杨涛, 刘燕姗, 莫饶瑶, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取星油藤种子多糖及其体外降血糖活性评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(12): 276−285. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100059

YANG Tao, LIU Yanshan, MO Raoyao, et al. Ultrasound-assisted Deep Eutectic Solvent Extraction and *in Vitro* Hypoglycemic Activity of Polysaccharides from *Plukenetia volubilis* Seeds[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(12): 276−285. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100059

· 工艺技术 ·

超声辅助低共熔溶剂提取星油藤种子多糖及其体外降血糖活性评价

杨　涛[1], 刘燕姗[2,*], 莫饶瑶[1], 陈　慧[1], 王文晞[3], 刘赵云[3,*]

（1.广西民族师范学院, 广西崇左 532200;
2.广西演艺职业学院, 广西南宁 530226;
3.湖北省药品监督检验研究院, 湖北武汉 430075）

摘　要: 为促进星油藤资源的高值化利用，本研究采用超声辅助低共熔溶剂法，系统优化了星油藤种子多糖的提取工艺。粗多糖经纤维素柱层析纯化后，获得均一组分 PVP-2，进一步对其结构特征与体外降血糖活性进行系统分析。结果表明，氯化胆碱-尿素（摩尔比 1∶2）为最佳低共熔溶剂体系，在液料比 50∶1 mL/g、含水量 40%、超声温度 62 ℃、超声时间 71 min 的最佳工艺条件下，星油藤种子多糖得率达到 13.67%±0.76%。结构表征显示，PVP-2 分子结构具有典型的多糖特征吸收峰，是由鼠李糖（8.76%）、阿拉伯糖（16.45%）、木糖（12.34%）、半乳糖醛酸（38.42%）、葡萄糖（5.68%）和半乳糖（18.35%）组成的酸性杂多糖；重均分子量（Mw）为 9.453×10^5 Da，数均分子量（Mn）为 5.703×10^5 Da，分子量分布宽度（Mw/Mn）为 1.658。体外降血糖活性实验表明，PVP-2 对 *α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶的抑制率呈浓度依赖性增强趋势，对应的 IC_{50} 值分别为 0.51±0.03 和 0.81±0.06 mg/mL，显示出良好的降血糖应用潜力。本研究提供了一种星油藤种子多糖的高效提取方案，并为开发具有辅助降血糖的功能性食品提供了理论依据。

关键词: 星油藤, 低共熔溶剂, 多糖, 结构表征, 降血糖活性

中图分类号: R284.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)12−0276−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100059　　本文网刊:

Ultrasound-assisted Deep Eutectic Solvent Extraction and *in Vitro* Hypoglycemic Activity of Polysaccharides from *Plukenetia volubilis* Seeds

YANG Tao[1], LIU Yanshan[2,*], MO Raoyao[1], CHEN Hui[1], WANG Wenxi[3], LIU Zhaoyun[3,*]

（1.Guangxi Minzu Normal University, Chongzuo 532200, China;
2.Guangxi Vocational College of Performing Arts, Nanning 530226, China;
3.Hubei Institute for Drug Control, Wuhan 430075, China）

Abstract: This study employed an ultrasound-assisted deep eutectic solvent (DES) method to systematically optimize the extraction of polysaccharides from *Plukenetia volubilis* seeds, for promoting the high-value utilization of this resource. After purifying the crude polysaccharides by cellulose column chromatography, a homogeneous fraction (designated PVP-2) was obtained and systematically analyzed for its structural characteristics and *in vitro* hypoglycemic activity. The results indicated that choline chloride-urea system (molar ratio 1∶2) was the optimal DES. The polysaccharide yield reached

收稿日期: 2025−10−13

基金项目: 广西民族师范学院校级科研项目（2024YB087）; 国家级大学生创新创业训练项目（202410604003）。

作者简介: 杨涛（1990−）, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 天然活性多糖, E-mail: 15817368530@163.com。

*** 通信作者:** 刘燕姗（1994−）, 女, 本科, 助教, 研究方向: 食品安全, E-mail: 2072636027@qq.com。

刘赵云（1984−）, 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 生物制品质量控制和评价, E-mail: 282259113@qq.com。

13.67%±0.76% under the optimized conditions: Liquid-to-solid ratio of 50∶1 mL/g, water content of 40%, ultrasonic temperature of 62 ℃, and ultrasonic time of 71 min. Structural characterization demonstrated that PVP-2 was an acidic heteropolysaccharide with typical polysaccharide absorption peaks and a monomer composition of rhamnose (8.76%), arabinose (16.45%), xylose (12.34%), galacturonic acid (38.42%), glucose (5.68%), and galactose (18.35%) in molar percentages. The weight-average molecular weight (Mw) was determined to be 9.453×10^5 Da, the number-average molecular weight (Mn) was 5.703×10^5 Da, and the molecular weight distribution (Mw/Mn) was 1.658. *In vitro* hypoglycemic activity assays demonstrated that PVP-2 exhibited a concentration-dependent inhibitory effect on both α-glucosidase and α-amylase, with IC_{50} values of 0.51±0.03 and 0.81±0.06 mg/mL, respectively, indicating its promising potential for hypoglycemic applications. This study establishes an efficient extraction method for polysaccharides from *Plukenetia volubilis* seeds and offers a theoretical foundation for developing functional foods with auxiliary hypoglycemic functions.

Key words: *Plukenetia volubilis* L.; deep eutectic solvent; polysaccharides; structural characterization; hypoglycemic activity

星油藤（*Plukenetia volubilis* L.），又名美藤果、印加果或南美油藤，是一种原产于南美洲安第斯山脉地区的大戟科多年生木质藤本植物[1]。自 2006 年由中国科学院从秘鲁引种以来，现已在广西、云南等地广泛种植，成为重要的区域性经济作物。星油藤种子富含不饱和脂肪酸、蛋白质、多糖、甾醇等多种活性成分，这些成分赋予了它抗氧化、美白、免疫调节等广泛的药理活性，展现出良好的开发潜力[2−4]。然而，现有研究多聚焦于星油藤种子的脂肪油与蛋白质组分，对其多糖的系统性研究，尤其是结构与功能关系的探讨仍显薄弱[5−6]。多糖作为由十个以上单糖通过糖苷键连接而成的天然大分子，在降血糖、免疫调节等领域显示出巨大应用前景，已成为天然产物研究的热点[7−8]。因此，系统研究星油藤多糖的组成与生物功能，对拓展其在药物与功能性食品领域的应用具有重要意义。

多糖的提取效率与最终获得的生物活性，在很大程度上取决于所采用的提取技术[9]。目前常用的多糖提取方法，如热水、酸碱或酶提取法，常面临提取时间长、效率偏低以及可能破坏多糖高级结构导致活性丧失等问题[10]。因此，开发高效、环境友好且能最大限度保持多糖生物活性的新型提取工艺显得至关重要。低共熔溶剂（deep eutectic solvents, DES）作为一种由氢键供体与氢键受体按一定比例混合形成的新型绿色介质，以其低毒、可生物降解和溶解能力强等优势，已在香椿种子多糖[11]、香菇多糖[12]、小球藻多糖[13] 等多种天然多糖的提取中成功应用。相较于传统的热水浸提法、酸碱或酶提取法，DES 法在提取效率与环境友好性方面均有显著提高[14−15]。与此同时，超声辅助提取（ultrasound-assisted extraction, UAE）技术通过空化效应强化传质过程，能显著缩短提取时间并提高提取效率[16]。研究表明，将 UAE 与 DES 相结合（UAE-DES）可发挥协同增效作用：超声作用促进了 DES 对植物细胞壁的渗透与溶解，而 DES 所提供的温和环境又能有效缓解超声可能导致的多糖降解[17]。这种 UAE-DES 联合策略不仅能实现多糖的高效提取，还能有效维持其结构完整性与生物活性，显示出良好的应用前景[18]。

