吴欢琪, 周思怡, 周洋漾, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取苦竹笋多糖及其体外活性分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(8): 250−262. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040022

WU Huanqi, ZHOU Siyi, ZHOU Yangyang, et al. Ultrasound-assisted Deep Eutectic Solvent Extraction and *in Vitro* Bioactivity Evaluation of Polysaccharides from *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. Shoots[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(8): 250−262. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040022

·工艺技术·

超声辅助低共熔溶剂提取苦竹笋多糖及其体外活性分析

吴欢琪, 周思怡, 周洋漾, 陈明睿, 张壹钦*, 秦　文*

（四川农业大学食品学院, 四川雅安 625014）

摘　要: 本研究建立了一种超声辅助低共熔溶剂（deep eutectic solvent，DES）提取苦竹笋多糖的优化工艺，并对其结构特征和体外生物活性进行了系统评价。结果表明，以氯化胆碱-乳酸（摩尔比 1∶3）为 DES 体系，在液料比 30∶1 mL/g、超声时间 40 min、超声功率 75 W、温度 40 ℃ 的水浴条件下，苦竹笋多糖得率为 12.73%。结构表征结果显示，苦竹笋多糖的重均分子量为 381.52 kDa，主要单糖组成有阿拉伯糖、半乳糖和葡萄糖等；其分子结构具有典型的多糖官能团，并呈现非晶态、蜂窝状多孔形貌。体外活性实验结果表明，苦竹笋多糖具有优异的抗氧化能力，其半抑制浓度（IC_{50}）分别为 0.51 mg/mL（DPPH 自由基清除能力）、1.80 mg/mL（$ABTS^+$自由基清除能力）以及 0.86 mg/mL（铁离子还原能力）。苦竹笋多糖在一定程度上具有降血脂和降血糖的潜力，2 mg/mL 浓度时对 α-淀粉酶的抑制率为 36.6%；3 mg/mL 苦竹笋多糖与牛磺胆酸钠和甘氨胆酸钠的结合率分别为 52.10% 和 46.18%。此外，苦竹笋多糖对枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌具有抑制作用，抑菌圈直径超过 10 mm。本研究为苦竹笋多糖的提取工艺优化及功能活性开发提供了理论依据。

关键词: 苦竹笋多糖, 超声辅助提取, 低共熔溶剂, 抗氧化, 降血脂, 抑菌

中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)08−0250−13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040022　　本文网刊:

Ultrasound-assisted Deep Eutectic Solvent Extraction and *in Vitro* Bioactivity Evaluation of Polysaccharides from *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. Shoots

WU Huanqi, ZHOU Siyi, ZHOU Yangyang, CHEN Mingrui, ZHANG Yiqin*, QIN Wen*

（College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China）

Abstract: This study established an optimized ultrasound-assisted deep eutectic solvent (DES) extraction method for polysaccharides from *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. shoots and systematically evaluated their structural characteristics and *in vitro* bioactivities. Using a choline chloride-lactic acid DES system (molar ratio 1∶3) under optimized conditions (liquid-solid ratio 30∶1 mL/g, ultrasound time 40 min, power 75 W, temperature 40 ℃), a polysaccharide yield of 12.73% was achieved. Structural characterization indicated the extracted polysaccharides had a weight-average molecular weight of 381.52 kDa, composed primarily of arabinose, galactose and glucose, with characteristic polysaccharide functional groups and an amorphous, honeycomb-like porous morphology. *In vitro* bioactivity assays demonstrated that the polysaccharides from bitter bamboo shoots possess excellent antioxidant capacity, with IC_{50} values of 0.51 mg/mL (DPPH radical scavenging capacity), 1.80 mg/mL ($ABTS^+$ radical scavenging capacity), and 0.86 mg/mL (ferric reducing

收稿日期: 2025−04−03

基金项目: 雅安市科学技术局市校合作项目（24CGZH0020）。

作者简介: 吴欢琪（1998−）, 女, 博士研究生, 研究方向: 果蔬采后生物学与天然产物研究, E-mail: wuhuanqi2023@163.com。

*** 通信作者:** 张壹钦（1996−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 采后果蔬生理与衰老生物学机制, E-mail: scyszyq@163.com。

秦文（1967−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 果蔬采后生理及贮藏保鲜技术, E-mail: qinwen@sicau.edu.cn。

antioxidant power). The polysaccharides also exhibited potential for lowering blood lipids and blood glucose. At a concentration of 2 mg/mL, the α-amylase inhibition rate was 36.6%. And at 3 mg/mL, the binding rates of bitter bamboo shoot polysaccharides to sodium taurocholate and sodium glycocholate were 52.10% and 46.18%, respectively. Furthermore, the polysaccharides showed inhibitory effects against *Bacillus subtilis*, *Escherichia coli*, and *Staphylococcus aureus*, with inhibition zone diameters exceeding 10 mm. This study provides theoretical foundations for optimizing extraction and developing functional applications of *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. shoot polysaccharides.

Key words: bamboo shoot polysaccharides; ultrasound-assisted extraction; deep eutectic solvents; antioxidant activity; hypolipidemic activity; antimicrobial activity

苦竹(*Pleioblastus amarus*（Keng）Keng f.)嫩芽即竹笋，是一种可食的天然林业蔬菜，主要生长在我国长江以南地区，富含膳食纤维、蛋白质、氨基酸等多种营养素，深受广大消费者的喜爱[1]。苦竹笋富含多种生物活性成分，如多糖[2]、酚类[3]、黄酮类化合物[4]和生物碱等[5]，具有抑菌、抗炎、抗氧化、降血糖和疾病预防等作用，适量食用苦竹笋可提供人体所需的各类营养成分，有益健康[6]。其中，多糖类大分子物质在苦竹笋中占据十分重要的位置，具有显著的生物活性功能[7]。研究表明，多糖可以清除活性氧自由基，平衡肠道有益微生物菌群，调控脂质代谢和干预炎症信号等[8−9]。同时，多糖在调节血糖水平方面也显示出与二甲双胍相当的效果，有助于糖尿病症状控制[10]。此外，多种植物源多糖对常见致病菌(如大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、铜绿假单胞菌、枯草芽孢杆菌及鼠伤寒沙门氏菌等)均表现出显著的抗菌活性[11−13]。总体而言，多糖在多个领域展现出卓越的生物活性，有望成为天然抗氧化剂、抗菌剂和营养补剂的重要来源。

近年来，低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DESs)在植物源多糖提取上被广泛研究和应用，如海带、木耳、葛根、中草药中多糖的提取[14]。DES 作为一类新型绿色溶剂，具有价格低、可生物降解、蒸气压低、无毒且易于合成等优点[15]。与其他方法相比，DES 提取多糖能显著提升多糖的产量、纯度和生物活性，表现出显著优势[16]。例如，从油茶果壳[17]和枇杷叶[18]中提取多糖时，DES 在提高多糖得率的同时，也相应增强其抗氧化活性与多糖纯度，这表明 DES 在多糖提取中的高效性和功能性，具有广阔的应用前景。DES 通常由氢键供体(hydrogen bond donor, HBD)和氢键受体(hydrogen bond acceptor, HBA)相互作用形成一种共熔混合物，其熔点低于各单独组分[19]。此外，DES 允许精确调整 HBD 和 HBA 比例，以满足特定的提取要求[20]。另一方面，超声提取法利用高频率的声波产生空化和扰动效应，以此提高物质传递的效率，也因其操作简单、周期短、成本低及稳定性好而被广泛应用于提取植物多糖[21]。

目前，对提取苦竹笋中活性成分及其应用的研究相对较少。本研究选取苦竹笋为研究对象，采用超声辅助低共熔溶剂法提取苦竹笋中多糖成分，并对提取产物进行结构表征，分析其体外抗氧化、降血脂、降血糖以及抗菌活性，旨在为苦竹笋的高附加值应用和开发功能食品提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

苦竹笋　采集自四川省雅安市；氯化胆碱、甘油　分析纯，北京酷来搏科技有限公司；乙二醇　分析纯，成都市科隆化学品有限公司；乳酸　分析纯，成都金山化学试剂有限公司；1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)　分析纯，北京索莱宝科技有限公司；2,2′-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐(2,2'-azino-bis(3-ethylbenzthiazoline-6-sulphonate), ABTS)　分析纯，北京博奥拓达科技有限公司；牛磺胆酸钠、甘氨胆酸钠、α-淀粉酶(50 U/mg)、α-葡萄糖苷酶(50 U/mg)、对硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷(PNPG)　色谱纯，上海源叶生物科技有限公司。

DHG-9245A 电热鼓风干燥箱　上海一恒科技有限公司；PL-S80T 超声波清洗机　东莞康士洁超声波科技有限公司；TGL16M 离心机　长沙湘智离心机仪器有限公司；Varioskan Flash 多功能酶标仪、Nicolet iS20 傅立叶红外光谱仪、超高效液相色谱 Thermo ICS 5000+离子色谱系统配备 Dionex™ CarboPac™ PA20(150×3.0 mm, 10 μm)色谱柱、凝胶色谱-示差-多角度激光光散射系统、U3000 液相系统　美国赛默飞公司；Gemini SEM 300 扫描电子显微镜　德国卡尔蔡司股份公司；Ultima IV-X 射线衍射仪　日本 Rigaku 公司；UV-3600i Plus 紫外可见近红外分光光度计　日本岛津公司；Optilab T-rEX 示差检测器、DAWN HELEOS Ⅱ激光光散射检测器　美国怀雅特技术公司。

1.2　实验方法

1.2.1　竹笋预处理　苦竹笋去壳洗净，切片后置于 50 ℃ 烘箱中 24 h，烘干后使用高速粉碎机将其粉碎，过 60 目筛后保存备用。

1.2.2　制备低共熔溶剂(DES)　参考韩益等[22]方法配制不同 HBD 的 DES 体系(表 1)，在磁力搅拌器 80 ℃ 恒温条件下搅拌，直至形成均匀稳定、透明、无气泡的 DES 体系[20]。在 DES 体系中加入超纯水使其含水量为 30%，冷却至室温后转移至密封试剂瓶中，在(4±1) ℃ 条件下冷藏备用。

