倪立颖, 孙梦雪, 胡付侠, 等. 金针菇菇脚不溶性膳食纤维对高血脂小鼠的降脂作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(7): 431−441. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030362

NI Liying, SUN Mengxue, HU Fuxia, et al. Hypolipidemic Effect of Insoluble Dietary Fiber from *Flammulina velutipes* Root in Hyperlipidemic Mice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(7): 431−441. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030362

· 营养与保健 ·

金针菇菇脚不溶性膳食纤维对高血脂小鼠的降脂作用

倪立颖[1], 孙梦雪[1], 胡付侠[1], 张　明[1], 郭泽镔[2], 林少玲[2], 马　超[1,*], 吴茂玉[1,*]

（1.中华全国供销合作总社济南果品研究所, 山东济南 250014;
2.福建农林大学食品科学学院, 福建福州 350002）

摘　要: 为探究蒸汽爆破预处理的金针菇菇脚不溶性膳食纤维（SE-IDF）的降血脂以及肝脏保护功效，利用酶法制备不溶性膳食纤维并探究其化学组成及基本理化性质，采用高脂饲料诱导构建高血脂小鼠模型，将 40 只雄性 C57BL/6J 小鼠随机分为正常饮食组（ND）、高脂饮食组（HFD）、金针菇菇脚不溶性膳食纤维低（SE-IDFL，50 mg/kg）、中（SE-IDFM，100 mg/kg）、高剂量组（SE-IDFH，200 mg/kg）。10 周后，检测血清和肝脏中总胆固醇（Total cholesterol，TC）、甘油三酯（Triglycerid，TG）、高密度脂蛋白胆固醇（High-density lipoprotein cholesterol，HDL-C）、低密度脂蛋白胆固醇（Low density lipoprotein cholesterol，LDL-C）的含量；测定血清中天冬氨酸转氨酶（Aspartate aminotransferase，AST）、丙氨酸转氨酶（Alanine transaminase，ALT）、脂多糖（lipopolysaccharide，LPS）和白介素-6（interleukin-6，IL-6）的水平；测定肝脏中氧化应激因子超氧化物歧化酶（Total superoxide dismutase，SOD）、过氧化氢酶（Catalase，CAT）、谷胱甘肽（Glutathione，GSH）和丙二醛（Malondialdehyde，MDA）的活力及含量；通过 HE、油红 O 染色法观察肝脏脂肪病变及分布情况。结果显示：蒸汽爆破处理显著降低金针菇菇脚中纤维素、半纤维素及木质素含量。与未蒸汽爆破处理的 IDF 相比，SE-IDF 的持油力及胆固醇结合能力明显提高，具有良好的油脂吸附能力。动物实验结果表明，与 HFD 组相比，SE-IDFH 组能显著降低高血脂小鼠血清及肝脏中 TC、TG、LDL-C 水平（$P<0.05$）；升高 HDL-C 水平（$P<0.05$）；不同剂量的 SE-IDF 均可提高高血脂小鼠中 SOD、CAT 活性以及 GSH 含量，降低 MDA、LPS 及 IL-6 的含量，缓解高脂饮食引起的炎症损伤及氧化应激反应。SE-IDFM 及 SE-IDFH 组可明显改善肝脏组织病理学结构，减少肝脏脂滴面积、空泡的数量和炎症浸润。结果表明 SE-IDF 可以改善高血脂小鼠血脂异常，减少高血脂症小鼠肝脏中脂质沉积，达到降血脂、改善脂肪肝和保护肝脏的作用。

关键词: 金针菇菇脚不溶性膳食纤维, C57BL/6J 小鼠, 降血脂, 肝脏保护

中图分类号: TS210.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)07−0431−11

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030362　　本文网刊:

Hypolipidemic Effect of Insoluble Dietary Fiber from *Flammulina velutipes* Root in Hyperlipidemic Mice

NI Liying[1], SUN Mengxue[1], HU Fuxia[1], ZHANG Ming[1], GUO Zebin[2], LIN Shaoling[2], MA Chao[1,*], WU Maoyu[1,*]

（1.Jinan Fruit Research Institute, All China Federation of Supply & Marketing Co-operatives, Jinan 250014, China;
2.College of Food Science, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China）

Abstract: This study aimed to investigate the effect of steam-exploded insoluble dietary fiber from *Flammulina velutipes*

收稿日期: 2025−03−28

基金项目: 国家重点研发计划（2024YFD2100800）; 济南果品研究所科研发展基金（CTCF202306）。

作者简介: 倪立颖（1994−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物提取及评价, E-mail: niliying12@163.com。

*** 通信作者:** 马超（1982−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能食品研发, E-mail: mch.01@163.com。

吴茂玉（1972−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 果蔬菌资源综合利用, E-mail: wmyu1972@163.com。

root (SE-IDF) on blood lipids and liver protection. The insoluble dietary fiber was prepared using an enzymatic method, and its chemical composition and fundamental physicochemical properties were characterized. A hyperlipidemia model was established in C57BL/6J male mice (n=40) induced by high-fat diet feeding. Mice were randomly divided into five groups: Normal diet group (ND), high-fat diet group (HFD), and three SE-IDF treatment groups with low (SE-IDFL, 50 mg/kg), medium (SE-IDFM, 100 mg/kg), and high doses (SE-IDFH, 200 mg/kg). After 10 weeks of intervention, serum and hepatic levels of total cholesterol (TC), triglycerides (TG), high-density lipoprotein cholesterol (HDL-C), and low-density lipoprotein cholesterol (LDL-C) were measured. In addition, serum levels of aspartate aminotransferase (AST), alanine aminotransferase (ALT), lipopolysaccharide (LPS), and interleukin-6 (IL-6) were assessed. Hepatic oxidative stress markers, including total superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT), glutathione (GSH), and malondialdehyde (MDA), were also determined. Hepatic steatosis and lipid distribution were assessed by hematoxylin-eosin (HE) and oil red O staining to evaluate pathological changes in liver tissue. The results indicated that the contents of cellulose, hemicellulose, and lignin in *Flammulina velutipes* root were significantly reduced by steam explosion treatment. Compared with IDF without steam explosion treatment, the oil holding capacity and cholesterol binding capacity of SE-IDF were obviously improved, resulting in good oil adsorption capacity. Animal experiments demonstrated that, compared with the HFD group, the SE-IDFH group significantly reduced serum and hepatic TC, TG, and LDL-C levels (P<0.05), and increased HDL-C levels (P<0.05). All SE-IDF treatment groups enhanced SOD and CAT activity as well as GSH levels, while decreasing MDA, LPS, and IL-6 concentrations, thereby alleviating inflammation and oxidative stress induced by a high-fat diet. SE-IDFM and SE-IDFH groups markedly improved liver histopathological structure, reduced hepatic lipid droplet area, vacuole formation, and inflammatory infiltration. These findings suggest that SE-IDF can effectively improve dyslipidemia in hyperlipidemic mice, reduce hepatic lipid accumulation, and exert hypolipidemic, hepatoprotective, and anti-fatty liver effects.

Key words: *Flammulina velutipes* root insoluble dietary fiber; C57BL/6J mice; hypolipidemic effect; liver protection

随着国民经济的高速发展，中国人的饮食结构和生活习惯发生了很大变化。不良的饮食习惯（如高糖、高脂肪饮食等）、生活习惯（如吸烟、酗酒）、较重的生活压力、缺乏运动等，都会引起体内脂质代谢失调，诱发超重及肥胖[1]。《2023 年世界肥胖地图集》预测，全球 5 岁以上肥胖和超重的人数将达到 19.1 亿，到 2035 年，中国 18% 的成年人将患肥胖[2−3]。此外，肥胖是高脂血症、糖尿病、心血管疾病、动脉粥样硬化以及其他慢性疾病的主要风险因素。目前，治疗肥胖和高脂血症的常见方法主要包括手术和药物治疗。然而，药物常常引起包括呕吐、恶心和胃肠道不适等不良反应，手术干预则易带来感染、出血、营养不良和贫血的风险[4]。因此，迫切需要找到一种有效、安全的治疗肥胖、缓解高脂血症的方法。

膳食纤维（Dietary Fiber, DF）是一类能够在大肠内完全或部分发酵，而不会被人体消化酶直接吸收利用的碳水化合物及其类似物的总和。根据其物理化学特性的不同被划分为两大类，即可溶性膳食纤维（Soluble Dietary Fiber, SDF）和不溶性膳食纤维（Insoluble Dietary Fiber, IDF）。国内外研究[5−6]表明，膳食纤维在预防结肠癌和心血管疾病、降低胆固醇和血脂水平、促进胃肠道运动等方面具有重要的功能作用，可有效减少机体对食物中脂肪酸和胆固醇的吸收[7]，改善肝脏脂质代谢，发挥降血脂的积极作用。其中，IDF 主要由纤维素和木质素组成，具有良好的吸水性，能够增加餐后饱腹感，促进胃肠蠕动，减少由饮食带来的有害物质在人体内的转运时间，降低一系列疾病的患病风险，有助于预防便秘和具有一定的减肥功效[8]。IDF 作为一种功能性成分，在食品工业中具有广泛的应用前景。然而，由于其口感粗糙、结构致密，不利于活性基团暴露，使其生物活性及在食品加工中的应用受到限制。因此，为提高 IDF 功能性和应用性，对其进行改性研究具有重要的意义[9]。蒸汽爆破（简称“汽爆”）改性是一种常见的 DF 改性工艺，它可以改变 DF 的粒径、微观结构和比表面积，从而改善其物理化学性质。同时，高温高压和剧烈的物理变化促使 IDF 纤维素链断裂，并释放内部的低聚糖分子或酚类基团，发挥抗氧化、抗炎、调节血糖等功效。目前该方法主要应用于增加 SDF 得率，尚未广泛应用于 IDF[10]。

