张艳, 古丽努尔·买买提, 薛淑花, 等. 葡萄皮渣水溶性膳食纤维的改性制备及降脂活性研究 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 200−211. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030086

ZHANG Yan, Gulinuer Maimaiti, XUE Shuhua, et al. Modification Preparation and Hypolipidemic Activity Exploration of Water-soluble Dietary Fiber from Grape Pomace[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 200−211. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030086

· 工艺技术 ·

葡萄皮渣水溶性膳食纤维的改性制备及降脂活性研究

张　艳[1], 古丽努尔·买买提[1], 薛淑花[2], 权娣红[2], 王建国[2], 高雅洁[1], 刘辰龙[1], 张文轩[1], 桑尊瑞[1], 孔令明[1,*], 杨华峰[2,*]

(1.新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052;
2.新疆乡都酒业有限公司, 新疆巴州 841100)

摘　要: 本研究旨在通过两种改性方法处理葡萄皮渣水溶性膳食纤维（soluble dietary fiber，SDF），优化改性参数，比较改性前后 SDF 的理化性质，并探究其对高脂血症小鼠的降血脂效果，为葡萄皮渣 SDF 的深入研究及食品研发提供理论依据。以葡萄皮渣 SDF 为原料，分别采用微波联合酸法（microwave- acid，M-A）与超声波联合纤维素酶法（cellulase-ultrasound wave，C-UW）对其进行改性处理，在单因素实验的基础上通过响应面法优化试验得到改性最优参数组合，将改性前 SDF 与两种改性 SDF 进行理化性质比较（功能特性、胆固醇吸附能力、阳离子交换能力），并进行扫描电子显微镜与傅里叶变换红外光谱分析，此外，建立高脂血症小鼠模型，探究改性前后 SDF 对小鼠降血脂效果，对小鼠体重、血脂四项、血清 ALT 与 AST 活性、肝脏指标及肝脏切片染色指标进行测定及分析。结果表明，M-A 法改性 SDF 最优参数组合：料液比 1∶24.97、微波功率 220.56 W、微波时间 60.24 s，SDF 得率 22.17%，验证试验将工艺参数微调为柠檬酸质量分数 6%、料液比 1∶25、微波功率 240 W，SDF 平均得率为 21.74%，与理论得率相比仅有 0.41% 的微小偏差。C-UW 法改性 SDF 最优参数组合：纤维素酶添加量 0.38%、酶解温度 54.04 ℃、酶解时间 28.61 min，SDF 得率 28.8%，验证试验将工艺参数微调为纤维素酶添加量 0.4%、酶解温度 55 ℃、酶解时间 30 min，SDF 平均得率为 28.29%，与理论得率相比仅有 0.51% 的微小偏差。理化性质得出 C-UW 改性 SDF 显著优于未改性 SDF 及 M-A 改性 SDF。扫描电镜结果显示，C-UW 改性 SDF 形成更为紧密的棍状结构，傅里叶变换红外光谱分析表明三种 SDF 的主要组分及其整体的化学结构保持了相对稳定，未发生明显变化。由此证实 C-UW 改性 SDF 较未改性 SDF 及 M-A 改性 SDF 改性效果更好。小鼠试验结果表明，与模型组相比，C-UW SDF 显著降低 TC、TG 和 LDL-C，同时显著升高 HDL-C。与其他处理组（未改性 SDF、M-A SDF）相比，C-UW SDF 在改善血脂四项指标上的效果更为突出，尤其在降低 LDL-C 和升高 HDL-C 方面。此外，C-UW SDF 还表现出对血清 ALT 与 AST 的降低效果，体重增长的抑制作用，并减轻肝脏损伤，保护肝细胞完整性，证实了 C-UW SDF 在降低高脂血症小鼠血脂水平方面效果更为显著，为后续葡萄皮渣 SDF 的研究及食品研发奠定了基础。

关键词: 葡萄皮渣, 水溶性膳食纤维, 改性, 理化性质, 降血脂活性

中图分类号: TS255.1　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0200−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030086　　本文网刊:

Modification Preparation and Hypolipidemic Activity Exploration of Water-soluble Dietary Fiber from Grape Pomace

ZHANG Yan[1], Gulinuer Maimaiti[1], XUE Shuhua[2], QUAN Dihong[2], WANG Jianguo[2], GAO Yajie[1], LIU Chenlong[1], ZHANG Wenxuan[1], SANG Zunrui[1], KONG Lingming[1,*], YANG Huafeng[2,*]

收稿日期: 2025−03−07

基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项（2022A02002-4）。

作者简介: 张艳（2000−）, 女, 硕士, 研究方向: 农产品加工及综合利用, E-mail: 1741444964@qq.com。

*** 通信作者:** 孔令明（1976−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及综合利用, E-mail: klingming@126.com。

杨华峰（1970−）, 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 葡萄酒果酒酿造与葡萄籽皮精深加工, E-mail: 188100844@qq.com。

（1.School of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China；
2.Xinjiang Xiangdu Liquor Industry Co., Ltd., Bazhou 841100, China）

Abstract: This study aimed to treat grape pomace-derived soluble dietary fiber (SDF) using two modification methods, optimize the modification parameters, compare the physicochemical properties of SDF before and after modification, and investigate its hypolipidemic effects in hyperlipidemic mice, thereby providing a theoretical basis for in-depth research on grape pomace SDF and food development. Using grape pomace SDF as the raw material, it was subjected to modification by microwave-acid (M-A) and cellulase-ultrasound wave (C-UW) methods. Based on single-factor experiments, response surface methodology was employed to optimize the experimental conditions and determine the optimal parameter combinations for modification. The physicochemical properties (including functional characteristics, cholesterol adsorption capacity, and cation exchange capacity) of unmodified SDF and the two modified SDF were compared. Scanning electron microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy analyses were also conducted. Additionally, a hyperlipidemic mouse model was established to explore the hypolipidemic effects of SDF before and after modification. Measurements and analyses were conducted on mouse body weight, four lipid profile indicators, serum ALT and AST activities, liver indices, and histological staining of liver sections. Results showed that the optimal parameter combination for M-A method modified SDF was a solid-to-liquid ratio of 1:24.97, microwave power of 220.56 W, microwave time of 60.24 s, and the yield of SDF was 22.17%. For validation, the process parameters were slightly adjusted to citric acid mass fraction 6%, solid-to-liquid ratio 1∶25, and microwave power 240 W, resulting in an average SDF yield of 21.74%, with only a minor deviation of 0.41% from the theoretical yield. For the C-UW-modified SDF, the optimal parameters were: cellulase addition 0.38%, enzymatic hydrolysis temperature 54.04℃, and enzymatic hydrolysis time 28.61 min, resulting in an SDF yield of 28.8%. For validation, the process parameters were slightly adjusted to cellulase addition 0.4%, enzymatic hydrolysis temperature 55 ℃, and enzymatic hydrolysis time 30 min, resulting in an average SDF yield of 28.29%, with only a minor deviation of 0.51% from the theoretical yield. In terms of physicochemical properties, C-UW-modified SDF exhibited significant superiority over unmodified SDF and M-A-modified SDF. SEM results showed that C-UW-modified SDF formed a denser, rod-like structure, while FTIR analysis indicated that the main components and overall chemical structure of the three SDFs remained relatively stable without significant changes. These findings confirmed that C-UW-modified SDF demonstrated better modification effects compared to unmodified SDF and M-A-modified SDF. In the mouse experiments, compared to the model group, C-UW SDF significantly reduced TC, TG, and LDL-C, while significantly increasing HDL-C. Compared to other treatment groups (unmodified SDF, M-A SDF), C-UW SDF showed more pronounced effects in improving the four lipid profile indicators, particularly in reducing LDL-C and increasing HDL-C. Additionally, C-UW SDF exhibited a reducing effect on serum ALT and AST activities, an inhibitory effect on weight gain, and alleviated liver damage, protecting the integrity of hepatocytes. These results confirmed that C-UW SDF was more effective in reducing blood lipid levels in hyperlipidemic mice, laying a foundation for subsequent research on grape pomace SDF and food development.

