蔡梦权, 杨胜男, 熊小英, 等. 超声辅助大孔树脂纯化菜芙蓉叶黄酮及其对肠道菌群的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 265−276. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070250

CAI Mengquan, YANG Shengnan, XIONG Xiaoying, et al. Ultrasound-assisted Macroporous Resin Purification of Flavonoids from *Abelmoschus manihot* (L.) Leaves and Their Effect on Gut Microbiota[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 265−276. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070250

· 工艺技术 ·

超声辅助大孔树脂纯化菜芙蓉叶黄酮及其对肠道菌群的影响

蔡梦权, 杨胜男, 熊小英, 郑明洋, 赵　斗, 仇　燕*

（河北科技大学食品与生物学院, 河北石家庄 050018）

摘　要: 本研究旨在优化超声辅助大孔树脂技术纯化菜芙蓉叶黄酮（*Ambelmoschus manihot* (L.) leaves flavonoid, AMLF）工艺，并探究 AMLF 对小鼠肠道菌群与代谢产物的影响。通过超声功率、温度、时间和上样浓度等因素确定最佳吸附率，并以超声功率、温度、时间和乙醇体积分数确定最佳解吸率，结合吸附率和解吸率双指标，确定最佳纯化工艺。连续灌胃正常小鼠不同浓度 AMLF（80、160、320 mg/kg）35 d，测定小肠总抗氧化能力（Total antioxidant capacity，T-AOC）、过氧化氢酶（Catalase，CAT）、丙二醛（Malondialdehyde，MDA）、超氧化物歧化酶（Superoxide dismutase，SOD）和分泌型免疫球蛋白 A（Secretory immunoglobulin A，sIgA）含量，测定血清组织白细胞介素 1β（Interleukin-1β，IL-1β）、白细胞介素 2（Interleukin-2，IL-2）、免疫球蛋白 G（Immunoglobulin G，IgG）的含量，分析肠道菌群组成以及粪便短链脂肪酸（Short-chain fatty acids，SCFAs）含量。结果表明，选用 HPD500 大孔树脂，在超声功率 150 W，温度 25 ℃，时间 60 min，上样浓度 1.3 mg/mL 的吸附条件下，黄酮吸附率最高达 51.76%；在超声功率 180 W，温度 45 ℃，时间 30 min，乙醇体积分数 70% 的解吸条件下，解吸率达 84.65%，在此工艺下 AMLF 纯度可达 36.72%。与空白组相比，高剂量组（320 mg/kg）小鼠 CAT 含量提高了 67.43%（P<0.05），而 MDA 含量则降低了 50.41%（P<0.05）。AMLF 能够提高小鼠肠道菌群多样性，上调有益菌 *Lactobacillus* 和 *Prevotellaceae*_UCG_001 相对丰度，促进 SCFAs 的产生。综上，超声辅助大孔树脂技术绿色低耗、易于放大，可显著增加 AMLF 的纯度，且 AMLF 能够调节机体免疫能力，提高抗氧化能力，改变肠道菌群结构与代谢产物种类，促进肠道健康，为菜芙蓉叶资源的开发及其在食品领域的应用提供理论基础。

关键词: 菜芙蓉叶黄酮, 超声, 大孔树脂, 纯化, 肠道菌群, 短链脂肪酸

中图分类号: Q946.8　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0265−12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070250　　本文网刊:

Ultrasound-assisted Macroporous Resin Purification of Flavonoids from *Abelmoschus manihot* (L.) Leaves and Their Effect on Gut Microbiota

CAI Mengquan, YANG Shengnan, XIONG Xiaoying, ZHENG Mingyang, ZHAO Dou, QIU Yan*

（College of Food Science and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China）

Abstract: This study aimed to optimize the ultrasound-assisted macroporous resin purification process for *Abelmoschus manihot* (L.) leaf flavonoids (AMLF) and investigate their regulatory effect on intestinal microbiota in mice. Optimal adsorption rates were determined by evaluating ultrasound power, temperature, time, and sample loading concentration, while desorption efficiency was optimized via ultrasound power, temperature, time, and ethanol volume fraction. The final purification protocol was established by integrating both adsorption and desorption performance. The normal mice were gavaged

收稿日期: 2025−07−21

基金项目: 河北省重点研发计划项目（22322801D）。

作者简介: 蔡梦权（2001−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 天然产物, E-mail: 1542322368@qq.com。

*** 通信作者:** 仇燕（1977−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 天然产物及其功效评价, E-mail: qiuyan2015@126.com。

with AMLF at doses of 80, 160, or 320 mg/kg for 35 days. Biomarkers including total antioxidant capacity (T-AOC), catalase (CAT), malondialdehyde (MDA), superoxide dismutase (SOD), and secretory immunoglobulin A (sIgA) in intestinal tissues, as well as serum interleukin-1β (IL-1β), interleukin-2 (IL-2), and immunoglobulin G (IgG) levels, were measured. Intestinal microbiota composition and fecal short-chain fatty acids (SCFAs) were analyzed respectively. The results indicated that HPD500 macroporous resin under adsorption conditions (150 W ultrasound power, 25 ℃, 60 min, 1.3 mg/mL loading concentration) achieved the highest adsorption rate (51.76%). Optimal desorption was attained at 180 W ultrasound power, 45 ℃, 30 min, and 70% ethanol, yielding a desorption rate of 84.65%. Under this protocol, AMLF purity increased to 36.72%. Compared with the control group, the intestinal CAT activity in mice of the high-dose group (320 mg/kg) was significantly elevated by 67.43% (P<0.05), whereas the MDA content was markedly reduced by 50.41% (P<0.05). AMLF treatment enhanced intestinal microbiota diversity, upregulated the relative abundance of beneficial bacteria (e.g., *Lactobacillus* and *Prevotellaceae*_UCG_001), and promoted SCFA production. In summary, the ultrasound-assisted macroporous resin technology, characterized by its greenness, low energy consumption, and scalability, effectively enhances the purity of AMLF. Moreover, AMLF modulates immune function, enhances antioxidant capacity, alters the structure of intestinal microbiota and the composition of metabolites, and promotes intestinal health. These findings collectively lay a theoretical foundation for the development of *A. manihot* (L.) leaf resources and their application in the food industry.

Key words: *Abelmoschus manihot* (L.) leaves flavonoid; ultrasound; macroporous resin; purification; gut microbiota; short-chain fatty acids

菜芙蓉(*Abelmoschus manihot*(L.) Medic),又称金花葵,是锦葵科秋葵属的一年生或多年生草本植物[1]。我国河北、山东、内蒙古、广东、江苏等地已人工种植两万余亩,其中河北张家口亩产鲜株 1900 kg、干品 500 kg[2]。花、叶、根、茎和果都可食用,是传统的药食两用资源,具有清利湿热、消炎镇痛之功效。菜芙蓉花含有丰富的黄酮、多糖、不饱和脂肪酸和微量元素硒、锌等成分[3],其中黄酮类化合物是其主要活性物质。Pan 等[4] 发现菜芙蓉植株不同部位总黄酮含量分布从高到低依次为花、叶、茎、根。现代药理学研究表明,菜芙蓉黄酮具有减轻炎症反应、抵抗自由基引起的细胞损伤[5]、免疫调节[6]、降低血脂[7]等功效,在医药、食品和化妆品等领域具有广阔的应用前景。目前大量研究集中于菜芙蓉花黄酮的提取分离及应用,对叶黄酮的研究与开发缺乏报道。

目前大孔树脂纯化技术,因其易于再生,溶剂消耗低和成本低廉等优势被广泛应用于黄酮类化合物的富集纯化。代继云等[8] 用大孔树脂技术纯化尖叶胡枝子总黄酮,使其总黄酮纯度由 20.45% 提高至 52.21%。Shen 等[9] 利用超声辅助大孔树脂吸附/解吸纯化大枣皮黄酮,发现纯化后儿茶素、表儿茶素、芦丁和槲皮素含量均是常规摇床处理的 2~3 倍,且抗氧化和降血糖活性显著增强。Pan 等[10] 研究表明异槲皮苷等类黄酮能够显著促进双歧杆菌的生长,并提高乳酸菌等益生菌的相对丰度,降低有害菌的相对丰度。黄酮类化合物也改变了肠道微生物的组成增加了短链脂肪酸的含量[11]。桑黄黄酮灌胃环磷酰胺诱导的免疫低下小鼠,可以促进其肠道丙酸和丁酸的产生,增加短链脂肪酸的含量,进而增强了小鼠的免疫力[12]。而菜芙蓉叶黄酮(AMLF)对小鼠肠道菌群和短链脂肪酸的影响未见报道。

本研究旨在筛选富集 AMLF 的最适大孔树脂,确定超声辅助大孔树脂纯化的最佳条件,建立动力学模型、热力学模型揭示吸附与解吸机理,优化纯化工艺,以实现高效的菜芙蓉叶黄酮纯化。并进一步探究纯化后 AMLF 对小鼠肠道菌群和短链脂肪酸的影响,挖掘潜在功能价值,为其在食品工业中的应用提供科学依据,进一步推动菜芙蓉资源的深度开发与利用。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

