

黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究

尚学钰, 美合日班, 苏玲, 王琦

Functional Characteristics and Lipid Lowering Activity of *Auricularia heimuer* Soluble Dietary Fiber

SHANG Xueyu, MEI Heriban, SU Ling, and WANG Qi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030398>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

复合酶改性玉米皮可溶性膳食纤维的工艺优化及理化特性分析

Process Optimization and Physicochemical Characteristics Analysis of Soluble Dietary Fiber from Corn Bran Modified by Composite Enzymes

食品工业科技. 2024, 45(6): 202–209 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070095>

高粱鸟米可溶性膳食纤维提取工艺优化及功能性分析

Extraction Process Optimization and Functional Analysis of Soluble Dietary Fiber from *Sporisorium reilianum*

食品工业科技. 2023, 44(5): 213–221 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022060236>

好食脉孢霉发酵麦麸制备可溶性膳食纤维及其理化性质

Preparation and Physicochemical Properties of Soluble Dietary Fiber(SDF)from Wheat Bran Fermented by *Neurospora sitophila*

食品工业科技. 2021, 42(2): 170–176,191 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030170>

茶梗可溶性膳食纤维的制备工艺优化及单糖组成和理化特性研究

Optimization of Preparing Process of Soluble Dietary Fiber from Tea Stalks and Its Monosaccharide Composition and Physicochemical Properties

食品工业科技. 2021, 42(18): 190–196 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021010070>

超声辅助酶法提取西番莲果皮可溶性膳食纤维及理化性质

Extraction of Soluble Dietary Fiber from *Passiflora edulis* Peel by Ultrasonic Assisted Enzymatic Method and Its Physicochemical Properties

食品工业科技. 2020, 41(7): 161–165,172 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.07.027>

米糠可溶性膳食纤维对馒头抗老化特性的影响

Effect of Rice Bran Soluble Dietary Fiber on the Quality of Chinese Steamed Bread

食品工业科技. 2022, 43(4): 59–64 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060076>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

尚学钰, 美合日班, 苏玲, 等. 黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(2): 112–121. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030398

SHANG Xueyu, MEI Heriban, SU Ling, et al. Functional Characteristics and Lipid Lowering Activity of *Auricularia heimuer* Soluble Dietary Fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 112–121. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030398

· 研究与探讨 ·

黑木耳可溶性膳食纤维功能特性和降脂活性研究

尚学钰^{1,2}, 美合日班^{1,2,*}, 苏 玲^{1,2,*}, 王 琦^{1,2,*}

(1. 吉林农业大学食用菌教育部工程研究中心, 吉林长春 130118;

2. 吉林农业大学植物保护学院, 吉林长春 130118)

摘要: 本研究以热水提取黑木耳多糖后剩余的黑木耳残渣为原料, 通过复合酶法提取黑木耳可溶性膳食纤维 (*Auricularia heimuer* soluble dietary fiber, HSDF), 对其分子量、单糖组成及糖链组成进行分析, 检测其持水力、持油力、膨胀力等理化性质, 并通过测定胆固醇吸附能力、脂肪酶抑制率及胆酸盐结合率, 评价其体外降脂活性。通过高脂喂养 (High-fat diet, HFD) C57BL/6J 小鼠构建肥胖动物模型, 给予黑木耳可溶性膳食纤维治疗, 评估 HSDF 治疗肥胖小鼠的体重、生化指标以及肝脏组织和脂肪组织病理学改变特征, 探究其在肥胖小鼠模型中的降脂效果。结果表明, HSDF 的相对分子量为 4.14×10^5 Da, 是由甘露糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖和岩藻糖聚合而成的混合物, 摩尔比为 $1808.87:0.00278:4.43:2.13:2.84:5.01$ 。HSDF 平均持水力为 (11.62 ± 0.302) g·g⁻¹, 平均持油力为 (2.95 ± 0.259) g·g⁻¹, 平均膨胀力为 (12.7 ± 0.434) mL·g⁻¹, 对肠道胆固醇的吸附能力为 $6.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$; 浓度为 $1.2 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时, 对甘氨胆酸钠和牛黄胆酸钠的结合率可达 92.91% 和 90.93%。此外, 浓度为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 的 HSDF 对胰脂肪酶抑制率为 75%, 具有良好的体外降脂活性。同时, HSDF 可以显著 ($P < 0.05$) 改善 HFD 小鼠脏器指数, 改善 HFD 小鼠肝脏中脂质积累、炎性细胞浸润及脂肪组织中脂肪细胞增大, 对于附睾白色脂肪组织细胞面积的改善可以达到 50% 以上, 具有较好的体内降脂效果, 结果可为后续黑木耳膳食纤维的研究以及功能食品的研发提供数据支持与理论基础。

关键词: 黑木耳可溶性膳食纤维, 体外降脂, 功能特性, 理化性质, 高脂饮食, 体内降脂

中图分类号: TS201.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)02-0112-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024030398

本文网刊:



Functional Characteristics and Lipid Lowering Activity of *Auricularia heimuer* Soluble Dietary Fiber

SHANG Xueyu^{1,2}, MEI Heriban^{1,2}, SU Ling^{1,2,*}, WANG Qi^{1,2,*}

(1. Engineering Research Center of Chinese Ministry of Education for Edible and Medicinal Fungi,
Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;

2. College of Plant Protection, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: In this study, the residue of *Auricularia heimuer* polysaccharide after hot water extraction was used as raw material, and the soluble dietary fiber (HSDF) of *A. heimuer* was extracted by compound enzyme method. Its molecular weight, monosaccharide composition and sugar chain composition were analyzed, its water holding capacity, oil holding capacity, swelling power and other physical and chemical properties were detected, and its lipid-lowering activity *in vitro* was evaluated by measuring cholesterol adsorption capacity, lipase inhibition rate and cholate binding rate. The obese

收稿日期: 2024-03-26

基金项目: 吉林省国际科技合作项目 (20220402051GH); 国家重点研发计划项目 (2021YFD1600401)。

作者简介: 尚学钰 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 菌物药理学, E-mail: shangxy23@163.com。

* 通信作者: 苏玲 (1982-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 菌物学, E-mail: suling0648@163.com。

王琦 (1963-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 菌物学, E-mail: qiwang@jla.edu.cn。

animal model was constructed by high fat diet (HFD) C57BL/6J mice, and treated with *A. heimuer* soluble dietary fiber. The body weight, biochemical indexes, and pathological changes of liver tissue and adipose tissue of HSDF treated obese mice were evaluated, and its lipid-lowering efficacy in obese mouse model was explored. Results showed that the relative molecular weight of HSDF was 4.14×10^5 Da, which was a mixture of mannose, glucuronic acid, glucose, galactose, xylose and fucose. The molar ratio was 1808.87:0.00278:4.43:2.13:2.84:5.01. The average water holding capacity of HSDF was (11.62 ± 0.302) g·g⁻¹, the average oil holding capacity was (2.95 ± 0.259) g·g⁻¹, the average swelling capacity was (12.7 ± 0.434) mL·g⁻¹, and the adsorption capacity of intestinal cholesterol was 6.63 mg·g⁻¹. When the concentration was 1.2 mg·mL⁻¹, the binding rate of sodium glycocholate and sodium taurocholate could reach 92.91% and 90.93%. In addition, HSDF with a concentration of 2.0 mg·mL⁻¹ had a 75% inhibition rate of pancreatic lipase, and had good lipid-lowering activity *in vitro*. At the same time, HSDF could significantly ($P < 0.05$) improve the organ index of HFD mice, improve the lipid accumulation, inflammatory cell infiltration in the liver and adipocyte enlargement in adipose tissue of HFD mice, and improve the cell area of white adipose tissue of epididymis by more than 50%, which had a good lipid-lowering effect *in vivo*. The results can provide data support and theoretical basis for the subsequent research on dietary fiber of *A. heimuer* and the research and development of functional food.

