张惠, 张灵芝, 张鑫, 等. 基于网络药理学与分子对接研究不同药食同源植物提取液的降脂作用 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(11): 88−99. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040227
ZHANG Hui, ZHANG Lingzhi, ZHANG Xin, et al. Hypolipidemic Effects of Medicinal and Edible Plant Extracts Based on Network Pharmacology and Molecular Docking[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(11): 88−99. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040227

· 研究与探讨 ·

基于网络药理学与分子对接研究不同药食同源植物提取液的降脂作用

张　惠[1], 张灵芝[1], 张　鑫[2], 王远亮[1], 肖　愈[1,*], 孔文平[3,*]
（1.湖南农业大学食品科学技术学院, 湖南长沙 410128;
2.宁波大学食品科学与工程学院, 浙江宁波 315211;
3.赣南医科大学护理学院, 江西赣州 341000）

摘　要: 为研究不同药食同源植物活性成分含量及其降脂作用，该试验测定了八种不同药食同源植物（小米、薏仁、陈皮、山楂、荷叶、桑叶、决明子和人参）水提液的多个活性成分含量、抗氧化活性以及与脂代谢有关的功能指标，并对其进行聚类分析和主成分分析；进一步通过网络药理学和分子对接技术挖掘其多个降脂作用靶点及途径。结果表明，荷叶的黄酮、总酚含量最高，分别为（75.81±2.87）mg RE/g DW、（38.63±0.88）mg GAE/g DW；山楂的总糖含量最高，为（67.54±1.13）mg DE/g DW。此外，山楂对胰脂肪酶、α-淀粉酶、α-葡萄糖苷酶三种酶活表现出较强的抑制能力，分别为（1.59±0.04）μg Orlistat/g DW、（4.26±0.23）mg Acarbose/g DW、（87.46±0.97）μg Acarbose/g DW；同时对甘氨胆酸钠的结合能力和胆固醇吸附作用最好，分别为 59.24%、9.57 mg/g。网络药理学分析揭示，山楂、荷叶和薏仁的潜在降脂靶点主要集中在脂质与动脉粥样硬化、胰岛素抵抗等途径。分子对接模拟结果显示，关键活性成分（如豆甾醇、谷甾醇和芸香苷）与核心靶点（INS、ALB、IL-6 等）具有较高的结合亲和力。综上，山楂、荷叶和薏仁在降脂方面表现出良好的应用前景，为开发基于天然产物的降脂功能性食品提供了科学依据。

关键词: 药食同源, 活性成分, 降脂, 分子对接, 网络药理学分析
中图分类号: TS201.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)11−0088−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025040227
本文网刊:

Hypolipidemic Effects of Medicinal and Edible Plant Extracts Based on Network Pharmacology and Molecular Docking

ZHANG Hui[1], ZHANG Lingzhi[1], ZHANG Xin[2], WANG Yuanliang[1], XIAO Yu[1,*], KONG Wenping[3,*]
（1.College of Food Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2.College of Food Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
3.School of Nursing, Gannan Medical University, Ganzhou 341000, China）

Abstract: To investigate the active components and hypolipidemic effects of medicinal and edible plants, this study evaluated eight species (foxtail millet, coix seed, tangerine peel, hawthorn, lotus leaf, mulberry leaf, cassia seed, and ginseng) through quantitative analysis of bioactive compounds, antioxidant capacity, and lipid metabolism-related functional indices, followed by cluster analysis and principal component analysis. Network pharmacology and molecular docking were further employed to identify potential hypolipidemic targets and pathways. Results demonstrated that lotus leaf exhibited the highest flavonoid (75.81±2.87 mg RE/g DW) and total phenolic content (38.63±0.88 mg GAE/g DW), while hawthorn showed

收稿日期: 2025−04−18
基金项目: 湖南省教育厅科学研究重点项目（24A0158）; 江西省自然科学基金项目（20252BAC200576）。
作者简介: 张惠（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 药食同源, E-mail: 1395672051@qq.com。
*** 通信作者:** 肖愈（1989−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品微生物与发酵食品, 天然产物生物转化与活性评价, E-mail: yuxiao_89@163.com。
孔文平（1992−）, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 益生菌与药食同源产品开发, 天然产物生物合成与活性评价, E-mail: wpkong@yeah.net。

the highest total sugar content (67.54±1.13 mg DE/g DW). Notably, hawthorn displayed potent inhibitory effects on pancreatic lipase (1.59±0.04 μg Orlistat/g DW), α-amylase (4.26±0.23 mg Acarbose/g DW), and α-glucosidase (87.46±0.97 μg Acarbose/g DW), along with superior sodium glycocholate binding capacity (59.24%) and cholesterol adsorption (9.57 mg/g). Network pharmacology revealed that hawthorn, lotus leaf, and coix seed primarily targeted lipid metabolism and atherosclerosis pathways, particularly through insulin resistance regulation. Molecular docking simulations revealed that key bioactive compounds (including stigmasterol, sitosterol, and rutin) exhibited strong binding affinities with core targets (INS, ALB, IL-6, etc.). These findings highlight hawthorn, lotus leaf, and coix seed as promising candidates for developing natural hypolipidemic functional foods, supported by multi-omics evidence.

Key words: medicine food homology; active ingredient; lipid-lowering; molecular docking; network pharmacology analysis

高脂血症(hyperlipidemia)是一种以血液脂蛋白代谢异常为主要特征的慢性代谢性疾病，临床上也称为血脂异常[1]。该疾病的典型生化特征表现为甘油三酯(TG)、总胆固醇(TC)和低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)水平升高，同时伴有高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)水平下降，这种改变显著增加心血管疾病、肥胖等代谢性共病的发生风险，因此高脂血症在临床上常表现出多病并发的特点[2]。然而，目前临床上用于治疗高脂血症的药物大部分为化学合成药物，长期使用存在明显的局限性，不仅容易产生一定的依赖性，难以有效控制高血脂引发的并发症，还可能导致严重的副作用[3]，如引发肝功能损伤、肌肉毒性等不良反应[4]，部分患者甚至出现血糖代谢异常等新的代谢紊乱。鉴于现有疗法的上述缺陷，促使研究者将目光转向“药性平和、毒副作用小”的药食同源植物。现代药理研究证实，多种药食同源植物(如山楂 *Crataegus pinnatifida*、荷叶 *Nelumbo nucifera*、桑叶 *Morus alba* 等)富含黄酮类、多糖类及多酚类活性成分，这些成分可通过多靶点、多途径发挥降脂作用，具有一定的研究意义[5−7]。

近年来，关于高脂血症的天然药物研究取得显著进展。研究表明，天然药食同源植物可通过多靶点、多通路发挥降脂作用，具体机制包括抑制外源性糖脂吸收、促进脂质代谢、改善胰岛素抵抗以及抗氧化等[8]。其中含有的多种活性成分具有抗氧化、调节血脂的功能，如黄酮类有效成分可能通过调节肠道微生物、改善肝功能，调控 JAK2/STAT3 等信号通路及 PPAR-α 等关键因子表达，减少脂肪合成[9]；多糖类成分可调控脂质的合成分解、抑制脂质的易位堆积、减少氧化应激和炎症损伤等方面[10]；多酚类活性成分则可以通过干预脂肪代谢和脂肪细胞分化等多途径减少脂肪沉积。周其其等[11]研究山楂叶中的黄酮物质对高脂血症肾损伤大鼠的保护作用，证明了山楂中的黄酮类化合物(如金丝桃苷、槲皮素等)能显著抑制磷酸化 ACC 的表达以提高脂肪酸的氧化。王韬等[12]通过研究薏苡仁油对小鼠肠道菌群及炎症因子的影响，证明了薏仁中的多糖成分则可以通过调节肠道菌群组成而影响胆汁酸代谢。Kim 等[13]证明了荷叶水提物能通过促进甘油三酯分解为游离脂肪酸和甘油来抑制高脂饮食小鼠的脂肪蓄积，同时促进脂肪分解以降低脂肪合成。尽管上述研究揭示了单一成分的作用机制，但不同药食同源植物的系统性降脂效能比较及其作用机制研究仍显不足。

因此，本研究选取八种不同药食同源植物(山楂、陈皮、荷叶、决明子、薏仁、小米、桑叶和人参)，通过测定其水提液中活性成分(黄酮、总酚、总糖)含量，体外抗氧化能力以及体外降脂能力，系统比较八种水提液的体外降脂作用。进一步结合网络药理学分析，基于筛选出的降脂活性显著的山楂、荷叶和薏仁水提液，通过多数据库挖掘其活性成分及作用靶点，构建 PPI 互作网络并进行 GO 功能与 KEGG 通路富集分析，系统预测其主要降脂作用机制。此外，采用分子对接技术模拟核心活性成分与关键靶点的结合模式，评估其相互作用潜力。本研究为开发具有降脂功效的功能性食品提供一定的理论依据与试验基础，同时为传统药食同源植物的现代化开发利用提供科学参考。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

八种药食同源材料(薏仁、小米、陈皮、山楂、荷叶、桑叶、决明子、人参)　均来自于湖南润天药业股份有限公司；α-淀粉酶(3700 U·g^{-1})　索莱宝科技有限公司；4-硝基苯基 α-D-吡喃葡萄糖苷(PNPG)、胰脂肪酶(30000 U·g^{-1})、奥利司他(Orlistat)、人工肠液、人工胃液　上海源叶生物科技有限公司；α-葡萄糖苷酶(≥10 U/mg)、胆固醇酯酶(67.9 U·mg^{-1})、棕榈酸对硝基苯酯(PNPP)、阿卡波糖水合物、4-硝基苯基丁酸酯　上海麦克林生化科技有限公司；新鲜鸡蛋　联华超市；其余所用试剂　均来自国药集团化学试剂有限公司。