Key words: grape pomace; soluble dietary fiber; modification; physicochemical properties; hypolipidemic activity

高脂血症（hyperlipidemia, HLP）是体内脂质代谢失衡的表现，同时它也是直接导致动脉粥样硬化的关键因素[1−2]。据统计数据显示，心血管疾病（cardiovascular disease, CVDs）每年夺去的生命占全球总死亡人数的 32%，这也是推动全球死亡率上升的重要因素之一。近年来，随着我国经济的快速发展，居民生活水平显著提高，人们的膳食结构也发生了变化，高热量食物在饮食中的占比日益增加，而传统饮食中的低能量、高纤维的植物性食品的摄入量却逐年下滑。这种膳食营养平衡失调的现象导致糖尿病、心血管疾病、肥胖症、肠癌及便秘等一系列“富贵病”在我国呈现逐年攀升的趋势。

葡萄皮渣作为葡萄酒生产过程中的副产品，它富含多种有价值的生物活性物质，如花色苷、原花青素、单宁、酒石酸、果胶等[3]。水溶性膳食纤维（soluble dietary fiber, SDF）是一种独特的纤维类型，富含微生物与生物多糖，易溶于水且不被人体消化酶分解，被誉为“第七大营养素”[4]。众多研究已证实 SDF 主要发挥着调节碳水化合物与脂类代谢的重要功能，且在改善肠道菌群、防癌抗癌、降血糖、降血脂以及预防糖尿病等多个方面均表现出正向作用[5−6]。林莹等[7] 的研究结果表明，水溶性膳食纤维显著降低血清总胆固醇（TC）、甘油三酯（TG）和低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）水平，升高高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）水平。谢惠[8] 研究了红枣可溶性膳食纤维对糖尿病动物模型的降血糖作用，发现红枣可溶性膳食纤维可通过改善胰岛素抵抗和糖代谢预防糖尿病的发生。Inoue 等[9] 将来自部分水解瓜尔豆胶的益生元膳食水溶性纤维添加到患有便秘症状的自闭症谱系障碍儿童的饮食中，观察肠道菌群及便秘等症状的变化，结果表明补充部分水解瓜尔豆胶会改变肠道菌群，显著增加每周排便的频率，并改善肠道菌群失调症状。Xu 等[10] 研究证实水溶性膳食纤维可安全有效地治疗慢传输型便秘，明显缩短结肠传输时间，

改善便秘症状，并具有调节肠道菌群和维护肠道微生态的效果。李荣乔等[11]研究苦瓜水溶性膳食纤维对糖尿病小鼠的降血糖效果，结果证实苦瓜水溶性膳食纤维显著降低糖尿病小鼠的空腹血糖和糖耐量，具有明确的降血糖作用。

微波、超声波作为一种新兴的物理改性方法，具有操作简便、条件温和、加热迅速、均匀、高效等特点。将微波与酸结合、超声波与纤维素酶结合，不仅缩短了制备时间，还减少了化学试剂的使用量，符合绿色化学的原则。陈仕学等[12]、张晨萍等[13]、李雄[14]及朱凤霞[15]分别以野生阳荷、豆粕、咖啡果皮和米糠为原料，通过不同方法（包括响应面法优化微波辅助提取、单因素实验和正交试验确定超声波-微波协同提取、超声波协同纤维素酶制备及超声波辅助酶法提取）优化了 SDF 的提取工艺，并获得了相应的最佳工艺条件及得率。作为葡萄酒生产副产品，葡萄皮渣富含多种生物活性物质，但原形态下 SDF 的利用率和生物活性有限，因此本研究通过微波辅助酸法（microwave- acid, M-A）及超声波辅助纤维素酶法（cellulase-ultrasound wave, C-UW）对其进行改性处理，旨在提升葡萄皮渣 SDF 的得率，改善其理化性质，并探讨葡萄皮渣 SDF 对高脂饮食诱导的肥胖症小鼠的降脂效果，为后续葡萄皮渣 SDF 的研究及功能食品的开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

C57BL/6J 小鼠　购于新疆医科大学，生产许可证：SCXK（新）2024-0001；小鼠基础饲料 MD12062、小鼠高脂饲料 MD12033　江苏美迪森生物医药有限公司；新疆焉耆盆地赤霞珠葡萄皮渣　新疆库尔勒乡都酒业有限公司；乙酸、氢氧化钠、柠檬酸、无水乙醇　分析纯，天津市致远化学试剂有限公司；纤维素酶（酶活力 50 u/mg）　上海源叶生物科技有限公司；鸡蛋　市购；血脂康　北京北大维信生物科技有限公司；血清总胆固醇（TC）试剂盒、血清甘油三酯（TG）试剂盒、高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）试剂盒、低密度脂蛋白胆固醇（LDL-C）试剂盒　南京建成生物工程研究所；谷草转氨酶（AST）试剂盒、谷丙转氨酶（ALT）试剂盒　深圳雷杜生命科学股份有限公司。

BJ-800A 粉碎机（小型）　德清拜杰电器有限公司；SHZ-B 水浴恒温振荡器　上海博讯医疗生物仪器股份有限公司；M1-L236A 微波炉　广东美的厨房电器制造有限公司；TD5A-WS 台式低速离心机　长沙湘仪离心机仪器有限公司；LXJ-IIB 台式高速离心机　上海安亭科学仪器厂；DG-9070A 鼓风干燥箱（电热恒温）　上海齐欣科学仪器有限公司；R-100 旋转蒸发仪　瑞士步琦有限公司；QL-866 漩涡振荡仪　海门市其林贝尔仪器制造有限公司；FA1204B 电子天平　上海仪天科学仪器有限公司；SHB-Ⅲ循环水式多用真空泵　郑州长城科工贸有限公司；KQ-250DE 超声波清洗机　昆山市超声仪器有限公司；T6 新世纪紫外可见光光度计　北京普析通用仪器有限责任公司；JSM-5900LV 扫描电子显微镜　日本电子株式会社；Spectrun-100 傅里叶红外光谱仪　美国 PerkinElmer 公司；BioTeK Epoch 酶标检测仪　上海鹏仪电子科技有限公司；Chemray 420 全自动生化分析仪　深圳雷杜生命科学股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 葡萄皮渣预处理及 SDF 提取

1.2.1.1 葡萄皮渣预处理　将酿酒后的葡萄皮渣进行水洗除杂、并将其皮籽分离，将其放入 60 ℃ 烘箱中烘干至恒定重量，再使用小型粉碎机对烘干后的葡萄皮渣进行粉碎，过孔径为 0.18 mm 的筛网，获得葡萄皮渣纤维原料粉，供后续试验使用。

1.2.1.2 葡萄皮渣 SDF 提取　称取 2.00 g 经过预处理的葡萄皮渣，将其加入到料液比 1∶30（g/mL）、柠檬酸质量分数 6% 的溶液中，接着将混合物置于 60 ℃ 的水浴恒温振荡器中进行振荡处理，5000 r/min 离心 15 min，取上清液进行旋蒸浓缩，向浓缩液中加入 4 倍体积的无水乙醇，在室温下进行醇沉处理，静置 5 h，随后通过抽滤的方式分离出沉淀物，即滤渣；最后，将滤渣置于干燥箱中干燥至恒重，获得 SDF。

1.2.2 改性葡萄皮渣水溶性膳食纤维制备

1.2.2.1 微波辅助酸法（M-A）改性　准确称取 2.00 g 葡萄皮渣纤维原料粉末置于锥形瓶中，加入料液比 1∶30（g/mL）、柠檬酸质量分数 6% 的溶液，充分混合后，60 ℃ 水浴恒温振荡 20 min，以确保葡萄皮渣纤维原料与柠檬酸溶液充分反应。随后，将锥形瓶从振荡器中取出，设置微波功率 240 W，微波时间 60 s 进行萃取操作，萃取完成后于 5000 r/min 离心 15 min，为使制备效率最大化，对过滤后的残渣进行二次提取，重复上述步骤，将两次离心所得的上清液合并，进行旋转蒸发。加入 4 倍体积的无水乙醇沉淀 5 h，使用真空泵进行抽滤，干燥至恒定重量，得到 M-A SDF[16−17]。

1.2.2.2 超声波辅助纤维素酶法（C-UW）改性　称取 2.00 g 预处理的葡萄皮渣，按料液比 1∶20（g/mL）加入蒸馏水并混合均匀，使用乙酸/氢氧化钠溶液调节混合液 pH 至 4.0，加入定量纤维素酶，调节至目标温度置于 250 W 超声场中酶解一定时间，酶解结束后，100 ℃ 水浴加热 10 min 终止反应，以 5000 r/min 转速离心 15 min，收集上清液，向上清液中加入 4 倍体积无水乙醇，室温静置醇沉 5 h，抽滤分离沉淀物，滤渣经干燥至恒重，获得 C-UW SDF[18−19]。

1.2.3 单因素实验

1.2.3.1 M-A 改性单因素实验设计　准确称取 2.0 g 样品，分别探究柠檬酸质量分数（3%、4%、5%、6%、

7%）、料液比（1∶20、1∶25、1∶30、1∶35、1∶40）、微波功率（80、240、400、640、800 W）、微波时间（30、60、90、120、150 s）对 SDF 得率的影响。考察单一因素时，其余因素固定为：柠檬酸质量分数 6%、料液比 1∶30、微波功率 240 W、微波时间 60 s。

1.2.3.2　C-UW 改性单因素实验设计　准确称取 2.0 g 样品，分别探究纤维素酶添加量（0、0.1%、0.2%、0.3%、0.4%、0.5%）、酶解温度（40、45、50、55、60 ℃）、酶解时间（10、20、30、40、50 min）对 SDF 得率的影响。考察单一因素时，其余因素固定为：纤维素酶添加量 0.4%、酶解温度 50 ℃、酶解时间 30 min。

1.2.4　响应面试验设计　采用响应面优化法确定最佳 SDF 改性的最佳工艺条件，以 SDF 得率为评价指标，分别探究 M-A 法和 C-UW 法对 SDF 改性效果的作用，并确定两种改性 SDF 的最佳工艺参数，试验因素水平设计分别见表 1 和表 2。

表 1　微波联合酸改性 SDF 响应面试验设计因素水平

Table 1　Factor and level design of response surface methodology for microwave-assisted acid modified soluble dietary fiber (SDF)