近年来，除活性成分提取工艺外，星油藤的降血糖活性也已引起研究者的初步关注。Lopez 等[19] 研究发现星油藤种子油能够改善小鼠胰岛素抵抗；Zhang 等[20] 则报道其种子蛋白肽能显著提高胰岛素抵抗 HepG2 细胞的葡萄糖消耗量。然而，作为星油藤种子中另一类重要的生物活性成分，其多糖的降血糖活性研究仍相对匮乏，特别是关于其均一组分的系统结构鉴定与活性评价基础数据尚不完善，这严重制约了星油藤多糖作为一种功能性食品的高值化利用。

为促进星油藤资源的高值化利用，本研究围绕其种子多糖，依次完成了 UAE-DES 提取工艺的优化、均一组分 PVP-2 的分离纯化与结构表征，并重点考察了其体外降血糖活性，为深度开发星油藤功能性食品原料提供了可靠的理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

星油藤种子　采集于广西崇左市，经湖北省药品监督检验研究院王文晞博士鉴定为大戟科植物星油藤（*Plukenetia volubilis* L.）的干燥种子；无水乙醇、苯酚、硫酸　分析纯，国药集团化学试剂有限公司；氯化胆碱、甜菜碱　分析纯，山东科源生化有限公司；柠檬酸、丙三醇、尿素　分析纯，成都金山化学有限公司；鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、半乳糖醛酸、葡萄糖、半乳糖　分析纯，上海西格玛贸易有限公司；阿卡波糖、对硝基苯基-α-D-葡萄糖吡喃苷（PNPG）分析纯，上海士锋生物科技有限公司；α-葡萄糖苷酶（50 U/mg）、α-淀粉酶（2 U/g）　分析纯，上海麦克林生化科技股份有限公司；牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠　分析纯，上海源叶生物科技有限公司；实验室所用水均为自制超纯水；其余所用到的试剂均为分析纯；透析袋（截留分子量 3500 Da）　美国 Viskase 公司。

Waters e2695 高效液相色谱仪　美国 Waters 公司；Dawn Heleos II 十八角度激光检测器　美国 Wyatt 公司；GC-2010 Pro 气相色谱　日本 Shimadzu 公司；ReadMax1900 酶标仪　上海闪谱股份有限公司；Evolution 300 紫外-可见分光光度计　德国 Ther-

mo 公司; Spectrum RX/BX 红外光谱仪　美国 Perkin Elmer 公司; KQ-800 超声波清洗仪　昆山超声仪器有限公司; GM-0.33A 冷冻干燥机　天津津腾有限公司; PB203-N 电子天平　瑞士 Mettler Toledo 公司; Centrifuge 5804R 高速离心机　德国 Eppendorf 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　不同体系 DES 的制备　DES 的制备参考 Liu 等[21] 的方法并略作修改。选取氯化胆碱、甜菜碱作为氢键受体, 丙三醇、尿素、柠檬酸作为氢键供体, 按表 1 的摩尔比称取后, 将二者充分混合均匀, 并加入固定比例的水, 于 60 ℃ 恒温水浴中使用磁力搅拌器持续搅拌, 直至形成澄清透明的均相液体后, 置于 4 ℃ 冰箱冷藏备用。

表 1　低共熔溶剂配方
Table 1　Deep eutectic solvents formulations

编号	氢键受体	氢键供体	摩尔比
DES-1	氯化胆碱	丙三醇	1∶2
DES-2		尿素	1∶2
DES-3		柠檬酸	1∶2
DES-4	甜菜碱	丙三醇	1∶2
DES-5		柠檬酸	1∶2
DES-6		尿素	1∶2

1.2.2　粗多糖提取工艺　将干燥的星油藤种子粉碎并过 100 目筛备用。取适量筛后粉末置于圆底烧瓶中, 按 10∶1 的液料比加入石油醚, 于 70 ℃ 水浴条件下回流提取 2 h 以去除部分脂肪与色素; 回流结束后进行过滤, 收集滤渣并干燥, 作为后续提取原料。准确称取 2 g 上述干燥滤渣, 按 40∶1 的液料比加入含水量 30% 的 DES, 于 60 ℃ 水浴条件下, 在 300 W 的超声功率下提取 60 min; 提取液经 8000 r/min 离心 5 min 后, 收集上清液并旋转蒸发浓缩至原体积的 20%。向浓缩液中加入 5 倍体积的无水乙醇, 混匀后, 于 4 ℃ 条件下醇沉过夜, 收集醇沉所得沉淀, 用适量蒸馏水复溶后, 加入 Sevage 试剂(氯仿∶正丁醇=4∶1, v/v)以去除蛋白。最后, 将除蛋白后的溶液减压浓缩、透析去除 DES 等小分子后冷冻干燥处理, 即得星油藤种子粗多糖。

1.2.3　粗多糖得率的计算　总糖含量的测定采用苯酚-硫酸法[22]。精密量取 0.1 mg/mL 的葡萄糖标准溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL, 分别置于洁净试管中, 各管均补加超纯水至总体积为 1.0 mL; 随后依次向各管中加入 1 mL 6% 的苯酚溶液和 5 mL 浓硫酸, 充分振荡混匀, 在室温条件下反应 30 min, 以超纯水为空白对照, 在 490 nm 波长处测量各管吸光值。以葡萄糖溶液浓度(C)为横坐标、对应吸光值(A)为纵坐标, 进行线性回归分析, 得回归方程为 A=12.705C+0.0078(R^2=0.9995)。将待测样品按上述相同方法处理并测定吸光值, 代入方程计算总糖浓度, 再根据式(1)计算得率(W)。

$$W(\%)=\frac{c\times V\times N}{m}\times 100 \qquad 式(1)$$

式中: c 为根据吸光度值计算出的样品溶液中总糖浓度, mg/mL; V 为样品溶液体积, mL; N 为样品溶液稀释倍数; m 为样品质量, mg。

1.2.4　单因素实验设计　在确定最优 DES 体系后、按照 1.2.2 节的提取方法, 固定其他变量(DES 含水量 30%、提取温度 60 ℃、提取时间 60 min 和液料比 40∶1 mL/g), 依次考察液料比(20∶1、30∶1、40∶1、50∶1、60∶1 mL/g), DES 含水量(20%、30%、40%、50%、60%), 超声时间(15、30、45、60、75 min), 超声温度(40、50、60、70、80 ℃)对星油藤种子多糖得率的影响。实验采用控制变量法, 每次仅改变一个待考察因素的水平。待一个因素优化完成并确定其最佳水平后, 再依次进行下一个因素的优化实验。

1.2.5　响应面试验设计　在单因素实验确定初步范围后, 选用响应面法中的 Box-Behnken Design(BBD)方案对提取工艺参数作进一步优化。选取液料比(A)、含水量(B)、超声时间(C)以及超声温度(D)作为四个关键影响因素, 以星油藤种子多糖得率(Y)为响应指标, 各因素均设置低、中、高三个水平, 并依次用“−1、0、+1”进行编码, 详细的因素水平与编码见表 2。

