李路凡, 李程程, 于丽娟, 等. 罗布麻多糖提取纯化及生物活性研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 548−556. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070154

LI Lufan, LI Chengcheng, YU Lijuan, et al. Research Progress on Extraction, Purification, and Bioactivities of *Apocynum venetum* Polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 548−556. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070154

· 专题综述 ·

罗布麻多糖提取纯化及生物活性研究进展

李路凡[1], 李程程[1,*], 于丽娟[2], 姜　黎[3,*]

（1.南京林业大学轻工与食品学院 木质纤维功能材料国际联合研究实验室, 江苏南京 210037;
2.云南省农业科学研究院, 云南昆明 650000;
3.中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆乌鲁木齐 830011）

摘　要: 罗布麻（*Apocynum venetum*）是一种富含多种功能性成分的传统药食两用植物资源。罗布麻多糖因具有多种生物活性，在食品、化妆品及生物医药领域具有广泛的应用前景。然而，目前关于罗布麻多糖的研究十分有限，导致其广泛开发和应用受阻。本文系统地综述了罗布麻多糖的提取、纯化、结构特征、生物活性及其潜在的应用价值，并对罗布麻多糖未来的应用前景和发展空间做了具体展望。在提取方面，主要介绍水提法、酸碱溶液提取法、超声波辅助酶解、微波协同低共熔溶剂等技术。在纯化方面，主要介绍柱层析法、超滤膜法以及超滤/凝胶色谱联用技术。此外，对罗布麻多糖的生物活性和应用价值进行了概述。最后，总结了罗布麻多糖在大规模开发和应用方面存在的问题及挑战。进一步提出未来研究需结合合成生物学与精准结构修饰等技术，适应功能性多糖的开发以及大规模生产的需要，为罗布麻多糖在食品等领域的高效利用提供理论支撑。

关键词: 罗布麻多糖, 提取纯化, 功能性食品, 抗氧化, 生物活性

中图分类号: TQ281　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0548−09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070154　　本文网刊:

Research Progress on Extraction, Purification, and Bioactivities of *Apocynum venetum* Polysaccharides

LI Lufan[1], LI Chengcheng[1,*], YU Lijuan[2], JIANG Li[3,*]

（1.Joint International Research Lab of Lignocellulosic Functional Materials, School of Light Industries and Food Science, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;
2.Yunnan Academy of Agricultural Sciences, Kunming 650000, China;
3.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China）

Abstract: *Apocynum venetum* is a traditional edible medicinal plant containing various functional ingredients. *A. venetum* polysaccharides display multiple bioactivities, rendering them applicable in the fields of food, cosmetics, and biomedicine. However, current research on this polysaccharide is limited, hindering their widespread application and development. Herein, we present a brief overview of the extraction, purification, structural characteristics, bioactivities, and potential applications of *A. venetum* polysaccharides. We also provide a perspective on their future applications and development. In terms of extraction and purification, the water extraction, acid/base extraction, ultrasonic assisted enzymolysis, microwave assisted eutectic solvent extraction methods, etc. are mainly introduced. For the purification of *A. venetum* polysaccharides, we mainly introduce the column chromatography, ultrafiltration membrane, and ultrafiltration/gel chromatography strategies. In addition, we also summarize the bioactivities and applications of *A. venetum* polysaccharides. Finally, the problems and challenges faced by *A. venetum* polysaccharides in large-scale applications, as well as future development trends are summarized. Future research should combine synthetic biology and precise structural modification technologies to meet

收稿日期: 2025−07−14

作者简介: 李路凡（2003−）, 女, 本科, 研究方向: 植物多糖, E-mail: 15850592272@163.com。

*** 通信作者:** 李程程（1985−）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物, E-mail: lichengcheng@njfu.edu.cn。

姜黎（1980−）, 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 罗布麻生态与产业化, E-mail: jiangli1015@126.com。

demands for the development of functional polysaccharides and their large-scale production. Efforts should be made to develop highly active polysaccharides to provide theoretical support for their utilization in food and other fields.

Key words: *Apocynum venetum* polysaccharides; extraction and purification; functional foods; antioxidant; bioactivity

罗布麻(*Apocynum venetum*)属于夹竹桃科罗布麻属植物[1]，广泛分布于中国西北部，尤其是新疆地区[2]。罗布麻抗逆性极强，在盐碱地等恶劣环境下可生存，因此，可被用作防风固沙植物[2]。此外，罗布麻全株含有多种化学成分，如多糖、酮类、酚类等物质，表现出多种生物活性，在食品和生物医药等领域具有广泛的应用前景[2−5]。

近年来，在人们对天然功能成分需求的增长以及大健康背景的推动下，生物活性多糖广受人们喜爱，成为食品、化妆品以及生物医学等领域的研究热点[6−7]。罗布麻全株含有多糖[8]，具有多种生物活性，如抗氧化、抗炎、益生元特性、抗凝血、免疫调节等功能[8−10]，在功能性食品及生物医药等领域具有广泛的应用前景[11−13]。目前，已有研究团队从罗布麻的不同部位获得了具有不同分子结构及功能特性的罗布麻多糖或多糖缀合物，并对其基本结构、单糖组成以及功能特性进行了表征和测试[14−16]。然而，罗布麻多糖的研究仍面临提取纯化效率低、结构解析不全、构效关系未明及大规模生产困难等挑战，制约其在功能性食品等领域的开发和应用。近年来，提取纯化技术的不断进步，如低共熔溶剂法、超声波-酶法联用与超滤分级/凝胶色谱法，有望提高罗布麻多糖的提取和纯化效率。此外，核磁共振(NMR)、原子力显微镜(AFM)等技术的成熟也将为解析罗布麻多糖的构效关系奠定基础。同时，合成生物学技术以及多糖结构精准修饰技术的快速发展将为罗布麻多糖的改性及产品增值创造更广泛的机遇。基于以上研究，罗布麻多糖在功能性食品原料及其他生物材料的开发方面极具前景，但提取、纯化效率低、构效关系未明及大规模化工业化生产与成本问题亟待解决。综上所述，本文将从罗布麻多糖的提取、纯化、结构特征、生物活性及应用前景等方面全面总结罗布麻多糖的研究进展，旨在对罗布麻多糖及其相关产品的研究和开发提供支撑，并促进其在食品等领域的应用。

1　罗布麻多糖的提取与纯化技术

1.1　罗布麻多糖的提取

目前，罗布麻多糖的提取主要包括水提法、碱提法、超声波辅助法、酶解法和微波辅助法(表 1)[15,17]。

水提法操作简单、成本低、安全性高，可用于工业化生产，但提取率较低、耗时长(2~6 h)，经济效益不高[6,18−20]。罗布麻根、茎和叶中多糖含量差异较大，采用水提法针对不同部位提取多糖时产率存在较大差异。刘丹等[10]采用水提法从罗布麻叶和根中分别获得叶粗多糖(ALLP)以及根粗多糖(ALRP1 和 ALRP2)，三者得率分别为 4.45%、2.59% 和 5.92%。此外，采用水提法针对罗布麻植株同一部位提取多糖时，由于提取方法的细节差异、植株的生长周期不同等，多糖得率也存在差异。赵东洋[20]采用水提法分别提取了罗布麻叶多糖(ALLP)、罗布麻花多糖(ALFP)、罗布麻茎多糖(ALSP)和罗布麻茶多糖(ALTP)，得率分别为 3.5%、12.0%、15.8% 和 15.0%。

