DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.H20260402006
引用格式: 朱娜, 周雪艳, 杨响, 等. 超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖的工艺优化及降血糖血脂作用研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(13): 302–310.
Zhu Na, Zhou Xueyan, Yang Xiang, et al. Study on the optimization of ultrasound-assisted cellulase extraction for *Pteris vittata* polysaccharides and its hypoglycemic and hypolipidemic effects [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(13): 302–310. (in Chinese with English abstract).

超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖的工艺优化及降血糖血脂作用研究

朱　娜, 周雪艳*, 杨　响, 杨利芳, 张　淼
(石家庄市食品药品检验中心, 石家庄　050031)

摘　要: 目的　研究超声辅助纤维素酶法对蜈蚣草多糖的提取效果, 并探究其降血糖血脂活性。**方法**　采用响应面优化蜈蚣草多糖超声辅助纤维素酶法提取工艺参数, 并通过研究其对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶活性抑制率评估体外降血糖活性, 通过研究其对胰脂肪酶抑制活性抑制率与甘氨胆酸盐和牛磺胆酸盐结合率评估体外降血脂活性。**结果**　蜈蚣草多糖最优提取工艺参数: 料液比 1:20 (g:mL)、纤维素酶用量 2.2%、超声功率 316 W、超声温度 51 ℃、超声时间 22 min, 在此条件下测得蜈蚣草多糖提取率为 4.19%±0.08%。体外活性评价表明, 蜈蚣草多糖具有一定的降血糖和降血脂生物学活性, 蜈蚣草多糖对 *α*-淀粉酶和 *α*-葡萄糖苷酶的半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})分别为 3.52 mg/mL 和 2.75 mg/mL; 对胰脂肪酶的 IC_{50} 为 4.08 mg/mL, 与甘氨胆酸盐和牛磺胆酸盐的半数有效浓度(half maximal effective concentration, EC_{50})分别为 4.45 mg/mL 和 4.38 mg/mL。**结论**　超声辅助纤维素酶法可高效提取蜈蚣草多糖, 蜈蚣草多糖是一种潜在的降血糖、降血脂功能性食品原料。

关键词: 蜈蚣草; 多糖; 超声辅助纤维素酶法; 降血糖; 降血脂
中图分类号: TS219　　**文献识别码:** A　　**文章编号:** 2095–0381(2026)13–0302–09

Study on the optimization of ultrasound-assisted cellulase extraction for *Pteris vittata* polysaccharides and its hypoglycemic and hypolipidemic effects

ZHU Na, ZHOU Xue-Yan*, YANG Xiang, YANG Li-Fang, ZHANG Miao
(*Shijiazhuang Food and Drug Inspection Center*, *Shijiazhuang* 050031, *China*)

ABSTRACT: Objective　To investigate the extraction efficiency of *Pteris vittata* polysaccharides via an ultrasound-assisted cellulase method, and explore its hypoglycemic and hypolipidemic activities. **Methods**　Response surface methodology was applied to optimize the technical parameters for the ultrasound-assisted cellulase extraction of *Pteris vittata* polysaccharides. The *in vitro* hypoglycemic activity was evaluated by determining the inhibition rates of

收稿日期: 2026-04-02
基金项目: 石家庄市科技计划项目(241200503); 河北省重大科技支撑计划项目(252G2503D)
第一作者: 朱娜(1987—), 女, 工程师, 主要研究方向为食品与药品分析。E-mail: 675053755@qq.com
***通信作者:** 周雪艳(1986—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为食品与药品分析。E-mail: zhou.xue.yan@163.com

α-amylase and *α*-glucosidase activities, while the *in vitro* hypolipidemic activity was assessed by analyzing the inhibition rate of pancreatic lipase activity as well as the binding rates to sodium glycocholate and sodium taurocholate. **Results** The optimal extraction parameters for *Pteris vittata* polysaccharides were determined as follows: solid-liquid ratio of 1:20 (g:mL), cellulase dosage of 2.2%, ultrasonic power of 316 W, ultrasonic temperature of 51 ℃ and ultrasonic time of 22 min. Under these conditions, the extraction yield of *Pteris vittata* polysaccharides was measured to be 4.19%±0.08%. *In vitro* bioactivity assessment demonstrated that *Pteris vittata* polysaccharides possessed certain hypoglycemic and hypolipidemic biological activities. The half-maximal inhibitory concentrations (IC_{50}) of *Pteris vittata* polysaccharides against *α*-amylase and *α*-glucosidase were 3.52 mg/mL and 2.75 mg/mL, respectively. Its IC_{50} against pancreatic lipase was 4.08 mg/mL, and the half-maximal effective concentrations (EC_{50}) for glycocholate and taurocholate were 4.45 mg/mL and 4.38 mg/mL, respectively. **Conclusion** The ultrasound-assisted cellulase method can efficiently extract *Pteris vittata* polysaccharides. *Pteris vittata* polysaccharides are potential functional food material with hypoglycemic and hypolipidemic properties.

KEY WORDS: *Pteris vittata*; polysaccharides; ultrasound-assisted cellulase extraction; hypoglycemic; hypolipidemic

0　引　言

蜈蚣草(*Pteris vittata*)隶属于凤尾蕨科凤尾蕨属, 以干燥或新鲜全草入药, 民间亦有梳子草、小贯众、牛肋巴、长叶甘草蕨等别称, 在我国云贵川等多个省份均有分布, 具有祛风除湿、舒筋活络、解毒杀虫的功效, 是我国一味传统中药[1], 由于其金属离子富集能力强, 常被用于环境重金属污染修复[2]。近年来研究发现, 蜈蚣草中富含多酚、黄酮、三萜、多糖等活性物质, 具有抗氧化、杀虫、提高肉鸡免疫力等功效, 在食品、保健品及生物医药领域展现出良好的开发潜力[3−7]。