水平	因素		
	A料液比（g/mL）	B微波功率（W）	C微波时间（s）
−1	1∶20	80	30
0	1∶25	240	60
1	1∶30	400	90

表 2　超声波联合纤维素酶改性 SDF 响应面试验设计因素水平

Table 2　Factor and level design of response surface methodology experiment for ultrasonic wave combined with cellulase-modified SDF

水平	因素		
	A纤维素酶添加量（%）	B酶解温度（℃）	C酶解时间（min）
−1	0.3	50	20
0	0.4	55	30
1	0.5	60	40

$$\text{SDF得率}(\%) = [(m_2 - m_1)/m] \times 100$$

式中：m 代表葡萄皮渣纤维原料粉末样品的质量，g；m_1 代表滤纸在过滤前的干燥至恒重的质量，g；m_2 代表滤纸连同残留物质干燥至恒重的质量，g。

1.2.5　葡萄皮渣 SDF 改性前后理化性质测定

1.2.5.1　功能特性测定　溶胀力（SC）：分别准确称取 1.00 g 葡萄皮渣 SDF、M-A SDF、C-UW SDF，向量筒中添加 20 mL 蒸馏水，使其充分混匀，室温条件下静置 24 h，读取量筒内的样品的体积数[20]。葡萄皮渣 SDF 的溶胀力按以下公式计算：

$$SC(mL/g) = \frac{V_1 - V}{m} \qquad 式（1）$$

式中，m 代表葡萄皮渣 SDF 样品的质量，g；V 代表干品膨胀前的体积，mL；V_1 代表干品膨胀后的体积，mL。

持水力（WHC）：分别准确称取 1.00 g 葡萄皮渣 SDF、M-A SDF、C-UW SDF 放入烧杯中，加入 20 mL 蒸馏水，使其充分混匀，室温条件下静置 24 h，用定量滤纸沥干样品水分，将湿样在 5000 r/min 条件下离心 5 min 后弃去水分，称取样品的质量[21]。葡萄皮渣 SDF 的持水力计算见下式：

$$WHC(g/g) = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \qquad 式（2）$$

式中，m_1 代表葡萄皮渣 SDF 样品的干质量，g；m_2 代表葡萄皮渣 SDF 样品的湿质量，g。

1.2.5.2　持油力（OHC）　方法同持水力的测定。选用市售葵花籽油测定葡萄皮渣 SDF 的持油能力。

1.2.5.3　胆固醇吸附能力　取鸡蛋黄，去除蛋清，加入 9 倍体积的去离子水稀释，充分搅打，在 200 mL 锥形瓶中分别加入 50 mg SDF、M-A SDF、C-UW SDF，添加 15 mL 上述蛋黄液，将 pH 分别调至 2 和 7，模拟人的胃和肠道环境[22−23]。37 ℃ 搅拌 2 h，于 4000 r/min 离心 20 min，取上清液 400 μL，将 1 mL 浓硫酸加入 1.5 mL 配制好的 OPA 试剂中，混匀后置于室温 10 min，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，根据公式（y=0.0094x−0.0076，R^2=0.9965）计算胆固醇的浓度。

$$胆固醇吸附能力(mg/g) = \frac{a - b}{m} \qquad 式（3）$$

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 SDF 加入量，g。

1.2.5.4　阳离子交换能力　准确称量 0.3 g SDF、M-A SDF、C-UW SDF，溶解于 30 mL 0.01 mol/L HCl 溶液中，4 ℃ 下放置 12 h，0.10 mol/L 氢氧化钠溶液滴定至终点，记录消耗氢氧化钠溶液体积和 pH 变化，绘制氢氧化钠溶液体积和 pH 关系图。以不加样品的 30 mL 0.01 mol/L HCl 溶液为空白对照[24]。

1.2.6　形貌结构观察

1.2.6.1　扫描电镜测定　参考唐顺博等[25] 的方法进行扫描电子显微镜（scanning electron microscope，SEM）分析，取适量葡萄皮渣 SDF、M-A SDF、C-UW SDF 粉末分别均匀涂抹于导电胶上，经过真空喷金处理后，获取 300 倍、1000 倍扫描电镜图像。

1.2.6.2　傅里叶红外光谱测定　将 SDF、M-A SDF、C-UW SDF 样品干燥至恒重，每次分别称取约 2 mg 样品于玛瑙研钵中，加入 100 mg 干燥 KBr 粉末，完全研细混匀，压片，进行红外光谱（FTIR）分析，扫描波长为 470~4000 cm^{-1}，扫描次数为 32 次，分辨率为 4 cm^{-1}[21]。

1.2.7　动物试验

1.2.7.1　高脂肥胖小鼠建模及给药　试验采用了

80 只雄性 C57BL/6J 小鼠，饲养环境温度控制在 22±1 ℃，小鼠初始体重在 16~18 g 之间。首先，所有小鼠均接受为期一周的适应性喂养，期间统一喂食基础饲料并自由饮水。适应性喂养结束后，随机抽取 72 只小鼠改喂 60% 高脂肪饲料以建立模型，剩余 8 只作为空白对照组（NC），继续食用基础饲料。建模持续 5 周后，剔除未成功建模的小鼠，将除空白组外的其余小鼠随机分为五组：模型组（MC）、阳性对照组（PC）、SDF 处理组（1.5 g/kg）、M-A SDF 处理组（1.5 g/kg）和 C-UW SDF 处理组（1.5 g/kg），每组 12 只小鼠。分组完成后，NC 组继续喂食基础饲料，其余各组继续高脂饲料喂养。根据小鼠体重进行灌胃给药，阳性对照药物选用血脂康（180 mg/kg），NC 组和 MC 组则每日灌胃 0.9% 生理盐水（0.2 mL/20 g），给药期间小鼠可自由饮水和进食，给药周期为 4 周。4 周后，小鼠禁食但不禁水 12 h，随后称量体重，通过眼球取血收集血液样本，脊椎脱臼法处死并迅速解剖，取出肝脏，用冷生理盐水清洗以去除血水，使用多聚甲醛固定，以备后续试验数据的测定。本研究涉及的动物实验方案已经通过新疆农业大学实验动物福利伦理委员会审核批准。

1.2.7.2 指标检测 将采集到的小鼠眼球血置于 2 mL EP 管，静置 2 h，血清析出后，1500 r/min 离心 10 min，取上清液，按照试剂盒方法测定小鼠血清中的 TC、TG、HDL-C、LDL-C、动脉粥样硬化指数（AI）及谷草转氨酶（AST）和谷丙转氨酶（ALT）活性；按照试剂盒方法测定肝脏中的 TC、TG、HDL-C、LDL-C，并对肝脏切片进行病理分析。

1.3 数据处理

采用 Excel 软件进行数据统计处理，采用 Origin 2021 软件作图，Design Expert 13 进行响应面法分析，采用 SPSS 26.0 软件中单因素方差法分析显著性差异，差异显著水平为 $P<0.05$。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 M-A 改性对 SDF 得率的影响 以柠檬酸质量分数 6%、料液比 1∶30、微波功率 240 W、微波时间 60 s 为固定值，保持其中三个因素条件不变的情况下，分别探究第四个因素对葡萄皮渣 SDF 得率的影响，结果如图 1 所示。

由图 1 可知，随着柠檬酸质量分数、料液比、微波功率、微波时间的增加，SDF 得率呈现先上升而后下降的趋势。在柠檬酸质量分数为 6% 时，SDF 得率最高。料液比为 1∶25 时，SDF 得率最高，表明在此料液比下，溶液既不过于稀释也不过于粘稠，传质阻力适中。

微波功率为 240 W 时，SDF 得率最高，说明在此功率下，SDF 分子能够吸收足够的微波能量来克服与葡萄皮渣的结合力，同时避免高温对 SDF 分子结构的破坏。微波时间为 60 s 时，SDF 得率最高，表明在这个时间点上，SDF 分子能够充分吸收微波的能量以克服与葡萄皮渣的结合力，同时又避免了长时间高温对 SDF 分子结构的破坏。综合考虑 SDF 得率影响程度，选用料液比（1∶20、1∶25、1∶30 g/mL）、微波功率（80、240、400 W）、微波时间（30、60、90 s）进行三因素三水平响应面优化试验。

