

## 基于 AHP-CRITIC 混合加权法优选芒果叶提取工艺及其促消化作用研究

丁世磊<sup>1,2</sup>, 温海梅<sup>1</sup>, 王婉瑜<sup>1</sup>, 李曼玲<sup>1</sup>, 秦健峰<sup>2</sup>, 邓家刚<sup>2\*</sup>

1. 广西中医药大学 药学院, 广西 南宁 530200

2. 广西中医药大学 广西中药药效研究重点实验室, 广西 南宁 530200

**摘要:** **目的** 结合化学与生物评价指标, 采用层次分析(AHP)-基于指标相关性的权重确定方法(CRITIC)复合加权优选芒果叶提取工艺, 并对其促消化活性进行评价, 为芒果叶药用开发提供实验依据。**方法** 建立芒果叶提取物中多酚、黄酮含量和胰脂肪酶抑制活性的分析方法; 以乙醇体积分数、提取温度、料液比、提取时间为考察因素, 筛选关键工艺参数; 分别运用 AHP 法、CRITIC 法及 AHP-CRITIC 混合加权法确定各指标权重, 结合 Box-Behnken 响应面(BBD-RSM)法优化提取工艺, 并测定提取物对胰脂肪酶的半数抑制浓度(IC<sub>50</sub>); 构建大鼠胃肠积滞模型, 从胃排空率、小肠推进率、胃动素含量及胃组织病理形态方面评价提取物体内促消化作用。**结果** 乙醇体积分数对各项评价指标影响最为显著; AHP-CRITIC 混合加权法兼顾主观与客观赋权优势, 所建响应面模型拟合效果良好。确定最优提取工艺为乙醇体积分数 60%、提取温度 70 ℃、料液比 1:18。该工艺所得提取物对胰脂肪酶的半数抑制浓度(IC<sub>50</sub>)为(5.022±0.006) mg·mL<sup>-1</sup>; 动物实验表明, 芒果叶提取物可显著提升模型大鼠胃排空率、小肠推进率与胃动素含量, 同时修复受损胃组织。**结论** AHP-CRITIC 混合加权法联合 BBD-RSM 法可有效优化芒果叶提取工艺, 所得提取物具备良好的体外胰脂肪酶抑制活性与体内促消化作用, 可为芒果叶的质量研究、资源化利用及促消化相关产品研发提供参考。

**关键词:** 芒果叶; AHP-CRITIC 混合加权法; 提取工艺; 响应面法; 促消化

**中图分类号:** R285.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6376(2026)07-2384-09

**DOI:** 10.7501/j.issn.1674-6376.2026.07.012

## Optimization of extraction technology based on AHP-CRITIC mixed entropy method and digestive-promoting effect in *Mangifera indica* leaves

DING Shilei<sup>1,2</sup>, WEN Haimei<sup>1</sup>, WANG Wanyu<sup>1</sup>, LI Manling<sup>1</sup>, QIN Jianfeng<sup>2</sup>, DENG Jiagang<sup>2</sup>

1. School of Pharmacy, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China

2. Guangxi Key Laboratory of Efficacy Study on Chinese Materia Medica, Guangxi University of Chinese Medicine, Nanning 530200, China

**Abstract: Objective** To optimize the extraction process of mango *Mangifera indica* extract using a combined weighting method integrating Analytic Hierarchy Process (AHP) and Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation (CRITIC), based on chemical and biological evaluation indicators, and to evaluate its digestive-promoting effect, thereby providing experimental support for the medicinal development of *M. indica* leaves. **Methods** An analytical method was established to determine polyphenol and flavonoid contents and pancreatic lipase inhibitory activity in *M. indica* leaves extracts. Ethanol concentration, extraction temperature, solid-liquid ratio, and extraction time were selected as key process variables. The weights of each indicator were determined separately by AHP, CRITIC, and the hybrid AHP-CRITIC weighting method, and the extraction process was optimized using Box-Behnken design-response surface methodology (BBD-RSM). A rat model of gastrointestinal stagnation was constructed to evaluate the *in vivo* motility-promoting effects of the extract through gastric emptying rate, small intestinal transit rate, motilin levels, and histopathological changes in gastric tissue. The half-maximal inhibitory concentration (IC<sub>50</sub>) of the extract against pancreatic lipase was also measured. **Results** Ethanol concentration had the most significant effect on all evaluated parameters. The AHP-CRITIC hybrid weighting method

收稿日期: 2026-03-06

**基金项目:** 广西自然科学基金项目(2024GXNSFBA010168, 2025GXNSFAA069493); 大学生创新训练计划项目(S202410600111); 广西中药药效研究重点实验室项目(桂科计字(2005)6号); 农作物废弃物功能成分研究协同创新中心资助课题(CICAR2023-P1)

**作者简介:** 丁世磊(1990—), 男, 博士, 副教授, 主要从事中药药效物质基础研究。E-mail: dshilei1234@126.com

**\*通信作者:** 邓家刚, 男, 博士生导师, 教授, 主要从事中药基础理论和中药药效筛选研究。E-mail: dengjg53@126.com

effectively combined subjective and objective weighting advantages, and the resulting response surface model showed excellent fitting performance. The optimal extraction conditions were identified as 60% ethanol concentration, 70 °C extraction temperature, and a solid-liquid ratio of 1 : 18. The  $IC_{50}$  value of the extract against pancreatic lipase under these conditions was  $(5.022 \pm 0.006) \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ . Animal experiments demonstrated that *M. indica* leaves extract significantly improved gastric emptying rate, small intestinal transit rate, and motilin levels in model rats, while also repairing damaged gastric tissues. **Conclusion** The combination of AHP-CRITIC hybrid weighting with BBD-RSM is effective in optimizing the *M. indica* leaves extraction process. The obtained extract exhibits strong *in vitro* inhibition of pancreatic lipase and significant *in vivo* gastrointestinal motility-promoting effects, offering valuable insights for quality research, resource utilization, and the development of digestive-promoting products from *M. indica* leaves.