表 1 低共熔溶剂的配比与种类

Table 1 Proportions and types of deep eutectic solvents

序号	简称	氢键受体	氢键供体	摩尔比	DES含水量(%)
1	DES-1	氯化胆碱	乙二醇	1∶2	30
2	DES-2	氯化胆碱	甘油	1∶2	30
3	DES-3	氯化胆碱	乳酸	1∶2	30

1.2.3 葡萄糖标准曲线的绘制 采用苯酚-硫酸法[23]测定多糖含量。准确称取 25 mg 葡萄糖标准品定容至 25 mL 刻度线, 即得 1 mg/mL 的葡萄糖水溶液, 配制 0.05~0.60 mg/mL 葡萄糖梯度溶液。分别取不同浓度葡萄糖溶液 100 μL 至 2 mL 离心管中, 依次加入 6% 苯酚溶液 100 μL 和浓硫酸 500 μL。混匀后室温条件下反应 30 min, 490 nm 处测定吸光度。以葡萄糖质量浓度(mg/mL)为横坐标, 吸光度(A)为纵坐标, 拟合标准曲线方程为 y=5.5745x±0.2114 (R^2=0.990)。

1.2.4 单因素实验

1.2.4.1 低共熔溶剂的选择 取 2 g 苦竹笋粉末, 按照 HBA: HBD 摩尔比 1∶2、液料比 20∶1 mL/g 的比例加入不同 HBD 的 DES 体系(乙二醇、甘油、乳酸), 充分混匀后在75 W、40 ℃ 水浴条件下超声 40 min, 以 8000 r/min离心 10 min, 收集上清液。边搅拌边在上清液中缓慢加入 4 倍体积的无水乙醇, 充分混合均匀, (4±1)℃ 醇沉过夜后以 8000 r/min 离心 10 min, 收集沉淀物, 无水乙醇洗涤沉淀物两次, 收集沉淀物溶解后加入氯仿∶正丁醇=4∶1(v/v)除蛋白, 透析 48 h 后浓缩、烘干样品, 获得苦竹笋粗多糖。加水溶解粗多糖并定容至 50 mL 刻度线, 苯酚-硫酸法处理后于 490 nm 处测定吸光度, 计算所得多糖浓度与得率。

1.2.4.2 摩尔比对多糖得率的影响 取 2 g 苦竹笋粉末, 分别加入氯化胆碱与乳酸摩尔比为 1∶1、1∶2、1∶3、1∶4 的 DES 体系, 参照 1.2.4.1 中提取步骤, 计算多糖得率。

1.2.4.3 液料比对多糖得率的影响 取 2 g 苦竹笋粉末, 按照最优摩尔比, 加入液料比分别为 10∶1、20∶1、30∶1、40∶1 mL/g 的 DES 体系, 重复 1.2.4.1 中提取步骤, 计算多糖得率。

1.2.4.4 超声时间对多糖得率的影响 取 2 g 苦竹笋粉末, 按最优液料比和摩尔比加入 DES 体系, 40 ℃ 条件下分别超声 20、30、40、50、60 min, 随后以 8000 r/min 离心 10 min, 收集上清液。重复 1.2.4.1 中步骤并计算多糖得率。

1.2.5 响应面法优化试验与多糖得率计算

1.2.5.1 响应面试验设计 基于单因素实验结果, 以摩尔比(A)(1∶2、1∶3、1∶4)、液料比(B)(20∶1、30∶1、40∶1 mL/g)和超声时间(C)(30、40、50 min)作为影响因素, 以多糖得率为响应值, 设计三因素三水平的响应面试验(表 2)。

表 2 响应面法因素水平

Table 2 Design of response surface parameters and levels

水平	影响因素		
	A: 摩尔比	B: 液料比(mL/g)	C: 超声时间(min)
−1	1∶2	20∶1	30
0	1∶3	30∶1	40
1	1∶4	40∶1	50

1.2.5.2 多糖得率的计算 吸取 100 μL 配制好的多糖样品液于 2 mL 离心管中, 依次加入 6% 苯酚溶液 100 μL, 浓硫酸 500 μL, 混匀后 25 ℃ 条件下反应 30 min, 于 490 nm 处测定吸光度。根据葡萄糖标准溶液的线性回归方程计算苦竹笋多糖浓度。根据刘靖洁等[24] 的方法稍作修改, 多糖得率计算公式如下:

$$Y(\%) = \frac{C \times N \times V}{m \times 1000} \times 100 \qquad 式(1)$$

式中: Y 表示多糖得率, %; C 表示提取液中多糖浓度, mg/mL; V 表示多糖提取液体积, mL; N 表示稀释系数; m 表示苦竹笋粉末质量, g。

1.2.6 结构表征

1.2.6.1 紫外可见光谱分析 配制 0.4 mg/mL 的苦竹笋多糖液, 利用紫外分光光度计在 200~400 nm 范围内扫描, 检测 260 nm 处的核酸吸光度和 280 nm 处的蛋白质吸光度, 扫描间距 1 nm。

1.2.6.2 分子量检测 参考 Wang 等[25] 方法稍作修改, 将多糖样品溶于含 0.02%(w/w)NaN_3 抑菌剂的 0.1 mol/L $NaNO_3$ 水溶液中, 配制成 1 mg/mL 的溶液, 经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 进行仪器分析。具体色谱柱及洗脱条件: 采用凝胶排阻色谱柱 Ohpak SB-805 HQ(300×8 mm)和 Ohpak SB-803 HQ(300×8 mm)串联。柱温 45 ℃, 进样量 100 μL, 流动相 A (0.02% NaN_3, 0.1 mol/L $NaNO_3$), 流速 0.6 mL/min, 等度洗脱 75 min。

1.2.6.3 单糖组成的测定 参考 Xu 等[26] 方法稍作修改, 取适量多糖提取物, 加入 2 mol/L 三氟乙酸(Trifluoroacetic Acid, TFA)溶液 1 mL, 121 ℃ 加热 2 h。氮吹后加入甲醇清洗, 重复 3 次。加无菌水溶解, 待测。柱温 30 ℃; 进样量 5 μL。流动相 A(H_2O), 流动相 B(0.1 mol/L NaOH), 流动相 C(0.1 mol/L NaOH, 0.2 mol/L NaAc), 流速 0.5 mL/min; 洗脱梯度如表 3 所示。

表 3 流动相洗脱梯度

Table 3 Design of response surface parameters and levels

洗脱时间(min)	流动相比例(v/v, %)		
	流动相A	流动相B	流动相C
0	95	5	0
26	85	5	10
42	85	5	10
42.1	60	0	40
52	60	40	0
52.1	95	5	0
60	95	5	0

1.2.6.4 微观形貌分析　使用扫描电子显微镜（Scanning electron microscope, SEM）观察竹笋多糖的微观形态：将 1.2.4.1 中获得的苦竹笋多糖干燥粉末用导电胶带固定在样品台上进行喷金处理（45 s、10 mA），然后将样品放置在 SEM 观察台上观察其微观结构，加速电压 10 kV。放大倍数分别为 1000 倍、2000 倍、4000 倍和 20000 倍。

1.2.6.5 化学基团分析　采用红外光谱分析（Fourier transform infrared spectroscopy, FTIR）提取物的官能团。将 2 mg 多糖样品与 200 mg 干燥溴化钾粉末均匀混合，制成 1 mm 压片，在 4000~400 cm^{-1} 波长范围内进行红外光谱扫描[27]。

1.2.6.6 晶体结构分析　应用 X 射线衍射（X-ray diffraction, XRD）测定材料中存在的晶体相。测试靶材为铜靶，具体扫描衍射角范围为 5°~90°，扫描速度 2°/min。

1.2.7 体外抗氧化活性测定

1.2.7.1 DPPH 自由基清除率　参考隋昕怡等[28]方法稍作修改，将不同浓度的多糖样品液 200 μL 和 0.2 mmol/L DPPH 0.8 mL 混合均匀，记作 A_1；不同浓度样品液 200 μL 和无水乙醇 0.8 mL 混匀，记作 A_2；200 μL 无水乙醇和 0.2 mmol/L DPPH 0.8 mL 混合均匀，记作 A_0。在 25 ℃ 避光条件下反应 30 min，517 nm 处测定吸光度。DPPH 自由基清除率计算公式为：

$$\text{DPPH 自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_1-A_2}{A_0}\right)\times 100 \quad \text{式（2）}$$

1.2.7.2 $ABTS^+$自由基清除率　参考刘养山等[29]方法稍作修改，称取 77 mg ABTS 粉末，加入 40 g/L 的过硫酸钾溶液 330 μL，加超纯水定容至 20 mL 刻度线，避光反应 12 h，即得 ABTS 母液。将 ABTS 母液用 PBS 缓冲液（pH6.6）稀释，734 nm 处测定吸光值为 0.7±0.02 即可。吸取 50 μL 超纯水和 150 μL ABTS 稀释液混合均匀，室温避光条件下反应 10 min，734 nm 处测定吸光度，记作 A_f；A_f 中的超纯水替换为不同浓度的样品液，记作 A_i；将 A_i 中的 ABTS 稀释液用超纯水替换，记作 A_j。$ABTS^+$自由基清除率计算公式为：

$$ABTS^+\text{自由基清除率}(\%)=\left(1-\frac{A_i-A_j}{A_f}\right)\times 100 \quad \text{式（3）}$$

1.2.7.3 铁离子还原能力测定　根据胡颖等[30]方法稍作修改，取待测样品液 0.8 mL 于离心管中，依次加入 40 μL 的 2.0 mmol/L $FeCl_2$ 溶液、1.5 mL 超纯水，混合均匀，在室温下反应 3 min，再加入 80 μL 的 5.0 mmol/L 菲啰嗪，混合均匀，在 25 ℃ 下反应 10 min，562 nm 处测定吸光度。A_s 为多糖溶液的吸光值；A_b 为超纯水替代多糖溶液的吸光值；A_g 为超纯水替代 $FeCl_2$ 溶液的吸光值。铁离子还原能力计算公式为：

$$\text{铁离子还原能力}(\%)=\left(1-\frac{A_s-A_g}{A_b}\right)\times 100 \quad \text{式（4）}$$

