滋阴药中多糖成分益生元样作用机制研究进展

刘佳蕊[1,2]，王欢欢[1,2]，崔天怡[3]，赵鑫[3]，孟凡征[1,2]

1. 天津市南开医院，天津 300100
2. 天津中医药大学南开临床学院，天津 300100
3. 天津中医药大学方剂学教育部重点实验室，天津 301617

［摘要］随着微生态学研究的不断发展，肠道菌群的调节已成为改善健康状况的重要途径之一。祛邪扶正是中医学的基本治法之一，扶正药中的滋阴药在临床中广泛用于治疗消渴、心悸、阴虚外感、便秘等多种疾病。现代药理和临床研究表明滋阴药中含有的多糖成分作为维持肠道菌群结构和功能的重要来源，具有免疫调节、抗炎、抗肿瘤、改善糖脂代谢紊乱等多种作用。综述滋阴药中的多糖成分调节体内外肠道菌群稳态、促进短链脂肪酸（SCFAs）等代谢产物生成、调控信号通路的相关研究，分析其作为潜在益生元与益生菌联用的前景，为将滋阴药中的多糖成分开发成益生元提供科学依据。

［关键词］滋阴药；多糖；益生元；肠道菌群；作用机制；研究进展
［中图分类号］R28　［文献标志码］A　［文章编号］0256-7415（2026）04-0116-07
DOI：10.13457/j.cnki.jncm.2026.04.019

Research Progress on the Prebiotic-Like Mechanism of Polysaccharide Components in Yin-Nourishing Herbs

LIU Jiarui[1,2], *WANG Huanhuan*[1,2], *CUI Tianyi*[3], *ZHAO Xin*[3], *MENG Fanzheng*[1,2]

1. Tianjin Nankai Hospital, Tianjin 300100, China; 2. Nankai Clinical College, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 300100, China; 3. Key Laboratory of Pharmacology of Traditional Chinese Medicine Formulae, Ministry of Education, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, Tianjin 301617, China

Abstract: With the continuous development of microecological research, the regulation of gut microbiota has become an important approach to improving health status. Eliminating pathogens and reinforcing healthy qi is a fundamental therapeutic principle in traditional Chinese medicine (TCM). Among the healthy qi-reinforcing herbs, yin-nourishing herbs are widely used in clinical practice to treat various diseases such as diabetes, palpitations, yin deficiency-induced exogenous fever, and constipation. Modern pharmacological and clinical studies have shown that polysaccharides contained in yin-nourishing herbs serve as important sources for maintaining the structure and function of gut microbiota, exhibiting multiple effects including immunomodulation, anti-inflammation, anti-tumor activity, and improvement of glucose and lipid metabolism disorders. This review summarizes research on how polysaccharide components from yin-nourishing herbs regulate gut microbiota homeostasis in vivo and in vitro, promote the production of metabolites such as short-chain fatty acids (SCFAs), and modulate signaling pathways. It also analyzes the potential of these polysaccharides as prebiotics combined with probiotics, providing a scientific basis for developing polysaccharide components from yin-nourishing herbs into prebiotics.

Keywords: Yin-nourishing herbs; Polysaccharides; Prebiotics; Gut microbiota; Mechanism of action; Research progress

［收稿日期］2025-08-31
［修回日期］2025-10-30
［基金项目］天津市卫生健康委员会中医中西医结合科研课题（2025109，2025024）；国家中医药管理局第六批全国中医临床优秀人才研修项目（中医药拔尖人才培养项目）（国中医药人教涵〔2025〕256号）
［作者简介］刘佳蕊（1994-），女，博士，主治医师。
［通信作者］赵鑫（1989-），女，博士，副研究员。孟凡征（1978-），男，主任医师。

滋阴药是临床中常用的补益类中药，大多味甘，性寒凉，质润，具有滋养阴液之功，用于治疗消渴、心悸、阴虚外感、便秘等多种疾病[1]。大多数滋阴药来自于植物，单个植物细胞组成的细胞壁富含纤维素、非纤维素多糖和木质素，非纤维素多糖是异质性的[2]。中医方剂中经常使用的汤剂及中成药生产工艺中的水煎法，使多糖类化合物得到了较好的提取[3]。目前已提取分离出100多种均一多糖，其中灵芝多糖、枸杞多糖、黄芪多糖、人参多糖等在临床中确有应用[4-8]。多糖结构的表征与探索是多糖构效关系研究中的热点与难点。已有研究发现从玉竹和黄精中提取出的中性多糖是一种果聚糖类多糖，其结构与常见的益生元结构相似，并且具有免疫刺激活性[9]。多糖作为肠道菌群的重要能量来源，可促进益生菌生长，抑制致病菌增殖，调节肠道菌群稳态和肠道菌群代谢物生成，激活相关受体及分子信号通路，改善人体免疫炎症反应、代谢功能紊乱等问题，具有益生元样作用[10]。益生元作为人体膳食重要的组成部分，通过消化道到达肠道，可为益生菌提供养料，发挥调节肠道菌群平衡的作用[11]。尽管多糖的益生元核心作用机制较为明确，然而，对于滋阴药这类特定中药中的多糖成分，在临床应用中发挥疗效的具体菌群机制尚未被充分阐释。笔者基于肠道菌群综述滋阴药中多糖成分的益生元样作用及机制研究，不仅能够从微生态层面揭示滋阴理论的科学内涵，有望为阴虚证相关疾病的微生态调节提供新的干预靶点和产品研发思路。

