

# 佛手多糖的体外降脂活性

林佩娜, 谢曦, 刘祎帆\*, 王琴

(广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 农业农村部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东省教育厅药食同源食品精深加工工程中心, 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225)

**摘要:** 为探究佛手多糖对高血脂症患者的血脂活性的影响, 该试验通过提取佛手多糖进行体外降脂活性的比较。利用热水浸提法提取佛手得到佛手粗多糖, 并测定其得率为 8.52%, 水溶性为 38.42%, 持水性为 15.51%。经过分离与粗纯化得到 FCP-N1 和 FCP-N2 两个组分, 且呈丝网状结构。再通过体外降脂活性评价, 对比这两个组分的胆酸盐结合率、胆固醇吸附量、胆固醇酯酶活性抑制率和胰脂肪酶活力抑制率。结果显示, 质量浓度为 2 mg·mL<sup>-1</sup> 时, FCP-N1 和 FCP-N2 的牛黄胆酸盐结合率分别为 36.62% 和 38.33%, 甘氨胆酸盐结合率为 43.38%、45.31%; 当 pH 值为 2.0 时, FCP-N1 的胆固醇吸附量为 13.99 mg·g<sup>-1</sup>, FCP-N2 为 18.95 mg·g<sup>-1</sup>, 当 pH 值为 7.0 时, FCP-N1 胆固醇吸附量为 24.90 mg·g<sup>-1</sup>, FCP-N2 为 30.01 mg·g<sup>-1</sup>; 在相同的质量浓度条件下, FCP-N1 和 FCP-N2 的胆固醇酯酶抑制率分别为 54.82% 和 57.21%; 当质量浓度为 2.0 mg·mL<sup>-1</sup> 时, FCP-N1 和 FCP-N2 的胰脂肪酶抑制率分别为 60.36% 和 69.56%。综上, 佛手多糖的 FCP-N1 和 FCP-N2 成分具有一定的降血脂功效, 且 FCP-N2 成分在体外降血脂活性方面表现更优。该研究为佛手多糖作为潜在的高血脂症治疗策略提供了科学依据。

**关键词:** 佛手; 多糖; 高血脂症; 降脂活性

文章编号: 1673-9078(2026)05-140-147 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.5.1585

## *In Vitro* Lipid-Lowering Activity of Fingered Citron Polysaccharides

LIN Peina, XIE Xi, LIU Huifan\*, WANG Qin

(Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology, Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan Specialty Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Engineering Technology Research Center for Intensive Processing of Medicinal and Edible Food, Department of Education of Guangdong Province; College of Light Industry and Food Science, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China)

**Abstract:** To investigate the lipid-lowering activity of fingered citron polysaccharides (FCP) in patients with hyperlipidemia, polysaccharides were extracted from fingered citron using hot water extraction. The yield of crude FCP was 8.52%, with a water solubility of 38.42% and a water-holding capacity of 15.51%. After isolation and purification, two polysaccharide fractions, FCP-N1 and FCP-N2, were obtained, both of which exhibited a filamentous network structure. The *in vitro* lipid-lowering activities of these two fractions were evaluated by comparing their bile salt binding capacity, cholesterol adsorption capacity, cholesterol esterase inhibition, and pancreatic lipase inhibition. At a mass concentration of 2 mg·mL<sup>-1</sup>, the binding rates of FCP-N1 and FCP-N2 to

引文格式:

林佩娜, 谢曦, 刘祎帆, 等. 佛手多糖的体外降脂活性[J]. 现代食品科技, 2026, 42(5): 140-147.

LIN Peina, XIE Xi, LIU Huifan, et al. *In vitro* lipid-lowering activity of fingered citron polysaccharides [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(5): 140-147.

收稿日期: 2024-10-26; 修回日期: 2025-06-23; 接受日期: 2025-06-27  
基金项目: 国家自然科学基金项目(32302087); 广东省普通高校工程技术研发中心项目(2024GCZX002); 广东省普通高校重点科研平台和项目(D12220781)  
作者简介: 林佩娜(2003-), 女, 本科生, 研究方向: 果蔬加工, E-mail: 19832938137@163.com  
通讯作者: 刘祎帆(1990-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 岭南特色果蔬、药食同源新资源, E-mail: lm\_zkng@163.com

taurocholate were 36.62% and 38.33%, respectively, while those to glycocholate were 43.38% and 45.31%, respectively. At pH 2.0, the cholesterol adsorption capacities of FCP-N1 and FCP-N2 were 13.99 mg·g<sup>-1</sup> and 18.95 mg·g<sup>-1</sup>, respectively. At pH 7.0, the corresponding values increased to 24.90 mg·g<sup>-1</sup> and 30.01 mg·g<sup>-1</sup>, respectively. Under the same mass concentration, the inhibition rates of FCP-N1 and FCP-N2 were 54.82% and 57.21%, respectively. At a mass concentration of 2.0 mg·mL<sup>-1</sup>, the pancreatic lipase inhibition rates were 60.36% and 69.56%, respectively. These findings demonstrate that fingered citron polysaccharides exhibit notable *in vitro* lipid-lowering activity, with FCP-N2 showing superior efficacy. This study provides a scientific basis for the potential use application of FCP in the management of hyperlipidemia.