ABP00251 全波长酶标仪　上海旦鼎国际贸易有限公司、XMTD-7000 电热恒温水浴锅　天津市泰斯特仪器有限公司、3-18R 高速冷冻离心机　美国贝克曼公司；RS-FS1406 磨粉机　荣事达有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品处理　将八种药食同源材料用磨粉机粉碎，装入自封袋中。分别称取 1 g 粉末，添加超纯水(水∶样品=40∶1, v/w)于 95 ℃ 水浴锅中热提取 30 min，其中每隔 5 min 振荡一次。冷却后 10000 r/min 离心 15 min，取上清液，定容到 50 mL，避光保藏放在 4 ℃ 冰箱中。

1.2.2 活性成分测定

1.2.2.1 总黄酮含量的测定 参照文献方法[14]并加以改进,精密吸取不同样品的水提液,采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法测定样品中总黄酮含量,于相同条件下测定不同浓度(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL)的芦丁标准溶液的吸光度,制作标准曲线,其方程为 y=0.9207x+0.0002(R^2=0.9995)。样品吸光度值代入标准曲线计算,最终结果以每克样品中含有的芦丁当量表示。

1.2.2.2 总酚含量的测定 基于文献方法[15]进行改进,精密吸取不同样品的水提液,采用福林酚比色法测定样品总酚含量,于相同条件下测定不同浓度(0、10、50、80、100、120、150 μg/mL)的没食子酸标准溶液的吸光度,制作标准曲线,其方程为 y=0.003x−0.0012(R^2=0.9941)。样品吸光度值代入标准曲线计算,最终结果以每克样品中含有的没食子酸当量表示。

1.2.2.3 总糖含量测定 参照文献方法[16]并加以改进,同时精密吸取不同浓度(0、5、10、20、30、40、50 μg/mL)葡萄糖标准溶液,按照苯酚-硫酸法反应条件于 490 nm 处测定吸光度,并制作标准曲线,其方程为 y=0.0092x+0.0003(R^2=0.9988)。于相同条件下测定不同样品吸光度,样品吸光度值代入标准曲线计算,最终结果以每克样品中含有的葡萄糖当量表示。

1.2.3 抗氧化活性测定

1.2.3.1 DPPH 自由基清除能力测定 根据文献方法[17]修改并测定,吸取 0.2 mL 样品溶液和浓度为 0.4 mmol/L 的 DPPH 甲醇溶液各 0.5 mL,旋涡振荡混匀;避光反应 30 min 后于 517 nm 处测定吸光度值。绘制维生素 C(0、2.5、10、12、18、25 μg/mL)标准曲线,其方程为 y=0.0151x−0.0156(R^2=0.9936),结果以每克样品中含有的维生素 C 当量表示。

1.2.3.2 $ABTS^+$自由基清除能力测定 根据文献方法[17]修改并测定,分别取 0.2 mL 样品溶液加入 2 mL 离心管;然后取 0.8 mL ABTS 工作液加入 2 mL 离心管中,混匀于室温下反应 6 min;于 734 nm 处测定吸光度值。使用不同浓度的维生素 C 标准溶液(0、2.5、5、10、12、15、25、30 μg/mL)绘制标准曲线,其方程为 y=0.0165x+0.0049(R^2=0.9973),结果以每克样品中含有的维生素 C 当量表示。

1.2.3.3 羟基自由基清除能力测定 根据文献方法[17]修改并测定,分别取 1 mL 试样溶液与 1 mL 浓度为 9 mmol/L 的硫酸亚铁溶液混合后,加入 1 mL 8.8 mmol/L 的 H_2O_2 溶液和 1 mL 9 mmol/L 的水杨酸-乙醇混合液并充分混匀。将反应体系置于 37 ℃恒温水浴中反应 60 min 后,使用分光光度计在 510 nm 波长处测定吸光度值。使用不同浓度的维生素 C 标准溶液(0、0.5、2、2.5、3、3.5、4 mg/mL)绘制标准曲线,其方程为 y=0.3335x−0.0409(R^2=0.9933),结果以每克样品中含有的维生素 C 当量表示。

1.2.3.4 铁离子还原能力测定 根据文献方法[17]修改并测定,分别取样品溶液 0.2 mL,加入 1 mL 的 FRAP 溶液,在 37 ℃下放置 20 min,于 593 nm 处测定吸光度值。使用不同浓度 $FeSO_4$ 标准溶液(0、50、100、200、400、500、600、800、1000 μmol/L)绘制标准曲线,其方程为 y=0.0023x+0.0087(R^2=0.9982),结果以每克样品中含有的 Fe(Ⅱ)当量表示。

1.2.3.5 还原力测定 根据文献方法[18]修改并测定,取 0.5 mL 待测样品,依次加入 2.5 mL pH6.6 的 0.2 mol/L 磷酸盐缓冲液和 10 mg/mL $K_3[Fe(CN)_6]$ 溶液,混匀后于 50 ℃水浴反应 20 min。随后加入 2.5 mL 的 100 mg/mL 三氯乙酸溶液,充分振荡混匀后以 2000 r/min 离心 10 min。吸取 2.5 mL 离心上清液,加入 0.5 mL 1 mg/mL $FeCl_3$ 溶液,静置反应 10 min 后在 700 nm 波长处测定吸光值。使用不同浓度的维生素 C 标准溶液(0、2.5、5、10、20、25、80、100 μg/mL)绘制标准曲线,其方程为 y=0.0061x+0.0083(R^2=0.9992),结果以每克样品中含有的维生素 C 当量表示。

1.2.4 不同糖脂代谢酶抑制能力

1.2.4.1 胰脂肪酶抑制能力测定 根据文献方法[19]修改并测定,按以下反应体系在 96 孔板中操作。首先取 30 μL Tris-HCl 缓冲液(50 mmol/L, pH8.0),加入 50 μL 胰脂肪酶溶液(1 mg/mL)和 20 μL 待测样品溶液,充分混匀后于 37 ℃恒温孵育 10 min。随后依次加入 100 μL PNPP 底物溶液(1 mmol/L)继续 37 ℃反应 15 min,然后测定各孔在 405 nm 波长下的吸光度。以奥利司他为阳性对照(0、0.000125、0.0025、0.005、0.02、0.04、0.06、0.08 μg/mL),并绘制奥利司他标准曲线,其方程为 y=8.6995x+0.1801(R^2=0.9912),最终结果以每克样品中含有的奥利司他当量表示。根据式(1)计算胰脂肪酶抑制率:

$$X(\%) = \left(1 - \frac{B - B_0}{A - A_0}\right) \times 100 \quad \text{式(1)}$$

式中:X:胰脂肪酶抑制率 %;B:样品组的吸光度;B_0:阴性对照组的吸光度(不加酶);A:未添加待测样品组的吸光度;A_0:为 A 的空白对照组(不加酶)的吸光度。

1.2.4.2 α-葡萄糖苷酶抑制能力测定 根据文献方法[19]修改并测定,按以下反应体系进行,依次加入 PBS(20 mmol/L pH6.9)、α-葡萄糖苷酶溶液(1 U/mL)和待测样品,混匀,37 ℃恒温 10 min;加入对硝基苯基-α-D-吡喃葡萄糖苷溶液(2.5 mmol/L)并混匀,37 ℃恒温反应 15 min;加入 Na_2CO_3(0.2 mol/L)溶液后混匀,在 405 nm 波长下测定各孔吸光度。以阿卡波糖作阳性对照(0、0.005、0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 μg/mL)并绘制阿卡波糖标准曲线,其方程为 y=7.2341x+0.1602(R^2=0.9924),最终结果以每克样

品中含有的阿卡波糖当量表示。计算公式见式(2)：

$$Y(\%) = \left(1 - \frac{A_1 - A_0}{A}\right) \times 100 \qquad 式（2）$$

式中：Y：α-葡萄糖苷酶抑制率 %；A_1：样品组的吸光度；A_0：阴性对照组的吸光度(不加酶)；A：未添加待测样品组的吸光度。

1.2.4.3　α-淀粉酶抑制能力测定　根据文献方法[20]修改并测定，按以下反应体系进行，在 1.5 mL 离心管中依次加入 PBS(20 mmol/L pH6.9)、α-淀粉酶溶液(0.2 U/mL)和样品溶液，混匀，37 ℃ 反应 5 min；加入淀粉溶液(质量分数为 1%)混匀，37 ℃ 恒温反应 10 min；再加入 DNS 溶液后混匀，在 37 ℃ 恒温反应 5 min 后，立即沸水浴 5 min，然后迅速冰水浴迅速冷却。最后加入 400 μL 蒸馏水稀释后，在 540 nm 波长下测定各孔吸光度。以阿卡波糖作阳性对照(0、0.01、0.02、0.06、0.08、0.1、0.14 mg/mL)并绘制阿卡波糖标准曲线，其方程为 y=0.0041x+0.1021(R^2=0.9913)，最终结果以每克样品中含有的阿卡波糖当量表示。计算公式同式(2)。

