

# 基于 AHP-CRITIC 权重分析法和热分析技术的焦麦芽炮制工艺优化及其对功能性消化不良小鼠胃肠动力的影响

董虹玲<sup>1,2,3,4</sup>, 裴科<sup>1,2,3,4</sup>, 孟祥龙<sup>1,2,3,4</sup>, 蹇天栋<sup>1</sup>, 张朔生<sup>1,2,3,4\*</sup>

1. 山西中医药大学中药与食品工程学院, 山西 晋中 030619
2. 中药炮制技术传承基地(山西中医药大学), 山西 晋中 030619
3. 中药炮制山西省重点实验室, 山西 晋中 030619
4. 中药材加工炮制传承与创新研究室, 山西 晋中 030619

**摘要:** 目的 优化焦麦芽的炮制工艺, 并探究其对功能性消化不良 (functional dyspepsia, FD) 小鼠胃肠动力的增效作用及其机制。方法 采用热分析技术分析麦芽及其有效成分的热解特性, 确定其适宜的炒焦温度范围; 以 5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)、总黄酮含量结合外观性状评分为评价指标, 采用 AHP-CRITIC 权重分析法确立各指标权重, 并运用响应面法优化炒制温度与炒制时间等工艺参数; 通过多因素复合法建立 FD 小鼠模型, 以小肠推进率、胃排空率及胃肠激素 (胃动素和胃泌素) 水平为考察指标, 比较优化工艺所得焦麦芽与麦芽的药效差异。结果 热分析确定麦芽炒焦的适宜温度为 217.7~286.3 °C; 响应面法优化得到的麦芽炒焦最佳工艺为 270.00 °C 炒制 20.00 min; 药效实验表明, 焦麦芽高剂量组能显著提高 FD 小鼠的小肠推进率 ( $P<0.05$ ) 及胃排空率 ( $P<0.05$ ), 并显著提升血清胃动素 ( $P<0.05$ ) 和胃泌素 ( $P<0.05$ ) 水平。结论 运用 AHP-CRITIC 权重分析法以及热分析技术对焦麦芽的炮制工艺进行了优化, 经工艺优化后的焦麦芽可显著改善 FD 小鼠的胃肠动力, 为焦麦芽等炒焦类中药炮制火候量化提供了方法学参考。

**关键词:** AHP-CRITIC 权重分析法; 热分析技术; 焦麦芽; 炮制工艺; 功能性消化不良; 5-羟甲基糠醛

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)06-2086-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.06.008

## Optimization of processing process of charred *Hordei Fructus Germinatus* and its effect on gastrointestinal motility in mice with functional dyspepsia based on AHP-CRITIC weight analysis and thermal analysis technology

DONG Hongling<sup>1,2,3,4</sup>, PEI Ke<sup>1,2,3,4</sup>, MENG Xianglong<sup>1,2,3,4</sup>, JIAN Tiandong<sup>1</sup>, ZHANG Shuosheng<sup>1,2,3,4</sup>

1. College of Chinese Medicine and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Jinzhong 030619, China
2. Traditional Chinese Medicine Preparation Technology Inheritance Base (Shanxi University of Chinese Medicine), Jinzhong 030619, China
3. Shanxi Provincial Key Laboratory of Traditional Chinese Medicine Processing, Jinzhong 030619, China
4. Research Room for Inheritance and Innovation of Chinese Herbal Medicine Processing, Jinzhong 030619, China

**Abstract: Objective** To optimize the processing technology of Jiaomaya (charred *Hordei Fructus Germinatus*, CHFG) and investigate its synergistic effects and mechanisms on intestinal motility in functional dyspepsia (FD) mice. **Methods** Thermal analysis techniques were employed to analyze the pyrolysis characteristics of maiya (*Hordei Fructus Germinatus*, HFG) and its active components, determining the appropriate temperature range for charring. Using 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF) content, total flavonoids content, and appearance trait scores as evaluation indicators, the AHP-CRITIC weight analysis was applied to establish the

收稿日期: 2025-09-25

基金项目: 山西省中医药科技创新工程项目: 山西道地药材炮制“火力/火候”客观化表征与饮片药性变化相关研究及应用示范 (CZ2023041\_019); 太原市揭榜挂帅项目“山西道地中药饮片质量提升关键技术研究及产业化”(2023048); 中药炮制技术传承基地建设 (CZ2023016); 山西中医药大学科技创新团队项目 (2022TD1014); 山西省平台基础与人才专项 (202304051001044); 阳泉市农业农村局项 (SZY-YQZX-2019004)

作者简介: 董虹玲, 讲师, 主要从事中药炮制现代研究、中药物质基础研究。E-mail: 57198450@163.com

\*通信作者: 张朔生, 博士生导师, 教授, 主要从事中药炮制现代研究。E-mail: zhangshuosheng@aliyun.com

weight of each indicator. Response surface methodology was utilized to optimize processing parameters such as temperature and duration. A multifactorial composite method was used to establish an FD mouse model. Intestinal propulsion rate, gastric emptying rate, and gastrointestinal hormone (motilin, gastrin) levels were measured to compare the pharmacological differences between optimized CHFG and raw HFG. **Results** Thermal analysis identified the optimal charring temperature window for HFG as 217.7—286.3 °C. Response surface optimization yielded the best processing parameters: 270.00 °C for 20.00 min. Pharmacological experiments demonstrated that the high-dose CHFG group significantly improved intestinal propulsion rate ( $P < 0.05$ ), gastric emptying rate ( $P < 0.05$ ), and serum motilin ( $P < 0.05$ ) and gastrin ( $P < 0.05$ ) levels in FD mice. **Conclusion** The AHP-CRITIC weighting method combined with thermal analysis technology successfully optimized the processing of CHFG. The optimized CHFG significantly enhanced gastrointestinal motility in FD mice, providing methodological references for the quantification and standardization of fire control in traditional Chinese medicine processing.

**Key words:** AHP-CRITIC weight analysis; thermal analysis techniques; charred *Hordei Fructus Germinatus*; processing technology; functional dyspepsia; 5-hydroxymethylfurfural

功能性消化不良 (functional dyspepsia, FD) 是一种常见的胃肠功能紊乱性疾病, 其全球发病率高达 10%~30%<sup>[1]</sup>, 临床症状包括早饱、上腹痛、餐后饱胀等, 对患者的生活质量造成了严重影响。其发病机制复杂, 涉及胃肠动力障碍、内脏敏感性增高、胃肠激素失调等因素<sup>[2]</sup>。胃肠激素如胃动素和胃泌素在调节胃肠运动中起关键作用, 其分泌异常与 FD 密切相关<sup>[3-4]</sup>。麦芽作为传统中药, 具有健脾开胃、消食化滞的功效<sup>[5]</sup>。历代本草强调“焦香醒脾”理论<sup>[6]</sup>, 即焦麦芽经炮制后消食化滞作用增强。然而, 当前焦麦芽炮制存在 2 大瓶颈: 一是工艺标准化不足, 炮制火候依赖经验判断, 缺乏量化参数, 导致市售品质量差异<sup>[7]</sup>; 二是药效机制不明, 炮制引发的成分变化与药效提升的关联尚未阐明<sup>[8]</sup>。目前, 已有研究采用正交实验法优化焦麦芽炮制工艺<sup>[9]</sup>, 但未结合热分析技术量化火候, 且药效机制研究聚焦单一成分。本研究首次创新性地采用热重-微商热重技术 (thermogravimetric analysis/derivative thermogravimetry analysis, TG/DTG) 结合 AHP-CRITIC 权重法<sup>[10-13]</sup>, 确立焦麦芽最佳炮制工艺; 通过多因素复合法建立 FD 小鼠模型<sup>[14]</sup>, 系统比较工艺优化后的焦麦芽与麦芽对胃肠动力及胃肠激素的调节差异; 为“焦香醒脾”理论提供科学依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器

STA449-F5 Jupite 型同步热分析仪, 德国耐驰仪器制造有限公司; 600 型电磁炒制 (药) 机, 北京华林瑞控科技有限公司; GZX-9076MBE 型电、热鼓风干燥箱, 上海博迅医疗生物仪器股份有限公司医疗设备厂; AXX224ZH/E 型电子天平, 奥豪斯仪器 (上海) 有限公司; Spectrophotometer 型紫外可见分光光度计, 上海美谱达仪器有限公司; DE-

100 g 型万能高速粉碎机, 浙江红景天工贸有限公司; SB120D 型超声波清洗机, 宁波新芝生物科技股份有限公司; U3000 型高效液相色谱仪, 美国 Thermo Fisher 公司。