表 2　BBD 试验因素与水平设计
Table 2　Factors and levels in the BBD experiment

水平	因素			
	A.液料比 (mL/g)	B.含水量 (%)	C.超声时间 (min)	D.超声温度 (℃)
−1	40∶1	30	45	60
0	50∶1	40	60	70
1	60∶1	50	75	80

1.2.6　星油藤种子粗多糖的纯化　将星油藤种子粗多糖用超纯水配制成浓度为 10 mg/mL 的样品溶液, 经 0.22 μm 微孔滤膜过滤后, 借助蠕动泵将其缓慢上样于 DEAE-52 纤维素层析柱顶端[23]。依次使用 0、0.1、0.3 和 0.5 mol/L 的 NaCl 溶液进行梯度洗脱, 洗脱流速控制为 1 mL/min, 按每管 5 mL 的体积收集洗脱液。采用苯酚-硫酸法对各管洗脱液进行多糖示踪检测, 以收集管号为横坐标、对应吸光度值为纵坐标, 绘制洗脱曲线。根据洗脱曲线特征, 合并 0.3 mol/L NaCl 溶液洗脱峰所对应的组分, 经减压浓缩处理后, 获得均一性多糖产物。

1.2.7　化学成分分析　以 D-葡萄糖为标准品, 采用苯酚-硫酸法测定 PVP-2 的总糖含量(A=12.705C+0.0078, R^2=0.9995)[22]; 以 D-葡萄糖醛酸为标准品, 通过咔唑-硫酸法测定其糖醛酸含量(A=6.23C+0.008, R^2=0.9992)[8]; 以牛血清白蛋白为参考标准, 采用考马斯亮蓝法测定其蛋白质含量(A=7.85C+0.006,

R^2=0.9991）[15]。

1.2.8　傅里叶变换红外光谱（Fourier transform infrared, FTIR）测试　称取适量纯化后的多糖样品，与溴化钾（KBr）粉末按约 1∶100 的质量比在玛瑙研钵中充分研磨，直至获得均匀混合物。随后，取约 100 mg 此混合粉末压制成半透明薄片，并在 4000~500 cm^{-1}的波数范围内采集红外光谱。

1.2.9　分子量分布　纯化后多糖样品的分子量分布特征通过高效尺寸排阻色谱-示差检测器-多角度激光光散射联用系统（High-performance size exclusion chromatography coupled with refractive index and multi-angle laser light scattering detector, HPSEC-RI-MALLS）进行测定。其原理基于静态光散射理论，系统同步采集多角度的激光光散射信号与示差检测器的浓度信号，通过内置软件执行经典的 Zimm 模型进行数据拟合，直接计算得出样品的绝对分子量，包括数均分子量（Mn）与重均分子量（Mw），该过程无需依赖分子量标准品进行校准[24]。色谱分析条件如下：以两根 TSKgel SuperMultiporePW-M 型凝胶柱串联作为分离柱，流动相由磷酸二氢钾（3.52 g）和磷酸氢二钠（8.08 g）加水定容至 2 L 配制而成，柱温 30 ℃，流速 0.5 mL/min，示差检测器温度为 40 ℃。将 PVP-2 样品使用流动相充分溶胀并稀释到适宜浓度，经 0.22 μm 水相微孔滤膜过滤后，精确进样 50 μL，依据光散射信号计算其分子量。

1.2.10　单糖组成测定　采用气相色谱法分析样品 PVP-2 中的单糖组成[25]。准确移取 5 mL 浓度为 1 mg/mL 的 PVP-2 溶液，加入 4.0 mL、4 mol/L 的三氟乙酸溶液，于 120 ℃ 条件下酸水解 4 h。水解完成后，将水解液于 60 ℃ 下减压旋蒸除去溶剂。随后，向蒸干残留物中依次加入 0.5 mL 吡啶与 10 mg 盐酸羟胺，在 90 ℃ 条件下反应 30 min，待反应液冷却至室温后，再加入 1.0 mL 乙酸酐，于 90 ℃ 下继续衍生 30 min。反应液冷却后经微孔滤膜过滤，供气相色谱进样分析。单糖标准品溶液的处理无需酸水解步骤，其衍生化及后续操作与样品处理保持一致。气相色谱分析条件：DB-1701 毛细管柱（30 m×0.25 mm，0.25 μm），氢火焰离子化检测器温度 270 ℃，进样口温度 250 ℃，柱温 180 ℃，进样量 1 μL。

1.2.11　降血糖活性

1.2.11.1　α-葡萄糖苷酶抑制能力　将纯化后的多糖样品溶解于磷酸盐缓冲液（PBS）中，配制成质量浓度分别为 0.25、0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 mg/mL 的系列梯度溶液。在 96 孔板中分别加入 40 μL 各浓度的 PVP-2 溶液和 30 μL 的 α-葡萄糖苷酶溶液（0.2 U/mL），混合均匀后，37 ℃ 孵育 10 min，之后加入 30 μL 浓度 0.5 mmol/mL 的对硝基苯基-α-D-葡萄糖吡喃苷（PNPG）作为反应底物，继续在 37 ℃ 反应 20 min。最后使用 50 μL 浓度为 0.05 mmol/mL 碳酸钠溶液终止反应。本实验选取临床常用的口服降糖药物阿卡波糖作为阳性对照，其能通过特异性抑制 α-葡萄糖苷酶的活性，延缓碳水化合物吸收，从而降低餐后血糖，已被广泛用作 α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶抑制剂筛选实验的标准参照物质[26]，随后在 405 nm 处检测各孔的吸光度值。α-葡萄糖苷酶抑制率（I_1）按式（2）计算：

$$I_1(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（2）$$

式中，A_1 为样品组的吸光度；A_2 为缓冲液替代酶溶液的对照组吸光度；A_0 为缓冲液替代 PVP-2 的空白组吸光度。

1.2.11.2　α-淀粉酶抑制能力　取 30 μL 纯化后的多糖样品溶液（质量浓度分别为 0.25、0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 mg/mL）与 20 μL α-淀粉酶（1 U/mL）在 96 孔板中混合均匀，于 37 ℃ 孵育 15 min，加入 500 μL 质量浓度为 1% 的淀粉溶液，继续在 37 ℃ 反应 10 min。随后加入 600 μL 3,5-二硝基水杨酸（DNS）试剂，沸水浴 15 min，冰水浴冷却至室温后加入 70 μL 蒸馏水终止反应。以阿卡波糖作为阳性对照，于 540 nm 波长处测定各管吸光度值[27]。根据式（3）计算 α-淀粉酶抑制率（I_2）：

$$I_2(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式（3）$$

式中，A_1 为样品组的吸光度；A_2 为缓冲液替代酶溶液的对照组吸光度；A_0 为缓冲液替代 PVP-2 的空白组吸光度。

1.3　数据处理

每组试验平行操作三次，数据均用平均值±标准差表示。采用 Origin 2021 软件进行试验数据处理与可视化分析，采用 Design Expert 13 软件进行响应面工艺参数优化。采用单因素方差分析（one-way ANOVA）对组间差异进行统计学分析，事后采用 Duncan 法进行多重比较检验，P<0.05 表示数据间具有显著性差异，P<0.01 表示差异极显著。