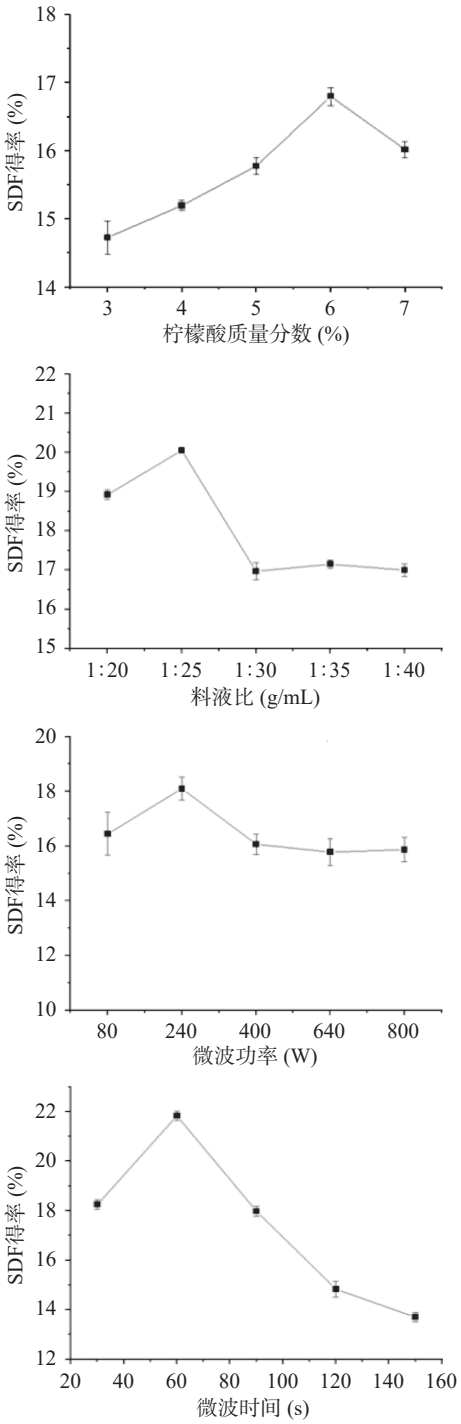


图 1 微波联合酸改性对葡萄皮渣 SDF 得率的影响

Fig.1 Effects of microwave combined with acid modification on the yield of SDF from grape pomace

2.1.2 C-UW 改性对 SDF 得率的影响 以纤维素酶添加量 0.4%、酶解温度 50 ℃、酶解时间 30 min 为固定值，保持其中两个因素条件不变的情况下，分别

探究第三个因素对葡萄皮渣 SDF 得率的影响，结果如图 2 所示。

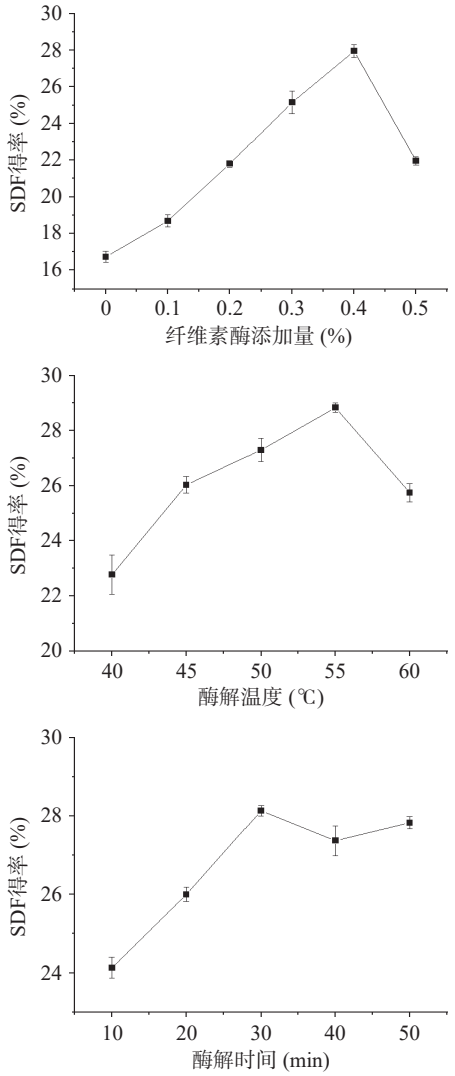


图 2　超声波联合纤维素酶改性对葡萄皮渣 SDF 得率的影响

Fig.2　Effects of ultrasonic treatment combined with cellulase modification on the yield of SDF from grape pomace

由图 2 可知，随着纤维素酶添加量、酶解温度及时间的递增，SDF 得率呈现出先递增，继而递减，随后又小幅回升的变化趋势。当纤维素酶添加量达到 0.4% 时，SDF 得率最高，主要是因为酶解产物随着酶浓度的提升而增加，但过高的酶浓度会导致部分膳食纤维被进一步水解为低聚糖，而该低聚糖无法被乙醇沉淀，从而降低 SDF 得率。当酶解温度为 55 ℃ 时，处于该适宜温度范围内，此时 SDF 得率处于较高水平。而酶解温度超过 55 ℃ 后，SDF 得率下降，原因在于过高的温度不仅会使酶部分失活，还会增大溶液的黏度，阻碍底物与酶的充分接触，最终导致 SDF 得率降低。在酶解时间为 30 min 时，SDF 得率最高，下降的原因可能是长时间的酶解作用与超声波的空化、微机械及热效应共同作用，导致膳食纤维发生降解为乙醇无法沉淀的低聚糖。因此，综合考虑选用纤维素酶添加量（0.3%、0.4%、0.5%）、酶解温度（50、55、60 ℃）、酶解时间（20、30、40 min）进行三因素三水平响应面优化试验。

2.2　响应面试验结果分析

表 3、表 4 为 M-A 改性葡萄皮渣 SDF 响应面试验设计与结果和回归方程模型方差分析表。表 5、表 6 为 C-UW 改性葡萄皮渣 SDF 响应面试验设计与结果和回归方程模型方差分析表。从表 3、表 4 可以看出，模型 F 值为 70.91，P<0.0001，表明该模型与试验数据之间存在极显著的差异，即模型能很好地解释试验数据中的差异；失拟项 P=0.3478>0.05，回归模型相关系数 R^2=0.9892，R^2_{Adj}=0.9752，R^2_{Pred}=0.9007，R^2 接近 1，R^2_{Adj} 与 R^2_{Pred} 差值小于 0.2，该模型展现出较高的拟合度，数据准确可靠。通过对

表 3　微波联合酸改性葡萄皮渣 SDF 响应面试验设计与结果

Table 3　Response surface methodology design and results for the combination of microwave and acid modification of SDF from grape pomace

实验号	A	B	C	SDF得率(%)
1	1	−1	0	16.05
2	0	−1	1	16.52
3	0	0	0	21.75
4	0	0	0	22.59
5	−1	0	1	16.80
6	0	1	1	14.25
7	0	0	0	22.62
8	−1	0	−1	16.65
9	0	1	−1	13.90
10	1	0	−1	16.30
11	1	0	1	15.75
12	−1	−1	0	15.40
13	−1	1	0	13.65
14	0	−1	−1	16.15
15	0	0	0	21.95
16	1	1	0	14.05
17	0	0	0	21.62

表 4　微波联合酸改性葡萄皮渣 SDF 回归方程模型方差分析结果

Table 4　Variance analysis results of the regression equation model of SDF from grape pomace modified by microwave and acid

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	170.22	9	18.91	70.91	<0.0001	**
A	0.0153	1	0.0153	0.0574	0.8175	
B	8.55	1	8.55	32.05	0.0008	**
C	0.0128	1	0.0128	0.0480	0.8328	
AB	0.0156	1	0.0156	0.0586	0.8157	
AC	0.1225	1	0.1225	0.4593	0.5197	
BC	0.0001	1	0.0001	0.0004	0.9851	
A^2	39.79	1	39.79	149.20	<0.0001	**
B^2	75.85	1	75.85	284.38	<0.0001	**
C^2	29.72	1	29.72	111.43	<0.0001	**
残差	1.87	7	0.2667			
失拟项	0.9812	3	0.3271	1.48	0.3478	
误差项	0.8857	4	0.2214			
总和	172.09	16				

注：“**”表示差异极显著（P<0.01）；“*”表示差异显著（P<0.05），表6同。

表 5 超声波联合纤维素酶改性葡萄皮渣 SDF 响应面试验设计与结果

Table 5 Response surface methodology design and results for the combination of ultrasonic treatment and cellulase modification of SDF from grape pomace

实验号	A	B	C	SDF得率(%)
1	1	−1	0	23.35
2	−1	1	0	25.65
3	0	1	−1	26.90
4	0	0	0	28.75
5	−1	−1	0	26.50
6	0	−1	1	27.10
7	0	0	0	28.40
8	1	0	1	23.70
9	0	0	0	28.30
10	0	1	1	25.85
11	0	0	0	28.90
12	1	0	−1	24.20
13	−1	0	1	25.25
14	1	1	0	23.75
15	0	−1	−1	27.55
16	0	0	0	28.95
17	−1	0	−1	25.75

表 6 超声波联合纤维素酶改性葡萄皮渣 SDF 回归方程模型方差分析结果

Table 6 Variance analysis results of the regression equation model of SDF from grape pomace modified by ultrasonic treatment and cellulase

方差来源	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性
模型	57.95	9	6.44	38.21	<0.0001	**
A	8.10	1	8.10	48.05	0.0002	**
B	0.6903	1	0.6903	4.09	0.0827	
C	0.7200	1	0.7200	4.27	0.0776	
AB	0.3906	1	0.3906	2.32	0.1718	
AC	0.0025	1	0.0025	0.0148	0.9065	
BC	0.0900	1	0.0900	0.5338	0.4887	
A^2	37.86	1	37.86	224.59	<0.0001	**
B^2	3.03	1	3.03	17.99	0.0038	**
C^2	3.89	1	3.89	23.08	0.0020	**
残差	1.18	7	0.1686			
失拟项	0.8331	3	0.2777	3.20	0.1452	
误差项	0.3470	4	0.0867			
总和	59.16	16				