Key words: *Auricularia heimuer* soluble dietary fiber; lipid lowering *in vitro*; functional characteristics; physical and chemical properties; high fat diet; lipid lowering *in vivo*

高脂血症(hyperlipidemia, HLP)是体内脂质代谢紊乱的表现,也是诱发动脉粥样硬化直接因素^[1-2]。据统计,每年因心血管疾病(Cardiovascular disease, CVDs)死亡的人数占全球总死亡人数的32%,这也是全球死亡率增高的主要原因之一。目前,临幊上常用于治疗高血脂的药物为他汀类药物,但长期服用不仅会产生很多副作用,还会增加经济负担。因此,有必要开发具有降血脂功能的天然物质产品,作为对抗疗法药物的替代途径。膳食纤维(dietary fiber, DF)是在人体小肠中不能被消化吸收,而在大肠中完全或部分发酵的植物性可食用部分或类似碳水化合物的总称,具有良好的营养价值和生理功能,被认为是“第七大营养素”,金针菇、胡萝卜、燕麦以及滇橄榄果渣等多糖或膳食纤维已被发现具有显著的降脂作用^[3-4]。

黑木耳(*Auricularia heimuer* F.)隶属于担子菌门、蘑菇纲、木耳目、木耳科、木耳属^[5-6],在我国有千余年的栽培历史,是我国食用菌第二大栽培品种^[7]。黑木耳的膳食纤维含量高达51.92~57.57 g/100 g,是黑木耳中最主要的成分之一^[8],具有开发为天然降脂活性成分的潜力,但目前对于其降脂活性的研究仍不完善,因此,本研究采用复合酶法提取黑木耳残渣中可溶性膳食纤维,并对其胆固醇吸附能力、脂肪酶抑制率和胆酸盐结合率进行了详细的测试,以评估其在体外的降脂效果,并通过构建肥胖动物模型,探究黑木耳可溶性膳食纤维对高脂饮食诱导的肥胖症的降脂作用效果,为后续黑木耳膳食纤维的研究以及功能食品的研发提供数据支持与理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

4周龄C57BL/6J小鼠 购自北京维通利华生物科技有限公司(动物许可证号:SCXK(京)2021-0006),实验动物方案通过吉林农业大学动物伦理审批(动物实验伦理号:20220921001);热水提取黑木

耳多糖后剩余的黑木耳残渣干粉 由吉林农业大学食药用菌教育部工程研究中心提供;纤维素酶10000 U/g,上海麦克林生化科技有限公司;果胶酶40 U/mg,武汉华翔科洁生物技术有限公司;鸡蛋市售;胆固醇 四川维克奇生物科技有限公司;胰脂肪酶 30~90 U/mg,上海瑞永生物科技有限公司;奥利司他 重庆植恩药业有限公司;辛他伐汀 北京双鹭药业股份有限公司;胰蛋白酶 50 U/mg,北京鼎国昌盛生物技术有限责任公司;血清总胆固醇(TC)试剂盒、血清甘油三酯(TG)试剂盒 南京建成生物工程研究所有限公司。

AL104 分析天平 上海梅特勒-托利多仪器有限公司;KJ 20AL 超声机 深圳市科洁超声科技有限公司;THZ-98A 恒温摇床振荡器 上海一恒科学仪器有限公司;Model 1680 酶标分析仪 伯乐生命医学产品有限公司;ALPHA1-4 真空冷冻干燥机 江苏肯尔菲实验仪器贸易有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑木耳可溶性膳食纤维提取及含量测定 称取黑木耳残渣干粉,料液比为1:80(g:mL),液体为纯净水,80 °C提取5 h后,在转速7000 r/min下离心15 min,取上清液1;在下层沉淀中,料液比为1:30(g:mL),向其中加入Na₂CO₃溶液,常温下超声提取30 min,然后以7000 r/min速度离心15 min,得到清液2。将下层沉淀用蒸馏水洗至中性,60 °C,20 h进行烘干。在烘干的沉淀中,按照1:30的料液比例加入蒸馏水,pH调节至5.0。加入0.9%的纤维素酶和果胶酶,并在50 °C下酶解反应3.5 h。随后,在100 °C下灭活20 min,在转速为7000 r/min下离心15 min,通过分离过程得到上清液3,pH调节至7.0,合并上清液1、2、3,进行60 °C,12 h浓缩及-50 °C,12 h冻干处理,最终获得黑木耳可溶性膳食纤维(HSDF)。

可溶性膳食纤维的质量分数按照GB 5009.88-

2014《食品安全国家标准食品中膳食纤维的测定》中的酶重量法进行测定。蛋白质含量的测定参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准食品的方法测定》。采用 ICP-OES 方法,依据 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准食品中多元素的测定》,对黑木耳可溶性膳食纤维(HSDF)中的铁元素进行测量。

1.2.2 黑木耳可溶性膳食纤维组成分析

1.2.2.1 分子量测定 采用高效凝胶渗透色谱法对 HSDF 进行分子量测定^[9],称取分子质量(M_v)为 10、40、70、100、200、500 kDa 的葡聚糖标准品,加蒸馏水配制成 10 mg/mL 溶液,过 0.22 μm 水相滤膜,保留时间 t 为 x 轴,相对分子质量对数 lg M_w 为 y 轴,绘制标准曲线($y=-0.23361x+7.6677, R^2=0.9941$)。称取 5 mg HSDF 加入蒸馏水配制成 10 mg/mL 溶液,过 0.22 μm 水相滤膜,进行检测并记录色谱图。色谱条件为: Agilent 1260 Infinity ELSD 蒸发光散射检测器, TSK-gel G-3000PWXL 色谱柱(7.8 mm×300 mm),柱温为 35 ℃,流动相为蒸馏水,流速为 0.6 mL/min。根据标准曲线,计算 SDF 相对分子质量。

1.2.2.2 单糖组成分析 通过高效液相色谱对 HSDF 单糖组成进行测定,称取 HSDF 5 mg,加入配制好的 TFA 溶液,121 ℃ 加热 2 h,氮气吹干。加入甲醇清洗再吹干,重复 3 次。加入无菌水溶解,转入色谱瓶中待测。流动相: A 相: ddH₂O; B 相: 200 mmol/L NaOH; C 相: 200 mmol/L NaOH/500 mmol/L NaAC。洗脱程序为: 0~30 min 流动相 A、B、C 分别为 99.2%、0.8% 和 0%; 30~40 min 流动相 A、B、C 分别为 79.2%、0.8% 和 20%; 40~60 min 流动相 A、B、C 分别为 20%、80% 和 0%; 60 min 流动相 A、B、C 分别为 99.2%、0.8% 和 0%。流速: 0.5 mL/min。

1.2.2.3 红外光谱分析 称好的样品和溴化钾(KBr)放入烘干机中,烘干 4 h;将样品与溴化钾以质量比 1:100 的比例充分研磨,混合均匀,用压片机将混合物压成透明片,在 4000~500 cm⁻¹ 范围内扫描,扫描次数为 64,分辨率为 4 cm⁻¹。

1.2.3 黑木耳可溶性膳食纤维理化性质测定

1.2.3.1 持水力的测定 参照文献 [10],称取 0.5 g 的 HSDF,加入 8 mL 蒸馏水混合均匀。在室温条件下静置 18 h,然后在 3000 r/min 下离心 20 min。记录离心后沉淀的质量为 m_f,将沉淀在 105 ℃ 下干燥,直到质量恒定,记录此时的质量为 m_d。每组重复 3 次,持水力(WRC)计算公式如下:

$$WRC(g/g) = \frac{m_f - m_d}{m_d}$$

式中: WRC 为膳食纤维持水力, g/g; m_f 为离心后沉淀质量, g; m_d 为干燥后沉淀质量, g。

1.2.3.2 持油力的测定 参照文献 [11],准确称取 0.2 g HSDF(标记为 m₀),将其放入离心管中,再次称量离心管和样品的总质量为 m₁。接下来,加入 5 mL