1.2.5　胆固醇酯酶抑制能力测定　根据文献方法[15]修改并测定，按以下反应体系进行，取 1 mL(0.1 mol/L，pH7.0)缓冲液，80 μL 酶液(100 U、7.2 U/mL)，200 μL 样品溶液和 20 μL 4 mmol/L 底物 4-硝基苯基丁酸酯于离心管中，混匀，25 ℃ 反应 0.5 h，于波长 405 nm 处测吸光度，以奥利司他作阳性对照(0、0.08、0.32、0.48、0.64、0.8 μg/mL)，测定各孔在 405 nm 波长下的吸光度，并绘制奥利司他标准曲线，其方程为 y=1.1196x−0.0335(R^2=0.9903)，最终结果以每克样品中含有的奥利司他当量表示。计算公式同式(1)。

1.2.6　胆酸盐结合能力测定　根据文献方法[21]修改并测定，准确量取 1 mL 待测样品(10 mg/mL)置于 10 mL 离心管中，加入 1 mL 模拟胃液，37 ℃ 恒温振荡消化 1 h；用 0.1 mol/L 氢氧化钠溶液调 pH 至 6.3 后，加入 4 mL 模拟肠液，37 ℃ 恒温振荡反应 1 h；随后分别加入 4 mL 甘氨胆酸盐与牛磺胆酸盐溶液(0.5 mmol/L)，37 ℃ 恒温振荡反应 1 h；以 4000 r/min 的转速离心 20 min 后，准确移取 2 mL 上清液备用；加入 6 mL 60% 浓硫酸溶液，70 ℃ 水浴加热 20 min，冷却至室温；于 387 nm 处测定吸光度值。并绘制标准曲线(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mmol/L)，甘氨胆酸盐标准曲线方程为 y=0.4206x+0.0235(R^2=0.9902)、牛磺胆酸盐标准曲线方程为 y=0.3758x+0.021(R^2=0.9905)。按公式(3)计算实际胆酸盐结合能力。

$$A = A_0 - (A_2 - A_1) \qquad 式（3）$$

式中：A_0：以 PBS 代替样品的吸光度值；A_1：以 PBS 代替胆酸盐溶液的吸光度值；A_2：样品管的吸光度值。

1.2.7　胆固醇吸附能力测定　根据文献方法[22]修改并测定，将新鲜蛋黄与 9 倍体积蒸馏水混合均匀后，准确称取 25 g 稀释蛋黄液置于 100 mL 锥形瓶，加入 1 g 待测样品溶液，调节 pH 至 7.0 后置于 37 ℃ 恒温振荡器中以 120 r/min 振荡反应 2 h。反应结束后吸取 0.4 mL 上清液，采用邻苯二甲醛法，于 550 nm 波长下测定吸光度，并绘制标准曲线(0、0.1、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 mg/mL)，标准曲线方程为 y=2.7311x+0.0209(R^2=0.9954)，代入公式(4)计算。

$$B = \frac{m_1 - m_2}{M} \qquad 式（4）$$

式中：m_1：吸附前胆固醇含量(mg)，m_2：吸附后胆固醇含量(mg)，M：样品质量(g)。

1.2.8　网络药理学分析

1.2.8.1　主要活性成分筛选及靶点筛选　通过 ETCM(http://www.tcmip.cn/)、TCMSP(http://lsp.Nwu.Edu.cn/tcmsp.php)、SwissTargetPrediction(http://www.swisstargetprediction.ch/)数据库搜索主要活性成分及其对应靶点，舍弃重复项，筛选后得到关键靶点，通过 UniProt 等数据库转换，即得其对应靶点基因名称[23]。

1.2.8.2　疾病靶点筛选　疾病靶点基因的筛选基于 GeneCards(https://www.genecards.org/)、DISGENET(https://disgenet.com/)和 OMIM 数据库(https://www.omim.org/)，输入关键词，检索并搜集有关靶点，对结果汇总后删除重复基因，即得有关基因。

1.2.8.3　核心靶点筛选及蛋白靶点相互作用(PPI)网络的构建　将数据导入 STRING(https://stringdb-orgs.libproxy.xmu.edu.cn:443)分析后得到交集靶点，利用 Cytoscape3.9.1 构建山楂、薏苡仁、荷叶与疾病的共同靶蛋白的蛋白质相互作用(PPI)网络，并进行分析。

1.2.8.4　基因本体(Gene Ontology, GO)功能和京都基因与基因组百科全书(Kyoto Encyclopedia of Genes and Genomes, KEGG)通路富集分析　运用 DAVID 在线分析平台(https://david.ncifcrf.gov/)对关键作用靶点开展 KEGG 通路富集研究和 GO 功能分析，从分子通路和生物学功能两个层面阐释其可能的降血糖调血脂作用机理。采用 KEGG 通路散点图和 GO 富集散点图对分析数据进行可视化展示。

1.2.9　分子对接　基于 PPI 网络中 MCC 算法的拓扑分析结果，选取网络中心度排名前五的核心靶点及与节点度最高的三种活性化合物开展分子对接研究。从 PubChem(https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/)化学数据库中下载所筛选化合物的三维结构信息：豆甾醇(Stigmasterol, PubChem ID：5280794)、谷甾醇(Sitosterol, PubChem ID：222284)和芸香苷(Rutin, PubChem ID：5280805)，关键靶点蛋白分别为胰岛素(INS, PDB ID：1mso)、白蛋白(ALB, PDB ID：1n5u)、白细胞介素-6(IL6, PDB ID：5gw9)、肿瘤坏死因子

(TNF, PDB ID:6q00)和蛋白激酶 B1(AKT1, PDB ID: 7myx),其晶体结构从 RCSB PDB 数据库(https://www.rcsb.org/)获取。并通过 PDB 蛋白质数据库下载关键靶点蛋白的晶体结构文件,然后经过 Pymol 4.60 对蛋白结构进行去除水分子、提取配体处理后,采用 AutoDock1.5.6 软件加氢处理并对配体与受体进行分子对接模拟,以结合自由能为评价指标,分析其相互作用能[24]。

1.3 数据处理

所有试验均进行 3 次独立重复测定,数据以均值±标准差(mean±SD)表示。采用 SPSS 20.0 软件对数据进行统计分析,组间比较采用单因素方差分析(ANOVA)及 LSD 事后检验。显著性水平设为 $P<0.05$。数据可视化用 Origin 2021 与 SPSS 20.0 完成。

2 结果与分析

2.1 活性成分分析

图 1 为不同植物水提液的活性成分含量,如图 1a~图 1c 所示,不同样品间的三种活性成分含量均存在显著差异($P<0.05$)。其中,荷叶提取物含有最高的总黄酮(75.81±2.87 mg RE/g DW)和总酚含量(38.63±0.88 mg GAE/g DW)。已有研究表明,荷叶富含黄酮类物质(如槲皮素、芦丁等),而槲皮素类黄酮化合物具有改善高脂饮食诱导的肥胖、减少脂质沉积的作用[25]。山楂中的总黄酮、总酚含量次之,分别为(44.31±3.2)mg RE/g DW、(25.08±1.07)mg GAE/g DW。山楂中的黄酮类活性成分主要来源于金丝桃苷、原花青素等物质,李贵海等[26]研究表明,金丝桃苷组分一定调节血脂和胆固醇代谢的功效,这为山楂的降脂功效提供了理论依据。相比之下,小米、薏仁和人参样品中的总黄酮和总酚含量显著低于荷叶($P<0.05$)。其中人参中总黄酮为(0.93±0.03)mg RE/g DW,小米总酚为(0.58±0.09)mg GAE/g DW。由图 1c 则可知,山楂的总糖含量最高,为(67.54±1.13)mg DE/g DW,而人参的总糖含量最低,为(15.15±0.38)mg DE/g DW。

2.2 抗氧化能力分析

不同提取液的体外抗氧化能力如图 2 所示,由图可知,8 种不同水提取液在 5 种抗氧化能力测定结果中均表现出显著性差异($P<0.05$)。其中,荷叶和山楂水提液的综合抗氧化能力最强。荷叶水提液对 $ABTS^{+}$和羟基自由基的清除能力最高,分别为(29.30±0.37)mg VCE/g DW 和(78.70±2.25)mg VCE/g DW。山楂水提液的 DPPH 自由基清除能力(53.55±0.11)mg VCE/g DW、铁离子还原能力(68.73±0.96)mg $FeSO_4$/g DW 及还原潜力(42.08±0.71)mg VCE/g DW 最强。有研究表明,植物中的多酚和黄酮含量与其抗氧化活性呈正相关[8],因此黄酮和总酚含量较高的荷叶与山楂水提液表现出更强的抗氧化能力。