1 滋阴药中的多糖成分重塑肠道菌群结构及相关代谢产物

多糖难以被人体的唾液-胃肠消化系统完全降解吸收[12]，大部分可随肠蠕动顺利到达大肠，被肠道菌群分解和利用。滋阴药中的多糖成分可作为肠道微生物发酵的碳源，为微生物的生长提供能量，它们具有类似益生元的作用，具体表现为改善肠道微生物多样性，促进益生菌增殖，抑制致病菌生长，参与多糖的代谢与转化，调节短链脂肪酸(SCFAs)等代谢产物生成，维持肠道微生态稳定。肠道菌群能够通过编码大量的碳水化合物活性酶(CAZymes)来降解具有不同化学特征的滋阴药中的多糖成分，例如糖苷水解酶(GHs)和多糖裂解酶(PLs)。GHs和PLs可以切断碳水化合物之间的糖苷键，最终在肠道菌群酵解作用下分解为寡糖、单糖，最后产生有益代谢产物，特别是SCFAs，如乙酸、丙酸和丁酸。乙酸是发酵产物中含量最多的SCFAs，是由大多数肠道细菌作为发酵产物产生的，但它也可以由氢营养芽孢杆菌降解生成，可通过乙酰胆碱辅酶A或氢气(H_2)、二氧化碳(CO_2)、甲酸盐途径形成。丙酸主要由拟杆菌门和厚壁菌门(如 *Phascolarctobacterium succinatutens*)，通过琥珀酸途径形成。丁酸的主要形成途径有2条，通过厚壁菌门利用丁酰辅酶或丁基-P催化生成。中药中的多糖成分作为天然的肠道微生态调节剂，与传统益生菌相比具有更稳定、更容易储存的优势，越来越多的研究者将目光转移到中药中的多糖成分调节肠道菌群及其代谢产物的研究上。

1.1 滋阴药中的多糖成分在体外对肠道菌群的调节作用 尽管动物体内研究能够提供较全面的肠道菌群动态信息，但对人体实际情况的直接适用性有限，且成本高。此外，药物对肠道菌群的作用会受到许多因素(例如食物不同成分)的影响，很难准确评估其对肠道菌群的直接影响，会降低动物实验研究的可靠性和清晰度。鉴于此，体外模拟消化和发酵特性的实验常被用作验证多糖益生元活性的有效工具，为高效筛选具有潜力的益生元奠定了基础。

细胞膜通透性是多糖抑菌活性的关键因素。破坏细胞膜中的蛋白质和核酸结构，能够抑制相关酶的功能，阻止核酸合成，最终造成细胞壁损伤[13]。有研究表明，多糖的抑菌活性与浓度有关，当菌群利用多糖的能力较强时，它可以将水解后的单糖作为自身的营养来源，此时抑菌活性会随多糖浓度升高而减弱；不同菌群对同种多糖表现出不同的耐药性，这可能与细胞壁上肽聚糖壁的厚度不同有关，此时抑菌活性不会随多糖浓度升高而产生较大改变[14]。如枸杞多糖对沙门氏菌、铜绿假单胞菌、大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌等致病菌的直接抑菌作用受pH值的影响，在pH=6的中性环境下抑菌效果最佳[15]。滋阴药中的多糖成分调节肠道菌群的体外研究具体见表1。

1.2 在体研究中滋阴药中的多糖成分对肠道菌群及其代谢产物的调节作用 多糖几乎不能被人类基因组编码的酶分解代谢，但可以被定居在结肠中的细菌作为微生物发酵底物，降解为可吸收的小分子代谢物，从而进一步与相关受体结合，激活分子信号