相较于水提法，酸/碱溶液可破坏植物细胞壁，促进多糖溶出，提升多糖提取率和多糖得率，适于难溶性多糖的提取。Zhou 等[21]采用碱提法提取罗布麻叶多糖，多糖得率相较于水提法提高至 21.32%。但强酸/碱可能破坏糖苷键，导致多糖降解并影响活性，同时化学试剂残留会导致环境污染等问题。

除上述提取方法之外，超声辅助提取、微波加热等技术也被应用到罗布麻多糖提取中。杨婷等[22]利用超声提取法从罗布麻叶中提取多糖，在料液比为 1∶40(m∶V)，提取功率为 400 W，提取时间为 100 min 的最优条件下获得的罗布麻叶粗多糖的含量为 0.36%。该方法极大程度地缩短了提取时间，但设备成本相对较高；微波加热法可使细胞快速破裂，促进多糖释放，提取效率高、得率高且溶剂用量相对较少，但该法可能破坏多糖结构及其生物活性，且成本较高，限制其广泛应用[19,23-24]。相较于上述多糖提取方法，酶解法提取条件温和(pH4~7，温度 40~60 ℃)、选择性高且环保，可在一定程度上增加多糖得率[21]。采用纤维素酶和果胶酶在 45 ℃ 条件下提取罗布麻叶多糖，显著提高了多糖得率[17]。其中，纤维素酶提取得率为 13.4%±0.2%、果胶酶提取得率为 13.6%±0.3%[17]。但酶的成本较高，增加了提取的经济负担。

近年来，一些绿色高效提取技术逐渐兴起并应用于植物多糖的提取[25-26]。例如，微波-低共熔溶剂联用技术用于植物多糖的提取，能进一步缩短提取时间至 30 min，且溶剂可循环使用，符合绿色化学趋势[26]。张玲赫等[26]采用微波辅助低共熔溶剂法提取野生樱桃李多糖，得率最高值为 26.38%±0.73%。未来，开发低毒、安全的低共熔溶剂提取工艺以及多技术联用或可大幅度提高罗布麻多糖的提取效率。

1.2　罗布麻多糖的分级纯化

多糖的纯化对于进一步解析多糖的结构、开发其功能以及探明多糖的构效关系至关重要。目前，多糖的分级纯化方法多采用 Sevage 法、离子交换色谱法、凝胶渗透色谱法、分级醇沉法以及多策略联合法等[6,27]。Liu 等[28]通过水提法从罗布麻根中提取粗多糖并采用 Sevage 法脱蛋白获得粗多糖 ALRP。进一步采用 DEAE-52 纤维素柱、Sepharose CL-6B 和 Sephadex G100 柱对所得粗多糖进行纯化，同时利用半制备型高效液相色谱法制备出纯化多糖 ALRPN-1

表 1 罗布麻多糖的提取方法比较

Table 1 Comparison of extraction methods for *A. venetum* polysaccharides

多糖来源	提取方法	提取条件				得率(%)	多糖得率测定方法	优缺点	参考文献
		料液比(g/mL)	提取时间(h)	提取温度(℃)	其他条件				
叶	水提法	1∶20	2	90	提取1次	9.20	称重法	条件较温和, 耗时长, 效率低	[17]
叶		1∶17.5	3.4	93	提取1次	0.60	苯酚-硫酸法		[31]
叶		1∶30	2	90	提取1次	5.00	称重法		[32]
叶		1∶28(40 L)、1∶28(40 L)、1∶22(32 L)	–	–	40、40、32 L沸水分别提取4、3、2 h	12	苯酚-硫酸法		[21]
茎		1∶28(10 L)、1∶28(10 L)、1∶22(8 L)	–	–		3.50	苯酚-硫酸法		
花		1∶28(10 L)、1∶28(10 L)、1∶22(8 L)	–	–	10、10、8 L沸水分别提取4、3、2 h	15.80	苯酚-硫酸法		
茶		1∶28(10 L)、1∶28(10 L)、1∶22(8 L)	–	–		15	苯酚-硫酸法		
叶		1∶10	4	100	提取3次	6.72	苯酚-硫酸法		[10]
根						3.91	苯酚-硫酸法		
						6.13	苯酚-硫酸法		
花		1∶15	4	90	提取3次	8.05	称重法		[30]
叶	超声波辅助水提取法	1∶30	0.5	50	提取1次	17.6~17.8	苯酚-硫酸法		[31]
叶		1∶20	1	60	超声波功率500 W	12.10	称重法	利用空化作用促进多糖的释放、扩散和溶解, 提取效率高(减少提取时间、降低温度); 多糖不易纯化	[17]
叶	超声微波协同提取法	1∶20	0.25	60	超声波功率400 W; 微波功率400 W	12.40	称重法		
叶	酶提取法	1∶20	2	45	纤维素酶, pH为7	13.40	称重法	提取温度低, 提取率高; 专一性强	
叶		1∶20	2	45	果胶酶, pH为5	13.60	称重法		
叶	碱提取法	1∶30	2	90	0.5 mol/L NaOH	21.32	称重法	提取率较高, 多适用于水溶性差的多糖和酸性多糖提取, 成本适中; 强碱条件下, 多糖不稳定易分解	[32]

和 ALRPN-2, 总糖含量分别为 92.47%±0.57% 和 95.50%±0.30%。Wang 等[29] 对提取的罗布麻花多糖采用 Sevage 法脱蛋白, 并进一步采用阴离子交换柱 DEAE-52 纤维素柱和 Sephadex G-100 对所获得的罗布麻花粗多糖进行纯化, 获得纯化多糖 Vp2a-I、Vp2a-II 和 Vp3, 产量分别为 13.44%、32.36% 和 56.9%。此外, 超滤膜分离技术以及琼脂糖凝胶柱层析法和半制备型高效凝胶渗透色谱法可对粗多糖不同分子量组分实现精准分离, 进一步获得高纯度的功能性多糖[10]。

