

## • 药剂与工艺 •

## 多指标-响应面法优化麸炒山药炮制工艺

郝佳琪<sup>1</sup>, 李新悦<sup>1</sup>, 曹广尚<sup>2</sup>, 张紫茹<sup>1</sup>, 崔伟亮<sup>3</sup>, 李慧芬<sup>1\*</sup>

1. 山东中医药大学, 山东 济南 250355

2. 山东中医药大学附属医院, 山东 济南 250014

3. 山东省食品药品检验研究院, 山东 济南 250000

**摘要:** 目的 采用多指标-响应面法优化麸炒山药 bran-fried *Dioscoreae Rhizoma* 的炮制工艺。方法 以麦麸用量、炮制温度和炮制时间作为考察因素, 以饮片外观色度值、山药多糖、薯蓣皂苷、腺苷、5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF) 和糠醛作为考察指标, 运用层次分析-赋值 (analytic hierarchy process-criteria importance through intercriteria correlation, AHP-CRITIC) 混合加权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface methodology, BBD-RSM) 优化麸炒山药的炮制工艺并进行验证。结果 优化后麸炒山药的最佳炮制工艺为每 100 g 饮片麦麸用量为 15 g, 在 350 °C 下炒制 1.5 min。结论 确定的麸炒山药工艺切实可行; 研究结果不仅为麸炒山药的标准化生产提供了科学依据, 采用的综合评价方法和工艺优化策略也可作为其他中药炮制工艺的现代化研究提供参考。

**关键词:** 山药; 麸炒; AHP-CRITIC 混合加权法; Box-Behnken 设计-响应面法; 炮制工艺; 色度; 山药多糖; 薯蓣皂苷; 腺苷; 5-羟甲基糠醛; 糠醛

中图分类号: R283.6

文献标志码: A

文章编号: 0253-2670(2025)18-6558-11

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.18.006

Optimization of processing technology of bran-fried *Dioscoreae Rhizoma* by multi-index response surface methodologyHAO Jiaqi<sup>1</sup>, LI Xinyue<sup>1</sup>, CAO Guangshang<sup>2</sup>, ZHANG Ziru<sup>1</sup>, CUI Weiliang<sup>3</sup>, LI Huifen<sup>1</sup>

1. Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250355, China

2. The Affiliated Hospital of Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China

3. Shandong Institute for Food and Drug Control, Jinan 250000, China

**Abstract: Objective** A multi-index response surface methodology was employed to optimize the processing parameters for bran-fried Shanyao (*Dioscoreae Rhizoma*, DR). **Methods** The optimization and validation of the bran-fried DR processing technology were conducted using wheat bran dosage, processing temperature, and processing time as investigated factors, with the appearance chromaticity value of decoction pieces, *Dioscorea Rhizoma* polysaccharides, dioscin, adenosine, 5-hydroxymethylfurfural (5-HMF), and furfural as response variables. An analytic hierarchy process-criteria importance through intercriteria correlation (AHP-CRITIC) hybrid weighting method combined with Box-Behnken design-response surface methodology (BBD-RSM) was employed for the optimization process. **Results** The optimized processing parameters were determined as 15 g wheat bran per 100 g medicinal slices, processed at 350 °C for 1.5 min. **Conclusion** The established processing protocol is practical and feasible. This study not only provides a scientific basis for the standardized production of bran-fried DR but also offers a methodological reference for modernizing the processing technologies of other traditional Chinese medicines through its comprehensive evaluation and optimization strategy.

收稿日期: 2025-04-08

**基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2023YFC3504102); 国家药品监管科学体系建设重点项目 (RS2024Z006); 全国中药特色技术传承人才培养项目 (国中医药人教函 (2023) 96 号, T20234832005); 山东省中医药科技项目 (MR20241736); 山东省研究生教育教学改革研究项目 (SDYJSJGC2023020)

**作者简介:** 郝佳琪 (2001—), 女, 山东青岛人, 硕士研究生, 研究方向为中药新药研发与炮制原理研究。E-mail: hjqq77@126.com

**\*通信作者:** 李慧芬 (1979—), 女, 教授, 从事中药新药研发与炮制原理研究。E-mail: lhfen007@126.com

**Key words:** *Dioscoreae Rhizoma*; bran-fried; AHP-CRITIC hybrid weighting method; Box-Behnken design-response surface methodology; processing technology; chromaticity; *Dioscorea Rhizoma* polysaccharides; dioscin, adenosine, 5-hydroxymethylfurfural; furfural