精制菜籽油,与样品充分混合。将混合物在室温下静置 18 h,并以 6000 r/min 的速度离心 10 min。之后,去除表面的油,并称量剩余物质(表示为 m₂)。每组三次平行试验,按照以下公式计算持油力(OAC)。

$$OAC(g/g) = \frac{m_2 - m_1}{m_0}$$

式中: OAC 为膳食纤维持油力, g/g; m₀ 为称量的 HSDF 质量, g; m₁ 为总质量, g; m₂ 为剩余物质总质量, g。

1.2.3.3 膨胀力的测定 参照文献 [12],准确称取 0.5 g HSDF(m),放入离心管中。轻轻振动离心管以保持样品平面水平,并记录初始体积为 V₀。向其中加入 10 mL 蒸馏水,将混合物置于环境温度下,水合 18 h,并记录最终体积 V。膨胀力(WSC)计算公式如下:

$$WSC(mL/g) = \frac{V - V_0}{m}$$

式中: WSC 为膳食纤维膨胀力, mL/g; m 为称量的 HSDF 质量, g; V₀ 为初始体积, mL; V 为最终体积, mL。

1.2.4 黑木耳可溶性膳食纤维体外降脂活性

1.2.4.1 胆固醇吸附能力 鸡蛋取鸡蛋黄,去除蛋白,随后向其中加入 9 倍体积的去离子水稀释,充分搅拌,在 200 mL 锥形瓶中加入 50 mg HSDF,加入 15 mL 上述蛋黄液,将 pH 分别调至 2 和 7,对人的胃和肠道环境进行模拟^[13]。置于 37 ℃ 的环境下,进行 2 h 的搅拌,在 4000 r/min 下离心 20 min,抽取上清液 400 μL,将 1 mL 浓硫酸加入 1.5 mL 配制好的 OPA 试剂盒,混匀后,置于室温 10 min,最终以 550 nm 波长检测样本的吸光度。以胆固醇标准浓度为横坐标 x,以吸光度为纵坐标 y 绘制标准曲线,根据标准曲线($y=0.0094x-0.0076, R^2=0.9965$)求出胆固醇的浓度。

$$\text{胆固醇吸附能力}(mg/g) = \frac{a - b}{m}$$

式中: a 为吸附前蛋黄液中的胆固醇含量, mg; b 为吸附后上清液中的胆固醇含量, mg; m 为 HSDF 加入量, g。

1.2.4.2 胆酸盐吸附能力 取 3 mL HSDF 于锥形瓶中,向其中加入 3 mL 10 mg/mL 胃蛋白酶(溶于 pH 6.3 的 0.1 mol/L 磷酸盐缓冲液),1 mL 0.01 mol/L HCl,以模拟胃消化过程及环境。向每个样品中同等加入 4 mL 0.4 mmol/L 的甘氨胆酸钠、0.5 mmol/L 牛磺胆酸钠,于 37 ℃ 恒温条件下振荡 1 h,将混合物转移至离心管中,以 4000 r/min 离心 20 min,取上清液,采用比色法进行测定,每个样品平行 3 次。胆酸盐结合率计算公式如下:

$$\text{胆酸盐结合率}(\%) = \frac{\text{胆酸盐加入量} - \text{胆酸盐剩余量}}{\text{胆酸盐加入量}} \times 100$$

1.2.4.3 胰脂肪酶抑制活性 将 0.5 mg 胰脂肪酶溶解于 1 mL PBS 缓冲液(200 mmol/L pH7.5)中, 配制成 0.5 mg/mL 溶液; 称取 0.5 mg 4-甲基伞形酮油酸酯(4-MUO), 将其溶解于浓度 1 mL 的 PBS 缓冲液(200 mmol/L pH7.5), 配比得到浓度为 0.5 mg/mL 的溶液备用; 继续称取 40 mg HSDF 溶解于 4 mL PBS 缓冲液中, 配制成 10 mg/mL 溶液, 并设置不同浓度梯度。最终在 320 nm 激发波长和 450 nm 发射波长下测量吸光度。并将奥利司他和辛他伐汀作为阳性对照。抑制率的计算公式为:

$$\text{胰脂肪酶抑制率}(\%) = \left(1 - \frac{A_{\text{样品}} - A_{\text{样品对照}}}{A_{\text{空白}} - A_{\text{空白对照}}} \right) \times 100$$

1.2.5 黑木耳可溶性膳食纤维体内降脂效果

1.2.5.1 动物建模给药 实验以 90 只 4 周龄雄性 C57BL/6J 小鼠为对象, 体重 20~22 g。动物室内的温度保持在 20~25 °C, 湿度保持在 50%~55%, 给予明/暗光照时间分别为 12 h。对小鼠进行适应性喂养 1 周后, 随机选择 75 只小鼠喂食 60% 的高脂肪饲料(D12492)进行建模, 其余小鼠作为空白组(NC), 继续饲喂普通饲料。建模时间为 8 周。成功建立肥胖小鼠模型后, 剔除建模不成功的小鼠, 将空白对照组以外的其他小鼠随机分为五组(n=8): 模型组(MC)、阳性对照组(PC)、HSDF 低剂量组(SL, 100 mg/kg)、中剂量组(SM, 200 mg/kg)和高剂量组(SH, 400 mg/kg)。分组后, 空白对照组的小鼠继续每天喂食基础饲料, 其他组继续喂食高脂饲料。根据体重对小鼠进行灌胃给药, 阳性药选择为奥利司他(150 mg/kg)。给药期间自由饮水和进食。给药周期为 6 周。

1.2.5.2 样品收集 实验结束后, 解剖小鼠, 取小鼠肝脏、腹股沟白色脂肪组织、肾周白色脂肪组织、附睾白色脂肪组织、肩胛骨棕色脂肪组织, 对各个组织进行称重, 一部分放入 5 mL 离心管中, 于-80 °C 进行保存, 其余部分用 4% 多聚甲醛固定, 常温保存, 用于后续实验。

1.2.5.3 血清生化指标测定 根据相关试剂盒说明书对小鼠血清总胆固醇(Total cholesterol, TC)、甘油三酯(Triglyceride, TG)指标进行检测。

1.2.5.4 苏木精-伊红(Hematoxylin-eosin, H&E)染色检测 将切割好的组织和相应的标签放入脱水槽中。将脱水槽放入脱水器内的篮子中, 逐渐梯度脱水。浸蜡组织在包埋机内进行包埋。将蜡块从框架中取出并切割, 切片厚度为 4 μm。切片漂浮在 40 °C 摊铺机的温水中, 将组织压平, 用载玻片将其拾起, 并在 60 °C 的烘箱中烘烤。完成后, 进行 H&E 染色以及显微镜观察, 进行图像采集分析。

1.2.5.5 脂肪细胞测量 采用 Image-pro plus 6.0 (Media Cybernetics, Inc., Rockville, MD, USA) 分析软件, 每组内每张切片挑选 200 倍视野进行拍照。

拍照时尽量让组织充满整个视野, 保证每张照片的背景光一致。应用 Image-Pro Plus 6.0 软件以 200 倍标尺为标准, 每张切片选取 5 个完整的脂肪细胞测量面积。

1.3 数据处理

所有试验均重复测定 3 次, 并采用 SPSS 20 软件对数据进行统计分析, 利用 Origin9.0 软件绘图, 数据处理采用单因素方差分析中 Tukey 法比较组间的差异性, 当 $P < 0.05$ 时具有统计学差异, 数据表示为平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 黑木耳可溶性膳食纤维成分分析及理化性质

HSDF 的提取率为 78%, 经检测确定 HSDF 由 50.7% 的膳食纤维, 14.86% 的粗多糖, 18.1% 的蛋白质组成, 并含有 255 mg/kg 的 Fe(表 1)。理化性质分析结果表明(表 2), HSDF 的平均持水力为(11.62±0.302)g/g, 平均持油力为(2.95±0.259)g/g, 平均膨胀力为(12.7±0.434)mL/g, 膳食纤维具有大量的亲水基团, 与水分子结合后会起到膨胀的效果, 在胃肠道中会增强饱腹感, 从而有助于减肥降脂^[14]。所测性质高于毕云枫等^[15]从人参残渣中所提取的膳食纤维, 以及杭书扬等^[16]从山药皮残渣中所提取的可溶性膳食纤维, 接近张羽婷^[17]所提取的梯棱羊肚菌可溶性膳食纤维, 表现出良好的理化性质。