**Key words:** fingered citron; polysaccharides; hyperlipidemia; lipid-lowering activity

高脂血症 (Hyperlipidaemia) 是一种因脂肪代谢异常导致的代谢性疾病, 该病症易引发动脉粥样硬化等严重并发症<sup>[1]</sup>, 进而可能导致相关心脑血管疾病<sup>[2]</sup>, 对人们的健康构成重大威胁。我国高脂血症的发病率逐年上升, 且有年轻化趋势<sup>[3]</sup>。据统计, 我国成年人中高脂血症的发病率高达 25%, 不良饮食习惯是导致其发生的关键因素之一。目前常见的治疗高脂血症的药物虽然有一定疗效, 但副作用<sup>[4,5]</sup>亦不容忽视。因此, 开发副作用更少的新型治疗和干预策略, 已成为治疗高脂血症的首选。近年来, 药食同源作为一种新型的安全有效的治疗手段, 备受众多研究者关注。

佛手 (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) 在我国资源丰富, 富含多种活性成分及药理作用, 其高价值不仅体现在食用方面, 亦体现在药用领域<sup>[6]</sup>。多糖由众多单糖单元经由糖苷键相互连接形成的高分子物质, 普遍分布于植物界、动物界以及微生物领域内, 是生命活动不可或缺的重要物质, 具有抗炎<sup>[7]</sup>、抗菌<sup>[8]</sup>等多种生物活性, 而且还能有效调节并增强免疫反应。而在佛手的多种成分中, 多糖以其独特的结构和功能脱颖而出, 成为近年来研究的热点之一。作为一种生理活性广泛、毒性低的物质, 佛手多糖可以缓解 DSS 诱导的结肠炎<sup>[9]</sup>, 还对不同类型的癌细胞显示出抑制增殖、诱导细胞毒性和凋亡的效应<sup>[10]</sup>。文献表明, 佛手多糖在体外发酵中表现出特性, 这可能与其独特的化学结构有关<sup>[11]</sup>。此外, 佛手多糖也有调节人类代谢的潜力, 尤其是用于调节血脂和血糖水平<sup>[12]</sup>。近年来, 众多研究逐渐将焦点放在多糖对于高脂血症治疗的潜在作用及其效果之上, 但当前对于佛手多糖的研究仍然不够全面, 多数研究主要集中于其提取<sup>[13]</sup>与抗氧化活性方面, 而对于其降脂活性的研究则相对较少。鉴于上述状况, 该文旨在通过提取、分离和纯化佛手多糖, 筛选出含量和活性较高的组分, 探究其体外降脂活性, 以期深入探索佛手多糖的降血脂功能。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

佛手 (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle) 干药材购自中国广东肇庆地区。将佛手干药材放入烘箱内, 在 60 °C 的温度下进行干燥至恒重。接着, 用磨粉机将干燥后的佛手加工成佛手粗粉, 并通过 60 目筛网筛选, 以备用。

体积分数 95% 的乙醇、苯酚、浓硫酸、无水葡萄糖、盐酸、氢氧化钠、氯化钠, 国外集团化学试剂有限公司; 牛黄胆酸钠、4-硝基苯丁酸酯, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 甘氨酸钠水合物, 上海麦克林生化科技股份有限公司; 胃蛋白酶、胰蛋白酶, 上海源叶生物科技有限公司; 胆固醇标准品、胆固醇酯酶, 北京索莱宝科技有限公司。

### 1.2 仪器设备与实验试剂

DHG-9079A 电热鼓风干燥箱, 上海甘易仪器设备有限公司; 30B 不锈钢打粉机, 湖南中诚制药机械厂; ME203E 型精密电子天平, 常州梅特勒-托利多测量技术有限公司; TDZ4-WS 型台式低速离心机, 湖南湘仪实验室仪器开发有限公司; UV1800 型紫外-可见分光光度计, 上海精密科学仪器有限公司; Multiskan GO 型酶标仪, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; JT-12S 脱水机, 武汉俊杰电子有限公司; QB-210 摇床, 海门市其林贝尔仪器制造有限公司; SCIENTZ-18 ND 型冷冻干燥机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; RE-52AA 旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂; AKTA 纯化系统、凝胶分离柱, 美国 General Electric Company 公司; LX 阴离子交换柱, 西安蓝晓科技新材料股份有限公司; XH-C 漩涡混合器, 金坛区白塔新宝仪器厂; DP-LNG-T88 台式快速离心浓缩干燥器, 湖南赫西仪器装备有限公司; TESCANA MIRA LMS 扫描电子显微镜 SEM, 上海泰思肯贸易有限公司。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 佛手多糖理化特性

佛手粗多糖的提取方法参考王琼琼<sup>[4]</sup>的方法。称取适量的佛手粗粉,按1:30(g·mL<sup>-1</sup>)料液比加入蒸馏水,随后在90℃浸泡提取2h处理。之后以4 500 r·min<sup>-1</sup>的转速离心处理10 min,并收集得到上清液,采用Sevage法除蛋白,将正丁醇和氯仿按1:4的比例混合得到Sevage试剂,并在多糖溶液中按体积的1/3加入Sevage试剂,充分混合并剧烈振摇,离心(4 500 r·min<sup>-1</sup>, 10 min)后除去沉淀,收集上清液再加入Sevage试剂,重复上述剧烈振摇步骤,离心至无蛋白层析出。加入4倍体积的体积分数95%的乙醇溶液充分搅拌混匀,于4℃静置醇沉12 h。后离心(4 500 r·min<sup>-1</sup>, 10 min)并除去乙醇上清液,收集沉淀物质,真空干燥后即得佛手粗多糖。

#### 1.3.2 佛手多糖得率

佛手粗多糖的提取效率采用苯酚-硫酸法进行测定,采用无水葡萄糖作为参照基准,横坐标设定为葡萄糖的质量浓度,纵坐标则为相应的吸光度值,据此制作出一条标准曲线。

$$P = \frac{W_1}{W_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

$P$ ——多糖得率, %;

$W_1$ ——冻干后粗多糖质量, g;

$W_2$ ——佛手粉质量, g。

#### 1.3.3 水溶性

准确称量1.0 g佛手粗多糖样品于烧杯中,加入纯水50 mL溶解,于磁力搅拌水浴锅90℃搅拌1 h,离心(4 000 r·min<sup>-1</sup>, 10 min),取上清液于105℃烘干至恒重。计算公式如下:

$$S = \frac{m_1}{m_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

$S$ ——水溶性, %;

$m_1$ ——称取样品的质量, g;