金针菇，又名冬菇、朴菇、构菌、毛柄金钱菌，属担子菌门、金钱菌属，是一种广泛栽培的食用药用真菌。研究表明，金针菇富含多种氨基酸、维生素及膳食纤维等功能活性成分，是一种高营养低热量的健康食品，具有丰富的营养价值和生物学特性，如免疫调节[11−12]、抗肿瘤[13]、抗疲劳[14]和抗氧化[15]等活性。目前，金针菇栽培的增加导致金针菇脚生产过剩。其中一小部分被加工成动物饲料，但大多数被丢弃。这种做法不仅造成资源浪费，同时造成了一定的环境污染[16]。

金针菇菇脚是膳食纤维的主要来源，目前国内外对金针菇菇脚膳食纤维蒸汽爆破改性的研究多集中于可溶性膳食纤维提取工艺[17−18]及理化特性的研究[19]，鲜见对其降血脂作用的深入研究，尤其未见汽爆处理后金针菇菇脚 IDF 降血脂作用的研究。基于此，本实验以经蒸汽爆破预处理后的金针菇菇脚为原料，通过酶法制备不溶性膳食纤维，研究其理化性质

及对高血脂小鼠的降血脂作用, 以期为金针菇菇脚膳食纤维的进一步开发和利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

6 周龄雄性 C57BL/6J 小鼠　SPF 级, 体重(20±2)g, 购自济南鹏悦实验动物繁育有限公司, 动物许可证号: SCXK(鲁) 2022-0006; 金针菇菇脚　山东友和生物科技股份有限公司; 耐高温 α-淀粉酶(A8751, 40000 U/g)、中性蛋白酶(Z8031, 50000 U/g)、淀粉葡萄糖苷酶(T8500, 100000 U/g)、纤维素含量检测试剂盒、半纤维素含量检测试剂盒、木质素含量检测试剂盒　北京索莱宝科技有限公司; BCA 蛋白测定试剂盒、TC、TG、HDL-C、LDL-C、ALT、AST、GSH、SOD、CAT、MDA 检测试剂盒　南京建成生物工程研究所; LPS、IL-6 ELISA 试剂盒　武汉华美生物工程有限公司; 小鼠饲料　江苏省协同医药生物工程有限责任公司; 所有其他试剂均为分析纯。

QBS-80 蒸汽爆破设备　鹤壁政道启宝实业有限公司; BG2-240 电热鼓风干燥箱　上海博迅医疗生物股份有限公司; 1000C 多功能粉碎机　永康市红太阳机电有限公司; PL203 分析天平　梅特勒-托利多仪器有限公司; TDL-5-A 离心机　上海安亭科学仪器厂; SB-1100 旋转蒸发器　日本东京理化有限公司; SHZ-III 循环水式多用真空泵　上海知信实验仪器技术有限公司; DW-HL398 超低温冷冻冰箱　中科美菱低温科技股份有限公司; DK-8D 恒温水浴锅　上海森信实验仪器有限公司; CenLee16R 台式高速冷冻离心机　上海涵飞医疗器械有限公司; Multiskan FC 酶标仪　赛默飞世尔仪器有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　蒸汽爆破预处理　根据前期研究对金针菇菇脚膳食纤维进行蒸汽爆破处理[20], 即蒸汽爆破料腔比 5∶8, 保压时间 105 s, 蒸汽爆破压强 1.0 MPa。随后, 将汽爆后样品置于电热鼓风干燥箱中, 60 ℃, 干燥至恒重。干燥的金针菇菇脚粉碎过 60 目筛, 备用。

1.2.2　不溶性膳食纤维制备　采用酶法提取制备金针菇菇脚 IDF[21]。金针菇菇脚粉末以 1∶30 料液比加入纯水, 加入 0.3%(w/w)耐高温 α-淀粉酶, 在 95 ℃、pH6.0 的条件下提取 60 min。待温度降至 50 ℃, 加入 0.5%(w/w)中性蛋白酶, pH6.5 的条件下酶解 60 min。随后, 温度升高至 60 ℃, 加入 0.3%(w/w)淀粉葡萄糖苷酶水解 60 min。最后, 在 95 ℃ 灭酶 10 min。样品以 4000 r/min 离心 10 min, 弃上清液, 沉淀干燥, 即为不溶性膳食纤维, 命名为 IDF, 蒸汽爆破处理后的样品命名为 SE-IDF。

1.2.3　蒸汽爆破处理前后金针菇菇脚 IDF 化学组成测定　参照 GB 5009.88-2014《食品中膳食纤维的测定》测定不溶性膳食纤维含量[22]。根据试剂盒, 测定 IDF 和 SE-IDF 中纤维素、半纤维素和木质素含量。

1.2.4　蒸汽爆破处理前后金针菇菇脚 IDF 红外光谱分析　采用 KBr 压片法对 IDF 和 SE-IDF 的结构进行测定。称取 1~2 mg 样品, 与干燥后的 KBr 粉末混合均匀并研磨, 压成薄片进行红外光谱扫描, 扫描范围为 4000~500 cm^{-1}。

1.2.5　蒸汽爆破处理前后金针菇菇脚 IDF 物化性质测定

1.2.5.1　持水力测定　取 1.00 g(m_1)样品, 并放入离心管, 向离心管加入纯化水 30 mL, 于室温静置过夜, 以 5000 r/min 离心 20 min, 去上清液, 并称量沉淀的质量(m_2)[23]。按式(1)计算持水力(g/g)。

$$\text{持水力(g/g)} = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \qquad \text{式（1）}$$

1.2.5.2　持油力测定　称取 3.00 g(m_1)样品与 30 g 食用油充分混和, 确保均匀后静置 30 min, 随后以 5000 r/min 离心 20 min, 称取上清油的质量(m_2)[24]。按式(2)计算持油力(g/g)。

$$\text{持油力(g/g)} = \frac{30 - m_2}{m_1} \qquad \text{式（2）}$$

1.2.5.3　膨胀力测定　称取 1.00 g(m)样品加入 50 mL 带刻度试管中, 记录下干粉体体积(V_1)。向试管中加入纯化水 20 mL, 振荡试管令其均匀, 室温静置过夜。再次记录试管中粉体的总体积(V_2)[25]。按式(3)计算膨胀力(mL/g)。

$$\text{膨胀力(mL/g)} = \frac{V_2 - V_1}{m} \qquad \text{式（3）}$$

1.2.5.4　胆固醇结合能力测定　参考段振[26] 的方法并稍作修改, 取 150 mg IDF 或 SE-IDF, 向其中加入 3 mL 胆固醇溶液, 37 ℃ 恒温振荡培养 2 h, 然后在 16000 r/min 条件下离心 20 min, 收集上清液, 用胆固醇试剂盒测定上清液中胆固醇含量。按式(4)计算胆固醇吸附量(mg/g)。

$$\text{胆固醇结合能力(mg/g)} = \frac{\text{吸附前胆固醇含量} - \text{吸附后上清液胆固醇含量}}{\text{样品质量}} \qquad \text{式（4）}$$

1.2.6　动物实验　40 只六周龄的雄性 C57BL/6J 小鼠在 22±2 ℃、50%~60% 湿度和 12/12 h 光/暗循环的条件下饲养, 可自由获取水和食物。适应性饲养 1 周后进行随机分组, 小鼠随机分配到 5 组(每组 8 只): ND 组, 喂食正常饮食(蛋白质占 19.2%, 碳水化合物占 67.3%, 脂肪占 4.3%, 总热量为 3.85 kcal/g)和 0.2 mL 生理盐水; HFD 组, 喂食高脂饮食(包括 26% 蛋白质(热量百分比为 20 kcal%), 35% 脂肪(热量百分比为 60 kcal%), 和 26% 碳水化合物(热量百分比为 20 kcal%), 总热量为 5.24 kcal/g)和 0.2 mL 生理盐水。依据 Liu 等[5] 的报道, SE-IDFH 组, 给予高脂饮食和 0.2 mL SE-IDF 溶液(200 mg/kg/d SE-IDF); SE-IDFM 组, 给予高脂饮食和 0.2 mL SE-IDF

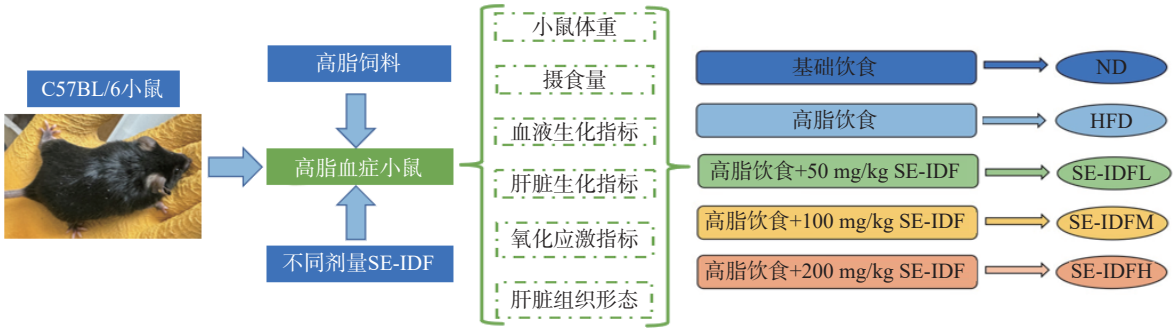


图 1 动物实验设计

Fig.1 Animal experimental design of the study

溶液(100 mg/kg/d SE-IDF); SE-IDFL 组, 给予高脂饮食和 0.2 mL SE-IDF 溶液(50 mg/kg/d SE-IDF)。所有动物实验均按照动物实验方案进行, 并得到伦理委员会的批准(批准号: YLX20230619)。

