研究 PSP 对 Cy 诱导鸡的免疫抑制作用,PSP 能显著刺激血清免疫球蛋白,促进外周血 T 淋巴细胞增殖;PSP 能促进免疫器官细胞进入 S 期和 G2/M 期,恢复脾脏、胸腺指标;同时,PSP 上调 IL-2、IL-6 和 IFN- γ 的表达。因此,PSP 对 Cy 诱导鸡免疫系统具有较好的调节作用。

通过建立力竭训练运动模型,研究黄精多糖对于机体的免疫指标的影响。叶绍凡^[39]研究发现低(50 g/kg)、中(100 g/kg)剂量组可以提高胸腺指数、脾脏指数,提高巨噬细胞的吞噬能力,高(150 g/kg)剂量黄精多糖还能提高血液中 T 淋巴细胞亚群 CD³⁺、CD⁴⁺的含量、以及 CD⁴⁺/CD⁸⁺比例。华岩等^[40]研究表明,黄精多糖可以提升机体体液免疫功能,同时,提高机体中免疫球蛋白 IgG、IgA、IgM 的含量,增强机体免疫调节能力。

4.2 抗氧化作用

目前,多数疾病的病理过程都涉及自由基代谢失衡和脂质过氧化^[41]。自由基是人体氧化反应中产生的有害物质,具有很强的氧化性,能损伤人体组织和细胞^[42]。黄精多糖能减轻自由基、抑制脂质过氧化物产生的危害,提高抗氧化活性。原丽容等^[43]通过实验研究证明黄精多糖具有清除羟自由基($\cdot$ OH)、抑制脂质过氧化物产生的能力,且在一定剂量范围内成剂量依赖性。Li 等^[9]研究表明多花黄精多糖具有清除羟自由基、ABTS⁺自由基、DPPH 自由基以及螯合 Fe²⁺的能力和还原力,显示出一定的抗氧化活性;分离纯化出 4 种多花黄精组分 HBSS、CHSS、DASS、CASS,4 个纯化多糖组分均表现出与浓度正相关的体外抗氧化活性;DASS 抗氧化能力最优,可能因为属于酸性 β -构型多糖。Trishna 等^[44]通过 H₂O₂ 诱导肝细胞,研究表明黄精多糖显著降低肝细胞中总活性氧水平,并显示出对羟基自由基的剂量依赖性活性。宫江宁等^[45]研究表明,黄精多糖具有一定的抗氧化活性,并且对自由基的清除率均呈现浓度依赖性。

黄精多糖对自由基的清除能力顺序为 $\text{ABTS}^+ \cdot > \cdot \text{OH} > \text{DPPH} \cdot > \text{O}_2^{\cdot -}$ 。

4.3 降血糖

糖尿病是一种以高血糖为特征的代谢性疾病^[46],表现为胰岛素抵抗,胰岛素分泌不足,糖脂代谢紊乱,最终导致体内血糖含量升高。黄精多糖能够调节胰岛素分泌,改善糖脂代谢紊乱,降低血糖水平。因此,黄精多糖可作为治疗糖尿病的辅助方法^[47]。王艺等^[48]研究发现黄精多糖改善链脲佐菌素(streptozotocin, STZ)诱导的大鼠糖尿病,通过降低血糖、血清糖化血红蛋白浓度,提高组织胰岛素及 C-肽表达量、增强胰岛素敏感性,从而改善糖尿病大鼠胰岛素抵抗。王秋丽等^[49]研究多花黄精多糖对 I 型糖尿病小鼠的影响,多花黄精多糖可以升高胰岛素受体底物-1(IRS-1)mRNA 水平,降低糖尿病肝脏中免疫因子 IL-6、IL-1 β 的水平。

