李斌, 郑逢曼, 肖雅洁, 等. 窄叶鲜卑花多糖的提取、表征及降血脂作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(10): 218−226. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040151

LI Bin, ZHENG Fengman, XIAO Yajie, et al. Extraction, Characterization and Lipid-lowering Effect of Polysaccharide from *Sibiraea angustata*[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(10): 218−226. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040151

·工艺技术·

窄叶鲜卑花多糖的提取、表征及降血脂作用

李　斌[1], 郑逢曼[1], 肖雅洁[1], 周　悦[2], 王依梦[1], 徐玲霞[1], 曹雷鹏[1,2,*]

（1.江西中医药大学院士工作站, 江西南昌 330004;
2.南昌大学生物质转化教育部工程研究中心, 江西南昌 330047）

摘　要: 为促进窄叶鲜卑花多糖的开发与应用，本论文通过响应面法优化了纤维素酶-超声协同提取窄叶鲜卑花多糖（*Sibiraea angustata* polysaccharide，SAPs）的工艺，并解析其结构特征及降血脂活性。工艺优化结果显示，各因素对 SAPs 得率的影响顺序为液料比>酶添加量>超声时间，且提取 SAPs 的最佳参数为：液料比 20 mL/g、酶添加量 3.5% 及超声时间 70 min，其得率达 6.98%，提取率达到 65.23%。SAPs 是由 9 种单糖残基组成的酸性杂多糖（Mw=87.72 kDa），其中半乳糖含量最高（32.9%），其次是鼠李糖（25.7%）、葡萄糖（15%）、阿拉伯糖（12.6%）。此外，SAPs 对 DPPH 和 $ABTS^+$自由基的清除能力 IC_{50} 分别为 99.53 mg/L 和 94.75 mg/L，显示其潜在抗氧化活性。在降血脂机制方面，SAPs 与胆酸盐的结合能力呈正向线性依赖关系，当 SAPs 浓度达到 5.0 mg/mL 时，其胆酸盐结合率超过 60%，其中与牛黄胆酸盐的结合能力最强。随着 SAPs 浓度升高，斑马鱼体内甘油三酯（ triglycerides，TG）、总胆固醇（total cholesterol，TC）及低密度脂蛋白（ low-density lipoprotein cholesterol，LDL-C）水平呈现剂量依赖性降低。油红 O 染色进一步证实 SAPs 可显著减少斑马鱼尾部脂滴沉积，且作用效果与浓度呈正相关。SAPs 降脂效果呈现浓度依赖性显著增加（P<0.05），当浓度达 5.0 mg/mL 时降脂率为 9.85%，表明 SAPs 可通过剂量调控有效改善高血脂症。该研究结果为利用 SAPs 开发功能性降血脂产品奠定理论基础与技术依据。

关键词: 窄叶鲜卑花, 多糖, 提取, 降血脂, 斑马鱼
中图分类号: TS201.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)10−0218−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040151　　本文网刊:

Extraction, Characterization and Lipid-lowering Effect of Polysaccharide from *Sibiraea angustata*

LI Bin[1], ZHENG Fengman[1], XIAO Yajie[1], ZHOU Yue[2], WANG Yimeng[1], XU Lingxia[1], CAO Leipeng[1,2,*]

（1.Academician Workstation, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China;
2.Engineering Research Center for Biomass Conversion, Ministry of Education, Nanchang University, Nanchang 330047, China）

Abstract: To promote the development and application of *Sibiraea angustata* polysaccharides (SAPs), this study optimized the cellulase-ultrasonic synergistic extraction process of SAPs using response surface methodology (RSM), and further analyzed their structural characteristics and lipid-lowering activity. The results of process optimization indicated that the order of factors influencing the yield of SAPs was: solid-to-liquid ratio>enzyme addition amount >ultrasonic time. The optimal parameters for SAPs extraction were determined as follows: Liquid-to-solid ratio of 20 mL/g, enzyme addition of 3.5%, and ultrasonic time of 70 min, achieving a yield of 6.98% with extract rate of 65.23%. SAPs was an acidic heteropolysaccharide composed of 9 monosaccharide residues (Mw = 87.72 kDa), with highest galactose (32.9%), followed by rhamnose (25.7%), glucose (15%), and arabinose (12.6%). In addition, the IC_{50} values of SAPs for scavenging ability

收稿日期: 2025−04−14
基金项目: 国家自然科学基金（82260761, 81760708）; 江西中医药大学博士科研启动项目（2004-5252301011）。
作者简介: 李斌（1970−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 中药化学, E-mail: 20010260@jxutcm.edu.cn。
*** 通信作者:** 曹雷鹏（1986−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 药食同源产品开发, E-mail: caoleipeng@jxutcm.edu.cn。

DPPH and $ABTS^+$ radicals were 99.53 mg/L and 94.75 mg/L respectively, indicating their potential antioxidant activity. In terms of the lipid-lowering mechanism, SAPs exhibit a positive linear dependence on bile salt binding capacity. The binding rate of bile salt exceeds 60% at 5.0 mg/mL SAPs, with the strongest binding ability observed with taurocholate. With increasing concentrations of SAPs, the levels of triglycerides (TG), total cholesterol (TC), and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) in zebrafish exhibited a dose-dependent decrease. Oil Red O staining further confirmed that SAPs significantly reduced lipid droplet deposition in the zebrafish tail, with the effect demonstrating a concentration-dependent manner. The lipid-lowering effect of SAPs was significantly concentration-dependent (P<0.05). The lipid-lowering rate reached 9.85% at 5.0 mg/mL SAPs, demonstrating that SAPs could effectively ameliorate hyperlipidemia through dose regulation. These results will lay a theoretical and technical foundation for the development of functional lipid-lowering products using SAPs.

Key words: *Sibiraea angustata*; polysaccharide; extraction; lipid-lowering; zebrafish

窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)广泛分布于中国四川、甘肃、西藏等中西部高海拔区域[1−2], 是一种兼具食用与药用价值的珍贵植物资源。因其嫩叶与嫩枝常被制成茶饮, 故俗称“柳茶”, 该植物富含多糖、单萜类、黄酮类等多种活性成分, 在食药领域具有重要研究价值。窄叶鲜卑花多糖(*Sibiraea angustata* polysaccharides, SAPs)作为窄叶鲜卑花中含量最高的主要天然绿色生物活性成分, 其含量高达 10% 左右。该成分由多种相同或不同的单糖残基通过 α-或 β-糖苷键连接而成, 具有清热助消化、调节血脂、抗炎及增强机体免疫活性等显著药用价值, 是窄叶鲜卑花发挥药理作用的核心物质基础[3−4]。据报道 SAPs 对预防和治疗高脂血症具有积极作用, 动物食之会呈现“掉膘”的现象[5−6], 因其特有的生理活性及天然绿色安全性使其在功能性食品开发中具有强大的应用潜力。