植物多糖是天然的生物活性大分子, 是药用植物发挥药理功效的重要活性物质之一, 现代药理研究表明, 天然多糖普遍具备降糖、降脂、抗氧化、免疫调节等活性[8]。多糖体外降血糖机制主要通过抑制 *α*-淀粉酶、*α*-葡萄糖苷酶等关键消化酶的活性, 延缓碳水化合物的吸收; 其体外降血脂机制主要是结合胆酸盐和抑制胰脂肪酶活性等方式减少脂质的吸收与合成, 从而发挥调控糖脂代谢的作用[9−10]。目前, 已有大量研究报道各种多糖的降血糖与降血脂活性(如红枣多糖、菜豆多糖、香菇多糖、桑葚多糖等), 证实其在功能性食品开发具有广阔的应用前景[9−11]。多糖也是蜈蚣草重要的活性成分之一, 但蜈蚣草在生态修复过程中会产生大量废弃物, 若直接焚烧容易造成二次污染, 而通过提取工艺分离纯化蜈蚣草多糖, 可将环境修复的废弃生物质转化为高附加值生物活性物质, 提高生态修复的经济价值。目前关于蜈蚣草多糖的提取工艺以及生物学活性研究较少, 仅见熊俊娟[12]采用热水提取法提取蜈蚣草多糖, 发现蜈蚣草多糖具有典型的多糖结构, 是一种吡喃环多糖, 无抑菌活性, 但该方法存在耗能高、提取效率低等缺点, 限制了蜈蚣草多糖的开发利用。超声具有空化效应和机械振动作用, 能快速破碎植物细胞壁, 加速活性成分溶出, 具有提取效率高、耗时短等特点[13]; 纤维素酶可特异性水解植物细胞壁中的纤维素, 破坏其致密结构, 促进胞内多糖释放, 且作用条件温和, 不易破坏多糖结构[14]。超声波还可提高酶活性, 降低酶使用量, 因此超声辅助酶法是一种绿色高效的提取技术[15]。本研究采用超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖, 优化其提取工艺, 并研究其降血脂和降血糖能力, 以期为蜈蚣草多糖的提取及在功能性食品开发利用提供参考。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

蜈蚣草购自成都千畦花木有限公司, 清水洗净后于 60 ℃烘箱中干燥, 粉碎过 40 目筛, 密封保存。

纤维素酶(生化试剂, 酶活 50 U/mg)、甘氨胆酸钠、牛磺胆酸钠、香菇多糖(分析纯)(上海源叶生物科技有限公司); 葡萄糖(色谱纯)、胰脂肪酶(生化试剂, 酶活 50 U/mg)(上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 阿卡波糖(分析纯)、*α*-葡萄糖苷酶(生化试剂, 酶活 50 U/mg)、*α*-淀粉酶(生化试剂, 酶活 2000 U/mg)[西格玛奥德里奇(上海)贸易有限公司]; 无水乙醇、苯酚、浓硫酸(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2　仪器与设备

BILON-1000CT 多用途恒温超声提取机(上海比郎仪器制造有限公司); KL05A 离心机(湖南凯达科学仪器有限公司); HBS-1101 酶标仪(南京德铁生物科技有限公司); MX204/A 分析天平(精度 0.01 mg, 瑞士梅特勒-托利多公司); R-1005 旋蒸蒸发仪(郑州科达机械仪器设备有限公司); FD5 型冷冻干燥机[金西盟(北京)仪器有限公司]。

1.3　蜈蚣草多糖提取试验方法

1.3.1　超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖及其含量测定

将蜈蚣草粉末, 按料液比 1:10 (g:mL)加入 95%乙醇回流脱脂 2 h, 残渣于 60 ℃烘干。取脱脂后的蜈蚣草粉末 20.0 g

置于锥形瓶中, 加入 1.5%纤维素酶和 1:20 (g:mL)纯化水混匀, 在 45 ℃下 240 W 超声提取 40 min。提取后于 90 ℃水浴灭酶 10 min, 4000 r/min, 离心 15 min 取上清液, 0.1 Mpa 真空度下 45 ℃浓缩至原体积的 1/20 后加入无水乙醇至乙醇体积分数为 90%, 4 ℃冰箱醇沉 12 h。离心收集沉淀, 冷冻干燥即得蜈蚣草粗多糖, 采用苯酚硫酸法[16]测定蜈蚣草粗多糖含量, 按照公式(1)计算蜈蚣草多糖提取率。

$$Y=\frac{c\times m}{M}\times 100 \quad (1)$$

式中: Y 为蜈蚣草多糖提取率, %; C 为蜈蚣草粗多糖含量, %; m 为蜈蚣草粗多糖重量, g; M 为蜈蚣草粉末重量, g。

1.3.2 超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖单因素试验设计

以料液比 1:20 (g:mL)、酶用量 2.0%、超声温度 50 ℃、超声时间 20 min、超声功率 240 W, 为基准, 以蜈蚣草多糖提取率为评价指标, 其他因素不变的情况下, 分别按照表 1 分别研究酶用量、超声温度、超声时间、超声功率以及料液比对蜈蚣草多糖提取率的影响。

表 1 单因素试验设计

Table 1 Single-factor experimental design

因素	参数				
A: 酶用量/%	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
B: 超声温度/℃	35	40	45	50	55
C: 超声时间/min	10	15	20	25	30
D: 超声功率/W	180	240	300	360	420
E: 料液比(g:mL)	1∶10	1∶15	1∶20	1∶25	1∶30

1.3.3 超声辅助纤维素酶法提取蜈蚣草多糖响应面试验设计

在上述试验结果的基础上, 进一步设计响应面试验, 以获得最优的提取条件。以酶用量、超声温度、超声时间和超声功率 4 因素为自变量, 设计 3 水平响应面试验, 各因素及水平如表 2 所示。

表 2 响应面试验因素及水平

Table 2 Response surface test factor and level

因素	水平		
	–1	0	1
A: 酶用量/%	1.5	2.0	2.5
B: 超声温度/℃	45	50	55
C: 超声时间/min	20	25	30
D: 超声功率/W	240	300	360

1.3.4 蜈蚣草多糖降血糖活性研究

参考刘海瀛等[9]方法, 使用 DNS 法分析不同质量浓度的蜈蚣草多糖溶液和阿卡波糖溶液对 α-淀粉酶的抑制率; 参考 Nguyen 等[17]方法, 使用 4-硝基苯-β-*D*-吡喃葡萄糖苷法分析不同质量浓度的蜈蚣草多糖溶液和阿卡波糖溶液对 α-葡萄糖苷酶的抑制率, 计算其半数抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})。

1.3.5 蜈蚣草多糖降血脂活性研究

参考张芸溪等[18]方法, 使用对硝基苯酚棕榈酸酯法分析不同质量浓度的蜈蚣草多糖溶液和香菇多糖溶液对胰脂肪酶的抑制率, 计算其 IC_{50}; 参考许梦粤等[10]方法, 使用糠醛硫酸法分析不同质量浓度的蜈蚣草多糖溶液和香菇多糖溶液对甘氨胆酸钠和牛磺胆酸钠的结合率, 计算其半数有效浓度(half maximal effective concentration, EC_{50})。

1.4 数据处理

所有试验重复 3 次, 采用 Design-Expert 13.0 软件进行响应面实验设计与数据分析, SPSS 22.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 酶用量对蜈蚣草多糖提取率的影响

