

# 玉竹多糖的结构及其生物活性研究进展

余江南, 姜慧妍, 徐遥, 徐希明

(江苏大学药学院药物/基因转运与组织工程研究中心, 江苏镇江 212013)

**摘要:** 玉竹为百合科植物玉竹 *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce 的干燥根茎, 主要分布在亚洲与欧洲大陆, 药用广泛。而多糖作为玉竹中的主要活性成分之一具有多种生物活性, 如抗氧化、抗糖尿病、增强免疫活性等。较多研究显示, 玉竹多糖的单糖组成情况、糖苷键类型、空间构型等都会影响其生物活性。本文综述了近几年来国内外在玉竹多糖的提取工艺、结构特征以及药理活性等方面的研究现状, 以期能为提高玉竹多糖的利用以及为进一步深入研究玉竹结构与活性的关系提供依据。

**关键词:** 玉竹多糖; 提取工艺; 结构特征; 药理活性; 构效关系

文章编号: 1673-9078(2018)08-273-282

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.8.040

## Structures and Bioactivities of the Polysaccharides from *Polygonatum Odoratum*: A Review

YU Jiang-nan, JIANG Hui-yan, XU Yao, XU Xi-ming

(School of Pharmacy, and Center for Drug/Gene Delivery and Tissue Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce belongs to the *Polygonatum* (Liliaceae) genus and is mainly distributed from Asia to Europe. As one of the main active ingredients in *Polygonatum odoratum*, polysaccharide has been confirmed to exhibit many pharmacological activities, such as antioxidant, antidiabetic, and enhancement of immune activity. Previous works indicated that the biological activities of *Polygonatum odoratum* polysaccharides is affected by their monosaccharide composition, the glycosidic bond type, and the space configuration. This review summarizes the technique of polysaccharide extraction, structure characteristics and pharmacological activities of *Polygonatum odoratum* achieved in the recent years, in order to provide basis for improving the extraction rate and further studying the relationship between structure and activity.

**Key words:** *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce polysaccharides; extraction process; structural characteristics; pharmacological activity; structure-activity relationship

玉竹又名葳蕤, 是百合科植物玉竹 (*Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce) 的干燥根茎, 最早被记载在《神农本草经》中, 是我国传统中药材, 为湖南省的道地药材。根状茎呈圆柱形, 略扁, 稍斜立, 具纵棱, 光滑无毛, 颜色为绿色, 有时稍微带紫红色, 半透明<sup>[1]</sup>。本草考证得出玉竹不仅具有药用价值, 还具有食用价值, 被卫生部列为药食同源物品。因为具有保健作用, 玉竹常被作为高级滋补食品、佳肴和饮料食用, 玉竹性平, 味甘, 性微寒, 具有养阴润燥、养气补血、生津润肺之功效, 用于肺胃阴伤, 干咳无痰, 内热消渴

收稿日期: 2018-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (81273470、81473172、81503025)

作者简介: 余江南 (1962-), 女, 博士, 教授, 主要从事中药高通量色谱筛选模型的建立与新药研发、药物新剂型新制剂的质量评价研究

通讯作者: 徐希明 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要从事难溶药物增溶及其缓释制剂开发、干细胞组织工程的研究

等症<sup>[2]</sup>。现代药理学研究发现, 玉竹具有降血脂、降血糖、抗氧化、改善心肌缺血、增强免疫力和抗肿瘤等作用<sup>[3]</sup>, 在治疗糖尿病、肿瘤等疾病中具有潜在的应用价值。玉竹中主要含有甾体皂苷类、氨基酸、高异黄酮类、多糖类及挥发油类等多种成分<sup>[4]</sup>。而其中, 作为含量最高的玉竹多糖是玉竹中的有效成分之一, 对玉竹多糖的提取也是对其深入研究和开发应用的基础, 最佳提取工艺的研究能够大大提高玉竹多糖的得率, 降低成本, 提高利用率。玉竹多糖具有多种药理活性, 如抗氧化、抗糖尿病和增强免疫活性等。多糖的生物活性一般都高度依赖于其结构特征, 而结构特征又与生理功能息息相关, 起到重要作用。多糖的单糖组成情况、糖苷键类型、空间构型等都是影响其活性的因素。所以, 对玉竹多糖结构的研究是其作为新型生物活性产品应用的先决条件, 近年来相关报道的发表也呈上升趋势, 表现出广泛的应用前景。因

此, 本文对近几年来国内外关于玉竹多糖提取工艺以及药理活性方面进行综述, 以期能为提高玉竹多糖的提取率以及为进一步深入研究玉竹结构与活性的关系提供依据。

## 1 玉竹多糖的提取工艺

因植物多糖属于细胞壁结构的一部分, 所以提取方法取决于细胞壁结构<sup>[5]</sup>。基本提取规则是在不改变多糖结构的情况下, 使用温和的提取条件如 pH 或温度将细胞壁从外层向里层破碎。目前玉竹多糖的提取方法主要有热水提取法、超声提取法、微波提取法、酶法提取法, 表 1 总结了玉竹多糖各种提取法工艺优化参数。

### 1.1 热水提取法

溶剂提取法是根据多糖分子量、溶解度和离子性质, 选择不同的溶剂进行提取, 常用的溶剂有热水、碱溶液和酸溶液<sup>[6,7]</sup>。传统的热水提取法(Hot water extraction, HWE)是提取多糖最常用的方法, 此法具有较好的渗透性、较高的浸出率, 安全环保、操作简单, 从而被广泛使用。然而, 热水提取法也有其局限性, 如在较长时间和较高温度下提取多次, 会对多糖的稳定性造成影响。因此, 在热水提取多糖时, 建议提取温度低于 90 °C 并且缩短提取时间, 以保持多糖完整结构和生物活性<sup>[8]</sup>。

何璐<sup>[10]</sup>等采用水提醇沉法提取玉竹多糖, 对料液比、提取温度、提取时间和乙醇浓度进行单因素试验。根据试验结果进行正交试验, 得出最佳提取工艺为料液比 1:15、提取温度为 70 °C、提取时间为 1.0 h、乙醇质量浓度为 95%, 此时玉竹多糖提取率最高, 为 8.13%。

### 1.2 辅助提取法

随着技术的发展, 加之热水提取法自身存在的不足, 其往往与其它提取方式结合进行辅助提取, 如超声提取法(Ultrasonic assisted extraction, UAE)、微波提取法(Microwave assisted extraction, MAE)、酶法提取法(Enzyme assisted extraction, EAE)等。