2 罗布麻多糖的结构

多糖的结构影响其生物活性及功能特性, 而提取、纯化方法的不同和罗布麻植株提取部位的选择都会对罗布麻多糖的结构产生影响(表 2)。刘丹[10] 利用水提法从罗布麻叶、根中获得了三种具有免疫调节活性的罗布麻多糖 ALRPN-1、ALRPN-2 和 ALRPN-3。三种多糖的单糖组成和分子量均具有明显差别, 其分子量分别为 15.42、5.105 和 6.430 kDa。ALRPN-1 主要由葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖构成; ALRPN-2 主要由葡萄糖、半乳糖和甘露糖构成; ALRPN-3 主要由甘露糖、葡萄糖、半乳糖和阿拉伯糖组成。SEM 结果显示 ALRPN-1、ALRPN-2 和 ALRPN-3 分别呈无规则厚片状结构、规则孔洞状结构以及纤维状/片状结构, 其中, ALRPN-3 具有三股

表 2 罗布麻多糖的纯化方法和结构特征

Table 2 Purification method and structural characteristics of *A. venetum* polysaccharides

多糖来源	多糖名称	纯化方法	相对分子质量(kDa)	单糖组成及比例	构型及糖苷键	参考文献
叶	AVP-HWE	–	–	Ara∶Glc∶Gal∶Man=37.98∶19.63∶33.02∶9.37	存在*β*-糖苷键, 是由阿拉伯半乳聚糖组成的果胶类多糖	[17]
叶	AVP-UE	–	–	Ara∶Glc∶Gal∶Xyl=23.39∶43.88∶30.67∶2.06		
叶	AVP-CE	–	–	Ara∶Glc∶Gal=37.25∶33.93∶28.82		
叶	AVP-PE	–	–	Ara∶Glc∶Gal=28.88∶46.07∶28.05		

续表 2

多糖来源	多糖名称	纯化方法	相对分子质量(kDa)	单糖组成及比例	构型及糖苷键	参考文献
叶	AVP-UME	–	–	Ara∶Glc∶Gal=26.33∶48.32∶21.42		
茶	ATPC-A	–	–	Ara、Xyl、GalA、Rha、Fuc等	以吡喃糖为主的果胶类酸性多糖	[34]
叶	AE	–	1	Man∶Rha∶GlcA∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara∶Xyl=1.40∶20.07∶1.97∶13.97∶9.43∶23.87∶26.19∶3.34	–	[32]
叶	WE		0.2	Man∶Rha∶GlcA∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=2.9∶28.06∶1.92∶21.72∶10.47∶26.69∶8.42		
叶	ALLP	DEAE-纤维素离子交换层析	–	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=3.1∶2.8∶9.6∶51.1∶4.8∶15.6∶13.0	–	[21]
	ALLP-N		6.7	Man∶Glc∶Gal∶Ara=11.4∶50.4∶24.8∶13.5	–	
	ALLP-A1		10.4	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=0.5∶1.3∶11.4∶60.7∶0.9∶12.8∶12.0	–	
	ALLP-A2		31.9-0.7	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara∶Xyl=1.1∶16.0∶7.8∶33.6∶4.4∶21.1∶15.0∶2.0	–	
茎	ALSP		–	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara∶Xyl=5.4∶1.5∶7.0∶37.4∶20.6∶15.6∶12.5∶2.7	–	
	ALSP-N		6.2	Man∶Rha∶Glc∶Gal∶Ara=5.9∶1.2∶51.1∶33.6∶8.3	–	
	ALSP-A1		3.2	GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=1.5∶7.5∶69.1∶0.4∶10.1∶11.5	–	
	ALSP-A2		35.0-0.4	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=2.3∶6.3∶11.4∶22.6∶7.5∶31.5∶18.4	–	
花	ALFP		–	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara∶Xyl=2.6∶1.5∶7.3∶39.4∶5.7∶24.9∶17.4∶1.3	–	
	ALFP-N		7.9	Man∶Glc∶Gal∶Ara=7.9∶41.7∶43.1∶16.0	–	
	ALFP-A1		42.9	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara∶Xyl=0.6∶2.6∶4.9∶62.0∶0.5∶16.7∶12.8∶0.5	–	
	ALFP-A2		1.6	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=1.7∶27.6∶5.2∶20.9∶19.5∶14.8∶12.0	–	
茶	ALTP		–	Man∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=1.5∶8.3∶44.4∶15.8∶18.2∶10.8	–	
	ALTP-N		4.3	Man∶Glc∶Gal∶Ara=5.5∶69.1∶13.1∶12.3	–	
	ALTP-A1		15.6	GlcA∶Rha∶GalA∶Gal∶Ara=2.9∶9.6∶63.9∶10.1∶14.3	–	
	ALTPA2		25.8、4.6	Man∶GlcA∶Rha∶GalA∶Glc∶Gal∶Ara=0.8∶15.5∶8.8∶28.9∶3.9∶22.8∶20.1	–	
叶	–	透析法除小分子杂质	–	–	–	[33]
叶	ALLP-A	DEAE-纤维素离子交换柱层析、超滤除盐(1000 Da)	主要分布于0.18~300.6 kDa之间, 少部分分布于300.6 kDa以上, 但峰型复杂	Gal∶Ara∶Rha∶Glc∶Man∶Xyl=36.85∶33.92∶11.07∶8.45∶6.57∶3.14	–	[10]
	ALLP-B		主要分布于0.18~300.6 kDa之间, 但峰形复杂	Glc∶Gal∶Ara∶Xyl∶Rha∶Man∶GlcA∶GalA=25.64∶18.11∶15.39∶14.10∶9.41∶7.17∶4.63∶5.55	–	
	ALLP-C		分子量分布于300.6 kDa以上	GalA∶Ara∶Gal∶Rha∶Glc∶Xyl∶GlcA∶Man=60.38∶13.85∶11.40∶9.59∶1.26∶1.03∶0.97∶1.52	–	
根	ALRP1-A1		分布于0.18~300.6 kDa范围内, 具有较为明显的对称峰, 该峰的分子量在20 kDa左右	Glc∶Gal∶Ara∶Rha∶Man∶Xyl=28.60∶33.21∶25.84∶4.16∶6.32∶1.87	–	
	ALRP1-A2		在0.18~300.6 kDa范围内有一个明显对称的峰, 该峰的分子量在4~6 kDa左右	–	–	
	ALRP1-B	DEAE-纤维素离子交换柱层析、超滤除盐(1000 Da)	主要分布于300.6 kDa以上, 在0.18~300.6 kDa范围内无明显峰形	Gal∶Ara∶GalA∶Rha∶GlcA∶Glc∶Xyl∶Man=27.73∶24.16∶15.70∶10.83∶8.70∶6.07∶3.57∶3.23	–	
	ALRP1-C		色谱峰重叠严重, 只有一部分分子量分布在0.18~300.6 kDa范围内	GalA∶Ara∶Gal∶Rha∶GlcA∶Xyl∶Glc=60.18∶15.65∶11.57∶8.18∶1.93∶1.86∶0.63	–	
	ALRP2-A		在0.18~300.600 kDa范围内, 有一个明显对称的峰, 该峰的分子量在4~6 kDa左右	Gal∶Ara∶Man∶Glc∶Rha∶Xyl=40.56∶26.59∶11.53∶11.78∶8.27∶1.26	–	