$m_2$ ——处理后样品的质量, g。

#### 1.3.4 持水性

称取0.5 g佛手粗多糖样品于10 mL离心管中,注入蒸馏水4.75 mL,随后将离心管置于沸水浴中加热20 min,待冷却至室温,离心(4 000 r·min<sup>-1</sup>, 20 min),弃去上清液体并称样品的质量。持水性计算公式如下:

$$B = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \quad (3)$$

式中:

$B$ ——持水性, g·g<sup>-1</sup>;

$m_1$ ——称取样品的质量, g;

$m_2$ ——处理后样品的质量, g。

#### 1.3.5 佛手多糖的分离纯化

将适量的粗多糖样品溶解在纯水中,制备成多糖溶液。经过10 min的离心处理,取其上清液,并通过DEAE Sephacryl FF离子交换柱进行纯化步骤,将流量设置为4 mL·min<sup>-1</sup>;利用纯水、0.1、0.2、0.3 mol·L<sup>-1</sup>的NaCl溶液进行梯度洗脱,一管装15 mL洗脱液,收集所有洗脱液。采用硫酸-苯酚法测量总糖含量,在490 nm波长处测定上述收集管中洗脱液的吸光度,绘制出离子纯化洗脱曲线。合并同一个洗脱峰对应的各收集管洗脱液,进行旋蒸浓缩处理至原体积的1/5。使用3 000 Da透析袋对多糖样品进行48~72 h的透析除盐处理,随后进行干燥。将经过离子交换色谱分离纯化后得到的多糖再次溶解于纯水中,制备成多糖溶液。离心10 min后,取其上清液,通过Sephacryl S-400HR型号的凝胶层析柱进一步的分离纯化步骤,流量1 mL·min<sup>-1</sup>;采用纯水洗脱1.5倍柱体积,一管装12 mL洗脱液,收集所有洗脱液。再次利用硫酸-苯酚法,在490 nm波长下测定各收集管中洗脱液的吸光度,并据此绘制凝胶纯化洗脱曲线。对于洗脱曲线中同一洗脱峰所对应的各收集管洗脱液,进行合并处理,后通过旋蒸将其浓缩至原体积的1/5。经过48 h的透析处理及冷冻干燥,得到粗纯化的佛手多糖,并采用硫酸-苯酚法鉴定凝胶纯化后的多糖进行含量和纯度的鉴定。

#### 1.3.6 佛手纯化多糖的SEM扫描分析

本实验运用扫描电镜的高分辨率、高放大倍率<sup>[15]</sup>以及立体直观等特性,可以实现对多糖样品表面形态结构的精确观测。具体操作如下所示:样品前处理:取适量样品干燥粉末直接粘到导电胶上,并使用Quorum SC7620溅射镀膜仪进行喷金处理,使样品表面均匀形成一层金离子薄膜。随后使用扫描电子显微镜分别选择150倍、2 000倍和5 000倍放大并拍摄样品的表面组织及外观形貌。

#### 1.3.7 佛手多糖体外降血脂活性

##### 1.3.7.1 胆酸盐结合能力

测定佛手多糖胆酸盐结合率参考王文帅<sup>[16]</sup>的方法并略作修改。制备具有不同质量百分比的牛磺胆酸钠与甘氨酸胆酸钠标准溶液。量取2.5 mL的胆酸盐标准溶

液,精确转移至含有 7.5 mL 的 60% 硫酸溶液的容器中,随后在 70 ℃ 的水浴条件下加热 30 min,之后迅速进行冷却处理。接着,在 387 nm 波长下测定其吸光度,并依据所得数据绘制出标准曲线图。准备质量浓度分别为 0.5、1、1.5、2 mg·mL<sup>-1</sup> 的多糖溶液。接着,从每种浓度的多糖溶液中取 3 mL 置于试管内,随后向试管中加入 3 mL 质量浓度为 10 mg·mL<sup>-1</sup> 的胃蛋白酶溶液以及 1 mL 浓度为 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 的盐酸溶液,在 37 ℃ 恒温水浴振荡器中消化反应 1 h,期间缓慢滴加 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 氢氧化钠溶液调整 pH 值至 6.0 以模拟胃环境;随后加入 4 mL 胰蛋白酶溶液(10 mg·mL<sup>-1</sup>)置于 37 ℃ 振荡孵育 1 h,随后各样品加入 4 mL 的牛磺胆酸钠或甘氨酸胆酸钠溶液(0.4 mmol·L<sup>-1</sup>)于 37 ℃ 的环境中恒温反应 1 h,随后以 4 000 r·min<sup>-1</sup> 的转速进行离心处理,持续 20 min。从上清液中准确量取 2.5 mL 并与 7.5 mL 60% 的硫酸溶液混合均匀。接着,在 70 ℃ 的水浴条件下加热 20 min,之后迅速冷却至室温,测定 387 nm 波长下的吸光度,并据此绘制标准曲线。利用已绘制的标准曲线来估算上清液中剩余的胆酸盐浓度。接下来,通过以下公式来计算佛手多糖对胆酸盐的结合能力:

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

$R$ ——胆酸盐结合率, %;

$m_1$ ——胆酸盐的加入量, mg;

$m_2$ ——胆酸盐的剩余量, mg。

#### 1.3.7.2 胆固醇吸附作用

佛手多糖胆固醇含量的测定具体方法参考刘亚楠等<sup>[17]</sup>报道的方法,依据胆固醇标准品的不同质量浓度来构建胆固醇的吸收标准曲线。从新鲜鸡蛋中提取蛋黄,并向其中加入相当于蛋黄体积十倍的纯净水,充分搅拌使其形成均匀的乳状液体。取两份各 10 mL 的乳浊液样本,分别调整它们的 pH 值为 2.0 和 7.0,然后各自加入 0.5 g 佛手多糖试样。接着,在 37 ℃ 的条件下振荡这两个样本 2 h。之后将它们取出并以 4 000 r·min<sup>-1</sup> 的转速进行离心处理 20 min,以分离出上清液部分。根据已建立的标准曲线来确定胆固醇的具体含量。接着,采用以下胆固醇吸附量公式来计算:

$$A = \frac{m_1 - m_2}{M} \quad (5)$$

式中:

$A$ ——胆固醇吸附量, mg·g<sup>-1</sup>;

$m_1$ ——乳浊液中含胆固醇的质量, mg;

$m_2$ ——上清液中含胆固醇的质量, mg;

$M$ ——佛手多糖的质量, g。

#### 1.3.7.3 胆固醇酯酶活性抑制作用

胆固醇酯酶于常温下与 4-硝基苯丁酸酯(PNPB)相互作用时,会产生黄绿色产物,因此通过测定溶液吸光度并计算其抑制率,能有效评估佛手多糖对胆固醇酯酶的抑制效果。

测定佛手多糖胆固醇酯酶的抑制率具体方法参考付金<sup>[18]</sup>报道的方法。首先配制磷酸缓冲液(0.1 mol·L<sup>-1</sup> 氯化钠, 5.16 mmol·L<sup>-1</sup> 牛磺胆酸钠),将胆固醇酯酶溶解于蒸馏水中。PNPB(0.2 mmol·L<sup>-1</sup>)先用乙腈溶解进行保存于 -20 ℃。向每个实验组加入 1 mL 磷酸缓冲液和 10 μL PNPB 溶液,而在空白管中则添加 25 μL 去离子水及 50 μL 酶液;在空白对照组中加入 75 μL 去离子水,在抑制组中,加入 25 μL 由两种成分组成的佛手多糖溶液(10 mg·mL<sup>-1</sup>)和 50 μL 酶液;对于背景对照组,则加入 25 μL 同样成分的佛手多糖溶液(10 mg·mL<sup>-1</sup>)和 50 μL 去离子水。将这些样本在 25 ℃ 的环境下反应 40 min,随后在 405 nm 波长下测量各溶液的吸光度值,计算抑制率公式如下:

$$E = \frac{(A-B)-(C-D)}{A-B} \times 100\% \quad (6)$$

式中:

$E$ ——胆固醇酯酶活性抑制率, %;

$A$ ——空白组吸光度值;

$B$ ——空白对照组吸光度值;

$C$ ——抑制组吸光度值;

$D$ ——背景对照组吸光度值。

#### 1.3.7.4 胰脂肪酶活力抑制作用

胰脂肪酶活力抑制率的具体测定方法参考周赛楠等<sup>[19]</sup>报道的方法并在此基础上进行适当调整与优化,首先配制 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 磷酸缓冲液(pH 值 8.0);配制 12 mmol·L<sup>-1</sup> 的 4-硝基苯丁酸酯(PNPB)溶解于乙腈中;取胰脂肪酶溶于磷酸缓冲液中,震荡溶解,得 0.5 mg·mL<sup>-1</sup> 胰脂肪酶溶液,以 2 000 r·min<sup>-1</sup> 的速度持续离心 5 min,最后收集上层清液。取不同质量浓度梯度的佛手多糖溶液与得到上清液进行等体积混合并于 37 ℃ 共同反应 30 min 后,加入 20 μL PNPB 溶液,反应 10 min。在实验操作中,设立以未添加任何酶溶液样本为空白对照,不加入佛手多糖溶液的样本视为正常组。反应完全后于 405 nm 波长处吸光度,以下是用于计算抑制率的公式表达:

$$L = \left(1 - \frac{A_2 - A_1}{A - A_1}\right) \times 100\% \quad (7)$$

式中:

$L$ ——胰脂肪酶活力抑制率, %;

$A$ ——正常组吸光度值;

$A_1$ ——空白组吸光度值;

$A_2$ ——样品吸光度值。

### 1.3.8 数据分析

用 Excel 软件将实验数据先进行处理, 采用 SPSS 19.0 版本软件进行数据分析处理。运用单因素方差分析 (ANOVA) 方法, 并结合 Duncan 检验手段, 来进行显著性分析 ( $P < 0.05$ ), 后用 Origin 2021 软件进行作图。

## 2 结果与讨论

### 2.1 佛手多糖理化性质

以无水葡萄糖为标准品, 用紫外分光光度法制作糖含量标准曲线为  $y = 0.7572x + 0.1489$ ,  $R^2 = 0.9981$ , 由此通过公式算出多糖得率为 8.52%。

多糖的水溶性和持水性均为多糖的水合特性。水溶性是表征多糖溶解能力大小的一种属性, 水溶性越高, 多糖溶解性越好。吸水性是表征多糖吸水能力并评价物质保水性的指标, 主要与其亲水基团数量相关<sup>[20]</sup>。根据水溶性和持水性的公式计算得: 多糖的水溶性为 38.42%, 持水性为  $15.51 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。佛手多糖的水合特性在预防肠道疾病方面具有重要, 其通过加速排泄过程、降低有毒物质在肠道内的居留时间, 帮助人体降低患病风险, 维护身体健康<sup>[21]</sup>。