表 1 HSDF 成分分析

Table 1 Composition analysis of HSDF

成分	含量
总膳食纤维(g/100 g)	50.7
可溶性膳食纤维(g/100 g)	78
粗多糖(g/100 g)	14.86
铁元素(mg/kg)	255
蛋白质(g/100 g)	18.1

表 2 HSDF 的理化性质

Table 2 Physicochemical properties of HSDF

指标	结果
持水力(g/g)	11.62±0.302
持油力(g/g)	2.95±0.259
膨胀力(mL/g)	12.7±0.434

2.2 黑木耳可溶性膳食纤维的分子量测定

对样品分子量进行标准曲线的绘制, 回归曲线为 $lg = -0.23361x + 7.6677, R^2 = 0.9941$ 。在此条件下测定 HSDF 的分子量(图 1), HSDF 洗脱峰为单一洗脱峰, 保留时间为 8.779 min, 代入分子量标准曲线得到分子量为 4.14×10^5 Da。

2.3 黑木耳可溶性膳食纤维的单糖组成分析

HSDF 经酸解及衍生化后, 通过 HPLC 检测的结果如图 2 所示。甘露糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖、岩藻糖保留时间分别为 18、30.2、39.5、

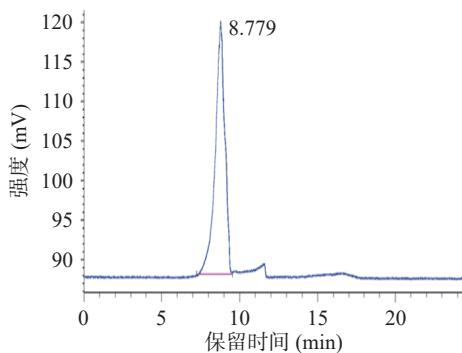


图 1 HDF 高效凝胶渗透色谱图

Fig.1 High performance gel permeation chromatography of HSDF

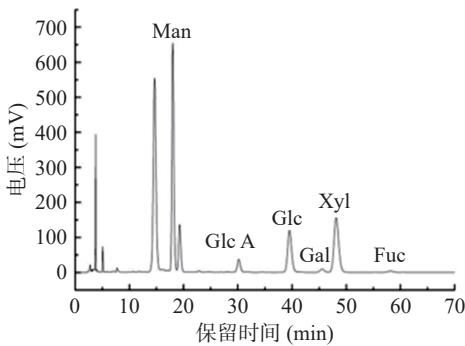


图 2 HSDF 单糖组成分析

Fig.2 Analysis of monosaccharide composition of HSDF
注: Man 甘露糖, Glc A 葡萄糖醛酸, Glc 葡萄糖, Gal 半乳糖, Xyl 木糖, Fuc 岩藻糖。

45.5、48.1、58.1 min。根据计算得出, HSDF 单糖组成摩尔百分比为 1808.87:0.00278:4.43:2.13:2.84:5.01。

2.4 黑木耳可溶性膳食纤维的红外光谱分析

如图 3 所示, 黑木耳可溶性膳食纤维具有纤维素类多糖的特征吸收峰, 其中在波数 3400 cm^{-1} 附近的宽吸收峰是 O-H 键伸缩振动产生的, 说明分子内氢键较多, 这增加膳食纤维的亲水性^[18]; 在波数 2900 cm^{-1} 附近出现由糖类甲基和亚甲基 C-H 引起的伸缩振动, 在波数 1600 cm^{-1} 附近是羧基或醛基的特征峰, 说明黑木耳残渣 SDF 中含有糖醛酸; 在波数 1000 cm^{-1} 左右具有 C-O-C 引起的伸缩振动^[19]。综上, HSDF 具有较多的亲水基团, 是由多糖聚合而成的 β -吡喃糖。

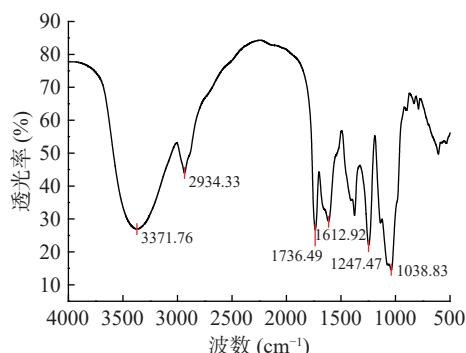


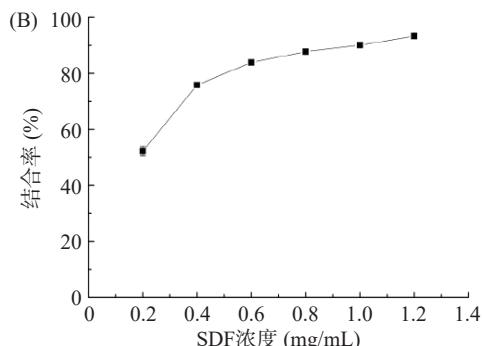
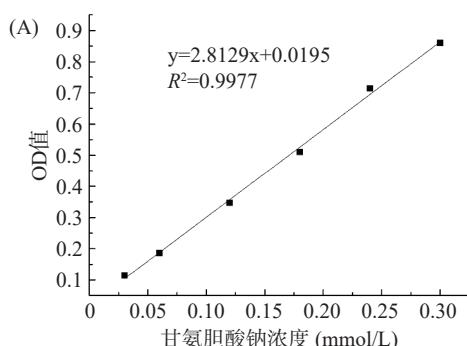
图 3 HSDF 红外光谱

Fig.3 FT-IR spectra of HSDF

2.5 黑木耳可溶性膳食纤维体外降脂活性

2.5.1 吸附胆固醇能力 胆固醇在体内有着广泛的生理作用, 然而它也可能导致高脂血症, 并且可能会造成如动脉粥样硬化、静脉血栓形成与胆石症等严重问题^[20]。HSDF 能够吸附胆固醇, 可以有效降低机体胆固醇含量, 从而减少相关并发症的发生^[21-22]。对 HSDF 的胆固醇吸附能力进行分析, 在 pH 为 7 时, HSDF 对胆固醇的吸附能力为 6.63 mg/g , 而当 pH 为 2 时, 吸附能力为 3.68 mg/g , 即 HSDF 在肠道中的吸附能力强于在胃中的吸附能力。这可能是因为膳食纤维对胆固醇的吸附能力受 pH 条件的显著影响, 在酸性条件下, 较多的 H^+ 使样品与胆固醇均带有一定的正电荷, 两者产生排斥力, 减弱了样品对胆固醇的吸附^[23]。膳食纤维对胆固醇的吸附能力常作为亲脂性物质的评价指标, 且已有文献报道, 膳食纤维可减少小肠对过量供给的甘油三酯和胆固醇的吸收和利用, 从而降低血胆固醇的水平^[24]。马凤等^[25]从梨渣中提取可溶性膳食纤维, 测得在肠道环境中对胆固醇吸附能力为 4.81 mg/g 。HSDF 具有较好的胆固醇吸附能力, 膳食纤维在消化道中对其的吸附能力越强, 越能起到更好的作用效果。

2.5.2 结合胆酸盐能力 纤维素和果胶等物质可以与胆盐结合成复合物, 从而阻止微小胆固醇颗粒的形成, 进而降低胆固醇的吸收^[26]。HSDF 结合甘氨胆酸钠及牛黄胆酸钠的能力结果见图 4, HSDF 有一定的胆酸盐结合能力。如图 4(A)、图 4(C)所示, 甘氨胆酸钠标准曲线为 $y=2.8129x+0.0195$ ($R^2=0.9977$), 线性关系良好; 牛黄胆酸钠标准曲线为 $y=2.535x+$