目前, 植物多糖的提取方法主要有热水提取法[7]、酶解法[8]、超声法[9]、微波法[10] 及有机溶剂萃取法[11] 等, 其中水热提取法具有操作简单、安全、低成本特点, 但其耗时长、得率低限制了其广泛应用。李思涵等[7] 研究报道采用水提醇沉法 4 h 制备沙子(黄芪)多糖, 其含量达到 5.96%。酶解法具有选择性和专一性, 不会随机破坏多糖的主链结构, 保留了其整体构象, 且该方法安全便捷, 可有效减少提取时间[12−13]。纤维素酶只水解纤维素中的 β-1,4-糖苷键, 对大多数其他多糖(如果胶的 α-1,4-糖苷键)无显著影响[14]。Wei 等[8] 研究对比了木瓜蛋白酶、纤维素酶和果胶酶对黑豆多糖得率的影响, 其中纤维素酶的得率最高。目前, 关于窄叶鲜卑花的研究报道较多, 但关于 SAPs 的制备及相关结构特性缺乏报道。

高血脂症(Hyperlipemia, HLP)是一种由脂肪组织过度堆积和脂质代谢失调而引起的血浆甘油三酯、总胆固醇高于正常参考范围的营养障碍性代谢疾病, 可以引发脂肪肝、动脉粥样硬化、冠心病等心脑血管疾病等, 严重危害人类身体健康[15−17]。临床常用降脂药物(如他汀类、贝特类、烟酸类)虽短期疗效显著, 但无法实现根本性治疗, 且存在头痛、恶心及脱发等明显不良反应[15,18]。目前, 大多数研究集中于治疗高脂血症药物开发, 而对高脂血症的预防缺乏研究报道, 其相关产品更加短缺。

因此, 本研究以窄叶鲜卑花为原料, 利用纤维素酶结合响应面方法优化提取鲜卑花多糖条件, 表征窄叶鲜卑花多糖结构功能特性, 并探究其降血脂效果, 为鲜卑花多糖的高效提取及研发鲜卑花多糖降血脂类的功能性食品提供理论技术依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

窄叶鲜卑花(*Sibiraea angustata*)叶片　采于西藏藏族自治区海拔 3000 m 以上的山林中, 于 60 ℃下干燥至恒重后粉碎, 80 目过筛后用于实验; 斑马鱼(野生型 AB 品系)鱼卵及成鱼　购于杭州环特生物科技有限公司(SYXK(浙)2022-0004), 于 28 ℃ 海水(水质: 200 mg/L 海盐; 电导率 450~550 μS/cm; pH5.0~8.5)中饲养; 斑马鱼成鱼普通饲料(丰年虫虾卵)、成鱼高脂饲料(蛋黄粉)　无棣爱家宠物水族用品有限公司; 透析袋(8~14 kDa)、甘氨胆酸钠盐、牛黄胆酸盐、纤维素酶(8000 U/g)　上海源叶生物科技有限公司; 单糖标品(葡萄糖(Glc)、阿拉伯糖(Ara)、鼠李糖(Rha)、半乳糖(Gal)、岩藻糖(Fuc)、葡萄糖醛酸(GlcA)、半乳糖醛酸(GalA)、木糖(Xyl)、甘露糖(Man))　美国 Sigma 公司; 油红 O 染色试剂盒、DPPH 试剂盒、ABTS 试剂盒、斑马鱼血脂 ELISA 测定试剂盒　江西科瑞斯生物科技有限公司; 乙醇、正丁醇、三氟乙酸等其他试剂　均为分析级, 西陇化工股份有限公司; 实验所用水均为超纯水。

DHG-9076A 电热恒温鼓风干燥箱　上海精其仪器有限公司; WK-400A 高速细胞粉碎仪　潍坊市北方制药设备制备有限公司; FTIR-850 傅里叶变换红外光谱仪　天津港东科技股份有限公司; SpectraMax iD3 酶标仪　中国美谷分子仪器(上海)有限公司; 3110 全自动生化分析仪　日立仪器(苏州)有限公司; 1260 infinityII 高效液相色谱仪及 1290-6545 超高压液相色谱-四级杆质谱仪　美国安捷伦科技(中国)有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　单因素实验　分别准确称取 5.0 g 脱脂的窄叶鲜卑花粉末(W_0), 在 50 ℃、pH6.5、酶解 60 min

和 300 W 超声功率条件下，按超声 60 min、液料比 20(v/m)，探究酶添加量(0%、1%、3%、5%、7%)对 SAPs 得率的影响；按 5% 纤维素酶、液料比 20 mL/g，探究超声提取时间(30、60、90、120、150 min)对 SAPs 得率的影响；按 5% 纤维素酶、超声 120 min，探究液料比(10、20、30、40、50)对 SAPs 得率的影响。采用纤维素酶协同超声技术提取后于 90 ℃ 灭酶 10 min，重复 3 次合并滤液，减压浓缩至 20 mL，按 1∶4 体积比缓慢加入 80 mL 无水乙醇，于 4 ℃ 下静置 12 h 后，4000 r/min 离心 15 min 收集沉淀，将沉淀复溶于 100 mL 水后于 4000 r/min 离心 15 min，上清液采用 Sevag 法脱除蛋白 4~6 次后，置于透析袋(8000 Da)中，超纯水透析 2 d，冷冻干燥获得 SAPs(W)，并按式(1)和式(2)计算 SAPs 得率及提取率。SAPs 含量测定参考苯酚-硫酸法测定。

$$\text{SAPs得率}(\%) = W \times 100/W_0 \quad \text{式（1）}$$

$$\text{SAPs提取率}(\%) = W \times 100/\text{原料中多糖含量} \quad \text{式（2）}$$

1.2.2 响应面优化试验设计 以 Box-Behnken 试验设计原理和方法，根据 SAPs 得率的单因素实验结果，选取酶添加量(A)、超声时间(B)、液料比(C)为自变量，以 SAPs 得率(Y)为响应值，设计三因素三水平的响应面试验，在 50 ℃、pH6.5、酶解 60 min 和 300 W 超声功率条件下，对 SAPs 提取工艺进行进一步优化。响应面分析因素与水平见表 1。

表 1 响应面分析因素与水平

Table 1 Factors and levels of response surface experimental

水平	因素		
	A酶添加量(%)	B时间(min)	C液料比
−1	3	60	10
0	5	90	20
1	7	120	30

1.2.3 单糖组成及含量的测定 样品水解：准确称取样品于具塞管中，加入 0.5 mL、12 mg/L H_2SO_4 溶液，水浴加热 30 min，再加入 2.5 mL 超纯水，继续水浴加热 1.5 h 后，待水解结束后稀释至 5 倍，0.24 μm 滤膜过滤后分析。以岩藻糖、鼠李糖、阿拉伯糖、半乳糖、木糖、甘露糖、葡萄糖、半乳糖醛酸及葡萄糖醛酸为标准品，配制成 0.2 mg/mL 的混合标准溶液。

色谱条件参考 Zhu 等[19]的方法：Thermo ICS 5000+离子色谱系统(ICS 5000+, Thermo Fisher Scientific, USA)；电化学检测器；Dionex™ CarboPac™ PA20(150×3.0 mm, 10 μm)液相色谱柱；进样量为 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，柱温为 30 ℃，洗脱梯度如表 2。