Gu 等^[50]研究发现,滇黄精多糖通过调节肠道微生物群组成,增加短链脂肪酸(shortchain fatty acid, SCFA)水平,改善糖脂代谢紊乱;肝脏组织中磷脂酰肌醇 3-激酶(phosphoinositide-3-kinase, PI3K)、蛋白激酶 B(protein kinase B, AKT)与胰岛素抵抗以及体内脂质代谢具有密切联系。汪光军等^[51]研究发现,对高脂饮食联合 STZ 诱导 C57 小鼠的糖脂代谢紊乱, PSP 可以增强小鼠肝脏 PI3K、AKT 的表达,发挥其保护肝脏组织正常的糖脂代谢机能的作用。贾璐等^[52]对高脂饮食诱导小鼠, PSP 可以改善血糖与胰岛素水平,并提高肝脏胰岛素受体-2(IRS-2)的表达量;同时,其能够抑制 NF- κ B-iNOS-NO 氧化应激通路,对高血糖环境下的高氧化应激状态有一定的抑制作用。孔瑕等^[53]发现黄精多糖调节肝脏中 PPAR- α 、PPAR- β 、PPAR- γ 、SREBP-1c、IL-6、TNF- α 脂类代谢相关基因和蛋白表达,起到防治糖脂代谢紊乱的作用。

4.4 抗炎作用

炎症是身体对刺激的防御反应,通过激活 Toll 样受体 4-核转录因子- κ B(TLR4-NF- κ B)信号通路,诱导炎性细胞释放炎症因子,使机体产生炎症反应。同时,也可以促进巨噬细胞释放的细胞因子,使机体产生炎症反应^[44]。黄精多糖在心肌炎症、肠炎、肾损伤模型中均有抗炎作用。黄精多糖对 STZ 诱导糖尿病大鼠心肌炎症损伤具有较好的生物活性,通过抑制 TLR4 表达进而下调 NF- κ B 信号通路,从而抑制巨噬细胞抑制因子(Macrophage inhibitory factor, MIF)释放^[44]。黄精多糖能够缓解炎症反应的能力。一方面,通过抑制 NF- κ B 通路,减少 MDA、MPO 产生,增加 SOD 含量,减少结肠氧化损伤,减轻肠道炎症反应。另一方面,黄精多糖通过降低结肠炎小鼠血清中的促炎细胞因子水平,提高抗炎细胞因子水平,对肠炎小鼠起到保护作用^[54]。此外,黄精多糖对转基因大鼠急性肾损伤有很强的保护作用,它能降低肾组

织中 NGAL 或 KIM-1 基因的表达,抑制 p38 MAPK/ATF2 信号通路和炎症因子肿瘤坏死因子- α (TNF- α)、白细胞介素-1 β (IL-1 β)和白细胞介素-6(IL-6)的产生^[55]。

4.5 抗肿瘤

黄精多糖具有较好的抗肿瘤活性。吕品田等^[56]发现黄精多糖对胃癌荷瘤小鼠的增殖具有抑制作用,通过抑制 TLR4/NF- κ B 信号通路,增加 TNF- α 、IL-2、IL-6 的免疫调节水平,发挥抑瘤作用。黄精多糖抑制 TNBC 肿瘤诱导的脾造血细胞增殖,增加 TNBC 肿瘤抑制的骨髓中的 HSPCs 和普通淋巴细胞,黄精多糖显示出持久的抗肿瘤作用^[57]。李超彦等^[58]发现,黄精多糖对 H22 肝癌移植瘤增殖和侵袭能力具有抑制作用,并能减轻顺铂引发的肝脏氧化损伤。丝裂原活化蛋白激酶(mitogen-activated protein kinase, MAPK)信号通路经过 p38 MAPK 和 MAPK 磷酸酶-1(MKP-1)信号可以传导,调控肿瘤细胞的生长、分化^[59]。研究表明,黄精多糖通过调节 TLR4 表达来抑制人食管鳞状细胞(Eca109 细胞)中的 NF- κ B 信号通路^[60],促进细胞凋亡。

此外,黄精多糖通过影响肿瘤细胞周期,阻碍肿瘤细胞基因转录,干扰肿瘤细胞分裂增殖,从而抑制肿瘤细胞转移。研究表明,黄精多糖通过影响细胞周期分布,将肝癌 H22 移植瘤细胞阻滞于 G0/G1 期,使肿瘤细胞不能进入 S 期进行 DNA 复制,从而抑制肝癌 H22 细胞增殖。此外,黄精多糖抑制肿瘤细胞下游 CDK1 和 CyclinB1 基因的表达,从而阻断 Hela 细胞周期 G2/M 期^[61]。