如图 1(A)所示, 随着酶用量逐渐增大, 蜈蚣草多糖提取率先逐渐升高再降低的趋势。当酶用量为 2.0%时, 蜈蚣草多糖提取率最大, 为 2.86%±0.04%。酶用量再逐渐增大时, 蜈蚣草多糖提取率反而降低。纤维素酶可以降解植物细胞壁, 破坏细胞壁结构, 从而加速多糖的溶出[14]。酶添加量过大时, 提取溶液中的酶量过多, 造成酶促反应平衡, 无法作用于底物, 且也会造成溶液黏度过大, 溶液传质阻力过大, 阻碍多糖的溶出[19], 所以酶用量选择 1.5%~2.5%作为响应面优化范围。

2.1.2 超声温度对蜈蚣草多糖提取率的影响

如图 1(B)所示, 超声温度逐渐增大, 蜈蚣草多糖提取率先逐渐升高再降低的趋势。当超声温度为 50 ℃时, 蜈蚣草多糖提取率最大, 为 2.86%±0.04%。超声温度再逐渐增大时, 蜈蚣草多糖提取率反而降低。超声温度可以提高纤维素酶活力, 加速酶促反应, 还可加快多糖的溶出[11]。超声温度过大时, 容易造成纤维素酶失活和多糖的降解[19], 所以超声温度选择 45~55 ℃作为响应面优化范围。

2.1.3 超声时间对蜈蚣草多糖提取率的影响

如图 1(C)所示, 超声时间逐渐增大, 蜈蚣草多糖提取率先逐渐升高再降低的趋势。当超声时间为 25 min 时, 蜈蚣草多糖提取率最大, 为(3.52±0.05)%。超声时间再逐渐增大时, 蜈蚣草多糖提取率反而降低。超声时间可以提高超声的空化作用力和机械作用力作用于细胞壁的时间, 破坏细胞壁, 加快多糖的溶出[20]。超声时间过长时, 容易局部温度过高, 造成酶失活或者多糖降解[11−12], 所以超声时间选择 20~30 min 作为响应面优化范围。

2.1.4 超声功率对蜈蚣草多糖提取率的影响

如图 1(D)所示, 超声功率逐渐增强, 蜈蚣草多糖提取

率先逐渐升高再降低的趋势。当超声功率设置为 300 W 时, 蜈蚣草多糖提取率最大, 为 3.73±0.05%。超声功率再逐渐增大时, 蜈蚣草多糖提取率反而降低。超声功率可以提高超声的空化作用力和机械作用力, 加速破坏细胞壁, 加快多糖的溶出[10]。超声功率过大, 可能会破坏多糖的结构, 造成多糖降解[10,18], 所以超声功率选择 240~360 W 作为响应面优化范围。

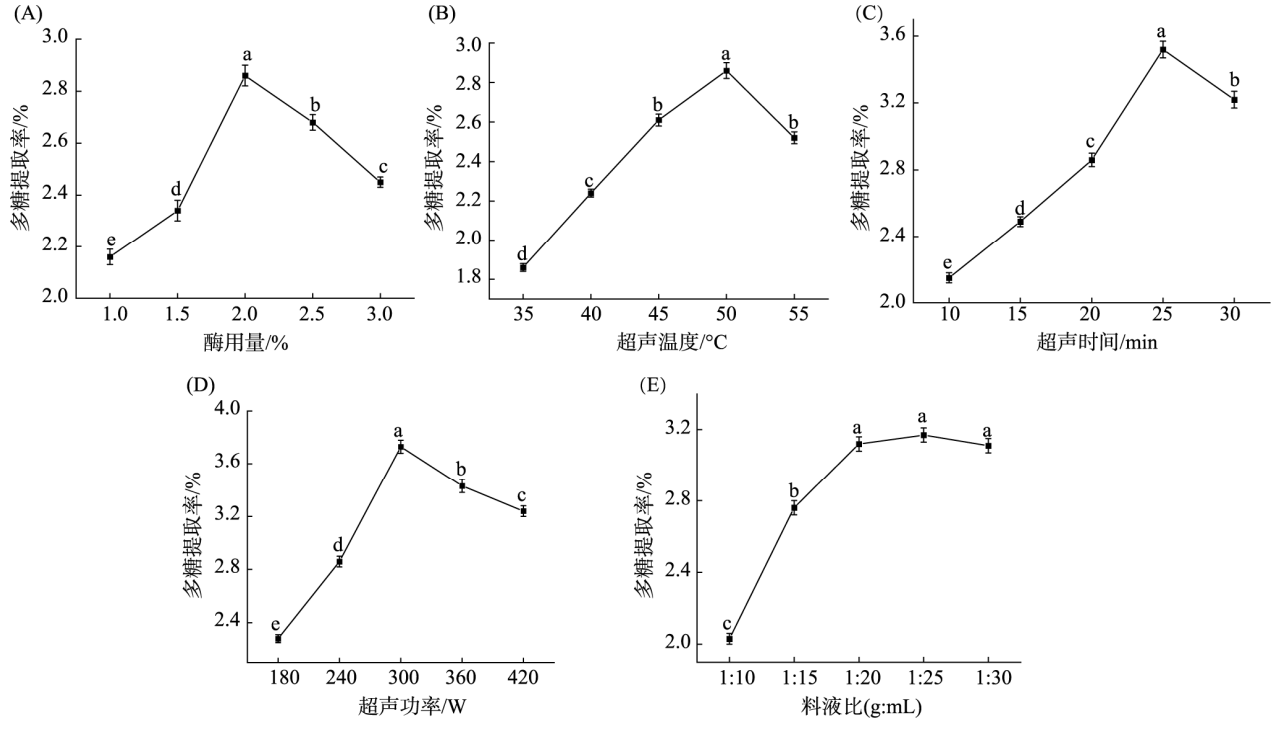
2.1.5　料液比对蜈蚣草多糖提取率的影响

如图 1(E)所示, 料液比逐渐加大, 蜈蚣草多糖提取率先逐渐升高后平稳的趋势, 当料液比设置为 1:20 (g:mL)时, 蜈蚣草多糖提取率达到最大, 为(3.12±0.04)%。料液比的增大, 可提高传质效率, 促进多糖的溶出, 但料液比过大时, 多糖与溶剂传质达到平衡[21], 因此蜈蚣草多糖提取率基本不再发生变化。考虑料液比过大时, 会增加溶剂蒸发的热量成本, 故料液比选择 1:20 (g:mL), 此参数不再进行优化。