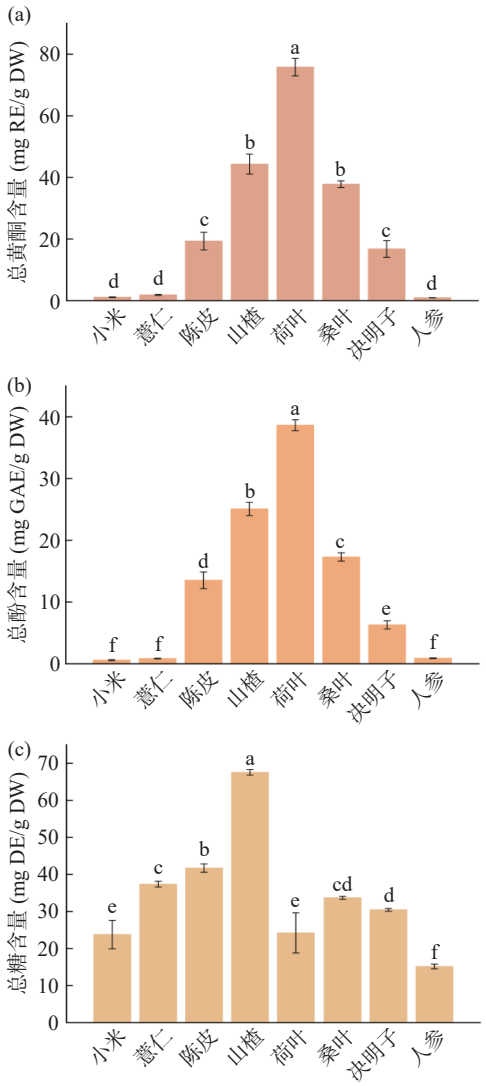


图 1 不同水提液活性成分含量

Fig.1 Contents of active ingredients in different water extracts

注:(a)总黄酮含量;(b)总酚含量;(c)总糖含量;不同小写字母表示组间差异显著($P<0.05$),图 2~图 5 同。

2.3 糖脂代谢酶活抑制能力分析

图 3 为不同水提取液对不同糖脂代谢酶酶活抑制能力结果,由图可知,8 种不同水提液对三种糖脂代谢酶酶活抑制能力存在显著性差异($P<0.05$)。其中,胰脂肪酶作为脂肪分解的关键酶,其主要功能体现在促进甘油三酯分解为甘油和游离脂肪酸[27];在糖代谢方面,α-葡萄糖苷酶直接影响肠道葡萄糖吸收效率[28],而 α-淀粉酶则是淀粉转化为葡萄糖过程中的限速酶。这三种酶的活性抑制程度与糖脂代谢调控密切相关,特别是胰脂肪酶活性的抑制对于高脂血症等代谢性疾病的防治具有重要价值。由图 3 可知,山楂水提液表现出最强的胰脂肪酶酶活抑制能力(1.59±0.04 μg Orlistat/g DW),荷叶提取液次之(1.45±0.12 μg Orlistat/g DW),这可能归因于两者富含的黄酮及多酚类活性成分[29]。在 α-葡萄糖苷酶活性抑制方面,山楂(87.46±0.97 μg Acarbose/g DW)和荷叶(41.18±1.38 μg Acarbose/g DW)水提液抑制能力与其余 6 组相比同样显著($P<0.05$)。文献指出,山楂中

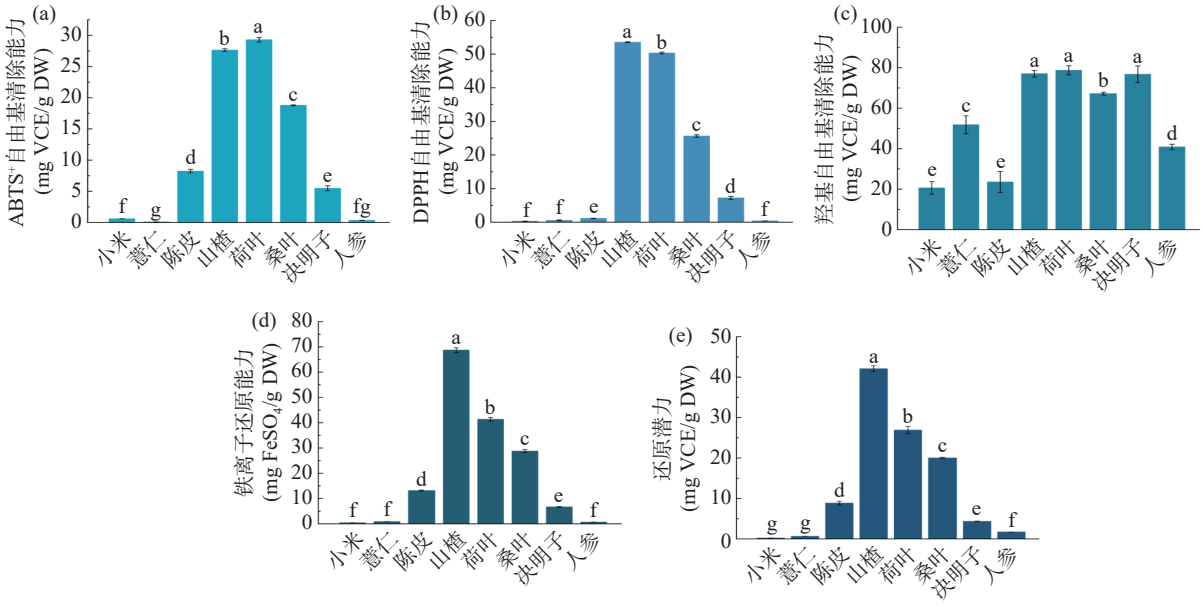


图 2　不同水提液的抗氧化能力

Fig.2　Antioxidant capacity of different water extracts

注：(a)ABTS⁺自由基清除能力；(b)DPPH 自由基清除能力；(c)羟基自由基清除能力；(d)铁离子还原能力；(e)还原潜力。

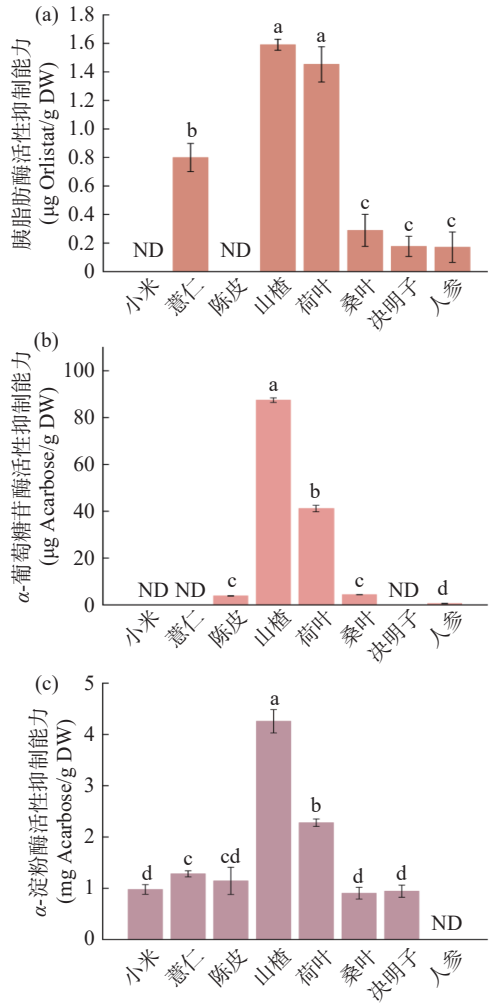


图 3　不同水提液对糖脂消化酶活性抑制效果

Fig.3　Inhibition ability of different extracts on pancreatic lipase activity

注：(a)胰脂肪酶活性抑制能力；(b)α-葡萄糖苷酶活性抑制能力；(c)α-淀粉酶活性抑制能力；ND：未检测到。

的槲皮素、熊果酸等黄酮成分通过非竞争性抑制机制作用于 α-葡萄糖苷酶，而荷叶中的生物碱类物质也显示出显著的酶抑制活性[30−31]。此外，在 α-淀粉酶抑制试验中，山楂水提液相较于其余 7 组也表现出显著抑制活性(4.26±0.23 mg Acarbose/g DW)，这一结果与陶益等[32] 报道的山楂黄酮类物质对 α-淀粉酶的抑制作用相吻合。荷叶水提液同样显示出明显的抑制效果(2.28±0.07 mg Acarbose/g DW)。

2.4　胆固醇酯酶活性抑制效果

如图 4 所示，八种水提液对胆固醇酯酶活性均表现出不同程度的抑制作用(P<0.05)。作为脂质代谢的关键酶，胆固醇酯酶参与胆固醇酯和甘油三酯的水解过程[33]。因此说明，水提取液可以通过抑制该酶活性，减少肠道对膳食胆固醇的吸收，从而发挥调节血脂的潜在功效。结果显示，薏仁水提液对胆固醇酯酶的抑制能力最强，为(26.72±0.82) μg Orlistat/g DW。研究表明，薏苡仁奶可以降低小鼠体内低密度脂蛋白胆固醇的水平[34]，结合此试验结果，推测薏仁

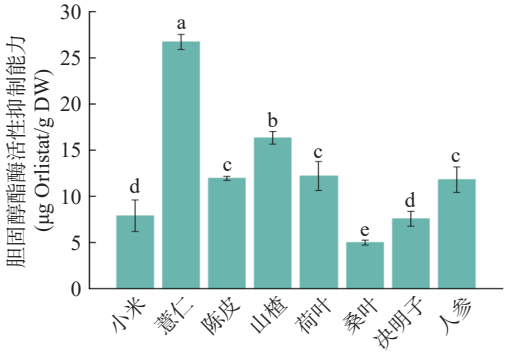


图 4　不同水提液对胆固醇酯酶活性抑制能力

Fig.4　Inhibition ability of different water extracts on cholesterol esterase activity

降低胆固醇的作用途径可能与抑制胆固醇酯酶活性有关。相比之下，桑叶提取液对胆固醇酯酶的抑制活性最低，为(4.99±0.27)μg Orlistat/g DW，薏仁抑制效果约为其 5.4 倍。因此，可以考虑利用薏仁对胆固醇酯酶活性的抑制作用来降血脂。

