段书彦, 张洋弋, 苏比努尔·尔热肯, 等. 新疆灰枣多糖的提取工艺优化、单糖组成及生物活性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 277−287. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100313

DUAN Shuyan, ZHANG Yangyi, SUBINUER Erreken, et al. Optimization of Extraction Process, Monosaccharide Composition and Biological Activity Analysis of Polysaccharides from Xinjiang Hui Jujube[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 277−287. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100313

· 工艺技术 ·

新疆灰枣多糖的提取工艺优化、单糖组成及生物活性分析

段书彦[1], 张洋弋[2], 苏比努尔·尔热肯[3], 白天雅[1], 肖　辉[1,*]

（1.新疆医科大学公共卫生学院, 新疆乌鲁木齐 830017;
2.新疆医科大学第一附属医院, 健康管理中心, 新疆乌鲁木齐 830054;
3.新疆医科大学药学院, 新疆乌鲁木齐 830017）

摘　要: 目的：本研究旨在优化新疆灰枣多糖的提取工艺，分析其单糖组成，并结合计算模拟与体外实验探讨其潜在生物活性。方法：采用超声辅助-热水浸提法提取灰枣多糖，通过单因素实验与响应面法优化提取工艺。经纯化后利用离子色谱分析单糖组成。基于深度学习模型预测主要单糖组分的潜在蛋白靶点，构建 PPI，并进行 GO、KEGG、DO 富集分析。通过分子对接评估核心靶点与单糖的结合特征。采用 DPPH 与 $ABTS^{+}$自由基清除实验评价其体外抗氧化活性，并检测灰枣多糖对 GES-1 细胞活力的影响。结果：最佳提取工艺条件为：超声功率 600 W、料液比 1∶40 g/mL、超声时间 11 min、水浴温度 72 ℃、水浴时间 196 min，此条件下多糖得率达 4.856%。灰枣多糖以葡萄糖为主要组分（88.59%），并含有阿拉伯糖（1.58%）、半乳糖醛酸（2.89%）、半乳糖（2.40%）和鼠李糖（4.54%），是一种含多种中性糖及半乳糖醛酸的酸性杂多糖。靶点预测与富集分析揭示，其潜在作用可能与糖代谢调控、胰岛素信号通路及糖基化相关过程密切相关，表明其可能具有调节糖代谢、改善胰岛素抵抗的潜在生理活性。体外实验表明，灰枣多糖对 DPPH 和 $ABTS^{+}$自由基均具有浓度依赖性清除能力；在 62.5~250 μg/mL 范围内，对 GES-1 细胞无明显毒性，并可促进细胞活力。结论：新疆灰枣多糖经工艺优化后可获得较高得率，具有明确的单糖组成特征，并表现出一定的抗氧化活性和良好的细胞相容性，其可能还具有调节糖代谢相关过程的潜在生物活性。本研究为新疆灰枣多糖的进一步开发利用提供了参考。

关键词: 新疆灰枣多糖, 提取工艺优化, 单糖组成, 分子对接, 生物活性

中图分类号: TS210.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0277−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100313　　本文网刊:

Optimization of Extraction Process, Monosaccharide Composition and Biological Activity Analysis of Polysaccharides from Xinjiang Hui Jujube

DUAN Shuyan[1], ZHANG Yangyi[2], SUBINUER Erreken[3], BAI Tianya[1], XIAO Hui[1,*]

（1.School of Public Health, Xinjiang Medical University, Urumqi 830017, China;
2.Health Management Center, The First Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830054, China;
3.School of Pharmacy, Xinjiang Medical University, Urumqi 830017, China）

Abstract: Objective: This study aimed to optimize the extraction process of polysaccharides from Xinjiang gray jujube, characterize their monosaccharide composition, and explore its potential biological activity by integrating computational

收稿日期: 2025−11−03

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项项目子课题（2023A02010-3-1）。

作者简介: 段书彦（1999−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 公共卫生, E-mail: duansy1213@163.com。

*** 通信作者:** 肖辉（1966−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 营养与食品, E-mail: 1348065182@qq.com。

simulation and *in vitro* experiments. Methods: Polysaccharides were extracted from Xinjiang gray jujube using ultrasonic-assisted hot water extraction, and the extraction parameters were optimized by single-factor experiments combined with response surface methodology. After purification, monosaccharide composition was determined by ion chromatography. Potential protein targets of the major monosaccharide components were predicted using a deep learning model, followed by construction of a protein–protein interaction (PPI) network and gene ontology (GO), kyoto encyclopedia of genes and genomes (KEGG), and disease ontology (DO) enrichment analyses. Molecular docking was performed to assess the binding characteristics between core targets and monosaccharides. *In vitro* antioxidant activity was evaluated using DPPH and $ABTS^+$ radical scavenging assays, and the effects of the polysaccharides on GES-1 cell viability were further assessed. Results: The optimal extraction conditions were as follows: Ultrasonic power 600 W, liquid-to-solid ratio 1∶40 g/mL, ultrasonic time 11 min, water bath temperature 72 ℃, and water bath time 196 min. Under these conditions, the polysaccharide yield reached 4.856%. The polysaccharides were mainly composed of glucose (88.59%), with smaller amounts of arabinose (1.58%), galacturonic acid (2.89%), galactose (2.40%), and rhamnose (4.54%), indicating that they were acidic heteropolysaccharides containing multiple neutral sugars and galacturonic acid. Target prediction and enrichment analyses suggested that their potential effects were closely associated with glucose metabolism, the insulin signaling pathway, and glycosylation-related processes, implying potential roles in modulating glucose metabolism and ameliorating insulin resistance. *In vitro* experiments demonstrated concentration-dependent scavenging activities against both DPPH and $ABTS^+$ radicals. Within the concentration range of 62.5~250 μg/mL, the polysaccharides showed no obvious cytotoxicity toward GES-1 cells and significantly promoted cell viability. Conclusion: Polysaccharides from Xinjiang gray jujube can be obtained at a relatively high yield after process optimization and exhibit a defined monosaccharide profile, antioxidant activity, and good cytocompatibility. They may also possess potential bioactivity related to glucose metabolism regulation. These findings provide a basis for the further development and utilization of Xinjiang gray jujube polysaccharides.

Key words: *Ziziphus jujuba* cv. Hui polysaccharides; extraction process optimization; monosaccharide composition; molecular docking; biological activity

新疆灰枣(*Ziziphus jujuba* cv. Hui)作为新疆主栽红枣品种,因其独特的光热资源与气候条件,积累了丰富的多糖、酚类等生物活性成分,在抗氧化、免疫调节及抗炎等方面展现出显著的健康效益[1]。据国家统计局及农业农村部数据显示,新疆已成为我国红枣种植规模最大的产区,其中灰枣与骏枣作为主导品种,奠定了其产业发展的核心优势[2]。红枣多糖被认为是其关键生物活性成分之一,对于提升新疆特色农产品附加值和推动区域红枣产业高质量发展具有重要意义。因此,系统开展新疆灰枣多糖的相关研究,对于促进地方特色资源的高值化利用具有现实意义和理论价值。

现有研究表明,枣多糖具有调节肠道菌群、改善代谢综合征及增强机体抗氧化能力等多种生理功能[3−4]。新疆红枣(包括若羌灰枣、阿克苏灰枣等)多糖在降血糖、降血脂、改善氧化应激与免疫功能方面具有较好潜力,例如新疆若羌灰枣多糖在动物实验中表现出降血糖、降血脂作用,并可通过抗氧化改善肝脏/胰腺组织损伤[5]。然而,这类研究多以功能评价为主,虽有部分关于新疆灰枣多糖提取工艺和结构参数的研究,但总体而言,在特定品种-精细结构-作用靶点这一连续谱系上的系统研究仍然有限。此外,传统热水浸提法提取效率有限,限制了灰枣多糖的高效利用与深度开发[6]。因此,优化新疆灰枣多糖的提取工艺,系统解析其单糖组成,并探索其生物活性机制,对实现灰枣资源的高值化利用具有重要意义。