1.2.8 胆酸盐结合能力测定　参照李成龙[31]的方法绘制胆酸盐标准曲线。用 0.1 mol/L 磷酸缓冲液（pH6.3）分别配制 1 mmol/L 牛磺胆酸钠溶液（Sodium Taurocholate, NaTC）和甘氨胆酸钠（Sodium Glycocholate, NaGC）溶液，分别取 NaTC 和 NaGC 溶液 0.1、0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mL 于离心管中，依次加入 2.5 mL 的 0.1 mol/L 磷酸缓冲液（pH6.3）和 7.5 mL 60% 硫酸溶液，混合均匀，70 ℃ 条件下水浴 30 min，冰浴 5 min，386 nm 处测定吸光度。分别以 NaTC 和 NaGC 浓度为横坐标，吸光值为纵坐标，绘制胆酸盐标准曲线。

参考杨青松等[32]方法稍作修改，取 3 mL 不同浓度样品液于离心管中，依次加入 3 mL 0.01 mol/L 的 HCl 和 1 mL 10 mg/mL 的胃蛋白酶，在 37 ℃ 恒温培养箱中充分振荡 60 min，模拟胃消化过程。加入 0.1 mol/L NaOH 调 pH 至 6.3，加入 4 mL 10 mg/L 的胰蛋白酶，在 37 ℃ 恒温培养箱中充分振荡 60 min，模拟小肠消化过程。在不同离心管中分别加入 4 mL 3 mmol/L 的 NaTC 溶液和 0.75 mmol/L 的 NaGC 溶液，振荡 60 min，以 4000 r/min 离心 20 min。取上清液，在 386 nm 处测定吸光度。胆酸盐结合率计算公式为：

$$\text{胆酸盐结合率}(\%)=\frac{C_0-C_1}{C_0}\times 100 \quad \text{式（5）}$$

式中：C_0 是胆酸盐的初始浓度，mmol/L；C_1 是上清液中胆酸盐的浓度，mmol/L。

1.2.9 体外降血糖活性分析

1.2.9.1 α-葡萄糖苷酶抑制活性分析　分别配制 0.01~2.0 mg/mL 多糖样品液，设置空白组、样品组、对照组，加入 0.5 mL 磷酸钠缓冲液和 100 μL 的 0.5 U/mL α-葡萄糖苷酶溶液，对照组不加 α-葡萄糖苷酶溶液，样品组和对照组加入不同浓度的 0.5 mL 提取物溶液，空白组不加样品液，空白组、样品组和对照组中加入 200 μL 1% 对硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷（PNPG），37 ℃ 水浴 15 min，随后加入 1 mol/L 碳酸钠溶液 1 mL，混合均匀，405 nm 处测定吸光度。α-葡萄糖苷酶抑制率公式计算如下：

$$\alpha\text{-葡萄糖苷酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_b-A_c}{A_a}\right)\times 100 \quad \text{式（6）}$$

式中：A_a 为空白组吸光度；A_b 为样品组吸光度；A_c 为对照组吸光度。

1.2.9.2 α-淀粉酶抑制活性分析　分别设置样品组、样品对照组、空白试验组和空白对照组，配制 0.01~2.0 mg/mL 提取物样品液，取 0.3 mL 样品液，依次加

入磷酸钠缓冲液(pH6.5)和 α-淀粉酶溶液各 1 mL,在 37 ℃ 水浴 10 min,加入 5% 淀粉溶液 1 mL,混匀后于 37 ℃ 水浴 10 min,加入 DNS 显色剂后沸水浴 5 min,冷却后取 100 μL 和 100 μL 超纯水混匀,540 nm 处测定吸光度,记为样品组。样品对照组和空白对照组不加 α-淀粉酶溶液,空白试验组和空白对照组不加样品溶液。α-淀粉酶抑制率计算公式如下:

$$\alpha\text{-淀粉酶抑制率}(\%)=\left(1-\frac{A_z-A_x}{A_n-A_m}\right)\times 100 \quad 式(7)$$

式中:A_z 为样品组吸光度;A_x 为样品对照组吸光度;A_n 为空白试验组吸光度;A_m 为空白对照组吸光度。

1.2.10 微生物抑制活性试验 采用纸片扩散法(Kirby-Bauer 法)研究竹笋提取物对微生物的抑制作用,将枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)、白色念珠菌(白假丝酵母)(*Candida albicans* (Robin) Berkhout)、大肠杆菌(*Escherichia coli*)和金黄色葡萄球菌(*Staphylococcus aureus*)分别在固体培养基和适宜生长温度下培养 24 h 活化,生理盐水稀释菌液使其含菌量为 10^5~10^7 CFU/mL。取 300 mg 多糖提取物,加入 4 mL 无菌水,配制为 75 mg/mL 的多糖样品液。将直径 6 mm 的空白药敏纸片灭菌后放置于菌液涂布均匀的平板中,滴加 20 μL 多糖样品液,每组设置 3 个平行。滴加无菌水作为空白对照组,分别记为 W1、W2、W3、W4。其中,枯草芽孢杆菌组分别标记为 Bs1、Bs2、Bs3;白色念珠菌(白假丝酵母)组分别标记为 Ca1、Ca2、Ca3;大肠杆菌组分别标记为 Ec1、Ec2、Ec3,金黄色葡萄球菌组分别标记为 Sa1、Sa2、Sa3。采用二倍稀释法将竹笋多糖水溶液依次稀释,制备得到 37.5、18.75 和 9.375 mg/mL 三个浓度梯度的系列样品溶液。抑菌活性实验结果表明,各浓度样品对受试菌株抑菌圈直径均小于 6 mm,未表现出明显的体外抑菌作用。

1.3 数据处理

采用 Origin 2021 软件进行试验数据处理与可视化分析,通过 Design Expert 13 软件进行响应面法试验设计与工艺参数优化。每组实验至少重复 3 次,$P<0.05$ 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 单因素实验结果

2.1.1 DES 体系的确定 不同 HBD 与氯化胆碱构成的 DES 体系对苦竹笋多糖具有不同的提取效果。如图 1A 所示,以乙二醇和乳酸为 HBD 时,多糖得率分别为 10.70%±0.33% 和 10.78%±0.32%,显著高于甘油组($P<0.05$)。可能由于乙二醇-DES 体系与竹笋多糖之间较强的氢键作用及更大的静电相互作用导致[33]。乳酸作为 HBD 时表现出优于甘油的提取效果,主要归因于其酸性溶剂体系可有效破坏细胞壁结构,且溶剂黏度适中、溶质分散均匀,促进了多糖的溶出[22]。尽管乳酸和乙二醇作为 HBD 在多糖得率上无显著差异($P>0.05$),但乳酸因其来源稳定、可生物降解、环境友好性、经济性和低毒性成为更优选择。因此,选择乳酸与氯化胆碱形成 DES 体系,并应用于后续响应面优化试验。

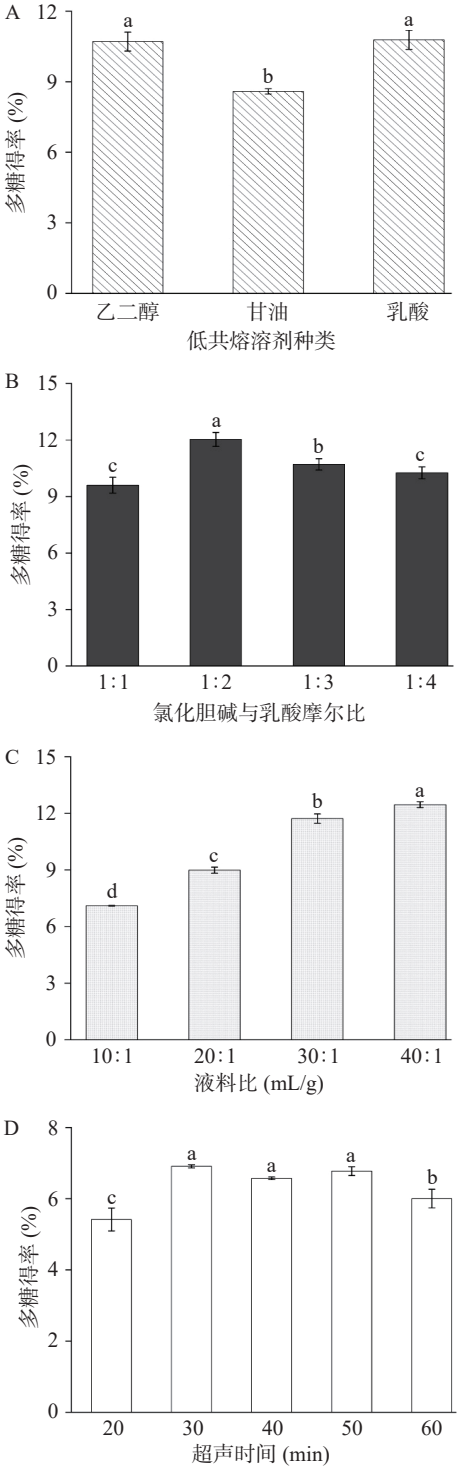


图 1 低共熔溶剂种类、摩尔比、液料比和超声时间对多糖得率的影响

Fig.1 Effects of DES type, molar ratio, liquid-to-soild ratio, and ultrasonication time on extraction yield

注:不同字母代表具有组间显著性差异,$P<0.05$。

2.1.2　摩尔比的确定　根据图 1B 可知，多糖得率会随氯化胆碱与乳酸摩尔比增大，呈先增大后减小的趋势。当 DES 体系的摩尔比为 1∶2 时，多糖得率最大为 12.03%±0.30%，较其他组具有显著性差异（$P<0.05$）。氯化胆碱与乳酸摩尔比固定时，DES 体系与多糖间的氢键作用力随 DES 含量增多而增强，导致多糖的溶出量增加[28]。当 DES 体系中 HBD 比例增加时，其黏度与表面张力逐渐降低；当乳酸含量超过一定范围后，HBD 与 HBA 两组分间相互作用力减弱，导致 DES 体系稳定性降低，故多糖得率降低[12]。因此，选择 DES 体系的摩尔比为 1∶2、1∶3、1∶4 进一步开展后续响应面优化试验。