实验开始后, 每周记录小鼠的体重, 所有小鼠通过灌胃给药治疗 10 周。最后, 所有小鼠禁食 16 h, 称重后, 处死小鼠。收集血液并以 15000 r/min, 4 ℃, 离心 5 min 以获得血清, 然后储存在−80 ℃ 以供后续实验使用。此外, 取肝脏最大叶用 4% 的多聚甲醛固定, 其余部分在液氮中冷冻并于−80 ℃ 储存。动物实验设计如图 1 所示。

1.2.7 血清及肝脏生化指标测定 通过试剂盒, 测定血清和肝脏中的 TG、TC、LDL-C 和 HDL-C 水平; 测定血清中肝功能指标 ALT 和 AST 的水平。

1.2.8 炎症因子测定 使用 ELISA 试剂盒测定肝脏中炎症因子 LPS 和 IL-6 的浓度。

1.2.9 氧化应激因子测定 根据试剂盒的说明, 测定 SOD、CAT、GSH 和 MDA 来评估小鼠肝脏的氧化应激水平。

1.2.10 肝脏组织病理学分析 将收集的肝脏组织样品送至北京索莱宝科技有限公司进行油红 O 和 HE 染色, 在光学显微镜下观察各组小鼠肝脏组织病理学变化情况。

1.3 数据处理

所有实验均重复进行三次。数据使用 SPSS 17.0 进行分析。结果以平均值±标准差表示, 并通过单因素方差分析和 Tukey 多重比较检验进行分析, 置信区间为 95%。$P<0.05$ 被认为具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 汽爆前后金针菇菇脚 IDF 化学组成分析

由表 1 可知, 蒸汽爆破处理后 IDF 含量显著下降($P<0.05$), 由 64.18% 降至 57.86%。这是由于蒸汽爆破的高压剪切和热效应均可以有效促进 IDF 向 SDF 转化, 使原料中的纤维素、半纤维素类成分发生不同程度的降解, 转化为水溶性糖类[27]。此外, IDF 主要由纤维素、半纤维素及木质素构成。蒸汽爆破处理后, 纤维素含量略有下降, 半纤维素含量由 23.51% 降至 17.69%, 显著降低($P<0.05$), 这主要是由于半纤维素分子链短, 分支多, 易在蒸汽爆破处理过程中降解成低聚糖或单糖, 导致含量明显降低。木质素含量降低了 5.56%。

表 1 IDF 和 SE-IDF 的主要组成成分

Table 1 Main components for IDF and SE-IDF

样品	含量(%)	纤维素(%)	半纤维素(%)	木质素(%)
IDF	64.18±0.74^a	42.77±0.46^a	23.51±0.24^a	6.54±0.20^a
SE-IDF	57.86±0.81^b	40.90±0.26^b	17.69±0.30^b	6.18±0.14^b

注: 同列不同的小写字母表示具有显著性差异($P<0.05$), 表2同。

2.2 汽爆前后金针菇菇脚 IDF 红外结构分析

红外光谱可对膳食纤维的化学组成、官能团和化学键信息进行简单的定性, 是鉴定、分析物质结构的重要手段。图 2 为蒸汽爆破前后金针菇菇脚 IDF 的红外光谱图, 其中在 3400 cm^{-1} 附近的吸收峰是纤维素和半纤维素羟基伸缩振动, 2928 cm^{-1} 左右的吸收峰对应纤维素-CH 和-CH_2 基团的振动, 620 cm^{-1} 附近吸收峰为糖分子中 β-型的 C-H 变角振动[28]。这表明汽爆前后金针菇菇脚 IDF 均具有糖类特征, 且具有纤维素与半纤维素的典型结构[29]。此外, 图谱中 1640 cm^{-1} 和 1078 cm^{-1} 分别为木质素中苯环的伸缩振动峰和纤维素的特征吸收峰[30]。汽爆处理后, 纤维素的特征峰由 1078 cm^{-1} 变成 1073 cm^{-1}, 吸收强度相对减弱, 说明此处发生分子间断裂, 纤维素降解; 木质素吸收峰的位置发生偏移, 强度降低, 推测汽爆处理在一定程度上促使木质素部分降解[30], 这与表 1 中汽爆前后 IDF 化学组成结果相一致。综上, 汽爆处理通过一系列水热反应, 使木质

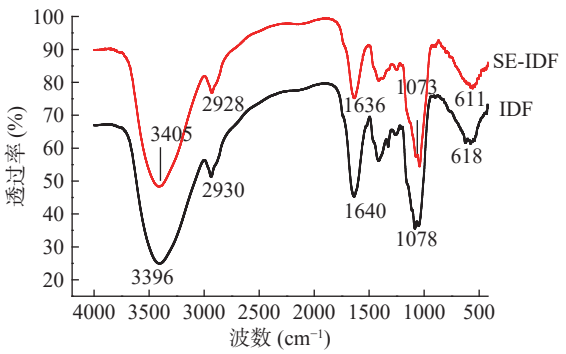


图 2 IDF 和 SE-IDF 的红外光谱

Fig.2 FT-IR spectrum of IDF and SE-IDF

素发生重排并部分降解成低分子酚聚合物，半纤维素和纤维素被水解成单糖和低聚糖形式。

2.3　汽爆前后金针菇菇脚 IDF 物化性质分析

持水力和膨胀力是评价膳食纤维亲水性的重要指标。由表 2 可知。蒸汽爆破处理后，IDF 的持水力和膨胀力显著提高（P<0.05）。研究表明，持水力和膨胀力高的膳食纤维更容易使人产生饱腹感，减少食欲，达到减肥的目的[31]。汽爆处理后，金针菇菇脚 IDF 的持水力和膨胀力分别增加了 10.92% 和 21.11%。持油力用于评估膳食纤维吸附脂肪的能力。由表可知，持油力由 2.67±0.09 g/g 提高至 4.05±0.11 g/g，表明蒸汽爆破处理增强了金针菇菇脚 IDF 对油脂的吸附能力。这可能是由于蒸汽爆破的高温高压导致膳食纤维原本致密的结构变得疏松，比表面积增加，孔径增大，表面粗糙度增加，暴露更多亲水或亲油基团[32]，从而改善 IDF 的性质。

表 2　IDF 和 SE-IDF 的持水力、持油力、膨胀力和胆固醇结合能力

Table 2　Water holding capacity, oil holding capacity, swelling capacity and cholesterol binding capacity of IDF and SE-IDF

样品	持水力(g/g)	持油力(g/g)	膨胀力(mL/g)	胆固醇结合能力(mg/g)
IDF	4.12±0.13^{b}	2.67±0.09^{b}	5.92±0.04^{b}	3.57±0.06^{b}
SE-IDF	4.57±0.06^{a}	4.05±0.11^{a}	7.17±0.02^{a}	4.26±0.03^{a}

研究表明，不溶性膳食纤维可与胆固醇结合形成沉淀，抑制胆固醇进入血液，从而达到降血脂的效果[33]。由表 2 可知，SE-IDF 对胆固醇的吸附量增加至 4.26±0.03 mg/g，增加了 19.33%。说明金针菇菇脚不溶性膳食纤维对胆固醇具有良好的结合能力，具有一定的降血脂功效。上述结果表明，SE-IDF 具有更好的吸水膨胀和油脂吸附能力，对于预防和控制糖脂代谢异常具有更好的效果。因此，选择 SE-IDF 进行后续动物实验研究。

2.4　SE-IDF 对高脂饮食小鼠体重和血脂水平的影响

金针菇菇脚 SE-IDF 对小鼠体重的影响如图 3（A、B）所示。在实验期间，各组小鼠的体重均有不同程度的增加。HFD 组喂养的小鼠体重增长速度明显高于 ND 组。与 HFD 组相比，不同剂量的 SE-IDF 处理均抑制了小鼠体重的增长。实验结束时，与 ND 组相比，HFD 组的小鼠体重显著升高（P<0.05），而不同剂量 SE-IDF 干预显著降低了小鼠体重（P<0.05）（图 3B）。结果表明，金针菇菇脚 SE-IDF 可以减少小鼠体重的增加，且高剂量组（SE-IDFH）效果最佳。由图 3C 可知，高脂饮食喂养组间摄食量无显著差异，表明 SE-IDF 对改善肥胖小鼠体重增加的影响并非由于减少摄食量所致。