### 2.2 佛手多糖的分离、纯化

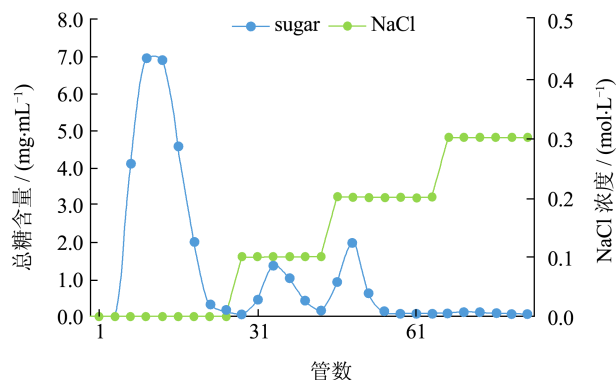


图1 离子交换柱层析洗脱结果

Fig.1 Ion exchange column chromatography results

采用 DEAE seplife FF 弱阴离子交换层析柱对佛手粗多糖进行分离纯化, 通过 NaCl 溶液洗脱, 分别得到第 7-19 管、第 31-40 管, 第 46-52 管三个离子洗脱峰。如图 1, 选取峰体积最大的 7-19 管进行收集、透析、浓缩及干燥。溶解后的样品经过 Sephacryl S-400HR 凝胶层析柱进行进一步的分离与粗纯化。本次凝胶纯化主要得到两个洗脱峰组分, 如图 2 所示, 分别为第 27-36 管, 记为 FCP-N1; 第 39-47 管, 记为 FCP-N2。

经总糖测定结果显示, 粗纯化后两个组分的多糖纯度为 FCP-N1 : 57.12%, FCP-N2 : 48.11%。

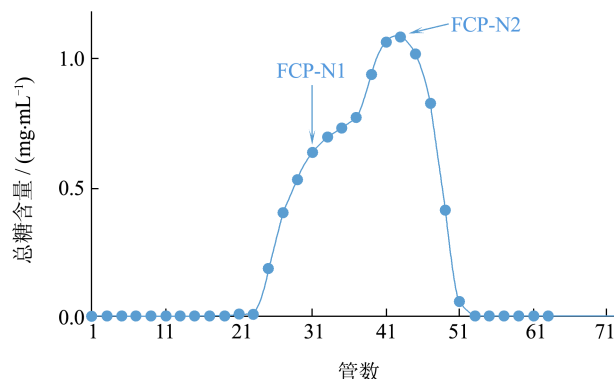


图2 凝胶柱层析洗脱结果

Fig.2 Gel column chromatography elution results

### 2.3 佛手多糖形貌分析

图 3 是 FCP-N1 和 FCP-N2 在不同放大倍数下的 SEM 图像。在  $150\times$  放大视域下, FCP-N1、FCP-N2 显现出大小不一且非规律性的丝网形态构造, 未见明显卷曲现象。在更高的放大倍数 ( $2\,000\times$  及  $5\,000\times$ ) 下, 观察到 FCP-N1 和 FCP-N2 表面光滑, 具有一些孔洞结构, FCP-N1 的丝网状更为疏松, 而 FCP-N2 的结构更为聚集, 说明 FCP-N2 作用力比较强, 结合较为紧密<sup>[22]</sup>。

### 2.4 佛手多糖体外降血脂活性评价

#### 2.4.1 胆酸盐结合能力

在肝脏中, 胆固醇经过分解生成胆汁酸, 胆汁酸的衍生物胆酸盐在肝肠系统中具有显著重要性。作为人体内的一种化合物, 胆酸盐具有强烈的脂肪乳化作用, 是排泄胆固醇的主要途径之一, 对维持体内脂质代谢平衡具有重大意义<sup>[23]</sup>。此外, 胆酸盐还能激活肝肠受体, 进而调节脂质代谢、血糖水平和免疫信号传导, 突显其在维护人体健康方面的综合作用<sup>[24]</sup>。该实验旨在通过测定两种胆酸盐 (牛磺胆酸钠和甘氨酸胆酸钠) 结合率达到评估佛手多糖的胆酸盐结合效能。

佛手多糖牛磺胆酸盐、甘氨酸胆酸盐结合能力结果分别如图 4a 和图 4b, 由此可以看出, FCP-N1、FCP-N2 均显示出与胆酸盐 (牛磺胆酸盐、甘氨酸胆酸盐) 具有一定的结合能力, 随多糖质量浓度的升高, 它们对胆酸盐的结合率也呈现递增的趋势, 且出现一个清晰的剂量-效应关系, 在质量浓度为  $2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$  时, FCP-N1 和 FCP-N2 牛磺胆酸盐结合率分别为 36.62%、38.33%, 甘氨酸胆酸盐结合能力分别为 43.38%、45.31%。由此可见, FCP-N2 的胆酸盐结合能力比 FCP-N1 的强。