2.1.3　液料比的确定　从图 1C 可知，随着提取液比例的增加，多糖得率逐渐上升。当液料比达到 40∶1 mL/g 时，多糖得率达到最大，为 12.46%±0.12%。多糖分子间存在较强的相互作用，当 DES 体积较小时多糖溶解不完全，导致 DES 体系对苦竹笋多糖的提取效率较低。相反，增加 DES 用量有助于多糖分子从细胞壁溶解到溶液中，多糖得率增大[34]。然而，当 DES 体积过大时，提取液中多糖被稀释，导致多糖得率降低[35]。因此，选择液料比 20∶1~40∶1 mL/g 开展后续的响应面优化试验。

2.1.4　超声时间的确定　随着超声时间的增加，苦竹笋多糖得率总体呈现先增加后减小的趋势，变化趋势如图 1D 所示。该现象可能归因于超声时间的双重影响：当超声时间过短时，竹笋细胞壁未能充分破碎，导致胞内多糖无法有效溶出。反之，超声时间过长则会引起 DES 体系中多糖的糖链降解，从而降低多糖得率[36]。在此研究基础上，选择超声时间 30、40、50 min 开展后续响应面优化试验。

2.2　响应面试验结果

2.2.1　响应面 Box-Behnken Design 设计　根据单因素实验结果，以多糖得率为响应因素，采用 Design-Expert 13 软件 Box-Benhnken 法设计三因素三水平的响应面试验，共 17 组试验，其中 5 次为中心重复试验，根据响应面试验结果确定超声辅助低共熔溶剂法提取竹笋多糖的工艺参数（表 4）。

2.2.2　回归模型及其方差分析　经 Design-Expert 13 软件，获得多糖得率对摩尔比（A）、液料比（B）、超声时间（C）的多元回归方程为：$Y=-56.0568+18.7028\times A+1.05915\times B+1.14282\times C-0.00275\times AB-0.0405\times AC+0.004075\times BC-2.854\times A^2-0.019615\times B^2-0.01404\times C^2$。从表 5 可知，$F$ 值为 16.54、P 值为 0.0006，属于极显著模型，失拟项的 P 值为 0.2898>0.05，不存在显著性差异，即不存在明显的失拟因素，表明该模型可以较好地反映试验的真实情况。根据方差分析结果可知，A^2、B^2、C^2 均为极显著（$P<0.01$），AB、AC、BC 间交互作用不显著（$P>0.05$）。根据 F 值大小判断 A、B、C 三个因素对多糖得率的影响程度排序为：液料比（B）>超声时间（C）>摩尔比（A）。

表 4　响应面试验设计及其结果

Table 4　Response surface Box-Behnken design and results

实验号	A摩尔比	B液料比（mL/g）	C超声时间（min）	多糖得率（%）
1	1∶2	20∶1	40	6.34
2	1∶4	20∶1	40	6.52
3	1∶2	40∶1	40	6.94
4	1∶4	40∶1	40	7.01
5	1∶2	30∶1	30	7.39
6	1∶4	30∶1	30	7.58
7	1∶2	30∶1	50	7.75
8	1∶4	30∶1	50	6.32
9	1∶3	20∶1	30	7.46
10	1∶3	40∶1	30	7.58
11	1∶3	20∶1	50	7.91
12	1∶3	40∶1	50	9.66
13	1∶3	30∶1	40	11.07
14	1∶3	30∶1	40	10.89
15	1∶3	30∶1	40	12.04
16	1∶3	30∶1	40	12.21
17	1∶3	30∶1	40	11.38

表 5　方差分析及其结果

Table 5　Analysis of variance results (ANOVA)

源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	67.83	9	7.54	16.54	0.0006
A-摩尔比	0.1225	1	0.1225	0.2689	0.6201
B-液料比	1.10	1	1.10	2.40	0.1650
C-超声时间	0.3321	1	0.3321	0.7289	0.4215
AB	0.0030	1	0.0030	0.0066	0.9373
AC	0.6561	1	0.6561	1.44	0.2692
BC	0.6642	1	0.6642	1.46	0.2665
A^2	34.30	1	34.30	75.27	<0.0001
B^2	16.20	1	16.20	35.55	0.0006
C^2	8.30	1	8.30	18.21	0.0037
残差	3.19	7	0.4557		
失拟项	1.82	3	0.6081	1.78	0.2898
纯误差	1.37	4	0.3414		
总误差	71.02	16			

2.2.3　三因素交互作用的响应面分析　摩尔比（A）、液料比（B）、超声时间（C）三因素间的响应面曲面图和等高线图如图 2 所示。曲面图和等高线图能够直观地展示因素间交互作用对苦竹笋多糖得率的影响[37]。响应面分析结果表明，曲面曲率与因素显著性呈正相关，而等高线椭圆度可反映因素间交互作用强度。如图 2 所示，AB、AC 和 BC 交互作用对响应值影响的等高线均呈现椭圆形，其中 AB 交互作用的曲面曲率最大，表明摩尔比与液料比的交互效应对多糖得率的影响较其他组交互时更明显。

2.2.4　验证提取条件　响应面优化结果表明，苦竹笋多糖最佳提取工艺参数为：液料比 31.037∶1（mL/g）、摩尔比 1∶2.972、超声时间 40.920 min，预测多糖得率为 11.548%。基于模型预测值并考虑实际操作可行性，确定验证实验条件为液料比 30∶1 mL/g、摩尔比

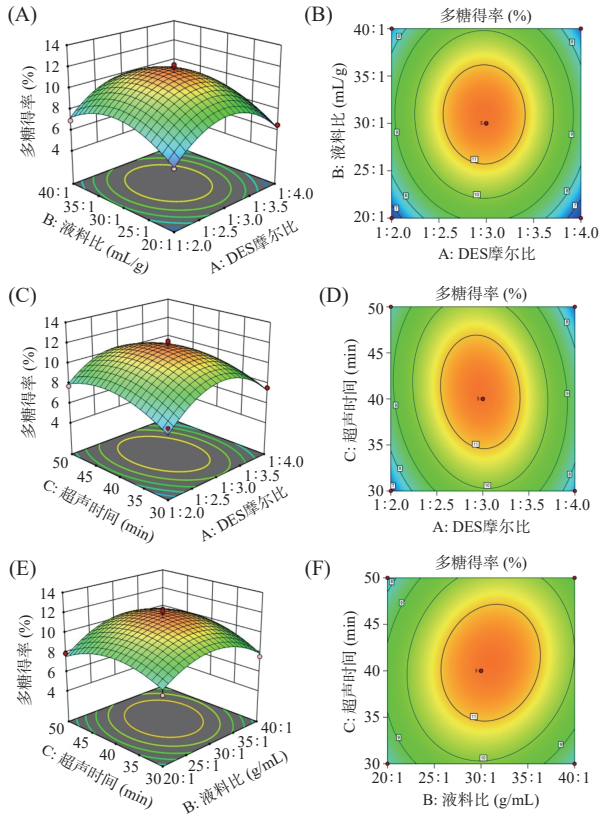


图 2 三因素交互作用对多糖得率的响应面分析

Fig.2 Response surface plot of the interaction of three factors on the extraction rate of bamboo shoot extracts

1∶3、超声时间 40 min，实际多糖得率达 12.73%±0.94%，与预测值相差小于 1.18%。验证实验结果证实了该模型的可靠性，表明其可用于指导竹笋多糖提取工艺优化。

2.3 结构表征

2.3.1 紫外结果分析 紫外光谱分析结果显示苦竹笋粗多糖在 250~300 nm 波长范围内呈现显著特征吸收峰(图 3A)，其中 260 nm 和 280 nm 处的特征峰分别指示核酸和蛋白质的存在，表明苦竹笋粗多糖中含有杂质组分，与 Cui 等[38] 在 280 nm 处观察到一个弱吸收峰的研究结果相似，验证了苦竹笋粗多糖中含有多糖链和蛋白质残基。

2.3.2 分子量分布 多糖的生物活性与其分子量分布密切相关，分子量的变化可能导致多糖理化性质的显著改变[39]。因此，准确测定苦竹笋多糖的分子量及其分布特征对于阐明其结构-活性关系具有重要意义。本研究中竹笋多糖分子量检测结果表明(图 3B)：数均分子量(Mn)为 53.32 kDa，峰值分子量(Mp)为 18.45 kDa，表明低分子量组分占主导；而重均分子量(Mw)和 Z 均分子量(Mz)分别高达 381.52 kDa 和 4655.19 kDa，说明样品中同时存在显著的高分子量及超高分子量组分。多分散性指数(PDI=7.16)进一步证实其分子量分布宽，可能由不同聚合度的多糖混合物或聚集态结构组成。本研究结果与 Chen 等[40] 提取方竹笋多糖结果相似，在竹笋多糖中同样发现了

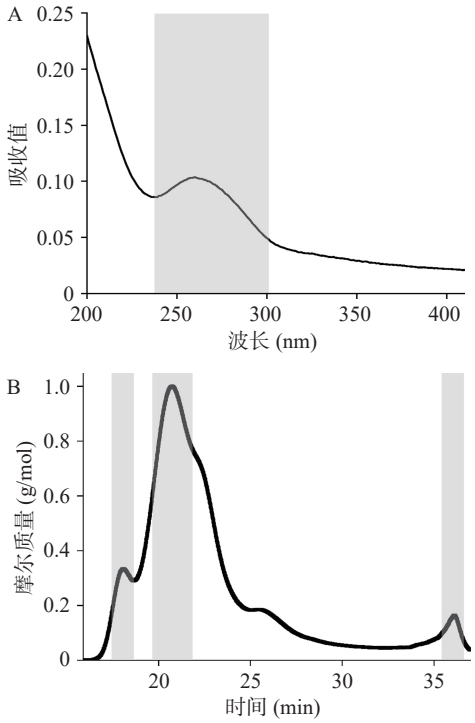


图 3 苦竹笋多糖的 UV-vis 光谱(A)和分子量分布(B)