2.2　响应面优化试验

如表 3 和表 4 所示, 根据 Design-Expert 13 软件可计算得出单因素酶添加量(A)、超声温度(B)、超声时间(C)和超声功率(D)对蜈蚣草多糖提取率的二次多项式模型方程为: Y=4.13+0.2875A+0.245B+0.1967C+0.2208D+0.0375AB+0.175AC−0.005AD+0.1425BC−0.03BD−0.0875CD−0.5238A^2−0.5976B^2−0.4126C^2−0.3388D^2, P<0.0001, 具有极显著性的差异, 失拟项 P=0.1233, 差异不显著, 表示建立的模型数据精度高。R^2=0.9985, 表示建立的模型拟合度较好, $R_{agj}{}^2$=0.9969, 与 R^2 数值接近, 表示实际的蜈蚣草多糖提取率与预测的蜈蚣草多糖提取率具有很高的相关度。变异系数=0.8254%, 表示实验数据具有较高的精度, 且数据稳定可靠。4 个单因素对的蜈蚣草多糖提取率影响均极显著。在 4 个单因素之间的交互作用中, A 与 C、B 与 C、C 与 D 极显著, A 与 B、B 与 D 显著, A 与 D 不显著。单因素之间响应面曲面坡度越陡, 则说明单因素之间交互作用越显著[22]。如图 2 可知, 除 A 与 D 外, 其他因素两两间形成的响应面曲面坡度均陡峭, 说明 A 与 D 交互作用不显著, 其他因素两两间交互作用显著。

通过多元模型方程分析, 得出蜈蚣草多糖提取率最优提取条件为: 酶添加量为 2.16%、超声温度为 51.23 ℃、超声时间为 21.62 min、超声功率为 316.25 W、料液比为 1:20 (g:mL)。在此条件下, 蜈蚣草多糖提取率为 4.27%。上述最优条件不利于操作, 所以考虑可行性, 将数据进行调整: 酶添加量为 2.2%、超声温度为 51 ℃、超声时间为 22 min、超声功率为 316 W、料液比为 1:20 (g:mL)。在调整后的提取条件下, 经 3 次重复试验, 蜈蚣草多糖提取率为 4.19%±0.08%, 与理论值差异较小, 表明可以使用该工艺条件提取蜈蚣草多糖。本研究最佳提取工艺得到的蜈蚣草多糖含量高于熊俊娟[12]采用热水提取的蜈蚣草多糖, 说明该方法可高效提取蜈蚣草多糖, 适用于蜈蚣草多糖的提取。



注: 不同小写字母表示组间差异显著, P<0.05。

图 1　单因素对蜈蚣草多糖提取率的影响

Fig. 1　Effects of single factor on the extraction rates of *Pteris vittata* polysaccharides

2.3 蜈蚣草多糖对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性抑制作用研究

α-淀粉酶与 α-葡萄糖苷酶是碳水化合物消化吸收过程中最为关键的两种限速酶, 淀粉类多糖首先在 α-淀粉酶的催化下水解为麦芽糖、麦芽三糖等低聚糖, 随后在小肠黏膜表面的 α-葡萄糖苷酶作用下进一步分解为可被肠道吸收的单糖, 进而进入血液引起餐后血糖升高[23–24]。通过抑制 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的活性, 能够有效延缓淀粉类碳水化合物的分解与葡萄糖的释放, 降低餐后血糖峰值, 从而达到改善糖代谢的目的, 以 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶抑制活性为指标, 研究多糖的降血糖活性是最常用的评价指标[25]。

2.3.1 蜈蚣草多糖对 α-淀粉酶活性的影响

如图 3(A)所示, 蜈蚣草多糖和阿卡波糖均能抑制 α-淀粉酶活性, 在一定范围内抑制率与浓度正相关, 蜈蚣草多糖和阿卡波糖对 α-淀粉酶活性最大抑制率分别为 70.21%±2.01%和 89.32%±2.15%, 对其进行 IC_{50} 计算, 分别为 3.52 mg/mL 和 1.48 mg/mL, 表明蜈蚣草多糖具有较强的抑制 α-淀粉酶活性能力, 但其抑制能力弱于阿卡波糖。

2.3.2 蜈蚣草多糖对 α-葡萄糖苷酶活性的影响

如图 3(B)所示, 蜈蚣草多糖和阿卡波糖均能抑制 α-葡萄糖苷酶活性, 在一定范围内抑制率与浓度正相关, 蜈蚣草多糖和阿卡波糖对 α-葡萄糖苷酶活性的最大抑制率分别为 74.23%±1.68%和 87.11%±1.69%, 对其进行 IC_{50} 计算, 分别为 2.75 mg/mL 和 1.58 mg/mL, 表明蜈蚣草多糖具有较强的抑制 α-淀粉酶活性能力, 但其抑制能力弱于阿卡波糖。

综上所述, 蜈蚣草多糖对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶均有一定的抑制其活性能力, 虽然不如阿卡波糖, 但其对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶活性最大抑制率和 IC_{50} 均优于红藻木寡糖[26]和同属蕨类的美丽鳞毛蕨多糖[27], 多糖的降血糖活性与分子量和单糖组成有关, 其多糖分子量越小、单糖组成中阿拉伯糖和木糖物质的量越高、糖醛酸含量约高, 其降血糖活性越好[17], 蜈蚣草多糖在该方面优于红藻木寡糖和美丽鳞毛蕨多糖。蜈蚣草多糖具有一定的应用价值, 具有开发成降血糖功效食品的潜力。

表 3 响应面优化设计试验结果

Table 3 Test results of response surface optimization design

实验编号	*A*: 酶用量/%	*B*: 超声温度/℃	*C*: 超声时间/min	*D*: 超声功率/W	*Y*: 多糖提取率/%
1	0	0	–1	–1	2.84±0.05
2	0	0	0	0	4.11±0.07
3	0	–1	0	1	3.19±0.03
4	0	1	1	0	3.68±0.07
5	0	0	–1	1	3.47±0.08
6	–1	–1	0	0	2.50±0.03
7	0	–1	0	–1	2.68±0.06
8	0	0	1	–1	3.44±0.06
9	1	–1	0	0	3.01±0.03
10	0	–1	1	0	2.91±0.04
11	1	0	–1	0	3.07±0.07
12	1	0	0	1	3.78±0.08
13	–1	0	0	–1	2.76±0.06
14	0	1	0	1	3.63±0.04
15	–1	0	0	1	3.19±0.07
16	0	0	1	1	3.72±0.03
17	0	0	0	0	4.13±0.05
18	–1	1	0	0	2.91±0.04
19	–1	0	1	0	2.95±0.08
20	0	0	0	0	4.13±0.09
21	1	1	0	0	3.57±0.04
22	–1	0	–1	0	2.88±0.03
23	0	1	0	–1	3.24±0.07
24	1	0	0	–1	3.37±0.06
25	0	1	–1	0	3.06±0.05
26	0	0	0	0	4.11±0.04
27	1	0	1	0	3.84±0.07
28	0	–1	–1	0	2.86±0.03
29	0	0	0	0	4.15±0.05