针对上述科学问题,本研究拟采用超声辅助-热水浸提法,结合单因素实验与响应面法优化多糖提取工艺,进一步借助高效液相色谱(High Performance Liquid Chromatography, HPLC)与生物信息学工具分析其单糖组成及潜在作用靶点,同时评价其体外抗氧化能力,以期为新疆灰枣多糖的功能性食品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

新疆灰枣　新疆维吾尔自治区喀什地区英吉沙县工业园区,有机灰枣执行标准 GB/T 19630-2019,有机产品证书编号:01SOP1700616;苯酚　上海阿拉丁生化科技股份有限公司;无水乙醇、浓硫酸　天津市大茂化学试剂合作企业(有限公司);D(+)无水葡萄糖、DPPH 自由基清除率检测试剂盒、ABTS 清除能力检测试剂盒　上海源叶生物科技有限公司;三氟乙酸、甲醇、无水乙醇　上海安谱实验科技股份有限公司;氢氧化钠、醋酸钠、木瓜蛋白酶(≥10 units/mg protein)、色谱纯岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡糖醛酸、甘露糖醛酸、古洛糖醛酸　Sigma 公司;石油醚、三氯甲烷、正丁醇　中国医药集团有限公司;复合蛋白酶(≥120 units/mg protein)　Solarbio 公司;以上未标注试剂均为分析纯;人正常胃黏膜上皮细胞株 GES-1　武汉普诺赛生命科技有限公司;DMEM 培养基　Gibco 公司。

SN-HWS-4 型水浴锅　上海上谱仪器设备有限公司；KQ-500DE 型数控超声波清洗器　江苏省昆山市超声仪器有限公司；新型密封性摇摆式高速粉碎机、BK-600J 型超声波清洗机　迈福（山东）科学仪器股份有限公司；UV-2700 型紫外可见分光光度计　Shimadzu Corporation；Advanced-Ⅲ-18W 型实验室超纯水机　成都唐氏康宁科技发展有限公司；101 型电热鼓风干燥箱　北京市永光明医疗器械有限公司；DZF-6051 型真空干燥箱　上海齐欣科学仪器有限公司；N-1100 型旋转蒸发仪　上海爱朗仪器有限公司；ESJ30-5A 电子天平　神宇龙腾；XH-T 漩涡混合器　新宝仪器；Reacti-therm 氮气吹扫仪、离子 ICS 5000 色谱、Multiskan GO 酶标仪　Thermo Reacti-thermo 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　灰枣多糖的提取与工艺优化

1.2.1.1　葡萄糖标准曲线的绘制　参照苯酚-硫酸法绘制葡萄糖标准曲线，称取干燥至恒重的葡萄糖对照品 80.0 mg，超纯水溶解并定容至 100 mL，配制成 0.8 mg/mL 的标准储备液[7]。分别精密吸取该储备液 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL 于试管中，加超纯水补足至 1.0 mL。依次向各管加入 0.5 mL 现配的 6% 苯酚溶液，迅速加入 2.5 mL 浓硫酸，振荡混匀后静置 30 min。于 490 nm 波长下测定吸光度值，以葡萄糖质量浓度为横坐标，吸光度值为纵坐标，绘制标准曲线，得回归方程。所得回归方程为：y=16.65x+0.2442，R^2=0.9984，表明葡萄糖浓度在 8~40 μg/mL 范围内与吸光度值之间具有良好的线性关系。

1.2.1.2　单因素实验设计　将灰枣去核、55 ℃ 烘干、粉碎过 40 目筛后，准确称取 2.0 g 灰枣粉，加入 80 mL 蒸馏水（料液比 1∶40（g/mL）），超声处理 10 min，于 70 ℃ 水浴条件下提取 3 h，提取液经抽滤后减压浓缩，加入 4 倍体积 95% 乙醇，醇沉 12 h，5000 r/min 离心 10 min 收集沉淀，得到灰枣粗多糖。将粗多糖溶于200 mL 超纯水中，稀释 20 倍后取 1 mL，采用苯酚-硫酸法测定多糖浓度，并计算多糖得率。系统考察料液比、超声功率、超声时间、水浴温度和水浴时间对多糖得率的影响。料液比分别设定为 1∶10、1∶20、1∶30、1∶40、1∶50 g/mL，固定超声功率 500 W、超声时间 10 min、水浴温度 70 ℃、水浴时间 3 h；超声功率分别设定为 200、300、400、500、600 W，固定料液比 1∶40 g/mL、超声时间 10 min、水浴温度 70 ℃、水浴时间 3 h；超声时间分别设定为 5、10、15、20、25 min，固定料液比 1∶40 g/mL、超声功率 500 W、水浴温度 70 ℃、水浴时间 3 h；水浴温度分别设定为 50、60、70、80、90 ℃，固定料液比 1∶40 g/mL、超声功率 500 W、超声时间 10 min、水浴时间 3 h；水浴时间分别设定为 1、2、3、4、5 h，固定料液比 1∶40 g/mL、超声功率 500 W、超声时间 10 min、水浴温度 70 ℃。提取液经抽滤、真空浓缩后，加入 4 倍体积 95% 乙醇沉淀多糖 12 h，5000 r/min 离心 10 min 收集沉淀，复溶定容后，按公式计算多糖得率。样品中多糖得率的计算公式为[8]：

$$\text{多糖得率}(\%)=\frac{C\times V\times N}{M\times 10^3}\times 100$$

式中：C 为根据葡萄糖标准曲线计算得到的稀释后样品质量浓度，mg/mL；V 为样品体积，mL；N 为样品稀释倍数；M 为灰枣粉质量，g。

1.2.1.3　响应面试验设计　根据单因素实验结果，选取料液比、超声时间、超声功率、水浴温度及水浴时间进行五因素三水平的响应面优化试验，通过 Design-Expert 13 中的 Box-Behnken 设计组合试验见表 1。

表 1　响应面优化试验因素与水平设计

Table 1　Factors and levels for the response surface methodology (RSM) optimization design

水平	因素				
	A超声功率（W）	B超声时间（min）	C水浴温度（℃）	D水浴时间（h）	E料液比（g/mL）
−1	400	5	60	2	1∶30
0	500	10	70	3	1∶40
1	600	15	80	4	1∶50

1.2.2　粗多糖纯化

取粗多糖固体，以纯水充分溶解后，按每 1 mL 粗多糖溶液中分别加入木瓜蛋白酶 0.6 mg 和复合蛋白酶 0.6 mg 的比例，于 37 ℃ 条件下酶解过夜，以去除蛋白质。

采用 Sevage 法[9]（三氯甲烷∶正丁醇=4∶1，v/v）脱除蛋白残留，并以石油醚萃取去除脂类成分。进一步加入 AB-8 大孔树脂进行脱色处理，收集滤液后，经 3000 Da 透析袋透析 24~48 h，除去小分子杂质。将透析液醇沉、烘干，获得纯化多糖（HZP），并采用苯酚-硫酸法测定其多糖含量

为精确测定多糖含量，采用苯酚-硫酸法绘制葡萄糖标准曲线，并分别测定粗多糖与纯化多糖的总糖含量。结果表明，葡萄糖浓度在测定范围内与吸光度呈现良好线性关系，回归方程为 y=344.29x+21.598，决定系数 R^2=0.9985，满足定量分析要求。多糖样品中总糖含量计算公式：

$$\text{总糖含量}(\text{mg/mg})=\frac{C\times V}{M}$$

式中，C 为根据标准曲线计算得到的样品中糖浓度（mg/mL）；V 为样品溶液体积（mL）；M 为待测多糖样品的实际质量（mg）。

1.2.3　多糖单糖组成分析

纯化灰枣多糖（HZP）经三氟乙酸酸水解后用于单糖组成分析。具体方法如下：称取一定量 HZP 样品，加入 2 mol/L 三氟乙酸（TFA）溶液 1 mL，于 121 ℃ 条件下水解 2 h。反应结束后，将水解液在氮气流下吹干，残余物用 99.99%