#### 1.2.1 超声提取法

超声提取法是通过超声使溶剂中产生的空化效应, 使细胞壁结构瞬间破裂释放有效成分, 同时超声也会产生机械效应, 通过增加固相和液相之间的接触

表面积使得溶质很快从固相快速扩散到溶剂中去。Lan 等<sup>[11]</sup>建立了超声波提取玉竹多糖的工艺。应用响应曲面法优化超声辅助提取参数, 得出最佳提取条件为超声时间 40 min, 提取次数 3 次, 固液比为 1:80。在此条件下, 与热水提取法相比, 玉竹多糖的得率可由 11.40%提高至 15.15%。并且通过测定所得玉竹多糖的分子量可知, 超声波提取可以获得更大分子量的玉竹多糖, 但大分子量多糖所占总体比例却低于热水提取法。这表明超声提取可破坏植物细胞壁致使大分子量的多糖渗透出来, 同时使部分大分子量的多糖降解转变为小分子量多糖。

#### 1.2.2 微波提取法

微波提取法是通过电磁波辐射于溶剂并穿透细胞壁, 溶剂与细胞液吸收微波能将其转化为热能, 压力增大, 当压力超过细胞壁的承受能力时, 细胞壁破裂, 有效成份从细胞内部中释放出来, 被周围的溶剂所溶解。微波提取法具有许多优点, 提取效率高, 有利于多糖的稳定<sup>[13]</sup>。

王晓林等<sup>[14]</sup>研究了玉竹多糖的微波辅助提取工艺条件。采用单因素试验和正交试验, 考察料液比、提取次数、醇沉浓度、提取时间、微波功率对玉竹多糖提取率的影响, 确定优化提取工艺条件: 醇沉浓度 85%, 提取时间 10 min, 微波功率 400 W, 提取次数 2 次, 料液比 1:20 为最佳工艺条件, 在此条件下玉竹多糖的平均提取率为 3.76%。

#### 1.2.3 酶提取法

酶辅助提取的基本原理是通过在最佳实验条件下使用酶作为催化剂进行水解破坏植物的细胞壁。酶辅助提取的影响因素主要包括反应时间, 酶的类型和浓度, 反应温度, pH 值和植物粉碎的粒度大小<sup>[15,16]</sup>。该提取方法温和, 不仅降低了对设备的腐蚀, 而且低毒性, 缩短了提取时间。由于酶辅助提取法的优点, 近年来用酶辅助提取植物多糖的报道也越来越多。

Liu 等<sup>[17]</sup>通过响应面法优化纤维素酶辅助提取玉竹多糖, 所得最佳提取参数为提取温度 58.21 °C, 提取时间 3.18 h, pH 值 5.8, 纤维素酶量 6.0%。在这些条件下, 多糖得率为 15.76%, 多糖含量为 69.94%, 都高于热水提取法。分子量测定结果表明, 纤维素酶可导致多糖糖链降解, 将大分子多糖转化为小分子多糖, 得到分子量小且分布均匀的玉竹多糖。但与热水提取法相比, 其单糖组成相似, 且都具有抗氧化和免疫调节的潜力。

表1 玉竹多糖各提取法工艺优化参数

Table 1 Several methods used for Polygonatum odoratum polysaccharides extraction

方法	固液比 (g/mL)	温度 /°C	提取时间 /min	其它提取条件	多糖得率/%	年份	参考文献
HWE	1:7.5	81.6	72.3	NA	10.82	2013	[19]
HWE	1:40	90	75	醇沉浓度 95%	8.37	2013	[20]
HWE	1:15	70	60	醇沉浓度 95%	8.13	2011	[10]
HWE	1:18.5	76	111	NA	8.82	2011	[9]
UAE	1:80	NA	40	提取 3 次	15.15	2011	[12]
UAE	1:50	NA	31	细粉过 200 目筛	8.26	2013	[21]
UAE	1:60	60	40	超声功率 90 W	8.6	2016	[11]
UAE	1:35	30	150	超声频率 90 Hz	11	2015	[22]
UAE	1:50	NA	35	超声功率 426 W	29.09	2012	[23]
MAE	1:20	70	10	提取 2 次, 微波功率 400 W	3.76	2012	[14]
EAE	1:30	58.21	190.8	pH 为 5.8, 纤维素酶浓度为 2%	15.76	2015	[17]
EAE	NA	50	125	木瓜蛋白酶 6.5 g/L	10	2013	[18]

注: NA 表示 Not Available, 没有内容, 文中没有提及。

## 2 玉竹多糖的分离纯化与结构特征

多糖的物理化学和结构特征由分子量、单糖组成、单糖序列、糖苷键的构型和位置、糖链分支的类型和聚合度、空间构型等确定<sup>[24]</sup>。多糖的结构可以分为初级结构和高级结构<sup>[25]</sup>, 初级结构又称为一级结构主要是指多糖的平面结构, 而高级结构是指多糖的立体构象。两类结构中研究最多的是一级结构, 多糖的一级结构包含很多方面如: 分子量、单糖组成及其摩尔比、有无糖醛酸和糖链连接方式等。

由于多糖结构的复杂性, 想要完全解析多糖结构非常困难, 但是仅解析多糖的一级结构则相对比较容易, 不过仍需要同时使用多种方法。多糖的结构解析方法一般分为化学分析法和仪器分析法, 化学分析法包括甲基化反应、高碘酸氧化、Smith 降解等, 仪器分析法包括高效液相色谱法、紫外分析、红外分析、质谱和核磁共振等<sup>[26]</sup>。

多糖的生物活性高度依赖其结构特征, 不同的结构能产生不同的生物活性<sup>[27]</sup>。所以对多糖初级结构和空间结构的探索是研究多糖生物学功能的前提基础, 具有十分重要的意义。迄今为止, 从玉竹的根中鉴定出总共 6 种多糖, 它们的组分名称、单糖组成、分子量和主要结构特征示于表 2 中。

目前多于玉竹多糖的结构解析还停留在简单的探索阶段。李钟等<sup>[28]</sup>用热水提取玉竹粗多糖, 乙醇分级沉淀, 收集 80%乙醇沉淀物经 DEAE-52 纤维素离子交换层析后得一 0.1 mol/L NaCl 洗脱组分, 再经

Sephadex G-100 凝胶柱层析 0.1 mol/L NaCl 洗脱分离纯化得到  $\beta$ -吡喃糖苷键连接的玉竹酸性多糖 POAP 80。经测定, POAP 80 主要含有甘露糖、葡萄糖、半乳糖醛酸、半乳糖其摩尔比为 0.93:2.65:29.38:3.47。王强等<sup>[29]</sup>采用水提醇沉法提取玉竹粗多糖, 经 DEAE-纤维素层析柱和 Sepharose CL-6B 凝胶柱纯化得到一种中性玉竹多糖, 平均分子量为  $1.21 \times 10^6$  u, 主要为甘露糖与葡萄糖, 其物质的量比为 5:1, 除此之外, 还含有少量的半乳糖。郑爽<sup>[30]</sup>将由 DEAE-52 纤维素柱蒸馏水洗脱得到的组分 POP-a 再经 Sephadex G-200 凝胶柱层析, 继续收集蒸馏水洗脱部分得 POP-a1, 其分子量大约为 2734。王海波<sup>[31]</sup>将所得玉竹粗多糖经高精度透析袋透析得到玉竹多糖 POPA-B, 再经 Sephadex G-75 柱纯化后得到一均一组分 POPS-B1, 高效液相色谱法测定 POPS-B1 平均相对分子量为 2800, 红外色谱的结果显示 POPS-B1 存在羰基、羟基等基团, 糖链构型为吡喃糖并且含有甘露糖和葡萄糖, 其摩尔比为 2.32:1。