**Key words:** *Mangifera indica* L. leaves; AHP-CRITIC hybrid weighting method; extraction process; response surface; digestive-promoting effect

芒果叶为漆树科芒果属植物芒果 *Mangifera indica* L. 的干燥叶片, 是我国经典壮瑶特色药材, 传统中医理论认为其具备行气消滞、生津消渴等药用功效, 临床常用于治疗热滞腹痛、腹部鼓胀、小儿疳积等症候<sup>[1-3]</sup>。芒果叶化学成分丰富, 主要包含黄酮类、二甲苯酮类、酚酸类、木脂素及三萜类等活性成分<sup>[4]</sup>。现代药理研究证实, 芒果叶兼具良好的抗炎、抗菌、抗肿瘤、抗氧化与免疫调节等多种药理活性<sup>[5]</sup>。作为芒果叶核心传统功效, 其行气消滞作用对应的药效物质基础与分子作用机制, 目前仍缺乏系统、深入的现代药理佐证, 相关作用机制亟待进一步挖掘阐释。

本课题组前期依托网络药理学结合指纹图谱技术开展初步探究<sup>[6]</sup>, 推测芒果叶内黄酮、多酚类活性成分是其发挥行气消滞药效的核心物质基础。胰脂肪酶可将膳食脂肪水解为脂肪酸、甘油等小分子物质, 进而提升机体消化吸收效率; 通过抑制胰脂肪酶活性, 能够加快体内油脂代谢排出、促进胃肠排空, 在减脂控重及防控肥胖相关性疾病方面具有积极作用<sup>[7-8]</sup>, 也可为行气消滞类中药材的药效评价提供可靠生物学评价思路。以黄酮、多酚 2 类化学成分含量, 联合胰脂肪酶抑制活性作为双重评价指标优化芒果叶提取工艺, 能够为其消滞相关药效研究筑牢实验基础。

鉴于此, 本研究采用层次分析 (AHP)-基于指标相关性的权重确定方法 (CRITIC) 混合加权, 结合单因素实验与 Box-Behnken 设计-响应面法 (BBD-RSM)<sup>[9]</sup>, 以黄酮、多酚质量分数及胰脂肪酶抑制率构建综合评价体系, 筛选确定芒果叶最优提取工艺参数, 为明晰其行气消滞功效物质基础提供实验依据; 同时利用最优工艺制备芒果叶提取物开展体内外促消化活性验证实验, 旨在为芒果叶行气消滞传统药用功效赋予现代科学理论支撑。

## 1 材料

### 1.1 药物与主要试剂

芒果叶均采自广西省百色市田东县芒果种植园, 经广西中医药大学壮医药学院韦松基教授鉴定, 为漆树科芒果属植物芒果 *Mangifera indica* L. 的叶子。样品自然晒干后粉碎, 过 30~50 号筛, 备用。亚硝酸钠、九水合硝酸铝、无水乙酸钠、福林酚、曲拉通 X-100, 分析纯; 脂肪酶 (猪胰腺, 批号 L812481); 月桂酸-4-硝基苯脂 (批号 N159738, 质量分数 98.00%), 均购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 3,4,5-三羟基苯甲酸 (批号 CNA952, 质量分数 99.99%), 默克 (上海) 贸易有限公司。高脂高蛋白饲料 (蛋白质质量分数 38.25%, 脂肪质量分数 12.90%), 科澳协力 (天津) 饲料有限公司。胃动素试剂盒 (货号 MK2032A), 江苏苏酶科生物科技有限公司。

### 1.2 主要仪器

DEVICES 酶标仪, 美谷分子仪器 (上海) 有限公司; UV-19001 紫外可见分光光度计, 岛津仪器 (苏州) 有限公司。

## 2 方法与结果

### 2.1 评价指标分析方法与结果

**2.1.1 芒果叶的提取** 称取芒果叶粉末 2.0 g, 分别于一定乙醇体积分数、提取温度、提取时间和料液比条件下进行提取, 滤过, 滤液定容至 50 mL。

**2.1.2 多酚含量分析** 参考裴文清等<sup>[10]</sup>报道方法绘制没食子酸标准曲线, 得到标准曲线方程  $Y = 0.0797X + 0.0039$ ,  $R^2 = 0.9993$ , 线性范围 1.028~5.140  $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。为了控制颜色, 吸取定容溶液 0.2 mL 稀释到 5 mL, 再取 0.2 mL 到 10.0 mL 进行测定。

**2.1.3 黄酮含量分析** 参考罗小莉等<sup>[11]</sup>报道方法绘制黄酮标准曲线, 在 510 nm 波长, 得到标准曲线方程  $Y = 12.283X - 0.0114$ ,  $R^2 = 0.9989$ , 线性范围

0.016~0.083 mg·mL<sup>-1</sup>。吸取定容溶液 0.2 mL 稀释到 10.0 mL 进行测定。

**2.1.4 胰脂肪酶抑制活性实验** 参照陈永丽等<sup>[12]</sup>方法,并根据实验需求进行部分优化调整。首先配制实验所需试剂,其中胰脂肪酶溶液质量浓度为 5.0 mg·mL<sup>-1</sup>,月桂酸-4-硝基苯酯溶液质量浓度为 0.8 mg·mL<sup>-1</sup>。在 96 孔板中,按表 1 分组,依次加入 5 μL 杠果叶浸提液或蒸馏水、磷酸盐缓冲液(PBS, pH 8.0)以及胰脂肪酶溶液;将 96 孔板置于 37 ℃避光恒温条件下孵育 10 min 后,加入 40 μL 月桂酸-4-硝基苯酯溶液,充分摇匀,继续在 37 ℃

避光恒温条件下孵育 20 min;孵育结束后,采用酶标仪在 405 nm 波长下测定各孔吸光度(A)值,并计算酶抑制率。实验设置 3 组平行重复,结果取 3 次重复的平均值。

$$\text{胰脂肪酶抑制率} = 1 - (A_A - A_a) / (A_B - A_b)$$

## 2.2 单因素考察杠果叶提取工艺

**2.2.1 乙醇体积分数考察** 称取杠果叶粉末 2.0 g 分别于体积分数为 40%、50%、60%、70%、80%乙醇溶液中,按料液比 1:10 于 70 ℃回流提取 2 h,过滤,滤液定容至 50 mL,按“2.1”方法测定各评价指标。结果见表 2。随着乙醇体积分数的增加多