甲醇清洗并再次吹干，该步骤重复三次以彻底去除 TFA。随后以无菌超纯水溶解所得酸水解产物，经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后，转移至色谱瓶，用于后续单糖组成的离子色谱分析。分别配制浓度 10 mg/mL 的 13 种单糖标准品（岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、木糖、甘露糖、果糖、核糖、半乳糖醛酸、葡糖醛酸、甘露糖醛酸、古洛糖醛酸）。按预设比例混合各单标储备液，配制成最高浓度分别为 40、50、60 μg/mL 的混合标准工作液，并进一步梯度稀释，建立系列标准曲线，用于色谱定量分析[10]。

采用 Thermo ICS 5000+离子色谱系统，配以脉冲安培检测器进行分析[11]。色谱柱为 Dionex™ CarboPac™ PA20（150×3.0 mm, 10 μm），柱温 30 ℃，流速 0.5 mL/min，进样量 5 μL。流动相包括：A（H_2O）、B（0.1 mol/L NaOH）和 C（0.1 mol/L NaOH+0.2 mol/L NaAc）。梯度洗脱程序如下：0 min（95∶5∶0），26 min（85∶5∶10），42 min（85∶5∶10），42.1 min（60∶0∶40），52 min（60∶40∶0），52.1 min（95∶5∶0），并保持至 60 min。采用外标法定量，通过 Chromeleon 软件拟合标准曲线，样品中单糖含量按公式：

$$单糖含量(\mu g/mL) = C \times F$$

式中：C 为仪器测定浓度；F 为稀释因子。

1.2.4 多糖潜在生物活性靶点与作用机制 为探究灰枣多糖中主要单糖（鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖、半乳糖醛酸）的潜在作用机制，本研究通过 Swiss Target Prediction、Binding DB 等数据库检索其在人体内的潜在蛋白靶点，基于 DeepGlycanSite 深度学习模型[12] 预测靶点蛋白的碳水化合物结合位点，获取残基水平结合概率，对靶点进行 PPI 网络构建及 KEGG、GO 功能富集分析，以阐释其参与的生物学过程与信号通路[13]。为筛选关键靶点，对 PPI 网络数据进行归一化处理，结合预测概率计算各靶点的综合评分，依据评分排序，选取代表性靶点与相应单糖进行分子对接[14]。

1.2.5 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力的检测 使用 DPPH 自由基清除率检测试剂盒与 $ABTS^+$自由基清除能力检测试剂盒检测 HZP 的抗氧化能力[15]。

1.2.6 灰枣多糖对人胃黏膜上皮 GES-1 细胞活力的影响 采用人胃黏膜上皮细胞 GES-1 进行细胞活力检测。细胞在含 10% 胎牛血清和 1% 青霉素-链霉素的 DMEM 培养基中，于 37 ℃、5% CO_2 条件下培养。取对数生长期细胞，以 4×10^4 个/mL 的密度接种于 96 孔板中（100 μL/孔），培养 24 h 待细胞贴壁后弃去旧培养基。设空白对照组（仅加培养基）、样本组（加入不同浓度灰枣多糖 HZP，终浓度为 62.5、125 和 250 μg/mL）及调零组（不接种细胞），每组设 10 个复孔。在相同条件下继续培养 48 h 和 72 h 后，每孔加入 10 μL CCK-8 试剂，孵育 1 h，于 450 nm 波长处测定吸光值（OD）[16]。细胞活力按以下公式计算：

$$细胞活力(\%) = \frac{OD_{样本} - OD_{调零}}{OD_{空白对照} - OD_{调零}} \times 100$$

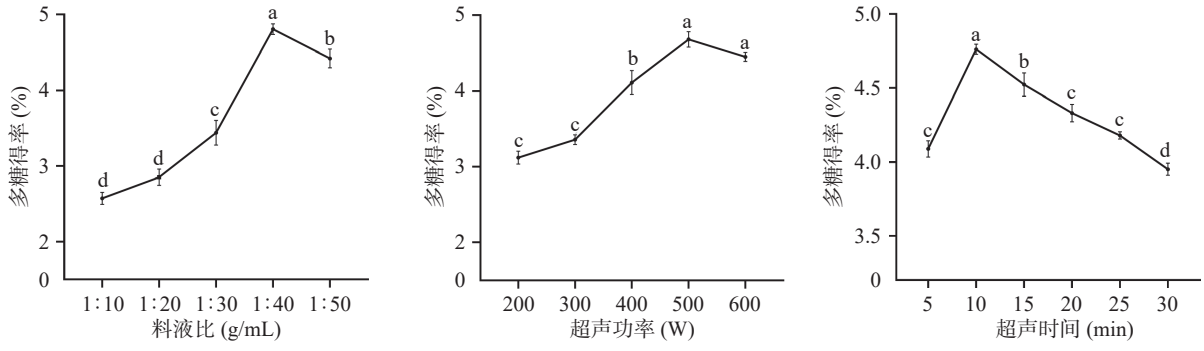
1.3 数据处理

每个试验重复 3 次，结果以（$\overline{X}\pm S$）表示。使用 SPSS 26 软件和 GraphPad Prism 9 软件进行数据分析和绘图。响应面试验数据采用 Design-Expert 13 软件设计并进行回归分析。色谱数据采用 Chromeleon Chromatography Data System（Version 7.2.10, Thermo Fisher Scientific, USA）进行处理。使用 R4.4.3、python3.1 和 Anaconda 进行深度学习 Deep Glycan Site。

2 结果与分析

2.1 灰枣多糖的提取工艺优化

2.1.1 单因素实验设计及结果 如图 1，在固定其他条件下，灰枣多糖得率随料液比、超声功率、超声时间、水浴温度及水浴时间的变化均呈现先升高后降低的趋势，且多数水平间差异具有统计学意义。具体而言，随着料液比由 1∶10 增至 1∶40（g/mL），多糖得率显著提高（$P<0.01$），说明适当增加溶剂用量有助于扩大原料与溶剂的接触面积，促进多糖由植物组织向溶剂中的扩散与溶出。当料液比进一步增至 1∶50（g/mL）时，多糖得率反而下降（$P<0.01$），可能是由于体系过度稀释，单位体积内多糖浓度降低，同时更多水溶性杂质被共提取，降低了多糖的有效提取效率[17]。在超声功率因素中，随着功率由 200 W 提高至 500 W，多糖得率逐渐增加（$P<0.01$）。这可能与超声空化效应增强，细胞壁结构破坏及传质阻力降低有关，从而促进多糖释放。然而，当超声功率超过 500 W 后，多糖得率略有下降（$P>0.05$），推测过强的



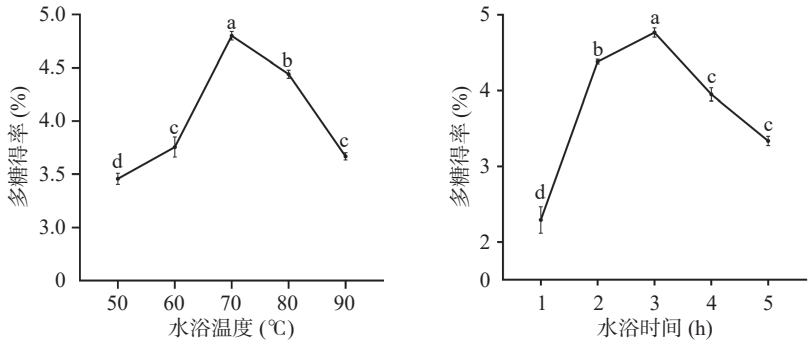


图 1　各因素对多糖得率的影响

Fig.1　Effects of various factors on polysaccharide extraction yield

注：不同小写字母代表组间极显著差异（P<0.01）。

空化效应可能导致多糖分子链断裂或部分降解，不利于得率进一步提高[18]。在超声时间中，当超声时间由 5 min 延长至 10 min 时，多糖得率极显著提高（P<0.01），表明适度延长超声作用时间有利于多糖充分释放，继续延长超声时间后，得率出现下降（P<0.01），可能与长时间超声导致多糖结构破坏或降解有关[19]。水浴温度对多糖提取得率的影响表明，随着水浴温度由 50 ℃ 升高至 70 ℃，多糖得率增加（P<0.01）。这是由于温度升高可增强分子热运动，加快多糖在溶剂中的扩散速率，从而促进其溶出。然而，当温度继续升高时，多糖得率下降（P<0.01），可能是较高温度导致多糖糖苷键断裂，并诱发热降解或氧化反应[20]。同样的，水浴时间由 1 h 延长至 3 h 时，多糖得率提高（P<0.01），表明适当延长提取时间有利于多糖的充分溶出；但继续延长水浴时间后，得率反而下降（P<0.01），可能与长时间加热导致多糖发生热降解或糖苷键断裂，从而影响其稳定性和提取效率有关[21]。综合上述结果，选取料液比 1∶40（g/mL）、超声功率 500 W、超声时间 10 min、水浴温度 70 ℃、水浴时间 3 h 作为响应面优化的中心水平。