由此可知, 玉竹多糖分子量的分布从几千至百万, 不同组分的玉竹多糖所含单糖的种类和比例也不同, 其中半乳糖、甘露糖、葡萄糖三种单糖所占比例较大, 同时有些组分还含有少量的鼠李糖、阿拉伯糖和半乳糖醛酸。玉竹多糖组分 NPOP60- I 和 POAP60- I 主要为  $\beta$  型吡喃糖构型, 其主链均有 1 $\rightarrow$ 6 连接的葡萄糖、1 $\rightarrow$ 6 连接的半乳糖, 其中 NPOP60- I 的主链还有 1 $\rightarrow$ 2 连接的葡萄糖, 而 POAP60- I 则还有 2 $\rightarrow$ 6 连接的甘露糖和 1 $\rightarrow$ 4 连接的葡萄糖<sup>[32]</sup>。

表2 玉竹多糖分离纯化及结构特征

Table 2 Isolation, purification and structural information of Polygonatum odoratum polysaccharides

组分名称	纯化方法	分子量/u	单糖组成及摩尔比	结构信息	文献
POPS-B1	高精度透析袋 (50 ku)、 Sephadex G-75	2800	葡萄糖:甘露糖=2.32:1	吡喃糖	[31]
POP-a1	DEAE-52、Sephadex G-200	2734	NA	NA	[30]
POAP 80	DEAE-52、Sephadex G-100	NA	甘露糖:葡萄糖:半乳糖醛酸:半乳糖=0.93:2.65:29.38:3.47	$\beta$ -吡喃糖	[28]
中性玉竹多糖	DEAE、Sephadex CL-4B	$1.21 \times 10^6$	甘露糖:葡萄糖=5:1	NA	[29]
NPOP60- I	DEAE-52、Sephadex G-100	NA	甘露糖:葡萄糖:半乳糖 =1.00:12.07:9.55	$\beta$ 型吡喃糖构型, 主链为 1 $\rightarrow$ 6 葡萄糖、1 $\rightarrow$ 2 葡萄糖 和 1 $\rightarrow$ 6 半乳糖, 末端残基 为甘露糖	[32]
POAP60- I	DEAE-52、Sephadex G-100	NA	甘露糖:鼠李糖:葡萄糖:半乳糖: 阿拉伯糖:半乳糖醛酸 =1.00:0.82:12.61:4.87:2.23:0.22	$\beta$ 型吡喃糖构型, 主链为 2 $\rightarrow$ 6 甘露糖、1 $\rightarrow$ 6 葡萄糖、 1 $\rightarrow$ 4 葡萄糖、1 $\rightarrow$ 6 半乳糖, 末端残基为葡萄糖 1 $\rightarrow$	[32]

注: NA 表示 Not Available 没有内容, 文中没有提及。

### 3 玉竹多糖的药理活性

玉竹多糖是玉竹中的有效成分之一, 具有多种药理活性, 主要有抗糖尿病、抗氧化、增强免疫、调节甲亢阴虚代谢紊乱等, 表3详细概括了近7年关于玉竹多糖活性的报道。

#### 3.1 抗糖尿病活性

糖尿病 (diabetes mellitus, DM) 是一种常见的代谢障碍性疾病, 由胰岛素分泌缺陷或胰岛素抵抗或两者同时导致, 其特征为高脂血症。在人体内, 血糖的产生和利用是一种动态变化的过程, 正常人的血糖值在一定范围内平衡波动。目前, 我国糖尿病的诊断标准为空腹血糖值大于 7.2 mmol/L 或是餐后血糖值大于 11.1 mmol/L。稳定的血糖值对人身体的健康意义重大, 但随着环境的变迁和生活水平的提高, 我国糖尿病的患病率飞快上升, 特别是 2 型糖尿病, 高血糖及其诱发的一系列并发症给患者带来极大的痛苦, 严重影响正常生活。临床治疗上一般采用双胍类及磺脲类等, 但随之带来的继发性性失效与副作用都限制了其应用, 如服用二甲双胍后会出现腹泻、恶心的反应, 氯磺丙脲服用时间长后容易产生低血糖等。近年来, 人们积极探索天然来源的降血糖活性成分, 目前报道已有超过 200 种的植物具有抗糖尿病的功效<sup>[33]</sup>, 其中就有包括玉竹, 而多糖作为各种抗糖尿病植物的主要活性成分, 其药效温和, 毒副作用小, 引起了许多研究者的注意。其中膳食不当造成的肥胖是导致 2 型糖

尿病产生的主要决定因素, 因此目前常用的动物模型为高糖高脂膳食饲养联合小剂量 STZ 腹腔注射诱导的糖尿病模型, 该模型能够模拟人类 2 型糖尿病发病过程和表型特征, 操作简单, 易于掌握。

王世伟等<sup>[34]</sup>利用高中低三个剂量的玉竹多糖对高脂饲料喂养联合链脲佐菌素诱导的糖尿病大鼠进行干预, 以格列本脲作为阳性药物, 结果发现玉竹多糖可以显著的降低 STZ 诱导的 2 型糖尿病大鼠的空腹血糖值 (FBG), 总胆固醇 (TC)、甘油三酯 (TG)、低密度脂蛋白 (LDL-C)、血脂指标、丙二醛 (MDA) 的水平以及提高空腹胰岛素 (FINS)、C-肽 (C-P)、糖化血红蛋白 (HbA1c) 的水平与超氧化物歧化酶 (SOD) 的活性。并表明其降血糖的作用机制可能是与抑制 p-JNK 及 p65NF- $\kappa$ B 蛋白表达, 体内氧化应激水平与炎症反应降低, 氧自由基减少了对胰岛细胞的攻击, 从而胰腺组织的损伤降低, 维持了胰岛素的分泌, 使糖代谢途径能够正常进行, 达到降低血糖来治疗糖尿病的效果。漆宇珊等<sup>[35]</sup>建立了一种肥胖模型, 研究玉竹多糖对 C57BL/6 小鼠糖脂代谢的调节作用, 奥利司他作为阳性药。实验结果显示玉竹多糖可以抑制高脂饲料导致的体重增加, 改善血脂代谢, 降低肝指数与脂肪指数。基因表达结果显示玉竹多糖可以降低肝组织与脂肪合成有关的 LPL、ACC、FAS mRNA 基因的表达水平而不影响肝脏组织 HMGCR、SREBP1C、G6P 和骨骼肌 GLUT4 mRNA 基因的表达, 从而有效改善高脂饲料喂养小鼠的肝脏脂肪代谢紊乱与肥胖。