2.5 胆酸盐结合能力分析

表 1 为不同水提取液对胆酸盐结合能力结果。人体中肝脏胆汁酸常以钠盐或钾盐的形式存在，并与甘氨酸或牛磺酸结合，形成甘氨胆酸钠和牛磺胆酸钠两种结合型胆酸盐[35]。这些胆酸盐有助于小肠对脂肪的吸收和胆固醇的降解，因此胆酸盐结合能力可作为评价降血脂功效的重要指标。由表 1 可知，这八种水提取液对两种胆酸盐均有一定的结合能力，表明它们均可促使胆酸盐排出体外从而加速胆固醇的排泄代谢，发挥降脂作用。山楂、荷叶水提液分别对甘氨胆酸钠和牛磺胆酸钠的结合能力最强。有研究表明，荷叶中黄酮类成分可通过增强胆酸盐结合能力发挥降脂作用[36]。本研究结果进一步验证了这一结论，并为山楂和荷叶的降脂功效提供了新的试验证据。

2.6 胆固醇吸附能力分析

图 5 为不同水提取液的胆固醇吸附能力结果。机体内胆固醇含量过高，会增加高血脂、心血管等疾病的风险[37]，因此有效降低胆固醇含量，可以减少人体患病的风险。由图 5 可知，八种不同样品均对胆固醇有不同程度的吸附能力。其中，山楂对胆固醇吸附能力最高，为 9.57 mg/g，其次为荷叶，为 9.21 mg/g，吸附能力最小的为陈皮，为 2.84 mg/g，并且山楂的吸附能力为陈皮的 3.37 倍，样品间表现出显著差异(P<0.05)。进一步结合胆固醇酯酶活性抑制能力、胆酸盐结合能力两个指标可知，山楂、荷叶水提取液在这三个评价指标中均表现出优异的降胆固醇效果。其作用机制可能包括：直接吸附消化道中的胆固醇；抑制胆固醇酯酶的活性；促进胆酸盐的排泄[38]。这种多靶点的协同作用使得山楂和荷叶在调节胆固醇代谢方面表现出显著优势。

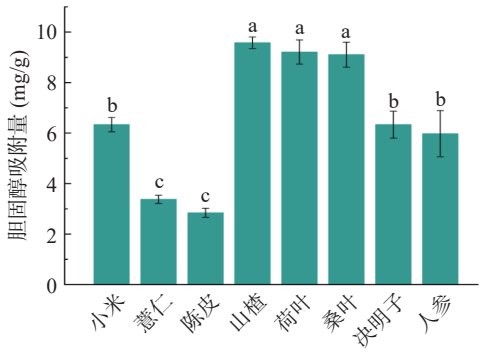


图 5 不同水提取液对胆固醇吸附能力

Fig.5 Cholesterol adsorption capacity of different water extracts

2.7 不同水提液活性成分与功能之间的主成分分析与聚类分析

基于以上试验结果构建 PCA 图进行数据可视化。如图 6a 所示，PCA 分析有效区分了八种植物提取液样品，两个主成分累计贡献率达 83.6%，充分反映了样本间的主要差异。空间分布显示，荷叶、山楂位于评分图右侧区域，桑叶位于中间区域，其余样品(小米、陈皮、薏仁、决明子、人参)集中分布于左侧象限。载荷分析(图 6b)进一步揭示了影响样本分异的关键变量，反映了影响不同样品的活性成分含量和各种功能指标间的分布情况。由图可知，除胆固醇酯酶活性抑制能力和总糖活性成分含量外，绝大多数活性成分(总黄酮、总酚)和功能指标(胰脂肪酶抑制、

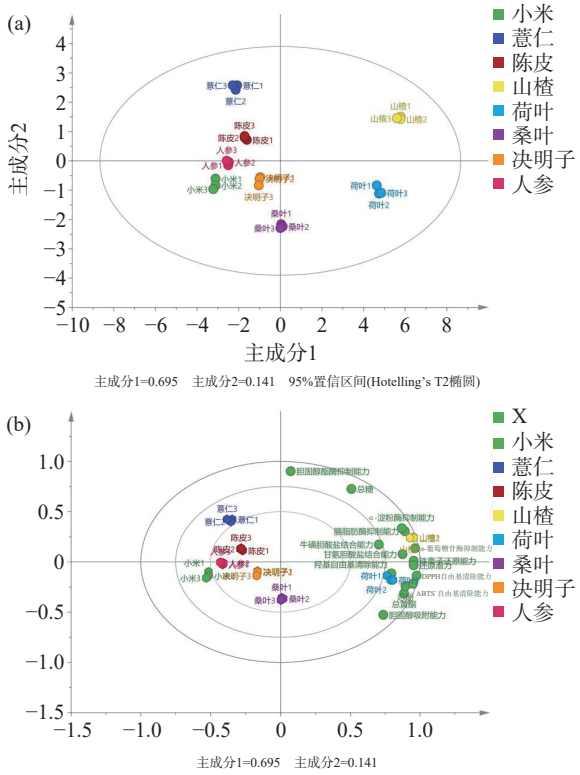


图 6 不同水提取液主成分、载荷分析图

Fig.6 Principal component and load analysis diagram of different water extracts

注：(a)主成分图；(b)载荷图，X：图中所有变量指标。

表 1 不同水提取液对胆酸盐结合能力

Table 1 Cholate binding ability of different water extracts

胆酸盐	胆酸盐相对结合量(μmol/10 mg)							
	小米	薏仁	陈皮	山楂	荷叶	桑叶	决明子	人参
甘氨胆酸钠	13.59±0.36^{f}	15.41±0.24^{e}	27.3±0.86^{c}	59.24±0.36^{a}	58.77±1.07^{a}	13.99±0.71^{ef}	42.44±0.85^{b}	18.9±0.6^{d}
牛磺胆酸钠	15.26±0.31^{g}	20.4±0.93^{f}	22.8±0.92^{e}	39.65±0.53^{b}	45.68±0.67^{a}	9.14±1.87^{h}	35.13±0.46^{c}	27.32±2.17^{d}

注：同一行不同小写字母表示组间差异显著(P<0.05)。

α-葡萄糖苷酶抑制等）的载荷向量均与山楂、荷叶的投影位置紧密关联。这一发现从统计学角度解释了二者降脂作用相似性的基础。

对这八种样品进行聚类分析，如图 7 所示，当类间距离为 3 时，可以将八种样品分为三类，一类为山楂、荷叶；一类为桑叶，另一类为小米、陈皮、薏仁、决明子和人参，这与主成分分析结果相符合。综上，山楂和荷叶在活性成分含量与功能特性上呈现明显的聚类特征，表明二者在调节脂代谢能力方面可能具有相似性，桑叶和薏仁呈现出较独特的活性特征；而其他四种样品在活性成分和功能上具有较高相似性。以上分析为后续功能产品开发的原料筛选或者复配提供了一定科学依据，特别是验证了山楂和荷叶作为核心原料的优越性。

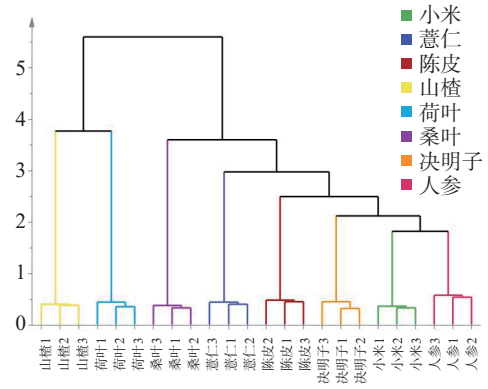


图 7　不同水提取液聚类分析

Fig.7　Hierarchical cluster of different water extracts

2.8　网络药理学分析

2.8.1　靶点筛选　基于上述试验结果，综合各项功能指标表明山楂、荷叶在降脂方面具有显著潜力，薏仁在抑制胆固醇酯酶方面表现出较好的降胆固醇作用。因此，选择山楂、荷叶和薏仁三种物质，利用网络药理学分析继续进一步分析其降脂机制。首先通过 GeneCards、OMIM 数据库，以高血脂为关键词进行搜索，整理后共得到 2106 个疾病靶点。然后通过 TCMSP 和 SwissTargetPrediction 数据库搜索山楂、薏仁、荷叶的靶点，整理后得到 1304 个药物靶点。将以上药物靶点和疾病靶点求交集得到交集靶点 218 个（图 8）。

2.8.2　PPI 网络分析　通过 STRING 数据库构建 218 个降脂潜在靶点的 PPI 网络，并利用 MCC 算法筛选出核心靶点 INS（胰岛素）、ALB（白蛋白）和 IL-6（白细胞介素-6）（图 9）。这些靶点在度值、介数、接近中心性等拓扑参数中显著突出，表明其在网络中的核心地位。INS 通过调控脂质合成与能量代谢参与降脂作用；ALB 作为脂质运输的关键载体；IL-6 则介导炎症反应与代谢紊乱[39−41]。三者与其他靶点广泛互作，形成覆盖脂代谢、炎症及胰岛素信号通路的协同网络，提示山楂、薏仁、荷叶可能通过多靶点调控机制，如改善脂代谢紊乱、抑制炎症等协同发挥降脂