表 2 离子交换色谱梯度洗脱程序

Table 2 Gradient elution procedure for high performance anion exchange chromatography

时间(min)	0	26	42	42.1	52	52.1	60
A(%)	95	85	85	60	60	95	95
B(%)	5	5	5	0	40	5	5
C(%)	0	10	10	40	0	0	0

1.2.4 SAPs 分子量的测定 分子量的测定参考 Zheng 等[20]的方法，并稍加修改。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。SAPs 前处理：将样品溶解在 0.1 mol/L $NaNO_3$ 水溶液(含 0.02% NaN_3, w/w)中，终浓度为 1.0 mg/mL，经 0.45 μm 滤膜过滤后上机检测。

色谱条件：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，等度洗脱时间：75 min。

标准曲线制备：分别配制 2 mg/mL 分子量为 10、50、100、500 和 1000 kDa 的不同葡聚糖标准溶液，过 0.45 μm 水相滤膜，进行色谱分析。

1.2.5 抗氧化活性测定

1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力 取 1.0 mL 不同浓度的 SAPs 溶液(20、50、70、100、200 mg/L)于试管，加入 1.0 mL 0.2 mmol/L DPPH 乙醇溶液混合均匀后，常温下避光反应 20 min，517 nm 处测吸光度值(A_1)。以 1.0 mL 样品和 1.0 mL 乙醇的混合溶液作为对照 A_2，以 1.0 mL DPPH 和 1.0 mL 乙醇的混合溶液作为空白 A_0，V_C 作阳性对照。DPPH 自由基清除率按公式(3)计算。

$$\text{DPPH自由基清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式（3）}$$

1.2.5.2 $ABTS^+$·清除能力 ABTS 工作液的制备：取 5 mL 7.0 mmol/L $ABTS^+$·溶液和 5 mL 2.45 mmol/L $K_2S_2O_8$ 溶液混合，于黑暗常温条件中反应 12 h 后，超纯水稀释至 734 nm 处的吸光度为 0.7±0.03。

取 0.2 mL SAPs 溶液(50、100、200、300、400 mg/L)与 0.8 mL ABTS 稀释后的工作液振荡混合均匀后静置 6 min，于 734 nm 下测定 OD 值(A_1)。用超纯水作为对照，记录 OD 值(A_0)，以 0.2 mL SAPs 溶液和 0.8 mL 超纯水测定值 OD 值(A_2)。$ABTS^+$·清除率按公式(4)计算。

$$ABTS^+\cdot\text{清除率}(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_2}{A_0}\right) \times 100 \quad \text{式（4）}$$

1.2.6 SAPs 结合胆酸盐能力 取 1.5 mL 不同浓度的 SAPs(0.625、1.25、2.5、5.0 mg/mL)溶液，加入 1.5 mL 10 mg/mL 人工胃液，加入 0.5 mL 0. 01 mol/L 的 HCl 溶液，37 ℃ 水浴消化 1 h，并用 0.01 mol/L NaoH 溶液调节 pH 至 6.8，再加入 2.0 mL 10 mg/mL 人工肠液，37 ℃ 水浴消化 1 h，再分别加入牛黄胆酸盐和甘氨胆酸钠，37 ℃ 水浴反应 1 h 后，4000 r/min 离心 10 min 后，取 1.0 mL 上清液，加入 3.0 mL 60 %

硫酸溶液, 70 ℃ 水浴加热 20 min, 取出冷却至室温, 于 387 nm 波长处测吸光度, 以 PBS 代替牛黄胆酸盐和甘氨胆酸钠溶液作为空白, 按公式(5)计算牛黄胆酸盐、甘氨胆酸钠结合率。

$$\text{胆酸盐结合率}(\%) = \frac{\text{空白溶液中胆酸盐浓度} - \text{样品溶液中胆酸盐浓度}}{\text{空白溶液中胆酸盐浓度}} \times 100$$

式（5）

1.2.7　斑马鱼高血脂模型的构建及降脂实验

1.2.7.1　斑马鱼幼鱼高血脂模型建立及降脂质率计算　实验参考郭子斌等[21] 的方法, 180 尾斑马鱼幼鱼系由受精 5 d 后的鱼卵发育而来, 其中 30 尾作为正常对照组, 而 150 尾饲喂 0.1% 的蛋黄粉溶液喂饲幼鱼 2 d, 每 12 h 换液一次, 建立高血脂模型。将高血脂斑马鱼幼鱼随机分为高血脂模型组、辛伐他汀组(0.5 μg/mL)、SAPs 处理组(高、中、低)等 5 组, 每组 30 条, 体系总体积为 30 mL。对照组正常饲喂虫虾卵, 而其余 5 个处理组在饲喂虫虾卵的基础上均添加 0.1% 蛋黄粉, 25 ℃ 恒温饲喂 2 d 后。将斑马鱼用 4% 多聚甲醛固定 12 h, 用 PBS 缓冲液(pH7.4)清洗 3 次, 用 60% 异丙醇浸洗 20~30 s 后, 转移至油红 O 染色液中, 避光染色 3 h, 在经 60% 异丙醇、PBS 溶液浸洗多余的染料和杂质, 封片后于显微镜下观察斑马鱼尾部血管油红 O 染色后观察幼鱼体内脂质积累情况。利用 Image-Pro Plus 6.0 高级图像处理软件计算血脂光密度总和(Integrated optical density, IOD)作为染色的相对定量指标。通过比较模型组和 SAPs 处理组的 IOD 值, SAPs 降脂率按公式(6)计算。

$$\text{降脂率}(\%) = \frac{\text{模型组 IOD} - \text{处理组 IOD}}{\text{模型组 IOD}} \times 100$$

式（6）

1.2.7.2　斑马鱼血脂检测　斑马鱼鱼卵受精后发育至 5 d 的幼鱼, 经持续饲喂 2 d 后, 每组随机选取 20 条幼鱼, 加入 150 mL 乙醇溶液并充分混匀, 采用高速低温组织研磨仪进行匀浆处理后, 于 10000 r/min 离心 15 min 收集上清液; 随后采用甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)及低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)检测试剂盒, 依次测定上清液中 TG、TC 和 LDL-C 的含量。

1.3　数据处理

以上所有实验均重复 3 次, 数据结果以 mean± SD 表示。采用 SPSS 27.0 软件进行统计学单因素方差(One-way ANOVA)分析(P<0.05), 采用 Excel 2013、Origin 8.5 和 AI 2020 软件进行数据处理和分析。

2　结果与分析

2.1　酶添加量、超声时间、液料比对 SAPs 得率的影响

图 1 显示纤维素酶添加量、超声时间、液料比对 SAPs 得率的影响。由图 1a 可知, 在超声 60 min 和液料比 20 的提取条件下, 纤维素酶质量分数为 0~5%, SAPs 的得率随着酶添加量增加而显著(P<0.05)提高, 其可能与植物细胞壁结构损伤加剧存在关联, 当细胞壁被破坏时, 细胞膜渗透性随之增强, 促使细胞内容物加速外溢, 最终导致胞内溶出物浓度显著提升[13]。当纤维素酶添加量为 5%, SAPs 得率达到 6.69%(w/w), 若继续添加纤维素酶至 7%, SAPs 得率无显著性差异(P>0.05), 其可能是当酶浓度超过临界阈值时, 窄叶鲜卑花细胞壁的裂解过程已呈现饱和效应, 致使水溶性 SAPs 的溶出效率趋于稳定。