续表 2

多糖来源	多糖名称	纯化方法	相对分子质量(kDa)	单糖组成及比例	构型及糖苷键	参考文献
	ALRPN-1		15.42	Glc∶Gal∶Ara=81.68∶13.88∶4.43	→4)-β-D-Galp-(1→和→4)-α-D Glcp-(1→	
	ALRPN-2	Sepharose Cl-6B 凝胶柱、HPGPC	5.105	Glc∶Gal∶Man=60.74∶25.75∶13.50	→4)-β-D-Galp-(1→、→4)-α-D-Glcp-(1→、→4)-β-D-Manp-(1→和→4,6)-α-D-Glcp-(1→	
	ALRPN-3		6.43	Glc∶Gal∶Man∶Ara=23.67∶7.04∶35.1∶34.18	(1→4)-β-D-Man和(1→5)-α-L-Ara	
花	Vp2a-Ⅱ	DEAE-纤维素离子交换柱层析	7	Rha∶ Ara∶Xyl∶Man∶Glu∶Gal=1.94∶16.7∶0.38∶1.76∶0.17∶15.4	→6)-α-D-Galp-(1→6)-β-D-Glcp-(1→6)-α-D-Galp-(1→5)-Ara-(1→	[30]
	Vp3		9	Rha∶Ara∶Xyl∶Man∶Glu∶Gal=8.09∶7.87∶2.12∶2.46∶0.41∶8.43	α-D-GlcpA-(3→α-D-GalpA	
茶	Bt	−	31.21	Xyl∶Ara∶Rha∶Fuc∶Glu∶Gal∶Man=1.08∶33.09∶20.50∶1.08∶8.27∶35.61∶0.36	α-Araf-(1、→4)-α-GalpA-(1→、α-Fucp-(1→	[8]
茶	Ht	−	49.11	Xyl∶Ara∶Rha∶Fuc∶Glu∶Gal∶Man=1.55∶21.91∶13.66∶0.77∶35.82∶25.52∶0.77	α-Araf-(1、→2, 6)-α-Galp-(1→、→3)-α-Fucp-(1→	[8]
叶	AVRP-N	DEAE-纤维素离子交换柱层析、HPGPC	5.405	Man∶Ara∶Glu∶Gal=35.10∶34.18∶23.67∶7.04	(1→4)-β-D-Man、(1→5)-α-L-Ara	[9]

注: −未提及; 甘露糖(Man)、鼠李糖(Rha)、半乳糖醛酸(GalA)、葡萄糖醛酸(GlcA)、葡萄糖(Glc)、半乳糖(Gal)、阿拉伯糖(Ara)、木糖(Xyl)、岩藻糖(Fuc); 罗布麻茶, 即利用罗布麻制备的茶叶。

螺旋结构。此外, 不同方法提取的罗布麻多糖, 虽然单糖组成种类大致相同, 但各单糖所占的摩尔比存在一定差异[17]。周金辉[14] 利用 GPC 分别测定了酸、碱和蒸馏水提取出的罗布麻多糖的分子量分布, 也得出其分子量分布存在较大差异。

3 罗布麻多糖的生物活性

3.1 抗氧化

植物多糖具有良好的抗氧化能力, 能清除多种自由基, 包括羟基自由基、DPPH 自由基等, 同时, 其还具有一定的还原能力[17,33,35], 在食品领域具有广泛的应用前景。罗布麻多糖对 DPPH 自由基的清除能力及对铜离子的还原能力与 V_C 接近, 且该抗氧化特性呈现浓度依赖性, 有望成为新型天然抗氧化剂[20]。此外, 罗布麻多糖还可与其他成分复配协同发挥抗氧化作用。史文娟[32] 证明罗布麻多糖清除活性氧自由基的能力相当于 V_C 的 6 倍, 远高于黄酮。更进一步发现罗布麻多糖和黄酮的复配物在抗氧化时具有协同作用, 这有利于复合抗氧化剂的开发和对罗布麻活性成分的综合利用。但罗布麻多糖的抗氧化活性因提取方法的不同而存在显著差异, 周元龙等[16] 采用热水提取、超声辅助提取、果胶酶提取、纤维素酶提取和超声微波协同提取法获得的罗布麻叶多糖 AVP-HWE、AVP-UE、AVP-PE、AVP-CE 和 AVP-UME 均具有优异的抗氧化能力, 但不同多糖对自由基的清除具有选择性。其中, AVP-HWE 对 DPPH 及 $ABTS^+$自由基清除能力最强; AVP-UE 对羟自由基清除能力最强; AVP-CE 对亚铁离子螯合能力最强。

3.2 免疫调节

大量研究发现植物多糖可通过激活巨噬细胞的免疫应答而发挥免疫调节功能[36−38]。罗布麻多糖作为天然植物活性多糖同样具有免疫调节活性。来源于罗布麻根部的三种罗布麻多糖 ALRPN-1、ALRPN-2、ALRPN-3 可促进 IL-4 的分泌, 其中, ALRPN-2 可促进 IFN-γ 的分泌[10]。进一步研究证明, 三种多糖可能通过调控 Th1/Th2 细胞产生相关的细胞因子, 影响脾淋巴细胞的转化, 进而调控 ERK/MAPKs 信号通路发挥其免疫调节作用[10]。不同提取方法和不同植株部位获得的多糖在免疫调节能力上差异较大, 体外实验证明来源于罗布麻花的多糖 Vp2a-II 和 Vp3 均具有免疫调节活性, 但免疫调节能力有较大差异[14]。Vp2a-II 在 200 μg/mL 时对巨噬细胞吞噬能力的刺激达到峰值, 而 Vp3 仅在高浓度(400 μg/mL)时能提高巨噬细胞的吞噬活性[14]。进一步的机制研究证明这两种多糖的免疫调节作用与激活 NF-κB/MAWK 信号通路有关(图 1)。此外, 动物实验进一步证明了罗布麻多糖的免疫调节活性。如罗布麻叶多糖(AVRP-N)能刺激细胞因子 IFN-γ、IL-2、IL-10 和 IL-4 的产生, 从而对小鼠脾淋巴细胞的增长起到调控作用[9]。而罗布麻花多糖可对环磷酰胺(CTX)诱导的免疫缺陷小鼠起到免疫调节的作用, 进一步探究发现其免疫活性可能通过调控

