DOI:10.13193/j.issn.1673-7717.2025.06.017

薏苡仁多糖提取纯化、结构表征及药理作用研究进展

杨亚[1],李瑞煜[2,3],冯五文[3],卢勇[1],赵松梅[1]
[1.雅安市中医医院,四川 雅安 625000;2.华润三九(雅安)药业有限公司,四川 雅安 625000;
3.成都中医药大学药学院,四川 成都 611137]

摘要:薏苡仁是我国传统药食两用中药材,具有利水渗湿、健脾止泻等功效。薏苡仁富含多种化合物,包括脂肪酸及酯类、多糖、黄酮、三萜等。其中,多糖是其发挥功效的重要物质基础。目前,薏苡仁多糖的提取方法主要有热水提取法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法和闪式提取法等。研究表明,薏苡仁多糖的单糖组成丰富,主要包含葡萄糖、半乳糖、木糖以及甘露糖等。薏苡仁多糖具有多种生物活性,如降糖、抗肿瘤、抗炎、抗氧化、调节肠道菌群等。系统综述了近年来国内外薏苡仁多糖的提取、分离纯化、结构特征及生物活性研究,以期为薏苡仁多糖的深入系统研究及有效开发利用提供科学参考。

关键词:薏苡仁多糖;提取纯化;结构表征;降糖;抗肿瘤及免疫调节;抗炎
中图分类号:R282.7 **文献标志码**:A **文章编号**:1673-7717(2025)06-0093-07

Research Progress in Extraction, Purification, Structural Characterization and Pharmacological Action of Polysaccharides from Yiyiren (Coicis Semen)

YANG Ya[1], LI Ruiyu[2,3], FENG Wuwen[3], LU Yong[1], ZHAO Songmei[1]
[1. Yaan Hospital of Traditional Chinese Medicine, Yaan 625000, Sichuan, China;
2. China Resources Sanjiu (Yaan) Pharmaceutical Co., Ltd., Yaan 625000, Sichuan, China;
3. School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, Sichuan, China]

Abstract: Yiyiren (Coicis Semen) is a traditional Chinese medicinal and edible herb, possessed the dual functions of promoting diuresis to drain dampness and tonifying spleen to arrest diarrhea. Yiyiren (Coicis Semen) is rich in many constituents, including fatty acids and esters, polysaccharides, flavonoids, triterpenoids, etc. Among these constituents, polysaccharides are served as a vital material foundation for its therapeutic effects. Currently, the principal extraction methods for Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides include hot water extraction, ultrasonic-assisted extraction, microwave-assisted extraction and flash extraction. The previous research has demonstrated that Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides are rich in a diverse monosaccharide composition, primarily containing glucose, galactose, xylose and mannose. Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides have various biological activities, such as hypoglycemic effect, anti-tumor, anti-inflammation, anti-oxidation, regulating intestinal flora, etc. This article presented a systematic review of recent advances in the extraction, purification, structural characterization and biological activities of Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides domestically and internationally, aiming to provide a scientific reference for further in-depth systematic research and efficient exploitation of Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides.

Keywords: Yiyiren (Coicis Semen) polysaccharides; extraction and purification; structural characterization; hypoglycemic effect; anti-tumor and immunoregulation; anti-inflammatory

薏苡仁,又名薏米、苡仁,为禾本科植物薏苡 *Coix lacryma-jobi* L. *var. ma-yuen* (Roman.) Stapf 的干燥成熟种仁[1],在我国作为常用中药已有1500年历史。同时薏苡仁也被认为是一种功能食品,在中国、东亚以及东南亚有着广泛使用。薏苡仁已被证实具有多种活性,如改善肝脾功能、改善血糖、抗肿瘤、调节肠道微生物群、抗炎等[2]。薏苡仁化学组成丰富,包括酯类、脂肪酸、多糖、蛋白质、氨基酸、酚类等,其中,以淀粉为主的多糖类成分质量分数约为69%[3]。薏苡仁多糖因其具有降糖、抗肿瘤、抗炎、抗氧化等多方面的生物活性与功

基金项目:中国博士后科学基金第69批面上资助项目(2021M690490);四川省科技计划项目(2021YJ0466);雅安市省级转移支付研究专项(22ZYZF0003)
作者简介:杨亚(1990-),女,四川成都人,主管药师,硕士,研究方向:药学。
通讯作者:赵松梅(1967-),女,四川雅安人,主任中医师,学士,研究方向:中医内科。E-mail:1263527645@qq.com。

能引起了人们的关注[1]，薏苡仁多糖研究起步很早，早在 1985 年，TAKAHASHI M 等[4]发现了具有降糖活性的薏苡仁多糖 coixans A、B、C。国内开展薏苡仁多糖研究始于 21 世纪初，徐梓辉等[5-9]在分离纯化及降糖活性研究方面做了大量工作。但尚未见对其多糖的提取分离、结构解析和生物活性进行系统报道。因此，本文对薏苡仁多糖近年来提取、纯化工艺，结构特征以及药理作用等方面进行全面综述，以期更好地为薏苡仁多糖研究提供支撑和借鉴。

1 提取纯化

1.1 提取

薏苡仁多糖的提取方法主要有热水提取法、超声波辅助提取法、微波辅助提取法和闪式提取法等。多位学者基于上述提取工艺，主要考察提取温度、提取时间、料液比、超声/微波功率等因素，采用单因素与正交实验或响应面法结合的方式，以苯酚硫酸法检测多糖得率，对薏苡仁多糖的提取工艺进行了优化。薏苡仁多糖提取方法及相关参数见表 1。

1.1.1 *热水提取法* 热水提取法是最常用的多糖提取方法，其操作简单，成本低，应用广泛。郑早早和罗云云等[10-11]采用热水提取法，并运用响应面法、正交实验等方法对提取工艺进行优化，优化后的提取条件为：水提取温度 86 ℃～92 ℃，水浸提时间 72～75 min，料液比 4.3∶1～5∶1（g/L），收率为 7.91%～10.25%。其中罗云云[11]明确了这些因素影响大小依次为提取时间、提取温度和料液比。