4.6 其他生物活性

黄精多糖除具有免疫调节、抗氧化、降血糖、抗炎、抗肿瘤的生物活性外,还具有抑菌、抗病毒、抗衰老、保护神经系统、调节心肌活性等生物活性。黄精多糖的其他生物活性详见表 3。

5 结语

目前,黄精多糖提取分离、纯化以及生物活性的研究取得了一定进展,但也存在局限性。如:黄精种类不同造成多糖提取、分离纯化方法存在差异性,部分方法提取效率低,时间长,黄精多糖纯化困难且损失较大;黄精多糖结构研究主要在初级结构方面,对黄精多糖空间构象、主链的高级结构研究较少;黄精多糖结构修饰的研究相对较少,主要取决于化学结构的复杂性;黄精多糖质量测定标准不易控制,对生物活性作用机理及其构效关系尚不明确;黄精多糖的生物活性以体外实验为主,缺乏体内实验以及临床应用,这限制黄精多糖的深入研究。因此,我们对黄精多糖的研究可从以下几点出发:a.黄精多糖采用协同提取方法提取,并将膜分离与柱层析技术有效结合,提高分离纯化效果,以获得纯度较高的黄精多糖;b.在对黄精多糖初级结构研究的基础上,采用原子力显微镜法、X-射线衍射法等方法分析黄精多糖晶型、

表 3 黄精多糖的其他生物活性
Table 3 Other biological activities of *Polygonatum* polysaccharides

生物活性	实验模型	剂量	作用	参考文献
抑菌作用	体外培养基模型	2、4、6、8、10、12、14 mg/mL	抑制枯草芽孢杆菌、金黄色葡萄球菌的活性	[9]
抗病毒	猴肾衍生细胞模型	10 mg/mL	抑制疱疹病毒的活性, 具有较好的抗病毒活性	[62]
抗衰老	AD转基因小鼠模型	40 mg/kg	提高组织细胞端粒酶活性, 达到延缓细胞衰老和凋亡的效应	[63]
	衰老小鼠模型	100、200、400 mg/kg	增强呼吸链酶的活性, 改善线粒体能量代谢, 起到延缓衰老的作用	[64]
保护神经系统	脑缺血大鼠模型	750 mg/kg	改善神经元结构, 降低前额皮质和海马区Aβ1-42的蛋白表达	[65]
	慢性脑缺血大鼠模型	—	减轻神经细胞结构紊乱, 降低前额皮质和海马区PS-1蛋白表达	[66]
调节心肌活性	力竭小鼠模型	500、1000 mg/kg	抑制心肌组织中Ca ²⁺ -ATP 酶活性, 维持细胞膜内外Ca ²⁺ 的分布平衡	[67]

注1: —表示无相关数据。

分子构型和空间构象;同时,利用计算机模拟黄精多糖的空间构象,构建黄精多糖的立体结构,为探究黄精多糖高级结构提供新的思路;c.黄精多糖单体化合物的生物活性及其作用机制研究仍相对较少;研究时应注意分析其提取、纯化活性部位,阐明其药效团的基础,为其进一步开发利用提供科学依据;d.在多种信号通路分析的基础上,从基因调控、蛋白表达、代谢组学角度去探究黄精多糖对疾病的防御机制,为深入研究黄精多糖在动物及人体的生物学作用提供科学依据。总之,黄精多糖的研究仍处于发展阶段,仍需要科研工作者从不同角度对黄精多糖进行探索研究。

参考文献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 2006(15): 52. [Editorial board of flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China[M]. Beijing: Science Press, 2006 (15): 52.]

[2] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部)[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 319. [State Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China[M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020: 319.]