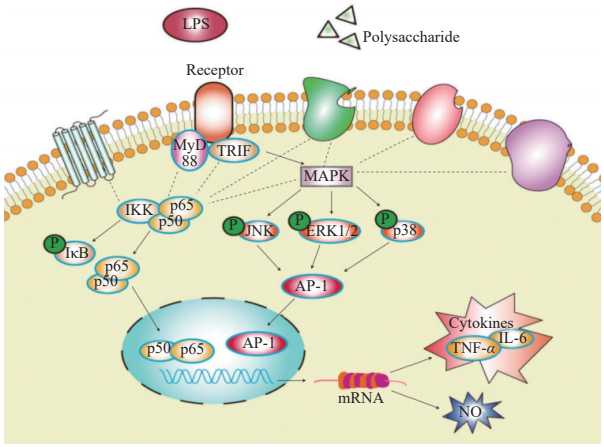


图 1　罗布麻多糖 Vp2a-II 和 Vp3 免疫调节机制图[14]

Fig.1　Immunomodulatory mechanism diagram of polysaccharides Vp2a-II and Vp3 from *A. venetum*[14]

免疫相关基因（*Bcl3*、*Hp*、*Lbp*、*Cebpd*、*Lcn2*）的表达来实现[16]。

3.3　抗炎

天然植物多糖普遍具有抗炎功效，可作为理想的抗炎制剂[39]。目前已有初步研究表明罗布麻多糖可通过抑制促炎因子分泌、阻断炎症相关信号通路、抑制巨噬细胞过度活化以及减少巨噬细胞吞噬等途径发挥抗炎功效。Abubakar 等[8] 从罗布白麻和红麻茶中提取出两种水溶性多糖，分子量分别为 31.21 和 49.11 kDa，体内外实验显示这两种多糖可抑制炎症因子、环氧合酶（COX-2）、肿瘤坏死因子（TNF-α）和白细胞介素（IL-6）的表达，具有良好的抗炎功效。斑马鱼切尾模型进一步证明：罗布麻多糖可通过抑制巨噬细胞和中性粒细胞的聚集以及促进巨噬细胞和中性粒细胞的清除等途径，在炎症初期、中期和后期发挥抗炎功效，具有较高的体内抗炎活性[31]。此外，罗布麻多糖可通过调控多种免疫细胞的功能，如抑制巨噬细胞增殖和吞噬实现抗炎效果。Liu 等[28] 从罗布麻根提取得到水溶性罗布麻多糖 ALRP，进一步纯化获得 ALRPN-1 和 ALRPN-2，它们可显著降低一氧化氮（NO）、TNF-α、IL-6 和 IL-1β 水平，并下调脂多糖（LPS）诱导的巨噬细胞（RAW 264.7）中丝裂原活化蛋白激酶（MAPKs）信号通路的细胞外信号相关激酶（ERK1/2）的磷酸化水平，发挥强大的抗炎作用。目前，关于罗布麻多糖抗炎功效以及抗炎机制的研究还很少，未来需进一步深入研究其作用机制，为抗炎提供安全、有效的科学依据。

3.4　抗凝血

血液凝固会引发血栓，诱发一系列心脑血管疾病[40]，严重威胁人类生命健康。肝素是一种常用的心血管疾病药物，但是肝素在实际使用过程中会出现一些副作用，如血小板减少及出血等。寻找作用效果好、副作用小的替代物成为研究热点。一些天然来源的多糖类物质往往具有一定药用价值，如海藻来源的硫酸多糖是天然抗凝剂的良好来源，已成为寻找新药的重要研究领域[41]。近年来，罗布麻多糖也被证明在抗凝血方面发挥功效。Wang 等[29] 采用水提法从罗布麻花中获得了分子量分别为 7 和 9 kDa 的多糖 Vp3 和 Vp2a-II，可分别通过不同途径发挥抗凝血作用。其中，Vp2a-II 可通过外源性途径和内源性凝血途径发挥抗凝血功效，Vp3 则通过外源性途径和凝血途径抗凝血[30]。由此可见，罗布麻多糖在开发抗凝血产品方面具有一定潜力，但多糖的抗凝功效与其结构密切相关。目前，对罗布麻多糖的结构解析还不充分，限制了其作为抗凝血制剂的进一步开发和应用。未来，可通过罗布麻多糖的结构调控、改善提取、纯化工艺等，获得具有优异抗凝血功效的罗布麻多糖。

3.5　降血糖

高血糖会导致一系列慢性疾病的发生，如心血管疾病、神经病变、糖尿病、肾病等[42–43]。预防和控制血糖对于控制慢性疾病的发生、提升人们的生活质量和健康水平至关重要。多项研究表明某些植物多糖具有显著降血糖作用[43–44]。罗布麻多糖在降血糖方面也表现出一定效果。对高脂饮食联合链脲佐菌素（STZ）诱导的 II 型糖尿病小鼠灌胃碱提罗布麻叶多糖四周后，给药组小鼠的空腹血糖水平显著降低，糖尿病相关症状得到了明显改善[15]。进一步研究表明，碱提罗布麻多糖主要通过恢复糖尿病小鼠的糖原含量、改善胰岛 β 细胞功能、改善血脂水平、恢复抗氧化水平以及促进短链脂肪酸的分泌发挥对 II 型糖尿病小鼠的治疗作用。基于以上特性，罗布麻叶多糖在改善 II 型糖尿病方面发挥重要功效，为开发罗布麻多糖类功能性保健产品或药物制剂奠定了坚实的基础。

3.6　肠道菌群调节

肠道菌群与人体健康密切相关，肠道菌群一旦失衡，将会增加肠道相关疾病的患病风险，如，炎症性肠病（IBD）和癌症（CRC）[45–46]。肠道微生物群在调节肠道屏障的完整性和功能方面发挥重要作用，多项研究表明调节肠道菌群可以增加肠道屏障功能，进而有效缓解和治疗各种疾病[45–46]。大多数植物来源的多糖不能在上消化道吸收和消化；相反，它们可被肠道菌群利用，代谢产生 SCFAs，促进有益细菌的繁殖，展现出了其潜在的益生元活性[47–50]。近年来，罗布麻多糖也被证明具有肠道菌群调节的功效[32]。Yuan 等[31] 分别采用水提法和碱提法（0.05 mol/L NaOH）从罗布麻叶中提取出了两种罗布麻多糖，利用高脂饮食和链脲佐菌素（STZ）诱导的 II 型糖尿病小鼠模型进行动物实验，结果证明两种罗布麻多糖对小鼠肠道菌群均具有调节作用，可增加有益菌的丰度并降低有害菌的丰度。

4　罗布麻多糖的应用

4.1　功能性食品

植物多糖具有多种生物活性，可广泛用于各类功能性食品的开发，发挥精准营养的作用[51]。肖俊勇

等[51] 制备出含灵芝、枸杞和麦冬复合多糖的保健巧克力，具备生物功能的同时达到热量低、不易肥胖的效果。此外，多糖类物质的加入可与功能性食品中其他活性成分产生协同作用，如多糖与多酚偶联可提高降血糖、免疫调节等生物活性[52]。罗布麻多糖因其降血糖、肠道菌群调节等活性[14−15]，也可用于开发具备特殊功效的功能性食品，如固体饮料、益生元、酸奶及代餐粉等，与其他活性成分和营养成分协作，赋予产品多种生理功能，对糖尿病、肥胖症等人群友好。