表1　滋阴药中的多糖成分调节肠道菌群的体外研究

多糖来源	给药浓度	上调微生物	下调微生物	文献
石斛	11.1 mg/mL	厚壁菌门、拟杆菌门	变形菌门	[16]
	2 g/L	干酪乳杆菌、嗜酸乳杆菌	–	[17]
玉竹	4.5 mg/mL	约氏乳杆菌	克雷伯菌	[18]
桑椹	2.5 mg/mL、5 mg/mL	多形拟杆菌	–	[19-20]
枸杞子	8 mg/mL	–	黑曲霉、产黄青霉	[15]
	378 μg/mL	–	沙门氏菌、铜绿假单胞菌、大肠埃希氏菌、金黄色葡萄球菌	[21]
黄精	31.25 ~ 500 mg/mL		白色念珠菌、金黄色葡萄球菌、蜡样芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌	[22]
百合	50 μg/mL	–	中华根霉、黑曲霉、啤酒酵母	[23]
	未进行定量实验	–	苹果霉菌	[24]
女贞子	50 ~ 200 mg/mL	–	金黄色葡萄球菌、大肠杆菌	[25]

通路，发挥抗炎、调节免疫与代谢等作用。

石斛多糖的化学结构及药理学研究显示，它的核心活性特征是内切-β-1，4-甘露聚糖酶的线性结构，核心结构域主要为葡萄糖和甘露糖，摩尔比为1.00∶4.76，由(1→4)-β-D-Glcp和(1→4)-β-D-Manp组成，并附有一些2-O-乙酰化基团。据报道，由半乳糖、葡萄糖、半乳糖醛酸和鼠李糖组成的多糖多能有效抗炎[26]，因此石斛多糖对小鼠结肠炎的抗炎作用可能归功于其单糖组成。枸杞多糖是研究较多的植物多糖之一，目前通过已建立的枸杞多糖纯化分离和结构表征方法，从枸杞子中分析和鉴定出超过33种多糖[27]。通过广泛的研究和探索发现，枸杞多糖的分子量在10 ~ 2 300 kDa范围内；单糖组成主要包括鼠李糖、岩藻糖、阿拉伯糖、半乳糖和半乳糖醛酸。药理学研究表明枸杞多糖在调节免疫、抗氧化、抗肿瘤等方面均有生物活性[28]。玉竹和黄精都属于百合科植物，黄精偏于“补五劳七伤，助筋骨，止饥，耐寒暑，益脾胃，润心肺”。从黄精中分离得到的2种多糖POP-1和PCP-1均含有(2→1)连接的β-d-果糖(Fruf)主链和(2→6)连接的β-d-Fruf侧链，具有内部α-d-吡喃葡萄糖(Glcp)的形式，这2种纯化的多糖之间的区别在于PCP-1具有在α-d-Glcp残基的O-3处连接的乙酰基，结构差异也导致了活性的区别，PCP-1比POP-1能表现出更好的免疫活性[9]。

综上，可以看出滋阴药中的多糖成分在结构上主要由葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖、鼠李糖组成，分子量大小分布较广，由α/β构型组成，但多为杂多糖；在功效上均能够促进乳酸球菌、拟杆菌、阿克曼氏菌等益生菌增殖，无论是在结构上还是在促进益生菌增殖上，都具有益生元样潜力，有助于被开发为益生元食品。下文对石斛、枸杞子、麦冬、桑椹、黄精、玉竹、五味子等滋阴药中的多糖成分调节肠道菌群及其代谢物的体内研究进行总结。见表2。

2　滋阴药中的多糖成分调控分子信号通路发挥益生元样作用

滋阴药中的多糖成分经由肠道菌群发酵代谢后生成SCFAs等小分子物质。SCFAs调节宿主的机制主要有2条途径，第一条是抑制组蛋白去乙酰酶(HDACs)直接调节相关基因表达，第二条是通过G蛋白偶联受体(GPRs)发出信号，激活GPR41、GPR43和GPR109A等，例如石斛多糖既可以提高肠道中的SCFAs水平和GPR43/41表达，还可增加主动脉中GPR41表达，改善肠道菌群，加强肠道屏障，从而降低大鼠血压并改善异常脂质代谢[41]。石斛多糖能富集产丁酸盐细菌丰度，激活GPR41表达，从而调节肠-脑-卵巢轴，改善多囊卵巢综合征病情[42]。但目前关于滋阴药中的多糖成分经由肠道菌群-SCFAs-信号通路发挥药理机制的中间环节尚不明确，仍需进一步研究和探索。

滋阴药中的多糖成分调控分子信号通路发挥益生元样作用较为深入的是石斛多糖和枸杞多糖，其益生元样作用涉及呼吸系统、心脑血管系统、消化系统、糖尿病及其并发症和生殖系统等。见表3。