2　结果与分析

2.1　最佳低共熔溶剂体系的确定

如图 1 所示，不同 DES 配方对星油藤种子多糖的得率存在显著（P<0.05）差异。氯化胆碱-尿素摩尔比 1∶2（DES-2）表现出最优的提取效果，其多糖得率达到 10.12%±0.16%，显著高于热水提取组和其他 DES 组。这可能与以下两个因素相关：一方面，多糖分子中含有丰富的羟基等极性基团，在超声辅助作用下能够与 DES 组分形成氢键，从而有效破坏多糖原有的氢键网络，促进多糖溶出；另一方面，氯化胆碱-尿素体系具有较低的黏度和良好的流动性，其极性与星油藤种子多糖更为接近，有助于增加溶剂与多糖分子的接触面积，从而提高提取效率[28]。因此，本研究选择 DES-2 配方用于后续优化实验。

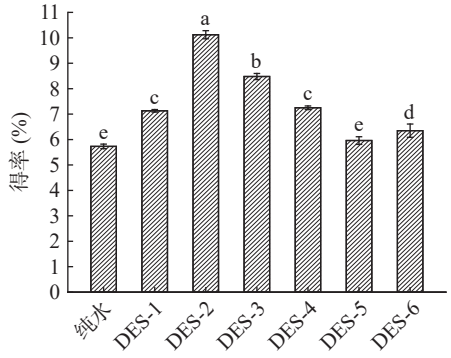


图 1 不同体系对多糖得率的影响

Fig.1 Effect of different systems on the extraction yield of polysaccharides

注: 不同的小写字母表示显著差异(P<0.05); 图 2 同。

2.2 单因素实验结果

2.2.1 液料比对多糖得率的影响 如图 2A 所示, 随着液料比的增大, 星油藤种子多糖的得率呈先增加后缓慢降低的趋势, 当液料比为 40∶1 mL/g 时, 继续增加液料比至 50∶1 mL/g, 多糖得率变化不显著, 此时得率已达到最大值, 液料比至 60∶1 mL/g 时, 多糖得率显著下降(P<0.05)。这可能是因为, 当 DES 用量较少时, 多糖溶解不完全, 导致提取不充分, 适当提高 DES 的用量, 可增加溶剂与多糖的接触面积, 有助于多糖从细胞壁溶出, 多糖得率增大, 但是当 DES 用量过多时会使更多的其他杂质被共提出来, 竞争性抑制多糖溶出, 导致得率的降低[29]。因此, 后续选择液料比 40∶1、50∶1、60∶1 mL/g 开展响应面试验。

2.2.2 含水量对多糖得率的影响 如图 2B 所示, 随着含水量的增加, 多糖得率呈先增加后下降的趋势。当含水量为 40% 时达到最高的得率。这是因为含水量的增加可降低 DES 的黏度, 促进细胞壁溶胀, 破坏其致密结构, 从而促进多糖分子从细胞内释放[14]。同时水分也有助于破坏多糖与细胞壁间的氢键, 增强溶解性, 从而提高得率。但是过高的含水量可能破坏 DES 本身稳定的氢键网络结构, 反而不利于多糖的提取[17]。因此, 后续选择含水量 30%、40%、50% 进行响应面试验。

2.2.3 超声时间对多糖得率的影响 从图 2C 可以看出, 随着超声时间延长, 多糖得率表现为先上升后快速下降的趋势, 在 60 min 时达到最大。这是因为, 超声时间短会导致提取不充分, 适当延长超声时间可增强空化效应, 促进细胞壁破碎及多糖释放[30]。但长时间超声作用也会破坏多糖内部的糖链结构, 使得部分多糖降解, 造成得率下降。因此, 选择超声时间 45、60、75 min 进行后续响应面试验。

2.2.4 超声温度对多糖得率的影响 从图 2D 可以看出, 随着超声温度的升高, 多糖得率呈先上升后减少的趋势, 在 70 ℃ 时达到最高的得率。这是因为, 适当升温可增强分子热运动并降低溶剂的黏度, 从而提高传质效率, 有利于多糖从细胞内溶出; 但温度过高可能导致多糖降解或空间结构改变, 从而降低得率[31]。因此, 选择超声温度 60、70、80 ℃ 进行后续响应面试验。

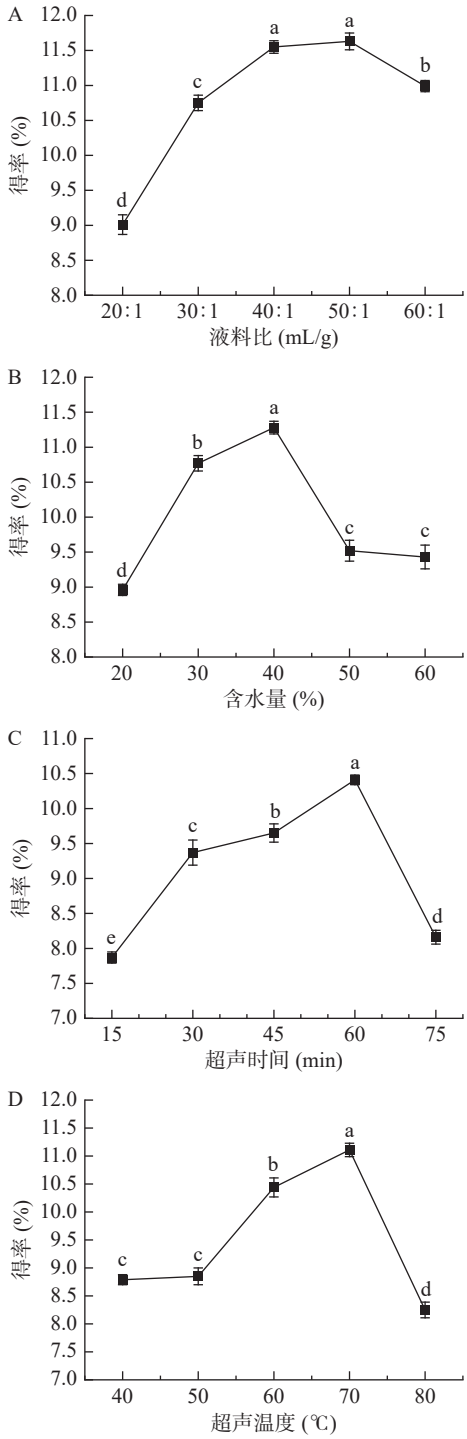


图 2 液料比(A)、含水量(B)、超声时间(C)和超声温度(D)对多糖得率的影响

Fig.2 Effects of liquid-solid ratio (A), water content (B), ultrasonication time (C) and ultrasonication temperature (D) on the polysaccharide yield

2.3 响应面试验结果

2.3.1 响应面 Box-Behnken Design 试验结果 根据单因素实验结果, 以星油藤种子多糖得率为响应值, 采用 Design-Expert 13 软件对表 3 中的实验数据进行回归分析, 得到多糖得率(Y)的二次多项式回归方

程：$Y=13.38+0.0117A-0.0375B+0.3483C+0.4542D+0.2275AB+0.5700AC+0.3625AD+0.5725BC-0.8725BD-0.5225CD-1.69A^2-0.9712B^2-1.17C^2-1.52D^2$。