### 1.2 试药

麦芽, 批号 240401, 购自山西元和堂中药有限公司, 经山西中医药大学张朔生教授鉴定, 为禾本科大麦属植物大麦 *Hordeum vulgare* L. 的成熟果实经发芽干燥的炮制加工品。大黄饮片, 批号 240821, 山西元和堂中药有限公司, 经山西中医药大学张朔生教授鉴定, 为蓼科植物掌叶大黄 *Rheum palmatum* L. 的干燥根及根茎。5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF, 批号 20090201, 质量分数 99.79%)、D-无水葡萄糖 (批号 23040411, 质量分数 99.37%)、阿魏酸 (批号 24031304, 质量分数 98.47%)、亮氨酸 (批号 23040410, 质量分数 99.92%), 成都格利普生物科技有限公司; 大麦芽碱 (批号 MUST-24022124, 质量分数 99.80%), 成都曼思特生物科技有限公司;  $\alpha$ -淀粉酶 (批号 JS243808, 生物技术级, 43.4U/mg), 成都普菲德生物技术有限公司; 芦丁 (批号 131308, 质量分数 90.30%), 上海诗丹德标准技术服务有限公司; 甲醇、无水乙醇 (分析纯), 天津市科密欧化学试剂有限公司; 乙腈, (色谱纯), 天津市彪仕奇科技发展有限公司; 多潘立酮 (批号 PGJ1194), 西安杨森制药有限公司; 左旋精氨酸 (批号 710018)、碘乙酰胺 (批号 241793), 上海麦克林生化科技股份有限公司; 小鼠胃动素试剂盒 (批号 021W674829)、小鼠胃泌素试剂盒 (批号 5893W84834), 上海凡科维生物技术有限公司; 4%多聚甲醛固定液, 批号 73829, 长沙艾碧维生物技术有限公司; 羧甲基纤维素 (批号 241038)、蔗糖 (批号 8379105), 天津科

密欧化学试剂有限公司。

### 1.3 动物

90只SPF级雌性KM小鼠,体质量19~23g,许可证号SYXK(晋)2023-0007,浙江维通利华实验动物技术有限公司。动物实验经山西中医药大学实验动物管理委员会和伦理委员会批准,伦理号AWE202302025。

## 2 方法与结果

### 2.1 麦芽及其不同提取部位样品热分析研究

**2.1.1 麦芽原粉样品的制备** 称取麦芽药材100g,粉碎,过40目筛,即得麦芽原粉样品,备用。

**2.1.2 麦芽总黄酮提取物样品的制备** 称取2g麦芽粉末,置于锥形瓶中,以液固比55mL/g加入95%乙醇110mL,充分振摇,50℃下超声辅助振荡22min,滤过,将滤液浓缩,干燥,残渣研碎,过40目筛,即可得到麦芽总黄酮提取物样品<sup>[15]</sup>。

**2.1.3 麦芽总多糖提取物样品的制备** 称取2g麦芽粉末,置圆底烧瓶中,以液固比8mL/g加入蒸馏水16mL,置水浴上40℃回流提取,滤过,提取3次,每次1h,合并滤液,将滤液浓缩,挥干滤液,残渣研碎,过40目筛,即可得到麦芽总多糖提取物样品<sup>[16]</sup>。

**2.1.4 麦芽总生物碱提取物样品的制备** 称取2g麦芽粉末,置于锥形瓶中,以液固比5mL/g加入80%甲醇10mL,充分振摇,50℃下超声辅助振荡45min,滤过,提取3次,合并滤液,将滤液浓缩,挥干滤液,残渣研碎,过40目筛,即可得到麦芽总生物碱提取物样品<sup>[17]</sup>。

**2.1.5 麦芽乙醇浸出物样品的制备** 参照《中国药典》2025年版四部通则2201制备麦芽乙醇浸出物,取麦芽粉2g,置于100~200mL锥形瓶中,加乙醇50~100mL,称定质量,静置1h后,连接回流冷凝管,加热至沸腾,并保持微沸1h。放冷后取下锥形瓶,密塞,再称定质量,补足减失的质量,摇匀,用干燥过滤器滤过,取滤液置于已干燥至恒定质量的蒸发皿中,在水浴上蒸干后,于105℃干燥器中干燥3h,残渣研碎,过40目筛,即可得麦芽乙醇浸出物样品<sup>[18]</sup>。

**2.1.6 燃烧热解反应** 模拟空气(氮气-氧气4:1)为载气,体积流量60mL/min,升温速率10℃/min,分别取麦芽原粉样品、麦芽乙醇浸出物、麦芽总黄酮提取物、麦芽总生物碱提取物、麦芽总多糖提取物和D-无水葡萄糖、亮氨酸、阿魏酸、大麦芽碱等

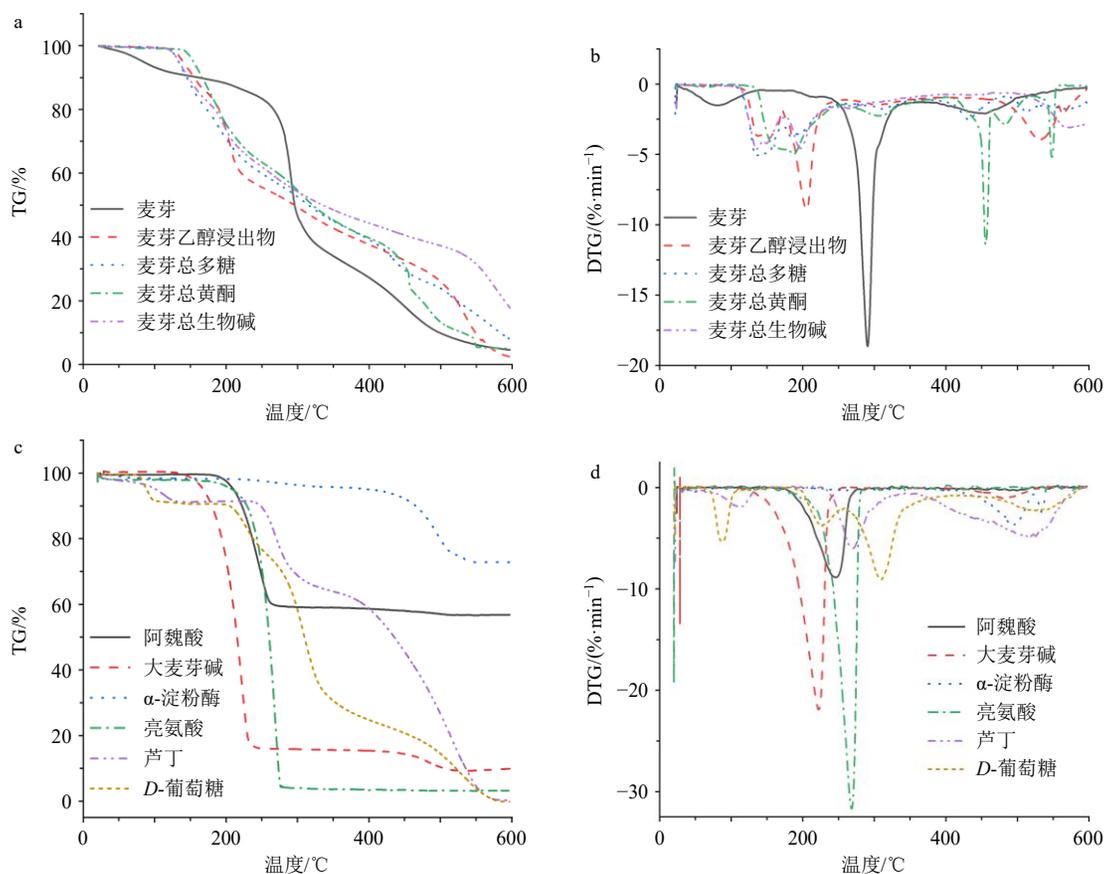
对照品(20±5)mg,水平均匀分散于坩埚中,在模拟空气的条件下对其进行热解特性的研究,从室温升至600℃,每个样品平行3次实验<sup>[19-20]</sup>。

**2.1.7 数据处理** 采用Origin 8.0软件进行数据处理及图谱绘制。

**2.1.8 热分析实验结果与分析** 麦芽粉末、麦芽乙醇浸出物、总多糖类、总黄酮类、总生物碱类提取物的热重-微商热重(thermogravimetric analysis-derivative thermogravimetry analysis, TG-DTG)曲线见图1-a、b;阿魏酸、大麦芽碱、 $\alpha$ -淀粉酶、亮氨酸、芦丁、D-无水葡萄糖对照品的TG-DTG曲线见图1-c、d,相关参数见表1。