表2　滋阴药中的多糖成分调节肠道菌群及其代谢物的体内研究

多糖来源	结构		肠道菌群		代谢产物	疾病模型	参考文献
	分子量	单糖组成及摩尔比	上调↑	下调↓			
	141.2 kDa	葡萄糖∶甘露糖=1.00∶4.76	拟杆菌、乳酸杆菌、瘤胃球菌	变形菌	SCFAs↑	溃疡性结肠炎	[29]
石斛	–	葡萄糖∶阿拉伯糖∶甘露糖∶木糖∶半乳糖∶鼠李糖=16.49∶20.62∶24.74∶15.46∶16.49∶6.19	拟杆菌、乳酸杆菌	–	–	免疫抑制	[30]
	746.52 kDa	甘露糖∶葡萄糖=2.55∶1.00	阿克曼菌、阿利斯提普氏菌	梭状芽胞杆菌	–	认知障碍	[31]
	–	甘露糖∶鼠李糖∶葡萄糖∶半乳糖∶阿拉伯糖=1.00∶0.93∶12.55∶0.31∶0.53	脱铁杆菌	肠球菌	SCFAs↑	非酒精性脂肪性肝炎	[32]
枸杞子	PLPS-1：250 000 kDa	葡萄糖∶阿拉伯糖∶岩藻糖∶半乳糖∶木糖=21.964∶1.336∶1.182∶1∶1	产SCFA的菌	–	SCFAs↑	2型糖尿病	[33]
	PLPS-2：8 000 kDa	葡萄糖∶半乳糖∶甘露糖∶阿拉伯糖∶岩藻糖∶木糖=14.368∶2.594∶1.956∶1.552∶1.466∶1					
麦冬	–	–	肠球菌	厚壁菌	D-半乳糖胺↓，牛磺酸↑，SCFAs↑	肥胖	[34]
桑椹	–	–	拟杆菌、乳杆菌、副杆菌、巴氏杆菌、阿克曼氏菌		–	肥胖	[35]
	18.796 kDa	–	嗜黏蛋白阿克曼氏菌	幽门螺杆菌	–	阿尔兹海默症	[36]
黄精	–	–	链球菌属	脱硫杆菌	SCFAs↑	高血压	[37]
	–	甘露糖∶鼠李糖∶半乳糖醛酸∶葡萄糖∶木糖∶阿拉伯糖=6.6∶15.4∶4.5∶8.8∶40.7∶24	乳杆菌	拉克诺普拉希埃、巴氏菌	SCFAs↑	正常小鼠	[38]
玉竹	未涉及分子量及单糖组成的研究成果		–	梭状芽孢杆菌、肠球菌、克罗普巴菌、乳球菌和萨特雷拉菌	异丁酸↑,丁酸↑，戊酸↑	肥胖	[9,39]
五味子	–	D-葡萄糖胺∶鼠李糖∶葡萄糖∶半乳糖∶木糖∶阿拉伯糖=7.5∶1.4∶2.5∶79∶7.1∶2.5	毛螺菌科未定种(毛螺菌科_S24-7菌群)、脱硫弧菌、阿利斯皮斯菌	乳酸杆菌、苏黎世杆菌	SCFAs↑	溃疡性结肠炎	[40]

3　滋阴药中的多糖成分作为潜在益生元与益生菌联用前景分析

多糖不能被人体直接消化，但可作为益生元通过抑制病原体和刺激免疫系统来维持机体胃肠道健康，被肠道菌群分解利用，生成具有生物活性的产物SCFAs，调节肠道微生物组成和活性，改善人体健康状况。滋阴药中的多糖成分可作为潜在益生元开发差异化的健康产品，具有广阔的应用前景。此外，中药多糖成分具有广泛的生物活性，可作为益生元与益生菌联合发挥作用，这对于合生元产品的开发和应用有着重要意义。

在食品农业领域，多糖与益生菌的组合搭配对牲畜有益，例如在饲料中添加益生菌和山药多糖的复合制剂可提高舍饲山羊的抗氧化功能，促进蛋白质代谢，但两者联用对糖脂代谢紊乱的调节作用不明显[55]。而在医学领域中有研究发现，山药多糖的纳米粒与双歧杆菌、卡波姆混后制得的合生元结肠靶向微生态调节剂，则可通过促进Bcl-2蛋白表达、抑制Bax蛋白表达，提高菌群失调大鼠的免疫调节能力[56]。此外，也有研究显示使用益生菌和基于多糖的递送系统在保证药物疗效的基础上还可提高结肠靶向剂型药物的释放量[57]。另一项研究发现，植物乳酸杆菌和香菇多糖组成的合生元对正常小鼠肠道微生态也具有调节作用，可促进肠道中乳杆菌、双歧杆菌等有益菌生长，降低肠杆菌、肠球菌等有害菌数量，提高SCFAs产量，且合生元使用效果优于两者

