DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2025.09.026

松属植物多糖研究进展

朱阳东,丁金铭,黄一真,周明,吴建林,闫滨
(山东中医药大学,山东 济南 250355)

摘要:松属植物多糖(Pine plant polysaccharides,PPPS)具有复杂的结构特征和多种生物活性,如免疫调节、抗肿瘤、抗氧化、调节血糖等功能。越来越多的研究表明,多糖是松属植物的主要活性成分之一,并且在松属植物的药用价值中发挥着不可或缺的作用。近年来针对松属植物多糖开展了大量研究,包括松属植物多糖的提取、分离、结构鉴定以及生物活性等。但是目前对松属植物多糖的研究还不够深入,对于多糖结构仅做了初步解析,活性的研究只采用了粗制多糖,并作了简单的药效评价,具体的作用机制和多糖的构效关系也不明确。目前对松属植物多糖的提取主要使用热水浸提法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法、酶辅助提取法等工艺;在纯化方法方面,主要采用阴离子交换色谱和葡聚糖凝胶色谱等方法;在化学结构解析方面,主要研究了分子量、单糖组成及比例、连接方式等;在生物活性方面,研究了免疫调节、抗病毒、抗肿瘤等活性。总结了近10年该领域的研究资料,对松属植物多糖的研究背景、提取、纯化、结构特征和生物活性进行梳理总结,以期为松属植物多糖的研究提供一些研究前景。

关键词:松属植物;多糖;提取分离;结构;生物活性
中图分类号:R282.71 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2025)09-0143-07

Research Progress of Pine Plant Polysaccharides

ZHU Yangdong,DING Jinming,HUANG Yizhen,ZHOU Ming,WU Jianlin,YAN Bin
(Shandong University of Traditional Chinese Medicine,Jinan 250355,Shandong,China)

Abstract:Pine plant polysaccharides(PPPS) have complex structural characteristics and various biological activities,such as immune regulation,anti-tumor,anti-oxidation and regulation of blood glucose. More and more studies have shown that polysaccharides are one of the main active ingredients of pine plants and play an indispensable role in the medicinal value of pine plants. In recent years,a large number of studies have been carried out on PPPS,including the extraction,separation,structural identification and activity research of PPPS. However,at present,the research on PPPS is not deep enough. The structure of polysaccharides is only preliminarily analyzed. The crude polysaccharides are used in the study of activity,and only simple efficacy evaluation is made. The specific mechanism of action and the structure-activity relationship of polysaccharides are not clear. At present,the extraction of PPPS mainly uses hot water extraction,ultrasonic assisted extraction,microwave assisted extraction,enzyme assisted extraction and other processes. In terms of purification methods,anion exchange chromatography and dextran gel chromatography were mainly used. In the aspect of chemical structure analysis,the molecular weight,monosaccharide composition and proportion,connection mode and so on were mainly studied. In terms of biological activity,the activities of immune regulation,anti-virus and anti-tumor were studied. This paper summarized the research data in this field in the past ten years as well as the research background,extraction,purification,structural characteristics and biological activity of PPPS,in order to provide some research prospects for the study of PPPS.

Keywords:pine plants;polysaccharide;extraction separation;structure;biological activity

基金项目:国家自然科学基金项目(82374311);国家科技部重点研发项目(2016YFC0800908);国家科技部重大研究专项(2014ZX09509);山东省重点研发项目(2017CXGC1305)
作者简介:朱阳东(2000-),男,山东济宁人,硕士在读,研究方向:中药化学。
通讯作者:闫滨(1971-),男,山东济南人,副教授,硕士研究生导师,硕士,研究方向:中药化学。E-mail:robinyan2002@163.com。吴建林(1976-),男,山东济南人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向:中医临床与实验研究。E-mail:wujianlin2018@163.com。

松树为松科松属的植物,我国松树品种多、分布广、易于采集,主要有华山松、马尾松、雪松、油松和红松等品种[1]。马尾松等松树被《名医别录》列入上品药材,入药部位包括松枝、松针、松树皮、松脂、松香、松节油、松花粉和松仁等[2]。随着对松树不同入药部位的不断研究,许多活性成分被发现,如黄酮类、挥发油、糖类等多种化学成分。黄酮类化合物一直是研究的重点,目前已发现大量的黄酮单体化合物,主要是杨梅素、槲皮素、山柰酚和异鼠李素等,黄酮类化合物具有多种的生理功能,例如抗氧化、抗炎、抗肿瘤、降血糖、调节心脑血管、清热解毒、降血脂和抗疲劳等作用[3]。此外对松树挥发油的研究也取得了一些进展,松树挥发油里主要含有α-蒎烯、β-蒎烯、

茨烯等,松树挥发油主要有抗肿瘤、抗炎、抗氧化等生理活性[4]。

多糖类物质长期以来被认为是一种没有生物活性的杂质而被去除。然而,越来越多的研究表明,多糖具有抗肿瘤、抗病毒、抗氧化、免疫调节等活性,并且具有对机体不良反应小、无残留、不产生耐药性等优点[5]。松属植物来源的多糖种类繁多,结构复杂,松树的松仁、松针、花粉、松子壳等都含有多糖,不同种类松树的多糖含量也存在差异[6]。本文综述了松属植物多糖(Pine plant polysaccharides,PPPS)的提取、纯化、结构特征和生物活性的研究进展。通过对 PPPS 的综述,可以为开发药用或功能性食品多糖提供更多的科学证据。

1 松属植物多糖主要的来源部位

松树各部位都含有多糖,但来源主要是松仁、松针、松花粉、松子壳、松塔 5 个部分,可见表 1。从目前研究结果分析,PPPS 的总体含量较少,低于该属植物中的油脂与蛋白质含量,并且不同部位、不同品种的 PPPS 含量和生理活性具有一定的差异,例如湿地松松针中多糖的含量高于马尾松和黑松,红松松塔多糖的抗氧化能力强于华山松和樟子松,并且要好于其他部位[7-8]。

表 1 松属植物多糖分布部位

部位	松树品种
松仁	红松
松针	红松、马尾松、湿地松、黑松、雪松、火炬松
松花粉	马尾松、泰山松、油松、湿地松
松子壳	红松、华山松、油松、白松、五叶松
松塔	红松、华山松、油松、白松、五叶松