[3] 陶弘景. 名医别录(尚志钧校注)[M]. 北京: 中国中医药出版社, 2013: 19–20. [TAO H J. Distinguished records of famous doctors[M]. Beijing: China traditional Chinese Medicine Press, 2013: 19–20]

[4] CHENG M E, WANG D Q. Anatomical structure and physiochemical localization about rhizome of five species of *Polygonatum* [J]. Chin H Chin Materia Med, 2013, 38(13): 2068–2072.

[5] WANG S, CUI X, CAO H, et al. A review: the bioactivities and pharmacological applications of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1170.

[6] WANG Y J, LIU N, XUE X, et al. Purification, structural characterization and *in vivo* immunoregulatory activity of a novel polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 160: 688–694.

[7] LONG T T, LIU Z J, SHANG J C, et al. *Polygonatum sibiricum* polysaccharides play anti-cancer effect through TLR4-MAPK/NF-κB signaling pathways[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018(May), 111: 813–821.

[8] SHEN F M, SONG Z J, XIE P, et al. *Polygonatum sibiricum* polysaccharide prevents depression-like behaviors by reducing oxidative stress, inflammation, and cellular and synaptic damage[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2021, 275: 114164.

[9] LI L, KIRAN T, LIAO B Y, et al. Antioxidant and antimicrobial potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtoneura* Hua [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018: 317–323.

[10] 王毅, 穆麒麟, 田小海, 等. 正交法优化黄精多糖的提取工艺[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 114–117. [WANG Y, MU Q L, TIAN X H, et al. Optimization of extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide by orthogonal design [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(15): 114–117.]

[11] 张梓原, 徐伟, 王鑫, 等. 黄精多糖的提取工艺对比研究[J]. 包装工程, 2020, 423(9): 60–67. [ZHANG Z Y, XU W, WANG X, et al. Comparative study on extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide [J]. *Packaging Engineering*, 2020, 423(9): 60–67.]

[12] 李月, 王盼, 左绍远. 植物多糖脱色工艺研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(10): 37–39. [LI Y, WANG Y, ZUO S Y. Research progress on decolorization technology of plant polysaccharides [J]. *Modern chemical industry*, 2018, 38(10): 37–39.]

[13] YUE H, ZENG H, DING K. A review of isolation methods, structure features and bioactivities of polysaccharides from *Dendrobium* species [J]. *Chinese Journal of Natural Medicines*, 2020, 18(1): 1–27.

[14] 楚冬海. 响应面分析法优化黄精多糖提取工艺及含量测定[J]. 辽宁中医杂志, 2020, 513(2): 162–165. [CHU D H. Optimization of extraction process and determination of *Polygonatum* polysaccharide by response surface methodology [J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2020, 513(2): 162–165.]

[15] 李智敏, 石瑶, 赵纯希, 等. 滇黄精多糖的提取工艺及其抗氧化活性研究[J]. 云南民族大学学报(自然科学版), 2020, 124(6): 13–18. [LI Z M, SHI Y, ZHAO C X, et al. Study on extraction technology and antioxidant activity of *Polygonatum kingianum* polysaccharide [J]. *Journal of Yunnan University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2020, 124(6): 13–18.]

[16] 赵瑞萌, 孙庭阁, 张玲. 碱法提取黄精多糖及提取工艺流程的优化[J]. 泰山医学院学报, 2010(1): 45–47. [ZHAO R M, SUN T G, ZHANG L. Optimization of alkali extraction of *Polygonatum* polysaccharide and extraction process [J]. *Journal of Taishan Medical College*, 2010(1): 45–47.]

[17] 魏炜, 李彦伟, 刘凤霞, 等. 响应面法优化超高压提取黄精多糖工艺[J]. 精细化工, 2019, 36(5): 875–881. [WEI W, LI Y