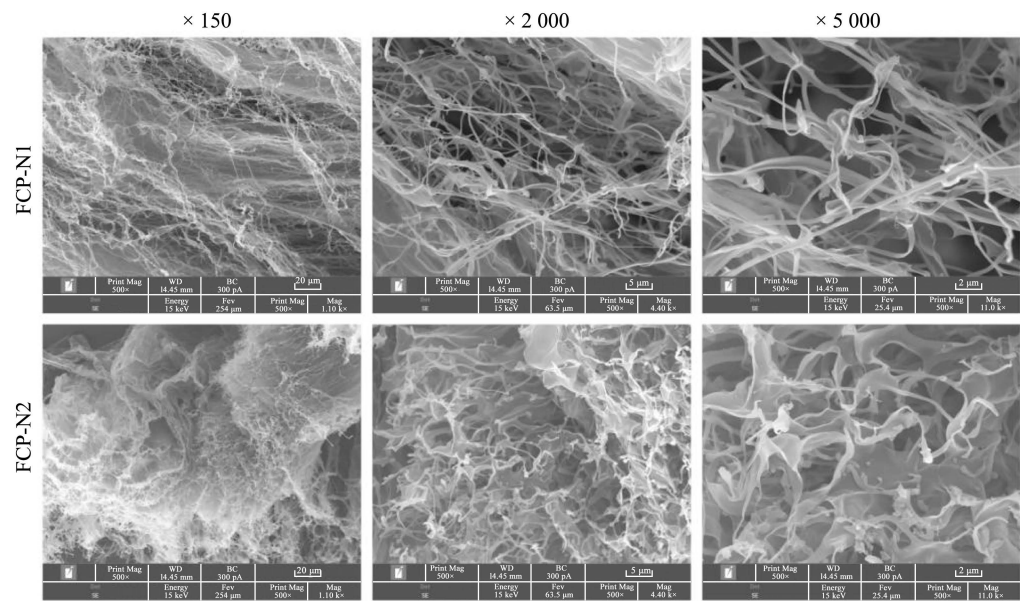


图3 FCP-N1 和 FCP-N2 的 SEM 图

Fig.3 SEM images of FCP-N1 and FCP-N2

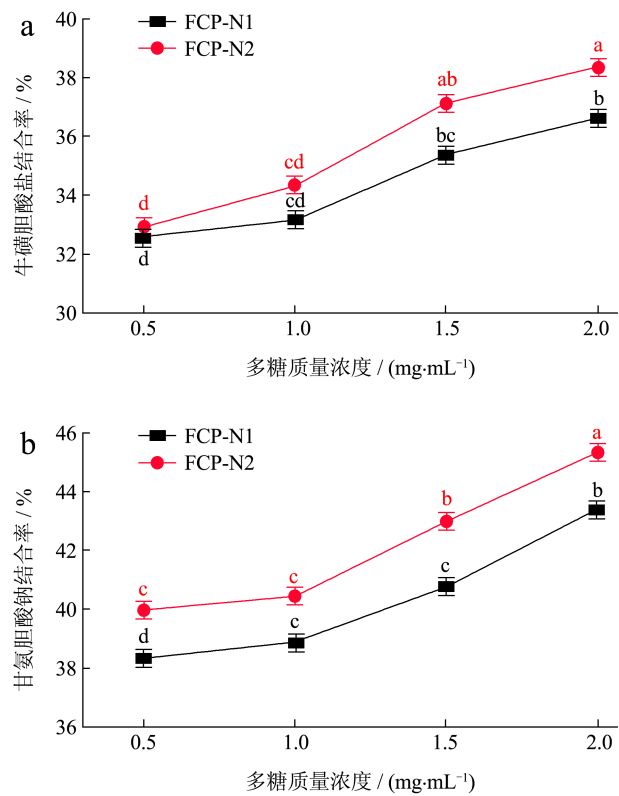


图 4 FCP-N1 和 FCP-N2 的胆酸盐结合率比较分析

Fig.4 Comparative analysis of cholic binding rates of FCP-N1 and FCP-N2

注：同一组标注相同小写字母表示无差异显著 ( $P>0.05$ ), 标注无相同小写字母表示有显著差异 ( $P<0.05$ )。下同。

2.4.2 胆固醇吸附作用

胆固醇作为动物细胞膜的至关重要的组成部分，

对细胞膜的稳定性和执行生物功能起着尤为关键的作用<sup>[25]</sup>。人体胆固醇的来源有两个途径：一是饮食摄入，二是肝脏合成。然而，过高的胆固醇水平可能会成为心血管疾病的潜在风险因素。由于胆固醇的溶解性较差，游离态胆固醇无法被小肠吸收或随食物残渣排出。唯有溶解在胆酸胶团中的胆固醇才能够被消化和吸收。降低胶团中胆固醇的溶解度，有助于降低胆固醇的吸收，从而改善血液胆固醇代谢失衡的状况<sup>[26]</sup>。

佛手多糖具有降低血脂的生物活性，其机制是利用分子表面的官能团吸附或包络血浆中的胆固醇分子，减少机体对胆固醇的吸收，同时促进过量胆固醇通过排泄系统排出体外<sup>[27]</sup>。在探究胆固醇吸附性能时，会选择两种不同的体外实验条件模拟体内环境，分别为肠道环境（pH 值 7.0）和胃液环境（pH 值 2.0）。在建立胆固醇标准曲线之后，会得到下面的线性回归方程为： $y=0.010\ 9x-0.035\ 6$ ， $R^2=0.990\ 8$ ，根据公式可以计算出佛手多糖的胆固醇吸附量有多少。当 pH 值为 2.0 时，FCP-N1 的胆固醇吸附量为  $13.99\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，FCP-N2 的胆固醇吸附量为  $18.95\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，当 pH 值为 7.0 时，FCP-N1 的胆固醇吸附量为  $24.90\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ ，FCP-N2 的胆固醇吸附量为  $30.01\ \text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。从图 5 看出，与酸性环境相比，佛手柑多糖在中性条件下对胆固醇的吸附能力大于酸性条件下的吸附能力，且 FCP-N2 的吸附效果比较显著。当中性环境作为背景的时候，佛手多糖对胆固醇的吸附总量比在酸性条件下的吸附量还要大，并且发现其在中性条件下的 FCP-N2 展现出了更为显著的吸附活性。

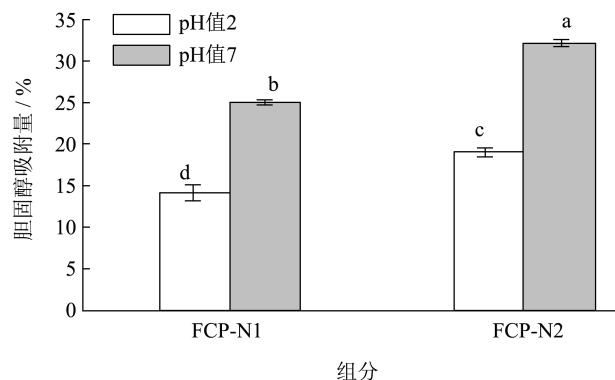


图5 FCP-N1 和 FCP-N2 的胆固醇吸附量

Fig.5 Cholesterol adsorption capacity of FCP-N1 and FCP-N2

### 2.4.3 胆固醇酯酶活性抑制作用

胆固醇酯酶作为关键的生物催化剂，其功能在于将胆固醇酯水解为胆固醇分子及游离的脂肪酸，从而调控从胆固醇酯储备中释放出的胆固醇的生物可利用性<sup>[28]</sup>。针对肥胖症的防治与管理策略中，可以通过干预胰脂肪酶和胆固醇酯酶的功能活动，实现对脂肪消化吸收速率的有效减缓。鉴于糖脂代谢过程中涉及多种酶类的作用机制，通常聚焦于酶活性的调节层面，旨在发掘能够抑制这些酶活性<sup>[29]</sup>并由此可能降低血糖和血脂水平的有效成分。由图6可得，在相同质量浓度条件下，FCP-N1 与 FCP-N2 的胆固醇酯酶抑制率相近，分别为 54.82% 和 57.21%，FCP-N2 的抑制率相对较高，但无显著性差异。