菜芙蓉叶　产自河北省井陉县;大孔树脂　郑州和成新材料科技有限公司,7 种树脂的名称及物理特性如表 1 所示;纤维素酶(10000 U/g)　山东隆科特酶制剂有限公司;木聚糖酶(20000 U/g)　山西大禹生物工程股份有限公司;1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1, 1-diphenyl-2-picrylhy-drazyl, DPPH)　和光纯化工业株式会社;乙腈　色谱级,天津市康科德科技有限公司;芦丁(≥98%)、金丝桃苷(≥98%)、异槲皮苷(98%)、杨梅素(98.31%)、槲皮素(99.1%)标准品　上海源叶生物科技有限公司;总抗氧化能力(T-AOC)试剂盒、过氧化氢酶(CAT)试剂盒、丙二醛(MDA)试剂盒、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒　南京建成生物科技有限公司;sIgA ELISA 试剂盒、IL-1β ELISA 试剂盒、IL-2 ELISA 试剂盒、IgG ELISA

表 1　7 种树脂的物理特性

Table 1　Physical properties of the seven resins

树脂名称	比表面积 (m^2/g)	极性	粒度 (mm)	含水量 (%)	堆积密度 (g/mL)
HPD500	500~550	极性	0.315~1.25	60~70	0.68~0.75
NKA-9	170~250	极性	0.315~1.25	67~73	0.66~0.71
HPD750	650~720	中极性	0.3~1.2	60~70	0.68~0.75
AB-8	>520	弱极性	0.315~1.25	65~75	0.65~0.75
HZ-801	500~600	非极性	0.25~0.315	60~70	0.6~0.7
HPD700	650~700	非极性	0.25~0.315	65~75	0.68~0.75
D101	600~700	非极性	0.3~1.25	50~66	0.65~0.7

试剂盒　上海源桔生物科技中心；健康雄性 BALB/c 小鼠　体重 18~22 g，6~8 周龄，32 只，购自河北医科大学实验动物中心，动物生产许可证号为 SCXK（冀）2022-001。小鼠在温度为 25 ℃、相对湿度为 50%~60% 的 SPF 级动物房中饲养，正常昼夜节律，自由饮水进食。动物实验经河北科技大学动物实验伦理审查委员会批准（批准号：22322801D），所有实验程序均按照国家研究委员会实验动物护理和使用指南进行；基础饲料　购自河北医科大学，SCXK（冀）2021-002。

SHZ-82 型气浴回旋振荡器　杭州旌斐仪器科技有限公司；WFZ UV-2000 型紫外可见分光光度计　尤尼柯（上海）仪器有限公司；RE-5298A 型真空旋转蒸发仪　上海亚荣生化仪器厂；KQ-300DE 型超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司；Spectra-MAX i3x 型酶标仪　美国美谷分子仪器有限公司；Waters 2996 高效液相色谱仪　美国沃特世科技有限公司；8890B-5977B/7000D 气相色谱质谱联用仪　美国安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　菜芙蓉叶黄酮提取物的制备　菜芙蓉叶清洗净，50 ℃ 烘干，粉碎过 80 目筛 4 ℃ 保存备用。称取 20 g 菜芙蓉叶粉末，加入 600 mL、0.05 mol/L 磷酸氢二钠-柠檬酸缓冲液（pH4.5）；复合酶（纤维素酶∶木聚糖酶）质量比为 2∶1，酶含量为 3.6%（w/w），混匀后在 37.5 ℃，提取 2.5 h，而后将酶于 95 ℃ 灭活 1 min，5000 r/min 离心 15 min，取上清，减压浓缩得提取液。

1.2.2　总黄酮含量的测定　参考白玉琴等[13] 的方法，使用 $NaNO_2$-$Al(NO_3)_3$-NaOH 法绘制芦丁标准曲线（Y=10.2907x−0.0023，R^2=0.9985）。将 AMLF 提取液 8000 r/min 离心 10 min，取上清，根据芦丁标准曲线计算黄酮含量。

1.2.3　大孔树脂预处理　取适量的树脂在无水乙醇中浸泡 24 h，纯水冲洗至无醇味，而后在 4% HCl 溶液中浸泡 4 h 并用纯水冲洗至中性，最后置于 4% NaOH 溶液中浸泡 4 h，用纯水冲洗至中性，备用。

1.2.4　大孔树脂的筛选　取各型号预处理的树脂 2 g，加入 20 mL AMLF 提取液并在 35 ℃，140 r/min 下静态吸附 24 h 后抽滤，纯水清洗树脂除杂后，加入 20 mL 70% 乙醇在 35 ℃、140 r/min 下静态解吸 12 h。每组设 3 个重复，测定吸光度并按下式计算吸附量（Q_1）、吸附率（R_1）、解吸量（Q_2）、解吸率（R_2）[9]。

$$Q_1 = \frac{(C_0 - C_1)V_0}{W} \quad 式（1）$$

$$R_1 = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100 \quad 式（2）$$

$$Q_2 = \frac{C_d V_d}{W} \quad 式（3）$$

$$R_2 = \frac{C_d V_d}{(C_0 - C_1)V_0} \times 100 \quad 式（4）$$

其中：C_0 为初始浓度（mg/mL）；C_1 为平衡浓度（mg/mL）；V_0 为样液体积（mL）；W 为树脂质量（g）；C_d 为解吸液浓度（mg/mL）；V_d 为 70%乙醇的体积（mL）。

1.2.5　吸附动力学　取 50 mL AMLF 提取液，加入 5 g 预处理 HPD500 树脂，在 25 ℃ 下，分别在不同功率下（0、120、150、180 和 210 W）进行超声辅助吸附处理。吸附过程中前 1 h 内间隔 10 min，后 1 h 间隔 30 min 取出等量吸附液测定吸光度，计算总黄酮含量。采用下列 3 种动力学模型来描述吸附过程[14]。动力学模型的方程如下：

$$伪一阶动力学模型：\ln(Q_e - Q_t) = \ln Q_e - K_0 t \quad 式（5）$$

$$伪二阶动力学模型：\frac{t}{Q_t} = \frac{1}{(K_1 Q_e^2)} + \frac{t}{Q_e} \quad 式（6）$$

$$粒子内扩散模型：Q_t = K_2 t^{1/2} + M \quad 式（7）$$

其中：K_0 为伪一阶模型速率常数；K_1 为伪二阶模型速率常数；K_2 为粒子内扩散模型速率常数；Q_t 为 t 时刻的吸附量；Q_e 为平衡时的吸附量；M 为粒子内扩散模型中的常数。

1.2.6　吸附热力学　取 5 g 预处理的 HPD500 树脂，分别加入 20 mL 不同浓度（0.3、1.3、2.3、3.3 和 4.4 mg/mL）的提取液，在 25、35 和 45 ℃（298、308 和 318 K）下进行超声处理，计算树脂平衡吸附量（Q_e）。采用 Langmuir 和 Freundlich 方程分析它们的契合度。相关方程如下：

$$Langmuir模型：\frac{C_e}{Q_e} = \frac{C_e}{Q_m} + \frac{1}{(K_L Q_m)} \quad 式（8）$$

$$Freundlich模型：\ln Q_e = \ln K_F + \frac{\ln C_e}{n} \quad 式（9）$$

其中：K_L 为 Langmuir 常数；K_F 为 Freundlich 常数；C_e 为平衡浓度，Q_m 为理论最大吸附能力。

$$\Delta G = -nRT \quad 式（10）$$

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad 式（11）$$

其中：R 为气体常数 [8.314（J/mol·K）]；n 是 Freundlich 方程中的表观常数；T 代表热力学温度，K。

1.2.7　大孔树脂纯化工艺优化

1.2.7.1　超声功率、温度、时间和上样浓度对黄酮吸附率的影响　将超声温度和上样浓度分别固定为 25 ℃、1.3 mg/mL，探究超声功率（0、120、150、180 和 210 W）的影响。将超声功率和上样浓度分别固定在 150 W、1.3 mg/mL，探究超声温度（25、35 和 45 ℃）的影响。将超声功率、超声温度和上样浓度分别固定为 150 W、25 ℃ 和 1.3 mg/mL，探究超声时间（10、20、30、40、50、60、90 和 120 min）的影响，将超声功率、温度和时间分别固定为 150 W、25 ℃

和 60 min, 考察上样浓度(0.3、1.3、2.3、3.3 和 4.4 mg/mL)的影响。

1.2.7.2 超声功率、温度、时间和乙醇体积分数对黄酮解吸率的影响 在吸附超声功率 150 W、超声温度 25 ℃、超声时间 60 min、最佳上样浓度 1.3 mg/mL 下, 对提取液进行吸附处理后进行解吸附处理。将超声温度和乙醇体积分数分别固定为 25 ℃ 和 70%, 探究超声功率(0、120、150、180 和 210 W)的影响。将超声功率和乙醇体积分数分别固定为180 W 和 70%, 探究超声温度(25、35 和 45 ℃)的影响。将超声功率、温度和乙醇体积分数分别固定为 180 W、45 ℃ 和 70%, 探究超声时间(10、20、30、40、50、60、90 和 120 min)的影响。将超声功率、温度和时间分别固定为 180 W、45 ℃ 和 30 min, 探究乙醇体积分数(50%、60%、70%、80% 和 90%)对解吸率的影响。