高脂血症是指脂肪代谢或运转异常，使血液中血脂指标 TC、TG 含量高于正常范围的一种症状[34]。SE-IDF 对高脂小鼠血清中 TC 和 TG 含量的影响如图 3（D~E）所示。与 ND 组相比，经过高脂饮食诱导的 HFD 组小鼠血清中的 TC、TG 含量显著增加（P<0.05），说明造模成功。经过 SE-IDF 处理后，TG 含量显著降低（P<0.05），并与 IDF 浓度呈量效关系。SE-IDFL、SE-IDFM 和 SE-IDFH 的 TG 含量分别下降 17.53%、35.71% 和 53.90%。同时，通过对比 TC 含量发现，HFD 组中 TC 含量是 ND 组的 1.56 倍。经过 SE-IDF 处理后，TC 含量有所降低，SE-IDFH 组的 TC 含量最低，下降了 31.18%。LDL-C 和 HDL-C 是胆固醇的一种，可以反映高脂小鼠的血脂含量。如图 3（F~G）所示，HFD 组小鼠血清中 LDL-C 含量有

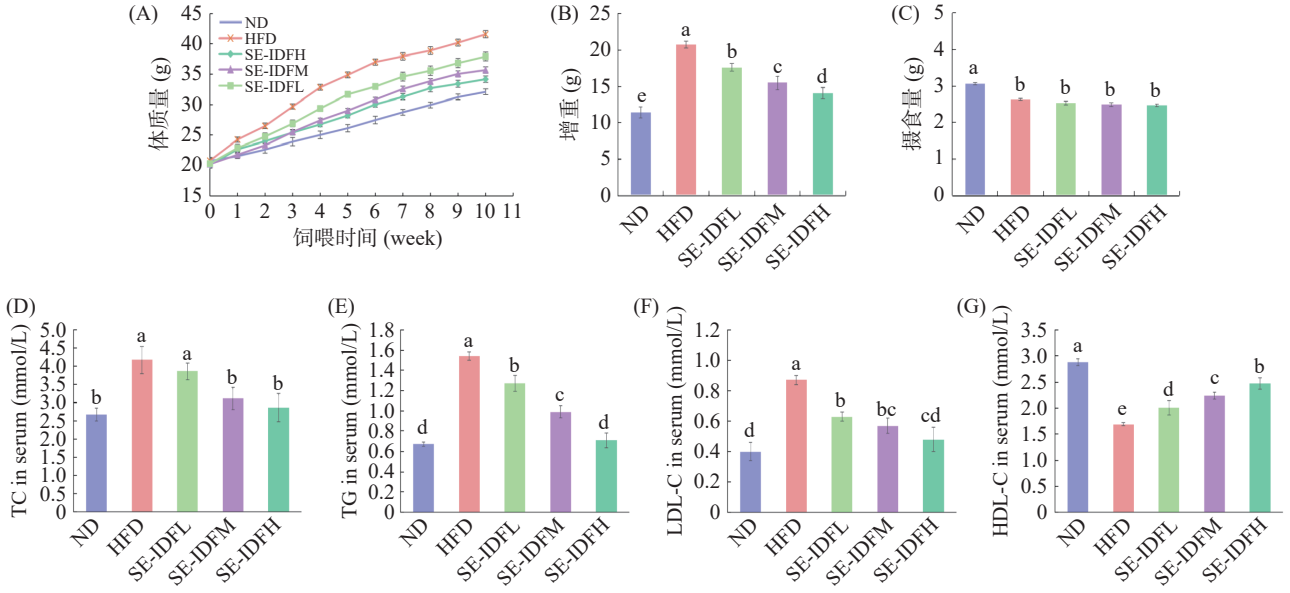


图 3　蒸汽爆破预处理的不溶性膳食纤维对高脂饮食诱导的肥胖小鼠的影响

Fig.3　Effects of the insoluble dietary fiber with steam explosion pretreatment (SE-IDF) in HFD-induced obese mice

注：（A）体重；（B）体重增加；（C）摄食量；（D~G）TC、TG、LDL-C 和 HDL-C 的水平；不同的小写字母表示具有显著性差异（P<0.05），图 4~图 8 同。

所增加，HDL-C 含量显著降低（P<0.05）。经过 SE-IDF 处理后，HDL-C 含量增加，且与IDF 浓度呈量效关系（P<0.05），LDL-C 含量降低，其中，SE-IDFH 组中 LDL-C 含量下降 44.83%，HDL-C含量提高 46.15%。说明金针菇菇脚 SE-IDF 能够抑制小鼠血清中 TG、TC、LDL-C 的产生，提高 HDL-C 含量，发挥降血脂作用。

2.5 SE-IDF 对小鼠血清中 ALT 和 AST 水平的影响

ALT 和 AST 是评估肝功能的重要指标，主要存在于细胞线粒体中。在正常情况下，血液中 ALT 和 AST 水平较低，当肝细胞受损时，ALT 和 AST 会被释放到血液中，导致二者含量升高，所以通过 AST 和 ALT 水平可反映肝脏的损伤程度[35]。SE-IDF 对高脂小鼠血清中 ALT 和 AST 水平的影响如图 4 所示。HFD 组中 ALT、AST 水平显著高于 ND 组（P<0.05），表明长时间的高脂饮食使小鼠肝脏受到一定程度的损伤。而经过 SE-IDF 处理后，ALT、AST 水平均下降，且 SE-IDFH 的抑制效果最好，分别下降了 30.98% 和 14.51%。这些结果表明，SE-IDF 可以减少肝脏损伤，保护肝脏健康。因此，金针菇菇脚不溶性膳食纤维对高脂饮食导致的肝损伤具有一定的改善作用。

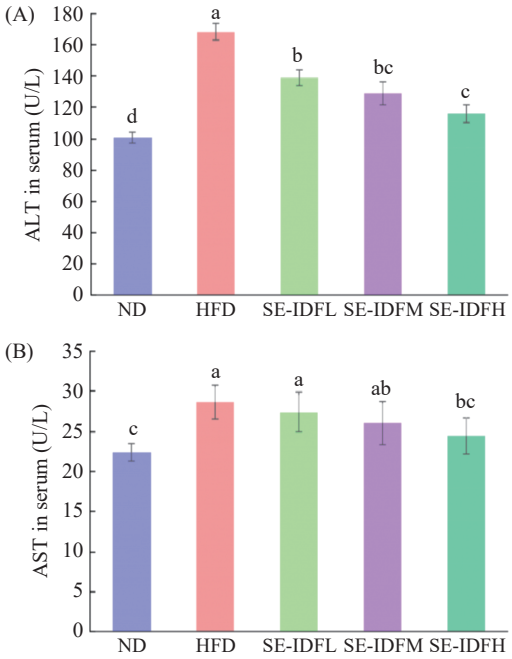


图 4 SE-IDF 对小鼠血清 ALT 和 AST 水平的影响

Fig.4 Effects of SE-IDF on ALT and AST level in serum of mice

2.6 SE-IDF 对小鼠血清中 LPS 和 IL-6 含量的影响

长期血脂异常会导致肝脏炎症和损伤，刺激 LPS 炎性因子 LPS、IL-6 等的合成和释放，而肝脏炎症反应又反过来进一步加重脂质代谢紊乱，从而导致恶性循环。LPS 和 IL-6 是机体重要的细胞因子，主要参与机体内的炎症病变，常用来反映机体炎症的严重程度。SE-IDF 对高脂小鼠血清中 LPS 和 IL-6 含量的影响如图 5 所示。与 ND 组相比，HFD 组中 LPS 和 IL-6 含量显著增加（P<0.05），而 SE-IDF 组中 LPS 和 IL-6 含量均显著下降（P<0.05），且呈剂量依赖性。其中，SE-IDFH 对 LPS 和 IL-6 抑制效果最好，分别下降 21.58% 和 53.68%，与正常饮食 ND 组无显著性差异（P>0.05），说明金针菇菇脚 SE-IDF 可以有效降低血清中 LPS 和炎症因子 IL-6 含量，从而改善高脂小鼠血清炎症反应。张颂[36] 研究发现，杏鲍菇膳食纤维干预后可以明显降低小鼠血清中 IL-6、TNF-α、IL-1β 含量，升高 IL-10 含量，在一定程度上缓解高脂饮食诱导的小鼠炎症反应。

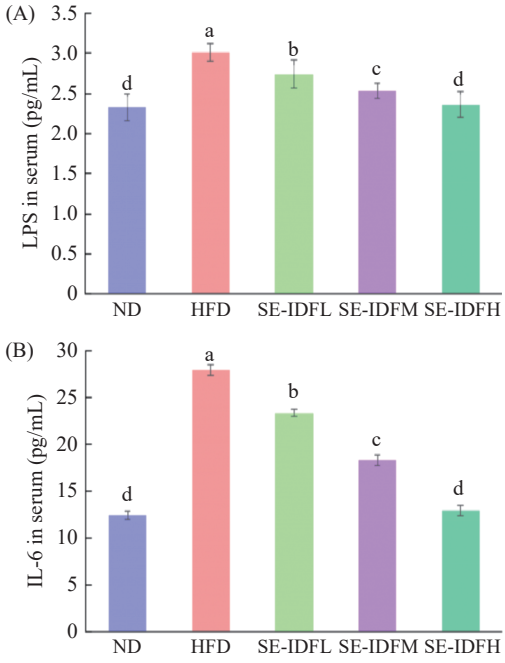


图 5 SE-IDF 对小鼠血清 LPS 和 IL-6 含量的影响

Fig.5 Effects of SE-IDF on LPS and IL-6 content in serum of mice

2.7 SE-IDF 对小鼠肝脏生化指标的影响

由图 6(A~C)可知，小鼠肝脏组织中 TC、TG 和 LDL-C 含量与血清中的变化趋势基本一致。与 ND 组相比，HFD 组小鼠肝脏内 TC、TG 和 LDL-C 含量显著上升（P<0.05）。经过 SE-IDF 处理后，TC、TG 和 LDL-C 含量随着 SE-IDF 含量的增加而显著降低（P<0.05），其中 SE-IDFH 组效果最好，显著降低至 TC（0.58±0.03 mmol/g）、TG（1.20±0.05 mmol/g）、LDL-C（0.29±0.02 mmol/g）含量（P<0.05）。胆固醇可在人体内与蛋白质结合形成脂蛋白，其中 HDL-C 的水平与心血管疾病的患病风险呈负相关[37]。由图 6(D)可知，与 ND 组相比，HFD 组的 HDL-C 含量显著降低（P<0.05）。HDL-C 含量随 SE-IDF 含量呈剂量依赖性增加，与血清中的趋势一致。其中 SE-IDFH 组中 HDL-C 含量最高，升至 0.36±0.03 mmol/g。上述结果表明，金针菇菇脚不溶性膳食纤维具有良好的降血脂作用，改善高血脂小鼠脂质代谢。