表 1 胰脂肪酶抑制活性实验分组及各溶液加入方法

Table 1 Experimental groups for pancreatic lipase inhibition activity and methods of solution addition

| 组别      | 杠果叶提取液/μL | 蒸馏水/μL | PBS/μL | 胰脂肪酶溶液/μL | 月桂酸-4-硝基苯脂/μL |
|---------|-----------|--------|--------|-----------|---------------|
| 样品(A)   | 5         | —      | 20     | 40        | 40            |
| 样品对照(a) | 5         | —      | 60     | —         | 40            |
| 空白(B)   | —         | 5      | 20     | 40        | 40            |
| 空白对照(b) | —         | 5      | 60     | —         | 40            |

表 2 乙醇体积分数的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

Table 2 Effect of ethanol extraction fraction ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

| 乙醇体积分数/% | 多酚(mg·g <sup>-1</sup> ) | 黄酮(mg·g <sup>-1</sup> ) | 胰脂肪酶抑制率/%  |
|----------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 40       | 88.51±1.61              | 26.55±0.90              | 45.01±0.78 |
| 50       | 91.58±1.37              | 27.65±1.28              | 66.72±1.97 |
| 60       | 99.11±1.59              | 31.26±1.00              | 68.50±1.28 |
| 70       | 89.45±0.55              | 28.06±0.97              | 56.15±0.63 |
| 80       | 81.10±1.92              | 26.55±0.83              | 40.20±1.19 |

酚、黄酮质量分数和胰脂肪酶的抑制率先增加后降低。乙醇体积分数为 60%时达到最大值。后续对 50%~70%乙醇进行优化。

**2.2.2 提取温度的影响** 称取杠果叶粉末 2.0 g 分别于 60%乙醇溶液中,按料液比 1:10 分别于 50、60、70、80 ℃回流提取 2 h,滤过,滤液定容至 50 mL,按并按“2.1”方法测定评价指标。结果见表 3,随着提取温度的升高,杠果叶提取物的胰脂肪酶抑制率及总黄酮和多酚质量分数先增加后降低,但温度为 70 ℃时均最高。因此,后续对提取温度 60~80 ℃进行优化。

**2.2.3 提取时间的影响** 称取杠果叶粉末 2.0 g 分别于 60%乙醇溶液中,按料液比 1:10 于 70 ℃回流提取 0.5、1.0、2.0、3.0、4.0 h,滤过,滤液定容至

表 3 提取温度的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

Table 3 Effect of extraction temperature ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

| 提取温度/℃ | 多酚(mg·g <sup>-1</sup> ) | 黄酮(mg·g <sup>-1</sup> ) | 胰脂肪酶抑制率/%  |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 50     | 90.26±1.01              | 27.35±0.55              | 59.24±1.02 |
| 60     | 95.36±1.37              | 30.25±0.55              | 62.16±0.61 |
| 70     | 100.70±2.77             | 31.35±1.31              | 67.97±1.80 |
| 80     | 97.05±1.69              | 27.30±0.50              | 62.58±2.50 |

50 mL,按“2.1”方法测定评价指标。结果见表 4,当提取时间为 1 h 时杠果叶中多酚质量分数和胰脂肪酶抑制率最高,当提取时间超过 1 h 时多酚质量分数及胰脂肪酶抑制率下降。随着提取时间的增加,黄酮质量分数先增加后降低,当提取 2 h 时,黄酮质量分数最高。但提取时间从 1 h 增加到 2 h 时,黄酮质量分数仅增加 1.67 mg·g<sup>-1</sup>。因此,为保证活性并减

表 4 提取时间的影响 ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

Table 4 Effect of extraction time ( $\bar{x} \pm s, n=3$ )

| 提取时间/h | 多酚(mg·g <sup>-1</sup> ) | 黄酮(mg·g <sup>-1</sup> ) | 胰脂肪酶抑制率/%  |
|--------|-------------------------|-------------------------|------------|
| 0.5    | 91.22±1.77              | 25.94±0.99              | 63.45±0.90 |
| 1.0    | 100.61±2.38             | 29.56±1.00              | 68.06±1.31 |
| 2.0    | 98.66±2.66              | 31.23±0.88              | 66.87±0.95 |
| 3.0    | 91.26±2.17              | 25.71±0.94              | 56.77±1.50 |
| 4.0    | 79.70±3.11              | 26.08±1.01              | 55.03±1.90 |

少能耗，确定后续实验的提取时间为 1 h。

**2.2.4 料液比的影响** 称取杠果叶粉末 2.0 g 于体积分数为 60%乙醇溶液中，分别按料液比 1：10、1：15、1：20、1：25 于 70 ℃回流提取 1 h，滤过，滤液定容至 50 mL，按“2.1”方法测定评价指标。结果见表 5，总黄酮、总多酚质量分数和胰脂肪酶抑制率呈现先升高后降低的趋势。当料液比为 1：15 时，3 个指标均较高。因此，确定后续实验对料液比 1：10~1：20 进行优化。

表 5 料液比的影响 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )  
Table 5 Effect of solid-liquid ratio ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )

| 料液比  | 多酚/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 黄酮/(mg·g <sup>-1</sup> ) | 胰脂肪酶抑制率/%  |
|------|--------------------------|--------------------------|------------|
| 1：10 | 98.36±2.73               | 28.59±1.21               | 66.47±2.04 |
| 1：15 | 104.74±3.93              | 33.66±0.89               | 67.33±2.11 |
| 1：20 | 88.32±4.11               | 31.64±1.16               | 64.42±1.17 |
| 1：25 | 85.38±2.77               | 30.36±0.83               | 62.32±1.02 |