TG曲线表明,所有样品从室温至600℃均经历3个失重阶段。(1)干燥失水阶段:脱除游离水及吸附水;(2)主要热解阶段:有机成分热分解;(3)固定碳燃烧阶段:残炭氧化。DTG曲线同步呈现3个特征失重速率峰。具体而言,多糖提取物的主要热解区间为286.6~375.9℃(失重率5.2%),DTG峰值328.5℃(失重速率8.64%/min);总黄酮提取物的主热解区254.7~309.6℃(失重率36.2%),DTG峰值333.5℃(失重速率7.83%/min);总生物碱提取物的主热解区175.3~264.2℃(失重率52.3%),DTG峰值254.3℃(失重速率10.7%/min);醇浸出物的主热解区305.7~453.7℃(失重率32.13%),DTG峰值314.7℃(失重速率5.62%/min)。总生物碱类、蛋白质类成分均在200.0~217.7℃出现较强的热失重速率峰,对比生品热解燃烧特性曲线可知,217.7~326.0℃阶段热失重为14.7%,传统中火炒制过程中,麦芽内总黄酮、总生物碱及蛋白质等成分含量显著下降,但总黄酮成分未被完全破坏。

经热分析检测,表明在传统中火炮制下,炮制后的焦麦芽可能由于加热炮制时,随着加热程度的升高, $\alpha$ -淀粉酶效价降低或消失;蛋白变性而易除去蛋白质,使蛋白含量降低;炮制过程中,焦麦芽多糖的糖苷键发生断裂,导致相对分子质量降低并部分降解为单糖,由于结构变化可能提高了多糖的可提取性或水溶性,炮制后测得的多糖含量反而呈现增加趋势。而在麦芽生品的主要热解阶段217.7~286.3℃这个温度范围内,麦芽中总黄酮类、总生物碱类、蛋白质类成分含量大幅度降低,其中总黄酮类成分含量虽下降但并未消失,反而在此温度范围,随着温度的升高,总黄酮含量呈现逐渐上升的



a、b 分别为麦芽药材与不同提取物的 TG (热失重) 和 DTG (热失重速率) 曲线; c、d 分别为不同对照品的 TG 和 DTG 曲线。  
a, b are TG (thermal weight loss)-DTG (thermal weight loss rate) curves of HFG medicinal materials and different extracts, respectively; c, d are TG-DTG curves of different reference substances.

图 1 麦芽、不同提取物和不同对照品的 TG-DTG 曲线

Fig. 1 TG-DTG curves of *Hordei Fructus Germinatus* (HFG), different extracts, and different reference substances

趋势。基于炮制适度理论分析, 麦芽炒焦的起始温度应高于 217.7 °C; 结合麦芽及其浸出物的 TG-DTG 曲线特征, 其炒焦终点温度不超过 286.3 °C。由此推断, 麦芽的最佳炮制温度范围为 217.7~286.3 °C。

## 2.2 5-HMF 含量测定

**2.2.1 对照品溶液的制备** 精确称取 5-HMF 对照品 6.44 mg, 置于 10 mL 棕色量瓶内, 以甲醇溶解并定容, 混匀后作为母液。精密量取该母液 8 mL, 转移至 50 mL 量瓶中, 用甲醇稀释至刻度, 制得质量浓度为 103.04 μg/mL 的对照品储备液, 备用。

**2.2.2 供试品溶液的制备** 称取焦麦芽粉末 5 g, 放入 100 mL 具塞锥形瓶中, 加 50 mL 甲醇, 在室温条件下浸泡过夜, 再超声处理 1 h, 提取液滤过, 置于 50 mL 量瓶中, 以甲醇定容。最后经 0.45 μm 微孔滤膜滤过, 获得供试品溶液。

**2.2.3 色谱条件** 色谱柱为 Waters C<sub>18</sub> (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 柱; 流动相为乙腈-0.1%磷酸水溶液,

梯度洗脱: 0~10 min, 5%~15%乙腈; 10~20 min, 15%~25%乙腈; 20~35 min, 25%~30%乙腈; 35~40 min, 30%~75%乙腈; 40~50 min, 75%~90%乙腈; 50~60 min, 90%乙腈; 检测波长 283 nm; 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 30 °C; 进样量 10 μL。色谱图见图 2。

**2.2.4 线性关系考察** 精密量取上述对照品储备液 (103.04 μg/mL) 1、2、4、6、8、10 mL, 分别置于 10 mL 量瓶中, 以甲醇定容, 配制成质量浓度依次为 10.304、20.608、41.216、61.824、82.432、103.04 μg/mL 的 5-HMF 系列对照品溶液。按照“2.2.3”项下色谱条件进行分析, 以 5-HMF 质量浓度为横坐标 (X), 以峰面积为纵坐标 (Y) 绘制标准曲线, 进行线性回归, 得回归方程  $Y=1.6444X-0.3904$ ,  $R^2=0.9998$ 。结果表明, 5-HMF 在 10.304~103.04 μg/mL 线性关系良好。

**2.2.5 精密度考察** 吸取“2.2.1”项下对照品溶液, 按照“2.2.3”项下色谱条件, 连续进样测定 6 次,

表 1 麦芽、麦芽提取物、麦芽主要成分的热解特性参数

Table 1 Thermal decomposition characteristic parameters of raw HFG materials, HFG extracts, and main components of HFG

样品	燃烧热解阶段	温度范围	Mass/ %	DTG <sub>max</sub> / (%·min <sup>-1</sup> )	样品	燃烧热解阶段	温度范围	Mass/ %	DTG <sub>max</sub> / (%·min <sup>-1</sup> )
麦芽	干燥失水阶段	室温~132.3 °C	9.17	1.54	亮氨酸	干燥失水阶段	室温~179.5 °C	8.42	24.71
	主要热解阶段	132.3~200.6 °C	13.80	4.36		主要热解阶段	179.5~295.0 °C	17.51	5.47
		217.7~286.3 °C	12.50	40.12				30.30	9.61
		286.4~326.0 °C	10.30	28.65		固定碳燃烧阶段	295.0~597.3 °C	26.70	16.40
固定碳燃烧阶段	346.9~597.0 °C	4.70	21.70	阿魏酸	干燥失水阶段	室温~165.4 °C	14.70	0.83	
醇浸物	干燥失水阶段	室温~154.7 °C	1.89	4.53	主要热解阶段	184.5~286.4 °C	40.10	6.42	
	主要热解阶段	154.7~305.7 °C	8.50	18.94			18.90	24.20	
		305.7~453.7 °C	25.76	32.13	固定碳燃烧阶段	300.0~597.3 °C	36.40	16.50	
总多糖	干燥失水阶段	室温~134.0 °C	5.92	6.43	大麦芽碱	干燥失水阶段	室温~132.5 °C	5.73	6.41
	主要热解阶段	134.0~286.6 °C	12.80	20.64	主要热解阶段	164.0~222.4 °C	23.70	21.91	
		286.6~375.9 °C	4.47	5.20			222.4~257.3 °C	17.48	1.74
总黄酮	固定碳燃烧阶段	375.9~597 °C	0.32	0.38	固定碳燃烧阶段	276.5~597.2 °C	2.73	15.20	
	干燥失水阶段	室温~140.1 °C	8.94	2.17	D-无水葡	干燥失水阶段	室温~123.1 °C	7.32	7.41
	主要热解阶段	140.1~254.7 °C	1.89	16.80	萄糖	主要热解阶段	226.4~316.7 °C	13.70	28.14
总生物碱	主要热解阶段	254.7~309.6 °C	14.10	36.20			28.40	5.32	
		309.6~330.3 °C	9.64	28.40	固定碳燃烧阶段	316.7~596.9 °C	0.75	16.30	
	固定碳燃烧阶段	330.3~597.0 °C	45.20	0.50	α-淀粉酶	干燥失水阶段	室温~154.7 °C	18.50	4.76
芦丁	干燥失水阶段	室温~147.7 °C	5.93	12.70	主要热解阶段	246.1~384.5 °C	34.50	16.72	
	主要热解阶段	175.3~264.2 °C	21.00	8.70			21.80	41.20	
		269.8~336.4 °C	40.40	39.64	固定碳燃烧阶段	384.5~597.1 °C	4.71	16.50	
	固定碳燃烧阶段	327.7~597.3 °C	12.20	24.26					

Mass-热失重率; DTG<sub>max</sub>-最大热失重速率。

Mass-thermal weight loss rate; DTG<sub>max</sub>-maximum thermal weight loss velocity.