1.2.8 DPPH 自由基的清除能力测定 参考 Lin 等[15]方法, 略作修改, 收集提取液, 减压浓缩成黄酮粉末, 测得纯化前后黄酮纯度分别为 3.88% 和 36.72%。制备浓度为 10 mg/mL 的精制黄酮样品液, 将样液稀释成浓度为 160 μg/mL 和 80 μg/mL 的样品液, 加入 DPPH 溶液, 在室温下, 每间隔 5 min, 测定 517 nm 处吸光度, DPPH 自由基清除率公式如下:

$$清除率(\%)=\left(1-\frac{A_r-A_m}{A_0}\right)\times 100 \qquad 式(12)$$

其中: A_m 为空白组, 加样品液不加 DPPH; A_0 为对照组, 加 DPPH 不加样品液; A_r 为实验组, 加样品液和 DPPH。

1.2.9 HPLC-DAD 定量分析 参照 Lai 等[16]方法对黄酮类化合物进行 HPLC 分析。色谱柱使用 Waters Symmetry C_{18}(4.6 mm×250 mm, 5 μm), 将纯化后的菜芙蓉粉末溶解配制成 1 mg/mL 的溶液, 梯度溶剂体系由乙腈(A)和 0.1% 磷酸(B)组成, 流速 1.0 mL/min, 进样量为 10 μL, 在 30 ℃ 条件下进行分离, 梯度洗脱程序 0~17 min, 15%(A), 18~25 min, 16%(A), 26~34 min, 20%(A), 35~44 min, 40%(A), 45~50 min, 15%(A); 检测波长为 370 nm。以芦丁、金丝桃苷、异槲皮苷、杨梅素和槲皮素为标准品, 分别绘制其标准曲线: y=15963x+7506.4(R^2=0.9997), y=17617x+4063.5(R^2=0.9999), y=40843x+16647(R^2=0.9998), y=34980x+3090.8(R^2=0.9999), y=37242x+9682.5(R^2=0.9996), 计算纯化后黄酮单体的含量。

1.2.10 动物实验及处理

1.2.10.1 动物分组 参考仇燕等[17]方法, 将 BALB/c 小鼠随机分成 4 组: 空白对照组(CK), 纯化 AMLF 低(L)、中(M)、高(H)剂量组分别为 80、160 和 320 mg/kg, 每组 8 只。适应性饲养 7 d, 连续灌胃 AMLF 35 d, CK 组灌胃同等体积的生理盐水, 自由饮水进食。第 35 d 禁食不禁水, 于第 36 d 麻醉, 眼眶取血后脱颈处死。

1.2.10.2 小鼠抗氧化指标和免疫因子测定 收集血液后, 3000 r/min 离心 10 min, 取上清液分装待测。小鼠解剖后, 取出小肠, 按组织重量(g)/生理盐水(mL)=1∶9 的比例, 放入预冷研磨机中, 制备成 10% 的匀浆液, 4 ℃、3500 r/min 离心 10 min, 取上清液分装备用。按照试剂盒说明书, 分别测定血清组织 IL-1β、IL-2、IgG 的含量和小肠组织 CAT、T-AOC、SOD 活性、MDA 含量和 sIgA 含量。

1.2.10.3 DNA 提取及高通量测序 在小鼠处死前收集粪便样本于无菌无酶的 EP 管中, 液氮速冻, −80 ℃ 保存。根据 DNA 试剂盒说明书进行小鼠粪便总 DNA 提取, 检测 DNA 质量, 测定 DNA 浓度和纯度。总基因组 DNA 质检合格后, 以之为模板, 设计合成带有 Barcode 序列的特异引物, 对 16S rRNA 基因的 V3~V4 区域进行 PCR 扩增和产物纯化。上游引物 338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3'), 下游引物 806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')。PCR 反应体系为: 5×TransStart FastPfu 缓冲液 4 μL, 2.5 mmol/L dNTPs 2 μL, 上游引物(5 μmol/L) 0.8 μL, 下游引物(5 μmol/L)0.8 μL, TransStart FastPfu DNA 聚合酶 0.4 μL, 模板 DNA 10 ng, 补足至 20 μL。扩增程序如下: 95 ℃ 预变性3 min, 27 个循环(95 ℃ 变性 30 s, 55 ℃ 退火, 30 s 72 ℃ 延伸 30 s), 72 ℃ 稳定延伸 10 min, 最后在 4 ℃进行保存。对 PCR 产物检测定量后构建 miseq 文库, 在 Illumina 公司的 Miseq PE300 平台进行高通量测序(上海美吉生物医药科技有限公司)。

1.2.10.4 短链脂肪酸测定方法 取 20 mg 粪便样品于研磨管中, 加入 800 μL 0.5% 磷酸水(含内标 2-乙基丁酸 10 μg/mL), 将样品冷冻研磨 3 min, 超声 10 min, 4 ℃ 12000 r/min 离心 15 min, 取出上清 200 μL 到 1.5 mL EP 管中, 然后加入 200 μL 正丁醇溶剂萃取。涡旋 10 s, 低温超声 10 min, 4 ℃、12000 r/min 离心 5 min, 取上清溶液到进样小瓶上机, GC-MS 检测, 采用 Agilent 8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪进行分析。色谱分离使用 HP-FFAP 毛细管柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm, Agilent J&W Scientific, Folsom, CA, USA), 载气为高纯氦气(纯度 ≥ 99.999%), 恒流模式, 流速 1.0 mL/min。进样口温度设为 180 ℃, 进样量 1 μL, 采用分流进样, 分流比为 10∶1, 溶剂延迟 2.5 min。柱温箱升温程序为: 初始温度 80 ℃, 以 20 ℃/min 升至 120 ℃, 再以 5 ℃/min 升至 160 ℃, 最后于 220 ℃ 后运行 3 min。质谱检测采用电子轰击离子源(EI), 离子源温度 230 ℃, 四极杆温度为 150 ℃, 传输线温度为 230 ℃, 电子能量为 70 eV。数据采集选用选择离子监测模式(SIM)。采用 Masshunter 定量软件对目标短链脂肪酸各离子碎片进行自动识别和积分, 通过标准曲线计算含量。

1.3　数据处理

所有实验均重复三次，实验数据以平均值±标准差表示。采用 Origin 2022 作图软件进行数据分析和处理；采用单因素方差分析（ANOVA）或 Student's *t* 检验对数据进行统计学分析。采用 Duncan's 多重极差检验法确定平均值间差异的显著性。其余均在美吉云平台上分析。

2　结果与分析

2.1　大孔树脂的筛选

吸附与解吸能力可作为评价目标化合物回收效率的关键指标[18]。如表 2 所示，通过测定 7 种不同树脂对黄酮的吸附率和解吸率，HPD500 和 D101 的吸附率均高于 60%，吸附效果较好，但两者无显著差异；D101 的解吸率为 83.84%，而 HPD500 的解吸率达到 98% 以上，具有显著差异（$P<0.05$）。因此，选择 HPD500 作为最适大孔树脂用于后续实验。

表 2　不同型号大孔树脂吸附率和解吸率比较

Table 2　Comparison of adsorption and desorption rates among different types of macroporous resins

树脂名称	吸附量(mg/g)	吸附率(%)	解吸量(mg/g)	解吸率(%)
HPD700	4.493±0.301^{a}	56.80±0.76^{c}	1.476±0.091^{d}	82.12±0.43^{f}
HZ-801	4.306±0.292^{a}	54.42±0.75^{d}	1.326±0.032^{e}	77.01±0.25^{g}
AB-8	3.206±0.212^{b}	40.52±0.55^{e}	1.086±0.081^{f}	84.66±0.60^{d}
NKA-9	2.893±0.443^{b}	36.56±1.12^{f}	1.099±0.023^{f}	94.98±0.16^{c}
HPD500	4.874±0.302^{a}	61.61±0.77^{a}	1.925±0.017^{a}	98.72±0.12^{a}
HPD750	4.656±0.481^{a}	58.85±1.22^{b}	1.821±0.034^{b}	97.77±0.35^{b}
D101	4.970±0.354^{a}	62.81±0.91^{a}	1.667±0.039^{c}	83.84±0.44^{e}

注：同一指标不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

2.2　吸附动力学研究

采用伪一阶、伪二阶和粒子内扩散模型描述不同超声功率下的吸附机理。由表 3 可见，不同模型决定系数（R^2）表明，伪二阶模型 R^2 更接近于 1，更适合黄酮的吸附，这与 Baranyika 等[19] 结果一致。此外，吸附过程涉及多个步骤，包括液膜扩散、粒子内扩散以及吸附反应[20]。如图 1 所示，粒子内扩散模型的所有曲线均未通过原点，表明仅仅考虑粒子内扩散并不能全面解释吸附速率。因此，可以推断出化合物的吸附速率不仅受到粒子内扩散的影响，还受到液膜扩散和吸附反应的影响。

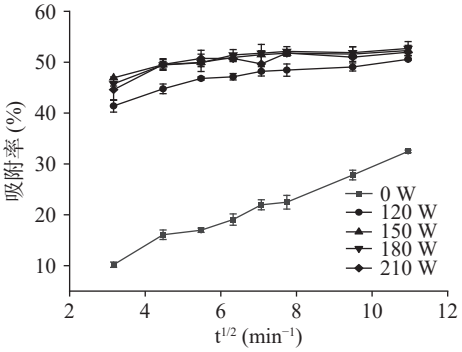


图 1　菜芙蓉叶黄酮吸附的粒子内扩散图

Fig.1　Intra-particle diffusion diagram of flavonoid adsorption in hibiscus leaves