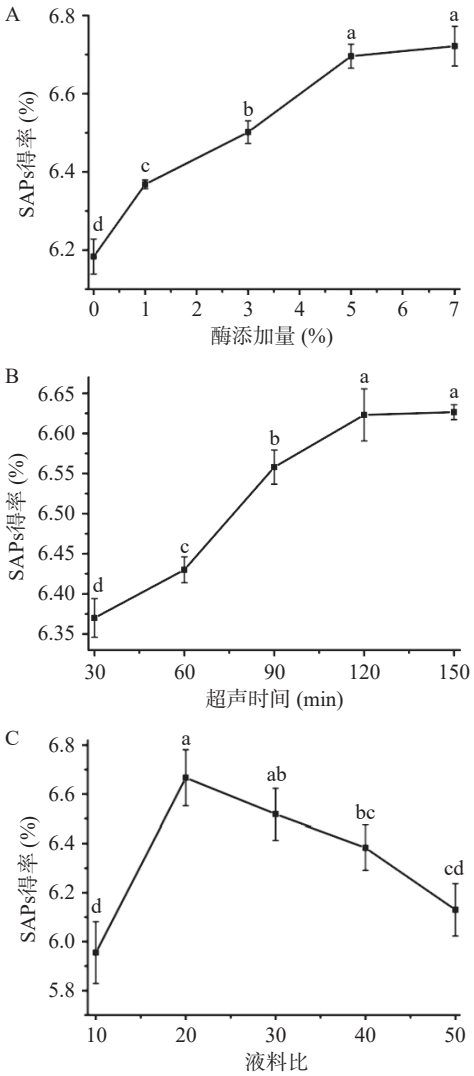


图 1　酶添加量(A)、超声时间(B)、液料比(C)对 SAPs 得率的影响

Fig.1　Effects of enzyme addition amount (A), ultrasonic time (B), and liquid-material ratio (C) on polysaccharides extracted from *Sibiraea angustata*

注: 图中不同字母代表显著性差异, P<0.05; 图 5 同。

图 1b 显示在 5% 纤维素酶与液料比 20 提取条件下, 超声提取时间小于 120 min 时, 随着提取时间增加, SAPs 得率显著增大(P<0.05), 可能由于超声波空化效应增强导致窄叶鲜卑花细胞壁结构破坏加剧, 从而促进内容物溶出[9]。超声时间 120 min, SAPs 得

率达最大 6.62%，表明细胞壁组织破坏程度达到最大值。之后随着超声提取时间继续增加，SAPs 得率趋于平稳。

图 1c 可知，在 5% 纤维素酶与超声 120 min 的提取条件下，SAPs 得率随着液料比的增加呈现先增加后递减的趋势。液料比小于 20 时，窄叶鲜卑花叶片细胞内、外多糖的浓度梯度增大，SAPs 得率呈增大趋势。液料比为 20 时，SAPs 得率达到最高值 6.67%。液料比超过 20 时，SAPs 得率随着液料比增加而显著下降(P<0.05)，其主要归因于体系中水分比例过高，导致单位体积内水相吸收的超声波能量减少，使得细胞壁破碎程度不足，进而造成 SAPs 得率下降。

2.2 响应面优化试验结果

2.2.1 回归模型的构建与解析 单因素实验结果可知，酶添加量(5%)、超声时间(120 min)和液料比(20)条件下能够得到 SAPs 的最大得率。以酶添加量(A)、超声时间(B)和液料比(C)为研究对象，以 SAPs 得率为响应值，采用 Box-Behnkens 试验设计法设计响应面，优化 SAPs 提取方案，试验设计及结果如表 3 所示。利用 Design Expert 8.0 软件，对表 3 数据进行多元回归拟合，并建立 SAPs 得率与以上因素的二次多元回归模型为：$Y=2.10818+0.381263A+0.0304682B+0.197685C+1.25\times10^{-4}AB-3.042\times10^{-3}AC+0.9410^{-4}BC-0.026626A^2-0.179\times10^{-3}B^2-3.723\times10^{-3}C^2$。

表 3 SAPs 提取的响应面试验设计及结果

Table 3 Design and corresponding results of SAPs extraction by response surface experimental

实验号	A(酶添加量)	B(超声时间)	C(液料比)	SAPs得率(%)
1	1	1	0	6.94
2	0	0	0	7.06
3	−1	−1	0	6.60
4	0	1	1	6.99
5	0	0	0	6.89
6	0	−1	1	6.82
7	1	−1	0	6.93
8	0	0	0	7.10
9	−1	1	0	6.58
10	0	1	−1	6.12
11	0	0	0	7.06
12	1	0	1	7.01
13	0	0	0	7.06
14	−1	0	−1	5.97
15	1	0	−1	6.27
16	−1	0	1	6.96
17	0	−1	−1	6.06

对酶耦合超声提取 SAPs 的回归数学模型进行方差分析，以检验方程的有效性和各因子的偏回归系数，其结果如表 4 所示。通过统计学分析可知该实验建立的模型 P<0.0001，表明该回归模型达到高度显著水平，且模型非常合适。失拟项 P 值为 0.4567>0.05，表明该模型对本实验拟合程度较高，非实验因素影响较小[22]。回归方程 R^2 值为 0.9795 说明该模型对各个实验点的匹配度达到 97.95%，拟合度较高，基本可利用该模型预测上述提取条件下 SAPs 的分析和得率。此外，回归方程系数 B、AB、AC、BC 项的影响不显著(P>0.05)，而 A^2 项的影响显著(P<0.05)，A、C、B^2、C^2 项影响极显著(P<0.01)。由 F 值可知，影响 SAPs 得率的因素顺序为液料比(C)>酶添加量(A)>超声时间(B)。

表 4 二次多项式模型的方差分析

Table 4 Analysis of variance regression model

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	2.37	9	0.2637	37.20	<0.0001**
A酶添加量	0.1369	1	0.1369	19.32	0.0032**
B超声时间	0.0052	1	0.0052	0.7296	0.4214
C液料比	1.41	1	1.41	199.45	<0.0001**
AB	0.0002	1	0.0002	0.0317	0.8637
AC	0.0148	1	0.0148	2.09	0.1917
BC	0.0032	1	0.0032	0.4529	0.5225
A^2	0.0478	1	0.0478	6.74	0.0357*
B^2	0.1087	1	0.1087	15.33	0.0058**
C^2	0.5837	1	0.5837	82.34	<0.0001**
残差	0.0496	7	0.0071		
失拟项	0.0221	3	0.0074	1.07	0.4567
纯误差	0.0276	4	0.0069		

注：*P<0.05表示差异显著，**P<0.01表示差异极显著。

2.2.2 响应面交互作用分析及最佳提取条件 研究表明，响应面越陡表明两因素之间交互作用越显著，若等高线排列密集且闭合曲线趋于椭圆形，则表示两因素交互效应对响应值的影响显著，而圆形则与之相反[23−24]。由图 2 可知，通过对 3 个曲面的分析可以