表3　滋阴药中的多糖成分调控信号通路改善人体健康的作用机制

疾病分类		多糖来源	信号通路	作用	参考文献
呼吸系统疾病	H1N1 流感	石斛	Toll 样受体 4(TLR4)/髓样分化因子 88(Myd88)/核因子-κB(NF-κB)	激活免疫	[43]
心脑血管系统	心肌缺血	枸杞子	核因子 E2 相关因子 2(Nrf2)/血红素加氧酶-1(HO-1)	抑制心肌凋亡	[44]
	脊髓损伤	枸杞子	丝裂原活化蛋白激酶(MAPK)/NF-κB	缓解神经炎症	[45]
	认知障碍	石斛	NF-κB	减轻海马体神经元损伤和淀粉样蛋白 β 的沉积	[31]
消化系统疾病	胃癌	石斛	信号转导及转录激活蛋白 6(STAT6)/(过氧化物酶体增殖物激活受体-r)PPAR-r、JAG1 基因(JAGGED1)/缺口蛋白 1(NOTCH1)	调控巨噬细胞的极化	[46]
	结肠癌	石斛	活性氧(ROS)-腺苷酸激活蛋白激酶(AMPK)-自噬途径	触发线粒体紊乱	[47]
	肠道炎症	枸杞子	肌球蛋白轻链激酶(MLCK)-肌球蛋白轻链(MLC)	抗炎,修复肠屏障	[48]
	糖尿病	石斛	脂多糖(LPS)/TLR4/三功能受体相互作用因子(TRIF)/NF-κB	降糖	[49]
糖尿病及其并发症	糖尿病肾病	石斛	胰岛素受体底物 1(IRS1)/蛋白激酶 B 信号(AKT)、促进线粒体自噬	减轻足细胞损伤	[50]
	糖尿病视网膜病变	枸杞	抑制猴脉络膜-视网膜内皮(RF/6A)细胞中 miR-15a-5p 的表达	减弱糖尿病视网膜血管生成	[51]
生殖系统	脱发	石斛	Wnt	改善雄激素水平	[52]
	卵巢早衰	枸杞子	AMPK/NAD+依赖性组蛋白去乙酰化酶(Sirt)	缓解衰老和性激素紊乱	[53]
其他	未分类的肿瘤	石斛	靶向肿瘤相关巨噬细胞的 Toll 样受体 2(TLR2)	促进巨噬细胞 M1 亚型的极化	[54]

单独使用[58]。虽然目前有关单独滋阴药中的多糖成分与益生菌联用的相关研究较少，但 Wang M 等[59]评价了嗜酸乳杆菌、乳酸乳杆与3种多糖(枸杞多糖、茯苓多糖和香菇多糖)结合的合生元对断奶大鼠的潜在影响，发现这样的组合可以提高双歧杆菌、乳酸杆菌、异杆菌等益生菌水平，降低厌氧杆菌、肠球菌和拟杆菌等致病菌水平，促进断奶大鼠的生长性能。

益生菌已广泛应用到食品、药品、保健品领域中，但在菌种加工、活性和稳定性上仍有发展的潜力，益生菌与滋阴药中的多糖成分联用可以为今后产品的研发和应用提供广阔的发展前景，未来需要更多研究证据的支持。

4　讨论与展望

滋阴药中多糖成分的益生元样作用受到学者们广泛关注，以多糖为原料的益生元产品开发成为热点。目前有大量研究发现多糖成分用于代谢性疾病、肠道疾病中疗效显著，其益生元样作用机制尚未明晰，但可以明确的是多糖结构与物理性质关系到其活性强弱。其生理活性受分子量、链构象、糖苷键类型等结构信息以及多糖的来源、处理方式、环境、温度和其他因素的影响很大。现阶段研究中，靶点菌与不同疾病的对应关系尚不明确，仍然需要更多的研究来确定，充分发挥靶向调节微生物改善健康状况的作用，同时为了明确中药中多糖成分的临床疗效，需要更多高质量临床研究数据支持。

[参考文献]

[1] 钟赣生. 中药学[M]. 5版. 北京：中国中医药出版社，2021：390.

[2] BURTON R A，GIDLEY M J，FINCHER G B. Heterogeneity in the chemistry，structure and function of plant cell walls[J]. Nat Chem Biol，2010，6(10)：724-732.

[3] REN T，FAN X，WU Q，et al. Structural insights and therapeutic potential of plant-based pectin as novel therapeutic for type 2 diabetes mellitus：A review[J]. Int J Biol Macromol，2025：141876.