2.3　吸附热力学研究

2.3.1　吸附等温线　为揭示大孔树脂的吸附与解吸机理，合理设计工艺流程，需要通过 Langmuir 或 Freundlich 等吸附等温模型测定并拟合吸附等温线，从而推导出等容热、熵和自由能等关键热力学参数[21]。由表 4 可知，Freundlich 模型在各温度下的决定系数（R^2）均显著优于 Langmuir 模型，表明其对菜芙蓉叶黄酮吸附行为的拟合更佳，故选用 Freundlich 模型进行描述。如图 2 所示，随着温度升高黄酮的吸附率降低，表明黄酮的吸附过程是放热反应。温度升高黄酮分子运动速度加快，使其在树脂上保留时间缩短[22]，

表 3　黄酮在 HPD500 大孔树脂上吸附动力学方程

Table 3　Adsorption kinetic equation of flavonoids on HPD500 macroporous resin

超声功率(W)	伪一阶模型	伪二阶模型	粒子内扩散模型
0	$\ln(Q_e-Q_t)=-0.01839t+1.26582$ $R^2=0.96833$	$t/Q_t=0.18824t+6.64945$ $R^2=0.96083$	$Q_t=0.36206t^{1/2}+0.31757$ $R^2=0.98441$
120	$\ln(Q_e-Q_t)=-0.02191t+0.09584$ $R^2=0.92588$	$t/Q_t=0.15364t+0.48153$ $R^2=0.99953$	$Q_t=0.13149t^{1/2}+5.05991$ $R^2=0.85104$
150	$\ln(Q_e-Q_t)=-0.02758t-0.50607$ $R^2=0.73376$	$t/Q_t=0.15061t+0.17464$ $R^2=0.99989$	$Q_t=0.07593t^{1/2}+5.88439$ $R^2=0.74777$
180	$\ln(Q_e-Q_t)=-0.02855t-0.33246$ $R^2=0.68417$	$t/Q_t=0.14822t+0.24299$ $R^2=0.99987$	$Q_t=0.09565t^{1/2}+5.75779$ $R^2=0.68959$
210	$\ln(Q_e-Q_t)=-0.02647t-0.60498$ $R^2=0.25271$	$t/Q_t=0.15083t+0.22053$ $R^2=0.99952$	$Q_t=0.0873t^{1/2}+5.73653$ $R^2=0.49496$

表 4　不同温度下黄酮在 HPD500 树脂上的吸附等温方程

Table 4　Translation of adsorption isotherm equation of flavonoids on HPD500 resin at different temperatures

T(℃)	Freundich模型				Langmuir模型			
	方程	K_F	n	R^2	方程	Q_m	K_L	R^2
25	$\ln Q_e=0.8016\ln C_e+2.19107$	8.945	1.25	0.97596	$C_e/Q_e=0.02053C_e+0.08752$	48.709	0.235	0.80599
35	$\ln Q_e=0.65683\ln C_e+1.99885$	7.381	1.52	0.91985	$C_e/Q_e=0.04491C_e+0.08239$	22.267	0.545	0.88034
45	$\ln Q_e=0.59536\ln C_e+1.87227$	6.503	1.68	0.9167	$C_e/Q_e=0.05905C_e+0.08379$	16.935	0.705	0.89077

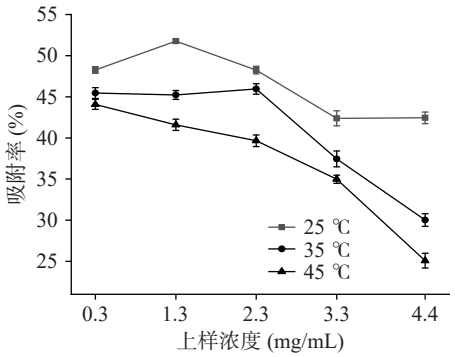


图 2 不同温度下黄酮在 HPD500 树脂上的吸附等温线

Fig.2 Adsorption isotherm of flavonoids on HPD500 resin at different temperatures

不利于吸附。同时，随着上样浓度的升高，黄酮吸附率降低，这可能是由于黄酮浓度过高，抑制其在树脂内的扩散，占据黄酮在树脂上的吸附位点，从而加大传质阻力[23]。

2.3.2 吸附热力学参数 对焓变（ΔH）、吉布斯自由能变（ΔG）和熵变（ΔS）的研究表明，通过 $\ln C_e$ 对 1/T 作 Clapeyron-Clauius 图，得到一条直线 $\ln C_e$=−1081.14849/T+3.15077（图 3），根据直线的斜率得 ΔH 为-8988.6685 J/mol。

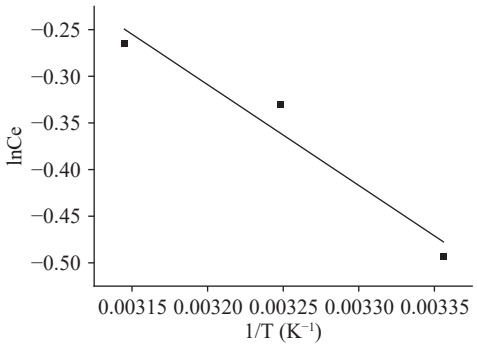


图 3 Clapeyron-Clauius 图

Fig.3 Clapeyron-Clauius diagram

如表 5 所示，列出了 HPD500 树脂上黄酮的热力学参数。ΔG<0，ΔH<0，ΔS<0 表明黄酮吸附是一个自发、放热、熵减的过程。

表 5 HPD500 树脂上黄酮的热力学参数

Table 5 Thermodynamic parameters of flavonoids adsorption on HPD500 resin

ΔH(J·mol⁻¹)	ΔG(J·mol⁻¹)			ΔS(J·mol⁻¹·K)		
	298 K	308 K	318 K	298 K	308 K	318 K
−8989	−3097	−3892	−4442	−19.772	−16.549	−14.299

2.4 超声波辅助的大孔树脂富集工艺优化

2.4.1 超声功率、温度、时间和上样浓度对吸附率的影响 如图 4A 所示，在 120~210 W 范围内，黄酮的吸附率随超声功率的增加而增加，当功率大于 150 W 时，吸附率增加不显著。因此，确定 150 W 为最佳超声功率。如图 4B 所示，吸附率随温度的升高而降

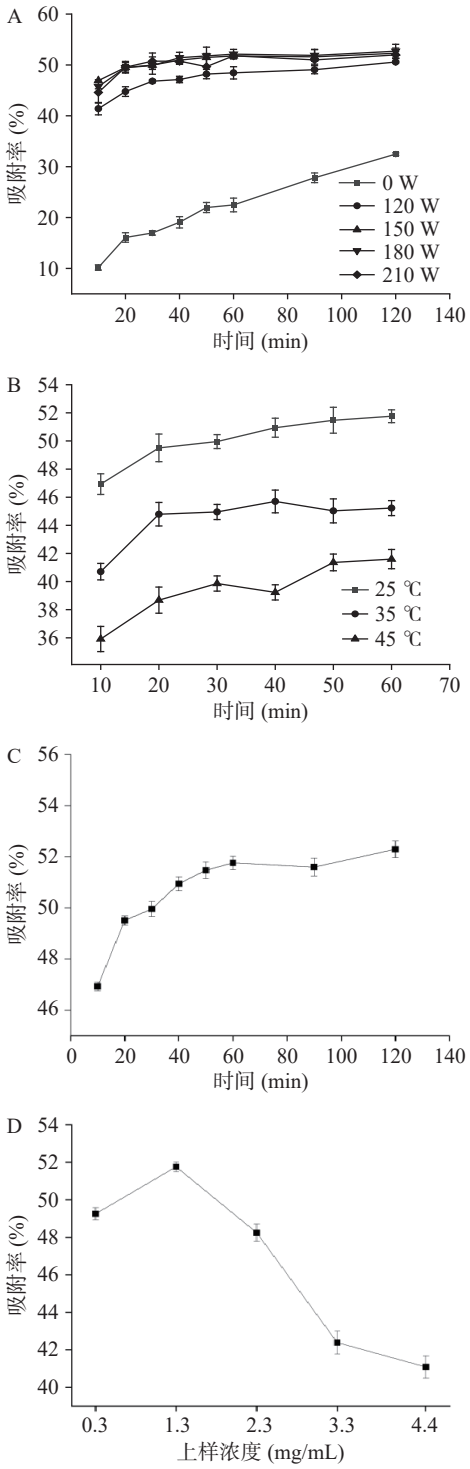


图 4 不同因素对吸附率的影响

Fig.4 Impact of different factors on adsorption rate

注：A.功率对吸附率的影响；B.温度对吸附率的影响；C.时间对吸附率的影响；D.上样浓度对吸附率的影响。

低，在 25 ℃ 时吸附率最高。温度继续升高，可能影响大孔树脂的孔隙结构、表面性质和破坏黄酮的结构[24]，不利于黄酮分子的吸附，导致黄酮吸附率下降。因此，最佳吸附温度为 25 ℃。

如图 4C 所示，黄酮的吸附率随超声时间的增加而增加，当时间超过 60 min，吸附率逐渐达到平衡，并且超声时间过长可导致大孔树脂发生破碎[25]，因此 60 min 为最佳超声时间。黄酮的吸附率随上样浓