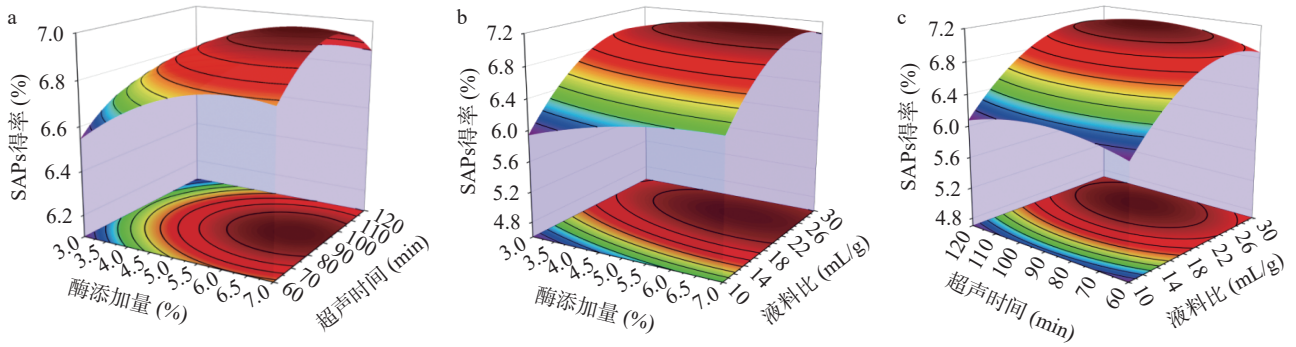


图 2 窄叶鲜卑花多糖提取的各因素交互作用的响应面图和等高线图

Fig.2 Response surface and contour plots showing the effects of interactions of various factors on the yield of SAPs

预测和检验变量的响应值及确定变量之间的相互关系。3 个因素两两交互作用的响应面图坡度平缓，且在等高线图趋于圆形，表明响应面交互因素作用不显著。通过响应面的陡峭程度分析发现，液料比对 SAPs 得率的影响最大，其次是酶添加量和超声时间，这与方差分析的结果基本一致。

通过 Design-Expert 8.0 软件分析，经响应面优化后的最优条件：酶添加量 3.48401%、超声时间 69.8811 min、液料比 20.3237，SAPs 得率为 6.7997%。根据实际操作可行性，将条件修正为酶添加量 3.5%、超声时间 70 min 及液料比 20，经过 3 次平行试验得到实测平均 SAPs 得率为 6.98%±0.22%，提取率达到 65.23%±0.75%，与预测值相比，相对误差约为 2.58%，表明该响应面模型可以有效地反映出 SAPs 提取的条件。

2.3　SAPs 单糖组成、含量及分子量

苯酚-硫酸法分析表明窄叶鲜卑花中 SAPs 的总含量达 10.7%。此外，采用 HPLC-PMP 分析 SAPs 组分的单糖组成及含量（图 3a~图 3b），结果显示 SAPs 是一种非常复杂的酸性杂多糖，含有 9 个单糖残基，其中半乳糖（Gal）相对质量最高，占比达到 32.9%，其次是鼠李糖（Rha，25.7%）、葡萄糖（Glc，15%）、阿拉伯糖（Ara，12.6%）、甘露糖（Man，4.8%）、半乳糖醛酸（Gal-A，3.0%）、木糖（Xyl，2.6%）、葡萄糖醛酸（Glc-A，2.2%）、岩藻糖（Fuc，1.3%）。

分子质量是多糖的重要结构指标，影响多糖的理化和生物活性等性质。图 3c 为高效凝胶排阻色谱（HPGPC）法分析了 SAPs 的分子量。SAPs 的峰位分子量（Mp）为 27.64 kDa，重均分子量（Mw）为 87.72 kDa，数均分子量（Mn）为 40.12 kDa，多分散性指数（Mw/Mn）=2.186，大于 1.0，表明 SAPs 的平均分子量比较分散，且纯度偏低。

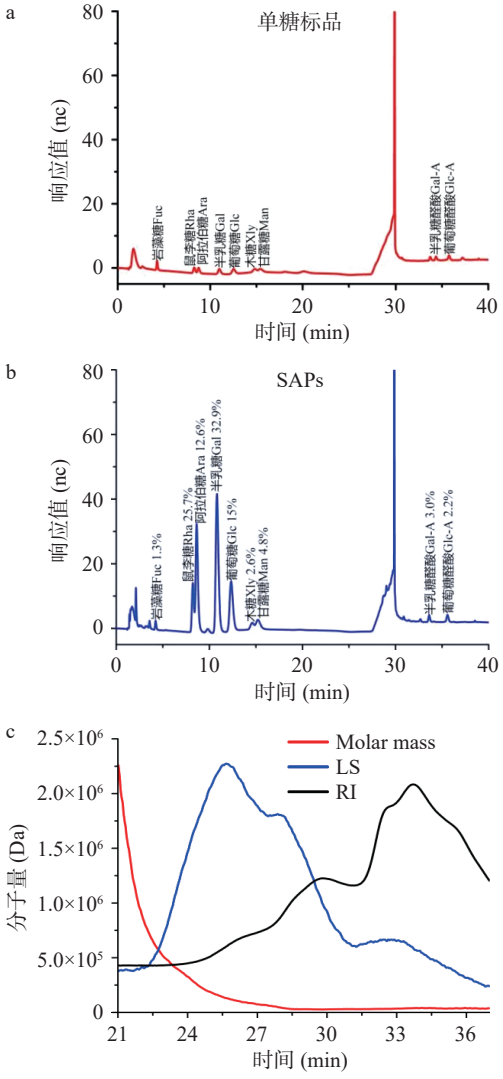


图 3　单糖标品液相色谱图（a）及 SAPs 中单糖残基含量（b）及分子量大小（c）

Fig.3　HPLC spectrum (a) compositions (b) and molecular weight (c) of monosaccharide residues in SAPs

2.4　抗氧化活性分析

DPPH 及 $ABTS^{+\cdot}$ 自由基的清除率是评判抗氧化剂的抗氧化能力的常用指标[25]。图 4 显示 SAPs 对 DPPH 及 $ABTS^{+\cdot}$ 自由基的清除能力。结果表明，SAPs 清除 DPPH 及 $ABTS^{+\cdot}$ 自由基能力呈现剂量依赖性，且随质量浓度的增大而显著增强（$P<0.05$），呈明显的正向量效关系。图 4a 显示 SAPs 浓度为 200 mg/L 时，DPPH 自由基清除率可高达 86.33%，接近于同质量浓度的 V_C 清除效果。当 SAPs 浓度为 400 mg/L，$ABTS^{+\cdot}$ 清除率保持在 94% 左右，接近于同质量浓度 V_C（图 4b）。IC_{50} 值是自由基清除率达到 50% 时的 SAPs 质量浓度，IC_{50} 越小，SAPs 的抗氧化效果越好，反之越大。根据线性回归方程计算 SAPs 对 DPPH 和 $ABTS^{+\cdot}$ 自由基清除能力的 IC_{50}