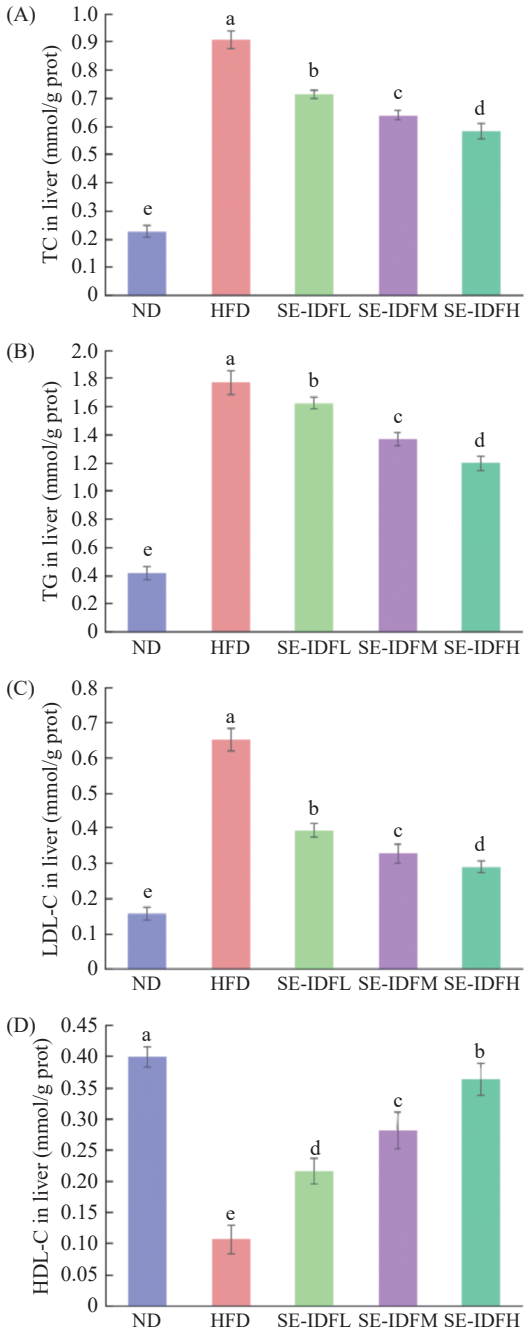


图 6　SE-IDF 对小鼠肝脏 TC、TG、LDL-C 和 HDL-C 含量的影响

Fig.6　Effects of SE-IDF on TC, TG, LDL-C and HDL-C content in liver of mice

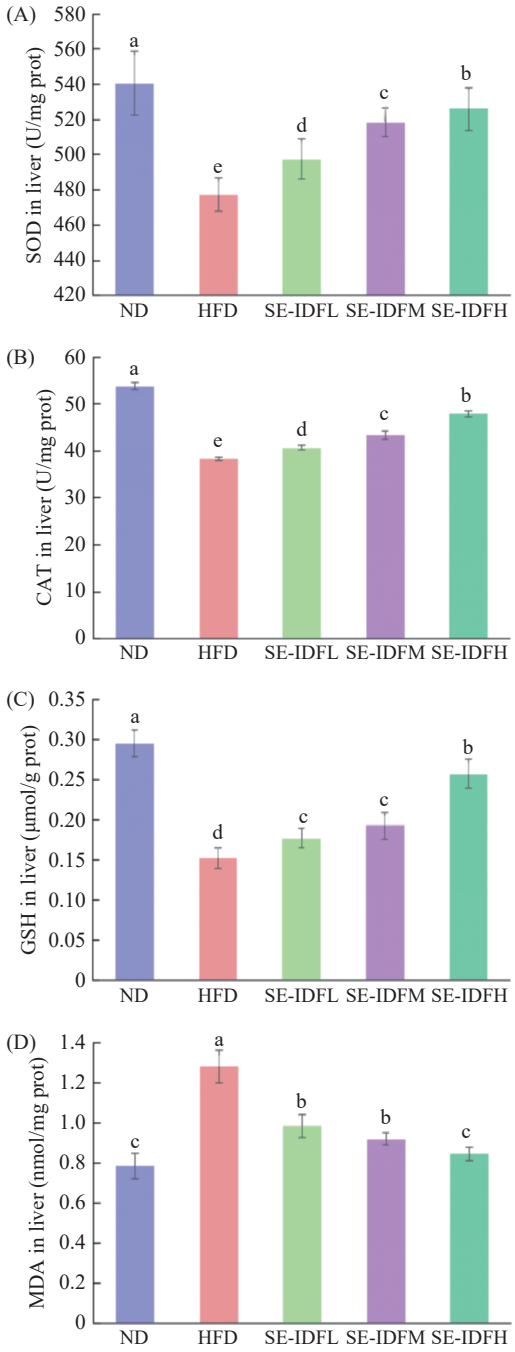


图 7　SE-IDF 对小鼠肝脏 SOD、CAT、GSH 和 MDA 水平的影响

Fig.7　Effects of SE-IDF on SOD, CAT, GSH and MDA level in liver of mice

2.8　SE-IDF 对小鼠肝脏中抗氧化酶和过氧化物的影响

研究表明，脂肪的过度积聚会导致氧化应激反应，体现在体内抗氧化酶的活力下降和氧化物的堆积[38]。SE-IDF 对高脂小鼠肝脏中 SOD 和 CAT 活力的影响如图 7(A~B)所示。与 ND 组相比，HFD 组中 SOD 和 CAT 活性显著降低(P<0.05)，分别降低了 11.71% 和 28.90%，说明高脂饮食能够诱导小鼠在肝脏水平上遭受到严重的氧化损伤。与 HFD 组相比，SE-IDF 以剂量依赖性方式显著提高了小鼠肝脏中 SOD 和 CAT 活性(P<0.05)。其中，SE-IDFH 组中 SOD(526.02±12.33 U/mg)和 CAT(47.91±0.67 U/mg)活性最高，说明 SE-IDF 可以提高肝脏内抗氧化酶的水平，减缓氧化应激对机体造成的伤害。由图 7C 看出，HFD 处理显著降低了小鼠肝脏中 GSH 含量(P<0.05)。经过 SE-IDF 处理后，小鼠肝脏内 GSH 含量显著提高(P<0.05)。但低、中剂量 SE-IDF 组之间无显著性差异(P>0.05)，SE-IDFH 组中 GSH 含量相较 HFD 组提高了 68.42%，表明 SE-IDF 可以提高小鼠肝脏内 GSH 含量来提高抗氧化应激活性。