2 松属植物多糖的提取工艺

目前已对松属植物不同部位(松子壳、松针、松塔和松仁等)中的多糖类成分的提取工艺进行了探索。文献所报道的 PPPS 提取方法主要有溶剂提取法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法以及酶解辅助提取法等,一般情况下多糖得率被作为评价多糖提取效率的重要指标[9],该属植物多糖类成分提取、脱蛋白及脱色方法的研究见表 2,对比提取 PPPS 所使用的方法,发现超声辅助提取和酶提取可以显著提高多糖的提取效率,并且缩短了提取的时间。

3 松属植物多糖的分离纯化

植物粗多糖提取物中一般会含有较多杂质,如脂质、色素、蛋白质和多肽等;这些杂质的存在会在一定程度上影响多糖的结构表征、理化性质及生物活性等。因此,对粗多糖进行分离除杂和纯化是进一步分析多糖结构及深入研究其功能活性的必要过程[34]。对松属植物多糖的分离纯化方法进行总结,见表 3。目前已报道的松属植物多糖的除蛋白方法主要是 TCA 法和 Sevag 法,也有酶 - Sevag 法,与传统方法比较酶 - Sevag 法对多糖的损耗小,蛋白去除率高。对于色素的去除,研究发现活性炭吸附对多糖的损耗很大,过氧化氢法容易降解多糖,用 DEAE 柱色谱既能分离多糖的同时还可以去除色素。

4 松属植物多糖的结构

4.1 松属植物多糖的组成表征 目前对 PPPS 研究发现,PPPS 含有中性多糖和果胶。中性多糖是 PPPS 的主要成分,在松花粉中含量最高,主要包括淀粉样蛋白混合物、右旋糖酐和阿拉伯半乳聚糖。酸性多糖在PPPS中只占一小部分。酸性

表 2 松属植物多糖提取工艺

部位	方法	提取条件	得率/(%)
松子壳	超声辅助提取	60 ℃,30 min,料液比 1∶40,提取 2 次	[10]
	超声辅助提取	80 ℃,40 min,料液比 1∶3,提取 2 次	2.37[11]
	超声辅助提取	85 ℃,45 min,料液比 1∶6,提取 2 次	[12]
	热水浸提	80 ℃,2 h,料液比 1∶3.5,提取 2 次	[13]
	热水浸提	100 ℃,2 h,料液比 1∶15,提取 3 次	2.90[14]
松针	超声酶法提取	80 ℃,47 min,料液比 1∶20,提取 2 次,超声功率 560 W,纤维素酶 12 FPU/g	10.39[15]
	超声辅助提取	91 ℃,超声 25 min,浸提 1 h,料液比 1∶25	1.86[16]
	超声辅助提取	90 ℃,2 h,料液比 1∶80,超声功率为 130 W	2.47[17]
	微波辅助提取	90 ℃,10 min,料液比 1∶14,提取 2 次,超声功率 800 W	2.16[18]
	微波辅助提取	150 s,料液比 1∶30,提取 2 次,微波功率 800 W	3.92[19]
	热水浸提法	100 ℃,3 h,pH 值 6,料液比 1∶14	4.02[7]
	热水浸提法	90 ℃,4 h,料液比 1∶25	2.85[20]
	内部沸腾法	90 ℃,5 min,料液比 1∶30,乙醇体积分数 40%	7.13[21]
	复合酶法提取	50 ℃酶解,料液比 1∶20,pH 6.5,2.5% 纤维素酶,酶解 2 h,1.5% 果胶酶,酶解 1.5 h	6.17[22]
松塔	热水浸提法	100 ℃,4 h,料液比 1∶12	1.52[23]
	热回流提取	100 ℃,8 h,料液比 1∶30	1.12[24]
松仁	超声辅助提取	90 ℃,35 min,料液比 1∶45,超声功率 800 W	9.80[25]
	微波辅助提取	料液比 1∶15,微波功率 320 W,微波 5 min,浸泡 60 min	6.01[26]
	热水浸提法	90 ℃,3 h,料液比 1∶20	6.26[27]
	超声波辅助提取	90 ℃,35 min,料液比 1∶45,超声波功率为 800 W	10.74[27]
	热水浸提法	95 ℃,1.5 h,料液比 1∶40,提取 3 次	9.26[28]
松花粉	超声破壁提取	80 ℃,10 min,料液比 1∶12,超声功率 400 W	1.84[29]
	热水浸提法	90 ℃,pH 9.0,料液比 1∶30	6.50[30]
	热水浸提法	90 ℃,3 h,料液比 1∶25	1.40[31]
	热水浸提法	70 ℃,2 h,料液比 1∶12,提取 3 次	1.81[32]
	热水浸提法	85 ℃,2 h,料液比 1∶15,提取 4 次	1.70[33]

多糖被认为是含有鼠李糖和半乳糖醛酸的果胶。果胶是一种酸性杂多糖的混合物,主要由 Gal、Gala、Rha、Ara 等组成,含有 RG、HG 和 AG 结构域。果胶中阿拉伯糖的常见连接键为 α-1,5 和 α-1,3,5 键。半乳糖主要通过 β-1,3 连接;β-1,6;β-1,3,6;和 β-1,4 键。半乳糖醛酸与 α-1,4 键相连,并伴有不同程度的甲基化和乙酰化。鼠李糖通常与 α-1,2 和 α-1,2,4-键相连[35-36]。

4.2 结构分析 解析 PPPS 的结构,是进行 PPPS 构-效关系研究的基础,对于深入探讨其生理功能的作用机制,以及深度利用和开发 PPPS 具有重要意义。到目前为止,已从松属植物中分离鉴定出 30 多种多糖,其分子量、单糖组成及摩尔比、生物活性,见表 3。目前,对松属植物多糖的结构解析还不足,大部分研究集中在单糖组成上,对单糖连接方式的研究还很少。