表 4 响应面试验方差分析

Table 4 Analysis of variance in response surface test

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*	显著性
模型	6.950	14	0.4965	648.91	<0.0001	**
A: 酶用量	0.9919	1	0.9919	1296.37	<0.0001	**
B: 超声温度	0.7203	1	0.7203	941.42	<0.0001	**
C: 超声时间	0.4641	1	0.4641	606.62	<0.0001	**
D: 超声功率	0.5852	1	0.5852	764.86	<0.0001	**
AB	0.0056	1	0.0056	7.35	0.0169	*
AC	0.1225	1	0.1225	160.11	<0.0001	**
AD	0.0001	1	0.0001	0.1307	0.7231	
BC	0.0812	1	0.0812	106.16	<0.0001	**

表 4(续)

方差来源	平方和	自由度	均方差	*F*	*P*	显著性
BD	0.0036	1	0.0036	4.71	0.0478	*
CD	0.0306	1	0.0306	40.03	<0.0001	**
A^2	1.780	1	1.780	2326.31	<0.0001	**
B^2	2.320	1	2.320	3027.45	<0.0001	**
C^2	1.100	1	1.100	1443.12	<0.0001	**
D^2	0.7447	1	0.7447	973.31	<0.0001	**
残差	0.0107	14	0.0008			
失拟项	0.0096	10	0.0010	3.43	0.1233	
误差项	0.0011	4	0.0003			

注: *表示差异显著, P<0.05, **表示差异极显著, P<0.01。

2.4　蜈蚣草多糖体外降血脂试验

胰脂肪酶是参与脂肪分解代谢的关键限速酶, 可将甘油三酯水解为游离脂肪酸与单酰甘油, 促进脂肪在肠道内的吸收[28]; 甘氨胆酸钠和牛磺胆酸盐均为胆汁酸盐类物质, 能够乳化脂肪形成微胶粒, 增大脂肪与胰脂肪酶的接触面积, 为脂肪水解提供必要的反应环境[28−29], 故多糖体外降血脂研究中, 常通过多糖抑制胰脂肪酶活性、与甘氨胆酸钠和牛磺胆酸盐结合情况评价其降血脂功效。

2.4.1　蜈蚣草多糖对胰脂肪酶活性的影响

如图 3(C)所示, 蜈蚣草多糖和香菇多糖均能抑制胰脂肪酶活性, 在一定范围内抑制率与浓度正相关, 蜈蚣草多糖和香菇多糖对胰脂肪酶活性的最大抑制率分别为 69.63%±1.98%和 81.58%±2.05%, 对其进行 IC_{50} 计算, 分别为 4.08 mg/mL 和 2.15 mg/mL, 表明蜈蚣草多糖具有较强的抑制胰脂肪酶活性能力, 但其抑制能力弱于香菇多糖。马尾藻多糖和玉米抗性淀粉多糖对胰脂肪酶活性最大抑制率和 IC_{50} 分别为 59.72%±1.89%和 5.78 mg/mL[30], 58.72%±2.33%和 6.35 mg/mL[28], 蜈蚣草多糖优于食蕨多糖和玉米抗性淀粉多糖, 说明蜈蚣草多糖表现出更强的胰脂肪酶抑制潜力。

2.4.2　蜈蚣草多糖对甘氨胆酸钠结合率的影响

如图 3(D)所示, 蜈蚣草多糖和香菇多糖均能结合甘氨胆酸钠, 在一定范围内结合率与浓度正相关, 蜈蚣草多糖和香菇多糖对甘氨胆酸钠的最大结合率分别为 68.39%±1.69%和 78.51%±1.77%, 对其进行 EC_{50} 计算, 分别为 4.45 mg/mL 和 2.38 mg/mL, 表明蜈蚣草多糖具有较强的甘氨胆酸钠结合能力, 但其结合能力弱于香菇多糖。

2.4.3　蜈蚣草多糖对牛磺胆酸盐结合率的影响

如图 3(E)所示, 蜈蚣草多糖和香菇多糖均能结合牛磺胆酸盐, 在一定范围内结合率与浓度正相关, 蜈蚣草多糖和香菇多糖对牛磺胆酸盐的最大结合率分别为 69.22%±2.01%和 80.68%±2.41%, 对其进行 EC_{50} 计算, 分别为 4.38 mg/mL 和 2.74 mg/mL, 表明蜈蚣草多糖具有较强的牛磺胆酸盐结合能力, 但其结合能力弱于香菇多糖。

综上所述, 蜈蚣草多糖对胰脂肪酶有一定的抑制其活性能力, 可结合一定的甘氨胆酸钠和牛磺胆酸盐, 但其结合能力弱于香菇多糖, 但其结合甘氨胆酸钠和牛磺胆酸盐优于密毛蕨多糖[31]和马齿苋多糖[32], 这可能与多糖的分子量以及其螺旋结构等高级结构差异有关[33]。考虑蜈蚣草多糖的原材料成本远低于香菇多糖, 且在蕨类中优于食蕨多糖和美丽鳞毛蕨多糖, 其在开发成降血脂功效食品上仍具有一定优势。