Fig.3 UV-vis spectrum (A) and molecular weight distribution (B) of bamboo shoot polysaccharides

中低分子量和高分子量，这可能是由于超声处理导致多糖分子降解，使大分子断裂为小分子片段所致。

2.3.3 单糖组成分析 离子色谱分析结果显示(图 4)，竹笋多糖的单糖组成以阿拉伯糖(27.38%)、半乳糖(21.73%)、葡萄糖(20.15%)和木糖(15.33%)为主，其中前三种单糖的摩尔质量百分比均超过 20%。此外，检测到含量超过 9% 的甘露糖以及微量

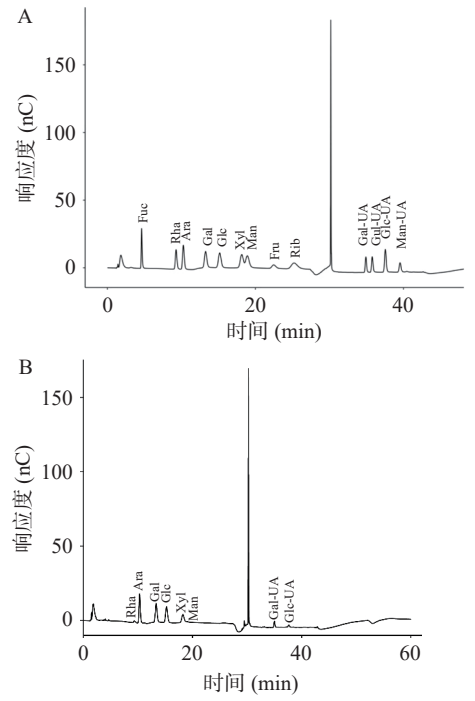


图 4 单糖标准品(A)、苦竹笋多糖中单糖组成(B)离子色谱图

Fig.4 Ion chromatogram of monosaccharide standards (A), monosaccharide composition in bamboo shoot polysaccharides (B)

鼠李糖、半乳糖醛酸和葡萄糖醛酸等组分，具体含量如表 6 所示。Yu 等[41] 对单糖组成分析结果表明竹笋多糖主要由葡萄糖、半乳糖、阿拉伯糖组成，本研究结果与该研究中主要单糖类型基本一致。

表 6　苦竹笋多糖的单糖组成

Table 6　Monosaccharide composition of bamboo shoot polysaccharides

名称	英文名称	质量含量（μg/mg）	百分比（%）	摩尔质量比（%）
阿拉伯糖	Arabinose, Ara	59.4044	24.40	27.38
半乳糖	Galactose, Gal	56.5867	23.24	21.73
葡萄糖	Glucose, Glc	52.4655	21.55	20.15
木糖	Xylose, Xyl	33.252	13.66	15.33
半乳糖醛酸	Galacturonic Acid, Gal-UA	25.3286	10.40	9.03
鼠李糖	Rhamnose, Rha	6.2963	2.59	2.65
葡萄糖醛酸	Glucuronic Acid, Glc-UA	5.8068	2.39	2.07
甘露糖	Mannose, Man	4.3074	1.77	1.65
岩藻糖	Fucose, Fuc	0	0.0	0.0
果糖	Fructose, Fru	0	0.0	0.0
核糖	Ribose, Fib	0	0.0	0.0
古罗糖醛酸	Guluronic Acid, Gul-UA	0	0.0	0.0
甘露糖醛酸	Mannuronic Acid, Man-UA	0	0.0	0.0

2.3.4　SEM 观察微观结构　SEM 结果如图 5 所示，苦竹笋多糖呈现典型的蜂窝状多孔结构，孔洞分布均匀且排列规整，孔径尺寸均一，显示出高度有序的微观结构特征。多糖结构单元间存在均匀间隙，整体结构完整，未观察到明显的结构碎片。高倍显微图像（图 5D）进一步显示样品表面光滑，分布有均匀的球形颗粒，且未出现结构断层。这些结构特征证实了苦竹笋多糖分子间存在较强的氢键和范德华力等分子间作用力，使其能够维持稳定的三维网络结构。同时，研究结果也表明超声辅助低共熔溶剂提取法能够有效保持多糖分子的糖链结构完整性和分子间交联作用，从而获得结构完整的苦竹笋多糖提取物。

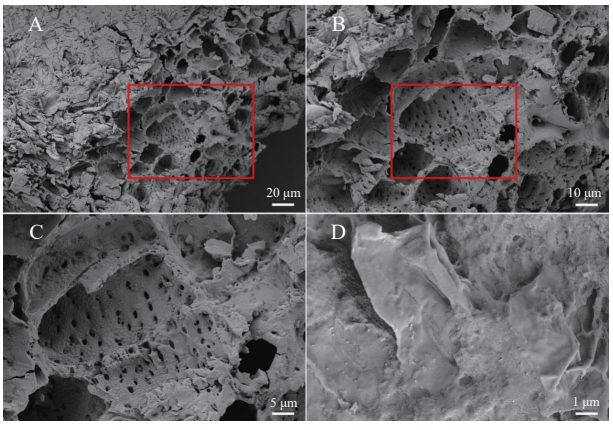


图 5　苦竹笋多糖的扫描电镜图

Fig.5　SEM image of bamboo shoot polysaccharides

注：A~D 放大倍数分别为 1000×、2000×、4000×以及 20000×。

2.3.5　FTIR 结果分析　图 6A 显示了苦竹笋多糖的 FTIR 谱图，在 3431 cm^{-1} 处出现宽且强的吸收峰，一般为多糖中 O-H 的伸缩振动，这也表明了多糖的分子间和分子内氢键作用力[42]；2931 cm^{-1} 处出现了较弱的吸收峰，归因于 C-H 的伸缩振动，是多糖的特征峰之一[43]；羰基（C=O）的特征吸收峰通常在 1850 cm^{-1} 至 1600 cm^{-1} 之间，因此，1736 cm^{-1} 和 1633 cm^{-1} 处的吸收峰可能是由 C=O 伸缩振动引起的，与储启明等[44] 研究结果相似；1446 cm^{-1} 处的吸收峰可能由 C=C 键的振动引起或 C-H 弯曲振动引起的；1235 cm^{-1} 处出现的吸收峰通常与 C-O 键的伸缩振动相关；1044 cm^{-1} 处可能与 C-O-C 和 C-O-H 的拉伸有关，表明竹笋多糖样品中可能存在吡喃糖环[45]。郭子斌等[46] 研究结果表明 1041 cm^{-1} 处吸收峰是多糖的特征带，本文结果与之相似。这些吸收峰证实苦竹笋提取物是一种含有羟基、羰基、吡喃糖环等典型多糖特征的物质。

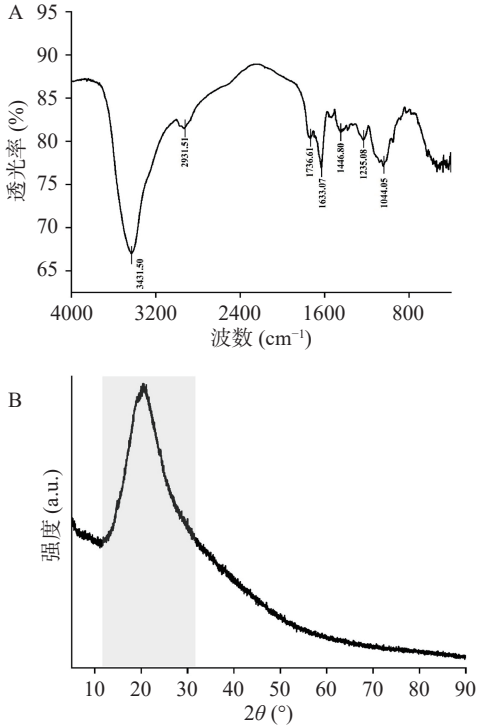


图 6　苦竹笋多糖的（A）红外光谱图与（B）XRD 衍射图

Fig.6　FTIR (A) and XRD (B) spectra of bamboo shoot polysaccharides

2.3.6　XRD 结果分析　物质的结晶度与其衍射特征呈现显著相关性：高结晶度物质通常在 XRD 图谱中呈现尖锐的特征衍射峰，而低结晶度多糖则表现为较宽的衍射峰[47]。从图 6B 可知，竹笋多糖在 2θ 为 20°附近发现明显且尖锐的宽峰，该特征峰可能对应于多糖分子中特定晶格结构的特征晶面衍射。同时，衍射图谱中存在宽而低的弥散包状峰，表明样品中存在大量非晶态区域，这一结果证实了苦竹笋多糖提取物呈现典型的半结晶特征，即同时包含结晶区和非晶区结构[48]。基于上述 XRD 分析结果，本研究推测苦竹笋多糖提取物主要呈现非晶态结构特征。

2.4　体外抗氧化活性结果

多糖具有抗氧化特性，与其抑制自由基链式反

应的还原作用密切相关[49]。基于自由基清除实验和铁离子还原能力测定结果，苦竹笋多糖对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基均表现出较好的清除能力，同时具有铁离子还原能力。在 0.1~2.0 mg/mL 浓度范围内，其抗氧化活性呈现出浓度依赖性，具有明显的剂量-效应关系。

抗氧化活性分析结果表明（图 7），苦竹笋多糖在 2.0 mg/mL 浓度时达到最大活性值，其中 DPPH 自由基清除率为 66.37%，$ABTS^+$自由基清除率为 51.58%，铁离子还原能力为 57.38%。其半抑制浓度（IC_{50}）分别为 0.51 mg/mL（DPPH 自由基清除能力）、1.80 mg/mL（$ABTS^+$自由基清除能力）和 0.86 mg/mL（铁离子还原能力）。在 0.05~2.0 mg/mL 浓度范围内，苦竹笋多糖的抗氧化活性呈现明显的浓度依赖性，当浓度低于 0.5 mg/mL 时，自由基清除能力相对较弱，这可能是由于低浓度下苦竹笋多糖参与自由基链反应的还原作用有限所致。铁离子还原实验结果显示，苦竹笋多糖的还原能力随浓度增加而增强，但在相同浓度下较阳性对照低 40% 以上。以上结果表明，超声辅助提取法能够有效保留苦竹笋多糖的活性成分，使其保持良好的体外抗氧化活性。