PPPS 结构分析需要酶法或化学方法(酸水解、甲基化、高碘酸盐氧化、Smith 降解、乙酰化等)结合物理方法。酶法和化学方法一般只用于多糖一级结构的测定,例如分子量测定、单糖组成、分子比例以及羟基连接方式等,物理方法有红外光谱、核磁共振(NMR)光谱和质谱。红外光谱主要用于鉴定多糖官能团和糖苷键的结构和糖类型。核磁共振波谱主要用于确定糖苷键的类型和重复结构中单糖的数量。质谱法主要用于测量分子量、糖片段的性质以及还原糖和非还原糖的存在。松属植物多糖的高级结构目前可用原子力显微镜、电子扫描显微镜和圆二色谱法进行检测,但是多糖的结构还是过于复杂,难以解析[37-38]。

表 3 松属植物多糖结构表征及其生理活性

种类部位	名称	单糖组成	相应组成比例	分子质量 Dal	分离纯化方法	生物活性
红松松仁	PNP1-a	葡萄糖:鼠李糖	2.57:1.00	1.02×10^5	15% TCA 脱蛋白,DEAE-52 阴离子交换柱层析,Sephadex G-100 柱纯化	免疫调节[27]
	PNP1-b	葡萄糖:阿拉伯糖	4.03:1.00	1.43×10^4		
	PNP2-a	葡萄糖	/	1.10×10^5		
	PNP3-a	葡萄糖	/	1.63×10^5		
红松松仁	PNP40c-1	葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖	0.52:2.98:1.00	2.06×10^5	15% TCA 脱蛋白,DEAE-52 阴离子交换柱层析,Sephacryl S-400 柱纯化	保肝作用抗炎[28]
云南松松塔	云南松塔多糖	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖:岩藻糖	0.63:1.10:1.11:0.14:0.04:1.80:1.00:0.60:0.09	/		抗病毒[29]
红松松塔	PKP-A-3b	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:木糖:核糖	1.25:0.78:0.50:0.29:0.38:0.25:0.21	2.86×10^5	10% TCA 脱蛋白,DEAE-52 阴离子交换柱层析,Sephadex G-200 柱纯化	抗氧化[39]
红松松塔	PKP-D70-2-a	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	36.32:19.23:10.67:13.6:20.18	3.04×10^6	6% TCA 脱蛋白,DEAE-52 阴离子交换柱层析,Sephadex G-100 柱纯化	抗氧化[40]
	PKP-D70-2-b	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖	23.10:27.19:13.68:36.03	2.54×10^6		
红松松塔	PKP-E-1-1	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	7.11:2.38:4.70:5.14:3.42	1.09×10^7	10% TCA 脱蛋白,DEAE-52 阴离子交换柱层析,Sephadex G-100 柱纯化	抗氧化[41]
	PKP-E-1-2	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	6.10:1.11:4.91:2.30:7.15	3.69×10^6		
	PKP-E-2-1	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	16.40:10.69:6.74:7.12:9.48	1.83×10^6		
	PKP-E-2-2	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	2.88:0.76:2.18:1.08:2.70	1.72×10^6		
红松松塔	PKP	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:木糖	8.66:3.61:1.73:1.34:2.59:0.39	/	6% TCA 脱蛋白,6% 过氧化氢脱色,冰乙酸:氯仿:95% 乙醇=2:5:1 作为展开剂,进行薄层层析	抗氧化抑菌[42]
红松松塔	PSP-I	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖	12.27:40.79:3.34:1.60:39.52:1.81:0.67	1.2×10^4	sevag 法脱蛋白质,DEAE-Sephacel 阴离子交性炭法脱色,换柱层析,Sephadex G-200 葡聚糖凝胶柱纯化	免疫调节[43]
偃松松塔	PPCP	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖	1.94:2.20:2.33:1.00	1.89×10^5	/	抗氧化免疫调节[44]
雪松松针	雪松粗多糖	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:果糖	1.00:27.51:1.29:1.70:4.86	/	/	抗氧化[46]
	雪松纯化多糖	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:果糖	1.00:23.02:1.22:5.40:1.22	/	酶法与 Sevage 法联用脱蛋白,双氧水与活性炭联用除色素	
雪松松针	APC	葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:木糖	37.53:1:4.32:0.93:0.91	1.53×10^4	Sevage 试剂脱蛋白,透析	抗氧化[45]
红松松子壳	PPSPⅠ-b	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:木糖	18.35:10.67:1.40:3.40:7.82:0.79	/	活性炭吸附,超滤,木瓜蛋白酶与 Sevage 联用脱蛋白,D101 大孔树脂脱色,透析,DEAE-52 离子交换柱层析	抗氧化[46]
	PPSPⅠ-1	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	6.91:10.60:2.30:0.96:10.60	/		
	PPSPⅠ-2	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	0.55:0.28:0.16:0.26:0.28	/		
	PPSPⅠ-4	葡萄糖	/	/		
红松松子壳	PPSP2-2	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖:岩藻糖	20.2:11.0:18.4:12.2:7.2:11.8:3.6:10.5:5.1	1.89×10^3	木瓜蛋白酶与 Sevag 法联用脱蛋白,大孔吸附树脂除色素,DEAE-52 阴离子交换柱层析,透析袋去除小分子杂质,Sephadex G-150 柱纯化	抗氧化[11]
	PPSP3-1	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖:岩藻糖	9.1:23.8:5.2:5.6:4.6:44.9:2.9:2.5:1.3	2.84×10^3		
红松松子壳	PPSP1				大孔吸附树脂去色素,DEAE-Bestarose FF 阴离子交换柱层析,超滤脱盐与去除小分子杂质	抗肿瘤[12]