1.1.2 *超声辅助提取法* HU X T[12]开发了一种超声辅助提取薏苡仁多糖的工艺，并采用响应面法对超声功率、提取时间、料液比等参数进行了优化。研究发现，在超声功率为 480 W，提取时间 16 min，料液比（g/L）为 50∶1 时，多糖提取率能够达到 8.340%。该超声辅助提取工艺相比于传统热水提取法，提取收率提高了 2.06 倍的同时降低多糖平均分子量。崔媛等[13]采用超声波辅助酸水提取薏苡仁多糖，运用正交实验对提取温度、pH 值、料液比、时间和提取次数进行了优化，最终确定最佳工艺为 10 倍量 pH 5.0 盐酸溶液浸泡 10 min，80 ℃超声波 15 min，提取 2 次，在此条件下最佳收率能够达到 14.12%。另外，尹媛媛[14]对比研究了超声波和微波提取薏苡仁粗多糖效率，发现前者的提取率要高于后者。

1.1.3 *微波辅助提取法* 微波辅助提取法提取率高、提取时间短、耗能小、成本低，王文平[15]采用微波辅助法，并加入与薏苡仁脱脂粉质量比为 1∶10 的 α－淀粉酶提取薏苡仁多糖。经正交实验优化后的最佳条件为：微波功率 560 W，料液比（g/L）33∶1，提取时间 4 min，收率为 22.61%。张洋婷等[16]同样采用微波辅助法，通过正交实验设计优化了多糖提取工艺，最佳工艺为提取时间 4 min、微波功率 320 W、料液比（g/L）33∶1，在此条件下的收率为 10.52%，此提取率只有前述方法的一半，可能与是否加入 α－淀粉酶以及微波功率有关。

1.1.4 *超声－微波协同提取法* 王春霞[17]开发了一种超声－微波协同提取薏苡仁多糖的方法，并通过单因素和四因素三水平正交实验优化提取条件，最终在最优条件超声功率 250 W，微波功率 250 W，提取温度 70 ℃，提取时间 45 min，料液比（g/L）40∶1 得到多糖提取率为 8.71%。王青青等[18]采用超声－微波协同萃取仪优化了薏苡仁多糖的提取方法，最佳工艺下的收率为 1.180%［计算方式为（多糖提取量×多糖含量）/薏苡仁粉末量］。

1.1.5 *闪式提取法* 闪式提取法的基本原理主要基于三点：①高速剪切；②超快速动态分子渗透；③剧烈的搅拌和强烈的振动。其优点是能在更短的提取时间、更少的溶剂和能量消耗、紧凑的设备以及安全且可靠的操作下高效获得提取物，是一种有前景的提取技术[19]。蔡永萍[20]研究并优化了闪式提取法提取薏苡仁多糖的工艺，考察了闪提时间、提取电压、提取转速对薏苡仁多糖得率的影响，并采用响应面法优化闪式提取工艺。最佳提取工艺为闪提时间 101 s、提取电压 161 V、提取转速 6100 r/min，在此条件下薏苡仁多糖平均得率为 9.03%。

1.2 纯化

薏苡仁粗多糖常含有很多杂质（如单糖、低聚糖、蛋白质、脂质等），对活性及后续结构研究有较大的影响，因此需进行系列的纯化以获得均一多糖。常用的方法为将多糖提取液进行多次醇沉，初步去除小分子杂质后，采用 Sevage 法脱蛋白[21]。将得到的粗多糖通过多种色谱柱联合使用进一步纯化得到纯度较高的多糖。常用纯化方法为二乙氨基乙基（diethylaminoethyl，DEAE）纤维柱联合葡聚糖凝胶柱（Sephadex 和 Sephacryl 系列）进行分离[22-23]，将纯化后的样品再进行除盐[12]，以冻干或者烘干方式得到干燥成品。

2 结构特征

2.1 分子量

相对分子质量是多糖重要物理特征之一，可间接反映其纯

表 1 薏苡仁多糖提取方法

提取方法	工艺优化方法	最佳工艺	最佳提取率/(%)	参考文献
热水提取法	响应面法和正交实验设计	水浸提时间 75 min，提取温度 92 ℃，料液比（g/L）5∶1	7.91	[11]
热水提取法	响应面法	水浸提时间 72 min，提取温度 86 ℃，料液比（g/L）4.3∶1	10.25	[10]
超声波辅助酸水提取	正交实验	10 倍量 pH 5.0 盐酸溶液浸泡 10 min，80 ℃超声波 15 min，提取 2 次	14.12	[13]
超声辅助提取法	响应面法	超声功率 480 W，提取时间 16 min，料液比（g/L）为 50∶1	8.340	[12]
微波辅助法	正交实验	微波功率 320 W，提取时间 4 min，料液比（g/L）33∶1	10.52	[16]
微波辅助法	正交实验	微波功率 560 W，提取时间 4 min 料液比（g/L）33∶1	22.61	[15]
超声－微波协同提取法	正交实验	超声功率 250 W，微波功率 250 W，提取温度 70 ℃，提取时间 45 min，料液比（g/L）40∶1	8.71	[17]
超声－微波协同萃取	正交实验	提取温度 80 ℃，提取时间 100 min，料液比（g/L）25∶1	1.180	[18]
闪式提取法	响应面法	闪提时间 101 s、提取电压 161 V、提取转速 6100 r/min	9.03	[20]

度。常用的测定手段为高效凝胶渗透色谱法联合折光检测器，以及多角度激光检测器（Multi - angle laser light scattering detector，Malls）。薏苡仁多糖的相对分子质量主要分布范围为 1849 ~ 2 144 877 Da，具体信息见表 2。

2.2 单糖组成

薏苡仁多糖的单糖组成丰富，主要由葡萄糖、半乳糖、木糖以及甘露糖组成，其余还包括阿拉伯糖、鼠李糖、果糖等，常用的分析方法有气相色谱[21]，具体信息见表 2。

2.3 化学结构

薏苡仁多糖精细结构的研究甚少，仍处于起步阶段。目前，有关其化学结构解析主要通过傅里叶红外光谱（Fourier Transform Infrared Spectrometer，FT - IR）、核磁共振扫描（Nuclear Magnetic Resonance，NMR）进行分析。有研究报道薏苡仁多糖是以（1→6）- α - D - 葡萄糖吡喃糖为主链[12,26]，但关于其构型及糖苷键研究报道较少。薏苡仁多糖的结构信息见表 2。