注: **表示数据差异极显著, $P<0.05$。

F 值的分析, 可以明确三个因素对葡萄皮渣中 SDF 得率的影响程度为 B>A>C, 确定最佳工艺参数: 料液比(1∶24.97)、微波功率(220.56 W)、微波时间(60.24 s), SDF 得率可达 22.17%, 为了便于实际操作, 将工艺参数微调为柠檬酸质量分数 6%、料液比 1∶25、微波功率 240 W, 基于调整后的参数, 调整后的参数进行 5 次重复性试验验证, SDF 得率稳定, 平均得率为 21.74%, 与理论得率相比仅有 0.41% 的微小偏差, 这有力证实了所建立的数学模型的准确性和可靠性。

从表 5、表 6 可以看出, 模型 *F* 值为 38.21, $P<0.0001$, 表明该模型与试验数据之间存在极显著的差异, 即模型能很好地解释试验数据中的差异; 失拟项 $P=0.1452>0.05$, 回归模型决定系数 $R^2=0.9801$, $R^2_{Adj}=0.9544$, $R^2_{Pred}=0.7655$, R^2 接近 1, R^2_{Adj} 与 R^2_{Pred} 差值小于 0.2, 该模型展现出较高的拟合度, 数据准确可靠, 通过对 *F* 值的分析, 酶解条件对 SDF 得率影响大小顺序为: A>C>B, 确定工艺参数: 纤维素酶添加量(0.38%)、酶解温度(54.04 ℃)、酶解时间(28.61 min), SDF 得率可达 28.8%, 为了便于实际操作, 将工艺参数微调为纤维素酶添加量 0.4%、酶解温度 55 ℃、酶解时间 30 min, 并进行了验证试验。结果显示, 调整后的参数下 SDF 得率稳定, 平均得率为 28.29%, 与理论得率相比仅有 0.51% 的微小偏差, 证实了所建立的数学模型的准确性和可靠性。由此可以看出, C-UW 改性 SDF 得率高于 M-A 改性。

2.3 改性前后 SDF 理化性质

由表 7 知, 改性处理显著改变了 SDF 的功能特性。具体表现为, 经过 M-A 法和 C-UW 法改性后的 SDF, 其溶胀力、持水力、持油力相较于未改性的 SDF 均有了显著提升($P<0.05$)。这一结果直接证明了 M-A 法与 C-UW 法在提高 SDF 溶胀力、持水力与持油力方面的有效性。进一步对比两种改性方法, 可以发现 C-UW 法在提升功能特性方面的效果更为突出, 这体现了酶解与超声联合处理的积极作用。改性葡萄皮渣 SDF 所展现出的这些优异功能特性, 为其在食品工业、保健品、医药等多个领域的应用提供了广阔前景。

表 7 SDF 的功能特性

Table 7 Functional characteristics of SDF

样品	溶胀力(mL·g^{-1})	持水力(g·g^{-1})	持油力(g·g^{-1})
SDF	1.03±0.06^c	1.52±0.02^c	2.35±0.06^c
M-A SDF	1.43±0.08^b	1.85±0.04^b	2.62±0.05^b
C-UW SDF	1.73±0.06^a	2.05±0.02^a	2.88±0.03^a

注: 同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

胆固醇在人体内具有多方面的生理功能, 但当其水平异常升高时, 可能诱发高脂血症, 进而增加动脉粥样硬化、静脉血栓形成及胆石症等严重疾病的发生风险[26]。SDF 能够吸附胆固醇, 可以有效

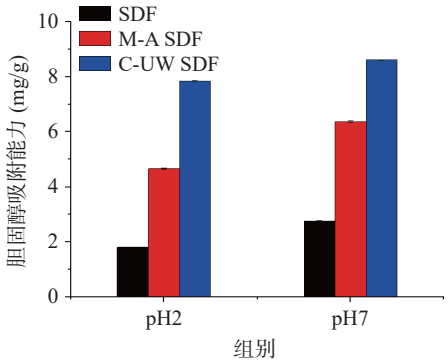


图 3 葡萄皮渣水溶性膳食纤维改性前后胆固醇吸附能力

Fig.3 Cholesterol adsorption capacity of soluble dietary fiber from grape pomace before and after modification

降低机体胆固醇含量，从而减少相关并发症的发生[27−28]。通过图 3 对比分析发现，在 pH2 的酸性环境和 pH7 的中性环境下，未改性 SDF、M-A 法改性 SDF、C-UW 法改性 SDF 的胆固醇吸附能力依次递增，且相较于未改性 SDF，两种改性方法均能够提升 SDF 在两种 pH 环境下的胆固醇吸附能力，C-UW 法提升效果更优。这一现象的原因可能在于，改性处理改变了 SDF 的分子结构和表面性质，使其能够更有效地与胆固醇分子结合。特别是 C-UW 法，通过超声波的空化效应和纤维素酶的酶解作用，可能进一步暴露了 SDF 分子中的活性位点，增强了其与胆固醇的相互作用，从而提高了胆固醇的吸附能力。

由图 4，曲线的斜率变化可用来评估样品的阳离子交换能力。具体而言，当曲线斜率较小时，表明样品在交换过程中释放或吸收阳离子的速率较为平缓，这反映出样品具有较强的阳离子交换能力和较好的缓冲性能。与空白组(NC)相比，三种 SDF(SDF、M-A SDF、C-UW SDF)的曲线变化均相对平缓，说明它们均具备一定程度的阳离子交换能力。尽管各 SDF 样品组之间的曲线斜率存在细微差异，但整体来看，这些差异并不大，进一步证实了三者均展现出良好的阳离子交换能力。

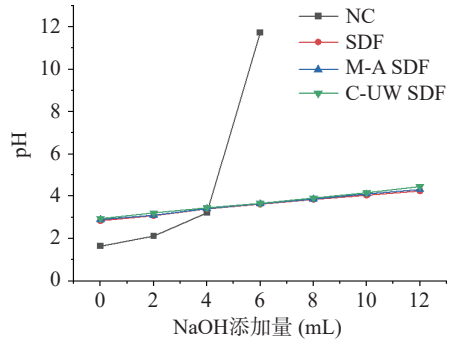


图 4　葡萄皮渣水溶性膳食纤维改性前后阳离子交换能力

Fig.4　Cationic exchange capacity of soluble dietary fiber from grape pomace before and after modification

2.4　改性前后 SDF 扫描电镜

图 5 显示了三种类型 SDF 样品分别放大 300 倍和 1000 倍后的电镜扫描图片，由 SDF 300 倍与 1000 倍的图片可以发现其呈现松散不规则球状，M-A SDF 颗粒变得更加细小均匀，不规则球状转变成均匀毛绒花状，纤维形态更加明显，并且原先包裹在纤维中的一些球形颗粒也被释放出来，这一变化可能是由于微波处理产生的热效应和机械效应所导致，进而提高了其与水分子的接触机会，这可能是 M-A SDF 功能特性提高的原因。而 C-UW SDF 形态转变为密集但不均匀的棍状，这种形态变化可能与超声波的空化效应和纤维素酶的酶解作用有关。超声波产生的空化泡释放出的能量可能促进了 SDF 分子间的相互作用和重排，形成了更为紧密的棍状结构，增加了 SDF 分子间的相互作用力，从而提高了其功能特性。该现象与其改性后持水力和溶胀力等物理性质发生了显著变化的结果相吻合。

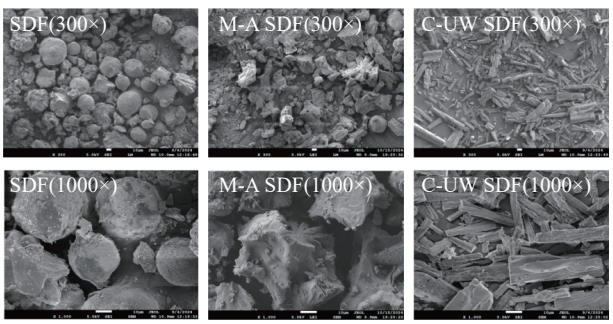


图 5　葡萄皮渣水溶性膳食纤维改性前后电镜扫描图

Fig.5　Scanning electron microscopy of SDF from grape pomace before and after modification

2.5　改性前后 SDF 傅里叶红外光谱分析

由图 6，三种类型的 SDF 红外图谱趋势大致相同，葡萄皮渣 SDF 具有多糖的特征峰。3317.02~3600 cm^{-1} 处出现的宽圆弧形曲线的吸收峰是 O-H 的伸缩振动，说明 SDF 中有羟基以及结合水分。1500~2000 cm^{-1} 是双键的伸缩振动，1591.01 cm^{-1} 是 C=C 键，1000~1200 cm^{-1} 是 C-O 的振动，1068.39 cm^{-1} 是 C-O-C 环内醚中 C-O 伸缩振动，684.62 cm^{-1} 是糖分子中 β-型的 C-H 直立键的变角振动吸收。各峰的数量、位置以及峰形均未观察到显著变化，这表明三种 SDF 的主要组分及其整体的化学结构保持了相对稳定，未发生明显变化。