续表 3 松属植物多糖结构表征及其生理活性

种类部位	名称	单糖组成	相应组成比例	分子质量 Dal	分离纯化方法	生物活性
马尾松松花粉	MTP1 - A	葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖	0.43 : 0.33 : 1		Sevage 试剂脱蛋白,DEAE - Sephadex A - 25 阴离子交换柱层析,Sephadex G - 75 柱纯化	抗氧化抗肿瘤[33]
	MTP4 - A	葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖	1 : 0.30 : 0.14 : 0.11			
马尾松松花粉	PPM60	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖	1 : 0.36 : 1.194 : 0.03			心肌保护免疫调节[47]
马尾松松花粉	MPP60 - B - Ⅱ	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:岩藻糖	1.16 : 1 : 5.2 : 1.72 : 6.66	2.08×10^5	Sevage 法除蛋白,乙醇分级沉淀法初步分离多糖后,采用 Sephacryl S - 400HR 凝胶柱层析法对多糖进行分离纯化	[48]
泰山马尾松松花粉	TPPPS1	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:核糖	1.46 : 2.01 : 1.23 : 1.35 : 0.38 : 1.42 : 2.15	5.6×10^4	DEAE - 52 阴离子交换柱层析,Sephadex G - 200 柱纯化	免疫调节抗氧化抗病毒[49]
	TPPPS2	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖	0.53 : 1.99 : 1.44 : 1.65 : 0.79 : 0.98 : 2.62	2.5×10^4		
	TPPPS3	葡萄糖:阿拉伯糖:甘露糖:半乳糖醛酸:葡萄糖醛酸:木糖:核糖	1.33 : 2.63 : 0.29 : 1.03 : 1.52 : 1.35 : 1.85	1.28×10^4		
油松松花粉	油松花粉多糖	半乳糖:葡萄糖:阿拉伯糖:鼠李糖:甘露糖:木糖	0.86 : 0.63 : 0.2 : 1 : 0.15 : 0.14		过氧化氢脱色,Sephadex G - 100 柱纯化	抗氧化[31]
油松松花粉	D11 D31			7.64×10^4	10% TCA 脱蛋白,DEAE - 52 阴离子交换柱层析、Sephaeryl S - 300 凝胶柱层析	抗氧化保湿性[32]

5 松属植物多糖的生物活性

5.1 免疫调节 多糖调节机体免疫功能的作用是多途径、多环节、多靶点的,并且抗肿瘤、抗病毒、抗氧化和抗衰老等生物功能都是通过增强机体免疫功能这一方面而实现[50]。最近研究结果显示,PPPS 能够全面增强机体的细胞免疫和体液免疫功能,增加免疫器官重量,增加免疫细胞数量、激活许多不同类型的免疫过程产生各种细胞因子[51]。PPPS 可以通过 SOC 通道及 TLR4 - PI3K - PLC - IP3 信号通路,以及 TCR/CD3 - PI3K - PLC 信号通路来提高其细胞内的 Ca^{2+},进而促进小鼠脾脏 B 淋巴细胞、脾脏 T 淋巴细胞的增殖和抗体的生成[52-53]。PPPS 还可以通过促进巨噬细胞 RAW 264.7 的有氧呼吸、降低糖酵解、增加能量代谢以及蛋白质、脂肪代谢来促进细胞的增殖,显著提高活化巨噬细胞的抗原呈递能力[54-56]。此外,PPPS 还能作为免疫增强剂,已有研究表明 PPPS 可以作为 2019 - nCoV 亚单位疫苗的候选佐剂,对感染 ALV - J、REV 等引起的免疫抑制也有很好的缓解作用,并且 PPPS 不会造成任何的局部炎症反应和组织损害,具有天然、无毒、无不良反应的突出特点[57-60]。

5.2 抗肿瘤 多糖对多种类型的恶性肿瘤细胞有一定的治疗作用,并且久服可以增强免疫力[61]。目前发现 PPPS 对人白血病细胞株 K562 细胞、肝癌细胞 HepG2 等多种肿瘤细胞均有抑制作用。PPPS 可以通过干扰某些肿瘤细胞内 NR5A2 表达降低 TGF - β/Smad2/3 信号通路关键蛋白的水平,进而抑制肿瘤细胞转移,并且还可以通过改变转录期基因的表达,升高细胞内钙离子和活性氧浓度,阻滞细胞周期,抑制细胞的分裂,并诱导细胞产生凋亡[62]。对于 ALV - J 病毒感染的肿瘤,PPPS 可以在体内作用于 TLR2、TLR3、TLR4 和 C 型凝集素受体,阻断病毒吸附,抑制病毒增殖。同时,PPPS 与受体结合会引起一系列基因的表达变化,上调的免疫相关基因激活免疫信号通路,下调的肿瘤相关基因表达抑制肿瘤相关信号通路,从而在体内发挥抗病毒和抗肿瘤作用,减轻病毒对组织器官的损伤[63]。

5.3 抗病毒 多糖抗病毒的研究机制主要可分为两种。一是植物多糖对病毒直接抑制作用;二是通过增强机体免疫系统而间接达到抑制病毒作用。很多植物多糖能够显著抑制人体免疫缺陷病毒、单纯疱疹病毒、流感病毒等[64]。研究发现,PPPS 主要是通过干扰病毒进入宿主细胞来减少感染,抑制感染细胞中的病毒蛋白合成和病毒粒子相关的 RNA 聚合酶活性和增强了宿主的抗病性起作用的[65]。据报道,PPPS 可以与病毒的 gp85 蛋白的结合阻断 ALV - J 病毒与 tv - b 受体蛋白的结合,阻止病毒的吸附[52,66-67]。对于 HIV - 1 病毒、犬细小病毒(CPV)和犬瘟热病毒(CDV),PPPS 通过抑制其转录酶的活性,使其不能复制。除此以外,PPPS 还能通过增加宿主免疫力来增加杀灭病毒[68]。

5.4 抗氧化 氧化与体内自由基和氧化反应相关,自由基是人体氧化反应中产生的有害物质,具有较强的氧化性,可损伤人体组织和细胞,并导致慢性疾病和衰老[69],研究表明,PPPS 表现出良好的羟基自由基、DPPH 自由基以及超氧阴离子自由基清除活性,并呈现明显的量效关系,在抗氧化功能食品和药物研发中有潜在应用价值[70]。动物实验表明,PPPS 可以显著提高小鼠肝脏和血清中的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶和谷胱甘肽过氧化物酶活力的活力,并且降低丙二醛含量,具有延缓衰老的作用[71]。PPPS 的抗氧化的活性与其提取部位、品种也有较大的影响,目前雪松、云南松、火炬松的松针多糖进行提取,发现雪松松针多糖的抗氧化能力比丁基羟基茴香醚(BHA)更强[46]。除此之外,PPPS 的抗氧化能力还能保护卵巢的早衰,降低卵泡凋亡与闭锁,促进卵泡正常发育[72]。