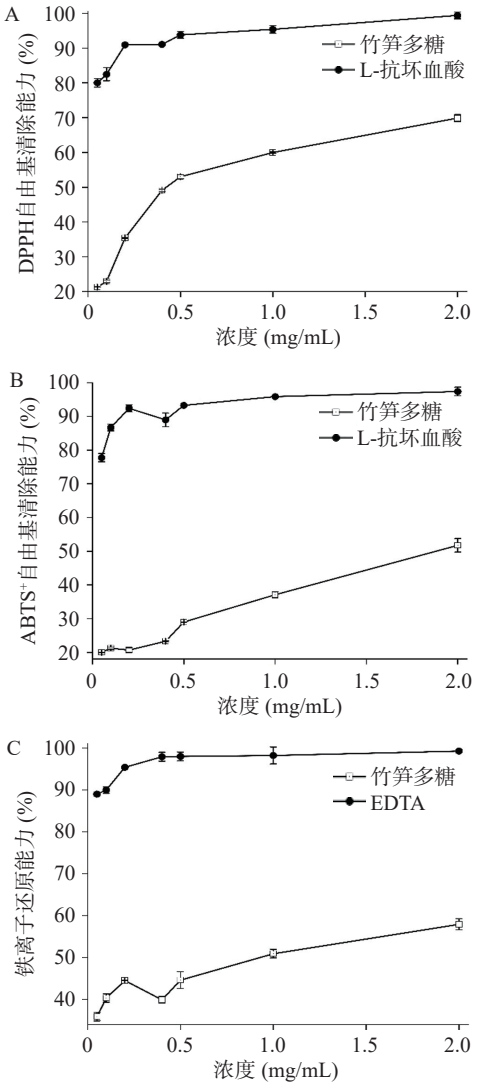


图 7 苦竹笋多糖的体外抗氧化活性

Fig.7 *In vitro* antioxidant capacity of bamboo shoot polysaccharide

注：A. DPPH 自由基清除能力；B. $ABTS^+$自由基清除能力；C. 铁离子还原能力。

2.5 体外降血脂活性结果

2.5.1 胆酸盐标准曲线 NaTC 和 NaGC 作为人体肝脏中两种主要的结合型胆酸盐，其体外结合能力的测定可作为评估样品降血脂活性的重要指标[50]。NaTC 和 NaGC 标准曲线（0.01~0.25 mmol/L）线性方程分别为 y=3.2605x+0.2051（R^2=0.9841）和 y=3.1842+0.1975（R^2=0.9824），两种胆酸盐浓度与吸光度间存在良好线性关系。

2.5.2 胆酸盐结合能力结果 苦竹笋多糖与胆酸盐结合能力的实验结果如图 8 所示，与 NaTC 和 NaGC 这两种胆酸钠的结合能力均呈现出明显的浓度依赖性。在 0.2~3.0 mg/mL 浓度范围内，NaTC 和 NaGC 的结合率随提取物浓度增加而显著升高（P<0.05）。值得注意的是，在 0.2~3.0 mg/mL 浓度范围内，提取物对 NaTC 的结合率高于 NaGC，这一差异可能与两种胆酸盐的分子结构和极性特征有关。研究表明，多糖的分子质量越大，与胆汁酸的结合能力越高，即降血脂能力越强[51]。体外消化模拟实验数据显示，当浓度达到 3 mg/mL 时，苦竹笋多糖对 NaTC 和 NaGC 的结合率分别达到 52.10% 和 46.18%，证实了该多糖具有一定的胆酸盐结合能力。结合 SEM 分析结果，该多糖独特的蜂窝状多孔结构有利于溶剂的渗透和多糖活性位点的暴露，从而增强其与胆酸盐的相互作用。根据上述结果，苦竹笋多糖可能通过与胆酸盐结合，阻止其在肠道中被吸收并排出体外，这一过程会促进体内胆固醇转化为胆汁酸，从而降低血液中的胆固醇水平，最终达到降低血脂的效果[52]。

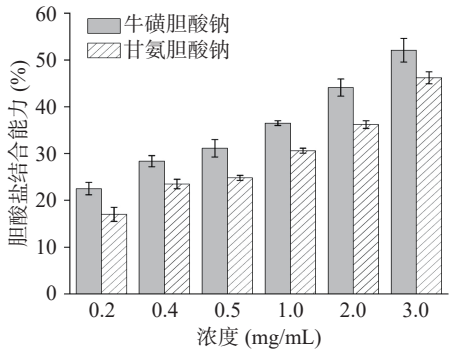


图 8 苦竹笋多糖的胆酸盐结合能力

Fig.8 Bile acid binding capacity of bamboo shoot polysaccharide

2.6 体外降血糖活性结果

2.6.1 α-葡萄糖苷酶抑制率 在 0.01~2.0 mg/mL 浓度范围内，竹笋多糖对 α-葡萄糖苷酶抑制率随浓度升高而逐渐缓慢上升，2 mg/mL 浓度时达到最大抑制率 16.99%（图 9A）。然而，与阳性对照阿卡波糖相比，其抑制活性显著较低（P<0.05），这一差异可能与

多糖纯度有关，提示通过进一步纯化处理可能提升其抑制活性。研究表明，多糖对 α-葡萄糖苷酶的抑制作用，可能归因于其对 α-葡萄糖苷酶的竞争性抑制效应[53]。本研究提取的苦竹笋粗多糖含有其他杂质，并可能会干扰多糖与酶之间的相互作用，从而降低多糖对 α-葡萄糖苷酶的抑制效果[54]。

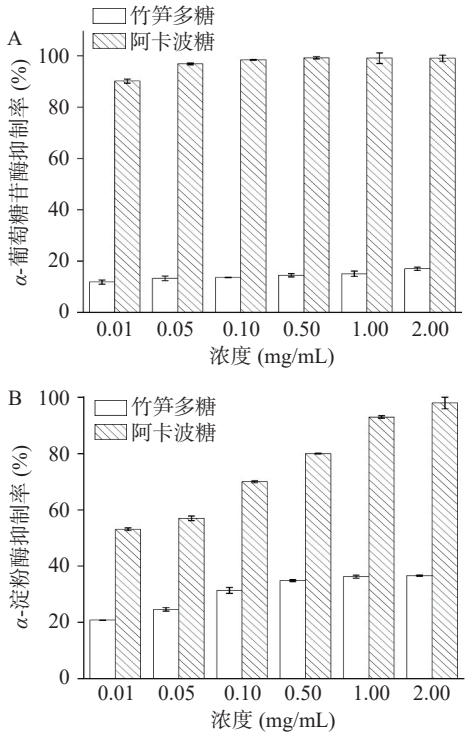


图 9　苦竹笋多糖的体外降血糖活性

Fig.9　*In vitro* hypoglycemic activity of bamboo shoot polysaccharide

注：A. α-葡萄糖苷酶抑制率；B. α-淀粉酶抑制率。

2.6.2　α-淀粉酶抑制率　α-淀粉酶是人体中一种关键的消化酶，能使摄入的碳水化合物中的 α-1,4 糖苷键断裂并生成葡萄糖，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[55]。从图 9B 可知，不同浓度的竹笋多糖能有效抑制 α-淀粉酶的活性，随着样品浓度的增加，其抑制效果也相应增强。当浓度达到 2 mg/mL 时，抑制率达到 36.60%，表明苦竹笋多糖具有一定的 α-淀粉酶抑制活性，但因其抑制率较低，后续实验应继续探究纯化后苦竹笋多糖对血糖相关酶活的影响。

2.7　竹笋多糖体外抑菌结果

枯草芽孢杆菌和白色念珠菌主要通过引起食品腐败、产生异味或毒素，对食品安全和品质造成危害[56]。大肠杆菌和金黄色葡萄球菌是常见的食源性病原体，它们经常导致果蔬和食品的污染，并对人类健康构成威胁[57]。因此，在食品生产和果蔬储存过程中，需采取有效措施抑制这些微生物的生长。在本研究中，采用纸片扩散法评估了苦竹笋多糖对这四种微生物的体外抗菌活性，并以抑制区的直径（mm）作为抗菌活性的评价指标。

75 mg/mL 多糖样品液对枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌效果如图 10 所示。添加苦竹笋多糖的实验组出现抑菌圈，抑菌圈直径分别为（10.69±0.75）mm、（11.20±0.76）mm 和（12.10±1.92）mm，表明苦竹笋多糖对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌在一定程度具有抑制效果。图 10B 中白色念珠菌的空白对照组（W2）和实验组（Ca1、Ca2、Ca3）均未发现明显抑菌圈，表明苦竹笋多糖对真菌的抑制效果不明显。这可能由于微生物细胞结构的显著不同造成的。相较于细菌较薄的肽聚糖细胞壁，真菌具有以几丁质为主要成分的更为复杂的多层细胞壁结构，其厚度和致密程度可能显著降低苦竹笋多糖的渗透效率。此外，真菌细胞壁表面的甘露蛋白层及其复杂的代谢系统可能进一步增强其对多糖作用的抗性，从而限制了多糖的吸附和生物活性[58−59]。张玲赫等[60] 研究发现新疆野生樱桃李多糖对白色念珠菌表现出极敏感的抑制效果，其抗菌活性显著优于对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑制，本研究结果与该发现存在差异。Zhang 等[61] 研究表明，多糖可通过破坏细菌细胞壁和细胞膜的完整性，增加其通透性，进而引起细胞结构损伤和胞内物质外泄，最终导致细胞死亡，这一机制是其发挥抗菌作用的关键途径。此外，多糖还可能通过形成物理屏障，阻断营养物质跨膜运输，从而抑制细菌生长。因此，苦竹笋多糖对革兰氏阳性菌和革兰氏阴性菌均表现出一定程度的抑菌活性，纯化后苦竹笋多糖应具有作为天然抑菌剂的潜在应用价值，但其对真菌的抑制作用及分子机制仍有待进一步阐明。