3 药理作用

现代药理研究表明，薏苡仁中甘油三酯类成分具有抗肿瘤作用，临床上以薏苡仁油为主要原料的康莱特注射液已广泛用于癌症的治疗[29]。近年来随着国内外对薏苡仁多糖的研究不断深入，报道了大量的活性研究，如降糖、抗肿瘤、抗炎、调节肠道菌群、改善糖脂代谢等。薏苡仁多糖生物活性总结于表 3。

3.1 降糖

《本草拾遗》记载薏苡仁具有“温气、主消渴”作用，是一种常被使用在中医学临床上治疗糖尿病的药物[38]。目前降糖作用被认为是薏苡仁多糖的主要活性之一。蔡永萍[20]报道，薏苡仁多糖在 0.1 ~ 3.2 mg/mL 浓度时对 α - 淀粉酶和 α - 葡萄糖苷酶具有良好的抑制作用，能够分别达到 81.34% 和 78.88%。王春霞[17]同样也证实了薏苡仁多糖对 α - 葡萄糖苷酶和 α - 淀粉酶具有良好的抑制活性，同时发现薏苡仁多糖能够显著提高胰岛素抵抗模型 HepG2 细胞的葡萄糖消耗能力，很好地发挥降血糖作用，减轻糖尿病症状。CHEN L C 等[30]采用超声辅助提取得到一种新型水溶性薏苡仁多糖（PAS），以 6、12、24 mg/kg 3 个剂量连续给药 4 周链脲佐菌素（Streptozotocin，STZ）造模小鼠后，发现其能够显著降低血糖和胰岛素，同时显著降低淀粉样蛋白 β42 和糖化血红蛋白（Hemoglobin A1c，HbA1c）的表达，胰高血糖素样肽（Glucagon - like peptide 1，GLP - 1）显著提高。CHEN L C 等[39]在此基础上，发现PAS能够改善肠道菌群微生态，提高乳酸杆菌和发酵乳酸

表 2 薏苡仁多糖分离纯化方法及结构表征

多糖/组分	分离纯化方法	分子量/(kDa)	单糖组成	结构特征	结构确证方法	参考文献
去皮薏苡仁多糖	乙醇沉淀法	27	Glc - Gal - Fuc (89.1 : 5.6 : 5.3)	-	-	[24]
FCSPs	乙醇沉淀法	1.849	Glc - Gal - Man - Ara - Xyl (93.04 : 2.86 : 2.08 : 1.56 : 0.44)	-	-	[25]
CP - W	DEAE - 52，Sephadex G - 75		Glc - Gla - Rha - Ara - Xyl (97.7 : 0.5 : 0.4 : 0.3 : 1.1)	-	-	[21]
化合物 1	乙醇沉淀，DEAE - 52 cellulose，HW - 55F gel，Sephacryl S - 400	681	Glc	骨架为(1→6) - α - 葡聚糖	1H NMR、^{13}C NMR	[26]
CSP	DEAE - 52	2 144.877	Glc	骨架为(1→6) - D - 吡喃葡萄糖	FT - IR，^{1}H NMR、^{13}C NMR、HSQC NMR	[12]
薏苡仁多糖	DEAE - 52	-	Glc - Gal - GlcA - Ara - GlcN - Man - GalA - Fuc (745.07 : 3.50 : 1.61 : 1.25 : 0.92 : 0.89 : 0.71 : 0.27 : 0.11)	糖苷键为 β - 构型	IR	[17]
CSP	乙醇沉淀	13.285	Fuc - Rha - Ara - Gal - Glc - Xyl - Man - Fru - Rib - GalA - GulA - GlA - ManA (0.25 : 1.05 : 2.79 : 3.86 : 79.64 : 2.75 : 3.54 : 0.31 : 0.08 : 4.26 : 0.31 : 0.81 : 0.18)	-	-	[27]
TPA	乙醇沉淀	176	-	-	-	[28]
AAP	DEAE Sepharose Fast Flow column 和 Sephacryl S - 300 High Resolution	AAP - 1：94.2；AAP - 1′：63.1；AAP - 2：82.3；AAP - 2′：60.4	AAP - 1：Rha - Ara - Glc - Gal (1.1 : 0.4 : 0.7 : 0.5)；AAP - 1′：Rha - Ara - Glc - Gal (1.4 : 1.6 : 0.4 : 0.7)；AAP - 2：Xyl - Rha - Gal - Glc (0.4 : 1.4 : 1.6 : 0.5)；AAP - 2′：Xyl - Rha - Gal - Glc (0.3 : 1.6 : 1.1 : 0.7)	超声处理后 AAP - 1′中 3380 cm^{-1}以及 AAP - 2′中 1620 cm^{-1}和 1420 cm^{-1}强度增加	FT - IR	[22]
CSP1、CSP2	DEAE Sepharose Fast Flow column	-	-	3418 cm^{-1}，2920 cm^{-1}两处多糖特征峰；849 cm^{-1}为 α 吡喃糖苷键特征峰	IR	[23]

注：Gal（Galactose，半乳糖）；Glc（Glucose，葡萄糖）；Man（Mannose，甘露糖）；Xyl（Xylose，木糖）；Rha（L - rhamnose monohydrate，鼠李糖）；Ara（L - Arabinose，阿拉伯糖）；Fru（Fructose，果糖）；GalA（D - Galacturonic acid，半乳糖醛酸）；GlcA（Glucuronic acid，葡萄糖醛酸）；Fuc（fucose，岩藻糖）；GlcN（glucosamine，氨基葡萄糖）；ManA（Mannuronic acid，甘露糖醛酸）；IR（Infrared Spectrometer，红外光谱）。