5.5 调节肠道菌群 肠道菌群影响着生物体的物质代谢和转化,并且还影响了机体的免疫系统[73]。研究发现,PPPS 可以增加小鼠肠道菌群的丰富度和多样性,可以调节肠道的免疫抑制状态和缓解脂多糖 LPS 诱导的 Caco2 细胞屏障的损伤,PPPS 可以通过非 IL - 23 途径促进 Th17 分泌 IL - 22 促进肠道黏膜损伤的修复,并且低水平的 IL - 23 有效降低结肠炎的炎症环

境[74]。PPPS 还对肠道菌群的失衡具有调节作用,可以通过下调有害菌的丰度并上调有益菌的丰度来发挥对溃疡性结肠炎的缓解作用[75]。例如,PPPS 下调阿克曼菌属和气球菌属丰度,上调乳杆菌属和分节丝状菌属的丰度,此外 PPPS 对 DSS 诱导的溃疡性结肠炎有改善作用,具体表现在改善结肠缩短,修复肠道损伤,减轻肠道炎症,调节血清代谢组以及调节肠道菌群的平衡等方面都起到积极作用[76]。

5.6 保肝作用 肝脏是人体内新陈代谢最活跃的器官,参与物质代谢并具有解毒作用,易受到化学毒素、病原微生物、酒精等因素诱导,引发脂肪肝、肝纤维化、肝硬化甚至肝癌等多种肝病[77]。目前研究发现 PPPS 由化学污染物、酒精和药物引起的肝损伤等都具有保护作用,并且 PPPS 对酒精诱导的肝损伤(AILI)保护作用最强[78]。PPPS 对急性 CCl_4 肝损伤和慢性酒精肝损伤的保护作用,其机理与其增强机体抗氧化能力,清除自由基和抑制内质网应激有关[79]。动物肝损伤保护实验发现,PPPS 对 CCl_4 诱导的肝损伤的体内外防护作用,是通过 NRF2/ARE 信号通路调节细胞内氧化还原状态,及通过 NRF2/ARE/MKP1/JNK 途径减轻肝细胞的凋亡;并通过抑制 NF-κB 信号途径降低 CCl_4 引起的肝脏局部炎症反应,共同起到防护 CCl_4 诱导肝损伤的作用[80]。PPPS 对慢性酒精肝损伤的保护作用,主要通过 NRF2/HO-1 途径增强肝细胞的抗氧化能力,减轻了酒精诱导的氧化应激。PPPS 还有效抑制包括 TNF-α、IL-1β 和 IL-6 在内的促炎细胞因子的分泌,在 AILI 中通过 NF-κB 信号通路表现出抗炎作用。此外,PPPS 通过调节 Hipk2、P53、Hp1γ 和 Wip1 的表达,保护小鼠免受酒精诱导的严重 DNA 损伤[81]。此外,PPPS 还可以显著改善 T-2 毒素诱导的肝脏损伤,通过增加肝脏中 GSH、CAT 和 SOD 含量,降低肝脏中 MDA、TNF-α 和 IL-6 含量,抑制 T-2 毒素引起小鼠肝脏的氧化应激和炎症反应,抑制 T-2 毒素引起的肝脏细胞凋亡,逆转 T-2 毒素引起的肠道微生物群落代谢功能障碍,改善 T-2 毒素引起的小鼠肝脏氨基酸代谢紊乱[82]。

5.7 心肌保护 心脏是脓毒症多器官功能障碍最常累及的器官之一,可表现为心肌损伤、心功能不全的发生,增加脓毒症的死亡风险[83]。研究发现 PPPS 可以保护脓血症造成的心肌损伤、增强心肌收缩力等。PPPS 能够靶向增加 p110β 蛋白的表达并促进其与 PTEN 的相互作用,而 p110β 的过表达能够直接影响 PI3K/PTEN/AKT 信号通路的活化并介导其下游的炎症反应,抑制心肌酶谱的异常增加,缓解心肌组织病理损伤和细胞凋亡,抑制炎症相关反应。并且硫酸酯化的 PPPS 还可以通过细胞膜上的 L-型钙通道增强心肌的收缩能力,作用效果随着取代度的升高而不断加强[84]。

5.8 调节血糖 糖尿病是一种广泛存在的代谢紊乱,经常导致一些严重并发症,包括心血管疾病和神经系统损伤。糖尿病在治疗上除了注射胰岛素外,还有口服磺脲类、双胍类和 a 糖苷酶抑制剂等降糖药物,但这些药物存在多种不良反应,因此有必要开发新型低毒的降糖药物[85]。目前发现 PPPS 可能有双向调节血糖的作用,可用于糖尿病的治疗之中。动物实验研究发现,硫酸酯化后的 PPPS 能显著促进胰岛素的分泌,有效地改善胰岛素抵抗和葡萄糖耐受能力,上调糖尿病小鼠的胰岛素敏感性促进胰岛素的分泌,其作用机制可能是通过细胞膜上电压依赖性的钙离子通道的开放和钙库的钙离子释放,升高细胞内游离钙离子浓度来实现的[86]。另外有研究发现,PPPS 对 2 型糖尿病小鼠空腹血糖、胰岛素水平的调节影响较小,经硫酸酯化 PPPS 产生了不同程度上的抗糖尿病功效,并且成剂量依赖性上升,并且部分修复受损胰岛 β 细胞的修复效果接近于二甲双胍,这可能是酸酯化 PPPS 的硫酸根增多,使其对某些受体的结合能力增强导致的[87]。

5.9 其他活性 PPPS 还具有降脂、抗菌及抗疲劳等作用。据研究报道,酯化多糖 PPPS 可以通过调节 3T3-F442A 前脂肪细胞胞内钙离子浓度从而对 3T3-F442A 前脂肪细胞脂质分化和积累产生影响[77]。PPPS 减轻结肠炎小鼠临床症状和肠道损伤,有效预防结肠炎风险[88]。此外,PPPS 能够改善机体内代谢产物尿素氮、乳酸、丙二醛的堆积;恢复超氧化物歧化酶、乳酸脱氢酶、谷胱甘肽过氧化物酶的活性;修复因过度运动造成的肝脏损伤,增加肝糖原的储量,降低血液中谷丙转氨酶和谷草转氨酶的含量,增加骨骼肌纤维面积[89-90]。