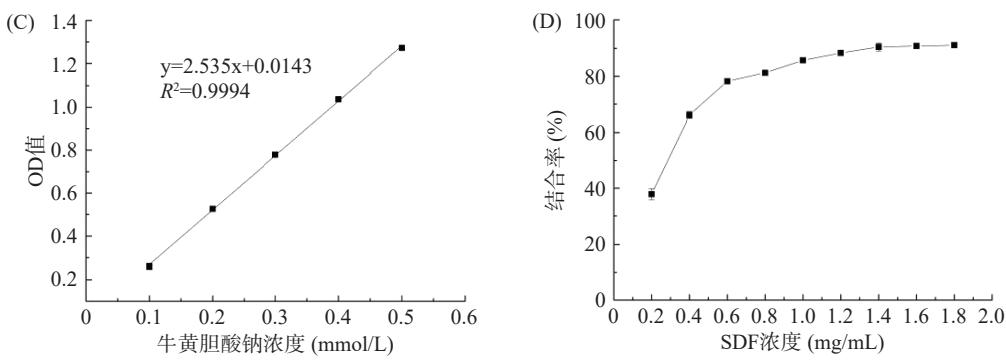


图 4 HSDF 结合胆酸盐能力
Fig.4 Cholate-binding capacity of HSDF

注: (A) 和 (C) 分别为甘氨胆酸钠和牛黄胆酸钠标准曲线; (B) 和 (D) 分别为甘氨胆酸钠和牛黄胆酸钠结合率。

0.0143 ($R^2=0.9994$), 线性关系良好。随着膳食纤维浓度的增加, 甘氨胆酸钠和牛黄胆酸钠的结合率逐渐增加, 且与 SDF 的浓度之间有明显的剂量-效应关系, 在膳食纤维浓度达到 1.2 mg/mL 时, 对甘氨胆酸钠的结合率可达到 92.91%; 在膳食纤维浓度达到 1.8 g/mL 时, 对牛黄胆酸钠的结合率可达到 90.93%。说明 HSDF 对胆酸盐表现出较强的结合能力。

2.5.3 胰脂肪酶抑制活性 胰脂肪酶在甘油三酯的消化中起关键作用, 它有效防止肠道对膳食甘油三酯的吸收, 因此是控制高脂血症和肥胖的关键途径^[27]。抑制胰脂肪酶活性对减少脂肪吸收具有有益作用。结果如图 5 所示。在 0.0~2.0 mg/mL 浓度范围内, HSDF 对胰脂肪酶抑制率随着浓度的增大而增加, 表现出较好的线性关系。在最大浓度时, 抑制率为 75%, 接近于药物(辛他伐汀、奥利司他)对胰脂肪酶的抑制率, 可见黑木耳可溶性膳食纤维的抑制效果有

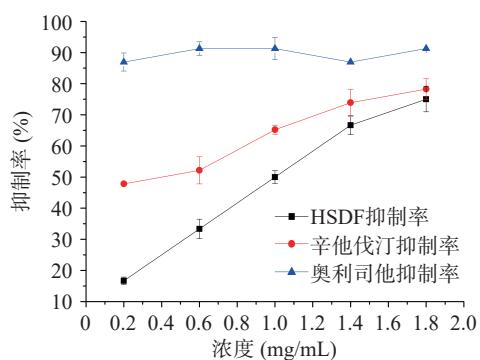


图 5 HSDF 对胰脂肪酶的抑制率

Fig.5 Inhibitory rates of HSDF on pancreatic lipase

一定的剂量依赖性, 但最终体现出良好的抑制效果, 说明 HSDF 在脂质消化中具有干预和调节的潜在优势。

2.6 黑木耳可溶性膳食纤维体内降脂效果

2.6.1 HSDF 对小鼠脏器指数的影响 通过对比表 3 中各组小鼠的脏器指数可以发现, MC 组小鼠经过高脂饲料喂养后, 各指数较 NC 组均有升高迹象, MC 组的肝脏指数较 NC 组显著上升 ($P<0.05$), SL 组较 MC 组相比有显著的恢复效果 ($P<0.01$)。尤其需要注意的是脂肪组织指数, 附睾脂肪组织 MC 组与 NC 组相比, 有极显著上升 ($P<0.001$), 肾周白色脂肪组织与腹股沟白色脂肪组织 MC 组与 NC 组相比也有上升现象 ($P<0.05$), 这是由于高脂喂养引起的过度肥胖导致的脂肪堆积造成的。在经过不同剂量的 HSDF 给药干预后, 各项指数均有所下降, 脂肪组织指数方面下降较为明显 ($P<0.05$), 说明 HSDF 具备减肥降脂, 缓解肥胖的功效。

2.6.2 HSDF 对小鼠生化指标的影响 如图 6 所示, 高脂喂养的小鼠血清中总胆固醇含量显著高于正常饲料喂养小鼠, 表明小鼠受肥胖状态影响, 出现了脂质代谢紊乱状况, 给予不同剂量黑木耳可溶性膳食纤维灌胃后, 各治疗组总胆固醇水平均有显著下降, 其中、高剂量灌胃组效果最为显著 ($P<0.0001$)。黑木耳可溶性膳食纤维对小鼠血清中甘油三酯的影响结果如图 6 所示, 模型组小鼠血清甘油三酯水平显著高于空白组小鼠, 但经过灌胃黑木耳可溶性膳食纤维后, 均照模型组有显著改善 ($P<0.0001$)。以上结果表明, HSDF 对于高脂饮食造成的脂质代谢紊乱状况有良好的治疗缓解效果。

表 3 各组小鼠脏器指数

Table 3 Organ index of mice in each group

器官组织	NC	MC	SL	SM	SH
肝脏	4.625±0.002	5.236±0.008 [#]	4.161±0.003 ^{**}	4.791±0.004	4.671±0.006 [*]
附睾白色脂肪组织	1.029±0.004	3.265±0.009 ^{###}	1.907±0.004 ^{**}	2.189±0.005 [*]	2.171±0.005 [*]
肾周白色脂肪组织	0.239±0.001	1.198±0.003 [#]	0.728±0.002 [*]	0.774±0.002 [*]	0.751±0.003 [*]
腹股沟白色脂肪组织	0.621±0.003	1.824±0.003 [#]	0.897±0.004 ^{***}	1.091±0.003 ^{**}	0.967±0.004 ^{**}
棕色脂肪组织	0.399±0.001	0.352±0.001	0.462±0.001 [*]	0.475±0.001 [*]	0.475±0.002 [*]

注: n=8, [#]P<0.05, ^{##}P<0.01, ^{###}P<0.001, vs NC 组; ^{*}P<0.05, ^{**}P<0.01, ^{***}P<0.001, vs MC 组。

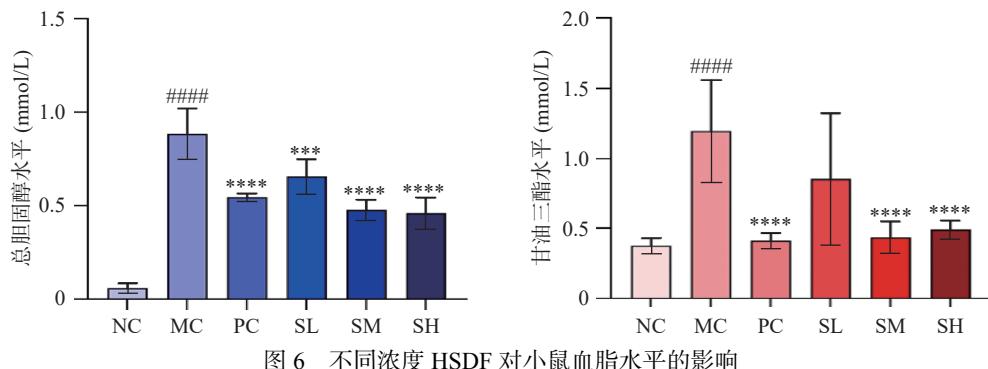


图 6 不同浓度 HSDF 对小鼠血脂水平的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of HSDF on blood lipid levels in mice