4.2 益生菌载体

多糖类物质可以作为益生菌的新型绿色包埋材料[53]，保护益生菌在口服递送时免受胃肠道不良环境的影响，提高益生菌的稳定性和存活率。目前，已有多种多糖被证实可开发成功能性材料，如膜、水凝胶、胶囊、纳米载体等，用于药物或营养物质递送以及益生菌包埋等[54−55]。例如，玉米醇溶蛋白和大豆多糖通过抗溶剂沉淀法形成纳米颗粒后，可用于包埋枯草芽孢杆菌。包埋后的枯草芽孢杆菌在模拟胃肠液消化过程中，其存活率相较于未包埋枯草芽孢杆菌提升了 3.13 倍，巴氏杀菌存活率提升了 3.20 倍[56]。Zhang 等[57] 设计了一种铁离子共交联的仙草多糖微凝胶，并通过多糖上自然结合的棕色生物活性物质，酚金属框架实现水凝胶的机械增强，用于包埋嗜黏蛋白阿克曼菌（AKK）。包埋后的益生菌在模拟肠胃液消化下的存活率大大提升，增加了到达肠道的活菌数，更好地实现了肠道屏障功能的恢复以及肠道菌群的平衡。罗布麻多糖由于其良好的功能特性[8,58]，也有望在上述材料中得到应用。同时，罗布麻多糖也可配合其他功能性成分、纳米材料和生物活性物质开发新型功能性材料。

4.3 乳液稳定剂

有些天然植物多糖或其缀合物被证明可用于乳液稳定剂[58−59]。由于植物来源特质，其安全性远高于其他乳液稳定剂，且其具有一定的营养价值和生物活性，可广泛用于功能性食品的开发。因此，植物多糖及其缀合物作为乳液稳定剂备受人们关注。目前，罗布麻多糖在稳定乳液方面已开展初步研究。Chen 等[60] 利用碱提法从罗布麻茶叶渣中获得了多糖-蛋白复合物 ATPC-A，该复合物可稳定以中链甘油三酯（MCT）为油相的水包油乳液。

基于罗布麻多糖或其复合物在乳液稳定方面的研究甚少，效果不佳这一现状，未来可从以下几方面对罗布麻多糖及其缀合物在稳定乳液方面的应用进行研究：a.罗布麻不同部位来源的多糖和不同提取方法获得的多糖在乳液稳定方面的差异性研究；b.罗布麻及其废弃物多糖进行功能化修饰或者复配其他类型稳定剂用于乳液制备；c.罗布麻多糖及其缀合物稳定乳液机理；d.探索罗布麻多糖稳定的乳液在药物、营养物质递送以及化妆品等领域的应用潜力。

综上所述，目前针对罗布麻多糖的研究还不够深入，其产品开发应用仍受限于提取方法复杂、成本高、多糖结构和功能研究不透彻等问题。因此，对罗布麻多糖的高效、低成本制备方法和功效的进一步研究是当前罗布麻多糖研究的重点，也是其用于各领域的基础。

5 总结与展望

罗布麻多糖具有抗氧化、免疫调节、抗炎等多种生物活性，赋予其广泛的应用价值。但罗布麻多糖的基础研究开展不充分，提取纯化方法仍停留在传统的水提法、碱提法等；结构与生物活性之间的关系未明，虽已通过初步实验证明其生物活性与其单糖组成、分子量、分支度等有关，但其定量关系、活性功能组分等亟待进一步探究；其在人体内的作用效果也尚未明晰，还需更为详尽的安全性评价和试验验证。其次，罗布麻多糖的开发利用还面临着规模化提取成本高，纯度控制困难、脱色效果不佳、脱色破坏结构等工业化瓶颈。此外，多糖稳定性与标准化生产也存在困难：不同品种、不同部位以及不同提取方式都对提取出的罗布麻多糖的结构、生物活性造成影响。

基于以上问题，对罗布麻多糖的未来发展趋势进行了展望：a.开发新型绿色提取纯化工艺，增加其提取效率和纯度、降低其生产成本。同时，对罗布麻多糖进行多维结构表征，明确其精细分子结构，进一步阐明其构效关系。此外，利用体内和体外实验对其进行全面安全性评价，夯实其应用基础。b.采用物理、化学或生物工程等手段对多糖进行改性，从而提高其生物活性、增加其应用效果。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 杨宏伟, 陈茹, 姚国民, 等. 新疆罗布麻产业发展现状分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(S1): 163−167. [YANG Hongwei, CHEN Ru, YAO Guomin, et al. The current development status of the *Apocynum venetum* industry in Xinjiang[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(S1): 163−167.]

[2] 王琨琳. 罗布麻织物服用性能的研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2014. [WANG Kunlin. Study on the wearability of *Apocynum* fabric[D]. Wuhu: Anhui Polytechnic University, 2014.]

[3] XIANG T, WU L J, ISAH M B, et al. *Apocynum venetum*, a medicinal, economical and ecological plant: A review update[J]. PeerJ, 2023, 11: e14966.

[4] 梅小雪. 罗布麻和苎麻纤维增强聚乳酸复合材料的制备与性能研究[D]. 上海: 东华大学, 2016. [MEI Xiaoxue. Fabrication and properties of *Apocynum* and ramie fiber reinforced polylactic composites[D]. Shanghai: Donghua University, 2016.]

[5] FU Hongmin, YIN Chunling, SHEN Zhiyong, et al. Flavonoids from the leaves of *Apocynum venetum* and their anti-inflammatory activity[J]. Journal of Chemical Research, 2022, 46: 246927412.

[6] SHI Lei. Bioactivities, isolation and purification methods of polysaccharides from natural products: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 37−48.