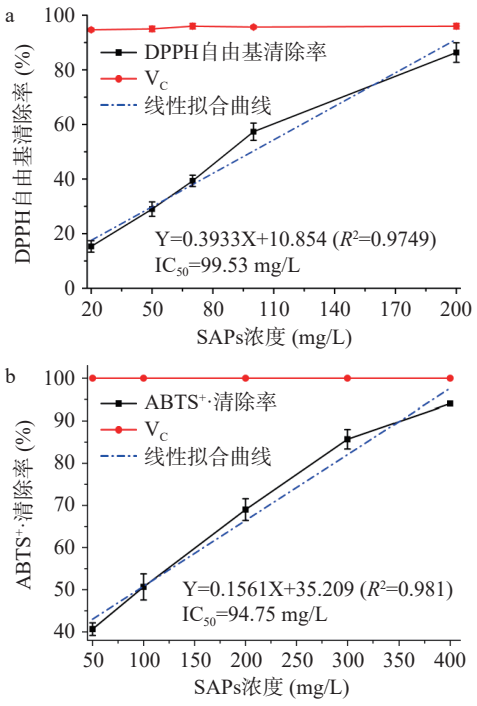


图 4　不同浓度 SAPs 的 DPPH（a）及 $ABTS^{+\cdot}$（b）自由基清除活性

Fig.4　Scavenging activity of DPPH (a) and $ABTS^{+\cdot}$ (b) with different concentration of SAPs

为 99.53 mg/L 和 94.75 mg/L，远低于金银花多糖[26]及天麻多糖[27]的 IC_{50} 值，因此，SAPs 可作为潜在有效的自由基清除剂。

2.5 SAPs 体外降血脂活性

在体外条件下，模拟人体胃肠环境进行胆酸结合实验，分析多糖的胆酸结合能力，可有效评估多糖降血脂的作用效果[28]。两种胆酸盐标准曲线的线性回归方程为：牛黄胆酸盐方程 y=1.73887x+0.11286（R^2=0.99636），甘氨胆酸钠方程 y=1.95129x+0.05797（R^2=0.9979）。由图 5 可知，SAPs 对胆酸盐的结合能力随着多糖浓度的增加而显著提高（P<0.05），但与不同胆酸盐的结合能力存在差异。SAPs 对 2 种胆酸盐的结合能力为：牛黄胆酸盐>甘氨胆酸钠。当 SAPs 浓度达到 5.0 mg/mL 时，与牛黄胆酸盐、甘氨胆酸钠的结合率分别为 75% 和 61%，均大于 50%，远高于纪慧杰等[29]石榴多糖（12 mg/mL）对胆酸盐的结合率（40.09% 牛黄胆酸盐和 34.90% 甘氨胆酸盐）。该研究结果表明，SAPs 与不同种类胆酸盐均表现出较高结合特性，其中对牛黄胆酸盐的结合效应尤为突出，其主要原因可能与其复杂的空间构象密切相关，如糖醛酸单元中的酸性基团与胆酸盐产生强效的静电结合作用，其次是多糖疏水区域与胆酸盐甾核形成的疏水作用力产生协同结合效应[30−31]。

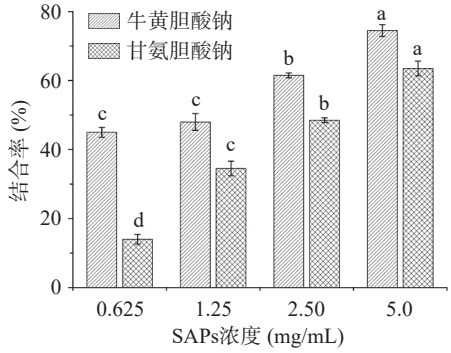


图 5 窄叶鲜卑花多糖的体外胆酸盐结合率

Fig.5 Bile acid binding capacities of SAPs *in vitro*

2.6 SAPs 体内降血脂活性

2.6.1 油红 O 染色及血脂光密度 油红 O 染色后细胞内脂滴呈红色。通过显微镜观察如图 6a 所示，正常对照组斑马鱼尾部血管无明显脂滴，高脂饮食模型组斑马鱼尾部血管可见大量脂滴沉积，表明斑马鱼的血脂水平明显提高。SAPs 组斑马鱼尾部脂滴比模型组明显减少，且随着浓度增加，脂滴沉积量逐渐减少，但高于辛伐他汀组斑马鱼尾部脂滴沉积量，表明 SAPs 可有效改善高脂血症，且呈剂量依赖性。图 6b 显示各处理组对斑马鱼尾部血脂光密度值的影响效果。模型组的 IOD 值为 354689.4 像素。辛伐他汀组与模型组相比，IOD 值下降了 19.44%。SAPs 处理组的 IOD 值随着浓度提高而显著降低（P<0.05），说明其降脂率逐渐增加。在 5.0 mg/mL SAPs 条件下，其 IOD 值降低至 319710.9 像素，其降脂率达到

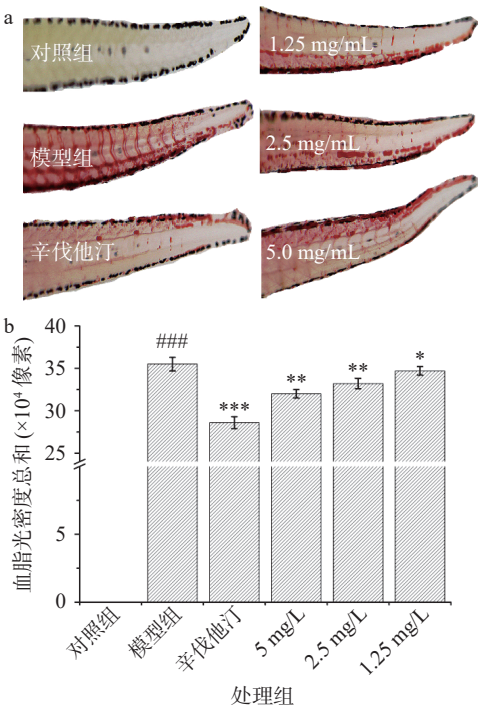


图 6 斑马鱼尾部的油红 O 染色（a）及各处理组的血脂光密度总和值（b）

Fig.6 Oil red O staining in zebrafish tails (a) and total light density of blood lipid in all groups (b)