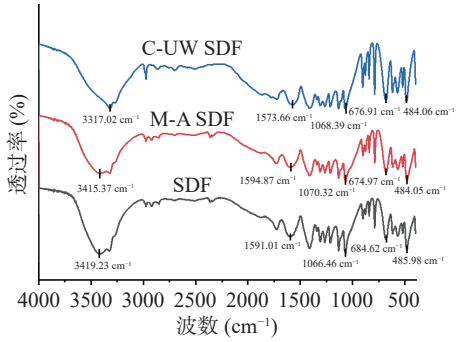


图 6　葡萄皮渣水溶性膳食纤维改性前后红外光谱

Fig.6　Infrared spectra of SDF from grape pomace before and after modification

2.6　小鼠高脂肥胖模型造模结果

高血脂症是指由于体内脂质代谢失衡，导致血浆中多种脂质成分超出正常范围的一种疾病状态。根据研究，高脂饮食会促使血浆中的 TC、TG、LDL-C 水平上升，而降低 HDL-C 的水平[29−30]。由图 7，建模五周后，MC 组小鼠的 TC、TG、LDL-C 浓度均极显著高于 NC 组小鼠(P<0.01)，MC 组 HDL-C 浓度较 NC 组极显著降低(P<0.01)，说明小鼠造模成功。

2.7　葡萄皮渣 SDF 对高脂小鼠各项生理指标的影响

2.7.1　葡萄皮渣 SDF 对高脂小鼠体重的影响　如表 8 所示，从同一时间段内各组小鼠体重差异显著性来看，第 0 d时，NC 组小鼠体重较其他组差异显

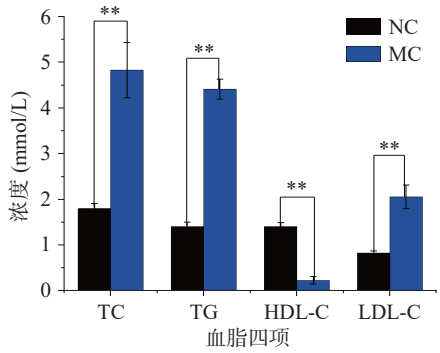


图 7 高脂肥胖模型小鼠造模试验结果

Fig.7 Results of high-fat diet-induced obesity model in mice

注: **表示两组血清指标数据差异极显著(P<0.01)。

著(P<0.05), NC 组灌胃 14 d 后体重增加显著(P<0.05); 而高脂饲料各组中, MC 组灌胃 14 d 时小鼠体重显著增加(P<0.05), PC 组从灌胃 7~28 d, 小鼠体重显著下降(P<0.05), SDF 组、M-A SDF 组、C-UW SDF 组在灌胃 28 d 后小鼠体重均有所降低, 但变化不显著。在 21 d 时, 根据数据分析, C-UW SDF 组小鼠体重与 PC 组、SDF 组和 M-A SDF 组相比, 并无显著性差异(P>0.05), 但与 MC 组相比也未达到显著性差异水平(虽趋势上有所降低, 但统计上不显著)。至 28 d 时, SDF 组小鼠体重较其他几组(除 NC 组外)表现出一定差异。整体而言, PC 组、SDF 组、M-A SDF 组、C-UW SDF 组在灌胃期间均显示出对小鼠体重增长的抑制作用, 其中 PC 组的抑制作用较为显著。因此, 可以认为改性前后的 SDF 对小鼠体重增长具有一定的影响。

2.7.2 葡萄皮渣 SDF 对高脂小鼠血清 TC、TG、HDL-C、LDL-C 的影响 表 9 为小鼠血清脂质指标。总胆固醇(TC): MC 组 TC 值最高, 显著高于其他组(P<0.05), 表明高脂血症模型建立成功。PC 组、SDF 组、M-A SDF 组和 C-UW SDF 组 TC 值均低于 MC 组, 且呈现不同程度的降低, 说明水溶性膳食纤维对降低 TC 有一定效果。C-UW SDF 组 TC 值最低, 与 NC 组接近, 表明其降 TC 效果最佳。

甘油三酯(TG): MC 组 TG 值最高, 显著高于其他组(P<0.05), 符合高脂血症特征。PC 组、SDF 组、M-A SDF 组和 C-UW SDF 组 TG 值均显著低于 MC 组(P<0.05)。说明水溶性膳食纤维能有效降低 TG。C-UW SDF 组 TG 值最低, 降 TG 效果最明显。

高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C): MC 组 HDL-C 值最低, 显著低于其他组(P<0.05), 表明高脂血症小鼠 HDL-C 水平下降。SDF 组和 C-UW SDF 组 HDL-C 值较高, 显著高于 MC 组(P<0.05), 说明这两种水溶性膳食纤维能提高 HDL-C 水平。NC 组 HDL-C 值处于中等水平, PC 组和 M-A SDF 组 HDL-C 值相对较低。

低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C): MC 组 LDL-C 值最高, 显著高于其他组(P<0.05), 表明高脂血症小鼠 LDL-C 水平升高。SDF 组、M-A SDF 组和 C-UW SDF 组 LDL-C 值均显著低于 MC 组(P<0.05), 说明这些膳食纤维能降低 LDL-C 水平。C-UW SDF 组 LDL-C 值最低, 降 LDL-C 效果最佳。

动脉粥样硬化(AI): 对人而言, 动脉硬化指数在正常范围内应低于 4。一旦该指数超过 4, 即意味着动脉硬化可能已经发生, 并且患心脑血管疾病的风险会随之增加[31]。本试验结果显示, MC 组小鼠的动脉粥样硬化指数超出了 4 的界限, 显示出动脉硬化迹象。无论是改性前还是改性后的 SDF, 均对高脂血

表 8 灌胃期各组小鼠体重

Table 8 Body weight of mice in each group during the gavage period

组别	0 d	7 d	14 d	21 d	28 d
NC组	24.09±1.35^{Cb}	25.04±1.10^{Bab}	25.66±1.44^{Ba}	26.15±1.61^{Ca}	26.51±1.51^{Ba}
MC组	26.25±1.86^{Bc}	27.32±1.99^{ABbc}	28.58±3.13^{Aab}	29.19±2.96^{Aab}	30.04±2.55^{Aa}
PC组	26.71±1.80^{Bab}	27.46±2.39^{Aa}	26.99±1.87^{ABab}	26.98±1.64^{ABCab}	25.59±1.82^{Bb}
SDF组	29.58±2.60^{Aa}	29.26±2.70^{Aa}	28.94±2.70^{Aa}	28.63±2.54^{ABa}	28.58±2.10^{Aa}
M-A SDF组	27.19±3.18^{Ba}	27.02±3.12^{ABa}	26.35±3.37^{ABa}	26.79±3.11^{ABCa}	26.27±2.50^{Ba}
C-UW SDF组	27.67±3.03^{ABa}	27.38±3.09^{ABa}	26.90±3.15^{ABa}	26.40±3.12^{BCa}	26.38±2.92^{Ba}

注: 同行不同小写字母表示不同时间段差异显著(P<0.05); 同列不同大写字母表示不同组别差异显著(P<0.05)。

表 9 改性前后 SDF 对高脂血症小鼠血清中 TC、TG、HDL-C、LDL-C 及 AI 的影响

Table 9 Effects of different soluble dietary fibers on TC, TG, HDL-C, LDL-C and AI in the serum of hyperlipidemia mice

组别	TC(mmol/L)	TG(mmol/L)	HDL-C(mmol/L)	LDL-C(mmol/L)	AI(mmol/L)
NC组	2.21±0.11^{f}	1.64±0.06^{b}	1.60±0.06^{c}	0.81±0.05^{b}	0.38±0.05^{d}
MC组	7.07±0.21^{a}	5.66±0.36^{a}	0.53±0.08^{f}	2.78±0.04^{a}	12.56±2.19^{a}
PC组	4.83±0.14^{b}	0.84±0.08^{c}	1.46±0.02^{d}	0.73±0.02^{c}	2.33±0.11^{b}
SDF组	4.13±0.04^{c}	0.66±0.03^{c}	2.12±0.02^{b}	0.54±0.05^{e}	0.94±0.03^{cd}
M-A SDF组	3.67±0.14^{d}	0.78±0.04^{c}	1.37±0.05^{e}	0.61±0.04^{d}	1.69±0.16^{bc}
C-UW SDF组	3.09±0.14^{e}	0.43±0.03^{d}	2.45±0.10^{a}	0.48±0.02^{f}	0.26±0.08^{d}

注: 同一列不同字母表示不同组别差异显著(P<0.05)。

症小鼠血清中的 TC、TG、HDL-C、LDL-C 及 AI 有不同程度血脂调节作用。其中，C-UW SDF 组在降低 TC、TG、LDL-C 及 AI 水平，提高 HDL-C 水平方面表现最佳。

2.7.3　葡萄皮渣 SDF 对高脂小鼠血清 ALT、AST 的影响　ALT 和 AST 主要存在于肝细胞中，其活性水平可作为评估肝损伤或肝功能障碍的重要指标[32]。在血清和血浆中，ALT 和 AST 的活性变化能够反映肝脏的功能状态。当肝细胞遭受损伤时，ALT 和 AST 会释放入血，导致血清中这两种酶的活性升高，这一现象是肝脏受损的特异性生物标志[33]。小鼠血清中 ALT 和 AST 的活性如图 8 所示，MC 组相较于 NC 组 ALT 和 AST 显著增高（$P<0.05$），表明长期饲喂高脂饲料会导致小鼠肝脏受损，经药物、SDF、M-A SDF、C-UW SDF 干预后，PC 组、SDF 组、M-A SDF 组及 C-UW SDF 组均能降低高脂血症小鼠血清中的 ALT 和 AST 活性，其中 C-UW SDF 组在降低 ALT 与 AST 活性更显著，PC 组在降低 AST 活性较显著。结果表明，M-A SDF、C-UW SDF 能减轻高脂血症小鼠肝脏损伤。这些结果与杨末[34] 研究的碱法制备的绿豆皮可溶性膳食纤维可以降低高血脂小鼠血清中 ALT 和 AST，减轻高脂饮食小鼠肝细胞损伤，保护肝细胞的完整性的研究结果一致。