［7］ YANG Wenna, ZHAO Ping, LI Xia, et al. The potential roles of natural plant polysaccharides in inflammatory bowel disease: A review[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 277: 118821.
［8］ ABUBAKAR A S, AHMAD B, AHMAD N, et al. Physicochemical evaluation, structural characterization, *in vitro* and *in vivo* bioactivities of water-soluble polysaccharides from Luobuma (*Apocynum* L.) tea[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140453.
［9］ LIU Dan, WANG Shuyue, WANG Guannan, et al. Structural characterization and immunoregulatory activity of a neutral polysaccharide from the roots of *Apocynum venetum* L[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 90−100.
［10］ 刘丹. 罗布麻叶、根多糖的分离纯化及根多糖的结构解析和免疫调节活性研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2022. ［LIU D. The isolation, purification, structural analysis and its effect on immunoregulation of polysaccharide from leaves and roots of *Apocynum venetum* L[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2022.］
［11］ LI Xin, WEI Jing, LIN Lezhen, et al. Extraction, moisturizing activity and potential application in skin cream of *Akebia trifoliata* (Thunb.) Koidz polysaccharide[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 197: 116613.
［12］ GOU Kaijun, LI Yuan, QU Yan, et al. Advances and prospects of *Bletilla striata* polysaccharide as promising multifunctional biomedical materials[J]. Materials & Design, 2022, 223: 111198.
［13］ WANG Honglin, MA Changyang, SUN-WATERHOUSE D, et al. Immunoregulatory polysaccharides from *Apocynum venetum* L. flowers stimulate phagocytosis and cytokine expression via activating the NF-κB/MAPK signaling pathways in $RAW_{264.7}$ cells[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(4): 806−814.
［14］ 周金辉. 罗布麻叶多糖提取及其生物活性的研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2020. ［ZHOU Jinhui. Extraction of polysaccharide from *Apocynum venetum* and its biological activity[D]. Qingdao: Qingdao University, 2020.］
［15］ ZHAO Qingchun, WANG Jinmei, LIANG Haiyang, et al. Prevention of cyclophosphamide-induced immune suppression by polysaccharides from *Apocynum venetum* flowers via enhancing immune response, reducing oxidative stress, and regulating gut microbiota in mice[J]. Frontiers in Pharmacology, 2024, 15: 1354794.
［16］ 周元龙, 宋年年, 易宇欣, 等. 不同提取方法对罗布麻多糖理化性质及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(19): 40−48. ［ZHOU Yuanlong, SONG Niannian, YI Yuxin, et al. Effects of different extraction methods on physicochemical properties and antioxidant activity of *Apocynum venetum* polysaccharides [J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(19): 40−48.］
［17］ HAN Xue, LIU Hai, ZHANG Yeshan, et al. The effects of different extraction methods on the structure and antioxidant properties of *Bletilla striata* polysaccharide[J]. Preparative Biochemistry & Biotechnology, 2025, 55(4): 392−402.
［18］ 卢金华, 袁清霞, 杨珍珍, 等. 甘蔗叶、渣多糖提取、分离纯化、结构表征及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 458−472. ［LU J H, YUAN Q X, YANG Z Z, et al. Research progress on extraction, isolation, purification, structure characterization, and bioactivities of polysaccharides from sugarcane leaves and bagasse[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 458−472.］
［19］ 郑思睿, 杨婷, 依木然·马瑞士, 等. 响应面法优化罗布麻多糖提取工艺及抗氧化活性研究[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(16): 93−97. ［ZHENG Sirui, YANG Ting, EMRAN Maris, et al. Study on extraction and antioxidant activity of polysaccharides in *Apocynum venetum* by response surface methods[J]. Food Research and Development, 2018, 39(16): 93−97.］
［20］ 赵东洋. 罗布麻系列多糖的提取、分离以及抑制半乳凝集素活性的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2017. ［ZHAO Dongyang. Studies on extraction and separation of polysaccharides from *Apocynum* and their anti-galectins effects[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2017.］
［21］ ZHOU Jinhui, ZOU Ping, JING Changliang, et al. Chemical characterization and bioactivities of polysaccharides from *Apocynum venetum* leaves extracted by different solvents[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2020, 14(1): 244−253.
［22］ 杨婷, 王玮, 姚军. 新疆罗布麻中多糖提取工艺优化及体外降压调脂活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(7): 1927−1933. ［YANG Ting, WANG Wei, YAO Jun. Optimization of extraction process of polysaccharides from *Apocynum* Sinkiang and study of antihypertensive and lipid-lowering activity *in vitro*[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2019, 10(7): 1927−1933.］
［23］ ZHOU Bingfeng, JIANG Jiaming, HUO Yu, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of *Chlorella* polysaccharide[J]. Algal Research, 2025, 89: 104077.
［24］ HU Jialun, LIU Yue, CHENG Liming, et al. Comparison in bioactivity and characteristics of *Ginkgo biloba* seed polysaccharides from four extract pathways[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 159: 1156−1164.
［25］ WU Dingtao, GENG Jinlei, LI Jie, et al. Efficient extraction of pectic polysaccharides from thinned unripe kiwifruits by deep eutectic solvent-based methods: Chemical structures and bioactivities[J]. Food Chemistry, 2023, 21: 101083.
［26］ 张玲赫, 谢浩, 努尔买买提. 微波辅助低共熔溶剂提取新疆野生樱桃李多糖工艺及抗氧化、抑菌活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 228−236. ［ZHANG L H, XIE H, NUER M. Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction of Xinjiang wild *Prunus cerasifera* Ehrh. polysaccharides and analysis of its antioxidant and antibacterial activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 228−236.］
［27］ 李梦娜, 黄佳蓉, 马俊炜, 等. 天然多糖的提取纯化及其对食品物理特性改善的应用研究[J]. 食品科技, 2024, 49(12): 204−212. ［LI Mengna, HUANG Jiarong, MA Junwei, et al. Extraction and purification of natural polysaccharides and its application in improvement of food physical properties[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(12): 204−212.］
［28］ LIU Dan, WANG Shuyue, BAO Yongli, et al. Extraction, purification and structural characterization of polysaccharides from *Apocynum venetum* L. roots with anti-inflammatory activity[J]. Process Biochemistry, 2022, 121: 100−112.
［29］ WANG Lili, ZHANG Xiaofeng, NIU Yingying, et al. Anticoagulant activity of two novel polysaccharides from flowers of *Apocynum venetum* L[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 1230−1237.
［30］ 田立, 郭晓农, 孟杨, 等. 罗布麻多糖成分体外抗氧化活性研究[J]. 中兽医医药杂志, 2016, 35(4): 5−8. ［TIAN Li, GUO Xiaonong, MENG Yang, et al. Study on the antioxidant activity of polysaccharide from *Apocynum venetum in vitro*[J]. Journal of Traditional Chinese Veterinary Medicine, 2016, 35(4): 5−8.］
［31］ 李卓航. 罗布麻多糖和罗布麻发酵产物的安全性与抗炎活性比较研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021. ［LI Zhuohang. Comparative study on safety and anti-inflammatory activity of Apocynum venetum polysaccharide and fermentation products[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2021.］
［32］ YUAN Yuan, ZHOU Jinhui, ZHENG Yanfen, et al. Beneficial effects of polysaccharide-rich extracts from *Apocynum venetum* leaves on hypoglycemic and gut microbiota in type 2 diabetic mice[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2020, 127: 110182.
［33］ 史文娟. 罗布麻和红三叶中多糖与黄酮的抗氧化活性研究