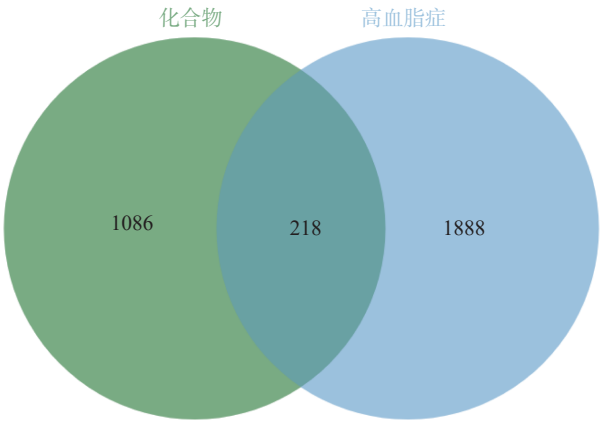


图 8　交集靶点韦恩图

Fig.8　Venn diagram of intersecting targets

注：绿色为药物靶点数，蓝色为疾病靶点数。

效应。为阐释山楂、薏苡仁、荷叶逆转高血脂症的分子机制提供了重要的理论依据，并为后续深入研究和临床应用奠定了基础。

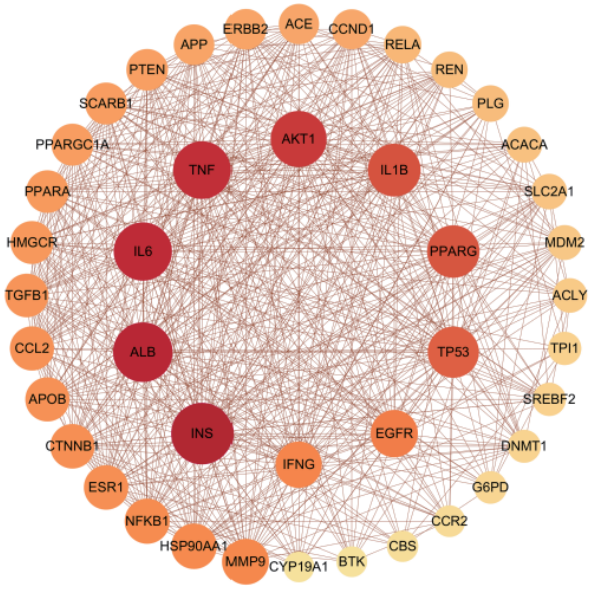


图 9　药物成分-疾病-核心靶点图

Fig.9　Drug component-disease-core target network

2.8.3　GO 功能与 KEGG 通路富集分析　经 GO 富集分析共获得 806 条 GO 富集分析条目，其中包含 572 个生物过程（BP）、78 个细胞组分（CC）和 156 个分子功能（MF）。选取各富集过程的前 10 个条目进行可视化分析（图 10a）。BP 富集分析结果显示，主要条目涉及对异生物质刺激的反应（response to xenobiotic stimulus）、基因表达的正负调控（positive/negative regulation of gene expression）等；CC 富集分析结果主要涉及细胞外空间（extracellular space）、细胞外分泌体（extracellular exosome）等；MF 富集分析结果主要涉及酶结合（enzyme binding）、氧化还原酶活性（oxidoreductase activity）、蛋白质同源二聚化活性（protein homodimerization activity）、相同蛋白质结合（identical protein binding）、染色质结合（chromatin

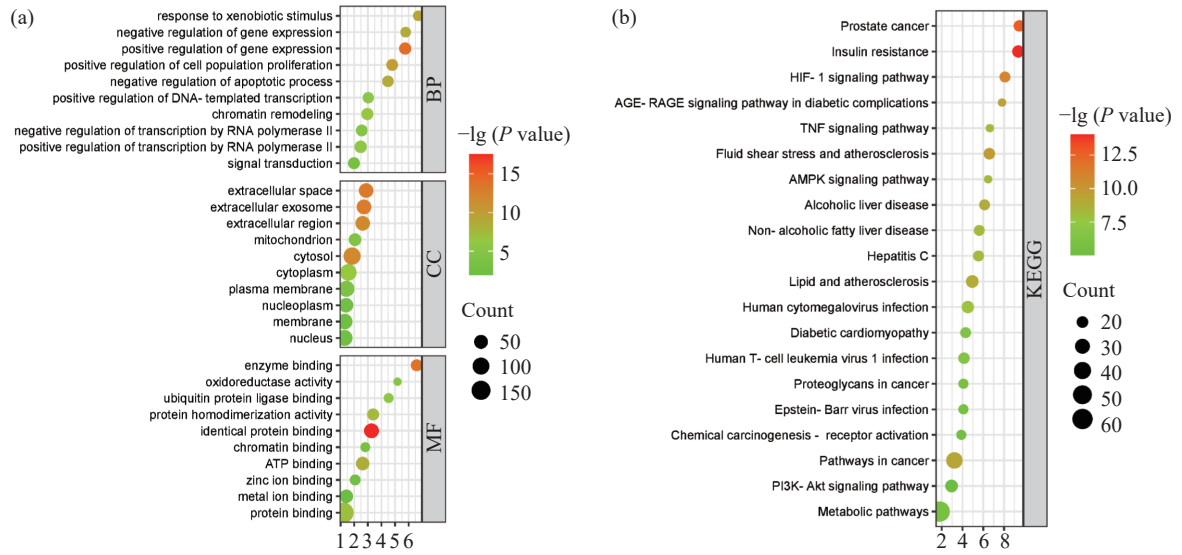


图 10 潜在降脂靶点 GO 功能、KEGG 通路富集结果

Fig.10 GO function and KEGG pathway enrichment results of potential lipid-lowering targets

注:(a)GO 富集分析气泡图;(b)KEGG 通路富集分析气泡图。

binding)以及 ATP 结合(ATP binding)等过程。

KEGG 富集分析共鉴定出 150 条相关信号通路,通过对排名前 20 的通路进行聚类分析并绘制气泡图(图 10b)。结果表明,山楂、薏仁和荷叶的作用靶点显著富集于胰岛素抵抗(Insulin resistance)、HIF-1 信号通路(HIF-1 signaling pathway)、AGE-RAGE 信号通路在糖尿病并发症中的调控(AGE-RAGE signaling pathway in diabetic complications)、AMPK 信号通路(AMPK signaling pathway)、非酒精性脂肪肝(Non-alcoholic fatty liver disease)、脂质与动脉粥样硬化(Lipid and atherosclerosis)等关键代谢途径。综合 GO 功能富集分析结果,山楂、荷叶和薏仁潜在降脂作用机制主要与机体调控脂质代谢相关基因的表达、细胞内的能量状态以及脂质代谢相关酶活性有关,以上均与高脂血症的发病机制有一定关联,表明山楂、荷叶和薏仁的潜在降脂靶点可通过作用多种复杂生物途径,达到协同降脂的效果。

2.8.4 成分-靶点-通路图 为进一步探究活性成分、靶点和通路相互之间的关系,构建了“成分-靶点-通路”交互网络(黄色节点表示活性成分、红色节点代表信号通路、蓝色节点代表作用靶点),该网络包含 28 个潜在活性成分、38 个降脂相关靶蛋白及 10 条富集信号通路(图 11)。网络拓扑分析显示(表 2),谷甾醇(MOL000359)、豆甾醇(MOL000449)和芸香苷(MOL000415)等成分具有较高的节点度(Degree 值),提示这些化合物可能会是山楂-薏仁-荷叶复方发挥降脂作用的关键活性物质。同时,从图中可以看出,山楂、薏仁和荷叶中 28 个潜在降脂活性成分作用于 38 个降脂相关靶点,主要涉及参与调控脂质与动脉粥样硬化通路(hsa05417)、HIF-1 信号通路(hsa04066)、流体剪切应力与动脉粥样硬化通路(hsa05418)、胰岛素抵抗(hsa04931)、PI3K-Akt 信号

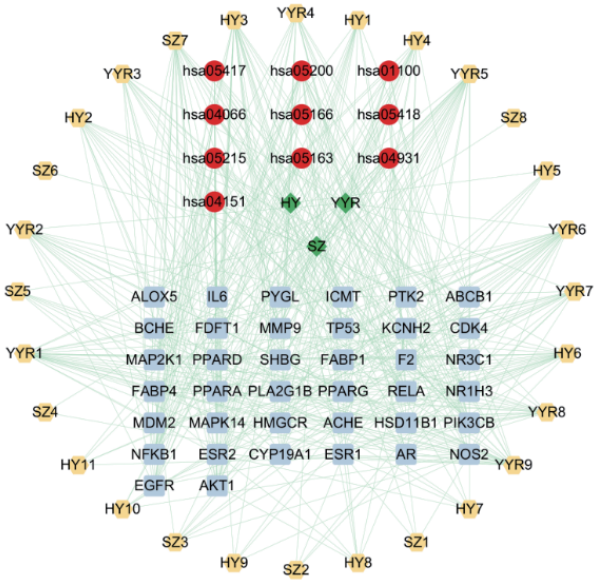


图 11 成分-靶点-通路图

Fig.11 Compound-target-pathway network

注:HY(1~11):荷叶(槲皮素、异鼠李素、谷甾醇、山奈酚、乌药碱、O-去甲基荷叶碱、荷叶碱、白矢车菊苷元、莲碱、(+)-表儿茶素、儿茶素);SZ(1~9):山楂(α-香树脂醇、绿原酸、Chlorogenin、柠檬酸、表儿茶素、金丝桃苷、芦丁、熊果酸、牡荆素);YYR(1~9):薏仁(柠檬二烯醇、亚油酸乙酯、角鲨烯、甘油单油酸酯、谷甾醇、豆甾醇、Coixenolide、2-十八烯酸单甘油酯、CLR)。