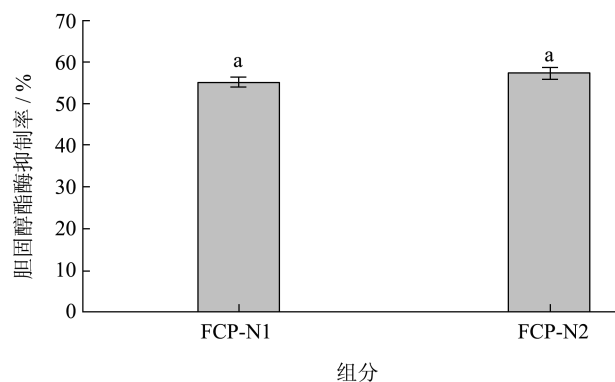


图6 FCP-N1 和 FCP-N2 的胆固醇酯酶活性抑制率

Fig.6 Inhibition rate of cholesterol esterase activity of FCP-N1 and FCP-N2

### 2.4.4 胰脂肪酶活力抑制

胰脂肪酶是人体必须的酶之一，人体约有 95% 摄入的脂肪量会在小肠阶段得到有效的吸收，这与消化脂肪酶密切相关<sup>[30]</sup>。通过抑制脂肪酶活性，能够减少膳食甘油三酯的水解，进而降低胆固醇的生成，实现对血脂的控制<sup>[31]</sup>。

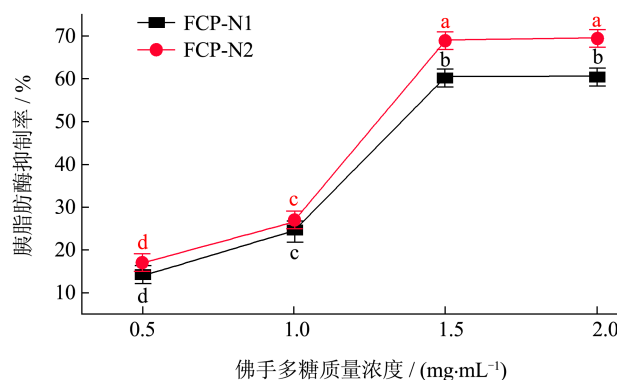


图7 FCP-N1 和 FCP-N2 的胰脂肪酶抑制率

Fig.7 Pancreatic lipase inhibition rates of FCP-N1 and FCP-N2

如图7所示，随着佛手多糖的质量浓度增加，对胰脂肪酶的抑制效应也越来越强，多糖质量浓度到 1.5 mg·mL<sup>-1</sup> 后逐渐平缓，说明佛手多糖对胰脂肪酶具有一定的抑制能力。当 FCP-N1 和 FCP-N2 质量浓度为 1.5 mg·mL<sup>-1</sup> 时，其胰脂肪酶抑制率分别为 60.33%、69.05%，当 FCP-N1 和 FCP-N2 质量浓度为 2.0 mg·mL<sup>-1</sup> 时，其胰脂肪酶抑制率分别为 60.36%、69.56%。两种不同组分的多糖对比可得，FCP-N2 的降脂活性更优。因此选择 FCP-N2 为实验对象，进行高脂小鼠降血脂作用研究。

## 3 结论

本研究以佛手为主原料，经分离纯化及体外降脂实验探究佛手多糖的降脂功能。通过热水浸提获得佛手粗多糖，其得率为 8.52%，水溶性为 38.42%，持水性为 15.51%。进一步分离纯化得 FCP-N1 和 FCP-N2 组分，两者一堆形状类似于球状，二维电镜扫描的形状为丝网状孔洞结构。体外模拟胃肠环境实验表明，在 2 mg·mL<sup>-1</sup> 质量浓度下，FCP-N1 和 FCP-N2 的牛黄胆酸盐结合率分别为 36.62% 和 38.33%，甘氨胆酸盐结合率分别为 43.38% 和 45.31%；pH 值为 2.0 时胆固醇吸附量分别为 13.99 mg·g<sup>-1</sup> 和 18.95 mg·g<sup>-1</sup>，pH 值为 7.0 时分别为 24.90 mg·g<sup>-1</sup> 和 30.01 mg·g<sup>-1</sup>；两者在相同质量浓度下对胆固醇酯酶的抑制率分别为 54.82% 和 57.21%，与石榴皮多糖的抑制作用相似<sup>[32]</sup>；在 2.0 mg·mL<sup>-1</sup> 质量浓度下，对胰脂肪酶的抑制率分别为 60.36% 和 69.56%，与西洋参皂苷抑制高脂大鼠甘油三酯升高的结论相类<sup>[33]</sup>。综上，FCP-N1 和 FCP-N2 均具良好降脂活性，且 FCP-N2 在胆酸盐结合、胆固醇吸附、胆固醇酯酶及胰脂肪酶抑制方面表现更优。本研究为进一步深入了解佛手多糖的降脂机制和作用特点提供了新的思路 and 方向。