表 6 BBD-RSM 实验因素水平、设计及结果  
Table 6 BBD-RSM factor level, test design and results

| 序号 | A/%    | B/℃    | C        | Y <sub>1</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ) | Y <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ) | Y <sub>3</sub> % | 序号 | A/% | B/℃ | C    | Y <sub>1</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ) | Y <sub>2</sub> /(mg·g <sup>-1</sup> ) | Y <sub>3</sub> % |
|----|--------|--------|----------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|----|-----|-----|------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------|
| 1  | 60(0)  | 80(1)  | 1：20(1)  | 100.56                                | 35.04                                 | 61.29            | 10 | 60  | 70  | 1：15 | 107.60                                | 33.64                                 | 63.81            |
| 2  | 60     | 60(-1) | 1：10(-1) | 106.81                                | 33.43                                 | 62.51            | 11 | 70  | 60  | 1：15 | 94.30                                 | 28.83                                 | 63.25            |
| 3  | 50(-1) | 80     | 1：15(0)  | 90.77                                 | 33.68                                 | 64.75            | 12 | 60  | 70  | 1：15 | 107.20                                | 35.06                                 | 64.96            |
| 4  | 70(1)  | 70(0)  | 1：10     | 99.35                                 | 26.29                                 | 58.98            | 13 | 50  | 60  | 1：15 | 100.94                                | 30.85                                 | 68.72            |
| 5  | 60     | 60     | 1：20     | 113.07                                | 31.30                                 | 64.11            | 14 | 60  | 70  | 1：15 | 106.03                                | 34.23                                 | 65.54            |
| 6  | 50     | 70     | 1：10     | 101.73                                | 28.72                                 | 70.41            | 15 | 70  | 70  | 1：20 | 102.51                                | 30.45                                 | 64.91            |
| 7  | 60     | 80     | 1：10     | 100.72                                | 34.28                                 | 60.16            | 16 | 60  | 70  | 1：15 | 107.21                                | 33.67                                 | 64.16            |
| 8  | 60     | 70     | 1：15     | 109.55                                | 34.13                                 | 65.96            | 17 | 50  | 70  | 1：20 | 107.21                                | 32.72                                 | 69.55            |
| 9  | 70     | 80     | 1：15     | 99.00                                 | 29.46                                 | 64.85            |    |     |     |      |                                       |                                       |                  |

表 7 评价指标矩阵评分和权重系数  
Table 7 Results of judgment matrix scoring and weighting coefficient

| 评价指标    | 多酚含量 | 黄酮含量 | 脂肪酶抑制率 | ω <sub>AHP</sub> 权重 |
|---------|------|------|--------|---------------------|
| 多酚含量    | 1    | 2    | 3      | 0.548 5             |
| 黄酮含量    | 1/2  | 1    | 2      | 0.240 9             |
| 胰脂肪酶抑制率 | 1/3  | 1/2  | 1      | 0.210 6             |

一致性检验通过，表明该判断矩阵评分有良好一致性，所得权重系数有效。

**(2) CRITIC 法确定权重系数 (ω<sub>CRITIC</sub>)**：通过 SPSS PRO 软件对数据进行归一化处理，然后进行 CRITIC 分析，得到黄酮含量、多酚质量分数和胰脂肪酶抑制率 ω<sub>CRITIC</sub> 分别是 0.446 5、0.266 7、0.286 8。

## 2.3 BBD-RSM 优化杠果叶提取工艺

通过单因素实验，确定乙醇体积分数 (A)、提取温度 (B) 和料液比 (C) 对多酚 (Y<sub>1</sub>)、黄酮质量分数 (Y<sub>2</sub>) 和胰脂肪酶抑制率 (Y<sub>3</sub>) 影响较显著，利用 BBD-RSM 进行 3 因素 3 水平共 17 次实验，结果见表 6。

### 2.3.1 指标权重的确定

**(1) AHP 法确定权重系数 (ω<sub>AHP</sub>)**：根据相关参考文献和前期研究结果发现，杠果叶中多酚质量分数显著高于黄酮质量分数，黄酮与多酚化学指标可以影响胃肠动力中多种酶（胰脂肪酶、α-淀粉酶和 α-葡萄糖苷酶等）和蛋白的调节，因此，将指标分为 3 个层次，优先顺序为多酚质量分数>黄酮质量分数>胰脂肪酶抑制率，判断矩阵评分和各指标权重见表 7。利用 SPSS PRO 软件对判断矩阵进行 AHP 法分析，得出多酚质量分数、黄酮质量分数和胰脂肪酶抑制率 ω<sub>AHP</sub> 分别是 0.548 5、0.240 9、0.210 6，一致性比率因子 (CR)=0.017<0.100，

**(3) AHP-CRITIC 法确定综合权重系数 (ω<sub>AHP-CRITIC</sub>)**：为了兼具 AHP 的主观性和 CRITIC 的客观性，参考文献<sup>[13]</sup>中的公式计算多酚质量分数、黄酮质量分数和胰脂肪酶抑制率的 ω<sub>AHP-CRITIC</sub> 分别为 0.465 5、0.342 3、0.192 2。

**2.3.2 各项方法权重评分的比较及确定** 分别采用

AHP、CRITIC 和 AHP-CRITIC 对响应面测定结果进行评分,结果见表 8,采用 SPSS PRO 软件对 3 种评价方法的权重系数评分结果进行 Pearson 相关系数分析。AHP 法和 CRITIC 法综合评分的相关系数为 0.920, AHP 法和 AHP-CRITIC 混合加权法综合评分的相关系数为 0.985, CRITIC 法和 AHP-CRITIC 混合加权法综合评分的相关系数为 0.970,表明 3 种方法两两之间呈显著正相关 ( $P<0.05$ ),即 3 种权重分

析方法得到的综合评分结果具有一致性<sup>[13]</sup>。对 AHP 法和 CRITIC 法得到的权重系数采用 SPSS 27.0 软件进行相关性分析,结果表明,2 种方法综合评分的相关系数为 0.602,即没有显著相关性 ( $P>0.05$ ),说明 2 种方法反映的信息不具有叠加性和重合性。因此,为科学、合理且全面地对评价指标进行赋权,本研究从主观和客观 2 个方面加以考虑,最终采用 AHP-CRITIC 混合加权法计算各指标的综合评分<sup>[14]</sup>。