杆菌丰度,新型多糖 PAS 具有独特的抗糖尿病活性,可作为潜在的膳食补充剂或功能性食品。XIA T 等[27]研究了 CSP 的降糖作用并从肠道菌群角度探讨了其作用机制。研究发现 CSP 同样能够降低 STZ 小鼠空腹血糖(fasting blood glucose,FBG)水平以及口服糖耐受 AUC_{0-2h},提高血清胰岛素及高密度脂蛋白(High Density Lipoprotein Cholesterol,HDL-C)水平,降低血清总胆固醇(Serum total cholesterol,TC),甘油三酯(Triglyceride,TG)和低密度脂蛋白(Low density lipoproteins cholesterol,LDL-C)水平。同时 CSP 能够增加乳酸菌,阿克曼氏菌,拟杆菌和双歧杆菌等产短链脂肪酸肠道菌群丰度。结肠转录组学表明,CSP 通过激活胰岛素样生长因子-1(Insulin-like growth factor 1,IGF1)/PI3K/AKT 通路起到降糖作用,相关结果也得到聚合酶链式反应(Polymerase Chain Reaction,PCR)及免疫组化实验结果证实。最后,通过分子对接验证了短链脂肪酸和 IGF1/PI3K/AKT 靶点的结合。

3.2 抗肿瘤及免疫调节作用

现代药理研究表明薏苡仁具有较好地抗肿瘤、调节机体免疫作用。LU X Y 等[35]对薏苡仁多糖组分 CP-1 抑制 A549 非小细胞肺癌细胞增殖作用进行了研究,发现 CP-1 能够诱导 A549 细胞凋亡并且呈剂量依赖关系,其细胞周期阻滞于 S 期而诱导凋亡。同时还观察到 CP-1 延长了单细胞凝胶电泳的彗星尾长,并破坏了线粒体膜电位。CP-1 能够增加 Caspase-3 和 Caspase-9 蛋白表达,其机制和激活内在线粒体通路有关。在此基础之上,LUO C 等[36]进一步研究了薏苡仁多糖 CP1 对 A549 非小细胞肺癌细胞的抑制机制,发现在 200,300 μg/mL 浓度下能够抑制细胞迁移和侵袭,其机制和下调 S100A4 基因和蛋白的表达有关。WANG H 等[33]对比研究了发酵和非发酵薏苡仁多糖改善高相对湿度 RH,(90±2)%对小鼠循环氮和免疫功能紊乱的影响。研究发现薏苡仁多糖能够降低循环氮(血尿素氮和氨),其机制可能是通过改变肠道菌群诱导粪氮排泄量增加来实现的。同时,发酵薏苡仁以及发酵薏苡仁多糖能够通过促进 Na^+,K^+-ATP 酶而改善红细胞形态,通过降低血浆中免疫球蛋白 M(Immunoglobulin M,IgM)和 γ-干扰素(Interferon-γ,IFN-γ)水平,上调白细胞介素-4(Interleukin-4,IL-4)和白细胞介素-6(Interleukin-6,IL-6)水平来起到免疫调节作用。YAO Y[22]从薏苡仁粗多糖中分离得到 AAP-1 和 AAP-2,超声处理后得到 AAP-1′和 AAP-2′。研究发现这四种多糖均能刺激 RAW 264.7 细胞释放 NO,肿瘤坏死因子-α(Tumor Necrosis Factor-α,TNF-α)和 IL-6,其中 AAP-2′表现出相对最强的作用,能够显著促进 NO 的释放。结果表明薏苡仁多糖能够增强巨噬细胞免疫功能,同时从一定程度上反映了多糖的结构变化能够引起生物活性的改变。王彦芳等[34]研究了薏苡仁粗多糖及其组分对大鼠脾淋巴细胞增殖影响以及改善脾虚水湿不化(Dampness stagnancy due to spleen deficiency,DSSD)大鼠免疫功能机制。研究发现多糖、多糖组分 I、多糖组分 II 均能在体外能显著促进淋巴细胞增殖;体内实验表明多糖及其组分能够上调 DSSD 大鼠的结肠组织 Janus 激酶 3(Janus Kinase 3,JAK3)、信号传导及转录激活蛋白 5(signal transducer and activator of transcription 5,STAT5)磷酸化水平,从而促进 T 细胞增殖,增强机体的细胞免疫功能。

3.3 抗炎和镇痛

SUI Y L 等发现薏苡仁多糖具有抗炎和镇痛作用,能够减少小鼠扭体次数,提高痛阈值,缓解急性炎症引起的肿胀程度。在此基础之上对提取得到粗多糖进一步分离纯化得到化合物 1[(1→6)-α-D-葡聚糖]和化合物 2[α-果糖残基(2→[1)-α-葡萄糖残基(6]$_5$→1)-α-葡萄糖残基(4→1)-α-葡萄糖残基],并发现其对脂多糖(Lipopolysaccharide,LPS)诱导的 RAW264.7 细胞炎症有较好地抑制作用[26]。李彦龙等[32]从 Caspase-1 介导的细胞焦亡通路角度探讨薏苡仁多糖对葡聚糖硫酸钠诱导的溃疡性结肠炎(Ulcerative colitis,UC)小鼠的影响。研究发现,以 250、500、1000 mg/kg 剂量连续给药 14 d 后,薏苡仁多糖能有效改善小鼠的症状,减轻结肠组织病理损伤。其机制可能为通过降低 UC 小鼠结肠内活性氧(Reactive oxygen species,ROS)活性、抑制 NLRP3 炎性小体激活及 Caspase-1 活化,阻碍结肠组织细胞焦亡,减少活性炎性因子 IL1-β、IL-18 释放。陈莉娟等[31]在体外溃疡性结肠炎模型同样证实了薏苡仁多糖能够通过介导 NLRP3/Caspase-1 通路,抑制人结肠上皮细胞的细胞焦亡,从而发挥人结肠上皮细胞保护作用。LI Y L 等[28]发现薏苡仁总多糖(TPA)能够减轻 TNF-α 导致的 Caco-2 细胞肠上皮屏障功能障碍,抑制促炎因子释放如白细胞介素-8(Interleukin-8,IL-8)和 IL-6;下调闭合蛋白和 ZO-3 表达;显著抑制核因子 κB(nuclear factor kappa-B,NF-κB)p65 的激活和表达,为预防和治疗炎症性肠病的提供了一种有价值的新策略。