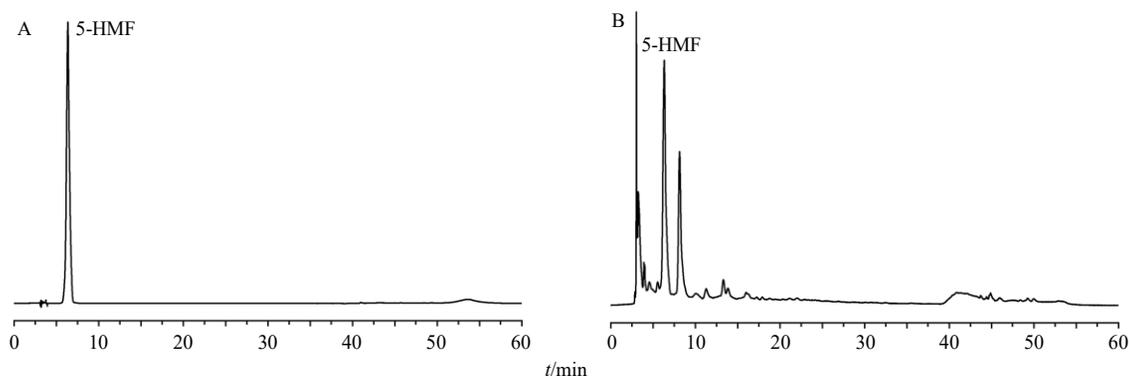


图 2 5-HMF 对照品溶液 (A) 和焦麦芽供试品溶液 (B) 的 HPLC 图

Fig. 2 HPLC of 5-HMF reference substance solution (A) and charred *Hordei Fructus Germinatus* (CHFG) test solution (B)

5-HMF 峰面积的 RSD 为 0.06%，结果表明该仪器精密度良好。

2.2.6 稳定性考察 吸取“2.2.2”项下供试品溶液，在“2.2.3”项色谱条件下，分别于制备后 0、2、4、

8、12、24 h 进样测定, 5-HMF 峰面积的 RSD 为 0.44%, 结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

**2.2.7 重复性考察** 按照“2.2.2”项下方法平行制备 6 份供试品溶液并进样分析, 5-HMF 质量分数的 RSD 为 0.12%, 结果表明该方法重复性符合要求。

**2.2.8 加样回收率考察** 称取已测定 5-HMF 含量的焦麦芽粉末 6 份, 每份 2.5 g, 精密称定, 分别定量加入饮片中 100% 水平 5-HMF 对照品, 混匀后按照“2.2.2”项下方法处理, 制备供试品溶液并进样测定, 计算得 5-HMF 的平均加样回收率为 99.7%, RSD 为 0.13%。

**2.2.9 样品测定** 按照“2.2.2”项下制备供试品溶液, 按照“2.2.3”项下的色谱条件进行 HPLC 分析。精密吸取供试品溶液 10  $\mu$ L 注入高效液相色谱仪, 记录 5-HMF 的峰面积, 代入回归方程, 计算样品中 5-HMF 的含量。

### 2.3 总黄酮含量测定

**2.3.1 对照品溶液的制备** 精密称取芦丁对照品 10 mg, 以 70% 乙醇定容于 50 mL 量瓶中, 配制成 0.2 mg/mL 的芦丁对照品储备液。

**2.3.2 供试品溶液的制备** 称取焦麦芽 1.00 g, 精密称定, 按照 1:15 的固液比加入 70% 乙醇, 于 80  $^{\circ}$ C 超声(功率 250 W、频率 40 kHz)提取 30 min。冷却后滤过, 滤液用 60% 乙醇定容至 25 mL。精密吸取该溶液 5 mL 至 25 mL 量瓶中, 先加入 1 mL 的 5% 亚硝酸钠溶液, 摇匀后静置 6 min, 再加入 1 mL 的 10% 硝酸铝溶液, 摇匀后静置 6 min, 接着加入 4 mL 的 10% 氢氧化钠, 加水定容, 静置 15 min, 即得供试品溶液, 待测。

**2.3.3 线性关系考察** 精密吸取芦丁对照品储备液 0、2、4、6、8 mL, 分别置于 25 mL 量瓶中, 按照“2.3.2”项下方法显色, 于 505 nm 波长处测定吸光度 ( $A$ ) 值, 以总黄酮质量浓度为横坐标 ( $X$ ),  $A$  值为纵坐标 ( $Y$ ), 绘制标准曲线, 进行线性回归, 得回归方程为  $Y=10.936 X-0.006$ ,  $R^2=0.999 2$ , 结果表明总黄酮在 0~0.064 mg/mL 线性关系良好。

**2.3.4 精密度考察** 选取“2.3.1”项下芦丁对照品溶液, 依据“2.3.3”项下的方法进行 6 次  $A$  值测定, RSD 为 0.03%, 结果显示该仪器精密度良好。

**2.3.5 稳定性考察** 吸取“2.3.2”项下供试品溶液, 分别在制备后 30、60、90、120、150、180 min 测定  $A$  值, RSD 为 1.80%, 结果表明供试品溶液在 180 min 内稳定性良好。

**2.3.6 重复性考察** 按照“2.3.2”项下方法制备 6 份供试品溶液, 依照“2.3.3”项下条件测定, 计算总黄酮质量分数的 RSD 为 0.80%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.3.7 加样回收率考察** 称取 0.5 g 焦麦芽粉末 6 份, 分别定量加入饮片中 100% 水平的芦丁对照品, 按照“2.3.2”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.3.3”项下方法进行测定, 计算得芦丁的平均加样回收率为 97.83%, RSD 为 0.40%。

**2.3.8 样品测定** 按照“2.3.2”项下方法制备供试品溶液, 取 1 mL, 按照“2.3.3”项下方法测定麦芽总黄酮的  $A$  值, 代入回归方程, 计算麦芽中总黄酮的含量。

### 2.4 感观性状评分

焦麦芽炒制要求色泽均匀, 外部焦褐色, 内部棕黄色, 伴有明显焦斑, 有浓烈香气, 味微苦。从焦麦芽的色泽、气味、口感进行感官评价<sup>[21]</sup>, 按照产品差异将其分为优、良、中、差 4 个等级, 对焦麦芽饮片进行评价。感官评价标准见表 2。

表 2 焦麦芽饮片感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation criteria for CHFG slices

等级	色泽	气味	口感
优 ( $\geq 80$ 分)	色泽均匀, 整体呈焦褐色, 伴有明显焦斑	有浓烈焦香气	味微苦
良 (61~79 分)	色泽比较均匀, 表面呈焦黄色, 伴有焦斑	有焦香气	味微苦
中 (41~60 分)	色泽不均匀, 呈棕褐色, 偶有焦斑	有香气	味微苦
差 ( $\leq 40$ 分)	整体呈棕黄色, 伴有略微焦斑	略有香气	味微苦

### 2.5 指标权重的确立

**2.5.1 AHP 法权重系数 ( $\omega_{AHP}$ ) 的确立** 基于麦芽炮制前后化学成分的动态变化, 将各质量评价指标量化为 3 级层次结构, 其优先级排序为总黄酮 > 感官 > 5-HMF。据此构建指标间两两比较的判断矩阵, 并依据优先级赋予相应评分值。结果显示, 总黄酮、感官、5-HMF 经 AHP 分析<sup>[22-23]</sup>之后  $\omega_{AHP}$  分别为 0.550、0.240、0.210, 一致性指标 (consistency index, CI) 值为 0.009, 随机一致性指标 (random consistency index, RCI) 值为 0.520, 一致性比率 (consistency ratio, CR=CI/RVI) 值为 0.017 < 0.1, 判断本研究满足一致性检验, 计算所得权重系数具有一致性。

**2.5.2 CRITIC 权重系数 ( $\omega_{CRITIC}$ ) 的确立** CRITIC 法是一种客观赋权法, 比主观权重赋值法更能体现数据波动性。它基于评价指标对比强度和指标间冲突性综合衡量指标客观权重, 对比强度或冲突性越大, 权重越高。

首先, 将表中数据进行无量纲化处理, 使用公式为  $(Y - Y_{min}) / (Y_{max} - Y_{min}) \times 100$ ,  $Y$  表示各指标实测值,  $Y_{max}$  表示各指标最大值,  $Y_{min}$  表示各指标最小值。采用 SPSS AU 在线软件对标准化后数据进行相关性分析, 计算总黄酮、感官、5-HMF 的  $\omega_{CRITIC}$  分别为 0.384 5、0.362 4、0.253 5。

**2.5.3 综合权重系数 ( $\omega_{综合}$ ) 的确立** 根据总黄酮、感官、5-HMF 的相关权重系数  $\omega_{AHP}$  和  $\omega_{CRITIC}$ , 按照公式  $\omega_{综合ij} = \omega_{AHPij} \omega_{CRITICij} / \sum \omega_{AHPij} \omega_{CRITICij}$ , 得到  $\omega_{综合}$ , 式中  $i, j$  分别表示指标  $i, j$ , 总黄酮、感官、5-HMF 的  $\omega_{综合}$  分别为 0.606 8、0.174 6、0.218 4。