度的增加呈现先升高后降低的趋势，在上样浓度为 1.3 mg/mL 时吸附率达到最高值为 51.76%(图 4D)。这可能是由于较低的上样浓度使树脂的吸附效果不佳，而过高的上样浓度可能导致过多的杂质堵塞大孔树脂表面，影响吸附效果[26]。因此，选择 1.3 mg/mL 为最佳上样浓度。

2.4.2　超声功率、温度、时间和乙醇体积分数对解吸率的影响　由图 5A 可知，黄酮的解吸率随超声功率的增加而增加，但超声功率高于 180 W 时增幅不明显。同时，超声功率过高，可能会破坏大孔树脂表面的完整性，不利于重复使用。解吸率随温度的升高而逐渐增加，45 ℃ 时解吸率最大(图 5B)。图 5C 表明，解吸率随超声时间的增加而增加，但 30 min 以后增幅不明显。如图 5D 所示，随乙醇体积分数的增加，黄酮的解吸率呈现一个先升高后降低的趋势，在 70% 时达到解吸最大值 84.65%。乙醇体积分数过低，黄酮的洗脱不完全，会导致解吸率降低，体积分数越高，对树脂与黄酮之间的氢键破坏程度越大[27]。

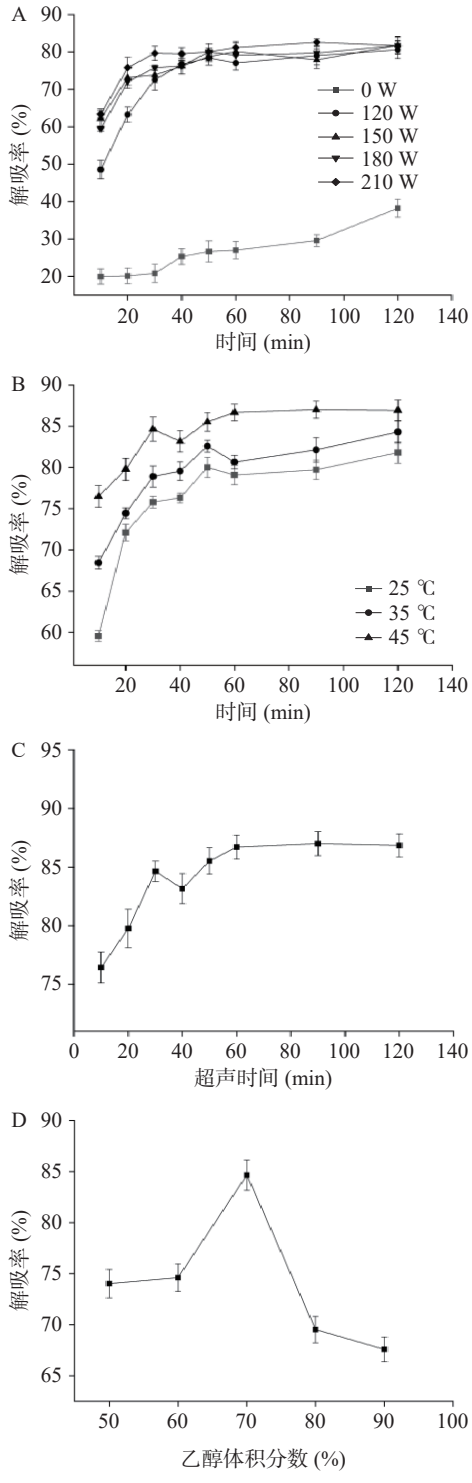


图 5　不同因素对解吸率的影响

Fig.5　Impact of different factors on desorption rate

注：A 为功率对解吸率的影响；B 为温度对解吸率的影响；C 为时间对解吸率的影响；D 为乙醇体积分数对解吸率的影响。

综上，最佳解吸超声功率、温度、时间和乙醇体积分数分别为 180 W、45 ℃、30 min 和 70%。

2.5　AMLF 的 DPPH 自由基清除实验动力学

采用动力学模型评估不同浓度 AMLF 对 DPPH 自由基的清除活性。以 ln(1−E)对 t 作图，回归方程为 ln(1−E)=−kt，其中 E 代表清除率，k 代表反应速率。由表 6 可知，DPPH 自由基的清除反应为一级反应。此外，反应速率常数随纯化 AMLF 浓度的增加而增加。如图 6 所示，在 50 min 时，反应趋于稳定。进行线性回归，ln(1−E)与 t 有良好的线性关系。该结果与 Wei 等[28] 利用双酶辅助盐析法从菟丝子种子中提取的黄酮类化合物清除 DPPH 自由基的动力学行为研究所得的结果相吻合。

表 6　DPPH 自由基清除反应的动力学参数

Table 6　Kinetic parameters of DPPH radical scavenging reaction

动力学参数	160 μg/mL	80 μg/mL
k	0.00759	0.00257
R^2	0.92234	0.99625

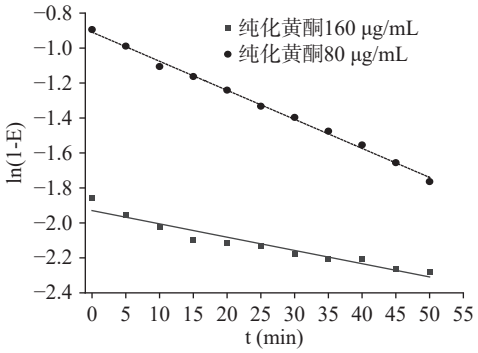


图 6　DPPH 自由基清除的动力学曲线

Fig.6　Kinetic curves of DPPH radical scavenging

2.6　HPLC 定量分析

如图 7 所示，对纯化的 AMLF 提取物中芦丁、金丝桃苷、异槲皮苷、杨梅素和槲皮素 5 种黄酮单体进行定量分析，根据标准曲线计算纯化后的 5 种黄酮单体含量分别为 3.579、53.83、0.01、0.316 和 7.791 mg/g。

2.7　AMLF 对小鼠抗氧化活性和免疫因子的影响。

如图 8 所示，与 CK 组相比，L 组和 M 组在体重

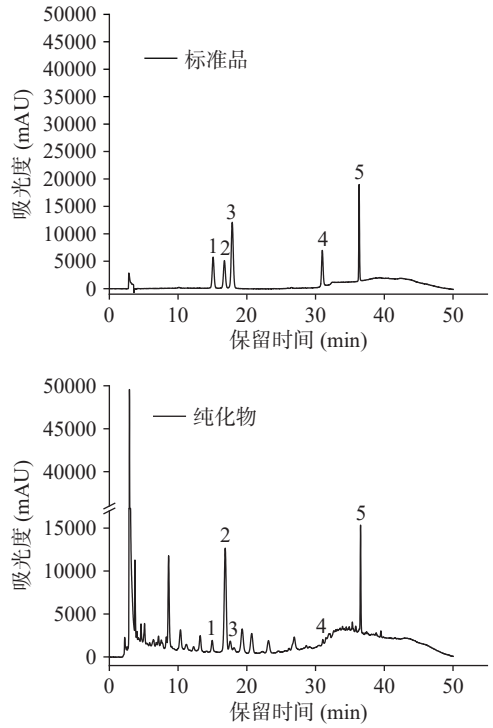


图 7 超声辅助纯化后 5 种黄酮类化合物的 HPLC 分析

Fig.7 HPLC analysis of five flavonoid compounds before and after ultrasound-assisted purification

注: 1: 芦丁; 2: 金丝桃苷; 3: 异槲皮苷; 4: 杨梅素; 5: 槲皮素。

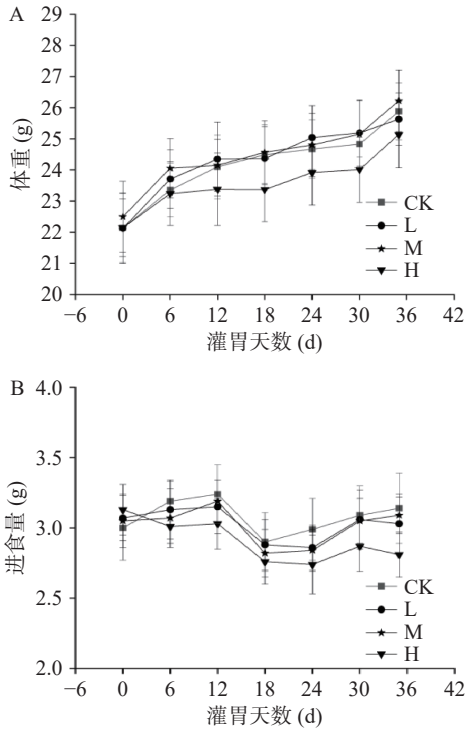


图 8 小鼠体重和进食量变化

Fig.8 Changes in body weight and food intake of mice

注: A 为小鼠体重变化; B 为小鼠进食量变化。

和进食量上差异不明显, 而 H 组体重下降, 进食量也显著下降(P<0.05), 可能是由于高剂量的 AMLF 抑制了小鼠食欲导致其体重下降, 这与高剂量荷叶黄酮显著降低大鼠体重增长的研究结果一致[29]。为探究 AMLF 对小鼠抗氧化和免疫的影响, 比较了不同组别小鼠血清和小肠进行抗氧化和免疫因子含量。由表 7 可知, 与 CK 组相比, H 组 CAT 含量显著提高了 67.43%(P<0.05), MDA 含量显著降低了 50.41%(P<0.05), IL-2 含量也显著提高(P<0.05), 表明 AMLF 可增强小鼠机体抗氧化和免疫能力。