[4] SARGOWO D，OVIANTI N，SUSILOWATI E，et al. The role of polysaccharide peptide of Ganoderma lucidum as a potent antioxidant against atherosclerosis in high risk and stable angina patients[J]. Indian Heart J，2018，70(5)：608-614.

[5] CHEN L J，XU W，LI Y P，et al. Lycium barbarum polysaccharide inhibited hypoxia-inducible factor 1 in COPD patients[J]. Int J Chron Obstruct Pulmon Dis，2020：1997-2004.

[6] SHEN W C，CHEN S C，WANG C H，et al. Astragalus polysaccharides improve adjuvant chemotherapy-induced fatigue for patients with early breast cancer[J]. Sci Rep，2024，14(1)：25690.

[7] CHO Y J，SON H J，KIM K S. A 14-week randomized，placebo-controlled，double-blind clinical trial to evaluate the efficacy and safety of ginseng polysaccharide (Y-75)[J]. J Transl Med，2014，12(1)：283.

[8] MA J, LIU H, WANG X. Effect of ginseng polysaccharides and dendritic cells on the balance of Th1/Th2 T helper cells in patients with non-small cell lung cancer[J]. J Tradit Chin Med, 2014, 34(6): 641-645.

[9] ZHAO P, ZHOU H, ZHAO C, et al. Purification, characterization and immunomodulatory activity of fructans from Polygonatum odoratum and P.cyrtonema[J]. Carbohydr Polym, 2019, 214: 44-52.

[10] HOLSCHER H D. Dietary fiber and prebiotics and the gastrointestinal microbiota[J]. Gut Microbes, 2017, 8(2): 172-184.

[11] GIBSON G R, HUTKINS R, SANDERS M E, et al. Expert consensus document: The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of prebiotics[J]. Nat Rev Gastroenterol Hepatol, 2017, 14(8): 491-502.

[12] YUAN Y, LI C, ZHENG Q, et al. Effect of simulated gastrointestinal digestion in vitro on the antioxidant activity, molecular weight and microstructure of polysaccharides from a tropical sea cucumber (Holothuria leucospilota) [J]. Food Hydrocolloids, 2019, 89: 735-741.

[13] BALAMAYOORAN G, BATRA S, FESSLER M B, et al. Mechanisms of neutrophil accumulation in the lungs against bacteria[J]. Am J Respir Cell Mol Biol, 2010, 43(1): 5-16.

[14] HEYDARIAN M, JOOYANDEH H, NASEHI B, et al. Characterization of Hypericum perforatum polysaccharides with antioxidant and antimicrobial activities: Optimization based statistical modeling[J]. Int J Biol Macromol, 2017, 104: 287-293.

[15] 李瑜，周玉，江冠民，等. 枸杞多糖与黄芪多糖抑菌活性的研究[J]. 现代生物医学进展，2012，12(26)：5061-5063.

[16] XU H, LIU Z, XU W, et al. Beneficial In Vitro Effects of Polysaccharide and Non-Polysaccharide Components of Dendrobium huoshanense on Gut Microbiota of Rats with Type 1 Diabetes as Opposed to Metformin[J]. Molecules, 29(12): 2791.

[17] 余茂元. 霍山石斛多糖分离纯化及其益生作用[D]. 芜湖：安徽工程大学，2019.

[18] LIU J R, CHEN B X, HUANG J Q, et al. Fingerprinting and characterization of the polysaccharides from Polygonatum odoratum and the in vitro fermented effects on Lactobacillus johnsonii[J]. J Pharm Biomed Anal, 2024, 239: 115911.

[19] LI S, LI M, YUE H, et al. Structural elucidation of a pectic polysaccharide from Fructus Mori and its bioactivity on intestinal bacteria strains[J]. Carbohydr Polym, 2018, 186: 168-175.

[20] CHEN C, HUANG Q, FU X, et al. In vitro fermentation of mulberry fruit polysaccharides by human fecal inocula and impact on microbiota[J]. Food Funct, 2016, 7(11): 4637-4643.

[21] 史蓉，周丽，曾文锦，等. 酒泉枸杞中枸杞多糖对肠道致病菌抑制作用的研究[J]. 甘肃科技，2018，34(10)：46-48.

[22] 龙杰凤，胡秀虹，范成念，等. 黔产生黄精多糖的抑菌活性研究[J]. 贵州科学，2022，40(1)：5-9.

[23] 唐明. 百合多糖的提取、纯化及抑菌活性研究[D]. 长沙：湖南农业大学，2010.

[24] 金华，姜萌，刘治刚，等. 百合多糖提取工艺的优化及抑菌活性研究[J]. 食品科技，2015，40(12)：167-169.