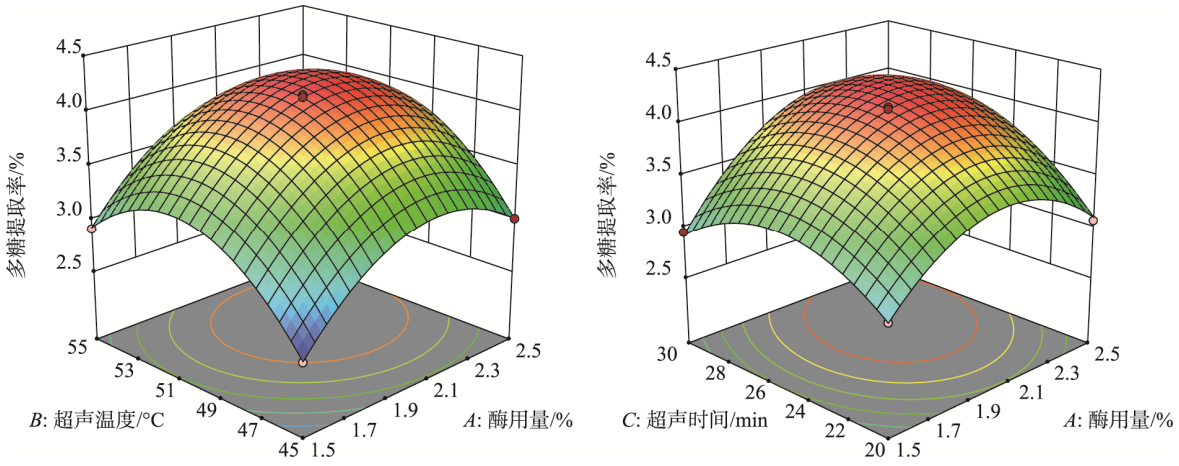


图 2　不同因素间相互作用的响应面图

Fig. 2　Response surface diagram of the interactions among different factors

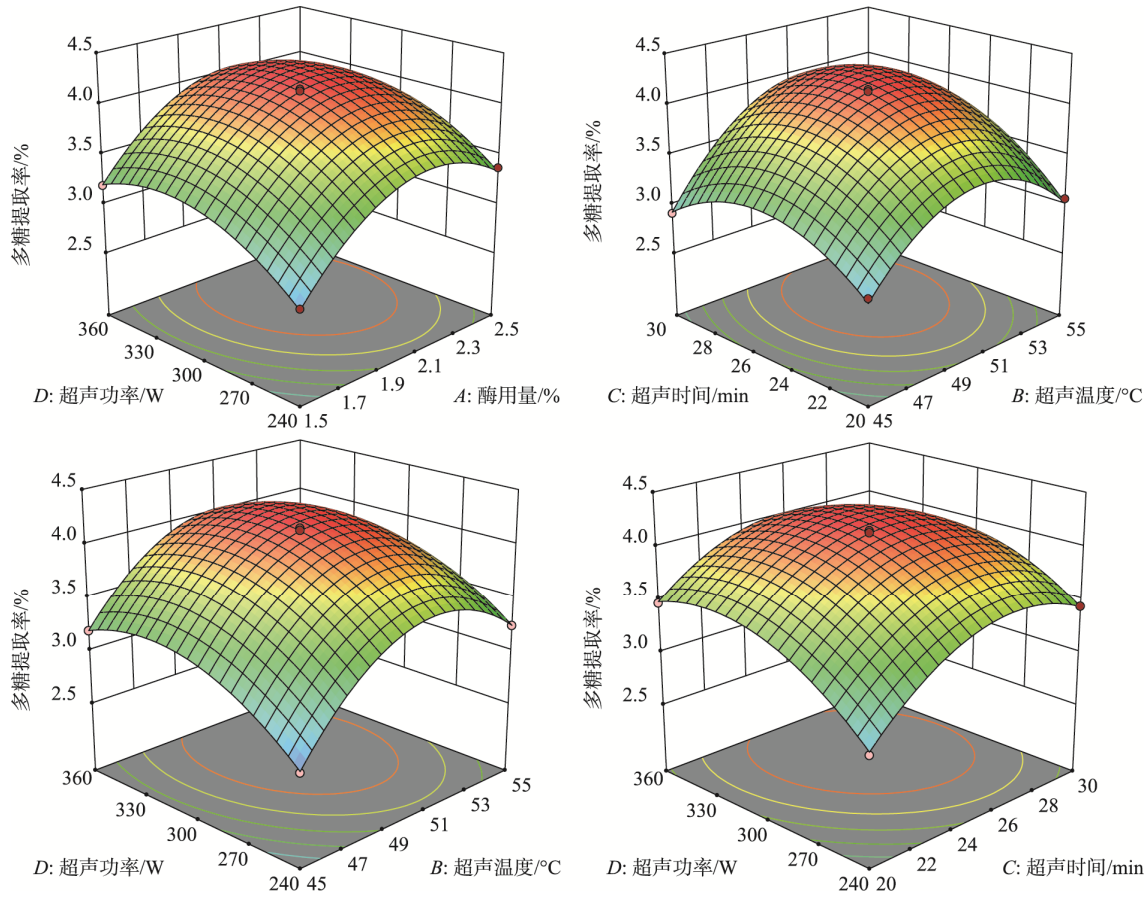


图 2(续) 不同因素间相互作用的响应面图

Fig. 2 Response surface diagram of the interactions among different factors

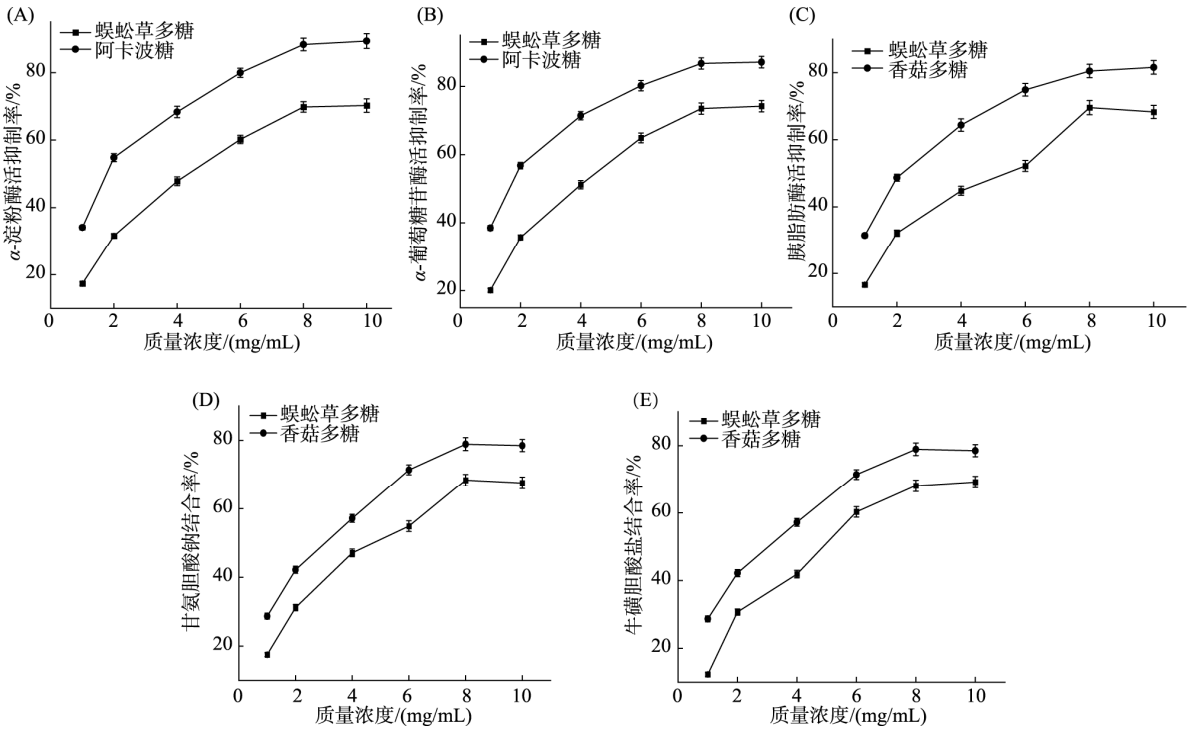


图 3 蜈蚣草多糖的体外降血糖和降血脂作用

Fig.3 *In vitro* hypolipidemic and hypoglycemic effects of *Pteris vittata* polysaccharides