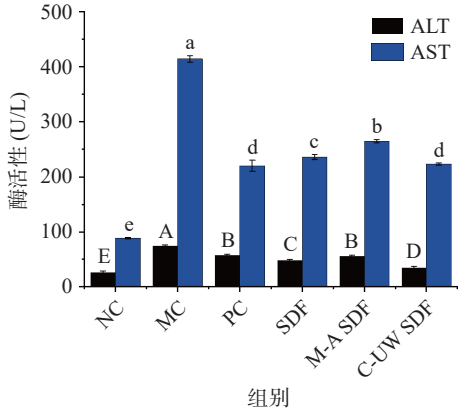


图 8　改性前后 SDF 对高脂血症小鼠血清中 ALT、AST 活性的影响

Fig.8　Effects of modified and unmodified SDF on ALT and AST activities in the serum of hyperlipidemia mice

注：图中大写字母判断 ALT 的显著性，小写字母判断 AST 的显著性，不同字母表示不同组别间差异显著（$P<0.05$）。

2.7.4　葡萄皮渣 SDF 对高脂小鼠肝脏 TC、TG、HDL-C、LDL-C 的影响　表 10 为小鼠肝脏脂质指标，从 TC、TG、HDL-C 和 LDL-C 水平可知，MC 组小鼠最高，均显著高于其他组（$P<0.05$），说明 MC 组小鼠肝脏中的脂质大量的沉积在肝脏中，通过灌胃水溶性膳食纤维均可以降低肝脏 TG、TC 和 LDL-C 水平，升高 HDL-C 水平，可以看出，改性前后 SDF 均使小鼠肝脏的 TG、TC 和 LDL-C 水平有不同程度的降低，HDL-C 水平不同程度的升高，其中 C-UW SDF 表现出来的效果最佳。

表 10　改性前后 SDF 对高脂血症小鼠肝脏中 TG、TC、HDL-C 及 LDL-C 的影响

Table 10　Effects of SDF before and after modification on TG, TC, HDL-C and LDL-C levels in the liver of hyperlipidemia mice

组别	TC (μmol/g)	TG (μmol/g)	HDL-C (μmol/g)	LDL-C (μmol/g)
NC组	3.24±0.14^{e}	2.63±0.18^{e}	1.59±0.31^{a}	3.57±0.25^{c}
MC组	7.05±0.28^{a}	10.82±0.87^{a}	0.35±0.09^{c}	5.47±0.42^{a}
PC组	4.26±0.24^{d}	3.42±0.31^{d}	0.84±0.02^{b}	3.11±0.40^{d}
SDF组	5.63±0.29^{b}	4.52±0.40^{c}	0.69±0.06^{b}	4.37±0.33^{b}
M-A SDF组	5.55±0.26^{b}	4.29±0.22^{c}	0.80±0.02^{b}	3.48±0.31^{c}
C-UW SDF组	5.12±0.06^{c}	5.15±0.08^{b}	0.82±0.02^{b}	4.13±0.05^{b}

注：同一列不同字母表示不同组别差异显著（$P<0.05$）。

2.7.5　小鼠肝脏 HE 切片染色及病理分析　六组小鼠肝脏 HE 染色如图 9 所示。图 9(A)为空白组肝细胞切片，组织内可见少量肝细胞空泡变性（蓝色箭头），胞质可见体积微小的空泡；实质和血管周围少见淋巴细胞小灶性浸润（紫色箭头）。图 9(B)为高脂组肝细胞切片，组织内可见多量肝细胞水肿（绿色箭头），胞质疏松淡染；较多肝细胞空泡变性（蓝色箭头），胞质可见体积微小的空泡；实质少见淋巴细胞小灶性浸润（紫色箭头）。图 9(C)为阳性组肝细胞切片，组织内可见少量肝细胞空泡变性（蓝色箭头），胞质可见体积微小的空泡；实质少见淋巴细胞和粒细胞小灶性浸润（紫色箭头）。图 9(D)为 SDF 组肝细胞切片，肝细胞圆润、饱满；实质偶见淋巴细胞和粒细胞浸润（紫色箭头）。图 9(E)为 M-A SDF 组肝细胞切片，组织内偶见肝细胞空泡变性（蓝色箭头），胞质可见体积微小的空泡，未见明显炎性细胞浸润。图 9(F)为 C-UW SDF 组肝细胞切片，组织内偶见肝细胞水肿（绿色箭头），胞质疏松淡染；偶见肝细胞空泡变性（蓝色箭头），胞质可见体积微小的空泡，未见明显炎性细胞浸润。该结果与上述血清脂质水平与肝脏脂质水平一致，说明改性后的水溶性膳食纤维对高脂血症小鼠能够起到一定的降血脂作用。

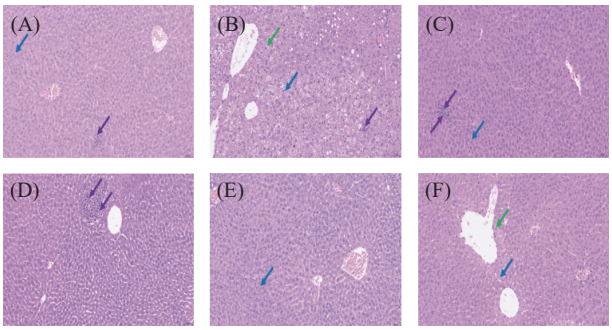


图 9　三种膳食纤维对小鼠肝脏组织学的影响

Fig.9　Effects of three types of dietary fiber on the histology of mouse liver

注：(A)~(F)分别代表 NC 组、MC 组、PC 组、SDF 组、M-A SDF 组和 C-UW SDF 组。

3　结论

本试验通过 M-A 法与 C-UW 法对葡萄皮渣

SDF 进行了改性处理，并系统研究了改性前后 SDF 的理化性质及其对高脂血症小鼠的降脂效果。首先通过单因素实验筛选了关键工艺参数，随后利用响应面优化法确定了两种改性方法的最佳工艺条件，并通过验证实验确认了所得参数的可靠性。结果显示，C-UW 法获得的 SDF 得率（28.8%）显著高于 M-A 法（21.74%），表明 C-UW 法在提高 SDF 提取效率方面具有优势。在理化性质比较中，C-UW SDF 在功能特性、胆固醇吸附能力及阳离子交换能力方面均表现出显著优于未改性 SDF 和 M-A SDF 的特性。微观结构观察和化学结构分析进一步证实了改性前后 SDF 在形态和化学结构上的变化，这些变化与理化性质的改善相吻合。动物试验结果表明，改性前后的葡萄皮渣 SDF 均能显著改善高脂血症小鼠的生理指标，包括降低体重、调节血脂四项、降低血清 ALT 与 AST 活性、改善肝脏指标及肝脏切片染色病理分析结果。本研究系统地评价了改性 SDF 的理化性质及其生物活性，为葡萄皮渣 SDF 的深入研究和应用提供了更为全面的数据支持。然而，本研究仍存在一些局限性，如改性过程中 SDF 分子结构变化的具体机制尚需进一步探讨，以及改性 SDF 在人体内的代谢途径和长期安全性评估等。未来研究可围绕这些问题展开，通过分子生物学、代谢组学等手段深入解析 SDF 的改性机制，为葡萄皮渣 SDF 在功能性食品及医药领域的广泛应用奠定坚实基础。

© 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] 林桂宇, 黄斌, 成芳梅, 等. 壮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 Guiyu, HUANG Bin, CHENG Fangmei, et al. Study on the blood lipid regulating and liver protective effects of oyster-pueraria lobata solid beverage on experimental hyperlipidemic mice[J]. Journal of Guangxi Medical University, 2021, 38(11): 2028−2033.]

[2] ZHAO S, ZHONG J, SUN C, 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.

[3] 王犁烨, 武运, 杨华峰, 等. 酿酒葡萄皮渣主要物质提取与利用的研究进展[J]. 中外葡萄与葡萄酒, 2018(6): 82−86. [WANG Liye, WU Yun, YANG Huafeng, et al. Research progress on the extraction and utilization of main substances from wine grape pomace [J]. Sino-Overseas Grapevine & Wine, 2018(6): 82−86.]

[4] 陈法志, 翟敬华, 刘克华, 等. 响应面法优化微波提取牡丹果壳水溶性膳食纤维工艺[J]. 江汉大学学报(自然科学版), 2020, 48(6): 48−55. [CHEN Fazhi, ZHAI Jinghua, LIU Kehua, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for water-soluble dietary fiber from peony fruit shells using response surface methodology[J]. Journal of Jianghan University (Natural Science Edition), 2020, 48(6): 48−55.]

[5] The physiological roles of dietary fibre[J]. Food Hydrocolloids, 2009, 25(2): 238−250.