山药 *Dioscoreae Rhizoma* (DR) 为薯蓣科薯蓣属植物薯蓣 *Dioscorea opposita* Thunb. 的干燥根茎, 性味甘、平, 归脾、肺、肾经, 具有补脾养胃、生津益肺、补肾涩精的功效。山药生品在临床上常用于脾虚食少、久泻不止及虚热消渴等症的治疗。经麸炒后, 补脾健胃的功效增强, 适用于脾虚食少、泄泻便溏及白带过多等症<sup>[1]</sup>。目前, 麸炒山药已被《中国药典》2020 年版及多个省市炮制规范所刊载, 但仍缺乏客观、统一的炮制工艺参数。炮制终点和饮片质量的常规评判主要依赖“切面黄白色或微黄色, 偶见焦斑, 略有焦香气”等感官指标, 主观性强、误差较大, 难以保证炮制品的质量稳定性与一致性。因此, 探索麸炒山药的最佳炮制工艺, 制备质量稳定的炮制品服务于临床具有重要意义。

现代优化中药炮制工艺常采用正交设计法、均匀设计法及响应面法等多因素多水平实验设计方法, 正交设计法具有“均匀分散、整齐可比”的特点, 能够在试验因素较多时大幅减少试验次数, 但会忽略因素间的交互作用, 不适用于样本量较小或数据变异较大的实验。均匀设计法可以确保每个因素的每个水平仅进行 1 次试验, 但无法进行组间比较, 难以分析因素间的交互效应。响应面法通过构建连续变量的曲面模型, 能够全面评估各因素及其相互作用, 从而确定各因素的最佳水平, 具有试验次数少、周期短、预测性强等优点, 尤其适用于复杂系统的优化分析<sup>[2]</sup>。已有研究采用正交试验对麸炒山药炮制工艺进行优选, 但在炮制温度相近的条件下, 确定的炮制时间参数却存在较大差异, 分析其原因可能与试验设计中因素交互作用未被充分考察、选择的评价指标不同等因素有关<sup>[3-4]</sup>。

近年来, 层次分析-赋值 (analytic hierarchy process-criteria importance through intercriteria correlation, AHP-CRITIC) 混合加权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface methodology, BBD-RSM) 作为一种综合优化策略, 在中药饮片炮制工艺优化研究中得到了广泛应用<sup>[5-7]</sup>, 为中药炮制工艺的标准化提供了新的思路。本研究基于 AHP-CRITIC 混合加权法构建多指标综合评价体系, 通过赋予山药质量标志物 (多糖、薯蓣皂苷、腺苷)、中药炮制过程中美拉德

反应的产物 [5-羟甲基糠醛 (5-hydroxymethylfurfural, 5-HMF)、糠醛] 及饮片色度值等关键质量指标不同的权重系数, 实现对麸炒山药炮制工艺参数全面、客观的优化, 为麸炒山药炮制工艺的标准化和现代化提供科学依据。

## 1 仪器与材料

### 1.1 仪器

DNM-9602 型酶标仪, 北京普朗贸易有限公司; Waters 2998 型高效液相色谱仪, 美国沃特世公司; 3nh-NH300 型色差仪, 深圳市三恩时科技有限公司; KQ-500DE 型数控超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; Mettler Toledo 十万分之一电子天平, 美国梅特勒托利多公司; QE-400 型粉碎机, 浙江屹立工贸有限公司; SUPOR C22-CS03 型电陶炉, 浙江苏泊尔家电制造有限公司; Smart AS872 型红外测温仪, 东莞万创电子制品有限公司。

### 1.2 试药

山药饮片, 购自安徽贺林中药饮片有限公司, 批号 240401, 经山东中医药大学中药鉴定教研室李峰教授鉴定为薯蓣科薯蓣属植物薯蓣 *D. opposita* Thunb. 的干燥根茎切制的厚片 (厚度 2~4 mm); 辅料麦麸, 购自山东百味堂中药饮片有限公司, 批号 201007, 经山东中医药大学中药鉴定教研室李峰教授鉴定为禾本科小麦属植物小麦 *Triticum aestivum* L. 的种皮。

对照品腺苷 (批号 B21356, 质量分数 ≥ 99.0%)、糠醛 (批号 98-01-01, 质量分数 ≥ 99.5%) 均购自上海源叶生物科技有限公司; 5-HMF (批号 PS020460, 质量分数 ≥ 95.0%)、薯蓣皂苷 (批号 PS000850, 质量分数 ≥ 98.0%) 均购自成都普思生物科技股份有限公司; 水为超纯水, 甲醇、乙腈为色谱纯, 其余试剂为分析纯。