2.1.2　响应面优化试验

2.1.2.1　响应面优化试验结果　以超声功率（A）、超声时间（B）、水浴温度（C）、水浴时间（D）和料液比（E）为自变量，多糖得率（Y）为响应值，开展响应面优化试验，结果如表 2。采用 Design-Expert 13 软件进行多元回归拟合，得到多糖得率的二次回归方程如下：$Y=4.83+0.4219A+0.212B+0.672C+0.3106D+0.1748E+0.1635AB-0.2685AC+0.0008AD-0.0465AE-0.118BC-0.0785BD-0.161BE-0.443CD-0.1055CE-0.179DE-0.5485A^2-0.447B^2-0.7053C^2-0.4081D^2-0.5093E^2$。

2.1.2.2　响应面回归模型方差分析　方差分析结果表明（表 3），该回归模型达到极显著水平（P<0.0001），失拟项不显著（P=0.0583>0.05）。模型的决定系数 R^2=0.9871，校正决定系数 R^2_{adj}=0.9768，说明模型拟合良好，预测值与实验值一致。各因素对多糖得率的影响主次顺序为：水浴温度>超声功率>水浴时间>超声时间>料液比。在交互作用方面，AB、AC、BE、

表 2　灰枣多糖提取的响应面优化试验设计及结果

Table 2　Response surface optimization experimental design and results for polysaccharide extraction from Xinjiang gray jujube

实验号	因素					多糖得率（%）
	A超声功率（W）	B超声时间（min）	C水浴温度（℃）	D水浴时间（h）	E料液比（g/mL）	
1	500	10	70	3	1∶40	4.900
2	400	10	70	4	1∶40	3.742
3	500	15	70	3	1∶30	4.078
4	500	10	60	3	1∶30	2.586
5	400	5	70	3	1∶40	3.460
6	400	15	70	3	1∶40	3.460
7	600	15	70	3	1∶40	4.560
8	500	10	70	4	1∶50	4.224
9	600	10	80	3	1∶40	4.444
10	500	10	80	3	1∶50	4.410
11	500	15	60	3	1∶40	3.354
12	500	15	70	2	1∶40	3.838
13	500	15	70	3	1∶50	4.162
14	400	10	70	2	1∶40	3.234
15	600	10	60	3	1∶40	3.636
16	500	5	70	3	1∶50	3.932
17	600	10	70	3	1∶30	4.058
18	600	5	70	3	1∶40	3.906
19	500	5	70	4	1∶40	4.254
20	600	10	70	3	1∶50	4.432
21	500	10	70	4	1∶30	4.356
22	500	10	60	4	1∶40	3.828
23	600	10	70	4	1∶40	4.496
24	500	10	70	3	1∶40	4.746
25	400	10	70	3	1∶50	3.546
26	500	10	80	4	1∶40	4.070
27	500	5	60	3	1∶40	2.674
28	500	15	80	3	1∶40	4.496
29	500	10	70	3	1∶40	4.858
30	400	10	70	3	1∶30	2.986
31	500	5	70	3	1∶30	3.204
32	500	5	80	3	1∶40	4.288
33	500	10	70	2	1∶30	3.360
34	500	10	80	2	1∶40	4.420
35	500	10	70	3	1∶40	4.864
36	500	10	60	2	1∶40	2.408
37	400	10	60	3	1∶40	2.214
38	500	10	60	3	1∶50	3.096
39	500	10	70	3	1∶40	4.812
40	500	15	70	4	1∶40	4.470
41	500	5	70	2	1∶40	3.308
42	500	10	70	3	1∶40	4.800
43	600	10	70	2	1∶40	3.956
44	500	10	80	3	1∶30	4.322
45	400	10	80	3	1∶40	4.096
46	500	10	70	2	1∶50	3.944

表 3 回归模型方差分析

Table 3 Analysis of variance for the regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	20.7300	20	1.0400	95.6700	<0.0001**
A-超声功率	2.8500	1	2.8500	262.8400	<0.0001**
B-超声时间	0.7191	1	0.7191	66.3700	<0.0001**
C-水浴温度	7.2300	1	7.2300	666.9100	<0.0001**
D-水浴时间	1.5400	1	1.5400	142.5000	<0.0001**
E-料液比	0.4886	1	0.4886	45.1000	<0.0001**
AB	0.1069	1	0.1069	9.8700	0.0043**
AC	0.2884	1	0.2884	26.6200	<0.0001**
AD	0.0003	1	0.0003	0.0236	0.8791
AE	0.0086	1	0.0086	0.7983	0.3801
BC	0.0557	1	0.0557	5.1400	0.0323*
BD	0.0246	1	0.0246	2.2800	0.1440
BE	0.1037	1	0.1037	9.5700	0.0048**
CD	0.7850	1	0.7850	72.4600	<0.0001**
CE	0.0445	1	0.0445	4.1100	0.0534
DE	0.1282	1	0.1282	11.8300	0.0021**
A^2	2.6300	1	2.6300	242.3100	<0.0001**
B^2	1.7400	1	1.7400	160.9300	<0.0001**
C^2	4.3400	1	4.3400	400.7100	<0.0001**
D^2	1.4500	1	1.4500	134.1800	<0.0001**
E^2	2.2600	1	2.2600	208.9400	<0.0001**
残差	0.2708	25	0.0108		
失拟项	0.2557	20	0.0128	4.2300	0.0583
纯误差	0.0151	5	0.0030		
总差	21.00	45			

注: *表示影响显著(P<0.05), **表示影响极显著(P<0.01)。

CD 和 DE 项对多糖得率具有极显著影响(P<0.01), BC 项呈显著影响(P<0.05), 而 AD、AE、BD 及 CE 项影响不显著(P>0.05)。其中, 水浴温度与超声功率(AC)以及水浴温度与水浴时间(CD)的交互项 F 值较大, 对灰枣多糖得率的影响尤为突出。图 2 进一步表明, 显著交互项对应的等高线多呈椭圆形, 说明因素间存在不同程度的协同作用。其中, AC 和 CD 的等高线较为紧密、曲面峰顶较明显, 表明其交互作用较强; AB、BE 和 DE 次之, 提示在中间水平组合下更有利于多糖溶出; BC 的曲面变化稍平缓, 但等高线也较为密集。此外, 模型中各二次项对多糖得率均具有显著影响, 表明各因素在考察范围内对多糖提取得率存在明显的非线性效应。

2.1.3 工艺优化与验证 基于响应面分析, 模型预测的最佳工艺条件为: 超声功率 600 W、料液比 1∶40.053(g/mL)、超声时间 10.862 min、水浴温度 71.739 ℃、水浴时间 3.26 h, 对应预测多糖得率为 4.85%。统计分析表明, 500 W 与 600 W 条件下多糖得率差异不显著(P>0.05)。综合模型预测结果与工艺可行性, 选取超声功率 600 W、料液比 1∶40 (g/mL)、超声时间 11 min、水浴温度 72 ℃、水浴时间 196 min 作为验证实验工艺参数。三次平行试验所得平均多糖得率为 4.856%±0.054%, 与模型预测值的相对误差仅为 0.12%, 表明所建立的响应面模型拟合良好。这一结果显著高于传统热水提取法通常