2.8 AMLF 对小鼠肠道菌群的影响

2.8.1 肠道菌群多样性分析 肠道菌群 Alpha 多样性分析主要用于评估样本中微生物群落的丰富度和多样性[30]。其中, Ace 指数主要反映群落的丰富度, Ace 指数越大, 说明群落的丰富度越大。Simpson 指数则主要反映群落的多样性, Simpson 指数越小, 群落多样性越高, 呈负相关关系。如图 9A 和图 9B 所示, 与 CK 组相比, L、M 和 H 组 Ace 指数均升高, 其中 H 组升高较为显著(P<0.05), M 和 H 组 Simpson 指数显著下降(P<0.05), 说明 AMLF 可以增加小鼠肠道菌群物种丰富度和多样性。

Beta 多样性是一种衡量不同微生物群落之间物种多样性差异的指标, 它通过比较群落间的物种组成来揭示样本间的微生物群落结构差异[31]。为了直观地展示这些差异, 可通过主坐标分析(PCoA)来反映样本间的差异。如图 9C 所示, 不同剂量处理组与 CK 组在 PCoA 图上显示出明显的分离趋势, 表明 AMLF 处理对小鼠肠道微生物群落结构产生了显著影响(P=0.001), 这一结果提示黄酮可能通过改变肠道微生物群落结构, 进而影响宿主的生理功能。

表 7 抗氧化指标和免疫因子含量变化

Table 7 Changes in antioxidant indicators and immune factor levels

器官组织	指标	CK	L(80 mg/kg)	M(160 mg/kg)	H(320 mg/kg)
血清	IL-1β(pg/mL)	136.99±4.24^a	135.30±3.85^a	133.53±6.76^a	131.49±6.62^a
	IL-2(pg/mL)	698.50±4.40^b	703.10±4.55^b	713.50±4.44^a	716.70±3.85^a
	IgG(g/L)	40.34±3.19^a	42.79±1.80^a	43.47±1.16^a	44.31±2.80^a
小肠	T-AOC(U/mg prot)	2.83±0.41^a	2.92±0.28^a	3.12±0.44^a	3.33±0.41^a
	CAT(U/mg prot)	22.57±8.47^b	24.37±5.5^b	25.82±8.92^b	37.79±1.66^a
	SOD(U/mg prot)	77.18±9.03^a	81.87±6.86^a	82.08±4.97^a	87.28±8.92^a
	MDA(nmol/mg prot)	1.21±0.11^a	1.14±0.32^a	1.05±0.26^a	0.60±0.10^b
	sIgA(pg/mL)	32.49±2.36^a	32.69±1.84^a	33.41±2.20^a	33.93±1.93^a

注: 同一指标不同小写字母表示差异显著, P<0.05。

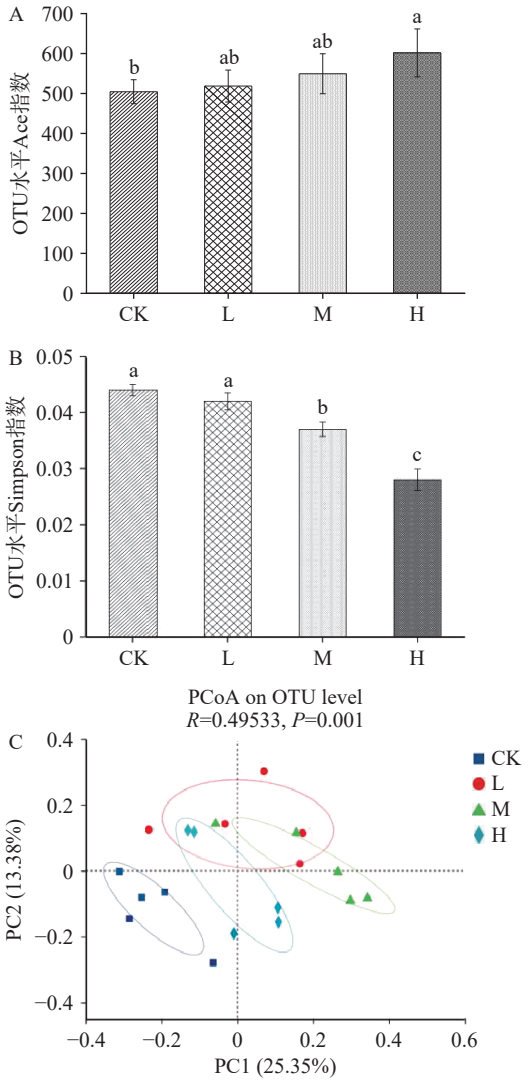


图 9　肠道菌群 Alpha 多样性指数与 PCoA 分析结果

Fig.9　Alpha diversity index of gut microbiota and PCoA analysis results

注：A. Ace 指数；B. Simpson 指数；C. PCoA。同一指标不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

2.8.2　肠道菌群丰度的变化　通过与数据库比对，将 OTU 在不同的分类等级进行分类并注释，得到物种注释柱状图。如图 10A 所示，在门水平上，不同处理组的优势菌群均为厚壁菌门（Firmicutes，F）和拟杆菌门（Bacteroidota，B），占肠道菌群丰度的 95% 以上。如图 10B 所示，与 CK 组相比，L、M 和 H 组厚壁菌门丰度均下降，F/B 比值显著降低，有助于维持肠道健康[32]。在属水平上，拟杆菌属（norank_f_*Muribaculaceae*）、乳酸杆菌属（*Lactobacillus*）、毛螺菌科 NK4A136 菌属、norank_f_norank_o_*Clostridia*_UCG-014、unclassified_f_*Lachnospiraceae*、普雷沃菌属（*Prevotellaceae*_UCG-001）和拟杆菌属（*Bacteroides*）为优势菌属，总相对丰度大于 60%（图 10C）。有研究表明，肠道菌群乳酸杆菌的丰度增加，可以提高短链脂肪酸的含量，对肠道菌群起积极作用[33]；*Prevotellaceae*_UCG _001 能够缓解糖脂代谢紊乱，对人体有益[34]。*Colidextribacter* 的丰度增

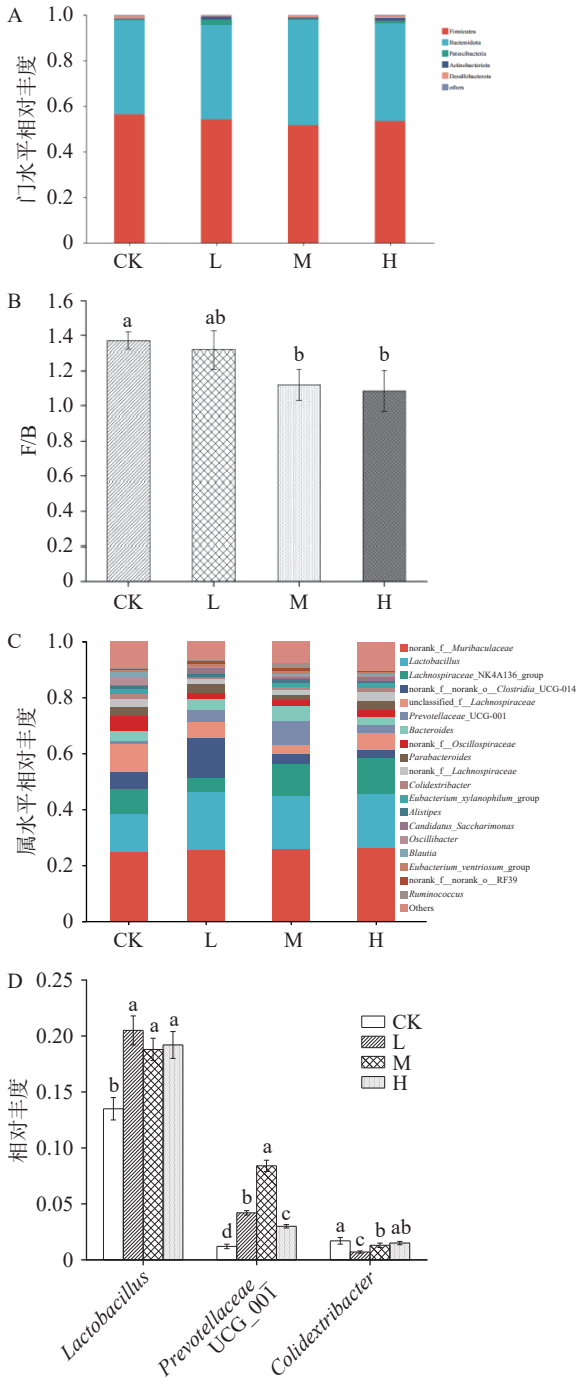


图 10　小鼠肠道菌群门、属水平变化

Fig.10　Changes in the gut microbiota of mice at the phylum and genus levels

注：A. 门水平变化；B. 厚壁菌门/拟杆菌门的比率；C. 属水平变化；D. 益生菌和有害菌相对丰度。同一指标不同小写字母表示差异显著，$P<0.05$。

加与肥胖和代谢紊乱相关[35]。如图 10D所示，与 CK 组相比，L、M 和 H 组的乳酸杆菌属（*Lactobacillus*）和普雷沃菌属（*Prevotellaceae*_UCG-001）的相对丰度均提高，*Colidextribacter* 的相对丰度降低（$P<0.05$）。以上结果表明 AMLF 可能通过增加益生菌并减少有害菌的相对丰度，优化肠道菌群结构以维持稳态。