**2.6 单因素考察麦芽炒焦炮制工艺**

**2.6.1 炒制温度对焦麦芽炮制工艺的影响** 取麦芽药材 30 g, 平行 5 份, 置于炒药机内, 分别于 240、250、260、270、280 °C 温度下炒制 20 min, 取出, 晾凉, 即得焦麦芽饮片。测定各成分含量, 并根据  $\omega_{综合}$  计算综合评分 (overall desirability, OD)。OD =  $(\omega_1 Y_1 / Y_{1max} + \omega_2 Y_2 / Y_{2max} + \omega_3 Y_3 / Y_{3max}) \times 100$ , 式中  $Y$  为各指标结果,  $Y_{max}$  为各结果中最大值。由表 3 可知, 随着炒制温度的增加, OD 值呈先上升后降低趋势, 且当炒制温度为 270 °C 时 OD 值最高, 故选 270 °C 为佳炒制温度。

表 3 炒制温度对 OD 值的影响

Table 3 Effects of frying temperature on OD values

炒制温度/°C	总黄酮/(mg·g <sup>-1</sup> )	色泽	气味	口感	感官评价均值	5-HMF/(μg·g <sup>-1</sup> )	OD 值
240	2.115 7	72	78	75	75	72.59	76.40
250	2.396 9	82	80	78	80	59.40	78.79
260	2.412 9	92	90	88	90	44.48	76.43
270	3.116 3	98	99	97	98	42.74	91.00
280	2.338 6	86	85	84	85	25.57	68.37

**2.6.2 炒制时间对焦麦芽炮制工艺的影响** 取净麦芽 30 g, 平行 5 份, 置于炒药机内, 分别于 270 °C 炒制温度下分别炒制 14、16、18、20、22 min, 取出, 晾凉, 即得焦麦芽饮片。测各成分含量, 并根据  $\omega_{综合}$  计算 OD 值。由表 4 可知, 随着炒制时间的升高, OD 值呈先上升后降低趋势, 在炒制时间 20 min 时 OD 值最高, 故选取 20 min 为佳。

表 4 炒制时间对 OD 值的影响

Table 4 Effects of frying time on OD values

炒制时间/min	总黄酮/(mg·g <sup>-1</sup> )	色泽	气味	口感	感官评价均值	5-HMF/(μg·g <sup>-1</sup> )	OD 值
14	2.079 1	81	80	79	80	64.15	76.53
16	2.797 0	84	83	82	83	46.23	85.03
18	2.810 7	91	90	89	90	59.48	90.94
20	3.120 4	98	99	97	98	39.60	91.62
22	3.054 1	78	80	79	79	25.05	82.00

**2.7 响应曲面法优选麦芽炒焦炮制工艺**

**2.7.1 响应曲面实验设计与结果** 结合单因素实验结果, 利用 Design Expert 8.0.6 软件按照中心组 (复合) 设计 (central composite design, CCD) 原理, 以焦麦芽的炒制温度 ( $X_1$ ) 和炒制时间 ( $X_2$ ) 2 个因素为自变量, 以焦麦芽中总黄酮、5-HMF 含量和外观性状的综合评分为因变量, 采用加权评分法优选焦麦芽的炮制工艺。共设定 2 因素 5 水平共 13 组试验点, 响应面实验设计与结果见表 5。

**2.7.2 实验分析** 由三维的立体模型图以及实验数据进行分析拟合, 得到综合评分对  $X_1$ 、 $X_2$  的二次多项式回归模拟方程为综合评分  $OD = -25\ 005.887\ 06 + 167.306\ 63\ X_1 + 262.918\ 16\ X_2 - 0.294\ 250\ X_1 X_2 - 0.300\ 592\ X_1^2 - 4.592\ 88\ X_2^2$ ,  $R^2 = 0.945\ 8$ , 说明该模型能解释 94.6% 响应值的变化, 因此该模型的拟合程度较好, 试验误差小, 可以用此模型进行分析和预测。响应面结果的方差分析结果见表 6, 由方差分析可知, 该模型的显著性检验中  $P < 0.001$ , 表明回归方程模型极度显著, 而失拟项  $P = 0.926\ 5$ , 不显著, 表明未知实验因素对实验干扰较小。

根据所得模型绘制炒制温度、炒制时间的交互作用对焦麦芽炮制工艺影响的 3D 响应面图, 结果见图 3。由 Design-Expert 8.0.6 优化处理得到最佳焦麦芽炮制工艺参数为炒制温度为 270.00 °C, 炒制时间为 20.00 min, 综合评分为 85.974。

**2.7.3 最优炮制工艺的验证** 根据软件得出最优结果, 最佳炒制温度为 270.00 °C, 时间为 20.00 min。按此工艺条件重复 3 次实验, 结果 3 次实验综合评分分别为 85.985、86.017、86.120, 得到综合评分平均为 86.041, 与预测值相接近, 说明利用响应曲面法对炮制工艺拟合效果较好。

**2.8 麦芽及其炮制品对 FD 小鼠胃肠功能的影响**

**2.8.1 样品的制备**

(1) 焦麦芽的制备: 取麦芽 100 g, 置于炒药机

表 5 响应曲面实验设计与结果

Table 5 Response surface experimental design and results

编号	$X_1/^\circ\text{C}$	$X_2/\text{min}$	总黄酮/( $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ )	5-HMF/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	色泽	气味	口感	感官评价均值	OD 值
1	280.00 (+1)	22.00 (+1)	2.53	27.04	73.00	75.10	74.50	74.20	19.60
2	270.00 (0)	17.17 ( $-2^{1/2}$ )	2.79	24.73	83.53	82.69	84.91	83.71	50.21
3	255.86 ( $-2^{1/2}$ )	20.00 (0)	2.60	23.83	89.00	88.00	87.00	88.00	41.49
4	270.00	20.00	3.21	20.18	96.00	97.00	95.00	96.00	100.00
5	270.00	20.00	3.03	20.54	90.00	90.00	89.70	89.90	82.37
6	270.00	20.00	3.09	20.26	93.00	94.00	92.30	93.10	89.07
7	270.00	20.00	3.07	20.28	92.00	93.00	92.50	92.50	87.04
8	284.14 ( $+2^{1/2}$ )	20.00	2.38	29.46	91.00	92.00	90.60	91.20	14.25
9	270.00	20.00	3.14	29.26	92.00	93.00	92.50	92.50	71.39
10	260.00 (-1)	22.00	2.80	25.54	82.00	82.00	81.70	81.90	48.04
11	260.00	18.00 (-1)	2.54	22.66	87.00	87.00	87.00	87.00	39.69
12	280.00	18.00	2.62	26.92	86.00	87.00	86.00	86.33	34.79
13	270.00	22.83 ( $+2^{1/2}$ )	2.91	23.69	69.00	70.05	70.50	69.85	52.28

表 6 回归方程的方差分析

Table 6 Analysis of variance for regression equation

方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	8 549.28	5	1 709.86	24.89	0.000 3	极显著
$X_1$	645.54	1	645.54	9.40	0.018 2	显著
$X_2$	1.91	1	1.91	0.03	0.872 2	
$X_1X_2$	138.53	1	138.53	2.02	0.198 5	
$X_1^2$	6 285.45	1	6 285.45	91.50	<0.000 1	极显著
$X_2^2$	2 347.85	1	2 347.85	34.18	0.000 6	极显著
残差	480.84	7	68.69			
失拟项	47.71	3	15.90	0.15	0.926 5	不显著
纯误差	433.13	4	108.28			
总离差	9 030.12	12				

$P < 0.05$  为显著,  $P < 0.01$  为极显著,  $P < 0.001$  为极度显著。

$P < 0.05$  indicates significance,  $P < 0.01$  indicates high significance,

$P < 0.001$  indicates extremely high significance.