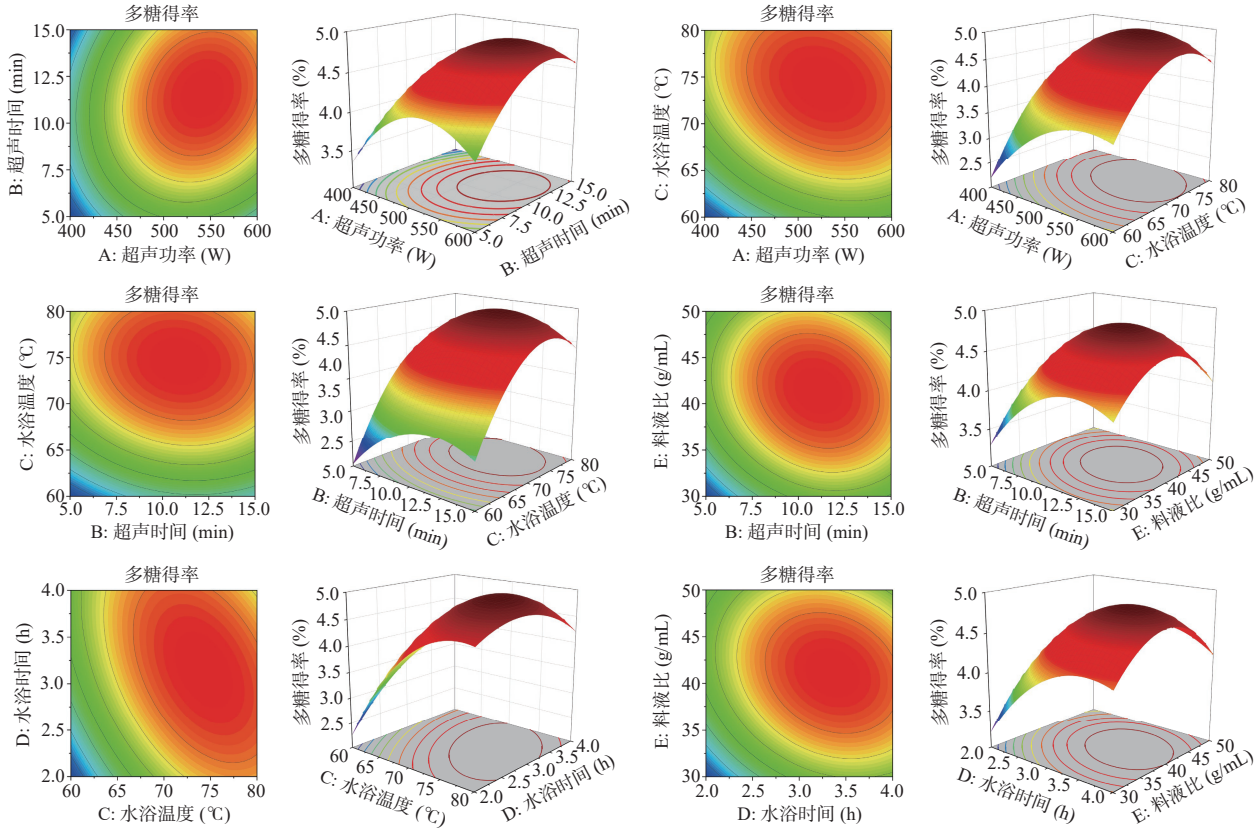


图 2 各因素间的交互作用对灰枣多糖得率影响的响应面及等高线图

Fig.2 Response surface plots showing the interactive effects of various factors on the polysaccharide yield from Xinjiang gray jujube

报道的 2%~3% 的得率范围[16,22]，证实了超声辅助技术在破坏植物细胞壁、促进多糖溶出方面的优势[23]。

2.2　粗多糖的纯化

灰枣粗多糖纯度由 57.3% 提高至 76.3%。具体而言，粗多糖经 Sevage 法除蛋白、石油醚脱脂及 AB-8 大孔树脂脱色等步骤处理后，所得 HZP 的纯度较纯化前明显升高，表明纯化工艺能够有效去除杂质并提高多糖纯度。

2.3　多糖单糖组成分析

采用离子色谱法对 10 批次灰枣多糖 HZP 的单糖组成进行系统分析见图 3。各单糖标准品在测定浓度范围内均建立了良好的线性标准曲线（R^2>0.998），满足离子色谱法对灰枣多糖单糖组成定量分析的要求。如图 3 所示，通过对比标准品与样品的色谱图保留时间，确定样品中含有鼠李糖（Rha）、阿拉伯糖（Ara）、半乳糖（Gal）、葡萄糖（Glc）和半乳糖醛酸（Gal-UA）五种单糖组分。定量分析结果显示，葡萄糖为主要单糖组分，摩尔质量比为 88.59%；其余四种单糖摩尔质量比分别为阿拉伯糖 1.58%、半乳糖醛酸 2.89%、半乳糖 2.40% 和鼠李糖 4.54%。该组成特征表明灰枣多糖是以葡萄糖为主要单糖组分，辅以少量阿拉伯糖、半乳糖等中性糖及半乳糖醛酸的酸性杂多糖，其结构特征与已知的枣多糖类型相符[24]。

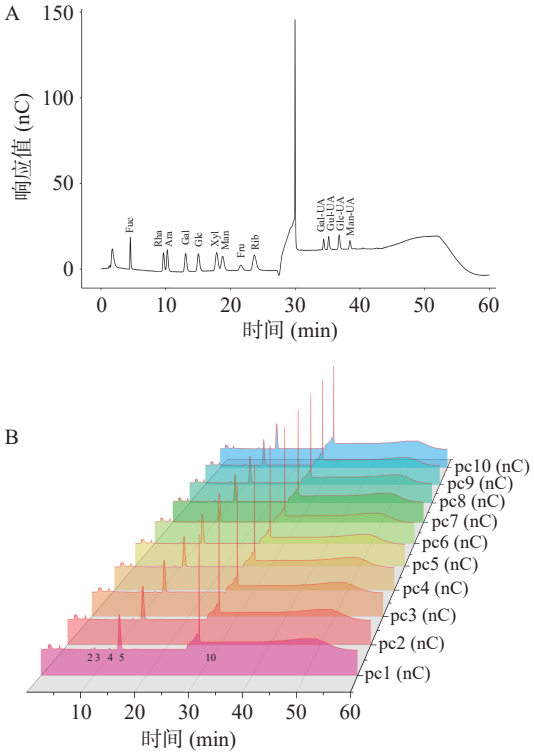


图 3　单糖标准品与灰枣多糖样品色谱图

Fig.3　Ion chromatography of monosaccharide standards and Xinjiang gray jujube sample

注：A.单糖标准品色谱图；B.灰枣多糖样品酸解产物的离子色谱图；色谱峰标识：2.Rha（鼠李糖）；3.Ara（阿拉伯糖）；4.Gal（半乳糖）；5.Glc（葡萄糖）；10.Gal-UA（半乳糖醛酸）；pc1~pc10为 10 批次 HZP 样品；nC 为峰容量。

2.4　多糖潜在生物活性靶点与作用机制

2.4.1　多糖潜在生物活性靶点　基于 Deep Glycan Site 深度学习模型预测鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和半乳糖醛酸与 1400 个人源蛋白靶点的结合概率。图 4 热图颜色从黄色到紫色表示结合概率由低到高（0.60~0.86）。GALK1、DPT 和 CLEC10A 等蛋白在五种单糖中均表现出较高的结合倾向（结合概率>0.75）。进一步构建 PPI（图 5），拓扑分析识别出 AKT1、SRC 和 HDAC1 等核心蛋白，这些靶点涉及糖代谢、免疫调节等多个生物学过程，在细胞信号转导和表观遗传调控中发挥关键作用[20]。反映具有类似单糖组成的酸性多糖可能涉及的共性调控节点，为后续机制研究提供了候选靶点。