2.8.3　粪便 SCFAs 分析　SCFAs 是哺乳动物能量代

谢和合成代谢的重要底物，饮食驱动的微生物多样性变化会导致 SCFAs 的变化，在维持肠道稳态中有重要作用[36]。乙酸能够通过降低细胞因子的表达缓解炎症[37]；丙酸可以抑制白细胞介素（IL-6）和活性氧的表达来缓解细胞中炎症[38]；丁酸能够通过激活 Nrf2 信号通路，增强抗氧化酶活性，减轻氧化应激[39]。如图 11 所示，乙酸（Acetic acid）、丙酸（Propanoic acid）和丁酸（Butanoic acid）是各组小鼠中最主要的 SCFAs。与 CK 组相比，L、M 和 H 组的三种主要 SCFAs 均升高（$P<0.05$），表明 AMLF 可能通过调节肠道菌群的结构，促进短链脂肪酸的产生与积累，进而调节肠道微生态，缓解炎症反应，减轻氧化应激。

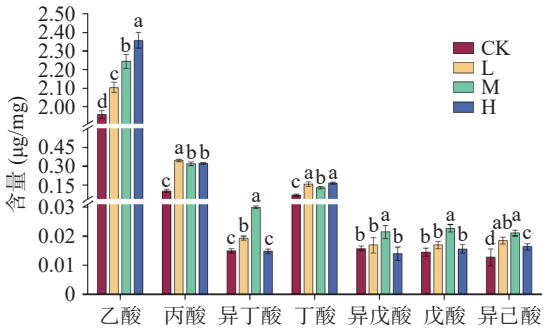


图 11 7 种短链脂肪酸含量

Fig.11 Content of seven short-chain fatty acids

注：不同小写字母表示数据差异显著，$P<0.05$。

2.8.4 总丰度前 20 属与环境因子的相关性分析

为了探究小鼠肠道微生物群与 SCFAs，免疫因子和抗氧化指标之间的关系，通过皮尔逊等级相关方法从属水平上对肠道微生物群与上述环境因子进行相关性分析。如图 12 所示，优势菌乳酸杆菌属（g_*Lactobacillus*）与 SCFAs、SOD、CAT 和 T-AOC 呈正相关，与 MDA 呈负相关，与免疫因子 IL-2、sIgA 和 IgG 呈正相关，与促炎因子 IL-1β 呈负相关。归荣[40]研究发现，地黄低聚糖处理的 LPS 诱导的炎症小鼠肠道中，乳酸杆菌与 SCFAs、SOD 和 CAT 活性呈正相关，与 IL-1β 呈负相关，本研究结果与之一致。*Prevotellaceae*_UCG_001 促进了短链脂肪酸的生成，而 g_*Colidextribacter* 则抑制了 SCFAs 的生成，其中对异己酸具有显著作用（$P<0.01$）。结合肠道菌群变化，AMLF 增加了 *Lactobacillus* 和 *Prevotellaceae*_UCG_001 的相对丰度，降低了 g_*Colidextribacter* 的相对丰度，因此，推测 AMLF 能够增加有益菌的相对丰度，降低有害菌的相对丰度，促进 SCFAs 的生成，提高了抗氧化活性和免疫活性，对维持肠道菌群健康有重要作用。

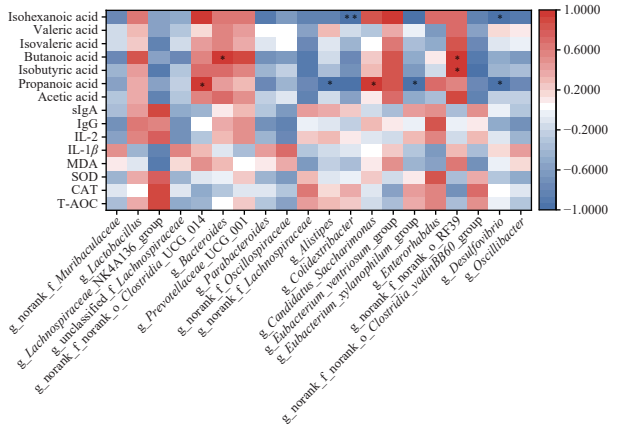


图 12 总丰度前 20 属与短链脂肪酸的相关性分析

Fig.12 Correlation analysis between the top 20 genera of total abundance and short-chain fatty acids

注：*$P<0.05$，**$P<0.01$。

3 结论

本研究通过超声辅助大孔树脂技术纯化 AMLF，在测试的 7 种树脂中，HPD500 吸附/解吸能力表现出最佳特性。采用单因素实验确定最佳纯化工艺：超声功率设定为 150 W，温度维持在 25 ℃，处理时间为 60 min，上样浓度为 1.3 mg/mL，吸附率最高达 51.76%；超声功率 180 W，处理时间 30 min，温度 45 ℃，乙醇体积分数 70%，解吸率最高达 84.65%，AMLF 纯度提高了约 9 倍，为 AMLF 的纯化提供了一种高效的途径。纯化黄酮对 DPPH 自由基表现出非常强的浓度依赖性抗氧化能力。高剂量组小鼠小肠中 CAT 含量较 CK 组提高了 67.43%，MDA 含量降低了 50.41%。AMLF 的干预促进了肠道菌群中 *Lactobacillus* 和 *Prevotellaceae*_UCG_001 等益生菌的生成，降低有害菌 *Colidextribacter* 的产生。这些有益菌可以促进 SCFAs 的生成，减少炎症因子的产生，调节免疫因子，增强抗氧化能力，从而促进机体健康。本研究不仅为 AMLF 的绿色高效大规模分离纯化提供数据参考，还显示了其在营养保健品领域的潜在应用。

© 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] 陈妍竹，楚洪涛，周宇涵，等. 金花葵花粗多酚的提取工艺优化及其体外抗氧化活性分析[J/OL]. 分子植物育种，1−10[2025-02-24]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220715.0923.002. [CHEN Yanzhu, CHU Hongtao, ZHOU Yuhan, et al. Optimization of the extraction process of crude polyphenols from *Abelmoschus manihot* L. and antioxidant activity *in vitro* at different flowering stages[J]. Molecular Plant Breeding, 1−10[2025-02-24]. https://link.cnki.net/urlid/46.1068.S.20220715.0923.002.]

[2] 范慧涛，尉文彬，王岩，等. 张家口地区金花葵的生长情况[J]. 黑龙江农业科学，2020(3)：74−77. [FAN Huitao, WEI Wenbin, WANG Yan, et al. Growth situation of *Hibiseu manihot* L. in Zhangjiakou area[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(3): 74−77.]

[3] 邱金玲，刘朋，熊维政，等. 金花葵中金丝桃苷的含量测定[J]. 中医学报，2015, 30(12)：1793−1795. [QIU Jinling, LIU Peng, XIONG Weizheng, et al. Determination of the content of hyperin in Jinhuakui by HPLC method[J]. China Journal of Chinese