表 3　响应面试验结果

Table 3　Response surface experimental results

实验号	A	B	C	D	Y(%)
1	0	−1	−1	0	11.41±0.15
2	0	1	−1	0	10.06±0.21
3	1	0	−1	0	9.56±0.18
4	0	0	0	0	13.32±0.10
5	−1	0	1	0	10.27±0.08
6	0	−1	0	−1	9.85±0.19
7	0	0	0	0	13.58±0.22
8	0	0	1	−1	10.84±0.27
9	−1	0	0	1	10.41±0.12
10	0	0	0	0	13.41±0.25
11	1	−1	0	0	10.33±0.11
12	−1	0	−1	0	10.52±0.14
13	0	0	0	0	13.25±0.24
14	1	0	0	1	11.15±0.19
15	0	1	0	1	10.12±0.23
16	1	0	0	−1	9.22±0.14
17	−1	0	0	−1	9.93±0.20
18	0	−1	1	0	11.29±0.17
19	1	0	1	0	11.59±0.26
20	1	1	0	0	11.04±0.31
21	0	−1	0	1	12.14±0.29
22	0	0	−1	−1	9.62±0.26
23	0	0	1	1	10.77±0.23
24	−1	1	0	0	10.71±0.18
25	0	1	1	0	12.23±0.28
26	0	0	0	0	13.36±0.16
27	0	1	0	−1	11.32±0.32
28	−1	−1	0	0	10.91±0.25
29	0	0	−1	1	11.64±0.13

2.3.2　方差分析　从表 4 中的方差分析结果可知，该回归模型达到极显著水平（$P<0.0001$），同时失拟项未呈现显著性（$P>0.05$），表明模型拟合良好，能准确反映各因素 A（料液比）、B（含水量）、C（超声时间）、D（超声温度）与星油藤种子多糖得率之间的关系，可以较好地用于工艺分析与预测[32]。此外，回归方程中一次项 C 和 D，以及交互项 AC、BC、BD 和 CD 对响应值有极显著影响（$P<0.01$）；交互项 AD 对响应值有显著影响（$P<0.05$）。从各因素的 F 值大小可知，其影响程度主次顺序为：D>C>B>A。

表 4　方差分析

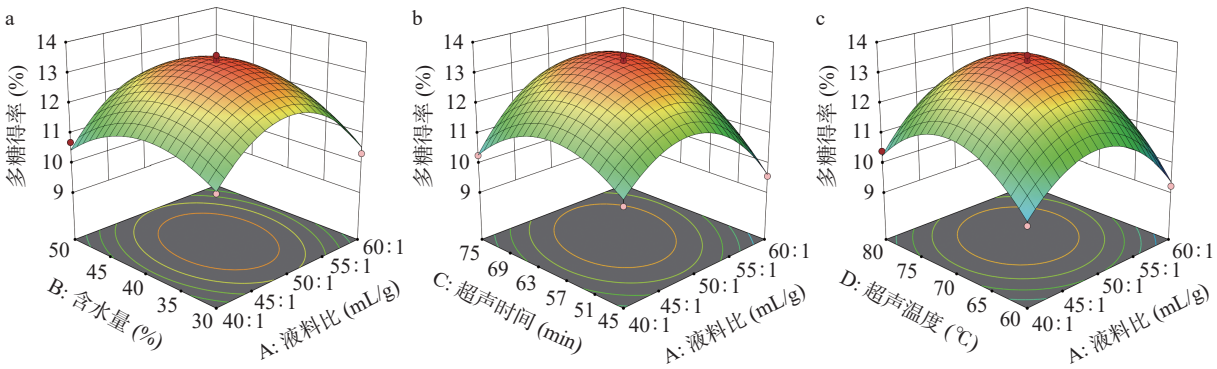
Table 4　Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	43.69	14	3.12	46.90	<0.0001	**
A	0.0016	1	0.0016	0.0245	0.8777	ns
B	0.0169	1	0.0169	0.2536	0.6224	ns
C	1.46	1	1.46	21.88	0.0004	**
D	2.48	1	2.48	37.20	<0.0001	**
AB	0.207	1	0.207	3.11	0.0995	ns
AC	1.3	1	1.3	19.53	0.0006	**
AD	0.5256	1	0.5256	7.90	0.0139	*
BC	1.31	1	1.31	19.70	0.0006	**
BD	3.05	1	3.05	45.76	<0.0001	**
CD	1.09	1	1.09	16.41	0.0012	**
A^2	18.58	1	18.58	279.23	<0.0001	**
B^2	6.12	1	6.12	91.95	<0.0001	**
C^2	8.92	1	8.92	134.00	<0.0001	**
D^2	15.01	1	15.01	225.58	<0.0001	**
残差	0.9315	14	0.0665			
失拟项	0.8698	10	0.087	5.64	0.0551	ns
净误差	0.0617	4	0.0154			
总和	44.62	28				

注：**表示差异极显著（$P<0.01$）；*表示差异显著（$P<0.05$）；ns表示差异不显著（$P>0.05$）。

2.3.3　响应曲面分析　三维响应曲面能直观反映不同变量间的交互作用对多糖得率的影响。当响应曲面呈现扭曲或倾斜的形态时，表明两因素之间存在显著的交互效应[11]。本研究结果显示，AC、BC、BD 和 CD 两两之间的交互作用对得率影响达到极显著（$P<0.01$）水平（图 3b、图 3d、图 3e、图 3f）；AD 之间的交互效应均达到显著（$P<0.05$）水平（图 3c）；而 AB 之间的交互效应对得率的影响不显著。根据曲面曲率分析，各交互项对多糖得率的影响强度依次为：BD>BC>AC>CD>AD>AB，该排序结果与方差分析一致。

2.3.4　最佳提取工艺验证　基于响应面模型的预测优化，星油藤种子多糖的最佳提取工艺参数为：液料比 50.34∶1、含水量 39.51%、超声温度 61.67 ℃、超声时间 71.49 min，该条件下得率预测值为 13.44%。考虑到实际操作的可行性，将上述参数调整为液料比 50∶1、含水量 40%、超声温度 62 ℃、超声时间 71 min，在该条件下重新进行 3 次独立验证实验，测得多糖得率为 13.67%±0.76%，与预测值接近，相对



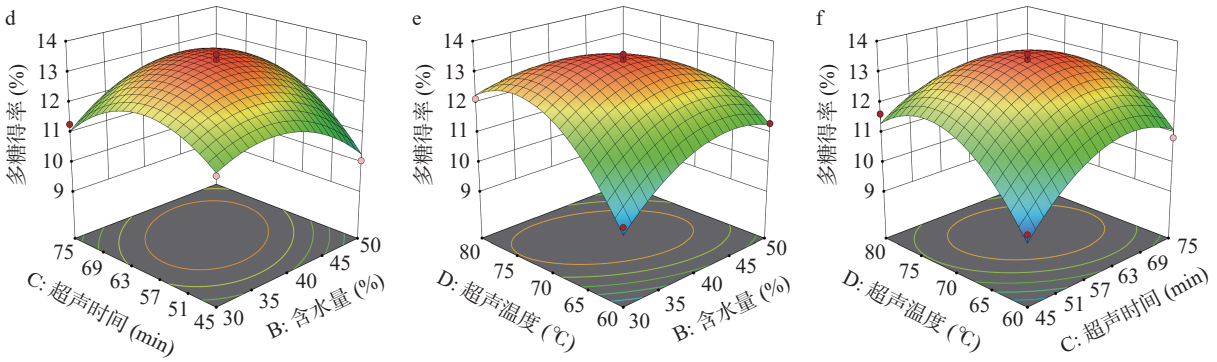


图 3　两因素交互作用对多糖得率的影响

Fig.3　Effects of two-factor interactions on polysaccharide yield

误差为 1.68%, 表明所建模型具有较高的预测准确性和良好的重复性。

2.4　星油藤种子多糖分离纯化

如图 4 所示, 星油藤种子多糖经 DEAE-52 纤维素柱层析分离后, 获得两个主要洗脱组分, 分别为超纯水洗脱的 PVP-1 和 0.3 mol/L NaCl 溶液洗脱的 PVP-2。综合考虑洗脱峰形态及产率等关键指标, PVP-1 组分存在明显的洗脱峰拖尾现象, 且产率相对较低; 而 PVP-2 组分洗脱峰分布集中、峰形对称, 具备更优的分离特性, 因此本研究选取 PVP-2 组分用于后续的实验研究。将 PVP-2 组分对应的洗脱液收集合并, 经浓缩、透析去除 DES 及冷冻干燥处理后, 进行化学成分分析。结果显示, PVP-2 中总糖含量高达 99.6%, 糖醛酸含量为 37.2%, 蛋白质含量仅为 0.18%, 表明该组分具有极高的纯度, 可满足后续深入研究的需求。