[25] XI Y L, HU L X, CHEN X, et al. Antibacterial and Anti-Inflammatory Polysaccharide from Fructus Ligustri Lucidi Incorporated in PVA/Pectin Hydrogels Accelerate Wound Healing[J]. Molecules, 2024, 29(7): 1423.

[26] CAPEK P, UHRIN D, ROSIK J, et al. Polysaccharides from the roots of the marsh mallow (*Althaea officinalis* L., var. Rhobusta): dianhydrides of oligosaccharides of the aldose type[J]. Carbohydrate Res, 1988, 182(1): 160-165.

[27] TIAN X, LIANG T, LIU Y, et al. Extraction, structural characterization, and biological functions of Lycium barbarum polysaccharides: A review[J]. Biomolecules, 2019, 9(9): 389.

[28] WANG J, LI S F, ZHANG H, et al. A review of Lycium barbarum polysaccharides: Extraction, purification, structural-property relationships, and bioactive molecular mechanisms[J]. Carbohydr Res, 2024, 544: 109230.

[29] ZHANG Y, WU Z J, LIU J X, et al. Identification of the core active structure of a Dendrobium officinale polysaccharide and its protective effect against dextran sulfate sodium-induced colitis via alleviating gut microbiota dysbiosis[J]. Food Res Int, 2020, 137: 109641.

[30] WEI L, RAN Y, ZHANG L. Dendrobium sonia polysaccharide regulates immunity and restores the dysbiosis of the gut microbiota of the cyclophosphamide-induced immunosuppressed mice[J]. Chin J Nat Med, 2019, 17(8): 600-607.

[31] SUN Y, ZENG X X, LIU Y N, et al. Dendrobium officinale polysaccharide attenuates cognitive impairment in circadian rhythm disruption mice model by modulating gut microbiota[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 217: 677-688.

[32] GAO L L, MA J M, FAN Y N, et al. Lycium barbarum polysaccharide combined with aerobic exercise ameliorated nonalcoholic fatty liver disease through restoring gut microbiota, intestinal barrier and inhibiting hepatic inflammation[J]. Int J Biol Macromol, 2021, 183: 1379-1392.

[33] LIU Y Y, WANG C R, LI J S, et al. Phellinus linteus polysaccharide extract improves insulin resistance by regulating gut microbiota composition[J]. FASEB J, 2020, 34(1): 1065-1078.

[34] SHI L L, LI Y, WANG Y, et al. MDG-1, an Ophiopogon polysaccharide, regulate gut microbiota in high-fat diet-induced obese C57BL/6 mice[J]. Int J Biol Macromol, 2015, 81: 576-583.

[35] CHEN C, YOU L J, HUANG Q, et al. Modulation of gut microbiota by mulberry fruit polysaccharide treatment of obese diabetic db/db mice[J]. Food Funct, 2018, 9(7): 3732-3742.

[36] LUO S L, ZHANG X, HUANG S, et al. A monomeric polysaccharide from Polygonatum sibiricum improves cognitive

functions in a model of Alzheimer's disease by reshaping the gut microbiota[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 213: 404-415.

[37] SU J, WANG Y J, YAN M Q, et al. The beneficial effects of Polygonatum sibiricum Red. superfine powder on metabolic hypertensive rats via gut-derived LPS/TLR4 pathway inhibition[J]. Phytomedicine, 2022, 106: 154404.

[38] LUO Y, FANG Q, LAI Y, et al. Polysaccharides from the leaves of Polygonatum sibiricum Red. regulate the gut microbiota and affect the production of short-chain fatty acids in mice[J]. Amb Express, 2022, 12(1): 35.

[39] WANG Y, FEI Y, LIU L, et al. Polygonatum odoratum polysaccharides modulate gut microbiota and mitigate experimentally induced obesity in rats[J]. Int J Mol Sci, 2018, 19(11): 3587.

[40] SU L, MAO C, WANG X, et al. The anti-colitis effect of Schisandra chinensis polysaccharide is associated with the regulation of the composition and metabolism of gut microbiota[J]. Front Cell Infect Microbiol, 2020, 10: 519479.

[41] LI B, WANG H Y, HUANG J H, et al. Polysaccharide, the Active Component of Dendrobium officinale, ameliorates metabolic hypertension in rats via regulating intestinal flora-SCFAs-vascular axis[J]. Front Pharmacol, 2022, 13: 935714.

[42] FENG X, WANG D, HU L, et al. Dendrobium officinale polysaccharide ameliorates polycystic ovary syndrome via regulating butyrate dependent gut-brain-ovary axis mechanism[J]. Front Endocrinol, 2022, 13: 962775.