## 2 方法与结果

### 2.1 麸炒山药的制备

锅预热后加入一定量的麦麸, 待起烟后投入 100 g 山药饮片, 在一定的炮制温度下炒制一定的时间, 取出, 筛去麦麸, 晾凉, 即得。

### 2.2 腺苷、5-HMF 和糠醛含量测定

**2.2.1 色谱条件** 色谱柱为 Kromasil 100-5 C<sub>18</sub> 柱 (250 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相为 0.1% 磷酸水

溶液-甲醇, 梯度洗脱: 0~5 min, 1% 甲醇; 5~15 min, 1%~5% 甲醇; 15~35 min, 5%~20% 甲醇; 进样体积 10  $\mu$ L; 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 35  $^{\circ}$ C; 检测波长 270 nm。典型色谱图见图 1。

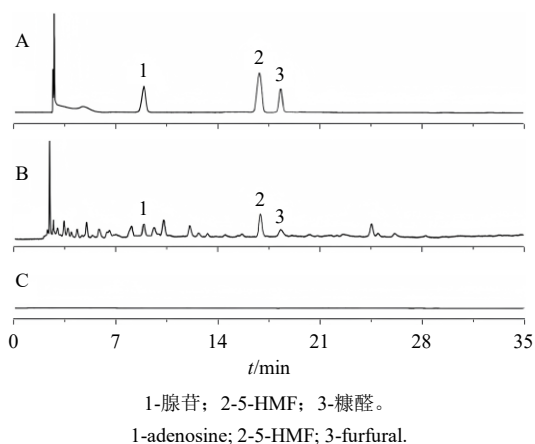


图 1 混合对照品溶液 (A)、麸炒山药供试品溶液 (B) 和阴性样品溶液 (C) 的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC chromatograms of mixed reference solution (A), bran-fried DR test solution (B), and negative control solution (C)

**2.2.2 对照品溶液的制备** 分别精密称取腺苷、5-HMF 和糠醛对照品适量, 置棕色量瓶中, 加甲醇溶解, 并稀释至刻度, 摇匀, 制备成质量浓度分别为 6.00、1.44、0.72  $\mu$ g/mL 的混合对照品溶液, 放置在 4  $^{\circ}$ C 冰箱中进行保存。

**2.2.3 供试品溶液的制备** 精密称取麸炒山药粉末 (过五号筛) 1.0 g, 置具塞锥形瓶中, 精密加入 10% 甲醇 15 mL, 盖塞称定质量, 超声提取 (功率 250 W、频率 40 kHz) 30 min, 取出放冷, 补足减失的质量, 摇匀, 0.45  $\mu$ m 微孔滤膜滤过, 即得供试品溶液。

**2.2.4 阴性样品溶液的制备** 按照“2.2.3”项下方法制备缺失麸炒山药粉末的阴性样品溶液, 即得。

**2.2.5 线性关系考察** 精密吸取“2.2.2”项下不同体积混合对照品溶液, 分别置于 10 mL 棕色量瓶中, 加甲醇稀释制成系列质量浓度的对照品溶液, 按照“2.2.1”项下色谱条件进样检测, 记录各指标成分的峰面积。以峰面积为纵坐标 ( $Y$ ), 各成分质量浓度为横坐标 ( $X$ ) 分别进行线性回归分析, 得回归方程结果分别为腺苷  $Y=10\,224.0X+201.4$ ,  $R^2=0.999\,9$ , 线性范围 1.20~6.00  $\mu$ g/mL; 5-HMF  $Y=57\,812.7X-3\,447.9$ ,  $R^2=0.999\,1$ , 线性范围 0.14~0.72  $\mu$ g/mL; 糠醛  $Y=50\,046.7X-3\,247.3$ ,  $R^2=$

0.999 3, 线性范围 0.29~1.44  $\mu$ g/mL。

**2.2.6 精密度试验** 精密吸取供试品溶液, 按照“2.2.1”项下色谱条件, 连续进样测定 6 次, 记录腺苷、5-HMF、糠醛的峰面积, 计算其 RSD 分别为 1.42%、0.79%、1.06%, 表明该仪器精密度良好。

**2.2.7 稳定性试验** 分别精密吸取供试品溶液 10  $\mu$ L, 分别于制备后 0、2、4、6、8、12 h, 按照“2.2.1”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积, 计算得到腺苷、5-HMF 和糠醛峰面积的 RSD 分别为 1.04%、1.34%、1.73%, 结果表明供试品溶液在 12 h 内稳定性良好。