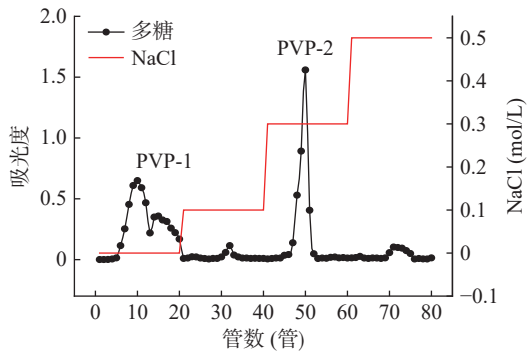


图 4　多糖 DEAE-52 洗脱曲线

Fig.4　Elution curve of polysaccharide by DEAE-52 cellulose

2.5　FTIR 分析

图 5 为星油藤种子多糖组分 PVP-2 的红外光谱分析结果。在 3398 cm^{-1} 波数附近处观察到一强而宽的吸收峰, 归属于 PVP-2 分子中的 O–H 的伸缩振动[15]; 2928 cm^{-1} 附近的弱吸收峰归于 C–H 的伸缩振动, 是多糖的特征峰之一[27]。1631 cm^{-1} 处出现的吸收带为 C=O 基团的不对称伸缩振动, 提示该多糖存在糖醛酸结构单元, 这与刘秋叶等[33] 的研究结果相似, 1125 cm^{-1} 处的吸收峰则归因于糖环中 C–O–C 键的非对称伸缩振动, 参照 Wang 等[34] 的研究结果, 这说明 PVP-2 中可能存在吡喃糖环。这些吸收峰证实 PVP-2 是一种含有羟基、羰基、吡喃糖环等典型多糖特征的物质。

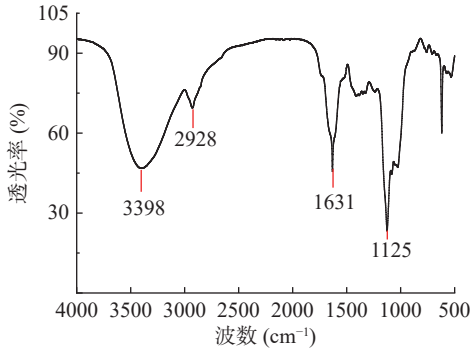


图 5　PVP-2 红外光谱分析

Fig.5　Infrared spectral analysis of PVP-2

2.6　分子量分布

图 6 为 PVP-2 的分子量分布测定色谱图, 其中蓝色实线代表示差检测器(RI)信号, 红色实线为多角度激光光散射检测器(MALLS)信号。示差信号呈现较为对称的单峰, 表明该样品为纯度较高的单一多糖组分。由多角度激光检测器计算, 其重均分子量 Mw 为 9.453×10^5 Da, 数均分子量 Mn 为 5.703×10^5 Da, 分子量分布宽度(Mw/Mn)为 1.658, 该值小于 2, 说明 PVP-2 分子量分布较窄, 均一性良好[35]。

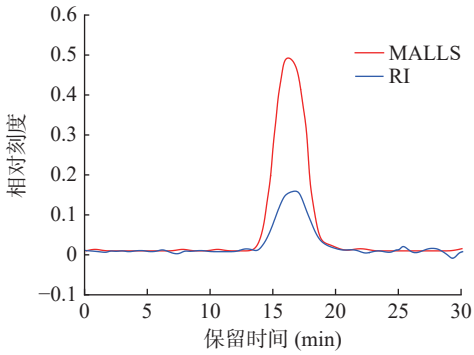


图 6　PVP-2 的 HPSEC-MALLS-RI 色谱图

Fig.6　HPSEC-MALLS-RI chromatogram of PVP-2

2.7　单糖组成

图 7 为 PVP-2 与标准品的 GC 谱图。从图 7 可

以看出，PVP-2 主要由鼠李糖(Rha)、阿拉伯糖(Ara)、木糖(Xyl)、半乳糖醛酸(GalA)、葡萄糖(Glc)和半乳糖(Gal)组成，其摩尔分数分别为 8.76%、16.45%、12.34%、38.42%、5.68% 和 18.35%。其中，半乳糖醛酸含量较高，该结果与 FTIR 谱图中 1631 cm^{-1} 处羧基特征吸收峰的结论相一致，表明 PVP-2 是一种酸性杂多糖。

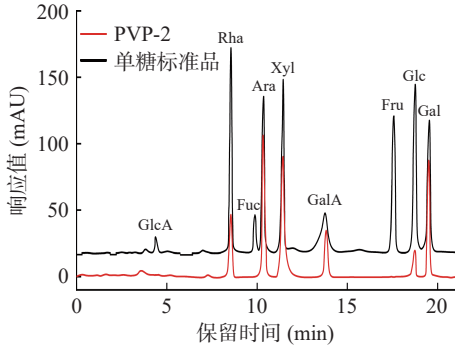


图 7　PVP-2 单糖组成分析

Fig.7　Analysis of monosaccharide composition of PVP-2

2.8　降血糖活性

2.8.1　*α*-葡萄糖苷酶抑制率　*α*-葡萄糖苷酶是分布于小肠刷状缘的关键碳水化合物消化酶，其活性直接影响膳食多糖分解为可吸收单糖的速率[36]。因此，通过抑制 *α*-葡萄糖苷酶活性以减缓葡萄糖的释放与吸收，已成为控制餐后血糖的有效策略[37]。本实验结果如图 8 所示，在 0.25~2.5 mg/mL 浓度范围内，PVP-2 的抑制效应呈现浓度依赖性，在浓度为 0.25 mg/mL 时，抑制率为 19.49%，当浓度增加到 2.5 mg/mL 时，抑制率可达 75.96%。采用 Logistic 方程对剂量-效应曲线进行非线性拟合，得其半抑制浓度(IC_{50})值为 0.51±0.03 mg/mL，这表明 PVP-2 具备较强的 *α*-葡萄糖苷酶抑制能力。其作用机制可能源于 PVP-2 结构中的活性片段能够与 *α*-葡萄糖苷酶的活性中心结合，从而竞争性阻断酶与底物的相互作用。虽然在本实验浓度下，PVP-2 的抑制效果仍低于临床药物阿卡波糖，但其活性优于多种已报道的天然多糖，如车前子多糖(IC_{50}=1.12 mg/mL)[38] 与陈皮多糖(IC_{50}=2.19 mg/mL)[39]。