长时间的高血糖水平会严重危及到肾、眼、足、周围神经的健康,造成一系列的并发症。在疾病开始时,视觉、肾脏和神经功能发生微小改变,随着疾病的加重,会出现视网膜病变、肾功能衰竭和周围神经病变等严重损害机体的并发症。其中有 33.5%的 2 型糖尿病患者都会发生周围神经病变,而导致糖尿病死亡率的增加<sup>[36]</sup>。同时,有报道证明高度表达的神经生长因子(NGF)是有效防治糖尿病周围神经病变的机制之一<sup>[37]</sup>。有研究表明玉竹多糖具有上调糖尿病大鼠坐骨神经 NGF mRNA 的表达水平,缓解坐骨神经损伤,防治糖尿病周围神经病变的作用<sup>[38]</sup>。

### 3.2 抗氧化活性

我们都知道,体内增加的自由基会导致 T 细胞损伤,免疫功能减弱,同时带来心血管和脑血管疾病的风险。在正常情况下,自由基调节细胞生长,抑制病毒和细菌<sup>[39]</sup>。然而过量的自由基也会引起一些人类慢性疾病,如癌症、动脉硬化和衰老等。由生物有氧代谢产生的活性氧(ROS)主要由超氧化物阴离子、过氧化氢和羟基自由基组成,低水平的 ROS 在许多生化过程中是必不可少的,例如细胞分化、细胞生长或细胞凋亡,而过多的 ROS 则可以攻击组织,破坏氧化应激反应<sup>[40]</sup>。天然提取物是一种很有前景的抗氧化剂来源,特别是多糖具有清除自由基的能力,所以它具有一定抗氧化和抗衰老活性的潜力。

研究发现,玉竹多糖对超氧阴离子( $O_2^{\cdot-}$ )与羟自由基( $\cdot OH$ )具有清除自由基的作用。王海波<sup>[31]</sup>将所得玉竹粗多糖经高精度透析袋透析得到两种玉竹多糖 POPA-A 和 POPA-B。其抗氧化实验表明两种多糖对超氧阴离子有一定的清除作用,清除能力在浓度为 2~4 mg/mL 之间,随着质量浓度逐渐增大而增强。两种多糖对羟自由基的清除也有一定效果,并且清除作用随着浓度的增大而缓慢增强。当浓度高于 4 mg/mL 时,POPS-B 的羟自由基清除能力显著增强,当浓度大于 2 mg/mL 时,其还原能力大于 POPS-A。同样,玉竹多糖对 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(DPPH)自由基与  $NO_2^-$  也具有清除作用,四者的清除能力大小为  $O_2^{\cdot-}$  > DPPH >  $NO_2^-$  >  $\cdot OH$ ,其中对  $NO_2^-$  的清除活性是 Vc 的 1.5 倍<sup>[41]</sup>。除此之外,玉竹多糖对过氧化氢( $H_2O_2$ )也具有较弱的清除作用,并且略胜于 Vc<sup>[42]</sup>。

### 3.3 增强免疫活性

疫苗接种被认为是医学上最重要的成就之一,它仍然是预防传染病的最具成本效益的方法。而免疫佐剂作为一种非特异性免疫增强剂具有显著增强疫苗免

疫原性,提高免疫应答的作用,从而直接降低疫苗的用量成本。目前临床上还只是依赖于铝为基础的复合物作为主要佐剂,产品单一。理想的免疫佐剂需无毒、对疫苗无影响、具备无致免疫性、可降解性等。目前已有报道表明铝佐剂可能会导致机体免疫功能紊乱,引起自身的免疫性疾病,铝在注射给药时也会出现红肿、结节等超敏反应,并且过量的铝会造成大脑老化出现神经方面的疾病<sup>[43]</sup>。免疫调节被认为是天然多糖的重要生物功能,它可以作为免疫调节剂或生物反应调节剂,并且绿色、无毒,是潜在的理想免疫佐剂。目前包括玉竹多糖在内的香菇多糖、黄芪多糖、茯苓多糖、猕猴桃多糖、云芝多糖等都被报道过具有免疫佐剂活性。将 H7N9 流感病毒裂解疫苗中添加玉竹多糖 POP 做佐剂一次性滴鼻免疫小鼠,免疫三周后用致死剂量的同源病毒攻击,结果显示当 POP 的添加量为 1000  $\mu g$  时能增强小鼠的抵抗力,体重减轻程度降低,存活率提高,肺部残余病毒滴度下降,血清中的疫苗特异性抗体与能中和病毒能力的抗体明显增高,表明 POP 在一定剂量下能增强疫苗诱导的免疫应答,具备粘膜佐剂效应<sup>[44]</sup>。

### 3.4 调节甲亢阴虚代谢紊乱

甲状腺机能亢进症,或甲状腺功能亢进,是由于甲状腺功能亢进或被动式释放激素引起的甲状腺激素过多。中医上则认为甲亢病是由阴虚、火旺、痰结、血瘀、气滞造成的。其中反应甲亢阴虚的指标主要有作为第一信使的三碘甲状腺素 T<sub>3</sub>、甲状腺素 T<sub>4</sub>,与作为第二信使的环磷酸腺苷(cAMP)、环磷酸鸟苷(cGMP),甲亢阴虚证会使体内的 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、cAMP 升高,cGMP 降低。常见症状为心悸、疲劳、震颤、焦虑、睡眠紊乱、体重减轻、出汗、心动过速,四肢震颤以及体重减轻<sup>[39]</sup>。中医一般采用滋阴补虚的药物进行治疗,而玉竹本身就有养阴生津的功效,进来更有报道玉竹多糖能够降低 T<sub>3</sub>、T<sub>4</sub>、cAMP、cAMP/cGMP 的含量,升高 cGMP 的含量,调节甲亢产生的能量方面、糖脂代谢方面的紊乱,预防甲亢阴虚的作用<sup>[45]</sup>。

### 3.5 其它活性

除了上述玉竹多糖所具有的药理作用以外,其在抑菌、抗肿瘤等方面也具有一定的潜力。王海波等<sup>[31]</sup>通过抑菌圈法,以抑菌圈直径大小来判定抑菌效果,测定了玉竹多糖 POPS、分离物 POPS-A 和 POPS-B 的抑菌能力,结果表明,多糖 POPS 对大肠杆菌有一定的抑制作用;多糖 POPS-B 对枯草芽孢杆菌和黑曲

霉均有一定的抑制作用。其可能的原因是微生物细胞壁上存在与糖结合的糖基、蛋白配体,当多糖聚集于菌体的表面时,影响菌体的正常代谢活动,最终导致真菌或细菌的生长繁殖被抑制,甚至死亡。