- W, LIU F X, et al. Optimization of ultra high pressure extraction of *Polygonatum* polysaccharide by response surface methodology[J]. *Fine Chemical Industry*, 2019, 36(5): 875-881.]
- [18] 杨军宣, 张毅, 吕珊珊, 等. 减压内部沸腾法提取黄精多糖的工艺[J]. *中成药*, 2016(2): 460-463. [YANG J X, ZHANG Y, LÜ S S, et al. Extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide by vacuum internal boiling method[J]. *Chinese Patent Medicine*, 2016(2): 460-463.]
- [19] 陈艳, 王杰, 李慧, 等. 黄精多糖的闪式提取及对乳酸菌发酵特性的影响[J]. *食品工业*, 2017(6): 161-166. [CHEN Y, WANG J, LI H, et al. Flash extraction of *Polygonatum* polysaccharide and its effect on fermentation characteristics of lactic acid bacteria[J]. *Food Industry*, 2017(6): 161-166.]
- [20] 胡芳, 周娟娟, 陈爱娟. 黄精多糖微波辅助提取工艺研究[J]. *现代中药研究与实践*, 2015, 29(4): 52-54. [HU F, ZHOU J J, CHEN A J. Microwave assisted extraction of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Research and Practice of Modern Chinese medicine*, 2015, 29(4): 52-54.]
- [21] 杜泽飞, 陶爱恩, 夏从龙, 等. 正交试验优选滇黄精中多糖超声提取工艺研究[J]. *海峡药学*, 2019, 236(9): 56-58. [DU Z F, TAO A E, XIA C L, et al. Optimization of ultrasonic extraction technology of polysaccharide from *Polygonatum kingianum* by orthogonal test[J]. *Strait Pharmacy*, 2019, 236(9): 56-58.]
- [22] ZHANG H, CAI X T, TIAN Q H, et al. Microwave assisted degradation of polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* and antioxidant activity[J]. *Journal of Food Science*, 2019, 4(4): 754-761.
- [23] 雍潘. 多花黄精的多糖提取, 纯化, 结构解析及活性研究[D]. 成都: 西南民族大学, 2019. [YONG P. Extraction, purification, structure elucidation and bioactivity of *Polygonatum multiflorum*[D]. Chengdu: Southwest University for Nationalities, 2019.]
- [24] 杨德, 薛淑静, 黄蕾, 等. Box-Behnken 设计优化黄精多糖酶法提取工艺[J]. *湖北农业科学*, 2017, 56(16): 3121-3124. [YANG D, XUE S J, HUANG L, et al. Optimization of enzymatic extraction process of *Polygonatum* polysaccharide by Box Behnken design[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2017, 56(16): 3121-3124.]
- [25] 苑璐, 冷凯良, 周余航, 等. 复合酶解法优化黄精多糖提取工艺[J]. *食品与生物技术学报*, 2017(9): 106-111. [YUAN L, LENG K L, ZHOU Y H, et al. Optimization of extraction process of *Polygonatum* polysaccharide by complex enzymatic hydrolysis[J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2017(9): 106-111.]
- [26] 刘日斌, 张宇鹏, 马崇坚, 等. 超声波辅助酶法优化黄精多糖提取工艺的研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(7): 141-146. [LIU R B, ZHANG Y P, MA C J, et al. Optimization of extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide by ultrasonic assisted enzymatic method[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(7): 141-146.]
- [27] 周桃英, 陈年友, 陈中建, 等. 超声波-微波协同法提取黄精多糖工艺研究[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(6): 231-233. [ZHOU T Y, CHEN N Y, CHEN Z J, et al. Study on extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide by ultrasonic microwave synergistic method[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2013, 41(6): 231-233.]
- [28] 刘小攀, 田启建, 田春莲. 黄精多糖酶法脱蛋白的工艺研究[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(1): 238-242. [LIU X P, TIAN Q J, TIAN C L. Study on enzymatic deproteinization of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(1): 238-242.]
- [29] 施伽, 杨浩, 杨思文, 等. 三氯乙酸法脱除黄精多糖中蛋白的工艺优化[J]. *安徽农学通报*, 2017, 23(6): 35-37. [SHI J, YANG H, YANG S W, et al. Optimization of protein removal from *Polygonatum* polysaccharide by trichloroacetic acid method[J]. *Anhui Agronomy Bulletin*, 2017, 23(6): 35-37.]
- [30] 李旭颖. 黄精多糖的提取工艺及提取液树脂法脱色的研究[J]. *化工管理*, 2015(26): 230. [LI X Y. Study on extraction technology of *Polygonatum* polysaccharide and decolorization of extract by resin method[J]. *Chemical Management*, 2015(26): 230.]
- [31] 梁引库, 吴三桥. 黄精多糖脱色和脱蛋白工艺研究[J]. *食品科技*, 2012(12): 166-169. [LIANG Y K, WU S Q. Decolorization and deproteinization of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Food Science and Technology*, 2012(12): 166-169.]
- [32] 王艳, 董鹏, 金晨钟, 等. 黄精多糖组成及其抗氧化活性分析[J]. *基因组学与应用生物学*, 2019, 38(5): 2191-2199. [WANG Y, DONG P, JIN C Z, et al. Composition and antioxidant activity of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2019, 38(5): 2191-2199.]
- [33] 张庭廷, 胡威, 汪好芬, 等. 九华山黄精多糖的分离纯化及化学表征[J]. *食品科学*, 2011(10): 48-51. [ZHANG T T, HU W, WANG H F, et al. Isolation, purification and chemical characterization of polysaccharides from *Polygonatum jiuhuashanense*[J]. *Food Science*, 2011(10): 48-51.]
- [34] LI R, TAO A, YANG R, et al. Structural characterization, hypoglycemic effects and antidiabetic mechanism of a novel polysaccharides from *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2020(131): 110687.
- [35] 王坤, 岳永德, 汤锋, 等. 多花黄精多糖的分级提取及结构初步分析[J]. *天然产物研究与开发*, 2014, 26(3): 364-369. [WANG K, YUE YUE Y D, TANG F, et al. Hierarchical extraction and preliminary structure analysis of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Research and Development of Natural Products*, 2014, 26(3): 364-369.]
- [36] LIU N, DONG Z, ZHU X, et al. Characterization and protective effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide against cyclophosphamide-induced immunosuppression in Balb/c mice[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 107: 796-802.
- [37] CHEN Z, LIU J, KONG X, et al. Characterization and Immunological Activities of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum*[J]. *Biological & Pharmaceutical Bulletin*, 2020, 43(6): 959-967.
- [38] SHU G, XU D, ZHAO J, et al. Protective effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide on cyclophosphamide-induced immunosuppression in chickens[J]. *Research in Veterinary Science*, 2021: 135.
- [39] 叶绍凡. 黄精多糖对力竭运动小鼠胸腺胸腺指数, 脾脏指数, T淋巴细胞亚群, 巨噬细胞吞噬功能的影响[J]. *基因组学与应用生物学*, 2015, 34(1): 60-65. [YE S F. Effects of *Poly-*