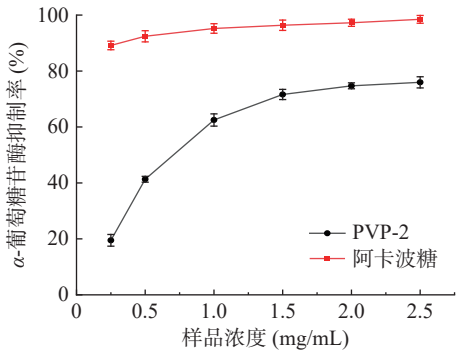


图 8　PVP-2 对 *α*-葡萄糖苷酶的抑制率

Fig.8　Inhibitory effects of PVP-2 on *α*-glucosidase

2.8.2　*α*-淀粉酶抑制率　*α*-淀粉酶是人体内一种关键的消化酶，能使摄入的碳水化合物中的 *α*-1,4 糖苷键水解并生成葡萄糖，通过抑制 *α*-淀粉酶的活性，可以减少机体摄入葡萄糖，从而达到降低血糖的效果[27]。本研究进一步评估了 PVP-2 对 *α*-淀粉酶的抑制潜力，结果如图 9 所示，在 0.25~2.5 mg/mL 浓度范围内，PVP-2 对 *α*-淀粉酶表现出浓度依赖性抑制效应，在最高测试浓度 2.5 mg/mL 时，抑制率达到 81.78%，经拟合计算得到其半抑制浓度(IC_{50})为 0.81±0.06 mg/mL，表明 PVP-2 也具有较好的 *α*-淀粉酶抑制活性。尽管其抑制强度低于活性较强的车前子多糖(IC_{50}=0.22 mg/mL)[38]，但显著优于陈皮多糖(IC_{50}=2.59 mg/mL)[39]。综合来看，PVP-2 在 *α*-葡萄糖苷酶与 *α*-淀粉酶抑制模型中均表现出良好活性，揭示其具备作为双重抑制剂用于血糖调控的潜在价值。

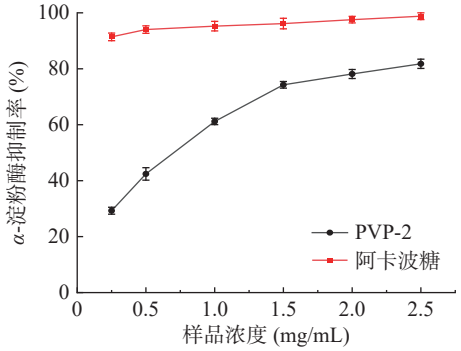


图 9　PVP-2 对 *α*-淀粉酶的抑制率

Fig.9　Inhibitory effects of PVP-2 on *α*-amylase

3　结论

本研究通过单因素和响应面法优化，确定了 UAE-DES 提取星油藤种子多糖的最佳工艺参数，以氯化胆碱和尿素(摩尔比 1∶2)制备的 DES 为提取溶剂，液料比 50∶1 mL/g、含水量 40%、超声温度 62 ℃、超声时间 71 min，在此条件下，星油藤种子多糖的得率为 13.67%±0.76%。经纤维素柱分离纯化后，获得均一组分 PVP-2，红外光谱显示其在多个波数位置具有典型的多糖特征吸收峰，分子量分析表明其重均分子量 Mw 为 9.453×10^5 Da，数均分子量 Mn 为 5.703×10^5 Da，分子量分布宽度(Mw/Mn)为 1.658，显示 PVP-2 良好的均一性。单糖组成分析表明 PVP-2 是由鼠李糖、阿拉伯糖、木糖、半乳糖醛酸、葡萄糖和半乳糖组成的酸性杂多糖。体外降血糖活性研究表明，PVP-2 对 *α*-葡萄糖苷酶和 *α*-淀粉酶的抑制率均表现出浓度依赖性抑制效应，在 2.5 mg/mL 时抑制率分别达到最高的 75.96% 和 81.78%，IC_{50} 分别为 0.51±0.03 mg/mL 和 0.81±0.06 mg/mL，与文献报道的车前子多糖和陈皮多糖相比，PVP-2 展现出均衡且显著的双酶抑制能力，表明其作为天然降血糖剂的独特潜力。

本研究首次将 UAE-DES 法用于星油藤种子多糖的绿色高效提取，成功分离获得均一组分 PVP-2，

并证实其体外显著的降血糖活性，为星油藤资源的高附加值开发提供了理论依据和技术支撑。然而，PVP-2 的精确构效关系、体内降血糖效果及具体作用机制尚待深入阐明。本课题组后续工作将聚焦于其精细结构解析、体内药效学验证及分子作用通路的进一步探索。

© 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] TIAN W, XIAO N, YANG Y, et al. Structure, antioxidant and immunomodulatory activity of a polysaccharide extracted from *Sacha inchi* seeds[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 162: 116−126.

[2] JIAPONG S, BUALEONG T, CHITTRAKORN S, et al. Optimized protein isolation from industrial *Sacha inchi* seed meal via alkaline extraction: Functional and nutritional characterization[J]. Journal of Agriculture and Food Research, 2025, 23: 102250.

[3] WENCHIEN L, CHIENSHAN C, YUNGJIA C, et al. New perspectives on different *Sacha inchi* seed oil extractions and its applications in the food and cosmetic industries[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 65(3): 11−19.

[4] KANNIKA K, YAOWAPA L, KANITHAPORN V, et al. Metabolite–flavor profile, phenolic content, and antioxidant activity changes in *Sacha inchi* (*Plukenetia volubilis* L.) seeds during germination[J]. Foods, 2021, 10(10): 2476−2476.

[5] MHD RODZI NAR, LEE LK. Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Recent insight on phytochemistry, pharmacology, organoleptic[J]. Safety and Toxicity Perspectives, 2022, 8(9): e10572.

[6] WANG S, ZHU F, KAKUDA Y. Sacha Inchi (*Plukenetia volubilis* L.): Nutritional composition, biological activity, and uses[J]. Food Chem, 2018, 265: 316−328.

[7] 康桥, 孙越, 刘梦瑶, 等. 金铃子果皮多糖超声辅助提取工艺优化及其抗氧化和降糖活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(21): 164−173. [KANG Q, SUN Y, LIU M Y, et al. Optimization of the ultrasonic-assisted extraction process of polysaccharides from the peels of wild bitter melon (*Momordica charantia* Linn. Var. Abbreviata Ser.) and a preliminary study on their antioxidant and hypoglycemic activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(21): 164−173.]

[8] 曹田欣, 闫小娟, 张海悦. 乌梅多糖提取工艺、理化性质及其体外功能活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(24): 101−110. [CAO T X, YAN X J, ZHANG H Y. Extraction process, physicochemical properties, and *in vitro* functional activity of polysaccharide from *Fructus mume*[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 101−110.]

[9] LIU J, GUO Y, SUN J, et al. Extraction methods, multiple biological activities, and related mechanisms of *Momordica charantia* polysaccharide: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 263(P2): 130473.

[10] 王歆彤, 李朋月, 吴兰芳, 等. 知母多糖复合酶提取工艺优化及其免疫活性[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 218−227. [WANG Y T, LI P Y, WU L F, et al. Optimization of multi-enzymatic extraction of polysaccharide from *Anemarrhena asphodeloides* Bunge and its immunomodulatory activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 218−227.]

[11] WEN Y, CHEN G P, ZHANG X B. Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction, characterization, and biological studies of polysaccharide from seeds of *Toona sinensis*[J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(5): 3255−3265.