6 结论与展望

松属植物具有悠久的药食两用历史,既是中药也是日常的保健食品,有很大的开发前景。多糖作为松属植物中的主要成分,对松属植物产品的开发和质量评估有着重要意义。

本文介绍了松属植物不同品种,不同部位的多糖,对其提取方法、结构和药理活性作了简单论述,对松属植物多糖目前的研究现状进行总结。结果发现 PPPS 的研究目前还存在着许多不足,首先是松属植物的种类、多糖可提取部位繁多,对不同品种、不同部位的多糖含量和药理作用的对比较少,不能找到一个高活性的品种部位进行研究。其次,PPPS 的结构解析和构效关系的研究不够深入,大部分集中在对多糖的单糖组成和相对分子质量的研究上,少部分才对其结构进行深度解析。因此,以后对 PPPS 的研究重心要放在化学结构解析上,在一级结构和高级结构的层次上进行对其药理活性的研究,为深入研究其构效关系,开发 PPPS 药物奠定基础,最后是对 PPPS 的作用机制研究不够深入,目前研究缺乏 PPPS 在体内代谢结果的研究,仅从细胞、动物模型证明了其活性,少部分运用体外模拟了多糖的消化情况,未对其体内代谢的结构变化和药理学影响进行研究,这限制了 PPPS 医药或功能性食品的进一步开发。

PPPS 具有良好的开发前景,松树的松仁、松花粉和松针等含有具有药理活性的多糖。PPPS 的原料更易获得,为 PPPS 开发奠定了基础。对于目前 PPPS 开发中存在的不足方面,我们需要做出更多的深入研究。

参考文献

[1] 胡祎, 梁莉娜, 肖良, 等. 松属植物地质历史及生物地理演变[J]. 地球环境学报, 2022, 13(3): 243-256.
[2] 龚恒佩, 刘祖望, 陈妍月, 等. 松针的显微及分子鉴别研究[J]. 浙江大学学报(医学版), 2018, 47(3): 300-306.
[3] SINGH L, DIXIT P, SRIVASTAVA R P, et al. Ethnobotany and pharmacology of *Pinus* species growing naturally in Indian Himalayas: a plant review[J]. Curr Pharm Biotechnol, 2019, 20(15): 1281-1287.
[4] WANG M, GU D Y, LI H Q, et al. Rapid prediction and identification of lipase inhibitors in volatile oil from *Pinus massoniana* L. needles[J]. Phytochemistry, 2017, 141: 114-120.
[5] ZHANG S, DING C B, LIU X L, et al. Research progress on extraction, isolation, structural analysis and biological activity of polysaccharides from *Panax* genus[J]. Molecules, 2023, 28(9): 3733.