玉竹多糖的抗肿瘤效应,并不是将其直接作用于肿瘤细胞,刘玉凤等<sup>[49]</sup>将玉竹多糖与人癌细胞共培养

后,发现不同产地的7种玉竹多糖对人肺癌细胞 A549 和人胰腺癌细胞 Panc-1 均不具有明显的细胞毒性。但将玉竹多糖与抗肿瘤药物联合使用时,玉竹多糖则表现出协同抗肿瘤药物的作用,不同程度的增加了抗肿瘤药物的药效。玉竹多糖可用于抗肿瘤药物的辅助用药。

表3 玉竹多糖的生物活性

Table 3 Biological activities of polysaccharide from *Polygonatum odoratum* (Mill.) Druce

生物活性	动物模型/体外试验	作用	文献
抗氧化	体外抗氧化试验	对 DPPH·、O <sub>2</sub> <sup>-·</sup> 、·OH 和 NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> 均有一定的清除作用	[41]
抗氧化	体外抗氧化试验	对 DPPH·、O <sub>2</sub> <sup>-·</sup> 、H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> · 具有较强清除能力,对·OH 清除能力弱	[42]
免疫佐剂	滴鼻免疫方式, H7N9 感染 SPF 级 BALB/c 小鼠模型	当剂量为 1000 μg 的时候,其佐剂效应最明显,显著性地提高了血清中 IgG 抗体、HI 抗体以及 S-IgA 抗体的滴度	[46]
免疫活性/延缓衰老	衰老模型小鼠	明显改善衰老小鼠 T 细胞和 B 细胞的增殖能力,增强其对外来抗原的反应性,增加脾脏中 CD <sub>8</sub> <sup>+</sup> T 细胞数量,降低 CD <sub>4</sub> <sup>+</sup> /CD <sub>8</sub> <sup>+</sup> 比值,抑制脾淋巴细胞的凋亡	[47]
调节脂质代谢	高脂膳食 C57BL/6 小鼠	降低 LPL、ACC、FAS mRNA 表达水平,提高了 HSL 基因的 mRNA 表达水平	[35]
预防阴虚代谢紊乱	甲元阴虚大鼠模型	降低 T3、T4、cAMP、cAMP/cGMP 含量,升高 cGMP 含量	[45]
抗糖尿病	高糖高脂饲料喂养联合 STZ 诱导 2 型糖尿病大鼠模型	降低 FBG、TG、TC、LDL-C、MDA 水平,提高 FINS、C-P、HbA1c 水平及 SOD 活性,降低 p-JNK 蛋白及 p65NF-κB 蛋白的表达	[34]
抗糖尿病	高脂饲料联合 STZ 诱导糖尿病老年大鼠模型	降低 FBG、TG、TC,提高 FINS	[48]
抗糖尿病	高脂饲料联合 STZ 诱导 2 型糖尿病大鼠模型	降低 TG 及餐后 0 h 血糖,上调坐骨神经 NGF mRNA 表达水平,改善胰岛细胞坏死	[38]
抗肿瘤	体外抗肿瘤实验(人肝癌细胞 HepG-2)	硫酸酯化玉竹多糖对 HepG-2 肿瘤细胞具有明显的抑制作用	[49]
抗肿瘤	体外抗肿瘤实验(人肺癌细胞 A549 和人胰腺癌细胞 Panc-1)	不同程度的增加了抗肿瘤药物的药效,表现出协同抗肿瘤药物的药效作用	[50]
抑菌活性	抑菌圈法(扩散法)	对大肠杆菌、枯草芽孢杆菌和黑曲霉均具有抑制作用	[31]

## 4 玉竹多糖结构对活性的影响

### 4.1 玉竹多糖分子量对活性的影响

分子量的大小是影响多糖生物活性的重要因素,不同的多糖产生生物活性的分子量范围亦不同<sup>[51]</sup>。玉竹多糖中小分子量的多糖组分所占比例较大,同时也具有更好的生物活性。王海波等<sup>[31]</sup>比较了分子量大于 50 ku 的多糖组分(POPS-A)和分子量小于 50 ku 的玉竹多糖组分(POPS-B)的抗氧化活性和抑菌活性,结果显示分子量更小的 POPS-B 的超氧阴离子自由基、羟基自由基清除活性更强,并且其还原能力和抑菌活性也要强于 POPS-A。这表明分子量更小的玉竹

多糖可能具有更强的抗氧化和抑菌活性。Liu 等<sup>[17]</sup>通过不同的提取方式得到两种多糖组分 CPP 和 HPP,其中分子量分布更低且更均匀的 CPP 组分表现出比 HPP 更强的抗氧化活性。

### 4.2 玉竹多糖异头碳构型对活性的影响

多糖异头碳的构型有  $\alpha$  和  $\beta$  构型,它们同样影响着多糖的活性。研究表明  $\beta$  构型的多糖免疫活性和抗肿瘤活性较高,由于人体中存在  $\alpha$  葡萄糖苷酶,能将  $\alpha$  糖苷键特异性水解,使得只有  $\alpha$  糖苷键的葡聚糖活性较差<sup>[52]</sup>。许多活性多糖都具有  $\beta$  糖苷键,如 Kweon<sup>[53]</sup> 等从竹笋中纯化得到 3 种  $\beta$ -葡聚糖均是有效的免疫增强剂。食用菌多糖作为一类重要的生物活性物质主链

大多为  $\beta$  (1 $\rightarrow$ 3) 糖苷键, 如灵芝多糖的主链和支链上都是由  $\beta$  构型的葡萄糖组成, 具有较好的抗肿瘤活性<sup>[54]</sup>, 还有已经被成功运用于临床的香菇多糖、裂褶菌多糖等。根据前人的研究, 玉竹多糖主要由  $\beta$  构型构成, 不存在或只存在少量的  $\alpha$  构型。具有  $\beta$  构型的玉竹多糖同样具有增强免疫活性的作用, 能够促进 T 细胞和 B 细胞的增殖, 增强抗原反应性, 同时增加脾脏中 CD<sub>8</sub><sup>+</sup> T 细胞数量, 降低 CD<sub>4</sub><sup>+</sup>/CD<sub>8</sub><sup>+</sup> 比值, 改善了机体的免疫失衡状态, 并且能抑制脾淋巴细胞的凋亡<sup>[47]</sup>, 具有  $\beta$  构型的多糖可能与免疫活性存在相关性。

#### 4.3 玉竹多糖单糖组成对活性的影响

葡聚糖是自然界动植物和微生物的基本结构单元, 具有葡聚糖为主链结构的多糖常具有较好的生物活性, 如葡聚糖为主链结构的香菇多糖具有很好的抗肿瘤作用<sup>[55]</sup>。除葡聚糖为主链结构外, 含有不同种类单糖的杂多糖同样具有较好的生物活性<sup>[56]</sup>。玉竹多糖作为一种杂多糖, 主要含有葡萄糖、甘露糖、半乳糖和少量的鼠李糖和阿拉伯糖。同时, 不同的玉竹多糖组分之间所含单糖种类和各单糖比例也存在差异, 这种差异性可能是与其具有多种生物活性相关。研究表明含有更多葡萄糖的玉竹多糖组分具有更好的抗氧化活性与免疫活性<sup>[17]</sup>。