中,按照“2.7”项下获得的最佳工艺参数,于  $270^\circ\text{C}$  条件下炒制 20 min, 即得。

(2) 生、焦麦芽水煎液的制备: 取生、焦麦芽 100 g, 粉碎后用水煎煮 2 h, 每次煎煮过程中保持微沸, 料液比 1 : 8, 共 3 次, 合并滤液后浓缩, 即得麦芽和炒麦芽水煎液<sup>[24]</sup>。

(3) 营养性半固体糊的制备: 称取羧甲基纤维素钠 5 g, 置于 128 mL 蒸馏水中搅拌均匀后, 依次称取 8 g 奶粉、4 g 糖、4 g 淀粉、1 g 活性炭加入, 充分搅拌均匀, 配制成 150 mL 半固体糊, 即得。

**2.8.2 实验方法** 90 只小鼠随机分为 9 组, 每组 10 只, 将小鼠划分为空白组、模型组、多潘立酮组以及麦芽低、中、高剂量组和焦麦芽低、中、高剂量

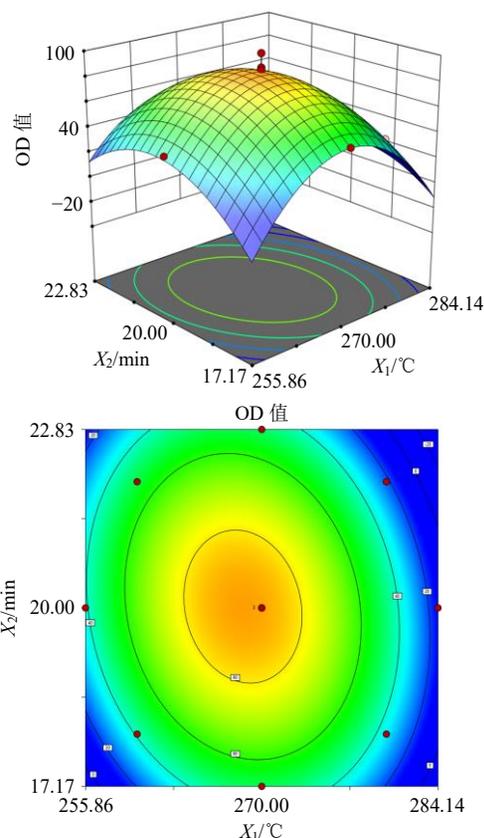


图 3 炒制温度与炒制时间对焦麦芽综合评分的影响

Fig. 3 Influence of roasting temperature and roasting time on overall score of CHFG

组。每日清晨对小鼠进行体质量称量, 空白组每只小鼠 ig 给予 2%蔗糖溶液 0.2 mL, 保证食物与水供应充足, 持续 8 d; 除空白组外, 其余各组每日清晨 ig 给予 0.1%碘乙酰胺蔗糖混合溶液 0.2 mL, 下午于水槽中注入自来水, 令小鼠持续游泳 20 min, 1 h

后按照 5.7 g/kg 剂量 ig 给予左旋精氨酸溶液, 持续 5 d; 自第 6 天起, 将左旋精氨酸溶液替换为大黄水煎液, 按照体质量 2.9 g/kg 进行 ig, 持续 3 d。其余各组采用间接给食方式 (连续 2 次给食间隔 24 h), 循环操作, 共计持续 8 d<sup>[13]</sup>。造模结束后, 空白组、模型组 ig 生理盐水 0.2 mL; 多潘立酮组按照 4 mg/kg ig 给予多潘立酮溶液; 焦麦芽、麦芽低、中、高剂量组, 分别 ig 给予 1.95、3.90、7.80 g/kg 相应麦芽水煎液, 0.2 mL/d, 持续 14 d。末次给药后禁食 24 h, 每只小鼠 ig 给予 0.5 g 碳末半固体糊, 30 min 后眼球采血, 室温自然凝固 15 min 后, 3 000 r/min 离心 (离心半径 8.5 cm) 15 min, 取血清冻存待测, 取胃肠组织固定。

**2.8.3 一般行为观察** 在造模前后通过拍照记录小鼠的毛发光泽程度和活跃程度。造模前, 各组小鼠精神状态良好, 活动活跃, 毛发浓密有光泽; 造模后, 除空白组小鼠外, 其余组小鼠出现精神萎靡、活动减少、饮食量下降、毛发脱落及无光泽等现象。与空白组相比, 其余组小鼠还表现出脊柱弯曲、竖

毛等异常行为, 被毛色泽明显暗淡。经过干预后, 多潘立酮组、麦芽与焦麦芽高、中、低剂量组小鼠状态均得到逐步改善。

**2.8.4 体质量、饮食量与饮水量** 在开始造模时、造模后和干预结束时, 称定质量并记录各小鼠体质量; 每天 8:00 时, 称取定量的食物, 于 24 h 后称量剩余食物, 差值与小鼠只数的比值, 即为每只小鼠的饮食量; 同时, 向每笼的水瓶中注入 150 mL 自来水, 24 h 后测量剩余水量, 差值与小鼠只数的比值, 即为每只小鼠的饮水量。由表 7 可知, 造模开始时, 各组小鼠体质量均无显著差异, 造模结束时, 模型组与各处理组体质量显著低于空白组 ( $P < 0.05$ ); 干预后, 与模型组相比, 各处理组小鼠体质量均显著升高 ( $P < 0.05$ ), 多潘立酮组与焦麦芽高剂量组无显著性差异; 造模开始时, 各组小鼠饮食、饮水量均无显著差异; 造模结束时, 各组饮水量和饮食量显著下降 ( $P < 0.05$ ); 干预后与模型组相比, 焦麦芽与麦芽高、中、低剂量组饮食量和饮水量恢复较好, 但各组间无显著差异。

表 7 体质量、饮食量及饮水量比较 ( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

Table 7 Comparison of weight, food intake and water intake ( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

组别	剂量/ (g·kg <sup>-1</sup> )	体质量/g			饮食量/g			饮水量/mL		
		造模开始	造模结束	干预结束	造模开始	造模结束	干预结束	造模开始	造模结束	干预结束
空白	-	33.47±1.09	35.22±1.34 <sup>a</sup>	39.04±1.80 <sup>a</sup>	4.98±0.29	5.35±0.21 <sup>a</sup>	5.59±0.13 <sup>a</sup>	4.88±0.11	5.00±0.14 <sup>a</sup>	5.73±0.16 <sup>a</sup>
模型	-	33.69±0.86	27.27±2.08 <sup>b</sup>	28.00±1.13 <sup>d</sup>	5.15±0.24	4.59±0.21 <sup>b</sup>	4.51±0.28 <sup>c</sup>	4.83±0.10	4.29±0.07 <sup>b</sup>	4.39±0.10 <sup>d</sup>
多潘立酮	0.004	33.20±0.95	28.23±1.16 <sup>b</sup>	31.95±0.83 <sup>b</sup>	5.13±0.25	4.71±0.15 <sup>b</sup>	4.80±0.16 <sup>b</sup>	4.80±0.09	4.30±0.08 <sup>b</sup>	4.67±0.06 <sup>b</sup>
麦芽	1.95	33.72±0.78	28.15±1.00 <sup>b</sup>	29.32±0.42 <sup>c</sup>	5.11±0.22	4.61±0.16 <sup>b</sup>	4.71±0.17 <sup>b</sup>	4.80±0.09	4.28±0.10 <sup>b</sup>	4.51±0.06 <sup>c</sup>
	3.90	34.10±0.98	27.87±1.24 <sup>b</sup>	29.76±0.43 <sup>c</sup>	5.04±0.24	4.60±0.14 <sup>b</sup>	4.72±0.20 <sup>b</sup>	4.81±0.14	4.29±0.08 <sup>b</sup>	4.52±0.13 <sup>c</sup>
	7.80	33.78±1.43	28.07±0.71 <sup>b</sup>	30.16±0.99 <sup>c</sup>	5.09±0.24	4.65±0.15 <sup>b</sup>	4.74±0.15 <sup>b</sup>	4.77±0.10	4.28±0.07 <sup>b</sup>	4.54±0.13 <sup>c</sup>
焦麦芽	1.95	33.81±1.29	27.14±0.67 <sup>b</sup>	29.40±0.89 <sup>c</sup>	5.18±0.25	4.56±0.11 <sup>b</sup>	4.75±0.09 <sup>b</sup>	4.77±0.09	4.29±0.11 <sup>b</sup>	4.51±0.08 <sup>c</sup>
	3.90	33.89±0.41	27.56±0.89 <sup>b</sup>	29.98±0.78 <sup>c</sup>	5.06±0.25	4.62±0.10 <sup>b</sup>	4.71±0.22 <sup>b</sup>	4.78±0.10	4.29±0.12 <sup>b</sup>	4.52±0.12 <sup>c</sup>
	7.80	33.65±1.13	27.73±1.20 <sup>b</sup>	31.26±0.68 <sup>b</sup>	5.10±0.25	4.69±0.14 <sup>b</sup>	4.83±0.19 <sup>b</sup>	4.82±0.09	4.28±0.12 <sup>b</sup>	4.53±0.12 <sup>c</sup>

相同字母组间无显著差异 ( $P > 0.05$ ), 不同字母组间有显著差异 ( $P < 0.05$ ); 表 8 同。

There was no significant difference between the same letter groups ( $P > 0.05$ ), but there was a significant difference between different letter groups ( $P < 0.05$ ); Same as table 8.