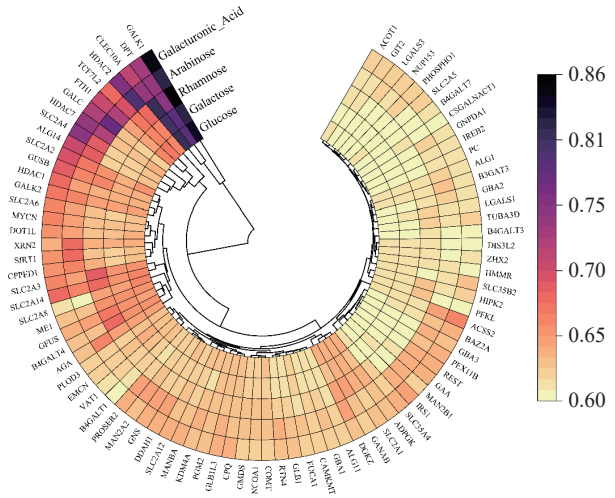


图 4　五种单糖与潜在蛋白靶点的结合概率热图

Fig.4　Heatmap of binding probabilities between five monosaccharides and potential protein targets

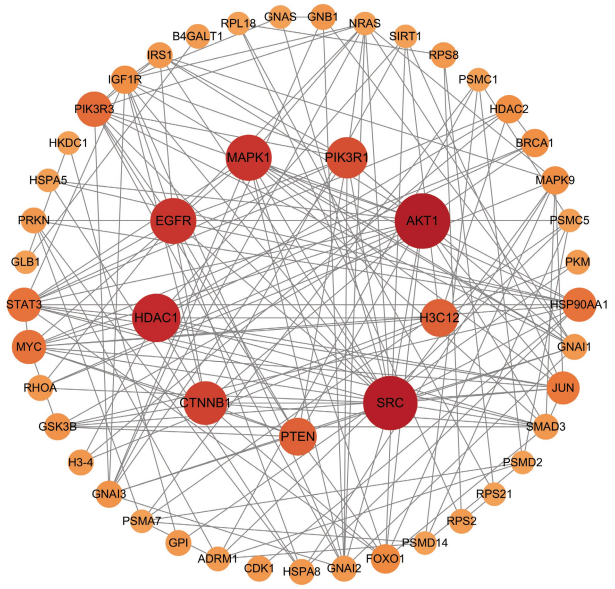


图 5　多糖潜在靶点的蛋白质-蛋白质相互作用网络

Fig.5　Protein-protein interaction network of potential polysaccharide targets

2.4.2　富集分析结果　为解析灰枣多糖相关候选靶点的功能特征，对其进行了 KEGG、GO、DO 富集分

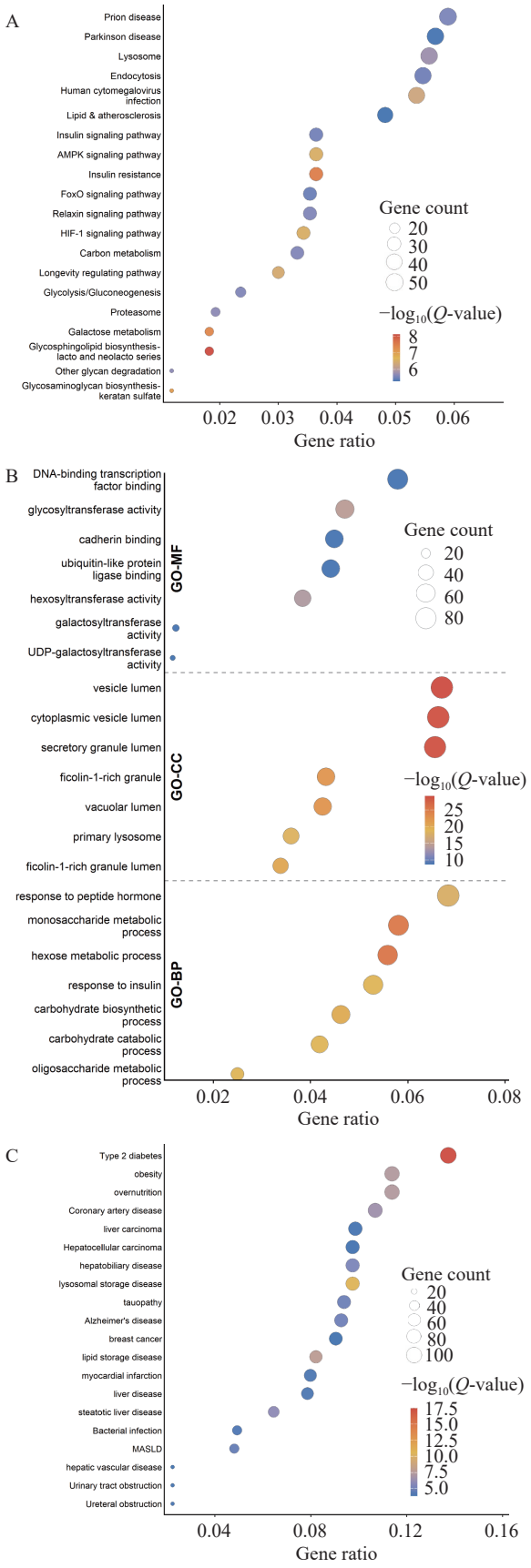


图 6 灰枣多糖潜在靶点的 KEGG 通路、GO 功能、DO 疾病靶点富集分析

Fig.6 KEGG pathway, GO function, and DO disease enrichment analysis of potential targets for Xinjiang gray jujube polysaccharides

注: A. KEGG 富集图; B. GO 富集图; C. DO 富集图。

析(如图 6)。结果显示, 候选靶点在 KEGG 层面主要富集于帕金森病(Parkinson disease)、脂质与动脉粥样硬化(Lipid & atherosclerosis)、胰岛素信号通路(Insulin signaling pathway)、腺苷酸活化蛋白激酶信号通路(AMPK signaling pathway)及胰岛素抵抗(Insulin resistance)等; 在基因本体(GO)层面, 生物过程(BP)主要涉及胰岛素应答(Response to insulin)、单糖代谢过程(Monosaccharide metabolic process)和己糖代谢过程(Hexose metabolic process), 分子功能(MF)主要涉及糖基转移酶活性(Glycosyltransferase activity), 细胞组分(CC)主要富集于囊泡腔(Vesicle lumen)等条目; 在疾病本体(DO)层面, 主要与 2 型糖尿病(Type 2 diabetes)、肥胖(Obesity)、营养过剩(Overnutrition)、肝脏疾病(Liver disease)、脂肪性肝病(Steatotic liver disease)及代谢功能障碍相关脂肪性肝病(MASLD)等疾病相关。综合来看, 候选靶点主要聚焦于糖代谢调控、胰岛素应答及相关代谢性疾病[25], 这与既往关于枣多糖和天然多糖可改善糖脂代谢紊乱、缓解胰岛素抵抗并减轻肝脏代谢异常的研究结果基本一致[26−27], 提示灰枣多糖可能具有一定的代谢调节与保护潜力。

2.4.3 核心靶点筛选 基于结合评分与网络拓扑参数构建综合评分模型(图 7), 筛选获得五个核心靶点: AKT1(综合评分 0.638)、SRC(0.613)、HDAC1(0.604)、PSMD14(0.596)和 PRKN(0.592)。这些靶点在蛋白互作网络中处于关键枢纽位置, 且均表现出较高的糖结合潜力(结合评分>0.59), 表明其可能在灰枣多糖介导的生物活性调控中发挥核心作用。可作为后续围绕灰枣多糖开展结构表征和细胞、动物实验验证时的优先关注靶点。

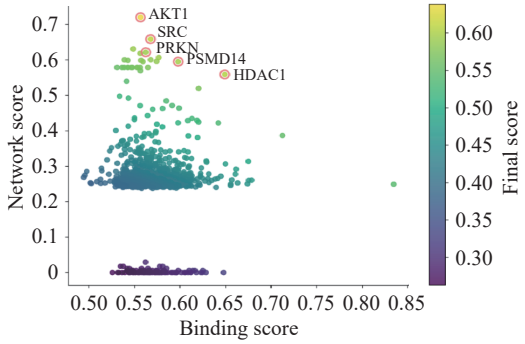


图 7 核心靶点结合评分与网络评分的综合筛选

Fig.7 Comprehensive screening of core targets by binding score and network score

2.4.4 核心靶点分子对接 所有靶蛋白与单糖之间均表现出良好的结合潜力(见表 4), 结合自由能 △G 分布于−4.019 至−6.226 kcal/mol 范围内。AKT1 对葡萄糖和半乳糖、PRKN 对鼠李糖和阿拉伯糖表现出较好的预测亲和力, 提示灰枣多糖相关糖残基可能通过 SRC、AKT1、PRKN 等激酶或泛素连接酶参与信号转导与代谢调控过程。结合既往研究, 枣多糖