3　结　论

本研究建立了蜈蚣草多糖超声辅助纤维素酶法提取工艺, 并对其降血糖和降血脂活性进行了评价。蜈蚣草多糖最优提取工艺参数为酶添加量为 2.2%、超声温度为 51 ℃、超声时间为 22 min、超声功率为 316 W、料液比为 1:20 (g:mL)。在此提取条件下, 蜈蚣草多糖提取率为 4.19%±0.08%。体外降血糖和降血脂评价结果显示, 蜈蚣草多糖对 α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶的 IC_{50} 分别为 3.52 mg/mL 和 2.75 mg/mL; 对胰脂肪酶的 IC_{50} 为 4.08 mg/mL, 与甘氨胆酸盐和牛磺胆酸盐的 EC_{50} 分别为 4.45 mg/mL 和 4.38 mg/mL, 蜈蚣草多糖具有一定的降血糖和降血脂生物学活性。后续可开展动物学安全性评价试验、动物学评价其体内降血脂和降血糖活性以及机制, 为蜈蚣草多糖的产业化开发提供理论依据。后续也应对粗多糖进行分离纯化, 获得均一精制多糖组分后, 开展分子量分布、波谱结构解析等研究, 深入阐明蜈蚣草多糖构效关系, 筛选出更具有应用潜力的多糖组分。

参考文献

[1] 魏伟, 邹娟, 于巍, 等. 蜈蚣草在少数民族医药中的药用考证[J]. 中国民族医药杂志, 2018, 24(6): 43–44.
Wei Wei, Zou Juan, Yu Wei, et al. Medicinal research of *Pteris vittata* in minority medicine [J]. Chinese Journal of Ethnomedicine and Ethnopharmacy, 2018, 24(6): 43–44.

[2] Feng Ruiqing, Shen Min, Xiao Xiyuan, et al. Synergistic effects of intercropping *Melia azedarach*, *Pennisetum purpureum*, and *Pteris vittata* on phytoremediation of arsenic, cadmium, and lead co-contaminated soils: insights from rhizosphere processes [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2026, 14(2): 121530.

[3] Hajar B, Ahamed M, Yassir E, et al. Evaluation of the antispasmodic and antioxidant activities of an alkaloid extracted from *Pancratium foetidum* Pom. (Moroccan Endemic Amaryllidaceae) [J]. E3S Web of Conferences, 2025, 632: 01007.

[4] Nguyen N P, Nguyen L N, Pham N H, et al. Antioxidant and antibacterial activities of *Pteris vittata* L. extracts from metalliferous soils: correlations with phenolic compounds [J]. Natural Product Communications, 2025, 20(2): 1–12.

[5] 刘英豪, 陈星, 李晓珍, 等. 蜈蚣草提取物对肉鸡生长性能、屠宰性能、抗氧化能力和免疫功能的影响[J]. 中国家禽, 2025, 47(5): 49–54.
Liu Yinghao, Chen Xing, Li Xiaozhen, et al. Effects of *Pteris vittata* extract on growth performance, slaughter performance, antioxidant capacity and immune function of broilers [J]. China Poultry, 2025, 47(5): 49–54.

[6] 侯文成, 韩丹丹, 陈曼丽, 等. 蜈蚣草甲醇提取物的抗氧化活性研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2016, 42(4): 441–444.
Hou Wencheng, Han Dandan, Chen Manli, et al. Antioxidant activity of methanol extract from *Pteris vittata* [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences Edition), 2016, 42(4): 441–444.

[7] 陈雨婷, 彭财英, 马圆媛, 等. 云南地产 10 种凤尾蕨属植物挥发油成分分析及其杀虫活性探讨[J]. 中国野生植物资源, 2025, 44 (7): 8–14, 36.
Chen Yuting, Peng Caiying, Ma Yuanyuan, et al. Analysis of volatile oil components and insecticidal activity of 10 species of *Pteris* from Yunnan [J]. Chinese Wild Plant Resources, 2025, 44(7): 8–14, 36.

[8] Jiao Jian, Deng Peng, Peng Lizeng, et al. Current emerging trends in structure and bioactivities of acidic and alkali-extracted polysaccharides: a review [J]. Industrial Crops & Products, 2026, 243: 123150.

[9] 刘海瀛, 毕金峰, 刘格格, 等. 低温预处理联合冷冻浓缩制备红枣多糖的结构表征及降血糖活性分析[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 277–284.
Liu Haiying, Bi Jinfeng, Liu Gege, et al. Structural characterization and hypoglycemic activity of jujube polysaccharides prepared by low-temperature pretreatment combined with freeze concentration [J]. Food Science, 2025, 46(20): 277–284.

[10] 许梦粤, 田鑫, 王君可, 等. 菜豆多糖与香菇多糖结构特征以及体外重要生物活性综合对比评价[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 2318–2327.
Xu Mengyue, Tian Xin, Wang Junke, et al. Comprehensive comparative evaluation of structural characteristics and key *in vitro* bioactivities of *Phaseolus vulgaris* polysaccharides and *Lentinus edodes* polysaccharides [J]. Food Science, 2024, 45(23): 2318–2327.

[11] 赵欣蕾, 刘宁, 夏其乐, 等. 酶解超声波联合提取桑椹多糖及其抗氧化能力和降血糖活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 292–301.
Zhao Xinlei, Liu Ning, Xia Qile, et al. Enzymolysis-ultrasound combined extraction of mulberry polysaccharides and its antioxidant and hypoglycemic activities [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 292–301.

[12] 熊俊娟. 蜈蚣草多糖和黄酮的提取及抑菌活性研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2012: 20-29.
Xiong Junjuan. Extraction and antibacterial activity of polysaccharides and flavonoids from *Pteris vittata* [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2012: 20-29.