3.4 抗衰老和抗氧化

ZHAO D 等[25]研究了发酵薏苡仁多糖的抗氧化和抗衰老活性,结果表明发酵薏苡仁多糖相比于普通常规水提薏苡仁多糖在 1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picryl-hydrazyl radical,DPPH·),2,2-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐[2,2′-Azino-bis-(3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonic acid),ABTS+·],OH·,和 O_2^- 自由基消除能力分别高出 10.09%,14.40%,49.93% 和 12.86%。在抗衰老活性方面,发酵薏苡仁多糖表现出较高的抗氧化酶活性以及较低的丙二醛积累,其机制为作用于胰岛素/IGF-1 信号通路,通过抑制 daf-2 和 age-1 表达和上调 daf-16,sod-3,skn-1 和 gcs-1 表达。另据蔡永萍[20]报道,薏苡仁多糖在 0.1 mg/mL~3.2 mg/mL 浓度时对 DPPH·,$ABTS^+$·最大清除率分别为 60.21% 和 40.06%。王春霞[17]以维生素 C 为阳性对照,考察了纯化后的薏苡仁多糖的体外抗氧化活性。实验结果表明,薏苡仁多糖对 DPPH 自由基的清除能力较强,当浓度为 8.0 mg/mL 时,其清除率可达到 58.30%。金凯宁等[23]评价了薏苡仁多糖组分 CSP1、CSP2 对 H_2O_2 诱导的 WRL-68 人正常肝细胞体外抗氧化活性评价,结果表明多糖组分能够显著提高肝细胞超氧化物歧化酶(Superoxide Dismutase,SOD);过氧化氢酶(Catalase,CAT);谷胱甘肽过氧化物酶(Glutathione peroxidase,GSH-Px)活力,从而起到抗氧化应激保护的作用。

3.5 调节肠道菌群

已有大量研究表明多糖能够影响肠道菌群丰度以及短链脂肪酸[40]。LEE B H 等[24]采取超声法提取得到主分分子量为 27 kDa 的去皮薏苡仁多糖。研究发现薏苡仁多糖能够显著促进长双歧杆菌亚长种、瘤胃球菌属以及下一代益生菌嗜黏蛋白阿克曼菌和普拉梭菌的生长。在体外结肠发酵模型发现消化处理后的薏苡仁多糖能够增加了乳杆菌属和阿克曼氏菌属的比例;同时发现加入薏苡仁多糖处理的粪便菌群条件培养基后,艰难梭菌的比例降低。薏苡仁多糖也同样能够提高短链脂肪酸水平。此外,薏苡仁多糖能够促进肠细胞紧密连接蛋白和黏蛋白的表达。该研究提示薏苡仁多糖可作为益生元调节微生物群和维持屏障功能,具有开发为保护肠道健康的新型功能性食品成分的潜力。

3.6 其他

刘伟杰等[37]对薏苡仁多糖防治糖脂代谢紊乱进行了研究,发现每天 2 次(0.1、0.2 g/kg),连续灌胃给药 8 周薏苡仁多糖后,氯氮平诱导的糖脂代谢紊乱大鼠的体质量、空腹血糖、餐后 2 h 血糖、血清中瘦素水平显著降低,血清中脂联素水平明显升高,其机制可能与调节血糖、瘦素及脂联素水平有关。王彦芳等研究发现薏苡仁多糖通过下调结肠中血管活性肠肽受体 1 的表达及上调水通道蛋白 3 的表达起到调控结肠水液代谢作用,这可能是治疗脾虚水湿不化模型大鼠的作用机制之一[41]。

4 应用

薏苡仁作为药食同源品种,是在食品行业的重要原料。刘想[42]开发了一种粉末直接压片法加工薏苡仁多糖咀嚼片工艺,并采用 Box - Behnken 响应面优化法对辅料配比的最佳工艺条件进行了优化。优化后的最佳工艺为薏苡仁粗多糖粉添加量 55%,食用淀粉添加量 25%,乳糖添加量 9%,微晶纤维素添加量 9.98%,硬脂酸镁添加量 0.67%,微粉硅胶添加量 0.75%。此条件下得到咀嚼片成品率为 91.78%。另有研究报道,薏苡仁多糖可以作为天然抗氧化剂,对油脂均具有抗氧化作用[16]。

中药多糖类成分,除具有独特的药理活性外,还具有来源广泛、生物相容性好、可生物降解、稳定性强等特点,是一类良好的载体材料[43]。CHEN L C 等[44]设计了基于多糖和蛋白质的薏苡仁油同源递送系统。结果表明,该系统薏苡仁油纳米颗粒的包合效率,粒径分布以及稳定性等数据良好。同时,纳米