注：与正常对照组比较，$^{###}P$<0.001；与模型组比较，$^{*}P$<0.05，$^{**}P$<0.01，$^{***}P$<0.001。

9.85%，表明 SAPs 缓解高脂血症效果明显，且呈现一定的剂量依赖关系，其主要归因于 SAPs 的抗氧化协同效应和肝脂酶分解作用[15,32]。

2.6.2 TG、TC 及 LDL-C 含量变化 血清 TG、TC 及 LDL-C 含量是评价高血脂症的重要指标[15−16]。图 7 显示了 SAPs 对高血脂斑马鱼血脂水平的影响。与对照组相比，模型组的 TG、TC 及 LDL-C 含量均显著提高（P<0.05），表明成功构建了高血脂斑马鱼模型。TG、TC 及 LDL-C 水平随着 SAPs 浓度增加而逐渐下降，呈现出一定量效关系，其中，与模型组相比，SAPs 在高剂量下处理效果尤为显著（P<0.001）。在 5.0 mg/mL SAPs 条件下，TG、TC 及 LDL-C 浓度分别降低至 0.34、0.155 及 0.055 mmol/L，与模型组相比，分别下降了 18.4%、8.82% 及 17.5%。此外，高剂量组 SAPs（5.0 mg/mL）与辛伐他汀处理组的 TG 水平无显著性差异（P>0.05），辛伐他汀是一种广泛应用的他汀类药物，主要通过抑制肝脏的 HMG-CoA 还原酶来降低胆固醇合成，从而有效降低血脂水平[31]。SAPs 则可能通过多种生理机制来调节脂质代谢，尤其是通过抗氧化、抗炎以及改善脂肪代谢的作用，其主要涉及以下三方面：首先，抗氧化协同作用，清除 DPPH 自由基，阻断泡沫细胞形成，有效保护低密度脂蛋白免受氧化修饰；其次，激活脂蛋白脂酶（LPL）和肝脂酶（HL），加速甘油三酯分解；最后，SAPs 分子中的 β-葡萄糖苷结构能够与胆汁酸形成稳定复合物，减少胆汁酸重吸收，促使肝细胞加速胆

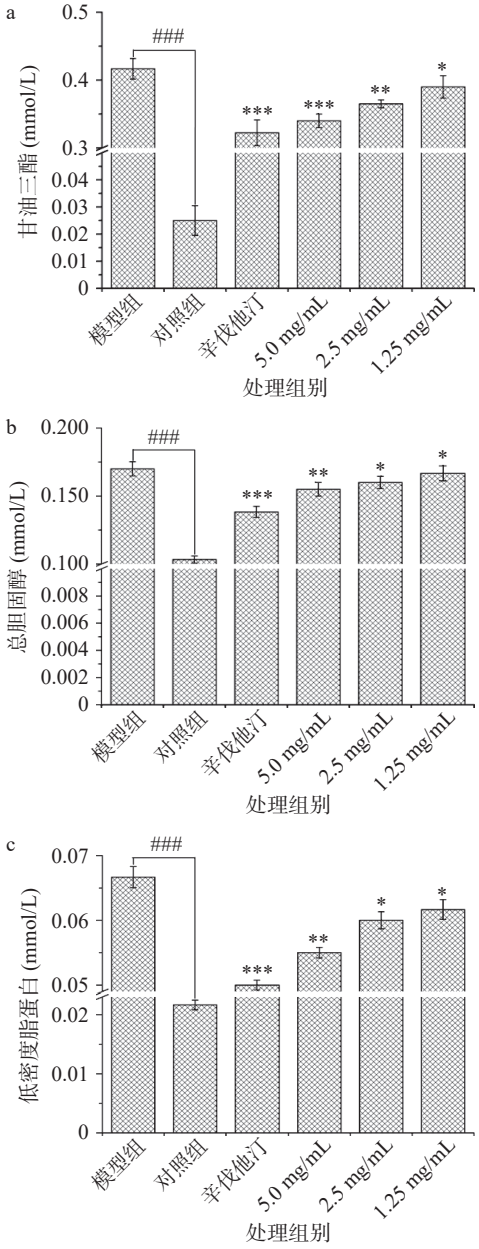


图 7　窄叶鲜卑花多糖对血清甘油三酯 (a)、总胆固醇 (b) 及低密度脂蛋白 (c)水平的影响

Fig.7　Effects of SAPs on TG (a), TC (b) and LDL-C (c) levels

注：与对照组比较，$^{###}P$<0.001；与模型组比较，*P<0.05，**P<0.01，***P<0.001。

固醇代谢用于胆汁酸合成，从而降低血清胆固醇水平[33−34]。尽管斑马鱼是研究代谢机制的常用模型生物，但由于其与哺乳动物存在显著的生理差异，相关研究成果还需在哺乳动物模型中得到进一步验证，才能评估其潜在的临床应用价值。

3　结论

本论文采用纤维素酶-超声协同处理技术，成功优化并提取了窄叶鲜卑花多糖，系统分析了其结构特征与功能活性，并深入探索了其在脂质代谢调控中的潜在应用价值。该技术最佳条件下 SAPs 得率可达到 6.98%，SAPs 主要是含有半乳糖、鼠李糖、葡萄糖、甘露糖、阿拉伯糖、半乳糖醛酸、木糖、葡萄糖醛酸、岩藻糖等 9 种单糖残基的吡喃型酸性杂多糖，其平均分子量为 87.72 kDa。此外，SAPs 可作为潜在有效的抗氧化剂，与胆酸盐的结合能力呈正向剂量依赖关系，有效降低 TG、TC 及 LDL-C 水平，明显减少斑马鱼尾部脂滴沉积量，表明 SAPs 可以有效改善高血脂症的作用，且呈一定的剂量依赖关系。该研究为窄叶鲜卑花及 SAPs 的综合利用提供了新的视角，特别是在功能性食品和天然降脂剂的开发方面具有重要意义。未来应进一步深入研究 SAPs 的分子机制，以推动其在临床和大健康产业中的应用。

© 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] CHEN Zilong, LIU Hongdong, CHEN Jie, et al. Separation and enrichment of sibiskoside from *Sibiraea angustat* with magnetic surface dummy template molecularly imprinted polymers[J]. Journal of Chromatography B, 2021, 1178: 122767.

[2] 刘宏栋, 高余英, 高琦, 等. 窄叶鲜卑花地上部分化学成分及降血脂活性研究[J]. 中草药, 2022, 53(14): 4276−4284. [LIU Hongdong, GAO Yuying, GAO Qi, et al. Chemical constituents from the aerial part of *Sibiraea angustat*a and their hypolipidemic activity[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2022, 53(14): 4276−4284.]

[3] YU Jinyan, SUN Jianguang, SUN Min, et al. Protective mechanism of *Coprinus comatus* polysaccharide on acute alcoholic liver injury in mice, the metabolomics and gut microbiota investigation [J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(1): 401−413.

[4] ZHANG Tingting, ZHAO Wenying, XIE Beizhen, et al. Effects of *Auricularia auricula* and its polysaccharide on diet-induced hyperlipidemia rats by modulating gut microbiota[J]. Journal of Functional Foods, 2020, 72: 104038.

[5] 王佳冰, 柴成奎, 陈平, 等. 藏药柳茶提取物对单纯性肥胖大鼠脂质代谢的影响[J]. 中药新药与临床药理, 2010, 21(2): 148−149, 176. [WANG Jiabing, CHAI Chengkui, CHEN Ping, et al. Effects of extract from *Sibiraea angustat*a(rchd). hand. -mazz on lipid metabolism in rats with simple obesity[J]. Traditional Chinese Drug Research and Clinical Pharmacology, 2010, 21(2): 148−149, 176.]