#### 4.4 玉竹多糖取代基对活性的影响

多糖的糖链上是否有取代基和取代基的种类对其生物活性也有较大的影响。取代基可通过化学修饰进行添加或者消除, 改变多糖的原有结构, 进而对其活性产生影响。常用的多糖修饰方法有硫酸化、乙酰化、磷酸化和羧甲基化等。大多数经过硫酸化的多糖其抗病毒<sup>[57]</sup>和抗肿瘤<sup>[58]</sup>等活性显著提高, 进而提高机体的免疫力, 其作用机理可能是由于硫酸根的聚阴离子作用和硫酸化后多糖立体结构的变化。而目前, 玉竹多糖的硫酸酯化的方法主要有三氧化硫-吡啶法<sup>[48]</sup>和氯磺酸-吡啶法<sup>[59]</sup>, 玉竹多糖经硫酸酯化后, 相较于直接和给药表现出更好的抗 HSV-2 病毒活性和对 HepG-2 细胞的体外抑制作用。

### 5 总结

目前玉竹多糖最常用的提取方法是水提醇沉法, 提取率可达到 8%, 方法简单, 安全环保。在此基础上, 运用一些辅助手段如超声提取、微波提取、酶提取来改进玉竹多糖的提取工艺, 其提取率在原有的基础上被大大提高。另外, 对玉竹多糖结构的解析显示其含有甘露糖与葡萄糖, 并具有  $\beta$  型吡喃糖构型, 但

目前文献还有限, 其详细的结构特征还需进一步的研究。玉竹多糖具有多种药理活性, 可作为保健食品, 并且新的活性也将继续被探索发现。目前, 玉竹多糖构效关系的系统研究还未取得较大进展, 影响了其进一步的开发利用。随着提取技术以及分析测试手段的发展, 对玉竹多糖的研究与开发应用将进一步深入。

#### 参考文献

- [1] 赵容, 许亮, 谢明, 等. 中药玉竹的本草考证[J]. 中国实验方剂学杂志, 2017, 15: 227-234  
ZHAO Rong, XU Liang, XIE Ming, et al. Textual research of *Polygonati odorati rhizoma* [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2017, 15: 227-234
- [2] 周富荣, 李振国, 王青晓. 评《中国药典》2010年版(一部)[J]. 中国药品标准, 2010, 11(2): 83-86  
ZHOU Fu-rong, LI Zhen-guo, WANG Qing-xiao. Review on volume I of pharmacopoeia of People's Republic of China (edition 2010) [J]. Drug Standards of China, 2010, 11(2): 83-86
- [3] 宁波. 玉竹有效成分的提取与纯化[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2017  
NING Bo. Extraction and purification of the active components of *Polygonatum odoratum* [D]. Jilin: Jilin Institute of Chemical Technology, 2017
- [4] 李妙然, 秦玲玲, 魏颖, 等. 玉竹化学成分与药理作用研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2015, 8: 1939-1943  
LI Miao-ran, QIN Ling-ling, WEI Ying, et al. Advances on chemical constituents and pharmacological activities of *Polygonatum odoratum* M [J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2015, 8: 1939-1943
- [5] Nie S P, Xie M Y. A review on the isolation and structure of tea polysaccharides and their bioactivities [J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(2): 144-149
- [6] Wong C Y, Al-Salami H, Dass C R. Microparticles, microcapsules and microspheres: A review of recent developments and prospects for oral delivery of insulin [J]. International Journal of Pharmaceutics, 2017, 537(1-2): 223
- [7] Jin M, Zhao K, Huang Q, et al. Isolation, structure and bioactivities of the polysaccharides from *Angelica sinensis* (Oliv.) Diels: a review [J]. Carbohydr Polym., 2012, 89(3): 713-722
- [8] Yang X, Zhao Y, Lv Y. In vivo macrophage activation and physicochemical property of the different polysaccharide fractions purified from *Angelica sinensis* [M]. Lewis

- Publishers, 2008
- [9] 彭潇波,马贯军.中心复合设计优化玉竹多糖提取工艺[J].广州化工,2011,39(14):65-66  
PENG Xiao-bo, MA Guan-jun. Optimization of the extraction of *Polygonatum Odoratum* (Mill.) druce polysaccharides by central composite design [J]. Guangzhou Chemical Industry, 2011, 39(14): 65-66
- [10] 何璐,刘莹,胡亚蕊,等.玉竹多糖提取工艺的研究[J].农业科技与装备,2011,1:28-31  
HE Lu, LIU Ying, HU Ya-rui, et al. Study on extraction process of *Polygonatum odoratum* (Mill) druce polysaccharide [J]. Agricultural Science & Technology & Equipment, 2011, 1: 28-31
- [11] 赵静,欧思阳,赵秀红.超声波提取玉竹多糖及在面条中的应用研究[J].食品研究与开发,2016,37(20):41-44  
ZHAO Jing, OU Si-yang, ZHAO Xiu-hong. A study on the extraction of polysaccharide of *Polygonatum odoratum* using ultrasonic and its application in noodles [J]. Food Research & Development, 2016, 37(20): 41-44
- [12] Lan G, Chen H, Wang Z, et al. Extraction of *Polygonatum odoratum* polysaccharides using response surface methodology and preparation of a compound beverage [J]. Carbohydrate Polymers, 2011, 86(3): 1175-1180
- [13] Balavigneswaran C K, Sujin J K T, Moses P R, et al. Anti-oxidant activity of polysaccharides extracted from *Isocrysis galbana* using RSM optimized conditions [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2013, 60(6): 100-108
- [14] 王晓林,钟方丽,杨蕾.微波法辅助提取玉竹多糖的工艺[J].食品研究与开发,2012,33(3):46-50  
WANG Xiao-lin, ZHONG Fang-li, YANG Lei. The extraction process of polysaccharide in *Polygonatum odoratum* (Mill.) druce. with microwave extraction method [J]. Food Research & Development, 2012, 33(3): 46-50
- [15] Sheldon R A, Pelt S V. Enzyme immobilisation in biocatalysis: why, what and how [J]. Chemical Society Reviews, 2013, 42(15): 6223-6235
- [16] Marić M, Grassino A N, Zhu Z, et al. An overview of the traditional and innovative approaches for pectin extraction from plant food wastes and by-products: ultrasound-, microwaves-, and enzyme-assisted extraction [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 76: 28-37
- [17] Liu X, Zhang M, Guo K, et al. Cellulase-assisted extraction, characterization and bioactivity of polysaccharides from *Polygonatum odoratum* [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 75(2): 258-265
- [18] 李钟,罗艳玲,刘塔斯.响应面法优化玉竹多糖的酶法提取工艺[J].广州中医药大学学报,2013,30(2):218-222  
LI Zhong, LUO Yan-ling, LIU Ta-si. Optimization of enzymatic extraction of crude polysaccharide from *Rhizoma polygonati odorati* by response surface methodology [J]. Journal of Guangzhou University of Traditional Chinese Medicine, 2013, 30(2): 218-222
- [19] 任雪峰,吴冬青,林敏,等.响应面分析法优化玉竹多糖提取工艺[J].光谱实验室,2013,30(6):3090-3097  
REN Xue-feng, WU Dong-Qing, LIN Min, et al. Optimum extraction of polysaccharides from *Polygonatum odoratum* (Mill) druce by response surface methodology [J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory, 2013, 30(6): 3090-3097
- [20] 贾嘉祺,王军,刘莹,等.响应面优化玉竹多糖的提取工艺研究[J].食品工程,2013,1:29-34  
JIA Jia-qi, WANG Jun, LIU Ying, et al. Optimization of the extraction of polysaccharide in *Polygonatum odoratum* by response surface methodology [J]. Food Engineering, 2013, 1: 29-34
- [21] 黄大川,华伟伟.超声波辅助提取湘玉竹多糖工艺优化[J].食品与机械,2013,6:171-175  
HUANG Da-chuan, HUA Wei-wei. Optimization of ultrasonic extraction technique for polysaccharides from hunan *Polygonatum odoratum* [J]. Food & Machinery, 2013, 6: 171-175
- [22] 吴杰,彭鹏,张猛,等.关玉竹多糖提取工艺研究[J].黑龙江畜牧兽医,2015,18:158-159  
WU Jie, PENG Peng, ZHANG Meng, et al. Study on the extraction technology of polysaccharide from *Polygonatum odoratum* druce [J]. Heilongjiang Animal Husbandry and Veterinarian, 2015, 18: 158-159
- [23] 彭永健,张安强,马新,等.玉竹多糖超声提取工艺优化及其保湿性研究[J].食品科学,2012,33(14):96-99  
PENG Yong-jian, ZHANG An-qiang, MA Xin, et al. Optimization of ultrasonic extraction process for polysaccharides from *Rhizoma polygonatiodorati* and determination of moisture retention capacity [J]. Food Science, 2012, 33(14): 96-99
- [24] Jin M, LU Z, HUANG M, et al. Sulfated modification and antioxidant activity of exopolysaccharides produced by *Enterobacter cloacae* Z0206 [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2011, 48(4): 607-612
- [25] 徐航,朱锐,刘玮,等.多糖高级结构解析方法的研究进展[J].药学进展,2015,5:364-369