表 3 薏苡仁多糖生物活性

生物活性	多糖/组分	实验模型	剂量	药理作用及机制	参考文献
抗氧化和抗衰老	FCSPs	DPPH·,$ABTS^{+}$·,OH·,和 O_2^-	5 g/L	IC_{50}分别为 1.41、6.39、3.53、3.03 g/L	[25]
	FCSPs	抗衰老模型(*C. elegans*)	0.2、1、5 g/L	作用于胰岛素/IGF-1 信号通路,抑制 daf-2 和 age-1 表达,上调 daf-16,sod-3,skn-1,and gcs-1 表达	[25]
	AP	DPPH·,$ABTS^{+}$·	0.1~3.2 mg/mL	清除率分别为 60.21% 和 40.06%	[20]
	CSP1、CSP2	H_2O_2 诱导的 WRL-68 人正常肝细胞	0.025~0.125 mg/mL	提高 SOD、CAT、GSH-Px 活力	[23]
降糖	PAS	STZ 造模小鼠	6、12、24 mg/kg 连续灌胃给药 4 周	降低血糖和胰岛素,显著降低淀粉样蛋白 β42 和 HbA1c 的表达,GLP-1 显著提高	[30]
	AP	α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶	0.1~3.2 mg/mL	抑制率分别为 81.34% 和 78.88%	[20]
	CSP	STZ 造模小鼠	175、350 mg/kg 连续灌胃给药 8 周	降低 FBG 水平以及口服糖耐受 AUC_{0-2h},提高血清胰岛素及 HDL-C 水平,降低 TC,TG,LDL-C;增加产短链脂肪酸肠道菌群丰度,激活 IGF1/PI3K/AKT 通路	[27]
抗炎和镇痛	化合物 1	LPS 诱导的 RAW 264.7 细胞	10、200、400 g/mL	降低 NO,TNF-α,IL-6,IL-1β	[26]
	TPA	TNF-α 诱导的 Caco-2 cells	60、120、240 μg/mL	抑制促炎因子释放如 IL-8 和 IL-6;下调闭合蛋白和 ZO-3 表达;显著抑制 NF-κB p65 的激活和表达	[28]
	薏苡仁多糖	LPS 诱导 NCM460 细胞	10、20、40 μmol/L	IL-1β、TNF-α 降低;NLRP3、Caspase1、GSDMD-N、IL-1β 表达水平明显下调	[31]
	薏苡仁多糖	葡聚糖硫酸钠造模 UC 小鼠	250、500、1000 mg/kg 连续灌胃给药 14 d	薏苡仁多糖通过降低 UC 小鼠结肠内 ROS 活性、抑制 NLRP3 炎性小体激活及 Caspase-1 活化,阻碍结肠组织细胞焦亡,减少活性炎性因子 IL-1β、IL-18 释放	[32]
抗肿瘤和免疫	FCP	高湿暴露小鼠[RH(90±2)%]	200 mg/kg 连续灌胃给药 14 d	降低血浆中 IgM 和 IFN-γ 水平,上调 IL-4 和 IL-6 水平	[33]
	粗多糖	大鼠脾淋巴细胞	62.5~250 μg/mL	显著促进淋巴细胞增殖	[34]
	多糖组分Ⅰ		250~4000 μg/mL		
	多糖组分Ⅱ		62.5~1000 μg/mL		
	粗多糖	DSSD 大鼠模型	0.911 3 g/kg 连续灌胃给药 2 周	p-JAK3、p-STAT5 蛋白表达显著上调	[34]
	多糖组分Ⅰ				
	多糖组分Ⅱ				
	CP-1	A549 细胞	100、200、300 μg/mL	诱导 A549 细胞凋亡;增加 Caspase-3 和 Caspase-9 蛋白表达	[35]
	CP1	A549 细胞	200、300 μg/mL	下调 S100A4 基因和蛋白的表达	[36]
	AAP	RAW 264.7 细胞	50、100、200 μg/mL	增强 NO、TNF-α 和 IL-6 的分泌	[22]
调节肠道菌	AP	体外结肠发酵模型	-	-	[24]
防治糖脂代谢紊乱	薏苡仁多糖	氯氮平诱导的大鼠糖脂代谢紊乱模型	0.1、0.2 g/kg,每天 2 次,连续灌胃给药 8 周	体质量、空腹血糖、餐后 2 h 血糖、血清中瘦素水平显著降低,血清中脂联素水平明显升高	[37]

颗粒与膜的融合使薏苡仁油能够通过 Caco-2 细胞单层运输，提高了肠道通透性。QU D[45]等以薏苡仁油和薏苡仁多糖作为抗癌成分和功能性辅料，开发了一种肝肿瘤双靶向微乳给药系统（Gal-C-MEs），通过薏苡仁多糖介导的被动肿瘤靶向增强和对半乳糖硬脂酸酯（肿瘤靶向配体）的修饰来增强肿瘤特异性积累。Gal-C-MEs 含有 30% 薏苡仁多糖（w%），呈定义明确的球形，其粒径小（47.63 ± 1.41）nm，分散度指数窄（0.101 ± 0.002），中性电位高（-4.37 ± 1.76）mV。在 HepG2 细胞模型上表现出较强的细胞毒性，能够增强细胞摄取，改善细胞凋亡诱导。体内试验表明该微乳肿瘤部位分布明显。在此基础之上，QU D 等[46]优化了靶向配体得到新的递送系统［Gal（oct）-C-MEs］并进行了体内外活性评价，研究结果提示 Gal（oct）-C-MEs 作为一种高效、安全的抗癌药物传递系统，在肝癌治疗中具有广阔的应用前景。

5 质量控制

不同产地薏苡仁的多糖含量存在差异，因此需要建立相应质量控制手段。王奎龙等[47]建立了高效液相色谱-紫外（High Performance Liquid Chromatography-UV，HPLC-UV）的方法研究不同产地薏苡仁多糖的单糖组成，该研究通过优化工艺富集得到薏苡仁多糖，采用酸水解的方法得到单糖，经过衍生化后进行测定。研究发现薏苡仁多糖由甘露糖、鼠李糖、葡萄糖醛酸、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖等单糖组成，其中葡萄糖所占比例最高，并初步分析了 7 种单糖的质量分数，发现不同产地的薏苡仁存在的差异较大。杨志清等[48]系统研究了云南地区产地对薏苡仁多糖含量的影响，通过收集不同地区 15 批薏苡仁，对其多糖含量分析比较，为云南薏苡优良品种的选育提供依据。

茅宇娟[49]建立了一种适用于测定薏苡仁多糖中单糖组成的高效液相色谱-蒸发光散射检测器（high performance liquid chromatography-evaporative light scattering detection，HPLC-ELSD）方法，通过色谱条件优化，最终确立最佳色谱条件：色谱柱为 Supelco® APHERANH2Polymer 色谱柱（150 mm × 2 mm，5 μm）；流动相为乙腈-0.05 mol/L 醋酸铵溶液（体积比 85∶15）；流速为 0.2 mL/min；进样量为 10 μL；柱温为 35 ℃；ELSD 检测条件为漂移管温度为 60 ℃，载气流量为 1.6 L/min，方法学验证表明该方法准确可靠，分离效果好。结果表明薏苡仁多糖主要由 Glc 组成，另外还含有少量的 Gal、Fuc、Rha、GlcA、Man 和 Ara。