MDA 含量可以用作脂质过氧化的衡量指标，在体内含量越多表明氧化损伤越严重。如图 7D 所示，

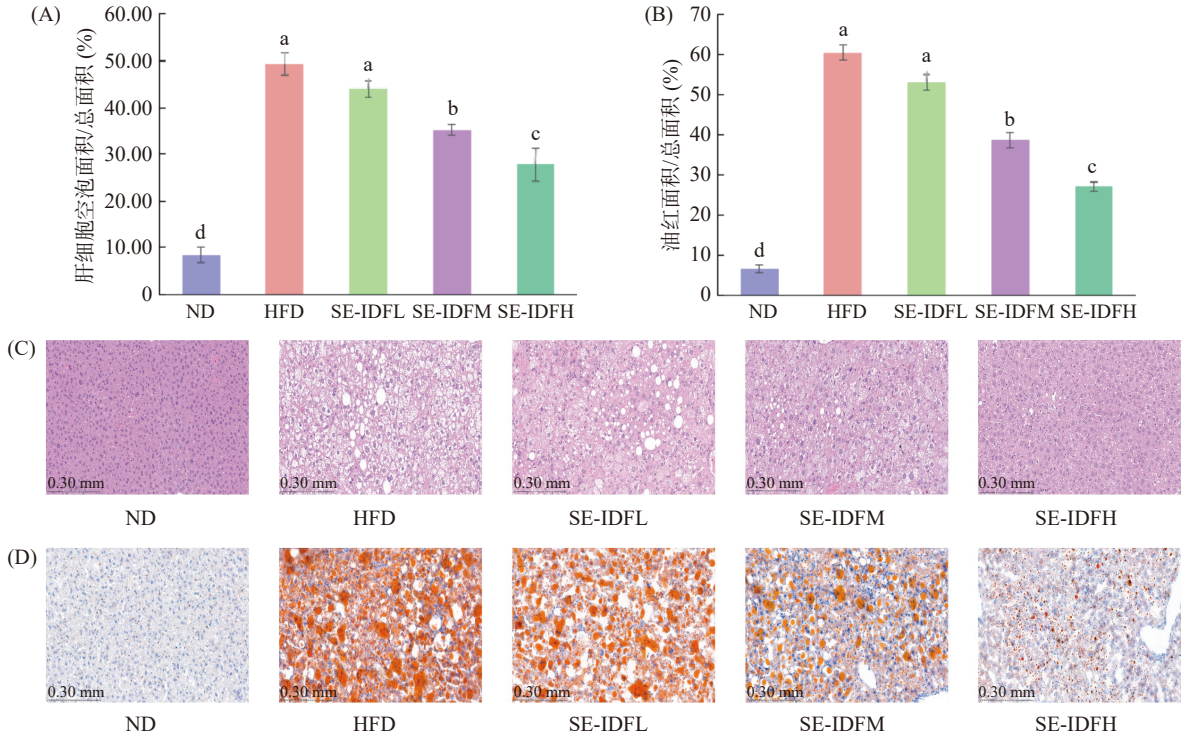


图 8　SE-IDF 对小鼠肝脏 HE 染色和油红 O 染色的影响

Fig.8　Effects of SE-IDF on HE staining and oil red O staining in liver of mice

注:(A)HE 染色的量化图;(B)油红 O 染色的量化图;(C)HE 染色图;(D)油红 O 染色图。

HFD 组中 MDA 含量较高,是 ND 组的 1.64 倍。而 SE-IDF 处理可以显著降低小鼠肝脏中 MDA 的含量(P<0.05)。SE-IDFH 组抑制作用最明显,与 ND 组无显著性差异(P>0.05),说明高剂量 SE-IDF 治疗后,由高脂饮食引起的肝脏 MDA 含量升高已基本恢复到正常水平。综上所述,SE-IDF 可以通过提高小鼠肝脏中 SOD、CAT 活力和 GSH 含量,抑制肝脏内 MDA 产生,对小鼠的肝损伤具有一定程度的修复作用。

2.9　SE-IDF 对小鼠肝脏组织形态学的影响

肝脏作为脂质代谢的主要器官,当脂质摄入过多时会影响肝脏的正常功能。油红 O 染色主要用于肝脏脂滴的观察,而 HE 染色广泛用于观察组织病理结构。图 8 是 SE-IDF 对高脂小鼠肝脏组织切片的 HE 染色和油红 O 染色图及其量化图。由图 8(C)可以看出,ND 组肝脏切片的结构完整且排列致密有序,形态正常,未见明显脂肪空泡。与 ND 组相比,HFD 组肝脏切片中肝细胞分布杂乱无章、大小不规整,脂肪大量囤积、脂肪空泡多,这说明小鼠肝脏由于长期摄入高脂饮食出现了明显的脂肪变性。经过 SE-IDF 处理后,小鼠肝脏组织形态变得相对致密。图 8A 显示了肝细胞空泡化区域在肝脏组织细胞中的百分比。结果表明,与 ND 组相比,HFD 喂养的小鼠中肝细胞空泡化的百分比升高。SE-IDF 干预减少了细胞中的空泡数和炎症浸润。

从油红 O 染色图(图 8D)中可以看出,ND 组小鼠肝脏组织的结构完整、形态正常,未见有橘红色脂滴积累。而 HFD 组小鼠肝脏细胞形态有明显的变形,存在显著异常的脂肪积累。中、高剂量 SE-IDF 干预后逆转了这一情况,脂滴的面积和数量逐渐降低(图 8B)。综上,SE-IDF 可以缓解高脂饲养造成的肝脏脂质积累和病理性损伤,具有一定肝脏保护作用。

3　讨论与结论

持续摄入高能量高脂肪饮食,会导致脂质代谢异常,引起高脂血症、肥胖、心脑血管疾病[39]。其中,高脂血症是一种常见的脂质代谢异常疾病,主要表现为血液中胆固醇和甘油三酯水平异常升高。目前,高脂血症疾病的治疗以他汀类药物为主,该类药物虽能有效控制机体脂质代谢紊乱所引起的不适,但长期使用会造成机体肝脏损害、肌肉损伤等[40]。因此,通过饮食来调节体重变化、改善血脂及脂质代谢异常,已成为营养学家研究的主要方向。有研究结果表明,DF 作为饮食干预的重要组成部分,展现了其在体重控制,降低血脂水平以及缓解脂质代谢紊乱方面的积极效应[41]。体外实验结果表明,汽爆处理后的 SE-IDF 表现出良好的持油力和胆固醇吸附能力。动物实验表明,SE-IDF 可以抑制 HFD 引起的体重增加,减轻高脂饮食造成的血脂水平升高和脏器脂肪累积。刘静宜等[42]研究发现,南瓜膳食纤维组大鼠血清 TC、TG 和 LDL-C 水平显著降低(P<0.05),HDL-C 水平显著提高(P<0.05);且不溶性膳食纤维的效果优于可溶性膳食纤维。

有文献报道,高脂血症与 TC、TG 和 LDL-C 呈正相关,与 HDL-C 呈负相关[43]。本实验结果表明,不同剂量的 SE-IDF 干预可以降低高脂饮食小鼠血清的 TG、TC、LDL-C 水平;增加 HDL-C 水平,肝脏

组织中也表现出相似趋势，表明金针菇菇脚 SE-IDF 具有良好的降低血脂的作用。高血脂症与肝脏的脂代谢能力以及脂肪肝密切相关，血脂水平的异常增加，可能导致脂肪肝的发生与发展。油红 O 染色结果显示，不同剂量的 SE-IDF 干预后，脂滴的面积和数量逐渐减少；HE 染色结果发现，SE-IDF 干预显著减少细胞中空泡的数量和炎症浸润。黄媛[44] 研究了金针菇、胡萝卜和燕麦复合不溶性膳食纤维可以显著的抑制高脂饮食引起的体重增量和血液中 ALT、AST 和碱性磷酸酶的含量的增加，并减小了脂肪细胞的大小和肝脏组织中的脂肪含量。

有研究表明，长期血脂异常会导致炎症和氧化应激反应增强，而炎症反应和氧化损伤又反过来进一步加重脂质代谢紊乱，从而导致恶性循环[45−46]。本研究中，不同剂量的 SE-IDF 处理后，由高脂饮食引起的 LPS 和 IL-6 含量增加均显著下降（P<0.05）。Chuang 等[47] 研究发现，谷物 DF 的摄入可以有效降低血清 IL-6 和 TNF-α 水平。Yokozawa 等[48] 的研究发现，通过抑制脂质过氧化反应，能够有效减轻高脂血症的产生。而脂肪量与人类和动物的全身氧化应激有关[49]。MDA 是脂质过氧化过程的终产物之一，也是最常见的氧化应激生物标志物之一。肥胖或高脂血症会增加氧化应激引起的脂质过氧化水平[50]。本研究探讨了小鼠灌胃 SE-IDF 降脂是否会缓解氧化应激反应，结果表明 HFD 组小鼠 MDA 含量明显升高，不同剂量的 SE-IDF 均可提高小鼠肝脏中 SOD、CAT 活性以及 GSH 含量，降低 MDA 的产生，表明小鼠灌胃 SE-IDF 过程中伴随着氧化应激的缓解。

SE-IDF 干预能通过改善脂质水平和肝脏损伤来缓解高血脂小鼠的脂质代谢异常。这种通过 SE-IDF 干预产生的有益效应，可能抑制了甘油三酯合成及脂质代谢相关通路的基因表达，改善了肠道菌群结构及脂质代谢产物，从而延缓或预防高脂血症发展。大量研究表明，膳食纤维对肠道菌群具有调节作用，而良好的肠道菌群结构有利于改善脂代谢。这种改善的机制包括维护肠道完整功能，减少炎症、增加有益菌数量等。另一方面，调节肠道菌群可以促进乙酸、丁酸等短链脂肪酸（SCFAs）的产生，发挥降低宿主食欲、抑制脂肪酶活性、调节肠道屏障和炎症水平[51]。黄雨梦[52] 制备的刺梨渣不溶性膳食纤维能有效降低高脂饮食诱导的肥胖小鼠血脂水平和肝脏脂质积累，肠道菌群测序结果显示：IDF 能够增加有益菌属如 *Ruminococcus*、*Coprococcus*、*Paraprevotell* 和 *Oscillospira* 丰度，降低有害或与肥胖相关的 *Allobaculum* 的丰度，重塑肠道菌群结构。此外，IDF 干预促进了乙酸、丙酸和丁酸等 SCFAs 含量增加，激活和增强 SCFAs 介导的代谢途径，从而发挥对肥胖的有效调控作用。腺苷酸活化蛋白激酶（adenosine monophosphate activated protein kinase, AMPK）是一种能量传感器，在维持能量平衡和脂质代谢动态平衡中发挥着关键作用[53]，被认为是高脂血症、糖尿病等代谢类疾病治疗的关键靶点。固醇调节元件结合蛋白（sterol regulatory element binding proteins, SREBPs）和过氧化物酶增殖物激活受体（peroxidase proliferators activate receptors, PPARs）是该通路的关键受体蛋白，其中 PPARs 直接调控与脂肪酸 β-氧化、胆固醇分解有关的基因[54]。SREBPs参与调控胆固醇、甘油三酯和脂肪酸的生物合成关键转录调控因子，其中 SREBP-2 是 SREBPs 典型的一种表达形式，主要调控与胆固醇合成和摄取相关的基因表达，例如低密度脂蛋白受体（LDCR）和 HMGR[55]。Liu 等[5] 报道了佛手柑膳食纤维（DFs）对高脂饮食诱导小鼠呈现剂量依赖性的减肥和降脂效果：DFs 能抑制体重增长、器官重量、血清与肝脏指标（如 TG、TC、LDL-C）以及脂肪组织和肝脏的脂质蓄积，同时下调 SREBP-1c、FAS、ACC 和 SREBP-2的表达，上调了棕色脂肪组织中的 PGC-1α、PRDM16、UCP-1 和 PPARγ 水平。Li 等[56] 研究发现灰树花多糖可上调 AMPK-α、PPARα、GCK 和 CYP7A1 的表达，同时下调 SREBP-1c、FAS、ACC的表达，从而发挥降脂作用。因此，基于 SE-IDF 对脂质水平的积极影响，有理由推测 SE-IDF 可能通过调节高脂血症小鼠肠道菌群结构、SCFAs 水平和脂质代谢相关通路蛋白，从而发挥降血脂和调控脂质代谢的功效。综上所述，蒸汽爆破过程中的水热反应促进金针菇菇脚 IDF 中纤维素、半纤维素的水解，促使木质素降解。SE-IDF 可以改善 HFD 引起的血脂异常和氧化应激，促进脂质代谢，缓解肝脏中脂质的积累，达到降血脂的效果。