[6] WANG H L, HUANG G L. Extraction, purification, structural modification, activities and application of polysaccharides from different parts of mulberry[J]. Food Funct, 2024, 15(8): 3939 - 3958.
[7] 徐丽珊, 张萍华. 松针多糖的提取工艺优化[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(4): 73 - 76.
[8] XU R B, YANG X, WANG J, et al. Chemical composition and antioxidant activities of three polysaccharide fractions from pine cones [J]. Int J Mol Sci, 2012, 13(11): 14262 - 14277.
[9] BAI C L, CHEN R Z, TAN L, et al. Effects of multi - frequency ultrasonic on the physicochemical properties and bioactivities of polysaccharides from different parts of ginseng[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 206: 896 - 910.
[10] 李桂娟, 李冲, 姜雪, 等. 松籽壳多糖超声辅助溶剂法提取及抗氧化性研究[J]. 食品与机械, 2012, 28(6): 133 - 137.
[11] 付昊雨, 张大伟, 吴庆燕, 等. 红松松子壳多糖分离纯化及对小鼠抗氧化活性的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2017, 39(2): 233 - 237.
[12] 李明谦. 红松松子壳多糖超声提取工艺的建立与抗肿瘤活性的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
[13] 张大伟, 张永亮, 昆道列提, 等. 红松松子壳酸性多糖最佳提取条件研究[J]. 时珍国医国药, 2006, 17(6): 997 - 999.
[14] 丁宁, 张曜武. 正交设计法优化红松松子壳多糖提取工艺[J]. 应用化工, 2014, 43(3): 510 - 511, 514.
[15] 周思杰, 张智红, 段久芳, 等. 雪松松针多糖超声波酶法提取及其抗氧化性[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31(2): 284 - 291.
[16] 许小向, 尹小莉, 洪艳平, 等. 火炬松松针多糖提取工艺及其抗氧化性研究[J]. 林产化学与工业, 2016, 36(3): 114 - 120.
[17] 肖川, 仲维锋, 崔少宁, 等. 超声辅助提取黑松松针多糖的工艺优化及其抑菌性研究[J]. 粮食与油脂, 2020, 33(4): 92 - 96.
[18] 许小向, 洪艳平, 胡捷敏, 等. 松针多糖微波提取工艺及抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2015, 36(23): 222 - 227.
[19] 许丽丽, 李杰. 正交设计优化马尾松松针多糖的微波提取工艺[J]. 食品工业, 2013, 34(2): 44 - 46.
[20] 安金花, 金香花, 南桂仙, 等. 赤松针多糖提取工艺及其清除自由基作用的研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(20): 8645 - 8646.
[21] 张松书, 杨平, 徐昕, 等. 内部沸腾法提取松针多糖工艺优化[J]. 吉林农业, 2014(24): 27.
[22] 谢玮, 郭宗明, 葛胜菊, 等. 黑松松针多糖的复合酶法提取及其抑菌性研究[J]. 保鲜与加工, 2021, 21(3): 104 - 110.
[23] 杨鑫, 王鑫淼, 高星烨, 等. 红松松塔多糖提取工艺优化及其含量测定[J]. 中成药, 2011, 33(2): 351 - 353.
[24] 郭霏霏, 陈大勇, 董岭, 等. 油松松塔多糖提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 人参研究, 2014, 26(1): 49 - 53, 60.
[25] 刘荣, 孙芳, 陈秀丽, 等. 超声波在松仁多糖提取中的应用[J]. 林产化学与工业, 2007, 27(1): 117 - 120.
[26] 王振宇, 孙芳, 刘荣. 微波辅助提取松仁多糖的工艺研究[J]. 食品工业科技, 2006, 27(9): 133 - 135, 139.
[27] 孙芳. 松仁多糖的理化性质及免疫功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2007.
[28] 曲航. 松仁多糖结构表征及对化学性肝损伤防护作用机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
[29] 杜晓平, 郑明珠, 刘景圣. 超声波破壁提取松花粉多糖的工艺研究[J]. 食品科学, 2007, 28(9): 308 - 311.
[30] 崔文平. 松花粉多糖活性组分及其靶向纳米药物抗 ALV - J 活性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021.
[31] 周立波. 油松花粉多糖的提取、纯化及抗氧化性研究[D]. 太原: 山西大学, 2009.
[32] 刘敏. 油松花粉多糖分离纯化及抗氧化活性研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2010.
[33] 马荣池. 马尾松花粉多糖的分离纯化、结构表征及其活性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.
[34] 武晓艳, 叶钰怡, 任文凯, 等. 植物多糖研究进展: 功能活性及潜在机制[J]. 中国科学: 生命科学, 2023, 53(6): 808 - 824.
[35] CHAN M K, YU Y, WULAMU S, et al. Structural analysis of water - soluble polysaccharides isolated from *Panax notoginseng*[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 155: 376 - 385.
[36] YUE F, XU J, ZHANG S, et al. Structural features and anticancer mechanisms of pectic polysaccharides: a review[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 209(pt a): 825 - 839.
[37] WANG X Y, ZHANG D D, YIN J Y, et al. Recent developments in *Hericium erinaceus* polysaccharides: extraction, purification, structural characteristics and biological activities[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2019, 59(sup1): S96 - S115.
[38] MO X L, GUO D K, JIANG Y G, et al. Isolation, structures and bioactivities of the polysaccharides from *Radix* hedysari: a review [J]. Int J Biol Macromol, 2022, 199: 212 - 222.
[39] 徐韧博. 松塔多糖的分离纯化、结构鉴定及抗氧化活性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
[40] 沈巳焱. 红松不同部位多糖分离纯化、结构及抗氧化活性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
[41] ZHANG H, ZOU P, ZHAO H T, et al. Isolation, purification, structure and antioxidant activity of polysaccharide from pinecones of *Pinus koraiensis*[J]. Carbohydr Polym, 2021, 251: 117078.
[42] 蒙琦. 红松松塔多糖分离纯化及生物活性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
[43] 曾祥玉. 松塔鳞片多糖的提取及其免疫生理活性研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
[44] 李子江, 刘慰, 吴磊, 等. 偃松松塔多糖的单糖组成分析及活性研究[J]. 林产化学与工业, 2020, 40(1): 37 - 44.
[45] ZENG W C, ZHANG Z, JIA L R. Antioxidant activity and characterization of antioxidant polysaccharides from pine needle (*Cedrus deodara*)[J]. Carbohydr Polym, 2014, 108: 58 - 64.
[46] 丁宁. 红松松子壳多糖的提取纯化、组成分析及抗氧化活性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2014.
[47] SUN M M, SU F C, YANG J X, et al. Fluorescent labeling of polysaccharides from Masson pine pollen and its effect on $RAW_{264.7}$ macrophages[J]. Polymers (Basel), 2018, 10(4): 372.
[48] 钤莉妍. 马尾松花粉多糖及其酯化物结构解析[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
[49] YANG S F, WEI K, JIA F J, et al. Characterization and biological activity of Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide *in vitro* [J]. PLoS One, 2015, 10(3): e0115638.
[50] LI W F, HU X Y, WANG S P, et al. Characterization and anti - tumor bioactivity of *Astragalus* polysaccharides by immunomodulation [J]. Int J Biol Macromol, 2020, 145: 985 - 997.
[51] WEI K, SUN Z H, YAN Z G, et al. Effects of Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide on immune response of rabbit haemorrhagic disease tissue inactivated vaccine and on production performance of Rex rabbits[J]. Vaccine, 2011, 29(14): 2530 - 2536.
[52] 刘铭, 李娜娜, 耿越. 硫酸酯化马尾松花粉多糖对小鼠脾脏 B 淋巴细胞免疫调节作用的研究[J]. 中国细胞生物学学报, 2014, 36(4): 461 - 469.