**2.8.5 小鼠胃排空及小肠推进功能测定** 小鼠眼球采血后脱颈处死, 剖开腹腔, 分别对小鼠贲门和幽门进行结扎, 取出全胃拭干后称定质量, 然后沿着大弯处剪开, 暴露胃内容物, 采用 4 °C 的生理盐水冲洗干净后再次滤纸拭干, 并称取胃净质量, 计算胃排空率。剖腹后取出小鼠全段小肠, 记录小肠的全段长度和碳末半固体糊在小肠中的移动长度, 计算小肠推进率。

胃排空率 = 1 - (胃全质量 - 胃净质量) / 碳末半固体糊

质量

小肠推进率 = 碳末半固体糊的移动距离 / 小肠全长

由表 8 可知, 炮制优化后的焦麦芽能显著改善 FD 模型小鼠的胃肠动力障碍。具体而言, 在胃排空方面, 焦麦芽高、中剂量组与多潘立酮组效果相当, 无显著性差异, 且均显著高于模型组和麦芽各剂量组 ( $P < 0.05$ )。在小肠推进方面, 焦麦芽高剂量组的提升效果最为显著, 优于多潘立酮组, 并显著高于麦芽各剂量组 ( $P < 0.05$ )。

表 8 麦芽及其炮制品对 FD 小鼠胃肠功能的影响 ( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

Table 8 Effects of HFG and its prepared products on gastrointestinal function of FD mice ( $\bar{x} \pm s, n = 10$ )

组别	剂量/(g·kg <sup>-1</sup> )	胃动素/(pg·mL <sup>-1</sup> )	胃泌素/(ng·mL <sup>-1</sup> )	胃排空率/%	小肠推进率/%
空白	-	424.48 ± 28.48 <sup>ab</sup>	29.42 ± 11.60 <sup>ab</sup>	72.60 ± 4.66 <sup>bc</sup>	80.02 ± 3.82 <sup>ab</sup>
模型	-	373.98 ± 34.35 <sup>c</sup>	19.60 ± 8.42 <sup>e</sup>	57.04 ± 8.48 <sup>d</sup>	60.23 ± 1.70 <sup>cd</sup>
多潘立酮	0.004	436.02 ± 40.82 <sup>a</sup>	31.16 ± 3.15 <sup>a</sup>	87.25 ± 0.85 <sup>a</sup>	84.26 ± 0.64 <sup>a</sup>
麦芽	1.95	376.52 ± 22.93 <sup>c</sup>	20.34 ± 4.32 <sup>de</sup>	68.03 ± 0.69 <sup>c</sup>	56.58 ± 1.55 <sup>d</sup>
	3.90	382.40 ± 51.18 <sup>c</sup>	22.50 ± 3.77 <sup>cde</sup>	72.08 ± 1.91 <sup>d</sup>	58.90 ± 6.81 <sup>cd</sup>
	7.80	422.59 ± 27.24 <sup>ab</sup>	28.10 ± 2.63 <sup>abc</sup>	76.00 ± 0.41 <sup>cd</sup>	61.35 ± 1.26 <sup>cd</sup>
焦麦芽	1.95	387.48 ± 17.62 <sup>c</sup>	24.09 ± 2.74 <sup>bcd</sup>	80.94 ± 0.82 <sup>ab</sup>	64.75 ± 3.84 <sup>cd</sup>
	3.90	391.93 ± 30.31 <sup>bc</sup>	26.31 ± 4.17 <sup>bcd</sup>	85.21 ± 0.41 <sup>ab</sup>	76.43 ± 5.99 <sup>ab</sup>
	7.80	424.05 ± 29.31 <sup>ab</sup>	28.66 ± 3.39 <sup>abc</sup>	92.00 ± 0.87 <sup>a</sup>	86.15 ± 1.08 <sup>a</sup>

**2.8.6 血清胃肠激素检测** 取小鼠血清样本, 并按照 ELISA 试剂盒的使用说明, 对血清中的胃泌素和胃动素水平进行测定<sup>[25-27]</sup>。模型组小鼠的血清胃泌素和胃动素含量较空白组均显著降低 ( $P < 0.05$ ), 表明造模成功导致胃肠激素水平下降; 多潘立酮组胃泌素和胃动素水平显著高于各剂量组 ( $P < 0.05$ ), 且与空白组比较无显著性差异; 麦芽高剂量组胃动素与空白组比较无显著性差异, 胃泌素水平虽有提升但低、中剂量组与模型组无显著差异; 焦麦芽各剂量组对胃泌素和胃动素的提升作用更为显著, 且随剂量增加效果增强。焦麦芽各剂量组的胃泌素水平与空白组无显著差异, 高、中剂量组胃动素水平也接近空白组水平。

**2.8.7 胃肠组织病理学** 在对小鼠进行眼球取血并实施颈椎脱位处死后, 取出胃和十二指肠组织, 在 4% 多聚甲醛溶液中固定胃肠组织, 用生理盐水冲洗。经过固定处理后, 组织样本被制成石蜡切片, 这些切片依次经过苏木精-伊红 (HE) 染色, 随后进行脱水处理, 并使用中性树胶封片, 通过显微镜观察胃肠组织变化情况<sup>[23]</sup>。对 HE 染色组织切片的观

察显示, 所有小鼠的胃组织均保持完整, 胃黏膜上皮细胞排列整齐, 腺体数量正常, 无炎性细胞浸润, 未观察到明显的组织学异常, 如细胞坏死、组织变性、异常增生、化生或萎缩等病理改变, 结果如图 4 所示。空白组小鼠十二指肠组织的绒毛与腺体结构完整且正常; 模型组小鼠十二指肠组织存在少部分黏膜上皮细胞肿胀的情况, 各给药组小鼠十二指肠组织绒毛的排列整齐度得到一定程度的改善, 细胞肿胀现象也有不同程度的缓解, 结果如图 5 所示。结果表明, 各组小鼠胃和十二指肠组织的结构未出现器质性病变, 符合 FD 的造模标准。

### 3 讨论

麦芽炒焦是中医药“焦香醒脾”理论的典型实践。本研究通过热分析技术与多指标评价方法, 优化了焦麦芽的炮制工艺, 探讨了其对 FD 小鼠胃肠动力的影响, 为其炮制规范化和药效物质研究提供了依据。

在焦麦芽炮制过程中, 热分析技术 (TGA/DTG) 为炮制火候的量化提供了依据, 热分析检测显示, 麦芽生品主要热解阶段为 217.7~286.3 °C, 此阶段

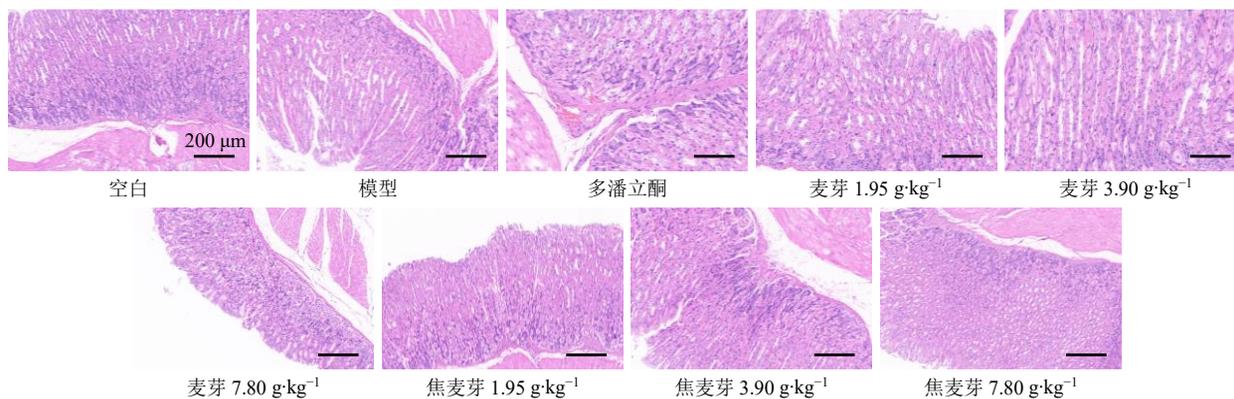


图 4 各组小鼠胃病理观察 (HE 染色, ×200)

Fig. 4 Gastric pathological observation of each group of mice (HE staining, ×200)