[43] WEI X, SUN W, ZHU P, et al. Refined polysaccharide from Dendrobium devonianum resists H1N1 influenza viral infection in mice by activating immunity through the TLR4/MyD88/NF-κB pathway[J]. Front Immunol, 2022, 13: 999945.

[44] GAO Y, LI H, QUE Y, et al. Lycium barbarum polysaccharides (LBP) suppresses hypoxia/reoxygenation (H/R) -induced rat H9C2 cardiomyocytes pyroptosis via Nrf2/HO-1 signaling pathway[J]. Int J Biol Macromol, 2024, 280: 135924.

[45] JIANG Z, ZENG Z, HE H, et al. Lycium barbarum glycopeptide alleviates neuroinflammation in spinal cord injury via modulating docosahexaenoic acid to inhibiting MAPKs/NF-kB and pyroptosis pathways[J]. J Transl Med, 2023, 21(1): 770.

[46] ZHAO Y, LU X, HUANG H, et al. Dendrobium officinale polysaccharide converts M2 into M1 subtype macrophage polarization via the STAT6/PPAR-r and JAGGED1/NOTCH1 signaling pathways to inhibit gastric cancer[J]. Molecules, 2023, 28(20): 7062.

[47] ZHANG K, ZHOU X, WANG J, et al. Dendrobium officinale polysaccharide triggers mitochondrial disorder to induce colon cancer cell death via ROS-AMPK-autophagy pathway[J]. Carbohydr Polym, 2021, 264: 118018.

[48] LI W, GAO M, HAN T. Lycium barbarum polysaccharides ameliorate intestinal barrier dysfunction and inflammation through the MLCK-MLC signaling pathway in Caco-2 cells[J]. Food Funct, 2020, 11(4): 3741-3748.

[49] CHEN X X, CHEN C, FU X. Dendrobium officinale polysaccharide alleviates type 2 diabetes mellitus by restoring gut microbiota and repairing intestinal barrier via the LPS/TLR4/TRIF/NF-kB Axis[J]. J Agric Food Chem, 2023, 71(31): 11929-11940.

[50] LI H, ZHENG J, WU Y, et al. Dendrobium officinale polysaccharide decreases podocyte injury in diabetic nephropathy by regulating IRS-1/AKT signal and promoting mitophagy[J]. Aging (Albany NY), 2023, 15(19): 10291.

[51] ZHU Y, ZHAO Q, JIANG Y. Lycium barbarum polysaccharides attenuates high glucose-induced diabetic retinal angiogenesis by rescuing the expression of miR-15a-5p in RF/6A cells[J]. J Ethnopharmacol, 2022, 283: 114652.

[52] ZHANG Y, TANG Q, ZENG B, et al. Dendrobium officinale polysaccharide promotes angiogenesis as well as follicle regeneration and hair growth through activation of the WNT signaling pathway[J]. Regen Ther, 2024, 26: 114-123.

[53] 江银, 王徽, 于潇, 等. 枸杞多糖调控AMPK/Sirt自噬途径延缓D-gal诱导的卵巢早衰的机制研究[J]. 中国中药杂志, 2022, 47(22): 6175-6182.

[54] WANG H Y, GE J C, ZHANG F Y, et al. Dendrobium officinale polysaccharide promotes M1 polarization of TAMs to inhibit tumor growth by targeting TLR2[J]. Carbohydr Polym, 2022, 292: 119683.

[55] 郭贝贝. 益生菌和中药多糖对舍饲山羊生产性能、血液指标和瘤胃菌群组成的影响[D]. 南昌: 江西农业大学, 2020.

[56] 于莲, 张灵芝, 马淑霞, 等. 纳米山药多糖合生元结肠靶向微生态调节剂对菌群失调大鼠细胞因子和凋亡蛋白表达影响[J]. 中国新药杂志, 2016, 25(24): 2871-2875.

[57] PRUDHVIRAJ G, VAIDYA Y, SINGH S K, et al. Effect of co-administration of probiotics with polysaccharide based colon targeted delivery systems to optimize site specific drug release[J]. Eur J Pharm Biopharm, 2015, 97: 164-172.

[58] 罗宏, 段翠翠, 赵玉娟, 等. 植物乳杆菌C88联合香菇多糖对肠道微生态的调节作用[J]. 中国乳品工业, 2016, 44(8): 4-8.

[59] WANG M, CHEN Y, WANG Y, et al. The effect of probiotics and polysaccharides on the gut microbiota composition and function of weaned rats[J]. Food Funct, 2018, 9(3): 1864-1877.

[责任编辑: 刘迪成, 蒋维超(英文)]