[6] 卓玛才仁, 张旭斌, 王宁, 等. 响应面法优化窄叶鲜卑花叶片多糖提取工艺[J]. 青海大学学报, 2020, 38(3): 67−72. [ZHUO Macairen, ZHANG Xubin, WANG Ning, et al. Optimization of extraction process of polysaccharides from *Sibiraea angustat*a(Rehd.) Hand-Mazz by response surface method[J]. Journal of Qinghai University, 2020, 38(3): 67−72.]

[7] 李思涵, 王君巧, 聂少平. 沙苑子多糖的提取纯化与结构解析[J]. 食品科学, 2023, 44(10): 310−316. [LI Sihan, WANG Junqiao, NIE Shaoping. Isolation, purification and structural characterization of polysaccharides from semen astragali complanati[J]. Food Science, 2023, 44(10): 310−316.]

[8] WEI J Q, XIAO C L, LU N, et al. Extraction of polysaccharides from black soybean by enzyme hydrolysis method[J]. Medicial Plant, 2014, 5(2): 1−4,8.

[9] LI Junchi, CHEN Zhongxuan, SHI Huimin, et al. Ultrasound-assisted extraction and properties of polysaccharide from *Ginkgo biloba* leaves[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106295.

[10] CHEN Xianxiang, YANG Jun, SHEN Mingyue, et al. Structure, function and advance application of microwave-treated

polysaccharide: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 123: 198−209.
[11] 刘旭, 孟继坤, 葛鑫会, 等. 低共熔溶剂提取的黄精多糖性质分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(11): 52−57. [LIU Xu, MENG Jikun, GE Xinhui, et al. Properties of polysaccharides from *Polygonatum sibiricum* extracted with deep eutectic solvents[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(11): 52−57.]
[12] LIU Xiaocui, LI Zhongqiao, XU Lin, et al. Optimization of polysaccharide extraction technology from *Perilla frutescens* leaves and its α-glucosidase inhibition activity[J]. Journal of Food Biochemistry, 2025, 2025(1): 8749940.
[13] LIU Yuchun, GUO Chao, WANG Chao, et al. Changes in the physicochemical properties and structural characteristics of rice bran polysaccharides extracted by specific enzyme cocktail and ultrasound[J]. Food Chemistry, 2025, 476: 143453.
[14] GU Fan, TAO Liang, CHEN Runling, et al. Ultrasonic-cellulase synergistic extraction of crude polysaccharides from *Moringa oleifera* leaves and alleviation of insulin resistance in HepG2 cells[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(20): 12405.
[15] FAN Xiangcheng, HAN Jun, ZHANG Feng, et al. Red yeast rice: A functional food used to reduce hyperlipidemia[J]. Food Reviews International, 2023, 39(8): 4965−4991.
[16] DING Guanwen, GUO Xiao, LI Xiao, et al. Study of active components and mechanisms mediating the hypolipidemic effect of *Inonotus obliquus* polysaccharides[J]. Food Science & Nutrition, 2024, 12(4): 2833−2845.
[17] BORDOLOI J, OZAH D, BORA T, et al. Gamma-glutamyl carboxylated Gas6 mediates the beneficial effect of vitamin K on lowering hyperlipidemia via regulating the AMPK/SREBP1/PPARα signaling cascade of lipid metabolism[J]. The Journal of Nutritional Biochemistry, 2019, 70: 174−184.
[18] NAGARTHNA P K M, HARSHA V, BASHIR B, et al. Hyperlipidemia and its treatment: A review[J]. Journal of Advanced Scientific Research, 2020, 11(1): 1−6.
[19] ZHU Minqian, HUANG Riming, WEN Peng, et al. Structural characterization and immunological activity of pectin polysaccharide from kiwano (*Cucumis metuliferus*) peels[J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 254: 117371.
[20] ZHENG Zhaomin, HUANG Qilin, LING Chuqi. Water-soluble yeast *β*-glucan fractions with different molecular weights: Extraction and separation by acidolysis assisted-size exclusion chromatography and their association with proliferative activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 123: 269−279.
[21] 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.]
[22] MAO Bo, LU Wei, HUANG Gangliang. Ultrasound-assisted enzymatic extraction, process optimization, and antioxidant activity of polysaccharides from sugarcane peel[J]. Scientific Reports, 2025, 15: 5009.
[23] ZHANG Meijian, ZHAO Meihui, QING Yudie, et al. Study on immunostimulatory activity and extraction process optimization of polysaccharides from *Caulerpa lentillifera*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 143: 677−684.
[24] WANG Yijie, HUANG Gangliang, HUANG Hualiang. Ultrasonic/enzymatic extraction, characteristics and comparison of leechee peel polysaccharide[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 108: 106948.
[25] LIU Yuhuan, WANG Yu, CAO Leipeng, et al. Preparation and characterization of intracellular and exopolysaccharides during cycle cultivation of *Spirulina platensis*[J]. Foods, 2023, 12(5): 1067.
[26] 王国霞, 牛富婷, 牛祎琳, 等. 不同产地金银花多糖理化性质及抗氧化活性分析[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(8): 39−46. [WANG Guoxia, NIU Futing, NIU Yilin, et al. Determination of physicochemical properties and antioxidant activity of *Lonicera japonica* polysaccharides from different producing areas[J]. Food Research and Development, 2025, 46(8): 39−46.]
[27] 温启华, 陆逸昊, 杨露芳, 等. 硒化天麻多糖的制备、结构表征及其抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2024, 45(3): 18−30. [WEN Qihua, LU Yihao, YANG Lufang, et al. Preparation, structure characterization and antioxidant activity evaluation of selenized *Gastrodia elata* polysaccharides[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(3): 18−30.]
[28] YOU Ying, SONG Chen, FU Yinghuan, et al. Structure-activity relationship of *Caulerpa lentillifera* polysaccharide in inhibiting lipid digestion[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 260: 129435.
[29] 纪慧杰, 朱彩平. 石榴皮多糖的提取及组成、体外降脂活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(4): 161−168. [JI Huijie, ZHU Caiping. Study on the extraction and composition of pomegranate peel polysaccharide and hypolipidemic activity *in vitro*[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(4): 161−168.]
[30] SONG Jie, ZHANG Zhao, WANG Hongxun, et al. Study on the structure and lipid-lowering activity of different components of *Lotus* root polysaccharides[J]. Food Research International, 2025, 203: 115801.
[31] LIN He, LI Jun, SUN Mingyang, et al. Effects of hazelnut soluble dietary fiber on lipid-lowering and gut microbiota in high-fat-diet-fed rats[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 256: 128538.
[32] CHENG Jiaobo, HU Jielun, GENG Fang, et al. *Bacteroides* utilization for dietary polysaccharides and their beneficial effects on gut health[J]. Food Science and Human Wellness, 2022, 11(5): 1101−1110.
[33] YANG Chen, LI Jingjing, LUO Tingting, et al. Ultrasonic-microwave assisted extraction for oat bran polysaccharides: Characterization and *in vivo* anti-hyperlipidemia study[J]. Industrial Crops and Products, 2024, 220: 119229.
[34] XUE Hongkun, LIANG Beimeng, WANG Yu, et al. The regulatory effect of polysaccharides on the gut microbiota and their effect on human health: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 132170.