表 4　分子对接结合能

Table 4　Molecular docking binding energies

蛋白	单糖组分				
	鼠李糖	阿拉伯糖	半乳糖	葡萄糖	半乳糖醛酸
AKT1	−5.527	−4.019	−5.776	−5.992	−4.73
HDAC1	−5.356	−4.86	−5.547	−5.172	−5.368
PRKN	−5.825	−5.745	−5.459	−5.224	−5.088
PSMD14	−5.127	−4.368	−5.349	−5.303	−4.288
SRC	−5.427	−4.467	−5.858	−6.226	−5.161

注：表中数据为核心靶蛋白与单糖组分的分子对接结合自由能（ΔG，kcal/mol）。

在胰岛素抵抗 HepG2 细胞模型中可提高葡萄糖消耗，并通过激活 PI3K/Akt 通路缓解胰岛素抵抗[28]。

2.5　新疆灰枣多糖体外抗氧化活性

采用 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除实验评价灰枣多糖的体外抗氧化能力[29]，结果如图 8 所示。灰枣多糖在两种体系中均表现出明显的浓度依赖性自由基清除活性。在 DPPH 体系中，灰枣多糖同样呈现良好的浓度依赖性，但清除活性相对较弱，计算得 IC_{50} 为 5.52 mg/mL；在最高测试浓度 8 mg/mL 时，清除率为 55.57%。结果表明灰枣多糖对 DPPH 自由基具有一定的清除作用。在 ABTS 体系中，随着多糖浓度的增加，自由基清除率迅速升高，计算得到 IC_{50} 为 0.37 mg/mL。在 8 mg/mL 时，清除率达到 77.20%，表明灰枣多糖对 $ABTS^+$自由基具有较强的清除能力。维生素 C（V_C）作为阳性对照，在两种自由基体系中均表现出显著的清除能力，在较低浓度下清除率即超过 80%。综上，灰枣多糖具有一定的体外抗氧化活性，且对 $ABTS^+$自由基的清除效果优于 DPPH 自由基，自由基体系间响应差异可能与多糖结构特征及不同自由基反应机制有关[30]。

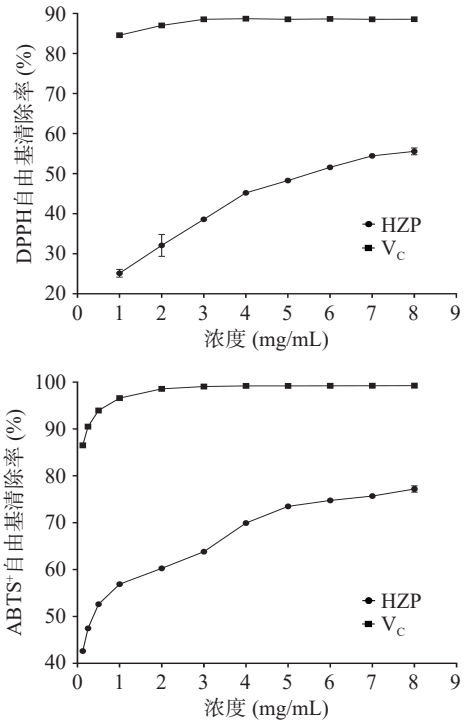


图 8　灰枣多糖对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除能力

Fig.8　Scavenging capacity of Xinjiang gray jujube polysaccharides on DPPH and $ABTS^+$ free radicals

2.6　灰枣多糖对人胃黏膜上皮 GES-1 细胞活力的影响

如图 9 所示，在 62.5~250 μg/mL 浓度范围内，灰枣多糖作用 48~72 h 对 GES-1 细胞均未表现出明显毒性，细胞活力整体呈随浓度升高、作用时间延长而上升的趋势。与对照组相比，48 h 时，62.5、125 和 250 μg/mL 处理组细胞活力均极显著升高（P<0.01）。在 72 h 作用条件下，各给药组细胞活力均极显著高于对照组（P<0.01），且随浓度升高呈上升趋势，其中 250 μg/mL 处理组细胞活力最高，约为对照组的 120%。综上，在 62.5~250 μg/mL 浓度、48~72 h 作用条件下，灰枣多糖对 GES-1 细胞表现出良好的体外相容性，并呈一定的剂量-时间依赖性促活化趋势，该结果与已有相关研究报道基本一致，提示其在胃黏膜保护方面具有一定潜在作用[31]。

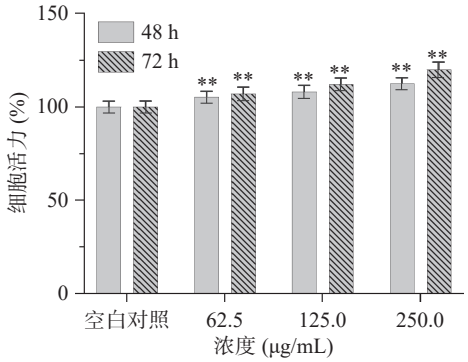


图 9　灰枣多糖对 GES-1 细胞活力的影响

Fig.9　Effects of Xinjiang gray jujube polysaccharides on the viability of GES-1 cells

注：**表示与空白对照组相比，P<0.01。

3　结论

本研究系统考察了新疆灰枣多糖的提取工艺、单糖组成特征及其潜在生物活性。结果表明，采用超声辅助-热水提取结合响应面法可有效优化灰枣多糖提取工艺，在超声功率 600 W、料液比 1∶40 g/mL、超声时间 11 min、水浴温度 72 ℃ 及水浴时间 196 min 条件下，多糖得率达到 4.856%，表明该工艺具有较好的稳定性和可行性。单糖组成分析显示，灰枣多糖为一种以葡萄糖为主，并含半乳糖、阿拉伯糖、鼠李糖及半乳糖醛酸的酸性杂多糖。体外活性评价表明，灰枣多糖具有一定的 DPPH 和 $ABTS^+$自由基清除能力，并在 62.5~250 μg/mL、48~72 h 范围内对 GES-1 细胞无明显毒性，可提高细胞活力，提示其具有较好的体外相容性及一定的细胞保护潜力。靶点预测与富集分析进一步表明，其潜在作用可能与糖代谢调控、胰岛素信号通路及糖基化相关过程密切相关，提示灰枣多糖具有调节糖代谢和改善胰岛素抵抗的潜在价值。综上，新疆灰枣多糖具有进一步开发为天然功能活性成分的应用前景。本研究为新疆灰枣多糖的功能评价及高值化利用提供了实验

依据。由于本研究对其高级结构特征及体内功能验证尚不充分，后续仍需结合精细结构解析及体内外机制研究，进一步阐明其构效关系及生物学作用机制。

© 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］ 万胜, 王利娜, 赵文, 等. 新疆灰枣园土壤养分与枣果矿质元素关系的多元分析[J]. 中国土壤与肥料, 2023(10): 127−135. ［WAN S, WANG L N, ZHAO W, et al. Multivariate analysis of the relationship between soil nutrients and mineral elements in fruits of Xinjiang gray jujube orchards[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2023(10): 127−135.］

［2］ 靳娟, 李丽莉, 杨磊, 等. 新疆红枣产业发展现状分析[J]. 新疆农业科学, 2024, 61(S1): 106−110. ［JIN J, LI L L, YANG L, et al. Analysis on the current development status of the Xinjiang red jujube industry[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2024, 61(S1): 106−110.］

［3］ 陈浩, 尹君叶, 郝建雄, 等. 红枣多糖的生物活性及作用机制研究进展[J]. 食品工业科技, 2024, 45(13): 342−351. ［CHEN H, YIN J Y, HAO J X, et al. Research progress on the biological activities and mechanisms of jujube polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(13): 342−351.］

［4］ JIA F, WANG B, MA H, et al. Research progress on extraction, separation, structure, and biological activities of polysaccharides from jujube fruit (*Ziziphus jujuba* Mill.): A review[J]. Frontiers in Chemistry, 2025, 13: 1581947.