表 8 AHP、CRITIC 和 AHP-CRITIC 权重系数评分  
Table 8 Weight coefficient scores using AHP, CRITIC, and AHP-CRITIC

| 序号 | AHP 法 | CRITIC 法 | AHP-CRITIC 法 | 序号 | AHP 法 | CRITIC 法 | AHP-CRITIC 法 |
|----|-------|----------|--------------|----|-------|----------|--------------|
| 1  | 91.03 | 93.05    | 92.15        | 10 | 94.23 | 93.95    | 94.37        |
| 2  | 93.32 | 92.97    | 93.49        | 11 | 84.31 | 84.48    | 84.06        |
| 3  | 86.37 | 90.41    | 87.73        | 12 | 95.35 | 96.13    | 95.90        |
| 4  | 83.76 | 80.72    | 82.51        | 13 | 90.55 | 90.83    | 90.25        |
| 5  | 95.37 | 92.39    | 94.43        | 14 | 94.39 | 95.03    | 94.77        |
| 6  | 89.98 | 88.99    | 88.96        | 15 | 89.90 | 89.15    | 89.47        |
| 7  | 90.24 | 91.66    | 91.17        | 16 | 94.17 | 94.04    | 94.34        |
| 8  | 96.15 | 95.90    | 96.23        | 17 | 95.12 | 95.02    | 94.88        |
| 9  | 87.51 | 87.04    | 87.05        |    |       |          |              |

对实验模型进行方差分析,结果如表 9 所示。结果显示,本实验所建立的回归模型显著 ( $P<0.05$ ),表示该模型与本实验数据适应性良好。其中,  $C$  对综合评分有显著影响 ( $P<0.05$ ),  $A$  对综合评分有极显著影响 ( $P<0.01$ ),  $A^2$  对综合评分影响极为显著 ( $P<0.01$ ),即在所选取的实验因素中,  $A$  对综合系数评分的影响最大,  $C$  次之,  $B$  对综合系数评分影响没有显著影响。在此模型中,决定系数  $R^2=0.9110$ ,表明变量与综合系数评分之间存在一定的相关性,对响应变量具有一定的可预测性。调整决定系数  $R_{Adj}^2=0.7966$ ,表明该模型拟合程度较好。变异系数为 2.05%,表明该模型的可靠性和重现性良好。失拟项并不显著 ( $P>0.01$ ),说

明在实验变量范围内,模型方程能够预测综合系数评分的大小。三维响应曲面倾斜度也可以判定响应面各因素之间的相互作用,倾斜度越陡峭说明影响越显著。图 1 所示为各因素间交互作用的三维响应面图。由图 1 可知,有  $A$  参与的交互作用的响应曲面较陡峭,说明  $A$  对综合评分影响显著。

通过 Design-Expert 12 软件,在 Optimization 中,以 AHP-CRITIC 混合加权法综合评分最大值为目标,所建模型得到枳果叶提取最佳工艺为乙醇体积分数 59.32%、提取温度 69.43 °C、料液比 1.00 : 18.04,预测综合评分 96.28;为方便操作,将工艺修正为乙醇体积分数 60%,提取温度 70 °C,料液比 1 : 18;重复 3 次,综合评分分别为 94.66、97.12、

表 9 响应面试验方差分析  
Table 9 Analysis of variance in response surface methodology

| 来源   | 平方和       | 自由度 | 均方       | $F$ 值    | $P$ 值   | 来源    | 平方和       | 自由度 | 均方        | $F$ 值    | $P$ 值   |
|------|-----------|-----|----------|----------|---------|-------|-----------|-----|-----------|----------|---------|
| 模型   | 250.310 0 | 9   | 27.810 0 | 7.960 0  | 0.006 1 | $A^2$ | 144.260 0 | 1   | 144.260 0 | 41.300 0 | 0.000 4 |
| $A$  | 43.840 0  | 1   | 43.840 0 | 12.550 0 | 0.009 4 | $B^2$ | 16.800 0  | 1   | 16.800 0  | 4.810 0  | 0.064 4 |
| $B$  | 2.130 0   | 1   | 2.130 0  | 0.609 7  | 0.460 5 | $C^2$ | 0.420 2   | 1   | 0.420 2   | 0.120 3  | 0.738 9 |
| $C$  | 27.400 0  | 1   | 27.400 0 | 7.840 0  | 0.026 5 | 残差    | 24.450 0  | 7   | 3.490 0   |          |         |
| $AB$ | 7.570 0   | 1   | 7.570 0  | 2.170 0  | 0.184 4 | 失拟项   | 21.310 0  | 3   | 7.100 0   | 9.040 0  | 0.029 6 |
| $AC$ | 0.270 5   | 1   | 0.270 5  | 0.077 4  | 0.788 8 | 纯误差   | 3.140 0   | 4   | 0.785 6   |          |         |
| $BC$ | 0.000 5   | 1   | 0.000 5  | 0.000 2  | 0.990 3 | 总和    | 274.760 0 | 16  |           |          |         |