本研究以酶法提取的金针菇菇脚不溶性膳食纤维（SE-IDF）为原料，通过饲喂高脂饲料的方法建立高脂血症小鼠模型，发现 SE-IDF 可以抑制 HFD 引起的体重增加，显著降低小鼠血清中 TC、TG 和 LDL-C 水平，提高 HDL-C 水平，且与 IDF 浓度呈量效关系（P<0.05）。肝脏生化指标表明，SE-IDF 有效减轻肝脏中 TC、TG 和 LDL-C 水平，并以剂量依赖性方式提高肝脏细胞中 SOD、CAT 等抗氧化酶的活性。这说明 SE-IDF 具有辅助降血脂、保肝的效果。肝脏组织病理学实验结果显示，经 SE-IDF 干预后，肝脏脂肪空泡减少，肝细胞脂肪化程度降低，表明 SE-IDF 可以缓解高脂饲养造成的肝脏脂质积累和病理性损伤，具有一定肝脏保护作用。本研究为汽爆后金针菇菇脚 IDF 的降血脂作用提供了基本理论依据，为其进一步开发和深加工提供了新的研究方向，但其降血脂机制和机理有待进一步研究，后续研究拟通过 Western 和 qPCR 等技术研究金针菇菇脚 IDF 调控脂质代谢的关键蛋白及其相关上下游信号因子的表达，阐明金针菇菇脚 IDF 基于基因-蛋白-代谢物层面调控脂质代谢的作用机制，为金针菇菇脚高值利用及功能食品开发提供进一步的理论支持。

© 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] 顾景范.《中国居民营养与慢性病状况报告(2015)》解读[J]. 营养学报, 2016, 38(6): 525−529. [GU Jingfan. Interpretation of the report on nutrition and chronic diseases of China residents (2015)[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 2016, 38(6): 525−529.]

[2] JAACKS L M, VANDEVIJVERE S, PAN A, et al. The obesity transition: Stages of the global epidemic[J]. The Lancet Diabetes & Endocrinology, 2019, 7(3): 231−240.

[3] World Obesity Federation. World obesity atlas 2023[R]. London, UK, 2023.

[4] STIER C, CORTEVILLE C. Endoskopisches komplikationsmanagement nach schlauchmagenbildung[J]. Der Chirurg, 2018, 89(12): 969−976.

[5] LIU Jingyi, HUA Jianxin, CHEN Shuxi, et al. The potential mechanisms of bergamot-derived dietary fiber alleviating high-fat diet-induced hyperlipidemia and obesity in rats[J]. Food & Function, 2022, 13(15): 8228−8242.

[6] 程明明, 黄苇. 西番莲果皮中膳食纤维的降脂保肝及润肠通便功能[J]. 食品科学, 2017, 38(11): 202−207. [CHENG Mingming, HUANG Wei. Hypolipidemic, hepatoprotective and laxative effects of dietary fiber from *Passiflora edulis* fruit peel[J]. Food Science, 2017, 38(11): 202−207.]

[7] LIU Mengjie, JIANG Yongchao, ZHANG Li, et al. Effect of steam explosion modification and *in vitro* simulated digestion on antioxidant capacity of dietary fiber of pineapple peel[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 330(4): 042055.

[8] 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.]

[9] 周新, 唐世英, 杨贺棋, 等. 不溶性膳食纤维的提取、表征及改性研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(3): 359−366,372. [ZHOU Xin, TANG Shiying, YANG Heqi, et al. Research progress on isolation, characterization and modification of insoluble dietary fiber[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(3): 359−366,372.]

[10] 刘璐, 王译晗, 张智. 不溶性膳食纤维的结构分类、改性方法研究进展[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 218−224. [LIU Lu, WANG Yihan, ZHANG Zhi. Research progress on structure classification and modification methods of insoluble dietary fiber[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 218−224.]

[11] FENG Ting, JIA Wei, WANG Wenhan, et al. Structural characterization and immunological activities of a novel water-soluble polysaccharide from the fruiting bodies of culinary-medicinal winter mushroom, *Flammulina velutipes* (Agaricomycetes)[J]. International Journal of Medicinal Mushrooms, 2016, 18(9): 807−819.

[12] ZHAO Ruiqiu, HU Qiuhui, MA Gaoxing, et al. Effects of *Flammulina velutipes* polysaccharide on immune response and intestinal microbiota in mice[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 56: 255−264.

[13] XU Hui, HU Ye, HU Qiuhui, et al. Isolation, characterization and HepG-2 inhibition of a novel proteoglycan from *Flammulina velutipes*[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 189: 11−17.

[14] 张秀玲. 金针菇多糖对缓解运动疲劳与调节恢复能力的效果探究[J]. 中国食用菌, 2020, 39(8): 56−58. [ZHANG X L. Effect of *Flammulina velutipes* polysaccharide on relieving sports fatigue and regulating recovery ability[J]. Edible Fungi of China, 2020, 39(8): 56−58.]

[15] ZHANG Zuofa, LÜ Guoying, HE Weiqiang, et al. Effects of extraction methods on the antioxidant activities of polysaccharides obtained from *Flammulina velutipes*[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 98(2): 1524−1531.

[16] ZHANG Yan, LI Hui, YANG Xiudong, et al. Cognitive-enhancing effect of polysaccharides from *Flammulina velutipes* on Alzheimer's disease by compatibilizing with ginsenosides[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 112: 788−795.

[17] 李明华, 孟秀梅, 陆正清, 等. 酶法提取金针菇菇脚可溶性膳食纤维的工艺优化[J]. 中国酿造, 2016, 35(5): 119−123. [LI Minghua, MENG Xiumei, LU Zhengqing, et al. Optimization of enzymatic extraction conditions for soluble dietary fiber from *Flammulina velutipes* feet[J]. China Brewing, 2016, 35(5): 119−123.]

[18] 吴素蕊, 郑淑彦, 桑兰, 等. 金针菇菇脚可溶性膳食纤维提取工艺研究[J]. 食品工业科技, 2012, 33(11): 300−302,311. [WU Surui, ZHENG Shuyan, SANG Lan, et al. Study on extraction technology of soluble dietary fiber from *Flammulina velutipes* feet[J]. Science and Technology of Food Industry, 2012, 33(11): 300−302, 311.]

[19] 孙梦雪, 倪立颖, 黄裕鸿, 等. 蒸汽爆破处理对金针菇菇脚水提物抗氧化及抗炎活性的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(17): 91−99. [SUN Mengxue, NI Liying, HUANG Yuhong, et al. Effects of steam explosion on antioxidant and anti-inflammatory activities of water extracts of *Flammulina velutipes* stembase[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(17): 91−99.]

[20] 张明, 马百惠, 吴茂玉, 等. 金针菇菇根膳食纤维蒸汽爆破改性工艺优化研究[J]. 中国果菜, 2020, 40(5): 32−35,49. [ZHANG Ming, MA Baihui, WU Maoyu, et al. Optimization on steam explosion modification process of dietary fiber of *Flammulina velutipes* root[J]. China Fruit & Vegetable, 2020, 40(5): 32−35,49.]

[21] 李建周, 陈晓华, 罗思诗. 豆渣中水不溶性膳食纤维的提取及性质研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(7): 29−33. [LI Jianzhou, CHEN Xiaohua, LUO Sishi. Study on the extraction and properties of water-insoluble dietary fiber from bean dregs[J]. Food Research and Development, 2017, 38(7): 29−33.]

[22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品中膳食纤维的测定 GB 5009.88-2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014. [People's Republic of China (PRC) National Health and Wellness Commission, State Administration of Market Supervision. Determination of dietary fiber in food GB 5009.88-2014[S]. Beijing: China Standards Publishing House, 2014.]