[13] Song Ying, Xiao Jiawei, Li Lin, et al. Ultrasound treatment of crystalline oil-in-water emulsions stabilized by sodium caseinate: impact on emulsion stability through altered crystallization behavior in the oil globules [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 106: 9.

[14] Mao Bo, Lu Wei, Huang Gangliang, et al. Ultrasound-assisted enzymatic extraction, process optimization, and antioxidant activity of polysaccharides from sugarcane peel [J]. Scientific Reports, 2025, 15(1): 12345.

[15] Wu Junlin, Wang Meng, Liao Yutong, et al. Ultrasonic-enzymatic synergistic extraction of *Ophiopogon japonicus* polysaccharides: structural characterization, in vitro hypoglycemic activity, and regulatory mechanism on human gut microbiota [J]. Food Bioscience, 2026, 75: 108138.

[16] 石万银, 赖富丽, 郝桂芳, 等. 党参多糖的提取纯化和免疫调节活性研究[J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(4): 61–66.
Shi Wanyin, Lai Fuli, Hao Guifang, et al. Extraction, purification and immunoregulatory activity of *Codonopsispilosula* polysaccharides [J]. Food and Fermentation Technology, 2025, 61(4): 61–66.

[17] Nguyen T K, Pham K H T, Tran L T T, et al. Alpha-glucosidase inhibitory activities of furanoflavonoids isolated from *Pongamia pinnata*: DFT calculation, molecular modelling and *in vitro* studies [J]. Journal of Applied Microbiology, 2025, 138(2): 112–125.

[18] 张芸溪, 刘童, 王颖, 等. 白芸豆蛋白源降脂肽的提取工艺优化及体外降血脂活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(23): 1–12.
Zhang Yunxi, Liu Tong, Wang Ying, et al. Optimization of extraction process and *in vitro* hypolipidemic activity of lipid-lowering peptides from white kidney bean protein [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(23): 1–12.

[19] 郑玉凤, 陈兆媛, 喻丹丹, 等. 超声波辅助纤维素酶提取佛手山药多糖及其抗氧化活性[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(23): 115–123.
Zheng Yufeng, Chen Zhaoyuan, Yu Dandan, et al. Ultrasound-assisted cellulase extraction of *Foshan Dioscorea* polysaccharides and its antioxidant activity [J]. Food Research and Development, 2025, 46(23): 115–123.

[20] 崔笑傲, 秦雨齐, 兰伟, 等. 超声辅助酶法提取蓝莓多糖工艺研究及其结构特性分析[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(8): 78–86.
Cui Xiaoao, Qin Yuqi, Lan Wei, et al. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic extraction and structural characteristics of blueberry polysaccharides [J]. China Food Additives, 2023, 34(8): 78–86.

[21] Yao Xiaowen, Ma Anting, Wang Guojun, et al. Optimization of ultrasonic extraction and kinetic modeling of *Jieduquyuziyin* prescription polysaccharides via explainable machine learning [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2025, 99: 106892.

[22] 张晓龙, 王宇飞, 都晓伟. 超声辅助纤维素酶法提取穿山龙多糖的工艺优化研究[J]. 化学工程师, 2026, 40(3): 92–97.
Zhang Xiaolong, Wang Yufei, Du Xiaowei. Optimization of ultrasonic-assisted cellulase extraction of *Dioscorea nipponica* polysaccharides [J]. Chemical Engineer, 2026, 40(3): 92–97.

[23] 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 Lipan, Wang Junpeng, Li Bing, et al. 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.

[24] Al-Farsi M A, Al-Dhaheri F S, Al-Mahrooqi A, et al. Structural characterization and functional evaluation of polysaccharides extracted from the heart of date palm (*Phoenix dactylifera* L.): insights into α-amylase inhibition and antidiabetic potential [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 269: 132145.

[25] Qiu Xu, Jiao Lihua, Xue Junjie, et al. Physicochemical characterization and *in vitro*hypoglycemic activity of a low-molecular-weight extracellular polysaccharide from deep-sea *Beauveria bassiana* [J]. Chemistry & Biodiversity, 2026, 23(5): e03649.

[26] Munema M, Hatanaka T, Kishimmura H, et al. Understanding antidiabetic potential of oligosaccharides from red alga *Dulse devaleraeainkyuleei*xylan by investigating α-amylase and α-glucosidase inhibition [J]. Molecules, 2024, 29(7): 1536.

[27] 马继雄, 马祥忠, 曾阳. 美丽鳞毛蕨粗多糖对 α-葡萄糖苷酶及小鼠耐糖量的影响[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(9): 243–246.
Ma Jixiong, Ma Xiangzhong, Zeng Yang. Effects of crude polysaccharide from *Dryopteris pulcherrima* on α-glucosidase and glucose tolerance in mice [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2012, 18(9): 243–246.

[28] Ma Mengge, Zhan Yuanrong, Xiao Xiao, et al. Pancreatic lipase-inhibiting polysaccharide from *Stropharia rugosoannulata*: structural characterization and interaction mechanisms [J]. Food Research International, 2025, 206: 116063.

[29] 刘温凯, 欧阳丹, 徐仰丽, 等. 组合酶制备羊栖菜多糖的工艺优化及其降血脂活性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 237–247.
Liu Wenkai, Ouyang Dan, Xu Yangli, et al. Optimization of combined enzymatic preparation of *Sargassum fusiforme* polysaccharides and analysis of its hypolipidemic activity [J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 237–247.

[30] Daub D C, Michaels L A, Mabate B, et al. Exploring the inhibitory potential of sodium alginate against digestive enzymes linked to obesity and type 2 diabetes [J]. Molecules, 2025, 30(5): 1155.

[31] Wang Kuiwu, Sheng Xinyuan, Wu Bin, et al. Structure characterization of novel heteropolysaccharides from *Pteridium revolutum* with antioxidant and antiglycated activities [J]. Food Chemistry: X, 2023, 19: 100826.

[32] Fu Qiang, Zhi Chenglin, Cai Siyi, et al. *Portulaca oleracea* polysaccharide alleviates obesity in mice with long-term high-fat diet by regulating gut microbiota and metabolites [J]. Frontiers in Nutrition, 2026, 13: 1759556.

[33] Hao Teng, Qiu Limei, Huang Zhizhi, et al. Structural characterization and in vitro hypolipidemic and hypoglycemic activities of a novel neutral polysaccharide from *Siraitia grosvenorii* (Luo Han Guo) flowers [J]. Chemical and Biological Technologies in Agriculture, 2025, 12(1): 1–14.

(责任编辑: 蔡世佳 韩晓红)