gonatum polysaccharide on thymus index, spleen index, lymphocyte subsets and phagocytic function of macrophages in exhausted exercise mice[J]. *Genomics and Applied Biology*, 2015, 34(1): 60–65.]

[40] 华岩,周碎平,梁金孟.黄精多糖对大强度运动大鼠外周血肌酸激酶,尿素氮及部分免疫指标的影响[J]. *现代预防医学*, 2019, 46(5): 875–878. [HUA Y, ZHOU X P, LIANG J M. Effects of *Polygonatum* polysaccharide on creatine kinase, urea nitrogen and some immune indexes in peripheral blood of rats with high intensity exercise[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2019, 46(5): 875–878.]

[41] HUANG H, CHEN F, LONG R, et al. The antioxidant activities *in vivo* of bitter melon polysaccharide[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019: 145.

[42] DUAN M Y, SHANG H M, CHEN S L, et al. Physicochemical properties and activities of comfrey polysaccharides extracted by different techniques[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018: 876–882.

[43] 原丽容,叶艺璐.黄精多糖体外抗氧化作用研究[J]. *海峡药学*, 2020, 241(2): 22–25. [YUAN L R, YE Y L. Study on antioxidant effect of *Polygonatum* polysaccharide *in vitro*[J]. *Taiwan Pharmaceutical*, 2020, 241(2): 22–25.]

[44] TRISHNA D, SA R P, DA H K, et al. Antioxidant and anti-inflammatory activity of *Polygonatum sibiricum* rhizome extracts[J]. *Asian Pacific Journal of Tropical Disease*, 2013, 3(4): 308–313.