[6] 刘绍鹏, 张梅, 慕春海, 等. 番茄水溶性膳食纤维对糖尿病小鼠降血糖作用的研究[J]. 农垦医学, 2008(3): 164−166. [LIU Shaopeng, ZHANG Mei, MU Chunhai, et al. Study on the hypoglycemic effect of water-soluble dietary fiber from tomatoes in diabetic mice[J]. Medical Journal of the State Farms, 2008(3): 164−166.]

[7] 林莹, 王旭清, 杨有, 等. 物理场结合酶法制备的水溶性膳食纤维降血脂作用的研究[J]. 食品工业, 2010, 31(5): 16−18. [LIN Ying, WANG Xuqing, YANG You, et al. Study on the hypolipidemic effect of water-soluble dietary fiber prepared by physical field combined with enzymatic Method[J]. Food Industry, 2010, 31(5): 16−18.]

[8] 谢惠. 红枣色素和红枣可溶性膳食纤维协同降血糖作用研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2018. [XIE Hui. Study on the synergistic hypoglycemic effect of jujube pigment and jujube soluble dietary fiber[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2018.]

[9] INOUE R, SAKAUE Y, KAWADA Y, et al. Dietary supplementation with partially hydrolyzed guar gum helps improve constipation and gut dysbiosis symptoms and behavioral irritability in children with autism spectrum disorder[J]. Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition, 2019, 64(3): 217−223.

[10] XU L, YU W K, JIANG J, et al. Clinical benefits after soluble dietary fiber supplementation: A randomized clinical trial in adults with slow-transit constipation[J]. National Medical Journal of China|Natl Med J China, 2014, 94(48): 3813−3816.

[11] 李荣乔, 谢晓亮, 贾东升, 等. 水溶性苦瓜膳食纤维的降血糖活性研究[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(10): 19−22. [LI Rongqiao, XIE Xiaoliang, JIA Dongsheng, et al. Study on the hypoglycemic activity of water-soluble bitter gourd dietary fiber[J]. Food Research and Development, 2017, 38(10): 19−22.]

[12] 陈仕学, 郁建平, 杨俊, 等. 响应面法优化微波提取阳荷水溶性膳食纤维工艺[J]. 食品科学, 2014, 35(18): 57−62. [CHEN Shixue, YU Jianping, YANG Jun, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for water-soluble dietary fiber from *Zingiber mioga* using response surface methodology[J]. Food Science, 2014, 35(18): 57−62.]

[13] 张晨萍, 吕转, 宿婧, 等. 超声-微波辅助提取豆粕水溶性膳食纤维及其抗氧化性研究[J]. 广东化工, 2022, 49(6): 32−35. [ZHANG Chenping, LÜ Zhuan, SU Jing, et al. Study on the ultrasonic-microwave assisted extraction of water-soluble dietary fiber from soybean meal and its antioxidant activity[J]. Guangdong Chemical Industry, 2022, 49(6): 32−35.]

[14] 李雄. 咖啡果皮水溶性膳食纤维的制备及特性研究[D]. 海口: 海南大学, 2020. [LI Xiong. Study on the preparation and characterization of water-soluble dietary fiber from coffee peel[D]. Haikou: Hainan University, 2020.]

[15] 朱凤霞. 米糠水溶性膳食纤维的优化提取及功效特性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018. [ZHU Fengxia. Study on the optimized extraction and functional properties of water-soluble dietary fiber from rice bran[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2018.]

[16] 蓝志福. 响应面优化西兰花水溶性膳食纤维提取及其理化性质[J]. 井冈山大学学报(自然科学版), 2019, 40(4): 34−39. [LAN Zhifu. Optimization of extraction process for water-soluble dietary fiber from broccoli using response surface methodology and its physicochemical properties[J]. Journal of Jinggangshan University (Natural Science Edition), 2019, 40(4): 34−39.]

［17］刘莉, 王燕, 黄华, 等. 响应面法优化红薯叶中水溶性膳食纤维提取工艺[J]. 粮食与油脂, 2023, 36(4): 122−125. ［LIU Li, WANG Yan, HUANG Hua, et al. Optimization of extraction process for water-soluble dietary fiber from sweet potato leaves using response surface methodology[J]. Cereals & Oils, 2023, 36(4): 122−125.］
［18］周永升, 莫小群, 张文婷, 等. 超声辅助纤维素酶法制备蔗叶膳食纤维及其理化特性分析[J]. 中国饲料, 2022(22): 107−113. ［ZHOU Yongsheng, MO Xiaoqun, ZHANG Wenting, et al. Preparation of dietary fiber from sugarcane leaves by ultrasonic-assisted cellulase method and analysis of its physicochemical properties[J]. China Feed, 2022(22): 107−113.］
［19］王记莲, 章志栋, 申宏丹. 盐地碱蓬可溶性膳食纤维的提取工艺优化及其理化特性及抗氧化活性研究[J]. 食品科技, 2025, 50(1): 223−231. ［WANG Jilian, ZHANG Zhidong, SHEN Hongdan. Optimization of extraction process for soluble dietary fiber from suaeda salsa and study on its physicochemical properties and antioxidant activity[J]. Food Science and Technology, 2025, 50(1): 223−231.］
［20］胡荣锁, 周晶, 董文江, 等. 响应面法优化咖啡果皮可溶性膳食纤维提取工艺和功能特性研究[J]. 热带农业科学, 2015, 35(9): 66−72. ［HU Rongsuo, ZHOU Jing, DONG Wenjiang, et al. Optimization of extraction process for soluble dietary fiber from coffee peel using response surface methodology and study on its functional properties[J]. Tropical Agricultural Sciences, 2015, 35(9): 66−72.］
［21］令博. 葡萄皮渣膳食纤维的改性及其生理功能和应用研究[D]. 重庆: 西南大学, 2013. ［LING Bo. Study on the modification, physiological functions, and applications of dietary fiber from grape pomace[D]. Chongqing: Southwest University, 2013.］
［22］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. ［SHANG Xueyu, MEIHERIBAN, SU Ling, et al. Study on the functional properties and hypolipidemic activity of soluble dietary fiber from auricularia auricula[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(2): 112−121.］
［23］欧仕益, 郑妍, 刘子立, 等. 不同麦(麦夫)材料吸附脂肪和胆固醇的研究[C/OL]//第三届“益生菌、益生元与健康研讨会”. 2004: 27−29. ［OU Shiyi, ZHENG Yan, LIU Zili, et al. Study on the adsorption of fat and cholesterol by different wheat bran materials[C/OL]//The 3rd Symposium on Probiotics, Prebiotics, and Health. 2004: 27−29.］
［24］黄萍, 林亲录, 朱凤霞, 等. 米糠水溶性膳食纤维理化特性及抗氧化性[J]. 食品科学, 2017, 38(23): 14−19. ［HUANG Ping, LIN Qinlu, ZHU Fengxia, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of water-soluble dietary fiber from rice bran[J]. Food Science, 2017, 38(23): 14−19.］
［25］唐顺博, 涂宗财, 沙小梅, 等. 罗非鱼鳞胶原肽亚铁螯合物制备工艺优化及结构表征[J]. 食品与机械, 2020, 36(7): 155−160. ［TANG Shunbo, TU Zongcai, SHA Xiaomei, et al. Optimization of preparation process and structural characterization of ferrous chelates of collagen peptides from tilapia scales[J]. Food & Machinery, 2020, 36(7): 155−160.］
［26］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.
［27］于美汇, 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 Meihui, ZHAO Xin, YIN Hongli, et al. Hypolipidemic effects of *Auricularia auricula* polysaccharides extracted by alkaline solution and precipitated with ethanol *in vitro* and *in vivo*[J]. Food Science, 2017, 38(1): 232−237.］
［28］WU W, HU J, GAO H, et al. The potential cholesterol-lowering and prebiotic effects of bamboo shoot dietary fibers and their structural characteristics[J]. Food Chemistry, 2020, 332: 127372.
［29］YANG Z W, OUYANG K H, ZHAO J, et al. Structural characterization and hypolipidemic effect of *Cyclocarya paliurus* polysaccharide in rat[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 1073−1080.
［30］AL-REJAIE S S, ALEISA A M, SAYED-AHMED M M, et al. Protective effect of rutin on the antioxidant genes expression in hypercholestrolemic male westar rat[J]. BMC Complementary and Alternative Medicine, 2013, 13(1): 136.
［31］陈晟. 菊芋水溶性膳食纤维的制备、改性及降血脂效果研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016. ［CHEN Sheng. Study on the preparation, modification, and hypolipidemic effects of water-soluble dietary fiber from Jerusalem artichoke[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016.］
［32］Liver function tests and their interpretation[J]. Indian Journal of Pediatrics. 2007, 74(7): 663−671.
［33］SHAKEEL M, JABEEN F, QURESHI N A, et al. Toxic effects of titanium dioxide nanoparticles and titanium dioxide bulk salt in the liver and blood of Male sprague-dawley rats assessed by different assays[J]. Biological Trace Element Research, 2016, 173(2): 405−426.
［34］杨末. 绿豆皮可溶性膳食纤维的提取及其降血脂研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2019. ［YANG Mo. Extraction of soluble dietary fiber from mung bean hulls and its study on hypolipidemic effects[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2019.］