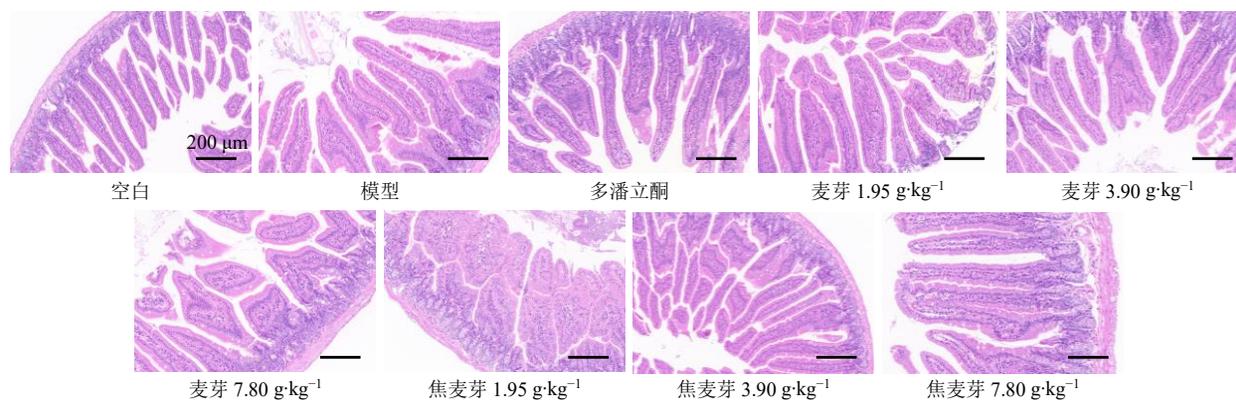


图5 各组小鼠十二指肠病理观察 (HE 染色, ×200)

Fig. 5 Pathological observation of duodenum in each group of mice (HE staining, ×200)

麦芽中总黄酮类、总生物碱类、蛋白质类成分含量大幅降低,但总黄酮类成分未消失,且总黄酮含量随温度升高逐渐上升。基于炮制适度理论,麦芽炒焦起始温度应高于 217.7 °C;结合 TG-DTG 曲线特征,炒焦终点温度不超过 286.3 °C。由此推断,焦麦芽最佳炮制温度区间为 217.7~286.3 °C。

单因素考察发现,总黄酮含量随炒制温度升高和炒制时间的延长呈先增后降趋势。适度加热有助于有效成分溶出,使总黄酮短暂增加;但高温久炒则导致其分解。5-HMF 含量随炮制时间和温度升高而先增加后下降<sup>[28-29]</sup>,可能与美拉德反应进程有关,初期 5-HMF 急剧生成,后期则进入含量下降阶段。因此,控制炮制火候对平衡 5-HMF 的生成与消耗至关重要。本研究采用 AHP-CRITIC 综合权重法,将总黄酮、外观性状和 5-HMF 等指标量化整合,通过单因素分析、响应面法优化得到最佳炮制工艺 (270.00 °C 炒制 20.00 min),该条件能较好地兼顾化学成分与传统外观标准。

药效学实验表明,优化工艺制备的焦麦芽能显著改善 FD 模型小鼠的胃肠动力,高剂量组可提升胃排空率、小肠推进率及血清胃动素、胃泌素水平。其增效机制与炮制过程中美拉德反应产物 5-HMF 积累和总黄酮的保留相关,总黄酮可通过调节胃肠平滑肌收缩增强胃肠动力<sup>[30-31]</sup>,与 5-HMF 协同发挥作用。这些成分的变化与胃肠激素胃动素、胃泌素水平的提升及胃肠动力指标的改善显著相关,构成了焦麦芽“焦香醒脾”功效的物质基础<sup>[7]</sup>。

#### 4 结论

本研究采用热分析技术确定麦芽炒焦适宜温度范围为 217.7~286.3 °C,采用 AHP-CRITIC 综合权重法结合响应面法,优化得出焦麦芽最佳炮制工

艺为 270.00 °C 炒制 20.00 min。此工艺下的焦麦芽总黄酮保留好、5-HMF 含量适中、外观符合传统要求且综合评分最高。优化工艺制备的焦麦芽能显著改善 FD 模型小鼠胃肠动力障碍,作用优于麦芽,证实“焦香醒脾”理论。本研究结合现代分析技术与传统炮制经验,可为焦麦芽饮片质量标准制定中“炮制温度-时间”参数设定提供数据支持,推动中药饮片生产规范化和现代化。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 陈旻湖,方秀才,侯晓华,等. 2022 中国功能性消化不良诊治专家共识 [J]. 胃肠病学, 2023, 28(8): 467-481.
- [2] Wauters L, Talley N J, Walker M M, *et al.* Novel concepts in the pathophysiology and treatment of functional dyspepsia [J]. *Gut*, 2020, 69(3): 591-600.
- [3] 吴洋,马学琴,王洋,等. 胃元宁对功能性消化不良小鼠胃肠运动及胃肠激素分泌的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2014, 20(24): 185-189.
- [4] 许明敏. 基于肠道菌群探讨针刺改善 FC 小鼠胃肠传输功能的效应机制研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2020.
- [5] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 167.
- [6] 董立硕,李修洋,鲍婷婷,等. 炒焦类药物的现代研究和临床运用 [J]. 中国中西医结合杂志, 2023, 43(12): 1523-1529.
- [7] 吴纯洁. 中药炮制共性技术之一:“火力火候”的研究思路探讨 [J]. 中国中药杂志, 2008, 33(15): 1926-1928.
- [8] 夏雨. 基于谱效学的炒麦芽抗功能性消化不良作用的物质基础及其制剂研究 [D]. 南昌: 江西中医药大学, 2021.
- [9] 邱孟,刘庆. 综合评分法优化麦芽炮制工艺 [J]. 中药材, 2007, 30(7): 778-780.
- [10] 张金秋,严菲,黄朝瑜,等. 热分析技术在药品检验与

- 研发中的应用 [J]. 广东化工, 2025, 52(2): 93-94.
- [11] 郭福贵, 兰子君, 张月, 等. 基于 AHP-CRITIC 权重分析法和热分析技术的小米炒党参炮制工艺研究 [J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(12): 211-217.
- [12] 苏晓娟, 宁晨旭, 刘晓琴, 等. 焦山楂炮制工艺及其改善胃动力障碍小鼠症状的研究 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2023, 25(3): 1168-1176.
- [13] 任婧, 张晓燕, 孟祥龙, 等. 基于热分析的生地黄炒炭炮制工艺研究 [J]. 吉林中医药, 2021, 41(2): 248-251.
- [14] 于静, 庞佳昱, 贾子晔, 等. 功能性消化不良成年小鼠模型的制备方法 [J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(32): 5158-5161.
- [15] 王仙, 王祥军, 曹连莆, 等. 大麦籽粒总黄酮超声辅助提取工艺的优化 [J]. 石河子大学学报: 自然科学版, 2010, 28(2): 152-157.
- [16] 杨延超. 大麦芽活性多糖的分离及结构解析 [D]. 无锡: 江南大学, 2012.
- [17] 李丽姣, 陈永刚, 张柯达, 等. 麦芽生物碱物质提取工艺优化及不同产地含量比较 [J]. 广东药学院学报, 2016(5): 572-576.
- [18] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 34.
- [19] 吕辰子. 栀子不同炮制工艺与抗炎作用相关性的研究 [D]. 太原: 山西中医药大学, 2020.
- [20] 吕辰子, 张晓燕, 苏晓娟, 等. 基于热分析技术及综合评价的栀子炭炮制工艺研究 [J]. 中草药, 2019, 50(21): 5253-5259.
- [21] 苏雪茹. 炒制对麦芽成分及活性的影响研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
- [22] 周俊, 马世澎. SPSSAU 科研数据分析方法与应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2024: 215-219.
- [23] 韩利, 梅强, 陆玉梅, 等. AHP-模糊综合评价方法的分析与研究 [J]. 中国安全科学学报, 2004, 14(7): 86-89.
- [24] 魏晴. 麦芽炮制前后化学成分及药理作用研究 [D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2018.
- [25] 王丽红. 和胃汤对功能性消化不良患者胃动素和胃泌素的影响 [J]. 中药药理与临床, 2015, 31(6): 182-183.
- [26] 刘红静. 益胃散对功能性消化不良模型小鼠血浆胃动素水平的影响 [D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2008.
- [27] 程瑶莹, 苏兰, 周卫青, 等. 斗米虫对功能性消化不良小鼠胃肠运动及胃肠激素分泌的影响 [J]. 动物营养学报, 2023, 35(5): 3333-3341.
- [28] 罗毓, 邝敏, 陈清怡, 等. 基于色度的麦芽炒制过程多成分动态变化研究 [J]. 中药材, 2024, 47(6): 1408-1414.
- [29] 杨华生, 谭丽霞, 吴维刚, 等. 麦芽炒香过程中有效成分与无效成分动态变化规律研究 [J]. 中国中药杂志, 2016, 41(23): 4382-4388.
- [30] 刘纹纹, 孔娜, 刘双, 等. 麦芽的化学成分及功能活性研究进展 [J]. 食品与药品, 2023, 25(4): 384-390.
- [31] 黄爱华, 迟玉广, 曾元儿, 等. 枳实黄酮对功能性消化不良大鼠胃肠动力的影响 [J]. 中药新药与临床药理, 2012, 23(6): 612-615.

[责任编辑 郑礼胜]