[45] 宫江宁,云成悦,吴婕,等.黄精多糖的提取优化及抗氧化活性研究[J]. *贵州师范大学学报:自然科学版*, 2019, 37(3): 18–23. [GONG J N, YUN C Y, WU J, et al. Study on extraction optimization and antioxidant activity of *Polygonatum* polysaccharide[J]. *Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition*, 2019, 37(3): 18–23.]

[46] LIU Y T, YOU Y X, LI Y W, et al. The characterization, selenylation and antidiabetic activity of mycelial polysaccharides from *Catathelasma ventricosum*[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2017, 174: 72–81.

[47] LU J M, WANG Y F, YAN H L, et al. Antidiabetic effect of total saponins from *Polygonatum kingianum* in streptozotocin-induced diabetic rats[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2015, 179: 291–300.

[48] 王艺,彭国庆,江新泉,等.黄精多糖对糖尿病大鼠模型的保护机制研究[J]. *中医药导报*, 2017, 23(2): 8–16. [WANG Y, PENG G Q, JIANG X Q, et al. Protective mechanism of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides on diabetic rat model[J]. *Chinese Medicine Guide*, 2017, 23(2): 8–16.]

[49] 王秋丽,童小慧,李小东,等.多花黄精多糖对 STZ 诱导的 I 型糖尿病小鼠影响作用研究[J]. *云南中医学院学报*, 2019(1): 1–7. [WANG Q L, DONG X H, LI X D, et al. Effects of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides on STZ induced type 1 diabetic mice[J]. *Journal of Yunnan University of Traditional Chinese Medicine*, 2019(1): 1–7.]

[50] GU W, WANG Y, ZENG L, et al. Polysaccharides from *Polygonatum kingianum* improve glucose and lipid metabolism in

rats fed a high fat diet[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy=Biomedecine & Pharmacotherapie*, 2020, 125: 109910.

[51] 汪光军,李九九,何立峰,等.黄精多糖预防小鼠糖脂代谢紊乱的作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2020, 11(21): 189–196. [WANG G J, LI J J, HE L F, et al. Study on the preventive effect of *Polygonatum* polysaccharide on glucose and lipid metabolism disorder in mice[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2020, 11(21): 189–196.]

[52] 贾璐,石洁,段志倩,等.黄精多糖对高脂饲料诱发糖尿病小鼠糖代谢功能的影响[J]. *中国医药导报*, 2017, 14(8): 24–28. [JIA L, SHI J, DUAN Z Q, et al. Effects of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide on glucose metabolism in diabetic mice induced by high-fat diet[J]. *China Medical Journal*, 2017, 14(8): 24–28.]

[53] 孔瑕,刘娇娇,李慧,等.黄精多糖对高脂血症小鼠脂代谢相关基因 mRNA 及蛋白表达的影响[J]. *中国中药杂志*, 2018, 43(18): 3740–3747. [KONG X, LIU J J, LI H, et al. Effect of *Polygonatum* polysaccharide on mRNA and protein expression of lipid metabolism related genes in hyperlipidemic mice[J]. *Chinese Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2018, 43(18): 3740–3747.]

[54] 陈婷婷,王国贤,付婷婷,等.黄精多糖对 I 型糖尿病大鼠心肌炎症的保护作用[J]. *中药药理与临床*, 2015(4): 86–90. [CHEN T T, WANG G X, FU T T, et al. Protective effect of *Polygonatum* polysaccharide on myocarditis in type[J]. *Diabetic Rats, Chinese Medicine Pharmacology and Clinic*, 2015(4): 86–90.]

[55] HAN C, SUN T, LIU Y, et al. Protective effect of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides on gentamicin-induced acute kidney injury in rats via inhibiting p38 MAPK/ATF2 pathway[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020: 151.