- XU Hang, ZHU Rui, LIU Wei, et al. Research progress in analytical methods for advanced structures of polysaccharides [J]. *Progress in Pharmaceutical Sciences*, 2015, 5: 364-369
- [26] 阳佛送,李雪华.多糖结构研究的方法和进展[J]. *食品科技*, 2008,33(3):200-203
- YANG Fo-song, LI Xue-hua. Advances and methods in study on structure analysis of polysaccharides [J]. *Food Science & Technology*, 2008, 33(3): 200-203
- [27] Gong Y, Zhang J, Gao F, et al. Structure features and *in vitro* hypoglycemic activities of polysaccharides from different species of *Maidong* [J]. *Carbohydr Polym*, 2017, 173: 215-222
- [28] 李钟,刘敏,何镇星,等.玉竹中酸性多糖的分离纯化及单糖组成分析[J].*中国实验方剂学杂志*,2013,19(9):69-72
- LI Zhong, LIU Min, HE Zhen-xing, et al. Isolation, purification and monosaccharide analysis of an acidic polysaccharide from *Polygonatum odoratum* [J]. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*, 2013, 19(9): 69-72
- [29] 王强,李盛钰,杨帆,等.玉竹中性多糖的分离纯化及单糖组成分析[J].*食品科学*,2010,31(15):100-102
- WANG Qiang, LI Sheng-yu, YANG Fan, et al. Isolation, purification and monosaccharide analysis of a neutral polysaccharide from *Polygonatum odoratum*(Mill) Druce [J]. *Food Science*, 2010, 31(15): 100-102
- [30] 郑爽.玉竹多糖的提取、纯化及理化性质与结构分析[D].沈阳:沈阳农业大学,2016
- ZHENG Shuang. Extraction, purification, physicochemical properties and structure of polysaccharides in *Polygonatum odoratum* [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016
- [31] 王海波.玉竹多糖的提取、纯化及活性研究[D].天津:天津科技大学,2011
- WANG Hai-bo. Study on Extraction, purification and activity of polysaccharide in *Polygonatum odoratum* [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2011
- [32] 刘敏.玉竹水溶性多糖的提取动力学模型及一级结构鉴定研究[D].广州:广东药学院,2015
- LIU Min. Kinetic model of extraction and structural characterization of water-soluble polysaccharide from *Polygonatum odoratum* [D]. Guangzhou: Guangdong Pharmaceutical University, 2015
- [33] Jia W, Gao W, Tang L. Antidiabetic herbal drugs officially approved in China [J]. *Phytotherapy Research* Ptr, 2003, 17(10): 1127-1134
- [34] 王世伟,徐宁.玉竹多糖对糖尿病大鼠降糖作用及机制研究[J].*辽宁中医杂志*,2017,8:1739-1741
- WANG Shi-wei, XU Ning. Odoratan on hypoglycemic effects and mechanisms of diabetic rats [J]. *Liaoning Journal of Traditional Chinese Medicine*, 2017, 8: 1739-1741
- [35] 漆宇珊,胡一鸿,金晨钟,等.玉竹多糖对高脂膳食小鼠糖脂代谢调节作用的研究[J].*湖南农业科学*,2016,11:27-30
- QI Yu-shan, HU Yi-hong, JIN Chen-zhong, et al. Regulation of *Polygonatum odoratum* polysaccharide on glycolipid metabolism in mice induced by high fat diet [J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016, 11: 27-30
- [36] Won J C, SANG S K, KO K S, et al. Current status of diabetic peripheral neuropathy in korea: report of a hospital-based study of type 2 diabetic patients in korea by the diabetic neuropathy study group of the korean diabetes association [J]. *Diabetes & Metabolism Journal*, 2014, 38(1): 25
- [37] 何丹丹,郑毅,陈闯,等.治疗糖尿病并发症的药物研究进展[J].*中南药学*,2017,6:714-721
- HE Dan-Dan, ZHENG Yi, CHEN Chuang, et al. Recent advance in drugs for diabetic complications [J]. *Central South Pharmacy*, 2017, 6: 714-721
- [38] 王晓彤,林海雄,郭爱琳,等.玉竹及其多糖对II型糖尿病大鼠血糖血脂及坐骨神经 NGF mRNA 表达的影响[J].*中华中医药学刊*,2017,5:1177-1180
- WANG Xiao-tong, LIN Hai-xiong, GUO Ai-lin, et al. Effect of *Polygonatum odoratum* and its polysaccharide on hypoglycemic, lipid regulation and sciatic nerve's NGF mRNA expression in rats with Type II Diabetes [J]. *Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine*, 2017, 5: 1177-1180
- [39] Chen Y, YAO F, MING K, et al. Polysaccharides from traditional chinese medicines: extraction, purification, modification, and biological activity [J]. *Molecules*, 2016, 21(12): 1705
- [40] Ghosh J, Myers C E. Inhibition of arachidonate 5-lipoxygenase triggers massive apoptosis in human prostate cancer cells. [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1998, 95(22): 13182-13187
- [41] 李化强,吴菲菲,龙艳珍,等.湘玉竹多糖的体外抗氧化活性研究[J].*食品安全质量检测学报*,2017,8(8):3062-3067
- LI Hua-qiang, WU Fei-fei, LONG Yan-zhen, et al. *In vitro* antioxidative effects of *Polygonatum odoratum*