[23] CHEN Huanhuan, ZHAO Chunmei, LI Jie, et al. Effects of extrusion on structural and physicochemical properties of soluble dietary fiber from nodes of Lotus root[J]. LWT, 2018, 93: 204−211.

[24] XIA Yongjun, MENG Peng, LIU Shaodong, et al. Structural and potential functional properties of alkali-extracted dietary fiber from *Antrodia camphorata*[J]. Frontiers in Microbiology, 2022, 13: 921164.

[25] PENG Fei, REN Xin, DU Bin, et al. Structure, physicochemical property, and functional activity of dietary fiber obtained from pear fruit pomace (*Pyrus ussuriensis* Maxim) via different extraction methods[J]. Foods, 2022, 11(14): 2161.

[26] 段振. 石榴皮不溶性膳食纤维的提取、体外降血脂活性研究及咀嚼片制备[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018. [DUAN Zhen. Extraction of insoluble dietary fiber from pomegranate peel, study on hypolipidemic activity *in vitro* and preparation of chewable tablets[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2018.]

[27] BADER UL AIN H, SAEED F, KHAN M A, et al. Modification of barley dietary fiber through thermal treatments[J]. Food Sci-

ence & Nutrition, 2019, 7(5): 1816−1820.
[28] ZHAO Xiaoyan, CHEN Jun, CHEN Fengliang, et al. Surface characterization of corn stalk superfine powder studied by FTIR and XRD[J]. Colloids and Surfaces. B, Biointerfaces, 2013, 104: 207−212.
[29] HE Yuanyuan, LI Wen, ZHANG Xiaoyu, et al. Physicochemical, functional, and microstructural properties of modified insoluble dietary fiber extracted from rose pomace[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(4): 1421−1429.
[30] 何晓琴, 李苇舟, 夏晓霞, 等. 蒸汽爆破预处理的苦荞麸皮不溶性膳食纤维理化特性及结构研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(18): 47−53. [HE Xiaoqin, LI Weizhou, XIA Xiaoxia, et al. Study on physicochemical properties and structure of insoluble dietary fiber from Tartary buckwheat bran pretreated by steam explosion[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(18): 47−53.]
[31] 季佳琪, 李明初, 李冬霞, 等. 高温蒸煮结合蜗牛酶法改性葡萄皮不溶性膳食纤维工艺优化及体外降血糖作用[J]. 食品工业科技, 2024, 45(16): 249−258. [JI Jiaqi, LI Mingchu, LI Dongxia, et al. Optimization of high-temperature steaming combined with snail enzymatic modification of insoluble dietary fiber from grape peel and its in vitro hypoglycemic effect[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(16): 249−258.]
[32] LI Na, FENG Ziqian, NIU Yuge, et al. Structural, rheological and functional properties of modified soluble dietary fiber from tomato peels[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 557−565.
[33] 刘萍, 祁兴普, 刘靖, 等. 芋头多糖提取工艺优化及其体外结合脂类和胆酸盐能力研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(10): 132−136,199. [LIU Ping, QI Xingpu, LIU Jing, et al. Optimization of polysaccharide extraction from taro and its binding capacities of lipid and bile salts *in vitro*[J]. Food & Machinery, 2016, 32(10): 132−136,199.]
[34] 程明明. 西番莲果皮水不溶性膳食纤维提取、改性及功能特性研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016. [CHENG Mingming. Study on extraction, modified and functional features of dietary fiber from *Passiflora edulis* Rind[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016.]
[35] 蔡露阳, 王科堂, 陈雪峰, 等. 猕猴桃果粉的降脂作用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 287−293. [CAI Luyang, WANG Ketang, CHEN Xuefeng, et al. Study on the lipid-lowering effect of kiwi fruit powder[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(21): 287−293.]
[36] 张颂. 杏鲍菇水不溶性膳食纤维对高脂小鼠模型的功效研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2020. [ZHANG S. Study on the effect of water-insoluble dietary fiber of *Pleurotus eryngii* on high-fat mouse model [D]. Harbin: Heilongjiang University, 2020.]
[37] 《中国心血管健康与疾病报告》编写组. 《中国心血管健康与疾病报告 2020》要点解读[J]. 中国心血管杂志, 2021, 26(3): 209−218. [The Writing Committee of the Report on Cardiovascular Health and Diseases in China. Interpretation of report on cardiovascular health and diseases in China 2020[J]. Chinese Journal of Cardiovascular Medicine, 2021, 26(3): 209−218.]
[38] PICHÉ M E, TCHERNOF A, DESPRES J P. Obesity phenotypes, diabetes, and cardiovascular diseases[J]. Circulation Research: a Journal of the American Heart Association, 2020(3): 127−136.
[39] DO M H, LEE H B, OH M J, et al. Polysaccharide fraction from greens of *Raphanus sativus* alleviates high fat diet-induced obesity[J]. Food Chemistry, 2021, 343: 128395.
[40] ZHANG Xiaojie, DENG Yuanxiong, SHI Qunzhi, et al. Hypolipidemic effect of the Chinese polyherbal Huanglian Jiedu decoction in type 2 diabetic rats and its possible mechanism[J]. Phytomedicine, 2014, 21(5): 615−623.
[41] CHEN Wanqing, ZHENG Rongshou, ZHANG Siwei, et al. The incidences and mortalities of major cancers in China, 2009[J]. Chinese Journal of Cancer, 2013, 32(3): 106−112.
[42] 刘静宜, 石晓玲, 陈小爱, 等. 南瓜膳食纤维对高脂血症大鼠的降血脂作用[J]. 食品工业科技, 2021, 42(1): 322−327,333. [LIU Jingyi, SHI Xiaoling, CHEN Xiaoai, et al. Effect of pumpkin dietary fiber on blood lipid on hyperlipidemic rats[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(1): 322−327,333.]
[43] ZHANG Y, YANG L, ZHAO N, et al. Soluble Polysaccharide derived from *Laminaria japonica* attenuates obesity-related nonalcoholic fatty liver disease associated with gut microbiota regulation[J]. Marine Drugs, 2021, 19(12): 19120699.
[44] 黄嫒. IDF 对膳食能量摄入及肠道菌群的影响[D]. 成都: 西华大学, 2020. [HUANG Ai. Effect of IDF on dietary energy intake and gut microbiota[D]. Chengdu: Xihua University, 2020.]
[45] RAHOUI W, MERZOUK H, EL HACI I A, et al. Beneficial effects of *Aloe vera* gel on lipid profile, lipase activities and oxidant/antioxidant status in obese rats[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 48: 525−532.
[46] HENKEL J, ALFINE E, SAÍN J, et al. Soybean oil-derived poly-unsaturated fatty acids enhance liver damage in NAFLD induced by dietary cholesterol[J]. Nutrients, 2018, 10(9): 1326−1331.
[47] CHUANG S C, VERMEULEN R, SHARABIANI M T A, et al. The intake of grain fibers modulates cytokine levels in blood[J]. Biomarkers, 2011, 16(6): 504−510.
[48] YOKOZAWA T, ISHIDA A, CHO E J, et al. The effects of *Coptidis Rhizoma* extract on a hypercholesterolemic animal model[J]. Phytomedicine, 2003, 10(1): 17−22.
[49] WANG Xin, WU Hao, YU Weihua, et al. Hepatocyte nuclear factor 1b is a novel negative regulator of white adipocyte differentiation[J]. Cell Death & Differentiation, 2017, 24(9): 1588−1597.
[50] LI Jia, ROMESTAING C, HAN Xianlin, et al. Cardiolipin remodeling by ALCAT1 links oxidative stress and mitochondrial dysfunction to obesity[J]. Cell Metabolism, 2010, 12(2): 154−165.
[51] SANCHEZ H N, MORONEY J B, GAN Huoqun, et al. B cell-intrinsic epigenetic modulation of antibody responses by dietary fiber-derived short-chain fatty acids[J]. Nature Communications, 2020, 11(1): 60.
[52] 黄雨梦. 刺梨果渣不溶性膳食纤维的改性及改善高脂饮食诱导小鼠肥胖的作用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2024. [HUANG Yumeng. Study on the modification of insoluble dietary fiber from *Rosa roxburghii* Tratt pomace and its effect on improving obesity in mice induced by high-fat diet[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2024.]
[53] HARDIE D G, ROSS F A, HAWLEY S A. AMPK: A nutrient and energy sensor that maintains energy homeostasis[J]. Nature Reviews Molecular Cell Biology, 2012, 13(4): 251−262.
[54] ZIMMERMANN R, LASS A, HAEMMERLE G, et al. Fate of fat: The role of adipose triglyceride lipase in lipolysis[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Molecular and Cell Biology of Lipids, 2009, 1791(6): 494−500.
[55] 兰佳欣, 付常振, 刘庆平. 固醇调节元件结合蛋白 2 信号通路与非酒精性脂肪性肝病[J]. 中国生物化学与分子生物学报, 2017, 33(10): 1014−1020. [LAN Jiaxin, FU Changzhen, LIU Qingping. The SREBP2 signaling pathways in non-alcoholic fatty liver diseases[J]. Chinese Journal of Biochemistry and Molecular Biology, 2017, 33(10): 1014−1020.]
[56] LI Xin, ZENG Feng, HUANG Yifan, et al. The positive effects of *Grifola frondosa* heteropolysaccharide on NAFLD and regulation of the gut microbiota[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2019, 20(21): 5302.