[56] 吕品田,段昕波.黄精多糖对 MFC 胃癌荷瘤小鼠抑瘤及免疫调节作用[J]. *中成药*, 2020, 42(8): 2169–2172. [LÜ P T, DUAN X B. Antitumor and immunomodulatory effects of *Polygonatum* polysaccharide on MFC gastric cancer bearing mice[J]. *Chinese Patent Medicine*, 2020, 42(8): 2169–2172.]

[57] XIE Y, JIANG Z, YANG R, et al. Polysaccharide-rich extract from *Polygonatum sibiricum* protects hematopoiesis in bone marrow suppressed by triple negative breast cancer[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2021, 137(6): 111338.

[58] 李超彦,周媛媛,王福青.黄精多糖联合低剂量顺铂对小鼠 H22 肝癌移植瘤生长的抑制及其抗氧化损伤作用[J]. *中国老年学杂志*, 2016, 36(5): 1038–1040. [LI C Y, ZHOU Y Y, WANG F Q. Inhibitory effect of *Polygonatum* polysaccharide combined with low-dose cisplatin on the growth of H22 hepatoma xenografts in mice and its antioxidant damage[J]. *Chinese Journal of Gerontology*, 2016, 36(5): 1038–1040.]

[59] YANG S F, ZHUANG T F, SI Y M, et al. *Coriolus versicolor* mushroom polysaccharides exert immunoregulatory effects on mouse B cells via membrane Ig and TLR-4 to activate the MAPK and NF- κ B signaling pathways[J]. *Mol Immunol*, 2015(64): 144–151.

[60] ZHOU W, HONG J, ZHU J, et al. Effects of *Polygonatum sibiricum* polysaccharides (PSP) on human esophageal squamous cell carcinoma (ESCC) via NF- κ B signaling pathway[J]. *Interna-*

tional Journal of Polymer Science, 2019(8): 1–9.

[61] LI L, THAKUR K, CAO Y Y, et al. Anticancerous potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtoneura* Hua in human cervical cancer Hela cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148(1): 843–850.

[62] LIU X X, WAN Z J, SHI L, et al. Preparation and antiherpetic activities of chemically modified polysaccharides from *Polygonatum cyrtoneura* Hua[J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 83(2): 737–742.

[63] 李友元, 成威, 邓洪波, 等. 黄精多糖对 App 转基因小鼠大脑及性腺组织端粒酶活性的影响[J]. 中国新药与临床杂志, 2008, 27(11): 844–846. [LI Y Y, CHENG W, DENG H B, et al. Effect of *Polygonatum* polysaccharide on telomerase activity in brain and gonad of APP transgenic mice[J]. Chinese Journal of New Drugs and Clinical Medicine, 2008, 27(11): 844–846.]

[64] 张涛, 金英, 魏晓东, 等. 黄精多糖对衰老小鼠肝线粒体呼吸链酶及 DNA 聚合酶 γ 表达的影响[J]. 中国老年学杂志, 2009, 29(16): 2076–2077. [ZHANG T, JIN Y, WEI X D, et al. Effects

of *Polygonatum* polysaccharide on the activities of respiratory chain enzyme and expression of DNA polymerase γ in liver mitochondria of aging mice[J]. Chinese Journal of Gerontology, 2009, 29(16): 2076–2077.]

[65] 王威, 刘文博, 唐伟, 等. 黄精多糖对慢性脑缺血大鼠学习记忆及脑组织 β -淀粉样蛋白表达的影响[J]. 中医药导报, 2016, 22(16): 26–29. [WANG W, LIU W B, TANG W, et al. Effects of *Polygonatum* polysaccharide on learning and memory and β -amyloid protein expression of brain tissue in rats with chronic cerebral ischemia[J]. Guide of Traditional Chinese Medicine, 2016, 22(16): 26–29.]

[66] ZHANG H, CAO Y, CHEN L, et al. A polysaccharide from *Polygonatum sibiricum* attenuates amyloid- β -induced neurotoxicity in PC12 cells[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 117: 879–886.

[67] ZHU X Y, WU W, CHEN X Y, et al. Protective effects of *Polygonatum sibiricum* polysaccharide on acute heart failure in rats 1[J]. Acta Cirurgica Brasileira, 2018, 33(10): 868–878.