注: #####P<0.0001, vs NC 组; ***P<0.001, ****P<0.0001, vs MC 组, n=8。

2.6.3 HSDF 对 HFD 小鼠肝脏的病理影响 肝脏是机体脂质代谢的中心器官^[28], 肝内脂肪主要来源于食物和外周脂肪组织, 通过对小鼠肝脏的病理观察, 可以判断给药是否起到了保护效果。如图 7 结果显示, NC 组肝组织结构正常, 肝细胞未见明显脂肪变性; MC 组, 肝组织结构重度异常, 肝细胞广泛脂肪变性, 胞浆可见大小不一圆形空泡, 组织可见少量炎症细胞浸润, 给药组, 随着剂量的增加, 损伤程度较 MC 组有明显的改善, 不但抑制了炎症细胞浸润现象, 同时减少了脂肪的积累, 说明摄入 HSDF 能有效抑制由高脂饮食诱导的肝细胞形态学改变和脂肪变性。

2.6.4 HSDF 对 HFD 小鼠脂肪组织的影响 白色脂

肪组织(White adipose tissue, WAT)和棕色脂肪组织(Brown adipose tissue, BAT)是人体内两种不同类型的脂肪组织, 它们在结构和代谢功能上存在显著差异。白色脂肪是人体中最常见的脂肪组织, 主要存储能量并提供细胞膜的构建材料^[29]。然而, 当白色脂肪过度积累时, 就会导致肥胖症的发生。经过 HFD 喂养的小鼠会引起体内 WAT 脂肪细胞肥大和增生。如图 8 脂肪组织 HE 染色结果显示, NC 组, 脂肪空泡整体面积较小, 分布均匀; MC 组脂肪泡整体偏大, 并可见部分大泡脂肪细胞, 给药组均可见少量大泡脂肪细胞, 较 MC 组有所改善。对细胞面积进行测量, 结果如图 9 所示, 可见 MC 组脂肪细胞的面积相较于 NC 组脂肪细胞面积显著增大(P<0.001), 而摄入

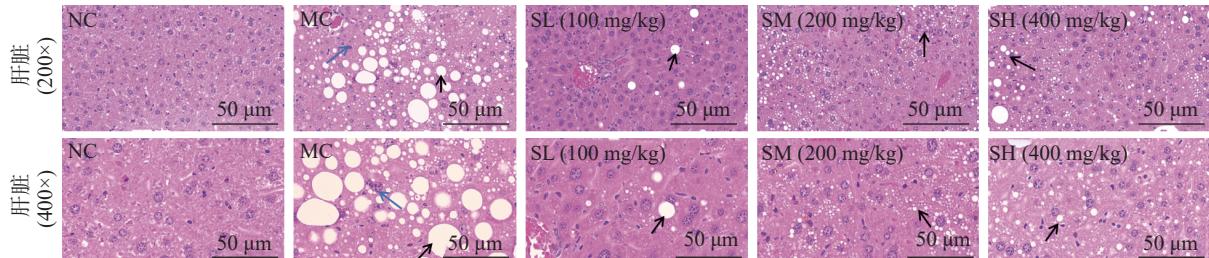


图 7 小鼠肝脏 H&E 染色

Fig.7 H&E staining of liver in mice

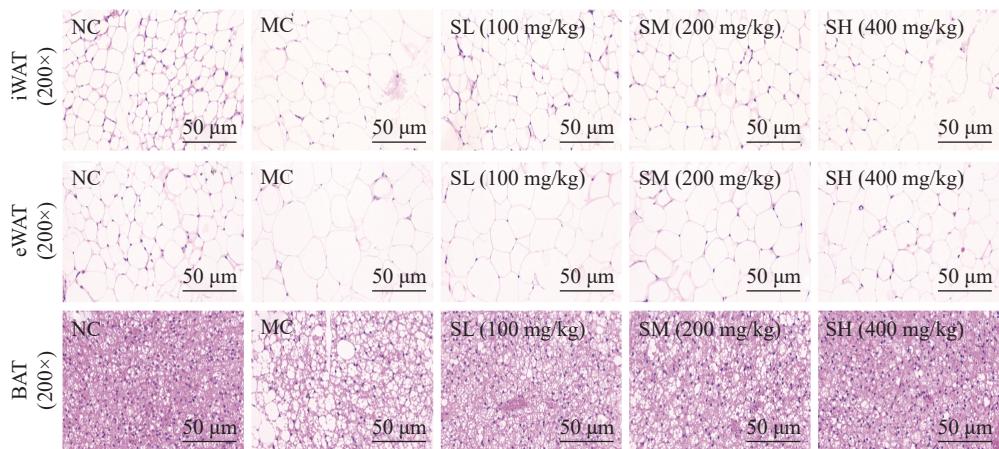


图 8 小鼠各脂肪 H&E 染色

Fig.8 H&E staining of adipose in mice

注: eWAT: 附睾白色脂肪组织; iWAT: 腹股沟白色脂肪组织; 图 9 同。

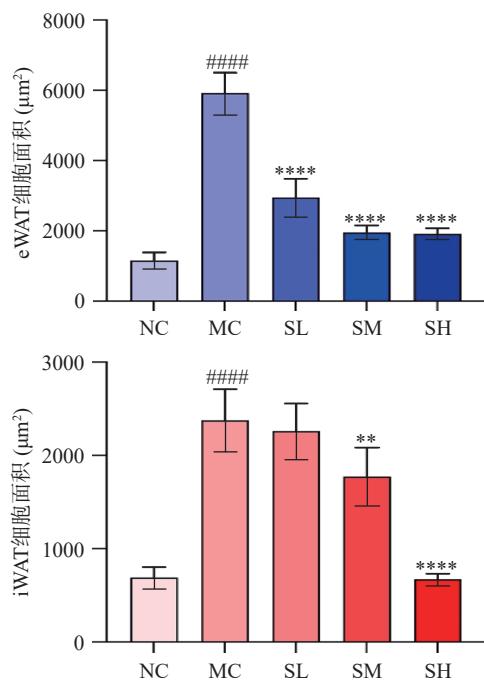


Fig.9 Area of adipocytes in mice

注: #####P<0.0001, vs NC 组; **P<0.01, ***P<0.001, vs MC 组。

HSDF 能有效改善恢复高脂饮食对脂肪组织细胞造成的损伤, 给药组细胞面积明显缩小, SH 组效果最为明显($P<0.001$)。

3 讨论

目前提取膳食纤维的主要方法有粗提法、化学法(酸碱浸提)、酶提法和发酵法等^[30]。本实验采用复合酶提法从黑木耳残渣中提取可溶性膳食纤维, 提取率为 78%, 付娆等^[31]采用纤维素酶法从黑木耳残渣中提取膳食纤维, 不可溶性膳食纤维的提取率为 40.32%, Du 等^[32]采用亚临界水提取法等三种提取方法提取脱脂椰子粉膳食纤维, 最优提取率为 13.99 g/100 g, 本实验采用复合酶法提取, 提取率为 78%, 与已有研究中的提取率相比, 本研究所采用方法提取率高, 成本较低。

膳食纤维生物活性与其结构密切相关, 膳食纤维最佳活性的发挥依赖于其相对分子量的大小, 分子量的过大或过小都不利于物质发挥其生物活性, 本研究结果显示 HSDF 分子量为 4.14×10^5 Da; 此外, HSDF 主要由甘露糖、葡萄糖醛酸、葡萄糖、半乳糖、木糖、岩藻糖组成, 其摩尔比为 1808.87:0.00278:4.43:2.13:2.84:5.01。胰脂肪酶是一种重要的脂肪分解酶, 由胰腺合成和分泌, 它将脂肪和油水解成单甘油酯和脂肪酸, 然后被身体重新吸收, 合成脂肪^[33], 因此, 抑制胰脂肪酶活力能够有效抑制脂质摄入。而胆酸盐可以通过“肝肠循环”进行再利用, 结合胆酸盐之后, 胆酸盐则无法完成“肝肠循环”, 肝脏就会将更多的胆固醇转化为胆汁酸, 从而间接地降低胆固