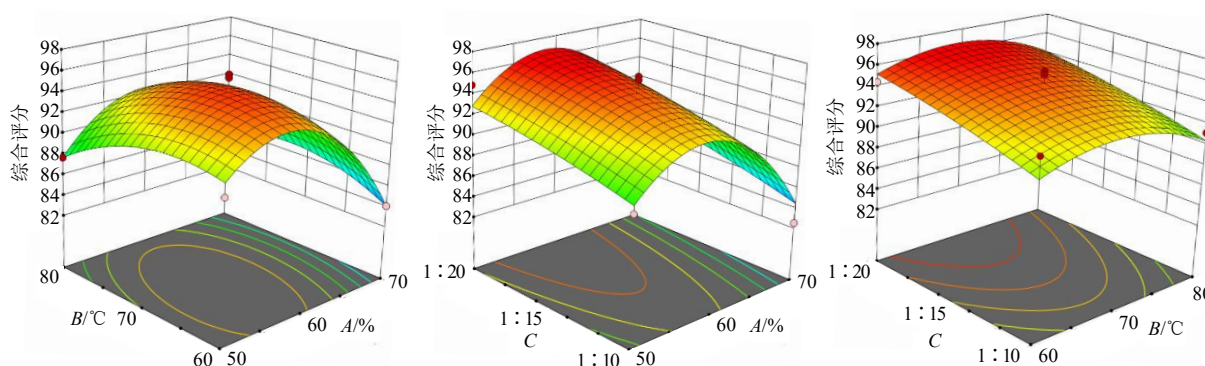


图 1 各因素间交互作用的三维响应面图

Fig. 1 3D response surface plots of interaction effects between factors

95.55, 平均综合评分为  $95.78 \pm 1.02$ , RSD 为 1.06%; 实际值与预测值接近, 说明模型与实际情况相吻合。

## 2.4 杧果叶提取液对胰脂肪酶半数抑制浓度 ( $IC_{50}$ ) 的确定

在最佳提取条件下, 以杧果叶提取液质量浓度为自变量 ( $X$ ), 胰脂肪酶抑制率为因变量 ( $Y$ ), 绘制抑制效应曲线 (图 2), 随着杧果叶提取物质量浓度的增加, 胰脂肪酶抑制率呈现出显著的剂量相关性。使用 Graphpad Prism10.1.2 软件, 采用非线性回归分析方法对数据进行拟合, 通过回归方程  $Y = 100/[1 + (5.028/X)^{1.418}]$  计算获得对胰脂肪酶抑制的  $IC_{50}$  值为  $(5.022 \pm 0.006) \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ,  $R^2 = 0.9611$ , 表明杧果叶醇提物对胰脂肪酶的抑制作用较强。

## 2.5 杧果叶提取物的促消化活性考察

**2.5.1 分组、造模及给药** 8 周龄 SPF 级健康雄性 SD 大鼠适应性喂养 3 d 后进行分组处理。对照组 (6 只) 全程给予普通饲料及饮用水; 模型组 (20 只) 全程给予高热量饲料。造模期间采用隔日交替给药

方案, 即奇数天按大鼠体质量  $ig$  给予  $10 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  油脂, 偶数天给予  $10 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$  56°白酒, 期间自由饮用  $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$  蜂蜜水<sup>[15]</sup>, 构建大鼠胃肠积滞模型; 对照组每天  $ig$  给予等量无菌 0.9%氯化钠溶液, 期间自由饮用普通水; 2 组连续  $ig$  14 d。

参考《大鼠/小鼠辨证论治实验方法学》<sup>[16]</sup>, 观察大鼠毛色、活动行为、小便、大便颜色和气味等一般情况。毛发发黄凌乱无光泽, 活动减少, 小便深黄, 大便黏腻, 臭秽, 即判定胃肠积滞模型造模成功。造模结束后, 模型组出现明显的食欲不振、毛发发黄且凌乱、活动减少和大便黏腻等症状, 并且随着造模时间增加粪便含水量增加, pH 和电导率降低。将造模成功的大鼠采用随机数字表法分为 3 组, 即模型组、吗丁啉组、杧果叶提取物组, 每组 6 只, 造模结束后恢复正常饲养, 对照组及模型组  $ig$  给予 0.9%氯化钠溶液, 其余各组分别  $ig$  给予相应药物, 连续给药 7 d, 杧果叶给药剂量根据《广西壮族自治区壮药质量标准》中成人最大生药用量  $30 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$  进行换算, 吗丁啉给药剂量根据药品说明书中成人最大用量  $30 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$  进行换算; 给药结束后, 各组大鼠禁食不禁水 12 h, 禁食结束后每只大鼠  $ig$  给予含活性炭的 2.0 mL 营养性半固体糊, 20 min 后  $ip$  3%戊巴比妥钠溶液麻醉, 腹主动脉取血, 血液样本经离心 ( $4^\circ\text{C}$ 、 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ) 15 min 后取血清, 采用试剂盒检测血清胃动素含量。颈椎脱臼法处死后迅速摘取所需脏器组织剖开腹腔分离完整胃肠道, 测量小肠全长及活性炭在小肠内的推进距离; 计算小肠推进率和胃排空率。

小肠推进率 = 小肠中碳末推进长度 / 小肠全长

胃排空率 =  $1 - (m_1 - m_2) / m_0$

$m_0$  为  $ig$  营养性半固体糊的质量,  $m_1$  为解剖取出的全胃质量,  $m_2$  为清洗吸干后的胃净质量

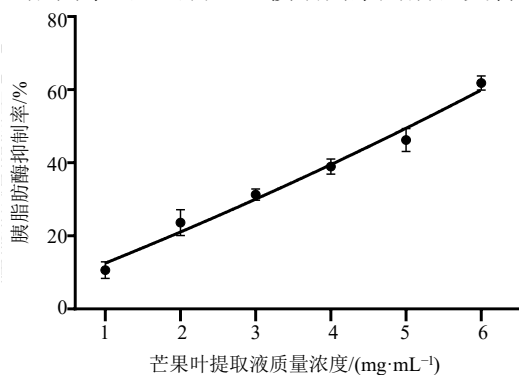


图 2 不同质量浓度杧果叶乙醇提取液对胰脂肪酶抑制率的影响 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )

Fig. 2 Effect of different concentrations of *M. indica* leaves ethanol extract on pancreatic lipase inhibition ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=3$ )

**2.5.2 治疗效果评价** 结果见表 10, 与对照组相比, 模型组大鼠小肠推进率和胃排空率显著减低 ( $P < 0.05$ )。与模型组相比, 枳椇叶提取物治疗后大鼠胃

排空率、小肠推进率和胃动素含量均得到显著回升 ( $P < 0.05$ ), 证明枳椇叶提取物可上调胃肠激素水平, 增强胃肠蠕动, 改善胃排空功能, 发挥促消化作用。

表 10 枳椇叶提取物对模型大鼠胃肠相关指标的影响 ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=6$ )

Table 10 Effect of *M. indica* leaves extract on gastrointestinal-related parameters in model Rats ( $\bar{x} \pm s$ ,  $n=6$ )

| 组别     | 剂量                                     | 小肠推进率/%             | 胃排空率/%              | 胃动素含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ |
|--------|----------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| 对照     | —                                      | $64.07 \pm 1.24$    | $72.47 \pm 1.48$    | $876.16 \pm 6.20$                         |
| 模型     | —                                      | $44.27 \pm 1.56^*$  | $34.74 \pm 1.64^*$  | $822.37 \pm 4.98$                         |
| 吗丁啉    | $3.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | $58.82 \pm 1.63^\#$ | $42.18 \pm 0.19^\#$ | $1\ 064.71 \pm 12.25^\#$                  |
| 枳椇叶提取物 | $3.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  | $71.42 \pm 2.66^\#$ | $58.64 \pm 1.18^\#$ | $912.77 \pm 3.54^\#$                      |

与对照组比较:  $^*P < 0.05$ ; 与模型组比较:  $^\#P < 0.05$ 。

$^*P < 0.05$  vs control group;  $^\#P < 0.05$  vs model group.