## 参考文献

- [1] FRANCESCA M, SAVERIOL L B, FRANCESCO C. Hyperlipidemia and cardiovascular risk in children and adolescents [J]. Biomedicines, 2023, 11(3): 809-809.
- [2] YAO Y S, LI T D, ZENG Z H. Mechanisms underlying direct actions of hyperlipidemia on myocardium: an updated review [J]. Lipids in Health and Disease, 2020, 19(1): 23.
- [3] JACKSON S, CREO A, KUMAR S. Are clinicians aggressive enough in treating diabetes-related hyperlipidemia in youth? [J]. Current Atherosclerosis Reports, 2022, 24(6): 471-481.
- [4] PADHYE, M R, YADAV, NIKHIL S. Plethora of adverse drug reactions in geriatric population receiving statin therapy for dyslipidaemia [J]. Journal of Family Medicine and Primary Care, 2022, 11(7): 3726-3729.
- [5] ALQAHTANI S M, ALZIBALI F K, MAHDI M M A, et al. Lipid-lowering medications for managing dyslipidemia: A narrative review [J]. Cureus, 2024, 16(7): e65202.
- [6] PENG B, YANG J, HUANG W, et al. Structural characterization and immunoregulatory activity of a novel Heteropolysaccharide from Bergamot (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) by alkali extraction [J]. Industrial Crops and Products, 2019, 140: 111617.
- [7] KIM H, CHO S M, KIM W J, et al. Red ginseng polysaccharide alleviates cytotoxicity and promotes anti-inflammatory activity of Ginsenosides [J]. Ciência e Tecnologia de Alimentos, 2021, 5: 42.
- [8] ZHANG Y, WU Y T, 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.
- [9] YANG Y, ZHANG Y, SONG J, et al. Bergamot polysaccharides relieve Dss-induced ulcerative colitis via regulating the gut microbiota and metabolites [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 253: 127335.
- [10] 简少芬.佛手提取物对HepG2细胞凋亡影响及机制研究[D].贵阳:贵州师范大学,2021.
- [11] WU K, LU X, FANG F, et al. Comparative study on *in vitro* fermentation characteristics of the polysaccharides extracted from bergamot and fermented bergamot [J]. Foods(Basel, Switzerland), 2023, 12(15): 2878.
- [12] LIU H, LIANG J, LIANG C, et al. Physicochemical properties of dietary fiber of bergamot and its effect on diabetic mice [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1040825.
- [13] YANG W J, YANG Z X, ZOU Y, et al. Extraction and deproteinization process of polysaccharide from purple sweet potato [J]. Chemical Biology & Drug Design, 2022, 99(1): 111-117.
- [14] 王琼琼.新疆无刺红花功能因子提取、鉴定及其生物活性研究[D].阿拉尔:塔里木大学,2021.
- [15] 李魁,贾圆,韩艳龙,等.基于MIP和SEM的构造区煤系碳酸盐岩微观结构定量表征[J].中国煤炭,2025,51(1):204-214.
- [16] 王文帅.灵芝菌丝体多糖的结构表征及其改善血脂紊乱的相关机制探究[D].泰安:山东农业大学,2023.
- [17] 刘亚楠,马月香,张诺,等.盐地碱蓬膳食纤维的提取纯化、理化特性及体外降血脂研究[J].中国食品添加剂,2022,33(11):34-42.
- [18] 付金.黔产皂角米多糖提取、分离纯化及体外降脂活性研究[D].贵阳:贵州民族大学,2021.
- [19] 周赛楠,张青,王发合,等.响应面法优化辅助降糖降脂的海藻果蔬提取物复配配方[J].食品科学,2021,42(13):57-63.
- [20] BUTT N A, ALI T M, MOIN A, et al. Comparative study on morphological, rheological and functional characteristics of extruded rice starch citrates and lactates [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 180: 782-791.
- [21] MOLLACE R, MACRI R, NICITA M, et al. Bergamot polyphenolic extract combined with albedo and pulp fibres counteracts changes in gut microbiota associated with high-fat diet: implications for lipoprotein size re-arrangement [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(16): 12967.
- [22] 赵宁,韩著,简颖琳,等.中药多糖结构表征及质量评价研究进展[J].中草药,2024,55(21):7491-7506.
- [23] 陈怡.‘红实2号’猕猴桃多糖提取优化及后熟过程中结构特征、体外生物活性变化规律的研究[D].雅安:四川农业大学,2023.
- [24] 李春宇,袁贞,余春洁,等.佛手化学成分和药理活性的研究进展[J].食品与药品,2022,24(2):187-193.
- [25] 潘欣,李广波,瞿旻,等.细胞膜微结构域中胆固醇对小鼠巨噬细胞摄取土拉弗朗西斯菌的作用[J].微生物与感染,2009,4(4):223-227.
- [26] ELS D S, MENSINK R P, PLAT J. Effects of plant sterols and stanols on intestinal cholesterol metabolism: suggested mechanisms from past to present [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2012, 56(7): 1058-1072.
- [27] 夏雨,王雁胜,张延杰,等.佛手果营养与活性成分测定及降血脂功能研究[J].食品科技,2016,41(2):70-73.
- [28] 苏建辉,马朝阳,杨鹿,等.槲皮素、EGCG对胆固醇酯酶活性和胆固醇胶束抑制作用研究[J].食品工业科技,2015,36(11):346-349.
- [29] 曾凤,尹震花,申丽,等.牛蒡多糖调控糖脂代谢的研究进展[J].中草药,2023,54(3):1010-1016.
- [30] 王雨,孙延平,杨炳友,等.天然产物多糖对脂肪酶的抑制活性研究进展[J].化学工程师,2022,36(11):62-65.
- [31] 李景恩,董金娇,谢美珍,等.南酸枣多糖的体外抗氧化、降血糖与降血脂作用[J].食品研究与开发,2024,45(3):59-66.
- [32] 武媛.石榴皮多糖的提取纯化、结构表征及体外降脂活性研究[D].西安:陕西师范大学,2021.
- [33] LIU W, ZHENG Y, HAN L, et al. Saponins (*ginsenosides*) from stems and leaves of panax quinquefolium prevented high-fat diet-induced obesity in mice [J]. Phytomedicine, 2008, 15(12): 1140-1145.