[53] 李娜娜, 刘铭, 耿越. 松花粉硫酸酯化多糖调控小鼠 T 细胞 $[Ca^{2+}]_i$ 的研究[J]. 中国药理学通报, 2014, 30(8): 1151 - 1155.
[54] SU F C, SUN M M, GENG Y. ^{1}H - NMR metabolomics analysis of the effects of sulfated polysaccharides from Masson pine pollen in $RAW_{264.7}$ macrophage cells[J]. Molecules, 2019, 24(9): 1841.
[55] 曲航, 高鑫, 伊娟娟, 等. 红松松仁多糖对脂多糖诱导 $RAW_{264.7}$ 细胞炎症反应的抑制作用[J]. 食品工业科技, 2020, 41(11): 328 - 334.
[56] BRUGGER D, WILHELM B, SCHUSSER B, et al. Masson Pine pollen (*Pinus massoniana*) activate HD11 chicken macrophages in-vitro[J]. J Ethnopharmacol, 2024, 325: 117870.
[57] LI B, WEI K, YANG S F, et al. Immunomodulatory effects of Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide and *Propolis* on immunosuppressed chickens[J]. Microb Pathog, 2015, 78: 7 - 13.
[58] GUO F X, XUE C, WU C, et al. Immunoregulatory effects of Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide on chicks co - infected with avian leukosis virus and *Bordetella avium* early in ovo[J]. Res Vet Sci, 2014, 96(2): 260 - 266.
[59] 王祥锟,宋学宏,刘金龙,等.新型冠状病毒亚单位疫苗研制及其高效免疫增强剂的筛选[J].生物技术通报,2023,39(1):305 - 313.
[60] SHANG H Q, NIU X Y, CUI W P, et al. Anti - tumor activity of polysaccharides extracted from *Pinus massoniana* pollen in colorectal cancer - *in vitro* and *in vivo* studies[J]. Food Funct, 2022, 13(11): 6350 - 6361.
[61] CHEN L, HUANG G L. Antitumor activity of polysaccharides: an overview[J]. Curr Drug Targets, 2018, 19(1): 89 - 96.
[62] CHU H L, MAO H, FENG W, et al. Effects of sulfated polysaccharide from Masson pine (*Pinus massoniana*) pollen on the proliferation and cell cycle of HepG2 cells[J]. Int J Biol Macromol, 2013, 55: 104 - 108.
[63] 张月, 薛瑞雪, 张海霞, 等. 泰山松花粉多糖在畜禽养殖中的应用[J]. 中国畜禽种业, 2021, 17(11): 89 - 90.
[64] CHEN L, HUANG G L. The antiviral activity of polysaccharides and their derivatives[J]. Int J Biol Macromol, 2018, 115: 77 - 82.
[65] SHANG H Q, SHA Z, WANG H, et al. Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide inhibits H9N2 subtype influenza virus infection both *in vitro* and *in vivo*[J]. Vet Microbiol, 2020, 248: 108803.
[66] YANG S F, ZHAO Z C, ZHANG A Y, et al. Proteomics analysis of chicken peripheral blood lymphocyte in Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharide regulation[J]. PLoS One, 2018, 13(11): e0208314.
[67] YANG S F, LI G M, ZHAO Z C, et al. Taishan *Pinus massoniana* pollen polysaccharides enhance immune responses in chickens infected by avian leukosis virus subgroup B[J]. Immunol Invest, 2018, 47(5): 443 - 456.
[68] 王淑娟, 魏凯, 黄河, 等. 泰山松花粉多糖体外抗鸡传染性法氏囊病病毒的效果[J]. 中国兽医学报, 2018, 38(9): 1670 - 1676.
[69] HUANG G L, MEI X Y, HU J C. The antioxidant activities of natural polysaccharides[J]. Curr Drug Targets, 2017, 18(11): 1296 - 1300.
[70] 马趣环, 王信, 石晓峰, 等. 雪松松针多糖的醇沉、脱蛋白工艺及抗氧化活性研究[J]. 林产化学与工业, 2023, 43(5): 81 - 88.
[71] 王腾飞, 雷婷. 松塔化学成分及其应用研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2022, 40(10): 125 - 128.
[72] 何毓婕,曲涛,王桐,等.松花粉对环磷酰胺致卵巢早衰大鼠的卵巢保护作用[J].天然产物研究与开发,2022,34(6):1005 - 1013.
[73] CUI L, GUAN X N, DING W B, et al. *Scutellaria baicalensis* Georgi polysaccharide ameliorates DSS - induced ulcerative colitis by improving intestinal barrier function and modulating gut microbiota[J]. Int J Biol Macromol, 2021, 166: 1035 - 1045.
[74] NIU X Y, SHANG H Q, CHEN S Y, et al. Effects of *Pinus massoniana* pollen polysaccharides on intestinal microenvironment and colitis in mice[J]. Food Funct, 2021, 12(1): 252 - 266.
[75] WANG Y L, SONG X, WANG Z J, et al. Effects of pine pollen polysaccharides and sulfated polysaccharides on ulcerative colitis and gut flora in mice[J]. Polymers (Basel), 2023, 15(6): 1414.
[76] SHA Z, SHANG H Q, MIAO Y Q, et al. Polysaccharides from *Pinus massoniana* pollen improve intestinal mucosal immunity in chickens[J]. Poult Sci, 2021, 100(2): 507 - 516.
[77] YANG Y, JI J, DI L Q, et al. Resource, chemical structure and activity of natural polysaccharides against alcoholic liver damages[J]. Carbohydr Polym, 2020, 241: 116355.
[78] QU H, GAO X, WANG Z Y, et al. Comparative study on hepatoprotection of pine nut (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) polysaccharide against different types of chemical - induced liver injury models *in vivo*[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 155: 1050 - 1059.
[79] ZHOU C M, YIN S J, YU Z F, et al. Preliminary characterization, antioxidant and hepatoprotective activities of polysaccharides from Taishan *Pinus massoniana* pollen[J]. Molecules, 2018, 23(2): 281.
[80] QU H, LIU S, CHENG C L, et al. Hepatoprotection of pine nut polysaccharide *via* NRF2/ARE/MKP1/JNK signaling pathways against carbon tetrachloride - induced liver injury in mice[J]. Food Chem Toxicol, 2020, 142: 111490.
[81] QU H, GAO X, CHENG C L, et al. Hepatoprotection mechanism against alcohol - induced liver injury *in vivo* and structural characterization of *Pinus koraiensis* pine nut polysaccharide[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 154: 1007 - 1021.
[82] 郭萍. 松花粉多糖对 T - 2 毒素诱导小鼠肝损伤的保护作用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
[83] WU B, SONG H X, FAN M M, et al. Luteolin attenuates sepsis - induced myocardial injury by enhancing autophagy in mice[J]. Int J Mol Med, 2020, 45(5): 1477 - 1487.
[84] 王成. 松花粉多糖对 LPS 诱导脓毒症动物心肌损伤的保护机制研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
[85] ZHANG Z X, ZHANG L, XU H S. Effect of *Astragalus* polysaccharide in treatment of diabetes mellitus: a narrative review[J]. J Tradit Chin Med, 2019, 39(1): 133 - 138.
[86] 朱巧莎, 侯占群, 段盛林, 等. 松花粉的主要活性成分及其功能的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(9): 194 - 198.
[87] 栾冬瑞. 松花粉硫酸酯化多糖对 3T3 - F442A 前脂肪细胞脂质分化的影响[D]. 济南: 山东师范大学, 2015.
[88] LI Z X, WANG H Y, WANG Z J, et al. Pine pollen polysaccharides´and sulfated polysaccharides´effects on UC mice through modulation of cell tight junctions and RIPK3 - dependent necroptosis pathways[J]. Molecules, 2022, 27(22): 7682.
[89] 周玉蕾. 松花粉粗多糖对小鼠抗疲劳作用的研究[D]. 延吉: 延边大学, 2022.
[90] CHU L L, YANG L C, LIN L Z, et al. Chemical composition, antioxidant activities of polysaccharide from Pine needle (*Pinus massoniana*) and hypolipidemic effect in high - fat diet - induced mice[J]. Int J Biol Macromol, 2019, 125: 445 - 452.