6 安全性

肖志勇[50]对薏苡仁多糖小鼠急性毒性及遗传毒性实验开展了研究，结果表明在 LD50 > 20 g/kg 剂量下（相当于人体推荐量的 600 倍），14 d 观察期内未有动物死亡，按急性毒性剂量分级标准属实际无毒级物质。在 Ames 实验、小鼠骨髓嗜多染红细胞微核实验、小鼠精子畸形实验中均呈阴性反应，未显示有遗传毒性作用。上述结果表明薏苡仁多糖基本无毒性。

7 结论与展望

薏苡仁最早记载于《神农本草经》，为我国传统的利水渗湿药，具有悠久的使用历史以及丰富的资源分布，是极具开发价值的植物资源[3]。本文对薏苡仁多糖的提取纯化、结构及活性进行了系统梳理概括，发现目前关于薏苡仁多糖提取工艺研究繁多，但尚缺乏统一，且由于计算标准及方法不同，导致提取率无法直观横向比较。在结构表征方面，现阶段对薏苡仁多糖结构研究方法以红外和一维核磁为主，二级精细结构研究报道较少。此外，薏苡仁多糖药理活性报道很多，但鲜有阐述构效关系的研究，因此需要逐渐优化并建立不同种类薏苡仁多糖活性成分的提取分离及其纯化的方法库，探索薏苡仁多糖的高级结构解析技术，加深对其结构及生物活性之间关系的解析，是未来研究薏苡仁多糖的重点。

综上所述，薏苡仁多糖还有很多方面研究不足，应深入研究其结构及构效关系，目前对于薏苡仁多糖的研究仅仅是冰山一角，本文总结归纳了薏苡仁多糖的现有研究，以期为薏苡仁多糖的开发利用和进一步研究提供参考。

参考文献

[1] 李晓凯，顾坤，梁慕文，等. 薏苡仁化学成分及药理作用研究进展[J]. 中草药，2020，51（21）：5645-5657.
[2] LI H，PENG L，YIN F，et al. Research on Coix seed as a food and medicinal resource，it's chemical components and their pharmacological activities：A review[J]. Journal of Ethnopharmacology，2024，319：117309.
[3] 吴静雨，陈晓凡，徐万爱，等. 薏苡仁活性成分研究进展[J]. 中国中药杂志，2023（2）：1-13.
[4] TAKAHASHI M，KONNO C，HIKINO H. Isolation and hypoglycemic activity of coixans A，B and C，glycans of *Coix lachryma-jobi* var. *ma-yuen* seeds[J]. Planta Medica，1986，52（1）：64-65.
[5] 徐梓辉，周世文，黄林清. 薏苡仁多糖的分离提取及其降血糖作用的研究[J]. 第三军医大学学报，2000（6）：578-581.
[6] 徐梓辉，周世文，黄林清. 薏苡仁多糖对四氧嘧啶致大鼠胰岛 β 细胞损伤的保护作用[J]. 中国药理学通报，2000（6）：639-642.
[7] 徐梓辉，周世文，黄文权，等. 薏苡仁多糖对实验性糖尿病大鼠红细胞免疫、T 淋巴细胞亚群的影响[J]. 湖南中医学院学报，2001（1）：17-19.
[8] 徐梓辉，周世文，黄林清，等. 薏苡仁多糖对实验性 2 型糖尿病大鼠胰岛素抵抗的影响[J]. 中国糖尿病杂志，2002（1）：42-46.
[9] 徐梓辉，周世文，陈卫，等. 薏苡仁多糖对糖尿病血管并发症大鼠 NO 及主动脉 iNOS 基因表达的影响[J]. 第三军医大学学报，2007（17）：1673-1676.
[10] 郑早早，林冰，刘雄利，等. 响应面分析法优化薏苡仁多糖提取工艺条件[J]. 山地农业生物学报，2013，32（6）：510-514.
[11] 罗云云，杜伟锋，应泽茜，等. 响应面法协同正交试验设计优化薏苡仁多糖提取工艺研究[J]. 中华中医药杂志，2019，34（10）：4847-4851.
[12] HU X，XU F，LI J，et al. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from coix seeds：Optimization，purification，and in vitro digestibility[J]. Food Chemistry，2022，374：131636.
[13] 崔媛，容蓉，杨勇，等. 超声波辅助酸提薏苡仁多糖工艺优化[J]. 中华中医药学刊，2015，33（9）：2143-2145.
[14] 尹媛媛，罗爱平，徐筱菁，等. 超声波和微波提取薏苡仁粗多糖及抗氧化活性的比较[J]. 贵州农业科学，2013，41（4）：65-67，71.
[15] 王文平，陈燕，吴国卿，等. 微波辅助酶法提取薏苡仁粗多糖