表 2 核心成分网络分析中节点拓扑属性

Table 2 Node topology attributes in core component network analysis

名称	中介中心性	接近中心性	节点度
豆甾醇	292.798	0.007	25.000
谷甾醇	301.566	0.006	24.000
芸香苷	255.359	0.006	21.000

通路(hsa04151)等多条与降脂相关的信号通路,从而形成多成分、多靶点、多通路的协同作用网络,实现

调控脂质代谢相关酶活性、氧化应激、胰岛素抵抗、脂质生成等多方面调节糖脂代谢平衡，最终有效降低血脂水平[21]。

2.9　分子对接

结合 PPI 网络和成分-靶点-通路分析，筛选出 INS、ALB、IL6、TNF、AKT1 五个关键靶点，可能是山楂、薏仁、荷叶干预高脂血症的核心作用位点。此外，豆甾醇（Stigmasterol）、谷甾醇（Sitosterol）、芸香苷（Rutin）等成分在网络中节点度值较高，提示其在降脂过程中起重要作用。为验证成分-靶点相互作用，采用 Autodock 分子对接技术分析关键活性成分与潜在靶点的结合能力，分子对接结合能如表 3 所示，同时，将表中结合能前三的对接结果进行了可视化分析，如图 12 所示。其中结合能结果显示，大部分结合能低于−5 kcal/mol（活性良好阈值）[42]，其中谷甾醇与 TNF 的结合能最优（−11.09 kcal/mol），此外，豆甾醇也与 ALB 靶蛋白表现出较强的结合能力（−11.07 kcal/mol）。其中，图 12（b）中，活性成分与 Glu64 残基的极性侧链形成了两个氢键，长度为 2.1 Å和 1.9 Å，表明二者之间存在较强的氢键作用。该结果验证了网络药理学的预测，从分子层面揭示了山楂、薏仁、荷叶多组分协同降脂的机制，为开发天然降脂功能食品提供了理论依据。

表 3　关键活性成分与核心靶点对接结合能

Table 3　Binding energies of key bioactive compounds with core targets

靶点	成分	结合能（kcal/mol）
INS	谷甾醇Sitosterol	−7.15
	豆甾醇Stigmasterol	−7.29
	芸香苷Rutin	−3.41
ALB	豆甾醇Stigmasterol	−11.07
	谷甾醇Sitosterol	−9.89
	芸香苷Rutin	−2.82
IL6	豆甾醇Stigmasterol	−7.74
	谷甾醇Sitosterol	−7.14
	芸香苷Rutin	−1.98
TNF	豆甾醇Stigmasterol	−10.61
	谷甾醇Sitosterol	−11.09
	芸香苷Rutin	−5.15
AKT1	豆甾醇Stigmasterol	−9.29
	谷甾醇Sitosterol	−9.13
	芸香苷Rutin	−4.61

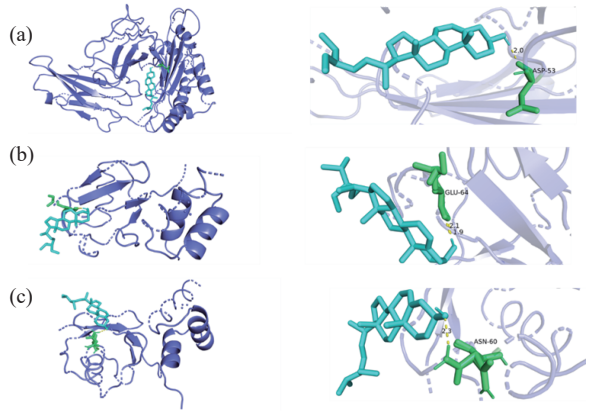


图 12　分子对接可视化结果

Fig.12　Visualization results of molecular docking

注：（a）：豆甾醇-ALB 分子对接可视化图；（b）：谷甾醇-TNF 分子对接可视化图；（c）：豆甾醇-TNF 分子对接可视化图。

3　结论

本文主要围绕八种药食同源植物水提液的降脂作用展开研究，重点探讨了山楂、荷叶和薏仁的降脂作用机制。从活性成分含量与降脂活性看，荷叶水提液的总黄酮、总酚含量显著高于其他样品（$P<0.05$），山楂水提液的总糖含量最高，且二者均表现出强抗氧化活性。在脂质代谢相关酶活抑制实验中，山楂对胰脂肪酶、α-葡萄糖苷酶和 α-淀粉酶的抑制作用最强，荷叶次之，薏仁对胆固醇酯酶的抑制效果最显著；同时，山楂和荷叶在胆酸钠结合及胆固醇吸附试验中表现最优，进一步体现降脂潜力。主成分分析（PCA）表明，山楂与荷叶的降脂作用存在一定相似性，薏仁则通过特异性抑制胆固醇酯酶发挥显著降胆固醇作用。网络药理学分析从机制层面得出：三者的活性成分可能通过调控胰岛素抵抗、AGE-RAGE、AMPK 等信号通路，干预脂质代谢和动脉粥样硬化等过程；同时参与酶结合、氧化还原酶活性调节等，通过多途径发挥降脂功效。分子对接结果显示，其关键成分（豆甾醇、谷甾醇和芸香苷）与核心靶点（INS、ALB、IL6 等）结合能力强，为上述机制提供支撑。综上，山楂、荷叶和薏仁通过多靶点、多通路协同调节脂代谢，降脂潜力显著，有望成为降脂功能性食品开发的优先候选材料，为代谢综合征的膳食干预提供新策略。但本研究结论仅为基于网络药理学和分子对接的生物信息学预测，所得结论还需通过后续开展细胞水平功能实验、动物模型等进行进一步验证。

© 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] HU Ying, CHEN Xingjuan, HU Mu, et al. Medicinal and edible plants in the treatment of dyslipidemia: Advances and prospects [J]. Chinese Medicine, 2022, 17: 113.

[2] 严晨晨. 黄大茶多糖体外降脂活性研究[D]. 合肥：安徽大学，2021. [YAN Chenchen. Lipid-lowering activity of polysaccharides from large yellow tea *in vitro*[D]. Hefei: Anhui University, 2021.]

[3] HUANG Yuanxiu, GAO Lin, XIE Xiaoping, et al. Epidemiology of dyslipidemia in Chinese adults: Meta-analysis of prevalence, awareness, treatment, and control[J]. Population Health Metrics, 2014, 12: 28.

[4] 冯锦辉，毛祥正，王文婷，等. 山楂决明降脂饮治疗高脂血症及认知障碍的作用机制[J]. 中药药理与临床，2025，41(3)：21-28. [FENG Jinhui, MAO Xiangzheng, WANG Wenting, et al. Mechanism of Shanzha Jueming lipid-lowering decoction in treatment of