[12] WANG D Y, ZHANG M, LAW C L, et al. Natural deep eutectic solvents for the extraction of lentinan from shiitake mushroom: COSMO-RS screening and ANN-GA optimizing conditions[J]. Food Chemistry, 2024, 430: 136990.

[13] ZHOU B F, JIANG J M, HUO Y, et al. Extraction of *Chlorella* polysaccharide using natural deep eutectic solvent[J]. Algal Research, 2025, 90104260−104260.

[14] LUO L R, FAN W, QIN J P, et al. Study on process optimization and antioxidant activity of polysaccharide from *Bletilla striata* extracted via deep eutectic solvents[J]. Molecules, 2023, 28(14): 5538.

[15] ZHAI X N, ZHANG W D, PEI H S, et al. Structure and physicochemical properties of polysaccharides from *Poria cocos* extracted by deep eutectic solvent[J]. Glycoconj J, 2022, 39(4): 475−486.

[16] SUN C Q, WANG G D, Sun J, et al. A new method of extracting *Polygonatum sibiricum* polysaccharide with antioxidant function: Ultrasound-assisted extraction-deep eutectic solvents method[J]. Foods, 2023, 12(18): 3438.

[17] YAN K, LIU X L, LI L, et al. Ultrasound-assisted deep eutectic solvents extraction of polysaccharides from loquat leaf: Process optimization and bioactivity study[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 274(P1): 133308.

[18] 刘金铭, 王辉, 张欢, 等. 超声辅助低共熔溶剂萃取法在活性成分提取与食品分析预处理中应用的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(7): 399−407. [LIU J M, WANG H, ZHANG H, et al. Research progress on extraction of active ingredients and pretreatment of food analysis by ultrasound-assisted deep eutectic solvent method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(7): 399−407.]

[19] LOPEZ CORTES JV, ACIN MARTINEZ S, MONTOYA G, et al. Cecropia angustifolia pentacyclic triterpene acids and *Sacha inchi* oil improve carbohydrate metabolism and inflammation in prediabetic mice[J]. Adv Pharmacol Pharm Sci, 2025, 2025: 4687213.

[20] ZHANG A Y, WANG K, LIU X F, et al. Isolation and identification of dipeptidyl peptidase-IV inhibitory peptides from *Sacha inchi* meal[J]. J Sci Food Agric, 2023, 103(6): 2926−2938.

[21] LIU Y W, WU Y J, LIU J M, et al. Deep eutectic solvents: Recent advances in fabrication approaches and pharmaceutical applications.[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2022, 622: 121811.

[22] ZHANG W, WU J, WENG L, et al. An improved phenol-sulfuric acid method for the determination of carbohydrates in the presence of persulfate[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 227: 115332.

[23] 潘章超, 张人谕, 黎欢昶, 等. 暗褐脉柄牛肝菌子实体多糖的分离纯化、结构表征及体外降血糖活性[J]. 食品科学, 2024, 45(8): 55−62. [PAN Z C, ZHANG R Y, LI H C, et al. Extraction, purification, characterization and *in vitro* hypoglycemic activity of polysaccharides from fruiting body of *Phlebopus portentosus*[J]. Food Science, 2024, 45(8): 55−62.]

[24] YANG T, ZHANG S P, WANG R F, et al. Polysaccharides from *Rhizoma panacis* Majoris and its anti-oxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 756−

763.
［25］ 田艳花, 杨兆艳, 罗爱国, 等. 微波辅助双水相提取百合多糖的工艺优化及其结构表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(21): 227−233. ［TIAN Y H, YANG Z Y, LUO A G, et al. Process optimization and structural characterization of microwave-assisted dual-aqueous phase extraction of lily polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(21): 227−233. ］
［26］ CHEN J X, ZHOU M, LIU M, et al. Physicochemical, rheological properties and *in vitro* hypoglycemic activities of polysaccharide fractions from peach gum[J]. Carbohydr Polym, 2022, 296: 119954.
［27］ YANG K, JIN Y Z, CAI M, et al. Separation, characterization and hypoglycemic activity *in vitro* evaluation of a low molecular weight heteropolysaccharide from the fruiting body of *Phellinus pini*[J]. Food Funct, 2021, 12(8): 3493−3503.
［28］ 陈梦星, 王涛, 赵金, 等. 天然低共熔溶剂高效提取金耳多糖的研究[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(9): 52−57. ［CHEN M X, WANG T, ZHAO J, et al. Optimization of extraction of *Tremella aurantialba* polysaccharides using natural deep eutectic solvents[J]. China Food Additives, 2024, 35(9): 52−57. ］
［29］ WEI Q, ZHANG Y H. Ultrasound-assisted polysaccharide extraction from *Cercis chinensis* and properites, antioxidant activity of polysaccharide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106422.
［30］ 白冰瑶, 李泉岑, 马欣悦, 等. 响应面法优化超声辅助低共熔溶剂提取红枣多糖工艺[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(18): 122−129. ［BAI B Y, LI Q C, MA X Y, et al. Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction of polysaccharides from jujube[J]. Food Research and Development, 2022, 43(18): 122−129. ］
［31］ ZHANG W C, ZOU F Y, ZOU Y, et al. Ultrasonic-assisted extraction of polysaccharide from *Paeoniae radix* Alba: Extraction optimization, structural characterization and antioxidant mechanism *in vitro*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 268: 131816.
［32］ 何仙玉, 李镕基, 李小艳, 等. 氯化胆碱/乳酸/愈创木酚三元共熔溶剂提取灵芝多糖的工艺及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2024, 45(14): 34−41. ［HE X Y, LI R J, LI X Y, et al. *Ganoderma lucidum* polysaccharides extraction by choline chloride/lactic acid/guaiacol ternary deep eutectic solvent and its antioxidant activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(14): 34−41. ］
［33］ 刘秋叶, 刘辉, 陈鑫, 等. 布渣叶多糖的提取工艺优化及生物活性分析[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 197−204. ［LIU Q Y, LIU H, CHEN X, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction of polysaccharides from *Agaricus blazei* by response surface methodology and its *in vitro* antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 197−204. ］
［34］ WANG W W, PENG B, YANG C X, et al. Structural characteristics and biological activities of six polysaccharides purified from the rhizomes of *Alisma plantago-aquatica*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 318(Pt 1): 144959.
［35］ HONG M, LIU W, LIU Y G, et al. Improved characterization on molecular weight of polyamic acids using gel permeation chromatography coupled with differential refractive index and multi-angle laser light scattering detectors[J]. Polymer, 2022, 260: 125370.
［36］ GUO W, ZHANG J, DENG H, et al. Structural characterization and anti-hyperuricemic effect of a mannogalactan from *Armillariella tabescens mycelium*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 283(Pt 1): 137152.
［37］ 郅丽超, 张琳依, 梁馨元, 等. 天然活性成分对 α-葡萄糖苷酶抑制作用的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(6): 2276−2282. ［ZHI L C, ZHANG L Y, LIANG X Y, et al. Research progress on the inhibitory effect of natural active ingredients on α-glucosidase[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(6): 2276−2282. ］
［38］ WEN Y, CHEN G, HU L. Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction, characterization, and bioactivities of polysaccharide from Plantaginis Semen[J]. Prep Biochem Biotechnol, 2022, 55(4): 434−445.
［39］ WEN Y, CHEN J. Optimization of ultrasound-assisted deep eutectic solvent extraction, characterization, and bioactivities of polysaccharide from *Pericarpium citri* Reticulatae[J]. Appl Biochem Biotechnol, 2024, 196(12): 8700−8723.