[J]. 农产品加工(创新版),2009(8):15 - 17.
[16] 张洋婷,马洪波,宋春梅,等. 薏苡仁多糖的提取及其对油脂的抗氧化作用研究[J]. 食品研究与开发,2015,36(18):58 - 61.
[17] 王春霞. 薏苡仁多糖的提取及其降血糖活性研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
[18] 王青青,李小艳,符纯彬,等. 超声 - 微波协同萃取薏苡仁多糖的工艺研究[J]. 福建中医学院学报,2010,20(3):42 - 43.
[19] QIN D,XI J. Flash extraction: An ultra - rapid technique for acquiring bioactive compounds from plant materials[J]. Trends in Food Science & Technology,2021,112:581 - 591.
[20] 蔡永萍,李阳杰. 薏苡仁多糖闪式提取工艺优化及其生物活性[J]. 食品研究与开发,2023,44(9):164 - 170.
[21] 杜镇,张玲,曹桂云,等. 薏苡仁多糖的分离纯化、单糖组成分析及对脾气虚证调节作用[J]. 中草药,2023,54(6):1736 - 1742.
[22] YAO Y,ZHU Y,GAO Y,et al. Effect of ultrasonic treatment on immunological activities of polysaccharides from adlay[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2015,80:246 - 252.
[23] 金凯宁,王飞燕,陈丽春,等. 薏苡仁多糖的分离纯化及抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂,2023,36(12):120 - 124.
[24] LEE B H,HUANG S C,HOU C Y,et al. Effect of polysaccharide derived from dehulled adlay on regulating gut microbiota and inhibiting Clostridioides difficile in an in vitro colonic fermentation model[J]. Food Chemistry,2023,410:135410.
[25] ZHAO D,YAN M,XU H,et al. Antioxidant and antiaging activity of fermented coix seed polysaccharides on caenorhabditis elegans[J]. Nutrients,2023,15(11):2474.
[26] SUI Y,XU D. Isolation and identification of anti - inflammatory and analgesic polysaccharides from Coix seed (*Coix lacryma - jobi L. var. Ma - yuen* (*Roman.*) *Stapf*)[J]. Natural Product Research,2022(2):1 - 10.
[27] XIA T,LIU C S,HU Y N,et al. Coix seed polysaccharides alleviate type 2 diabetes mellitus via gut microbiota - derived short - chain fatty acids activation of IGF1/PI3K/AKT signaling[J]. Food Research International,2021,150:110717.
[28] LI Y,TIAN X,LI S,et al. Total polysaccharides of adlay bran (*Coix lachryma - jobi* L.) improve TNF - α induced epithelial barrier dysfunction in Caco - 2 cells *via* inhibition of the inflammatory response[J]. Food & Function,2019,10(5):2906 - 2913.
[29] 李大鹏. 康莱特注射液抗癌作用机理研究进展[J]. 中药新药与临床药理,2001(2):122 - 124.
[30] CHEN L C,JIANG B K,ZHENG W H,et al. Preparation,characterization and anti - diabetic activity of polysaccharides from adlay seed[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2019,139:605 - 613.
[31] 陈莉娟,李彦龙,杨维建,等. 基于 NLRP3/Caspase - 1 通路探讨薏苡仁多糖对溃疡性结肠炎体外炎症模型的干预作用及机制[J]. 重庆医科大学学报,2023,48(11):1323 - 1330.
[32] 李彦龙,任彦彦,常利军,等. 薏苡仁多糖对溃疡性结肠炎小鼠 Caspase - 1 介导细胞焦亡通路的影响[J]. 时珍国医国药,2022,33(11):2633 - 2636.
[33] WANG H,YIN H,ZHONG Y,et al. Polysaccharides from fermented coix seed modulates circulating nitrogen and immune function by altering gut microbiota[J]. Current Research in Food Science,2022,5:1994 - 2003.
[34] 王彦芳,杨彬彬,陈倩,等. 薏苡仁多糖通过调控 JAK3/STAT5 通路改善细胞免疫功能的体内外研究[J]. 中华中医药杂志,2021,36(11):6414 - 6417.
[35] LU X,LIU W,WU J,et al. A polysaccharide fraction of adlay seed (Coix lachryma - jobi L.) induces apoptosis in human non - small cell lung cancer A549 cells[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications,2013,430(2):846 - 851.
[36] LUO C,WANG X,AN C,et al. Molecular inhibition mechanisms of cell migration and invasion by coix polysaccharides in A549 NSCLC cells via targeting S100A4[J]. Molecular Medicine Reports,2017,15(1):309 - 316.
[37] 刘伟杰,陈永新,李佳桓,等. 薏苡仁多糖对氯氮平诱导的糖脂代谢紊乱模型大鼠的影响[J]. 新中医,2018,50(8):1 - 4.
[38] 刘帆,侯林,张晓平,等. 薏苡仁多糖抗肿瘤作用及免疫作用研究进展[J]. 辽宁中医药大学学报,2019,21(3):123 - 126.
[39] CHEN L C,FAN Z Y,WANG H Y,et al. Effect of polysaccharides from adlay seed on anti - diabetic and gut microbiota[J]. Food & Function,2019,10(7):4372 - 4380.
[40] ZHANG D,LIU J,CHENG H,et al. Interactions between polysaccharides and gut microbiota: A metabolomic and microbial review[J]. Food Research International,2022,160:111653.
[41] 王彦芳,季旭明,韩晓春,等. 薏苡仁多糖不同组分对脾虚水湿不化模型大鼠结肠 VIPR1 和 AQP3 表达的影响[J]. 中药药理与临床,2018,34(2):43 - 47.
[42] 刘想,刘振春,邹基豪,等. 薏苡仁多糖咀嚼片直接压片法辅料配比的工艺研究[J]. 农产品加工,2017(1):41 - 44.
[43] 冯晓姣,王继林,杨文卓,等. 中药多成分的共递送给药系统的构建策略和方法[J]. 中国实验方剂学杂志,2021(2):1 - 9.
[44] CHEN L CHUN,KONG Y PING,ZHENG Y,et al. Preparation of coix seed oil bioactive delivery systems based on homologous polysaccharides and proteins[J]. International Journal of Biological Macromolecules,2020,151:376 - 383.
[45] QU D,SUN W,LIU M,et al. Bitargeted microemulsions based on coix seed ingredients for enhanced hepatic tumor delivery and synergistic therapy[J]. International Journal of Pharmaceutics,2016,503(1 - 2):90 - 101.
[46] QU D,LIU M,HUANG M,et al. Octanoyl galactose ester - modified microemulsion system self - assembled by coix seed components to enhance tumor targeting and hepatoma therapy[J]. International Journal of Nanomedicine,2017(12):2045 - 2059.
[47] 王奎龙,曹岗,何帅滢. 不同产地薏苡仁多糖的单糖组成分析[J]. 安徽农业科学,2019,47(24):177 - 179,191.
[48] 杨志清,王硕,张世鲍,等. 15 种薏苡仁中多糖含量测定[J]. 亚太传统医药,2014,10(19):25 - 26.
[49] 茅宇娟,王欢,曾陵,等. 高效液相色谱法联用蒸发光散射测定薏苡仁多糖的单糖组成[J]. 生物加工过程,2019,17(6):604 - 609.
[50] 肖志勇. 薏苡仁多糖急性毒性及遗传毒性试验研究[J]. 中南药学,2009,7(9):678 - 681.