[D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [SHI Wenjuan. The study on antioxidant activities of polysaccharide and flavonoid in *Apocynum venetum* L. and *Trifolium pratense* L[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.]
[34] 王春朋. 罗布麻茶多糖的乳化特性研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021. [WANG Chunpeng. Emulsification properties for the *Apocynum venetum* L. tea polysaccharide conjugates[D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.]
[35] SHI L J, YIMAMU H, KAWULI A, et al. HPTLC study of the monosaccharide composition of a polysaccharide from *Apocynum venetum* leaves[J]. Chemistry of Natural Compounds, 2015, 51(1): 130−131.
[36] NAKAMURA T, SUZUKI H, WADA Y, et al. Fucoidan induces nitric oxide production via p38 mitogen-activated protein kinase and NF-*κ*B-dependent signaling pathways through macrophage scavenger receptors[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2006, 343(1): 286−294.
[37] 张越, 孙明杰, 段雨婷, 等. 茯苓多糖对脾虚大鼠免疫功能和肠道菌群调节作用的研究[J]. 中华中医药杂志, 2024, 39(10): 5474−5480. [ZHANG Yue, SUN Mingjie, DUAN Yuting, et al. Study of *Poria cocos* polysaccharide on immune function and intestinal flora regulating of spleen deficiency rats[J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2024, 39(10): 5474−5480.]
[38] 薛胜男, 宋旺弟, 王云云, 等. 低分子量甘草多糖对健康小鼠免疫功能、肠道菌群和代谢产物的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 196−206. [XUE Shengnan, SONG Wangdi, WANG Yunyun, et al. Effects of low-molecular-weight *Glycyrrhiza* polysaccharides on immune function, gut microbiota and metabolites in healthy mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(13): 196−206.]
[39] LIU Yong, YE Yunfang, HU Xiaobo, et al. Structural characterization and anti-inflammatory activity of a polysaccharide from the lignified okra[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 265: 118081.
[40] 卞春, 王振宇, JOHN Shi. 黑木耳多糖生物功能的研究进展[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 390−394,400. [BIAN Chun, WANG Zhenyu, JOHN Shi. Research progress of *Auricularia auricular* polysaccharide (AAP) biological functions[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 390−394,400.]
[41] TANG Hao, HUANG Jinwen, YUAN Qingxia, et al. A regular *Chlorella mannogalactan* and its sulfated derivative as a promising anticoagulant: Structural characterization and anticoagulant activity[J]. Carbohydrate Polymers, 2023, 314: 120956.
[42] FENG Xiaojuan, ZHANG Qian, LI Jingyao, et al. The impact of a novel Chinese yam-derived polysaccharide on blood glucose control in HFD and STZ-induced diabetic C57BL/6 mice[J]. Food & Function, 2022, 13(5): 2681−2692.
[43] JIAO Jiaqi, YONG Tianqiao, HUANG Longhua, et al. A *Ganoderma lucidum* polysaccharide F31 alleviates hyperglycemia through kidney protection and adipocyte apoptosis[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 226: 1178−1191.
[44] ZHANG Meng, YANG Licheng, ZHU Maomao, et al. Moutan cortex polysaccharide ameliorates diabetic kidney disease *via* modulating gut microbiota dynamically in rats[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 206: 849−860.
[45] HOU Kaijian, WU Zhuoxun, CHEN Xuanyu, et al. Microbiota in health and diseases[J]. Signal Transduction and Targeted Therapy, 2022, 7: 135.
[46] HUANG Pan, JIANG Anqi, WANG Xuxin, et al. NMN maintains intestinal homeostasis by regulating the gut microbiota [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 714604.
[47] ZHU Zhenjun, ZHU Beiwei, SUN Yujiao, et al. Sulfated polysaccharide from sea cucumber modulates the gut microbiota and its metabolites in normal mice[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 120: 502−512.
[48] ZHANG Xu, LIU Tingting, WANG Xi, et al. Structural characterization, antioxidant activity and anti-inflammatory of the phosphorylated polysaccharide from *Pholiota nameko*[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 976552.
[49] CHENG Ming, SHI Yongbin, CHENG Yumeng, et al. Mulberry leaf polysaccharide improves cyclophosphamide-induced growth inhibition and intestinal damage in chicks by modulating intestinal flora, enhancing immune regulation and antioxidant capacity[J]. Frontiers in Microbiology, 2024, 15: 1382639.
[50] LI Jianlong, YIN Wen, LIANG Yuan, et al. Pomegranate flower polysaccharide improves mastitis in mice by regulating intestinal flora and restoring the blood-milk barrier[J]. Frontiers in Pharmacology, 2024, 15: 1427355.
[51] 段晨晨, 赵文晓, 吕琴, 等. 药食同源类中药多糖在功能性保健食品方面的药理作用研究进展[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2022, 24(10): 3844−3850. [DUAN Chenchen, ZHAO Wenxiao, LÜ Qin, et al. Research progress on pharmacological effects of medicinal and edible polysaccharides in functional health foods[J]. World Science and Technology-Modernization of Traditional Chinese Medicine, 2022, 24(10): 3844−3850.]
[52] 肖俊勇, 占密勤, 从仁怀, 等. 含中药功能因子巧克力 3D 打印成型性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(5): 77−82. [XIAO Junyong, ZHAN Miqin, CONG Renhuai, et al. Study on the 3D printing formability of chocolate with Chinese medicine functional factor[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(5): 77−82.]
[53] YANG Lu, GU Tingwei, XU Yang, et al. Plant polysaccharides as novel biomaterials for microcapsule construction and therapeutics delivery[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2022, 625: 122137.
[54] LI Kexin, LIU Xizhong, JIANG Fatang, et al. In the process of polysaccharide gel formation: A review of the role of competitive relationship between water and alcohol molecules[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 281: 136398.
[55] 龚雨薇, 张华林. 促创面愈合的载药复合功能性敷料的研究进展[J]. 宁夏医科大学学报, 2023, 45(10): 1065−1071. [GONG Yuwei, ZHANG Hualin. Research progress on drug-loaded compound functional dressing for promoting wound healing[J]. Journal of Ningxia Medical University, 2023, 45(10): 1065−1071.]
[56] CHENG Cheng, SUN Manman, WANG Li, et al. Zein and soy polysaccharide encapsulation enhances probiotic viability and modulates gut microbiota[J]. LWT, 2024, 210: 116827.
[57] ZHANG Huijuan, ZHANG Jipeng, LIU Bin, et al. Natural phenolic-metal framework strengthened *Mesona chinensis* polysaccharides microgels for improved viability of probiotics to alleviate the liver injury and gut microbiota dysbiosis[J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34(41): 2401064.
[58] XU Xuanxuan, GONG Jixian, ZHANG Tao, et al. Insights into antibacterial mechanism of *Apocynum venetum* L. fiber: Evolution of bioactive natural substances in bast during chemical degumming process[J]. Industrial Crops and Products, 2020, 151: 112419.
[59] CHEN Xiaoqiang, SUN Fengjie, TAN Qianyi, et al. High internal phase emulsions stabilized solely by alkali-extracted bamboo leaf polysaccharide conjugates[J]. Industrial Crops and Products, 2023, 201: 116932.
[60] CHEN X Q, WANG C P, WANG C Y, et al. The emulsification properties of alkaline-extracted polysaccharide conjugates from *Apocynum venetum* L. tea residues[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 124: 107315.