醇, 以此来达到降脂的目的^[34]。体外降脂实验结果表明, 在 HSDF 浓度为 1.2 mg/mL 时, 对甘氨胆酸钠的结合率可达到 92.91%; 当浓度达到 1.8 mg/mL 时, 对牛黄胆酸钠的结合率可达到 90.93%。HSDF 对胰脂肪酶抑制率呈现剂量依赖性, 在最大浓度时, 抑制率为 75%, 接近于辛他伐汀及奥利司他对胰脂肪酶的抑制率。可见黑木耳残渣中提取的可溶性膳食纤维具有减少机体对脂肪和胆固醇摄入的潜力, 可以为预防肥胖、高血脂等方面疾病的保健食品原料来源^[35-36]。

研究表明, 长期摄入的食物中含有大量的饱和脂肪或反式脂肪、缺乏锻炼、吸烟及肥胖均可引发高血脂症^[37], 研究通过高脂饲料诱导建立小鼠肥胖症模型, 给予 HSDF 干预, 来检验 HSDF 在体内的降脂效果。TC 浓度过高导致的胆固醇代谢失衡是高脂症的特征之一^[38], 而 TG 可在肝脏、脂肪等组织中可合成, 贮存脂肪组织中, 同时 TG 也是人体中提供能量的主要来源。刘学成等^[31]研究发现, 金针菇膳食纤维可改善由高脂饮食诱导的肥胖症小鼠脂质代谢紊乱现象, 而本研究证实, HSDF 具备良好的降低 TC、TG 水平的效果。在降脂方面, Pan 等^[39]发现灰树花多糖能上调肥胖小鼠 *AMPK-α*、*PPAR-α* 等基因的表达, 下调固醇调节原件结合蛋白-IC (SREBP-IC)、FAS 等蛋白的表达水平从而调节 TG 代谢, 起到降脂功效; Zhou 等^[40]研究发现, 竹笋膳食纤维可以通过调节肠道菌群和 PPAR/脂肪酸代谢信号通路改善高脂肪饮食引起的肥胖及其伴随的代谢变化。关于黑木耳可溶性膳食纤维降脂的作用机制还有待进一步研究确定。

4 结论

本研究通过采用复合酶提法从黑木耳残渣中提取可溶性膳食纤维, 并探究其功能特性、体外降脂活性以及对高脂喂养诱导的肥胖小鼠的影响。结果表明, HSDF 持水力, 持油力等理化性质良好, 其对脂肪、胆固醇、胆酸盐均表现出一定的吸附作用, 具备开发功能性食品的潜力。在降脂活性方面, HSDF 显著降低小鼠血清 TC、TG 水平, 同时 HSDF 给药治疗不但抑制了肝脏组织中炎症细胞浸润现象, 同时减少了脂肪的积累, 说明摄入脂肪组织切片 HSDF 能有效抑制由高脂饮食诱导的肝细胞形态学改变和脂肪变性; 而结果显示, 摄入 HSDF 能有效改善恢复高脂饮食对脂肪组织细胞造成的损伤。综上, 黑木耳可溶性膳食纤维具有良好的降脂活性。未来可以结合肠道菌群研究及多组学联合分析继续开展黑木耳可溶性膳食纤维预防肥胖, 降脂方面的研究, 探究其作用机制, 为后续药物开发提供理论支持。

参考文献

- [1] ZHAO S P, ZHONG J, SUN C H, et al. Effects of aerobic exercise on TC, HDL-C, LDL-C and TG in patients with hyperlipidemia: A protocol of systematic review and meta-analysis[J]. *Medicine*, 2021, 100(10): e25103.
- [2] 林桂宇, 黄斌, 成芳梅, 等. 牡蛎葛根固体饮料对实验性高血脂症小鼠的血脂调节及肝脏保护作用研究[J]. 广西医科大学学报, 2021, 38(11): 2028–2033. [LIN G Y, HUANG B, CHENG F M, et al. Effect of oyster and kudzu root powder drink on blood lipid regulation and liver protection in experimental hyperlipidemia mice[J]. *Journal of Guangxi Medical University*, 2021, 38(11): 2028–2033.]
- [3] 刘学成, 王文亮, 弓志青, 等. 金针菇膳食纤维改性、理化性质及抗氧化、降血脂活性[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 90–98. [LIU X C, WANG W L, GONG Z Q, et al. Modification, physicochemical properties and lipid-lowering and antioxidant activity of dietary fiber from *Flammulina velutipes*[J]. *Food Science*, 2021, 42(23): 90–98.]
- [4] YANG X, DAI J, ZHONG Y, et al. Characterization of insoluble dietary fiber from three food sources and their potential hypoglycemic and hypolipidemic effects[J]. *Food & Function*, 2021, 12(14): 6576–6587.
- [5] 戴玉成, 周丽伟, 杨祝良, 等. 中国食用菌名录[J]. 菌物学报, 2010, 29(1): 1–21. [DAI Y C, ZHOU L W, YANG Z L, et al. A revised checklist of edible fungi in China[J]. *Mycosistema*, 29(1): 1–21.]
- [6] 戴玉成, 杨祝良, 崔宝凯, 等. 中国森林大型真菌重要类群多样性和系统学研究[J]. 菌物学报, 2021, 40(4): 770–805. [DAI Y C, YANG Z L, CUI B K, et al. Diversity and systematics of the important macrofungi in Chinese forests[J]. *Mycosistema*, 2021, 40(4): 770–805.]
- [7] WU F, YUAN Y, MALYSHEVA F V, et al. Species clarification of the most important and cultivated *Auricularia* mushroom “Heimuer”: evidence from morphological and molecular data[J]. *Phytotaxa*, 2014, 186(5): 241–253.
- [8] 陈雪凤, 韦仕岩, 吴圣进, 等. 不同黑木耳菌株的营养成分分析比较[J]. 食用菌, 2016, 38(2): 72–73. [CHEN X F, WEI S Y, WU S J, et al. Comparative analysis of nutritional components of different strains of *Auricularia heimuer*[J]. *Edible Fungi*, 2016, 38(2): 72–73.]
- [9] 李鸥叶, 张全才, 施晓丹, 等. 基于高效凝胶渗透色谱法和离子色谱法的棘托竹荪提取物的质量控制[J]. 中国食品学报, 2019, 19(12): 213–219. [LI O Y, ZHANG Q C, SHI X D, et al. Quality control of extracts from *Dictyophora echinovolata* by high performance gel permeation chromatography and ion chromatography[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2019, 19(12): 213–219.]
- [10] ESPOSITO F, ARLOTTI G, BONIFATI A M, et al. Antioxidant activity and dietary fibre in durum wheat bran by-products[J]. *Food Research International*, 2005, 38(10): 1173.
- [11] WANG Lei, XU Honggao, YUAN Fang, et al. Preparation and physicochemical properties of soluble dietary fiber from orange peel assisted by steam explosion and dilute acid soaking[J]. *Food Chemistry*, 2015, 185(19): 90–98.
- [12] 张丽萍. 海带膳食纤维降脂减肥功效及作用机制研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2021. [ZHANG L P. Study on the lipid-lowering and weight loss effects and mechanisms of kelp dietary fiber[D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2021.]
- [13] 欧仕益, 郑妍, 刘子立, 等. 不同麦麸材料吸附脂肪和胆固醇的研究[J]. 现代食品科技, 2004: 24–26. [OU S Y, ZHENG Y, LIU Z L, et al. Study on the adsorption of fat and cholesterol by different wheat bran materials[J]. *Modern Food Technology*, 2004: 24–26.]
- [14] 司风玲, 刘小裕, 邓俊林. 玉木耳根膳食纤维提取工艺优化及理化性质测定[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(20): 209–214. [SI F L, LIU X Y, DENG J L. Optimization of extraction process and determination of physical and chemical properties of dietary fiber from yumu ear root[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2019, 45(20): 209–214.]
- [15] 毕云枫, 李彤昕, 闫璐, 等. 复合酶法制备人参膳食纤维的研究[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(16): 114–119. [BI Y F, LI T X, YAN L, et al. Research on the preparation of ginseng dietary fiber by compound enzyme method[J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(16): 114–119.]
- [16] 杭书扬, 杨林霄, 郭建行, 等. 山药皮残渣中可溶性膳食纤维的提取工艺优化及结构表征[J]. 食品工业科技, 2023, 44(6): 261–266. [HANG S Y, YANG L X, GUO J X, et al. Optimization and characterization of extraction technology of soluble dietary fiber from yam peel residue[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(6): 261–266.]
- [17] 张羽婷. 梯棱羊肚菌可溶性膳食纤维的提取优化及应用研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2020. [ZHANG Y T. Extraction optimization and application of soluble dietary fiber from *Morchella importuna*[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2020.]
- [18] 刘露. 壮丽环苞多糖(CIS-A)和硫黄菌多糖(LSM-X)的结构鉴定及生物活性的研究[D]. 南充: 西华师范大学, 2018. [LIU L. Structural identification and biological activity of *Cyclobractus splendens* polysaccharide (CIS-A) and *Thiobacillus flavus* polysaccharide (LSM-X)[D]. Nanchong: China West Normal University, 2018.]
- [19] 赵诗雨, 赵婷婷, 梁锐, 等. 三个不同产地香菇多糖的理化性质及生物活性研究[J]. 菌物学报, 2020, 39(8): 1530–1537. [ZHAO S Y, ZHAO T T, LIANG R, et al. Study on physicochemical properties and bioactivity of lentinan from three different producing areas[J]. *Chinese Journal of Fungi*, 2020, 39(8): 1530–1537.]
- [20] PATEL R S, SCOPELLITI E M, SAVELLONI J. Therapeutic management of familial hypercholesterolemia: current and emerging drug therapies[J]. *Pharmacotherapy: The Journal of Human Pharmacology and Drug Therapy*, 2015, 35(12): 1189–1203.
- [21] 于美江, 赵鑫, 尹红力, 等. 碱提醇沉黑木耳多糖体外和体内降血脂功能[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 232–237. [YU M H, ZHAO X, YIN H L, et al. *In vitro* and *in vivo* hypolipidemic effect of *Auricularia heimuer* polysaccharides[J]. *Food Science*, 2017, 38(1): 232–237.]
- [22] WU W J, HU J, GAI H Y, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. *Food Chemistry*, 2020, 332: 127372.
- [23] 李晗, 杨宗玲, 毕永雪, 等. 超声辅助酶法提取西番莲果皮可溶性膳食纤维及理化性质[J]. 食品工业科技, 2020, 41(7): 161–165, 172. [LI H, YANG Z L, BI Y X, et al. Ultrasonic assisted enzymatic extraction of soluble dietary fiber from passion fruit peel and its physicochemical properties[J]. *Food Industry Technology*, 2020, 41(7): 161–165, 172.]
- [24] HUANG H R, CHEN J J, CHEN Y, et al. Modification of tea residue dietary fiber by high-temperature cooking assisted enzymat-