［5］ 董小强, 文畅, 许金丹, 等. 鼠李科植物枣多糖的活性机制及其结构特征研究进展[J]. 中国药科大学学报, 2024, 55(4): 443−453. ［DONG X Q, WEN C, XU J D, et al. Research progress on the active mechanisms and structural characteristics of jujube polysaccharides from *Rhamnaceae* plants[J]. Journal of China Pharmaceutical University, 2024, 55(4): 443−453.］

［6］ GUO Y, NAN S, QIU C, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction of jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) polysaccharides: extraction efficiency, antioxidant activity, and structural features[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107088.

［7］ 刘战霞, 代文婷, 吴洪斌, 等. 超声辅助去糖处理对热风干燥及压差闪蒸干燥红枣脆片品质的影响[J]. 华中农业大学学报, 2024, 43(5): 234−241. ［LIU Z X, DAI W T, WU H B, et al. Effect of ultrasonic-assisted desugaring treatment on the quality of jujube chips dried by hot air drying and pressure-difference flash evaporation drying[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2024, 43(5): 234−241.］

［8］ 王娜, 冯艳凤, 潘治利, 等. 超声辅助提取对大枣粗多糖体外抗凝血活性及得率的影响[J]. 中国食品学报, 2021(4): 8−15. ［WANG N, FENG Y F, PAN Z L, et al. Effects of ultrasound-assisted extraction on the yield and *in vitro* anticoagulant activity of crude polysaccharides from Chinese jujube[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2021(4): 8−15.］

［9］ 王洋, 刘永灵. 超高效液相色谱-串联质谱法测定 4 种运动饮料中多糖的单糖组成及含量[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(7): 95−101. ［WANG Y, LIU Y L. Determination of the monosaccharide composition and content of polysaccharides in four sports drinks by ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry[J]. China Food Additives, 2023, 34(7): 95−101.］

［10］ 张立攀, 王俊朋, 李冰, 等. 山茱萸多糖的分离纯化、结构表征及体外降糖活性研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 1−11. ［ZHANG L P, WANG J P, LI B, et al. Study on the isolation, purification, structural characterization, and *in vitro* hypoglycemic activity of *Cornus officinalis* polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 1−11.］

［11］ 后艳琴. 基于“辨状论质”的大枣果实性状与其主要活性成分的相关性研究和质量评价研究[D]. 合肥: 安徽中医药大学, 2022. ［HOU Y Q. Correlation between fruit traits and major active components of Chinese jujube based on “quality evaluation by morphological characteristics” and quality evaluation study[D]. Hefei: Anhui University of Chinese Medicine, 2022.］

［12］ HE X, ZHAO L, TIAN Y, et al. Highly accurate carbohydrate-binding site prediction with DeepGlycanSite[J]. Nature Communications, 2024, 15: 5163.

［13］ YU G, WANG L G, HAN Y, et al. clusterProfiler: An R package for comparing biological themes among gene clusters[J]. OMICS, 2012, 16(5): 284-287.

［14］ 孙莹, 方胥伟, 杨斐然, 等. 分子动力学在植物蛋白、脂质和多糖中的应用进展[J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 422−433. ［SUN Y, FANG X W, YANG F R, et al. Research progress on the application of molecular dynamics in plant proteins, lipids, and polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 422−433.］

［15］ 李海飞, 杨毅, 亓雨芮, 等. 超声波辅助酸性天然低共熔溶剂提取黑果腺肋花楸花青素及其稳定性和抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 11−18. ［LI H F, YANG Y, QI Y R, et al. Ultrasound-assisted extraction of anthocyanins from *Aronia melanocarpa* using acidic natural deep eutectic solvents and analysis of their stability and antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 11−18.］

［16］ FAN J, SCHIEMER T, VASKA A, et al. Cell viability assay changes cellular metabolic characteristics by intervening with glycolysis and pentose phosphate pathway[J]. Chemical Research in Toxicology, 2024, 37(2): 208−211.

［17］ CUI F J, QIAN L S, SUN W J, et al. Ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Volvariella volvacea*: Process optimization and structural characterization[J]. Molecules, 2018, 23(7): 1706.

［18］ 彭欣宇, 邵予欣, 沙旖璇, 等. 半仿生法提取夏枯草多糖工艺优化及其体外抗氧化、酶抑制活性研究[J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 1−12. ［PENG X Y, SHAO Y X, SHA Y X, et al. Optimization of the semi-bionic extraction process of polysaccharides from *Prunella vulgaris* and their *in vitro* antioxidant and enzyme inhibitory activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 1−12.］

［19］ HOU F, SONG S, YANG S, et al. Study on the optimization, extraction kinetics and thermodynamics of the ultrasound-assisted enzymatic extraction of *Tremella fuciformis* polysaccharides[J]. Foods, 2024, 13(9): 1408.

［20］ 杨艳霞, 刘慧, 周铭懿, 等. 超声辅助提取酸枣仁多糖工艺和抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2025, 46(2): 10−15. ［YANG Y X, LIU H, ZHOU M Y, et al. Study on the ultrasound-assisted extraction process and antioxidant activity of polysaccharides from sour jujube seed[J]. The Food Industry, 2025, 46(2): 10−15.］

［21］ WANG Y, YANG J, LI X, et al. Optimization of the process of extracting polysaccharides from *Agrocybe aegerita* and *in vitro* antioxidant and anti-aging tests[J]. Molecules, 2024, 29(21): 4992.

［22］ 如柯耶木麦麦提图逊, 李彦欣, 穆开然姆开然木, 等. 响应面法优化若羌红枣多糖提取工艺[J]. 新疆畜牧业, 2025, 41(2): 16−20. ［RUKOYEMUMAIMAITITUXUN, LI Y X, MUKAIRANMUKAIRANMU, et al. Optimization of extraction process of Ruoqiang red jujube polysaccharides by response surface methodology[J]. Xinjiang Animal Husbandry, 2025, 41(2): 16−20.］

［23］ SURIN S, YOU S, SEESURIYACHAN P, et al. Optimization of ultrasonic-assisted extraction of polysaccharides from purple glutinous rice bran (*Oryza sativa* L) and their antioxidant activities. *Scientific Reports*, 2020, 10: 10410.

［24］ RUAN J, HAN Y, KENNEDY J F, et al. A review on polysaccharides from jujube and their pharmacological activities[J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2022, 3: 100220.

［25］ JI X, CHEN J, LI Z, et al. Digestion characteristics of jujube polysaccharide and its regulatory effect on intestinal microbiota and metabolites during *in vitro* fermentation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2024, 210: 112987.

［26］ FARHADNEJAD H, HEDAYATI M, SAHRANAVARD S, et al. Effect of dried *Ziziphus jujube* consumption on plasma insulin, blood pressure, oxidative stress, and advanced glycation end products in diabetic patients with excess weight: A randomized controlled trial[J]. Int J Prev Med, 2025, 16: 49.

［27］ ZHAO Y, YANG X, REN D, et al. Preventive effects of jujube polysaccharides on fructose-induced insulin resistance and dyslipidemia in mice[J]. Food Funct, 2014, 5(8): 1771−1778.

［28］ 龚频, 王佩佩, 同美霖, 等. 红枣多糖的提取工艺及药理活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 198−207. ［GONG P, WANG P P, TONG M L, et al. Study on extraction process and pharmacological activity of jujube polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 198−207.］

［29］ JI X, HOU C, YAN Y, et al. Comparison of structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from jujube (*Ziziphus jujuba* Mill.) fruit[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 149: 1008−1018.

［30］ WU B, QIU C, GUO Y, et al. Comparative evaluation of physicochemical properties, microstructure, and antioxidant activity of jujube polysaccharides subjected to hot air, infrared, radio frequency, and freeze drying[J]. Agriculture, 2022, 12(10): 1606.

［31］ WANG X Y, YIN J Y, HU J L, et al. Gastroprotective polysaccharide from natural sources: Review on structure, mechanism, and structure-activity relationship[J]. Food Frontiers, 2022, 3(4): 560−591.