**2.5.3 胃组织切片结果与分析** 用  $4\text{ }^\circ\text{C}$  0.9%氯化钠溶液冲洗胃, 滤纸擦干, 平放, 纵切。切片用 4%多聚甲醛固定液固定 48 h 后, 严格按照病理实验检测标准程序进行修剪、脱水、包埋、切片、染色、封片, 最后镜检合格的样片进行测量, 结果如图 3 所示。对照组大鼠的胃黏膜和腺体呈现完整结构,

细胞排列有序。而模型组大鼠的胃组织中, 腺体排列混乱, 出现糜烂水肿, 部分黏膜细胞脱落, 胃腺细胞增多, 核质较深。给予枳椇叶提取物治疗后, 枳椇叶醇提物和水提物组结构完整, 细胞排列相对有序。胃肠积滞 SD 大鼠的胃组织均存在炎症, 枳椇叶提取物对胃肠积滞具有治疗效果。

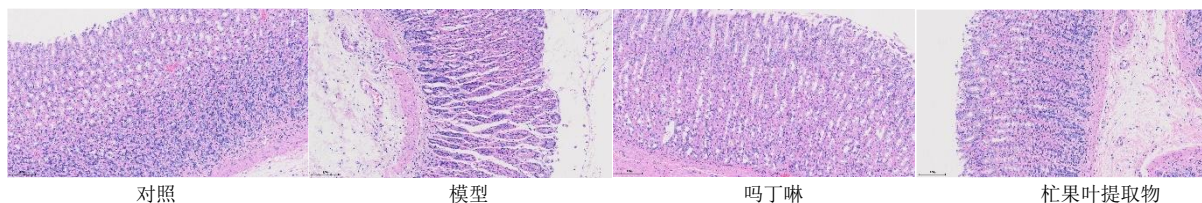


图 3 不同组别大鼠胃组织 HE 染色结果 ( $\times 200$ )

Fig. 3 Results of HE staining of stomach tissues of different groups of rats ( $\times 200$ )

### 3 讨论

枳椇叶是广西壮瑶特色中药材, 在民族医药应用及民众健康保障中占据重要地位<sup>[1,17]</sup>。行气消滞为枳椇叶经典药用功效, 临床用于小儿食积疗效确切<sup>[2,5]</sup>, 也是胃肠积热类病症候选开发药材, 但其药效物质基础与作用机制仍未完全阐明。当下居民生活水平提升、作息节奏加快, 高脂饮食摄入增多, 易诱发胃肠积热病症; 胰脂肪酶是机体脂肪代谢调控的关键靶点<sup>[18-19]</sup>。枳椇叶富含黄酮、多酚类活性成分, 可激活 5 羟色胺 (5-HT) 受体、促进乙酰胆碱分泌, 调节胃肠平滑肌蠕动, 同时调控胃动素、胃泌素等胃肠激素水平, 修复肠道菌群结构与黏膜屏障功能<sup>[20]</sup>。因此, 探究枳椇叶提取物促消化活性成分提取工艺, 分析其化学组分与胰脂肪酶抑制活性, 对阐释其行气消滞物质基础、推动药用开发具有现实意义。

单因素实验结果显示, 乙醇体积分数、料液比、

提取温度均显著影响枳椇叶总多酚、总黄酮含量及胰脂肪酶抑制活性。响应面实验与回归模型方差分析结果一致, 证实乙醇体积分数的影响作用大于另外 2 项, 是提取促消化活性成分的核心控制因素。本研究采用 AHP-CRITIC 混合加权法建立综合评价体系, 确定最优提取工艺: 乙醇体积分数 60%、提取温度  $70\text{ }^\circ\text{C}$ 、料液比 1:18。该工艺所得提取物的胰脂肪酶  $\text{IC}_{50}$  值为  $(5.022 \pm 0.006) \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ ; 动物实验表明, 提取物可修复胃肠积滞模型大鼠胃组织损伤, 加快胃排空与小肠推进。本研究不仅为枳椇叶行气消滞功效的开发提供实验依据, 也为枳椇叶这类农业废弃物资源化利用提供参考。

本研究仅验证了最优工艺提取物的体内药效, 未设置未优化工艺组进行对照, 尚无法证实工艺优化对体内药效的提升效果, 后续将开展不同提取工艺的体内对比实验, 明确工艺优化价值, 并深入探究活性成分构效关系。