- polysaccharides [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2017, 8(8): 3062-3067
- [42] 宁慧,李会宁,杨培君.玉竹多糖的抗氧化作用研究[J].陕西理工大学学报(自然科学版),2013,6:59-65  
NING Hui, LI Hui-ning, YANG Pei-jun. Antioxidant effect of polysaccharides in *Polygonatum odoratum* [J]. Journal of Shanxi University of Technology(Natural Science Edition), 2013, 6: 59-65
- [43] 李倩.板蓝根多糖免疫佐剂功能及机理研究[D].长春:吉林大学,2013  
LI Qian. Adjuvant activity and mechanism of polysaccharide from *Isatis indigotica* [D]. Changchun: Jilin University, 2013
- [44] De L S, Lee S Y, Braverman L E. Hyperthyroidism [J]. The Lancet, 2016, 388(10047): 906-918
- [45] 周亚敏,肖榕,胡玉珍,等.玉竹多糖对甲亢阴虚型大鼠干预的血清代谢组学研究[J].中国药学杂志,2017,14:1263-1268  
ZHOU Ya-min, XIAO Rong, HU Yu-zhen, et al. Metabolomic study of *Polygonatum odoratum* polysaccharide on hyperthyroidism Yin-deficiency rats based on GC-MS metabonomics [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2017, 14: 1263-1268
- [46] 黄生波.玉竹多糖对 H7N9 流感病毒裂解疫苗粘膜免疫的佐剂效力研究[D].长沙:湖南师范大学,2016  
HUANG Sheng-bo. Adjuvant efficacy of polygonatum polysaccharides for intranasally administered H7N9 influenza split vaccine [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2016
- [47] 单颖,姜东,潘兴瑜,等.玉竹多糖对衰老模型鼠免疫功能的影响[J].中国老年学,2007,27(1):20-22  
SHAN Ying, JIANG Dong, PAN Xing-yu, et al. The effect of *Polygonatum odoratum* polysaccharide on the immunological function of the aging model mice [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2007, 27(1): 20-22
- [48] 杨铁琦,李军鹤,桂海棠,等.玉竹多糖对糖尿病老年大鼠体重及血糖、血脂水平的影响[J].中国老年学,2015,35(18): 5056-5057  
YANG Tie-qi, LI Jun-ge, GUI Hai-ying, et al. Effect of *Polygonatum odoratum* polysaccharide on weight, serum glucose and blood lipid levels of the diabetes aged rats [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2015, 35(18): 5056-5057
- [49] 王强,李钟,张维维,等.玉竹多糖的硫酸酯化及其对 HepG-2 细胞体外抑制活性研究[J].广东药学院学报,2015,31(5): 585-588  
WANG Qiang, LI Zhong, ZHANG Wei-wei, et al. Sulfated modification of water-soluble *Polygonatum odoratum* polysaccharides and its inhibiting effect on growth of HepG-2 cells *in vitro* [J]. Journal of Guangdong Pharmaceutical University, 2015, 31(5): 585-588
- [50] 刘玉凤,李霞,许丽丽,等.玉竹多糖含量测定及其生物活性研究[J].时珍国医国药,2015,11:2589-2591  
LIU Yu-feng, LI Xia, XU Li-li, et al. Determination of polysaccharide from *Polygonatum odoratum* and its biological activity [J]. Lishizhen Medicine and Materia Medica Research, 2015, 11: 2589-2591
- [51] 刘淑贞,周文果,叶伟建,等.活性多糖的生物活性及构效关系研究进展[J].食品研究与开发,2017,38(18):211-218  
LIU Shu-zhen, ZHOU Wen-guo, YE Wei-jian, et al. Research advance on biological activity and structure-activity relationships of bioactive polysaccharide [J]. Food Research & Development, 2017, 38(18): 211-218
- [52] 王黎明.植物活性多糖构效关系研究进展[J].安徽农学通报,2008,14(23):45-46  
WANG Li-ming. Research progress on the structure-activity relationship of plant active polysaccharides [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2008, 14(23): 45-46
- [53] Kweon M H, Hwang H J, Sung H C. Isolation and characterization of anticomplementary beta-glucans from the shoots of bamboo *Phyllostachys edulis* [J]. Planta Medica, 2003, 69(1): 56-62
- [54] 刘高强,王晓玲.灵芝多糖的抗癌构效关系及其抗癌作用机制[J].菌物学报,2006,25(3):430-438  
LIU Gao-qiang, WANG Xiao-ling. Structure-activity relationship and anticancer mechanisms of *Ganoderma lucidum* polysaccharides [J]. Mycosystema, 2006, 25(3): 430-438
- [55] 黄卉,王弘,刘欣.多糖的构效关系研究进展[J].现代食品科技,2004,20(3):159-161  
HUANG Hui, WANG Hong, LIU Xin. Study advances in the structure activity relationship of polysaccharide [J]. Guangzhou Food Science & Technology, 2004, 20(3): 159-161
- [56] Rosicka-Kaczmarek J, Komisarczyk A, Nebesny E. Heteropolysaccharide preparations from rye and wheat bran as sources of antioxidants [J]. Journal of Cereal Science, 2018, 81: 37-43
- [57] Ghosh T, Chattopadhyay K, Marschall M, et al. Focus on antivirally active sulfated polysaccharides: from structure-activity analysis to clinical evaluation [J]. Glycobiology, 2009, 19(1): 2-15
- [58] Ji C F, Ji Y B, Meng D Y. Sulfated modification and anti-tumor activity of laminarin [J]. Experimental &

- Therapeutic Medicine, 2013, 6(5): 1259-1264
- [59] 杨敏,蒙义文.大玉竹低聚糖硫酸酯抗 HSV-2 病毒活性的研究[J].应用与环境生物学报,2000,6(5):483-486
- YANG Min, MENG Yi-wen. Study on antivirus activity of sulfated *Polygonatum Odoratum* oligosaccharide [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2000, 6(5): 483-486

现代食品科技