Medicine, 2015, 30(12): 1793−1795.］
［4］ PAN Xinxin, DU Leyue, TAO Jinhua, et al. Dynamic changes of flavonoids in *Abelmoschus manihot* different organs at different growth periods by UPLC–MS/MS[J]. Journal of Chromatography B, 2017, 1059: 21−26.
［5］ 杜星芳, 贾艳丽, 韩紫薇, 等. 菜芙蓉多糖对秀丽隐杆线虫抗氧化作用的研究[J]. 河北科技大学学报, 2022, 43(3): 308−318.［DU Xingfang, JIA Yanli, HAN Ziwei, et al. Study on antioxidantactivity of *Abelmoschus manihol* (L.) medic polysaccharide on *Caenorhabdilis elegans*[J]. Journal of Hebei University of Science and Tecchnology, 2022, 43(3): 308−318.］
［6］ 杨胜男, 赵斗, 蔡梦权, 等. 基于网络药理学和分子对接探究菜芙蓉黄酮的免疫调节机制研究[J]. 中国畜牧杂志, 2024, 60(12): 309−318.［YANG Shengnan, ZHAO Dou, CAI Mengquan, et al. Exploring the immune mechanism of flavonoids from *Abelmoschus manihot* (L.) Medic based on network pharmacology and molecular docking[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2024, 60(12): 309−318.］
［7］ 张月琴, 王紫薇, 叶文峰. 金花葵治疗高脂血症的研究进展[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2022, 38(5): 58−61.［ZHANG Yueqin, WANG Ziwei, YE Wenfeng. Research progress of *Aurea* helianthus in the treatment of hyperlipidemia[J]. Journal of Shanxi Datong University (Natural Science Edition), 2022, 38(5): 58−61.］
［8］ 代继云, 吴洪新, 刘宇宁, 等. 尖叶胡枝子总黄酮的纯化工艺及抗氧化活性研究[J]. 中国饲料, 2025(7): 83−88.［DAI Jiyun, WU Hongxin, LIU Yuning, et al. Purification process and antioxidant activity of total flavonoids from *Lespedeza hedysaroides*[J]. China Feed, 2025(7): 83−88.］
［9］ SHEN Dongbei, LABRECHE F, WU Caie, et al. Ultrasound-assisted adsorption/desorption of jujube peel flavonoids using macroporous resins[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130800.
［10］ PAN Lixia, YE Hangyu, PI Xionge, et al. Effects of several flavonoids on human gut microbiota and its metabolism by *in vitro* simulated fermentation[J]. Frontiers in Microbiology, 2023, 14: 1092729.
［11］ HUSSAIN Y, LUQMAN S, MEENA A. Research progress in flavonoids as potential anticancer drug including synergy with other approaches[J]. Current Topics in Medicinal Chemistry, 2020, 20(20): 1791−1809.
［12］ ZHU Xiaoya, GUO Ruirui, SU Xiayu, et al. Immune-enhancing activity of polysaccharides and flavonoids derived from *Phellinus igniarius* YASH1[J]. Frontiers in Pharmacology, 2023, 14: 1124607.
［13］ 白玉琴, 刘宏, 王焕芸. 两种比色法测定荞麦降糖颗粒中总黄酮的含量[J]. 内蒙古医科大学学报, 2017, 39(1): 30−33,40.［BAI Yuqin, LIU Hong, WANG Huanyun. Determination of total flavonoids in buckwheat hypoglycemic granules by two colorimetric methods[J]. Journal of Inner Mongolia Medical University, 2017, 39(1): 30−33,40.］
［14］ WU Yue, HAN Yongbin, TAO Yang, et al. Ultrasound assisted adsorption and desorption of blueberry anthocyanins using macroporous resins[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 48: 311−320.
［15］ LIN Yuyang, ZENG Huiyun, WANG Ke, et al. Microwave-assisted aqueous two-phase extraction of diverse polysaccharides from *Lentinus edodes*: Process optimization, structure characterization and antioxidant activity[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 136: 305−315.
［16］ LAI X, LIANG H, ZHAO Y, et al. Simultaneous determination of seven active flavonols in the flowers of *Abelmoschus manihot* by HPLC[J]. Journal of Chromatographic Science, 2009, 47(3): 206−210.
［17］ 仇燕, 李俊英, 刘畅, 等. 菜芙蓉总黄酮纯化及其体内抗氧化性[J]. 河北科技大学学报, 2016, 37(6): 587−593.［QIU Yan, LI Junying, LIU Chang, et al. Purification of total flavonoids of *Abelmoschus manihot* (L.) Medic and its antioxidant properties *in vivo*[J]. Journal of Hebei University of Science and Tecchnology, 2016, 37(6): 587−593.］
［18］ 王冰倩, 周瑾欣, 魏星, 等. 超声辅助大孔树脂技术富集荆芥穗中总黄酮和总酚的工艺研究[J]. 中草药, 2023, 54(17): 5541−5549.［WANG Bingqian, ZHOU Jinxin, WEI Xing, et al. Research on process of enriching total flavonoids and total phenols in *Schizonepetae spica* by ultrasound-assisted macroporous resin technology[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2023, 54(17): 5541−5549.］
［19］ BARANYIKA J B, BAKIRE S, PU Shoucheng, et al. Application of the selected macroporous resin for the separation and identification of flavonoids from Chinese *Radix* Pueraria *Lobata* by HPLC-Q-TOF-MS[J]. Microchemical Journal, 2024, 196: 109662.
［20］ 赵嘉琪, 史昌明, 佟敏, 等. 生物质电厂飞灰吸附脱 Cd 性能及动力学研究[J]. 化学工程与技术, 2021, 11(3): 8.［ZHAO Jiaqi, SHI Changming, TONG Min, et al. Adsorption and kinetic characteristics of Cd removal by fly ash from biomass power[J]. Chemical Engineering and Technology, 2021, 11(3): 8.］
［21］ LEYTON A, VERGARA-SALINAS J R, PÉREZ-CORREA J R, et al. Purification of phlorotannins from *Macrocystis pyrifera* using macroporous resins[J]. Food Chemistry, 2017, 237: 312−319.
［22］ 晏俊玲, 樊扬, 秦川, 等. 苦竹笋总黄酮大孔树脂纯化工艺及其体外抗炎活性研究[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(23): 184−192.［YAN Junling, FAN Yang, QIN Chuan, et al. Purification of total flavonoids from bamboo shoots of *Pleioblastus amarus* with macroporous resin and its anti-inflammation activity[J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(23): 184−192.］
［23］ 孙敬敬, 杨瑞金, 杨进洁, 等. 核桃种皮多酚的大孔树脂法分离与液质联用法鉴定[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(11): 136−142.［SUN Jingjing, YANG Ruijin, YANG Jinjie, et al. Walnut pellicle polyphenols: Separation with macroporous resin and identification with UPLC-TOF-MS/MS[J]. Food and Fermentation Industries Editorial Staff, 2022, 48(11): 136−142.］
［24］ 王瑜婷, 曹嵌, 何荣荣, 等. 淫羊藿总黄酮提取工艺优化与抗氧化活性研究[J]. 现代中药研究与实践, 2023, 37(3): 71−76.［WANG Yuting, CAO Qian, HE Rongrong, et al. Study on the optimization of extraction and the anti-oxidant activity of total flavonoids in *Epimedii folium*[J]. Research and Practice on Chinese Medicines, 2023, 37(3): 71−76.］
［25］ TAO Yang, WU Pengfei, DAI Yanxian, et al. Bridge between mass transfer behavior and properties of bubbles under two-stage ultrasound-assisted physisorption of polyphenols using macroporous resin[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 436: 135158.
［26］ 谢青云, 胥维昌, 王远, 等. 大孔树脂同时分离纯化黄蜀葵花总黄酮和多糖工艺优化[J]. 离子交换与吸附, 2023, 39(1): 36−49.［XIE Qingyun, XU Weichang, WANG Yuan, et al. Process optimization of simultaneous separation and purification of total flavonoids and polysaccharides from *Abelmoschusmanihot* flowers with macroporous[J]. Resin Ion Exchange and Adsorption, 2023, 39(1): 36−49.］
［27］ GUO Linxin, QIANG Taotao, MA Yangmin, et al. Purifica-

tion and characterization of hydrolysable tannins extracted from *Coriaria nepalensis* bark using macroporous resin and their application in Gallic acid production[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 162: 113302.

[28] WEI Yingqin, SUN Manman, FANG Haiyan. Dienzyme-assisted salting-out extraction of flavonoids from the seeds of *Cuscuta chinensis* Lam[J]. Industrial Crops and Products, 2019, 127: 232−236.

[29] 胡榴燕. 荷叶黄酮对高血脂大鼠调节血脂及抗氧化作用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006. [HU Liuyan. Study on the lipid-regulating and antioxidant effects of lotus leaf flavonoids in hyperlipidemic rats[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.]

[30] 程小英, 詹扬, 周衍安, 等. 乳酸菌素对幽门螺杆菌感染性胃炎小鼠炎症和肠道菌群的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(10): 316−324. [CHENG Xiaoying, ZHAN Yang, ZHOU Yan'an, et al. Effects of lacidophilin on inflammation and intestinal microbiota in mice with *Helicobacter pylori* induced gastritis[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(10): 316−324.]

[31] CHEN Biyuan, HE Xueyi, PAN Bangquan, et al. Comparison of beta diversity measures in clustering the high-dimensional microbial data[J]. PLoS One, 2021, 16(2): e0246893.

[32] MAYERHOFER C C K, KUMMEN M, HOLM K, et al. Low fibre intake is associated with gut microbiota alterations in chronic heart failure[J]. ESC Heart Failure, 2020, 7(2): 456−466.

[33] PARK B H, KIM I S, PARK J K, et al. Probiotic effect of *Lactococcus lactis* subsp. cremoris RPG-HL-0136 on intestinal mucosal immunity in mice[J]. Applied Biological Chemistry, 2021, 64(1): 93.

[34] SONG Xiaofeng, ZHONG Liang, LÜ Na, et al. Inulin can alleviate metabolism disorders in ob/ob mice by partially restoring leptin-related pathways mediated by gut microbiota[J]. Genomics, Proteomics & Bioinformatics, 2019, 17(1): 64-75.

[35] TIAN Baoming, HUANG Pinjiao, PAN Yizhu, et al. Tea polyphenols reduced obesity by modulating gut microbiota-SCFAs-barrier and inflammation in high-fat diet-induced mice[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2024, 68(24): 2400685.

[36] SCHÖNFELD P, WOJTCZAK L. Short- and medium-chain fatty acids in energy metabolism: The cellular perspective[J]. Journal of Lipid Research, 2016, 57(6): 943−954.

[37] YANG Hongguang, MENG Lan, AI Dengbin, et al. Acetic acid alleviates the inflammatory response and liver injury in septic mice by increasing the expression of TRIM40[J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2019, 17(4): 2789−2798.

[38] XIA Wen, DAI Xiaoyue, DING Longkun, et al. Three main short-chain fatty acids inhibit the activation of THP-1 cells by *Mycoplasma pneumoniae*[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2021, 85(4): 923−930.

[39] KALYANARAMAN B, CHENG Gang, HARDY M. Gut microbiome, short-chain fatty acids, alpha-synuclein, neuroinflammation, and ROS/RNS: Relevance to Parkinson's disease and therapeutic implications[J]. Redox Biology, 2024, 71: 103092.

[40] 归荣. 地黄低聚糖对 LPS 诱导小鼠肠道炎症及屏障损伤的保护作用研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2023. [GUI Rong. Study on the protective effects of *Rehmannia Glutinosa* oligosaccharides on lps-induced intestinal inflammation and barrier damage in mice[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2023.]