hyperlipidaemia and cognitive impairment[J]. Pharmacology and Clinics of Chinese Materia Medica, 2025, 41(3): 21−28.]
[5] 江震宇. 山楂降血糖、降血脂活性成分及机理初探[D]. 金华: 浙江师范大学, 2019. [JIANG Zhenyu. The hypoglycemic and hypolipidemic active ingredients with its mechanism research of hawthorn[D]. Jinhua: Zhejiang Normal University, 2019.]
[6] 张彧博, 张亚婷. 荷叶的减肥降脂功效成分与功能食品开发利用研究[J]. 中国林副特产, 2025(1): 84−87. [ZHANG Yubo, ZHANG Yating. Research on slimming and lipid-reducing effect constituents and development and utilization of functional food of *Lotus* leaf[J]. Forest By-Product and Speciality in China, 2025(1): 84−87.]
[7] 梁璐, 黄慧学, 陈路, 等. 桑叶降血脂作用的研究进展[J]. 广西中医药, 2021, 44(2): 74−76. [LIANG Lu, HUANG Huixue, CHEN Lu, et al. Research progress on the effect of mulberry leaf in lowering blood lipid[J]. Guangxi Journal of Traditional Chinese Medicine, 2021, 44(2): 74−76.]
[8] 李媛媛, 于良晓, 裴海生, 等. 药食同源生物活性物质降脂减重机制研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(22): 7407−7414. [LI Yuanyuan, YU Liangxiao, PEI Haisheng, et al. Progress in understanding the lipid-lowering and weight-reducing mechanism of medicinal and edible homologous compounds[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(22): 7407−7414.]
[9] 陈少影, 李晶晶, 兰卫. 常用中药有效成分降脂作用研究进展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(13): 241−253. [CHEN Shaoying, LI Jingjing, LAN Wei. Lipid-lowering effect of active components in common Chinese medicine: A review[J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2023, 29(13): 241−253.]
[10] 刘英语, 吴酉芝, 张冠亚. 食源性多糖缓解脂质代谢异常的研究进展[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(17): 210−217. [LIU Yingyu, WU Youzhi, ZHANG Guanya. Research progress in mechanism of food-derived polysaccharides in alleviating lipid metabolism disorders[J]. Food Research and Development, 2023, 44(17): 210−217.]
[11] 周其其, 闵洁, 刁婷婷, 等. 山楂叶总黄酮对高脂血症肾损伤大鼠的保护作用[J]. 医药导报, 2022, 41(5): 608−615. [ZHOU Qiqi, MIN Jie, DIAO Tingting, et al. Protective effect of hawthorn leaves flavonoids on kidney injury in hyperlipidemia rats[J]. Herald of Medicine, 2022, 41(5): 608−615.]
[12] 王韬, 费建东, 聂双发, 等. 薏苡仁油对小鼠肠道菌群及炎症因子的影响[J]. 中国医药导报, 2020, 17(36): 31−35. [WANG Tao, FEI Jiandong, NIE Shuangfa, et al. Effect of Coicis Semen oil on intestinal flora and inflammatory factors in mice[J]. China Medical Herald, 2020, 17(36): 31−35.]
[13] KIM B, CHO B, JANG S. Anti-obesity effects of *Diospyros lotus* leaf extract in mice with high-fat diet-induced obesity[J]. International Journal of Molecular Medicine, 2018: 603-613.
[14] 李宗军, 周明玺, 田星. 膳食多酚的降脂机理研究进展[J]. 现代食品科技, 2019, 35(9): 322−328,310. [LI Zongjun, ZHOU Mingxi, TIAN Xing. Research progress on lipid lowering mechanism of dietary polyphenols[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(9): 322−328,310.]
[15] 张会香, 汤霞利, 林军全, 等. 广金钱草不同极性萃取物体外降脂及降血糖活性的比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 192−198. [ZHANG Huixiang, TANG Xiali, LIN Junquan, et al. Comparison of the *in vitro* lipid-lowering and hypoglycemic activities of *Desmodium styracifolium* extracts with different polarities[J]. Modern Food Science & Technology, 2023, 39(12): 192−198.]
[16] CHEN Fang, HUANG Gangliang. Antioxidant activity of polysaccharides from different sources of ginseng[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 125: 906−908.
[17] WU Jianhang, ZHANG Ye, QIU Ran, et al. Effects of tea addition on antioxidant capacity, volatiles, and sensory quality of beer[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101193.
[18] VIJAYALAKSHMI M, RUCKMANI K. Ferric reducing anti-oxidant power assay in plant extract[J]. Bangladesh Journal of Pharmacology, 2016, 11(3): 570.
[19] TAN Y Q, CHANG S K C, ZHANG Y. Comparison of α-amylase, *α*-glucosidase and lipase inhibitory activity of the phenolic substances in two black legumes of different genera[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 259−268.
[20] LI Xiaofang, CHEN Haoze, JIA Yan, et al. Inhibitory effects against alpha-amylase of an enriched polyphenol extract from pericarp of mangosteen (*Garcinia mangostana*)[J]. Foods, 2022, 11(7): 1001.
[21] 刘美娜. 火棘果醇提物中降脂活性成分研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021. [LIU Meina. Study on the hypolipidemic active compounds of *Pyracantha fortuneana* fruit extract[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2021.]
[22] 孙凯峰, 包怡红. 微生物发酵对黑木耳总糖含量和体外调脂活性的影响[J]. 中草药, 2018, 49(16): 3781−3787. [SUN Kaifeng, BAO Yihong. Effect of microbial fermentation on total sugar content and *in vitro* hypolipidemic effect of *Auricularia auricula*[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2018, 49(16): 3781−3787.]
[23] 王雪峰, 周炜炜, 张梦洁, 等. 基于网络药理学和分子对接探究白术调节氧化应激的作用机制[J]. 饲料研究, 2024, 47(3): 100−106. [WANG Xuefeng, ZHOU Weiwei, ZHANG Mengjie, et al. Study on mechanism of *Atractylodes macrocephala* in regulating oxidative stress based on network pharmacology and molecular docking[J]. Feed Research, 2024, 47(3): 100−106.]
[24] 罗黄洋. 基于网络药理学与分子对接技术探索豆腐柴降脂功效[D]. 重庆: 重庆三峡学院, 2023. [LUO Huangyang. Exploring the lipid-lowering effect of *Premna microphylla* Turcz. based on network pharmacology and molecular docking[D]. Chongqing: Chongqing Three Gorges University, 2023.]
[25] PENG Lianxin, ZHANG Qu, ZHANG Yanhong, et al. Effect of Tartary buckwheat, rutin, and quercetin on lipid metabolism in rats during high dietary fat intake[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(1): 199−213.
[26] 李贵海, 孙敬勇, 张希林, 等. 山楂降血脂有效成分的实验研究[J]. 中草药, 2002, 33(1): 50−52. [LI Guihai, SUN Jingyong, ZHANG Xilin, et al. Experimental studies on antihyperlipidemia effects of two compositions from hawthorn in mice[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2002, 33(1): 50−52.]
[27] SEO D B, JEONG H W, KIM Y J, et al. Fermented green tea extract exhibits hypolipidaemic effects through the inhibition of pancreatic lipase and promotion of energy expenditure[J]. British Journal of Nutrition, 2017, 117(2): 177−186.
[28] YU Qun, TIAN Yu, FAN Liuping. Inhibition mechanisms of wounded okra on the *α*-glucosidase/*α*-amylase[J]. Food Bioscience, 2023, 51: 102333.
[29] XIN Chao, ZHAO Mengya, WANG Jiahui, et al. Hawthorn

polyphenols, D-chiro-inositol, and epigallocatechin gallate exert a synergistic hypoglycemic effect[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(7): e13771.
[30] 弓威. 山楂叶有效成分提取分离及利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015. [GONG Wei. Extraction and separation of effective components from hawthorn leaves and its application[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.]
[31] REN Xinshui, WU Mengdie, LIU Simin, et al. Optimizing ultrasonic extraction and purification of nuciferine with response surface method[J]. Natural Product Communications, 2024, 19: 1934578X231220119.
[32] 陶益, 陈锥, 张玉峰. 亲和超滤耦联液相色谱-质谱快速检测山楂叶中的 α-淀粉酶抑制剂[J]. 分析化学, 2013, 41(2): 229−234. [TAO Yi, CHEN Zhui, ZHANG Yufeng. Characterization of α-amylase binding agents from hawthorn leaf using ultrafiltration and liquid chromatography tandem mass spectrometry[J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2013, 41(2): 229−234.]
[33] 商曰玲, 夏晶晶, 支柳, 等. 食用果蔬酵素活性成分的对比分析及其体外降脂性能初探[J]. 食品工业, 2022, 43(12): 143−147. [SHANG Yueling, XIA Jingjing, ZHI Liu, et al. Comparative analysis of active components of edible fruit and vegetable Jiaosu and their lipid-lowering properties *in vitro*[J]. The Food Industry, 2022, 43(12): 143−147.]
[34] YANG Zhoujie, ZHU Xiaoli, WEN Anyan, et al. *Coix* seed-based milk fermented with *Limosilactobacillus reuteri* improves lipid metabolism and gut microbiota in mice fed with a high-fat diet[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 921255.
[35] 华梅, 樊美玲, 卢佳希, 等. 七种药食两用中药膳食纤维体外抗氧化及胆酸盐结合能力研究[J]. 食品工业科技, 2021, 42(11): 314−320. [HUA Mei, FAN Meiling, LU Jiaxi, et al. Study on the *in vitro* antioxidant and bile salts binding activity of the dietary fibers from seven edible rraditional Chinese medicines[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(11): 314−320.]
[36] 程泽华, 高鹏程, 甄鹏晨. 荷叶提取物降脂机理的研究[J]. 食品界, 2017(7): 43. [CHENG Zehua, GAO Pengcheng, ZHEN Pengchen. Study on the lipid-lowering mechanism of lotus leaf extract[J]. Food Industry, 2017(7): 43.]
[37] PATEL R S, SCOPELLITI E M, SAVELLONI J. Therapeutic management of familial hypercholesterolemia: Current and emerging drug therapies[J]. Pharmacotherapy, 2015, 35(12): 1189−1203.
[38] 唐蓉蓉. 山荷降脂颗粒的制备及其功效评价研究[D]. 银川: 宁夏医科大学, 2022. [TANG Rongrong. Study on preparation and efficacy evaluation of shanhe lipid-lowering granules[D]. Yinchuan: Ningxia Medical University, 2022.]
[39] 华宙佳, 王晨晔, 俞佳, 等. 基于网络药理学探讨苍附导痰汤加减方对多囊卵巢综合征大鼠胰岛素抵抗的作用机制[J]. 中国现代应用药学, 2023, 40(4): 461−470. [HUA Zhoujia, WANG Chenye, YU Jia, et al. Investigation on mechanism of action of modified Cangfu Daotan decoction on insulin resistance in polycystic ovarian syndrome rats based on network pharmacology[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2023, 40(4): 461−470.]
[40] 杨静. FIB 和 ALB 与冠心病患者冠状动脉病变严重程度的相关性研究[D]. 太原: 山西医科大学, 2022. [YANG Jing. Correlation between FIB, ALB and the severity of coronary artery lesions in patients with coronary heart disease[D]. Taiyuan: Shanxi Medical University, 2022.]
[41] 朱亮, 伍明江, 邱佳, 等. 基于网络药理学分析火棘果实提取物的抗炎作用及实验研究[J]. 贵州医科大学学报, 2025, 50(3): 346−360. [ZHU Liang, WU Mingjiang, QIU Jia, et al. Analysis of the anti-inflammatory effect and experimental study of *Pyracantha* fruit extracts based on network pharmacology[J]. Journal of Guizhou Medical University, 2025, 50(3): 346−360.]
[42] SHAHZADI Z, YOUSAF Z, ANJUM I, et al. Network pharmacology and molecular docking: Combined computational approaches to explore the antihypertensive potential of Fabaceae species[J]. Bioresources and Bioprocessing, 2024, 11: 53.