综上,本研究联合 AHP-CRITIC 加权评价与 BBD-RSM 法,确定了杧果叶行气消滞活性成分的最佳提取工艺。最优工艺产物兼具优异的体外胰脂肪酶抑制活性与体内促消化作用,可为杧果叶药用开发及废弃物资源化利用提供数据支撑。针对本研究未设置工艺对照组的不足,后续将补充平行体内实验,进一步验证工艺优势,并解析活性成分的构效作用机制。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 广西壮族自治区壮药质量标准 (DYB45-GXZYC0074-2008) [S]. 第一卷. 2008.  
Quality Standard for Zhuang Medicines of Guangxi Zhuang Autonomous Region (DYB45-GXZYC0074-2008) [S]. Volume I. 2008.
- [2] 邓家刚, 曾春晖. 芒果叶及芒果苷 30 年研究概况 [J]. 广西中医学院学报, 2003, 6(2): 44-49.  
Deng J G, Zeng C H. A survey of 30 years' research on mango leaves and mangiferin [J]. J Guangxi Tradit Chin Med Univ, 2003, 6(2): 44-49.
- [3] 刘颖, 王硕, 周小雷, 等. 芒果叶药理作用研究进展 [J]. 中华中医药杂志, 2017, 32(2): 662-665.  
Liu Y, Wang S, Zhou X L, et al. Research progress on pharmacologic effects of *Mangifera indica* L. leaf [J]. China J Tradit Chin Med Pharm, 2017, 32(2): 662-665.
- [4] 李瑞林, 侯小涛, 郝二伟, 等. 芒果叶化学成分、药理作用研究概况及质量标志物预测分析 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2022, 24(11): 98-109.  
Li R L, Hou X T, Hao E W, et al. Research summary on chemical constituents and pharmacological effects of mango leaves and predictive analysis of quality markers [J]. J Liaoning Univ Tradit Chin Med, 2022, 24(11): 98-109.
- [5] Kumar M, Saurabh V, Tomar M, et al. Mango (*Mangifera indica* L.) leaves: Nutritional composition, phytochemical profile, and health-promoting bioactivities [J]. Antioxidants, 2021, 10(2): 299.
- [6] 丁世磊, 蒙振清, 莫书国, 等. 基于指纹图谱和网络药理学结合多成分定量法对杧果叶 2 种提取物中消滞成分定量测定及其活性研究 [J]. 中草药, 2025, 56(4): 1213-1223.  
Ding S L, Meng Z Q, Mo S G, et al. Differences in eliminating stagnation components of *Mangiferae Indicae Folium* ethanol and water extraction based on fingerprinting and network pharmacology combined with multicomponent quantification methods and their efficacy study [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2025, 56(4): 1213-1223.
- [7] 彭紫君, 林润, 李泓杭, 等. 单丛茶多糖的表征及其体外降糖降脂活性研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 283-288.  
Peng Z J, Lin R, Li H H, et al. Characterization of Dancong tea polysaccharide and its *in vitro* hypoglycemic and lipid-lowering activity [J]. J Food Saf Qual, 2024, 15(7): 283-288.
- [8] Jalaja R, Leela S G, Valmiki P K, et al. Discovery of natural product derived labdane appended triazoles as potent pancreatic lipase inhibitors [J]. ACS Med Chem Lett, 2018, 9(7): 662-666.
- [9] 刘海翠, 先永强, 刘可欣, 等. 基于 AHP-CRITIC 结合 Box-Behnken 设计-响应面法优化奶制手参的炮制工艺及其质量控制研究 [J]. 中草药, 2025, 56(17): 6148-6158.  
Liu H C, Xian Y Q, Liu K X, et al. Study on optimization of processing technology and quality control of milk-processed *Gymnadenia conopsea* based on AHP-CRITIC combined with Box-Behnken design-response surface methodology [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2025, 56(17): 6148-6158.
- [10] 裴文清, 吕沛楠, 王靖宇, 等. 木瓜皮多酚和黄酮提取工艺优化及酪氨酸酶与胰脂肪酶抑制活性研究 [J]. 食品工业科技, 2022, 43(1): 188-195.  
Pei W Q, Lü L N, Wang J Y, et al. Optimization of extraction of polyphenols and flavonoids from Papaya peel and its anti-tyrosinase and anti-pancreatic lipase [J]. Sci Technol Food Ind, 2022, 43(1): 188-195.
- [11] 罗小莉, 胡竞文, 林胜青, 等. 鸡骨草黄酮提取工艺优化及降脂减肥功效研究 [J]. 食品科技, 2025, 50(2): 207-216.  
Luo X L, Hu J W, Lin S Q, et al. Optimization of extraction technology for flavonoids from *Abrus cantoniensis* hance and study on its weight loss and lipid-lowering effects [J]. Food Sci Technol, 2025, 50(2): 207-216.
- [12] 陈永丽, 黄俊瑾, 王玲, 等. 桑叶多糖的化学组成及其对胰脂肪酶的抑制作用研究 [J]. 食品科技, 2021, 46(3): 162-166.  
Chen Y L, Huang J T, Wang L, et al. Chemical composition of mulberry leaf polysaccharide and its inhibitory effect on pancreatic lipase [J]. Food Sci Technol, 2021, 46(3): 162-166.
- [13] 王伟超, 杨智涵, 周靖惟, 等. 基于 AHP-CRITIC 混合加权法优选石决明煅制工艺及其重金属及有害元素健康风险评估 [J]. 中草药, 2026, 57(2): 485-499.  
Wang W C, Yang Z H, Zhou J W, et al. Optimization of

- calcination processing technology based on AHP-CRITIC mixed entropy method and health risk assessment of heavy metals elements in *Haliotidis Concha* [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2026, 57(2): 485-499.
- [14] 廖香莲, 吴新, 陈志元, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化蒲公英多成分提取工艺 [J]. 药物评价研究, 2026, 49(1): 406.
- Liao X L, Wu X, Chen Z Y, et al. Optimization of multi-component extraction of *Taraxacum borealisinense* by AHP-entropy weight method combined with Box-Behnken response surface methodology [J]. Drug Eval Res, 2026, 49(1): 406.
- [15] 吕冠华, 劳绍贤. 脾胃湿热证动物模型的建立与评价 [J]. 广州中医药大学学报, 2005, 22(3): 231-235.
- Lü G H, Lao S X. Establishment and evaluation of animal models of spleen-stomach damp-heat syndrome [J]. J Guangzhou Univ Tradit Chin Med, 2005, 22(3): 231-235.
- [16] 方肇勤. 大鼠/小鼠辨证论治实验方法学的创建 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Fang Z Q. *Establishment of Experimental Methodology for Syndrome Differentiation and Treatment in Rats and Mice* [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [17] 广西壮族自治区瑶药材质量标准 (DYB45-GXYYC0071-2021) [S]. 2021.
- Quality Standard for Yao Medicinal of Guangxi Zhuang Autonomous Region (DYB45-GXYYC0071-2021) [S]. 2021.
- [18] Zhang X Y, Li D, Wang K X, et al. Hyperoside inhibits pancreatic lipase activity *in vitro* and reduces fat accumulation *in vivo* [J]. Food Funct, 2023, 14(10): 4763-4776.
- [19] Yu K, Jiang W J, Cheng N N, et al. Molecular mechanisms of naringin's high lipid-lowering activity: Pancreatic lipase inhibition and fat accumulation reduction [J]. J Sci Food Agric, 2025, 105(11): 6229-6242.
- [20] Ju T Y, Song Z Y, Qin D, et al. Neohesperidin attenuates DSS-induced ulcerative colitis by inhibiting inflammation, reducing intestinal barrier damage, and modulating intestinal flora composition [J]. J Agric Food Chem, 2024, 72(37): 20419-20431.

[责任编辑 孙英杰]