- ic method: Structural, physicochemical and functional properties[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 145: 111314.1–9.
- [25] 马凤, 张振宇, 陈启苗, 等. 梨渣可溶性膳食纤维提取工艺优化及功能特性分析[J]. 现代食品科技, 2024, 40(3): 229–238. [MA F, ZANG Z Y, CHEN Q M, et al. Optimization of extraction process and functional characteristics analysis of soluble dietary fiber from pear residue[J]. Modern Food Technology, 2024, 40(3): 229–238.]
- [26] 唐玉妹. 竹笋膳食纤维-多酚复合物的构建及其性能的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023. [TANG Y M. Construction and properties of bamboo shoot dietary fiber polyphenols complex [D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2023.]
- [27] TRUONG N H, LEE S, SHIM S M. Screening bioactive components affecting the capacity of bile acid binding and pancreatic lipase inhibitory activity[J]. Applied Biological Chemistry, 2016, 59(3): 475–479.
- [28] 张云露, 张海涵, 谷雪玲, 等. 女贞子改善家禽肝脏损伤的作用机制[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(1): 6–10. [ZHANG Y L, ZHANG H H, GU X L, et al. The mechanism by which *Ligustrum lucidum* improves liver damage in poultry[J]. Chinese Journal of Animal Husbandry, 2021, 57(1): 6–10.]
- [29] 张莉唯, 刘喜明, 付守强, 等. 基于"中土之制"探讨黄连调节脂肪组织糖脂代谢的作用机制[J]. 中医学报, 2023, 38(7): 1410–1415. [ZHANG L W, LIU X M, FU S Q, et al. Exploring the mechanism of Huanglian in regulating lipid metabolism in adipose tissue based on the "Middle earth System"[J]. Journal of Traditional Chinese Medicine, 2023, 38(7): 1410–1415.]
- [30] DING Q, LI Z, WU W, et al. Physicochemical and functional properties of dietary fiber from *Nannochloropsis oceanica*: A comparison of alkaline and ultrasonic-assisted alkaline extractions [J]. LWT- Food Science and Technology, 2020: 110080.
- [31] 付娆, 徐曼旭, 孙安敏, 等. 纤维素酶提取黑木耳残渣中膳食纤维的条件优化[J]. 食品工业, 2014, 35(1): 41–44. [FU R, XU M X, SUN A M, et al. The optimal conditions for extraction of dietary fibre from *Auricularia heimuer* residues with cellulase[J]. The Food Industry, 2014, 35(1): 41–44.]
- [32] DU X J, WANG L, HUANG X, et al. Effects of different extraction methods on structure and properties of soluble dietary fiber from defatted coconut flour[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 143(1): 111031.
- [33] LI S, HU X, PAN J H, et al. Mechanistic insights into the inhibition of pancreatic lipase by apigenin: Inhibitory interaction, conformational change and molecular docking studies[J]. Journal of Molecular Liquids, 2021, 335(1): 116505.
- [34] 姜欣洋, 梁金月, 史继童, 等. 补骨脂乙醇提取物活性成分与抗氧化及胆酸盐结合能力的关联性分析[J]. 食品工业科技, 2022, 43(13): 381–388. [QIANG X Y, LIANG J Y, SHI J T, et al. Correlation analysis between the active ingredients and the antioxidant or cholate binding ability of ethanol extracts from *Psoralea corylifolia* L.[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(13): 381–388.]
- [35] XUE Z H, GAO X D, JIA Y N, et al. Structure characterization of high molecular weight soluble dietary fiber from mushroom *Lentinula edodes* (Berk.) Pegler and its interaction mechanism with pancreatic lipase and bile salts[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 1281–1290.
- [36] 孙颖, 孟昭琴, 魏建华. 补充黑木耳多糖和运动对高脂血症大鼠血脂代谢的影响[J]. 教育体育与研究, 2021: 100–104
- [SUN Y, MENG Z Q, WEI J H. The effects of supplementing polysaccharides from *Auricularia heimuer* and exercise on lipid metabolism in hyperlipidemic rats[J]. Education, Sports and Research, 2021: 100–104.]
- [37] REAL J T, ASCASO J F. Metabolismo lipídico y clasificación de las hiperlipemias[J]. Clínicas Investigación en Arteriosclerosis, 2021, 33: 3–9.
- [38] LI Z Z, HUANG Q, YANG X L, et al. Cholesterol metabolic markers for differential evaluation of patients with hyperlipidemia and familial hypercholesterolemia[J]. Disease Markers, 2022, 2022: 2008556.
- [39] PAN Y Y, WAN X Z, ZENG F, et al. Regulatory effect of *Grifola frondosa* extract rich in polysaccharides and organic acids on glycolipid metabolism and gut microbiota in rats[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 155: 1030–1039.
- [40] ZHOU X L, MA L J, DONG L, et al. Bamboo shoot dietary fiber alleviates gut microbiota dysbiosis and modulates liver fatty acid metabolism in mice with high-fat diet-induced obesity[J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1161698.