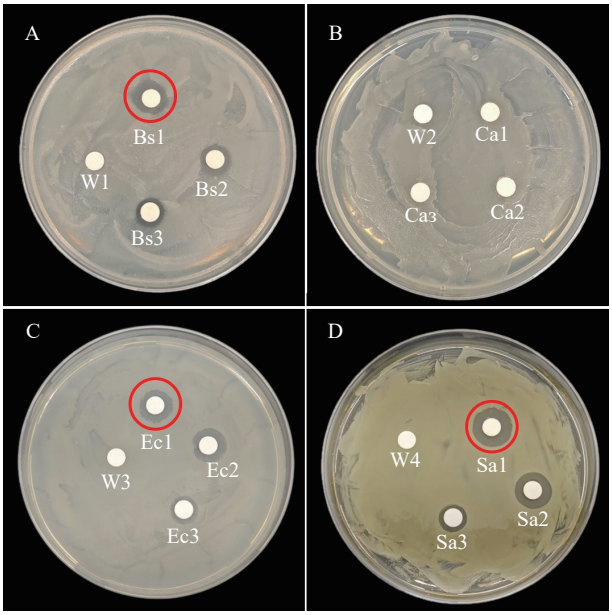


图 10　苦竹笋多糖的抑菌效果

Fig.10　Antibacterial effect of bamboo shoot polysaccharides

注：A. 枯草芽孢杆菌；B. 白色念珠菌；C. 大 肠杆菌；D. 金黄色葡萄球菌。

3　结论

本研究通过响应面法优化了超声辅助低共熔溶

剂(DES)提取苦竹笋多糖的工艺参数,确定最佳提取条件为:液料比 30∶1 mL/g、氯化胆碱与乳酸摩尔比 1∶3、超声时间 40 min。在此条件下,采用氯化胆碱-乳酸 DES 体系提取苦竹笋多糖的得率达到 12.73%±0.94%。进一步的结构表征结果显示,苦竹笋多糖的重均分子量为 381.52 kDa,其单糖组成主要包括阿拉伯糖、半乳糖、葡萄糖和木糖等组分。此外,FTIR 结果显示了该多糖样品的内部分子间作用,这些作用力辅助其形成了蜂窝状多孔交联结构,进一步证明了超声提取不会破坏多糖的固有分子链,而 XRD 结果也表明该样品以非晶体的无定型结构为主。在生物活性方面,苦竹笋多糖展现出较好的抗氧化能力(DPPH、$ABTS^{+}$及铁离子还原的 IC_{50} 分别为 0.51、1.80 和 0.855 mg/mL),并表现出一定的降血糖潜力(α-淀粉酶抑制率 36.60%)和降血脂活性(3 mg/mL 苦竹笋多糖与胆酸盐结合率在 50% 左右)。体外抑菌活性实验结果表明,苦竹笋多糖对枯草芽孢杆菌、大肠杆菌和金黄色葡萄球菌均具有抑制活性,抑菌圈直径可达 10 mm 以上,证实其具有作为天然功能成分的应用前景。本研究的亮点在于将 DES 绿色溶剂体系与超声技术相结合,实现了苦竹笋多糖的高效、温和提取,并系统揭示其多级结构特征与多重生物活性之间的关联,为天然植物中多糖的绿色提取与综合开发提供了新思路。然而,目前研究仍存在以下局限:多糖的精确构效关系尚未明确,其体内活性及作用机制有待通过动物实验进一步验证,DES 的回收与循环利用工艺也需优化以提升其规模化应用的经济性与环境友好性。综上所述,采用 DES 绿色体系提取植物多糖具有良好的应用前景与现实意义。

© 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] REN Y, LIU Y, ZHANG W, et al. Sheathless CESI–MS versus LC–MS: Results of qualitative and quantitative analyses of the primary and secondary metabolites of *Pleioblastus amarus* bamboo shoots[J]. Electrophoresis 2024, 45(3−4): 266−274.

[2] REN Y, BAI Y, ZHANG Z, et al. The preparation and structure analysis methods of natural polysaccharides of plants and fungi: A review of recent development[J]. Molecules, 2019, 24(17): 3122.

[3] AO X, YAN J, LIU S, et al. Extraction, isolation and identification of four phenolic compounds from *Pleioblastus amarus* shoots and their antioxidant and anti-inflammatory properties in vitro[J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131743.

[4] 晏俊玲, 樊扬, 秦川, 等. 苦竹笋总黄酮大孔树脂纯化工艺及其体外抗炎活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 184−192. [YAN Junling, FAN Yang, QIN Chuan, et al. Purification of total flavonoids from bamboo shoots of *Pleioblastus amarus* with macroporous resin and its anti-inflammation activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 184−192.]

[5] REN Y, MA Y, ZHANG Z, et al. Total alkaloids from bamboo shoots and bamboo shoot shells of *Pleioblastus amarus* (Keng) Keng f. and their anti-inflammatory activities[J]. Molecules, 2019, 24(15): 2699.

[6] ZHENG Y, WANG Q, HUANG J, et al. Hypoglycemic effect of dietary fibers from bamboo shoot shell: An *in vitro* and *in vivo* study[J]. Food and Chemical Toxicology, 2019, 127: 120−126.

[7] WANG M, YU A, HU W, et al. Extraction, purification, structural characteristic, health benefit, and product application of the polysaccharides from bamboo shoot: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 271(Pt 2): 132581.

[8] AZMI A F M N, MUSTAFA S, HASHIM D M, et al. Prebiotic activity of polysaccharides extracted from *Gigantochloa* Levis (buluh beting) shoots[J]. Molecules, 2012, 17(2): 1635−1651.

[9] LI Q, WU W, FANG X, et al. Structural characterization of a polysaccharide from bamboo (*Phyllostachys edulis*) shoot and its prevention effect on colitis mouse[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132807.

[10] ZHENG Y, ZHANG S, WANG Q, et al. Characterization and hypoglycemic activity of a β-pyran polysaccharides from bamboo shoot (*Leleba oldhami Nakal*) shells[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 144: 438−446.

[11] HAN Q, WU Z, HUANG B, et al. Extraction, antioxidant and antibacterial activities of *Broussonetia papyrifera* fruits polysaccharides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 92: 116−124.

[12] GAO Nengbin, ZHANG Weijia, HU Dianjie, et al. Study on extraction, physicochemical properties, and bacterio-static activity of polysaccharides from *Phellinus linteus*[J]. Molecules, 2023, 28(13): 5102.

[13] LI L, THAKUR K, LIAO B, et al. Antioxidant and antimicrobial potential of polysaccharides sequentially extracted from *Polygonatum cyrtonema* Hua[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 114: 317−323.

[14] 乔雪婷, 李敏琦, 许鑫玉, 等. 低共熔溶剂提取植物多糖的研究进展[J]. 化学工程师, 2024, 38(6): 60−63. [QIAO Xueting, LI Minqi, XU Xinyu, et al. Research progress of plant polysaccharide extraction with deep eutectic solvents[J]. Chemical Engineer, 2024, 38(6): 60−63.]

[15] SUGIARTO S, ALOKA WEERASINGHE U, KINYANJUI MUIRURI J, et al. Nanomaterial synthesis in deep eutectic solvents[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 499: 156177.

[16] ZHOU D, HU Y, ZHOU T, et al. Deep eutectic solvent extraction of polysaccharides from *Gastrodiae elata* with ultrasonic and enzymes assistance: Process optimization, structure, and antioxidant activity[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 119: 107383.

[17] FENG S, ZHANG J, LUO X, et al. Green extraction of polysaccharides from *Camellia oleifera* fruit shell using tailor-made deep eutectic solvents[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127286.

[18] YAN K, LIU X, 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: 133308.

[19] WILS L, HILALI S, BOUDESOCQUE-DELAYE L. Biomass valorization using natural deep eutectic solvents: What's new in France?[J]. Molecules, 2021, 26(21): 6556.

[20] CRAVEIRO R, AROSO I, FLAMMIA V, et al. Properties and thermal behavior of natural deep eutectic solvents[J]. Journal of Molecular Liquids, 2016, 215: 534−540.

［21］ SINGLA M, SIT N. Application of ultrasound in combination with other technologies in food processing: A review[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 73: 105506.
［22］ 韩益, 侯秋月, 余建军, 等. 超声辅助低共熔溶剂提取海带多糖工艺优化及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(22): 94−101. ［HAN Yi, HOU Qiuyue, YU Jianjun, et al. Optimization of ultrasonic-assisted eutectic solvent extraction of kelp polysaccharides and its antioxidant activity[J]. Food Research and Development, 2024, 45(22): 94−101.］
［23］ 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 Mengxing, WANG Tao, ZHAO Jin, et al. Optimization of extraction of *Tremella aurantialba* polysaccharides using natural deep eutectic solvents[J]. China Food Additives, 2024, 35(9): 52−57.］
［24］ 刘靖洁, 彭小伟, 王安娜, 等. 勃氏甜龙竹笋壳多糖提取工艺优化、结构表征及体外生物活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 21−30. ［LIU Jingjie, PENG Xiaowei, WANG Anna, et al. Optimization of extraction process, structural characterization and *in vitro* bioactivity of polysaccharides from *Dendrocalamus brandisii* bamboo shoot shell[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 21−30.］
［25］ WANG X, SU Y, SU J, et al. Optimization of enzyme−assisted aqueous extraction of polysaccharide from *Acanthopanax senticosus* and comparison of physicochemical properties and bioactivities of polysaccharides with different molecular weights[J]. Molecules, 2023, 28(18): 6585.
［26］ XU Zhou, LI Xu, FENG Shiling, et al. Characteristics and bioactivities of different molecular weight polysaccharides from *Camellia seed* cake[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 1025−1032.
［27］ ZHU M, HUANG R, WEN P, et al. Structural characterization and immunological activity of pectin polysaccharide from kiwano (*Cucumis metuliferus*) peels[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 254: 117371.
［28］ 隋昕怡, 逄梦玉, 刘丹, 等. 超声辅助低共熔溶剂法提取蛹虫草多糖工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(9): 92−96,113. ［SUI Xinyi, PANG Mengyu, LIU Dan, et al. Optimization of extraction process for polysaccharides from *Cordyceps militaris* by ultrasonic-assisted deep eutectic solvent and study on its antioxidant activity[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(9): 92−96,113.］
［29］ 刘养山, 张景, 任洪飞, 等. 冠县灵芝多糖的分离纯化、结构表征及抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(12): 81−89. ［LIU Yangshan, ZHANG Jing, REN Hongfei, et al. Extraction, purification, structural characterization and antioxidant activity of polysaccharides from the fruiting body of Guanxian Ganoderma lucidum[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(12): 81−89.］
［30］ 胡颖, 罗芳, 颜张锦博, 等. 嗜热链球菌发酵辣椒产胞外多糖提取、结构特征及体外抗氧化活性研究[J]. 中国调味品, 2024, 49(11): 52−58. ［HU Ying, LUO Fang, YAN Zhangjinbo, et al. Extraction, structural characteristics and *in vitro* antioxidant activity of extracellular polysaccharides from peppers fermented by *Streptococcus thermophilus*[J]. China Condiment, 2024, 49(11): 52−58.］
［31］ 李成龙. 发酵酸肉降血脂肽的分离纯化、特性研究及其对血管内皮细胞的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016. ［LI Chenglong. Purification of blood lipid lowering peptides from fermented sour meat and studing of physicochemical properties and its effects on vascular endothelial cells[D]. Chongqing: Southwest University, 2016.］
［32］ 杨青松, 陈小玲, 高路, 等. 水溶性红雪茶多糖体外结合胆酸盐能力的分析[J]. 中国食品添加剂, 2017, 28(9): 49−54. ［YANG Qingsong, CHEN Xiaoling, GAO Lu, et al. Analysis of bile salt-binding ability of water-soluble polysaccharide from *Lethariella* spp. *in vitro*[J]. China Food Additives, 2017, 28(9): 49−54.］
［33］ MEHRABI F, GHAEDI M, ALIPANAHPOUR DIL E. Magnetic nanofluid based on hydrophobic deep eutectic solvent for efficient and rapid enrichment and subsequent determination of cinnamic acid in juice samples: *Vortex*-assisted liquid-phase microextraction[J]. Talanta, 2023, 260: 124581.
［34］ 宋巧英, 赵宝怡, 刘子晴. 银耳多糖超声辅助低共熔溶剂提取及对糖尿病小鼠肠道菌群的影响[J]. 精细化工, 2025, 42(6): 1295−1305. ［SONG Qiaoying, ZHAO Baoyi, LIU Ziqing. Ultrasonic assisted extraction of *Tremella* polysaccharide with eutectic solvent and its effect on intestinal flora of diabetic mice[J]. Fine Chemicals, 2025, 42(6): 1295−1305.］
［35］ 王润平, 李云萍, 路小彬, 等. 探究杜仲叶多糖的超声提取优化及透析纯化工艺与抗氧化性能[J]. 饲料工业, 2024, 45(14): 87−95. ［WANG Runping, LI Yunping, LU Xiaobin, et al. Exploration for ultrasonic-assisted extraction optimization and dialysis purification of polysaccharides from *Eucommia ulmoides* leaf and corresponding antioxidant activity[J]. Feed Industry, 2024, 45(14): 87−95.］
［36］ 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 Qiao, SUN Yue, LIU Mengyao, 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.］
［37］ 陈炯朝, 马雪, 张研, 等. 响应面法优化超声辅助低共熔溶剂提取洋蓟花苞多糖工艺[J]. 中国食品添加剂, 2024, 35(4): 57−64. ［CHEN Jiongchao, MA Xue, ZHANG Yan, et al. Optimization of ultrasonic-assisted low eutectic reagents extraction of polysaccharides from artichoke buds by response surface methodology[J]. China Food Additives, 2024, 35(4): 57−64.］
［38］ CUI Jie, GU Xin, WANG Fengjun, et al. Purification and structural characterization of an α-glucosidase inhibitory polysaccharide from apricot (*Armeniaca sibirica* L. Lam.) pulp[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 121: 309−314.
［39］ 李智聪, 李俊, 熊晓萱, 等. 酸/碱提取菠萝蜜果丝多糖及其结构、生物活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 70−80. ［LI Zhicong, LI Jun, XIONG Xiaoxuan, et al. Effect of acid/alkali extraction of polysaccharides from jackfruit *Filum* and its structure and biological activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 70−80.］
［40］ CHEN Guangjing, FANG Chuchu, RAN Chunxia, et al. Comparison of different extraction methods for polysaccharides from bamboo shoots (*Chimonobambusa quadrangularis*) processing by-products[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 130: 903−914.
［41］ YU Yue, ZHANG Fuqiang, TAO Binbin, et al. Enhanced hydrothermal extraction of bamboo shoot polysaccharides by plasma-activated water: A process and characterization study[J]. LWT, 2025, 223: 117771.
［42］ LIU Xiaocui, ZHU Zhenyuan, TANG Yali, et al. Structural

properties of polysaccharides from cultivated fruit bodies and *Mycelium* of *Cordyceps militaris*[J]. Carbohydrate Polymers, 2016, 142: 63−72.

[43] RASHID F, AHMED Z, HUSSAIN S, et al. *Linum usitatissimum* L. seeds: Flax gum extraction, physicochemical and functional characterization[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 215: 29−38.

[44] 储启明, 魏洪玲, 田叙晨, 等. 金花葵多糖提取工艺优化及结构表征和抗氧化性研究[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 236−243. [CHU Qiming, WEI Hongling, TIAN Xuchen, et al. Optimization of extraction technology, structure characterization and antioxidant activity of polysaccharide from hibiseus *Manihot* L[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(8): 236−243.]

[45] PENG Xiaowei, HU Xiang, ZHANG Yingjun, et al. Extraction, characterization, antioxidant and anti-tumor activities of polysaccharides from *Camellia fascicularis* leaves[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 222: 373−384.

[46] 郭子斌, 杨洋, 范蓓, 等. 青稞多糖-多酚复合物的结构表征及其降血脂活性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 375−382. [GUO Zibin, YANG Yang, FAN Bei, et al. Structural characterization and hypolipidemic activity of highland barley polysaccharide-polyphenol complexes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 375−382.]

[47] 张玉梅, 邢慧珍, 刘会平, 等. 槐花多糖的提取、纯化和抗氧化活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 207−215. [ZHANG Yumei, XING Huizhen, LIU Huiping, et al. Extraction, purification and antioxidant activity of polysaccharides from *Sophora* Japonica[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 207−215.]

[48] 曹磊, 刘伟, 王俊龙, 等. 硫酸化制备圆苞车前子低黏多糖及其结构表征和抗氧化活性研究[J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(1): 26−36. [CAO Lei, LIU Wei, WANG Junlong, et al. Preparation of low viscosity polysaccharide from *Plantago ovata* Forsk by sulfation method and its structural characterization and antioxidant activities[J]. Natural Product Research and Development, 2024, 36(1): 26−36.]

[49] SHAFIE M H, YUSOF R, GAN C Y. Deep eutectic solvents (DES) mediated extraction of pectin from *Averrhoa bilimbi*: Optimization and characterization studies[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 216: 303−311.

[50] ZHENG M, OOYANG H, LI Z, et al. Ultra-high pressure assisted extraction of polysaccharide from *Bangia fusco*-purpurea: Structure and *in vitro* hypolipidemic activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 135687.

[51] PEI F, CAO X, WANG X, et al. Structural characteristics and bioactivities of polysaccharides from blue honeysuckle after probiotic fermentation[J]. LWT, 2022, 165: 113764.

[52] 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 Tianxin, YAN Xiaojuan, ZHANG Haiyue. Extraction process, physicochemical properties, and *in vitro* functional activity of polysaccharide from fructus mume[J]. Food Research and Development, 2024, 45(24): 101−110.]

[53] 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 Zhangchao, ZHANG Renyu, LI Huanchang, 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.]

[54] 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 Lichao, ZHANG Linyi, LIANG Xinyuan, et al. Research progress on the inhibitory effect of natural active ingredients on α-glucosidase[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2021, 12(6): 2276−2282.]

[55] 蔡舒, 钟诚, 黎敏姿, 等. 南瓜籽多糖的分离纯化及其体外降血糖活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(9): 352−362. [CAI Shu, ZHONG Cheng, LI Minzi, et al. Isolation, purification, and *in vitro* hypoglycemic activity of pumpkin seed polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(9): 352−362.]

[56] RAJESTARY R, LANDI L, ROMANAZZI G. Chitosan and postharvest decay of fresh fruit: Meta-analysis of disease control and antimicrobial and eliciting activities[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 563−582.

[57] LI Bingcheng, AN Yalu, NAN Fangru, et al. Optimizing ultrasonic extraction of polysaccharides from *Spirulina platensis* and evaluating their antioxidant and antibacterial activities in acidic environments[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 302: 140478.

[58] BROWN R, PRIEST E, NAGLIK J R, et al. Fungal toxins and host immune responses[J]. Frontiers in Microbiology, 2021, 12: 643639.

[59] MIHAI R A, MELO HERAS E J, FLORESCU L I, et al. The edible gray oyster fungi *Pleurotus ostreatus* (jacq. ex Fr.) P. kumm a potent waste consumer, a biofriendly species with antioxidant activity depending on the growth substrate[J]. Journal of Fungi, 2022, 8(3): 274.

[60] 张玲赫, 谢浩, 努尔买买提. 微波辅助低共熔溶剂提取新疆野生樱桃李多糖工艺及抗氧化、抑菌活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 228−236. [ZHANG Linghe, XIE Hao, NUER Maimaiti. Microwave-assisted deep eutectic solvent extraction of Xinjiang wild *Prunus cerasifera* Ehrh. polysaccharides and analysis of its antioxidant and antibacterial activities[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 228−236.]

[61] ZHANG Y, WU Y, ZHENG W, et al. The antibacterial activity and antibacterial mechanism of a polysaccharide from *Cordyceps cicadae*[J]. Journal of Functional Foods, 2017, 38: 273−279.