**2.2.8 重复性试验** 称取麸炒山药粉末 (过五号筛), 按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液, 平行 6 份, 按照“2.2.1”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积, 计算得到腺苷、5-HMF 和糠醛质量分数的 RSD 分别为 1.23%、1.86%、1.93%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.2.9 加样回收率试验** 精密称取已测定指标成分含量的麸炒山药粉末 (过五号筛) 0.5 g, 平行 6 份, 按照原有含量与添加对照品 1:1 的比例, 分别加入腺苷、5-HMF 和糠醛对照品适量, 按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.2.1”项下色谱条件进样测定, 计算得腺苷、5-HMF 和糠醛的平均加样回收率分别为 99.87%、99.93%、100.02%, RSD 分别为 1.23%、1.04%、1.42%, 结果表明该方法加样回收率良好。

**2.2.10 样品测定** 取各待测样品, 分别按照“2.2.3”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.2.1”项下色谱条件进样测定, 根据回归方程计算腺苷、5-HMF 和糠醛的含量。

## 2.3 薯蓣皂苷含量测定

**2.3.1 色谱条件** 色谱柱为 Kromasil 100-5  $C_{18}$  柱 (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5  $\mu$ m); 流动相为乙腈-水 (55:45); 进样体积 10  $\mu$ L; 体积流量 1.0 mL/min; 柱温 30  $^{\circ}$ C; 检测波长 203 nm。典型色谱图见图 2。

**2.3.2 对照品溶液的制备** 精密称取薯蓣皂苷对照品适量, 置于 10 mL 量瓶中, 加甲醇溶解, 制成质量浓度为 1 000  $\mu$ g/mL 的对照品溶液。

**2.3.3 供试品溶液的制备** 精密称取麸炒山药粉末 (过五号筛) 4.0 g, 置于 50 mL 离心管中, 精密加入甲醇 30 mL, 盖塞称定质量, 40  $^{\circ}$ C 超声提取 (功率 250 W、频率 40 kHz) 30 min, 放冷, 补足减失的质量, 摇匀后离心, 取上清液。剩余残渣加甲醇定容

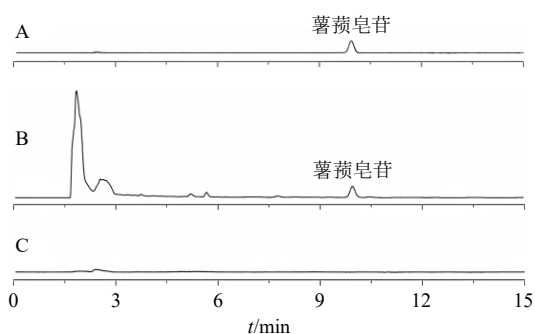


图 2 薯蓣皂苷对照品溶液 (A)、麸炒山药供试品溶液 (B) 和阴性样品溶液 (C) 的 HPLC 图

Fig. 2 HPLC chromatograms of dioscin reference solution (A), bran-fried DR test solution (B), and negative control solution (C)

至 30 mL, 按照上述步骤再重复提取 2 次。将 3 次所得上清液合并蒸干, 加甲醇溶解, 准确定容至 10 mL, 0.45  $\mu\text{m}$  微孔滤膜滤过, 即得供试品溶液。

**2.3.4 阴性样品溶液的制备** 按照“2.3.3”项下方法制备缺失麸炒山药粉末的阴性样品溶液, 即得。

**2.3.5 线性关系考察** 精密吸取薯蓣皂苷对照品溶液, 置 10 mL 量瓶中, 加甲醇稀释制成系列质量浓度的对照品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样检测, 记录峰面积。以峰面积为纵坐标 ( $Y$ ), 薯蓣皂苷质量浓度为横坐标 ( $X$ ) 进行线性回归分析, 得到回归方程为  $Y=3\,248.6X-14\,302.0$ ,  $R^2=0.999\,2$ , 线性范围为 100~300  $\mu\text{g/mL}$ 。

**2.3.6 精密度试验** 精密吸取供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件, 连续进样测定 6 次, 记录薯蓣皂苷的峰面积, 计算得到薯蓣皂苷峰面积的 RSD 为 1.05%, 结果表明该仪器精密度良好。

**2.3.7 稳定性试验** 分别精密吸取供试品溶液 10  $\mu\text{L}$ , 分别于制备后 0、2、4、6、8、12 h, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积, 计算得到薯蓣皂苷峰面积的 RSD 为 1.51%, 结果表明供试品溶液在 12 h 内稳定。

**2.3.8 重复性试验** 称取麸炒山药粉末 (过五号筛), 按照“2.3.3”项下方法制备供试品溶液, 平行 6 份, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积, 计算得到薯蓣皂苷质量分数的 RSD 为 1.71%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.3.9 加样回收率试验** 精密称取已测定指标成分含量的麸炒山药粉末 (过五号筛) 0.5 g, 平行 6 份, 按照原有含量与添加对照品 1:1 的比例加入薯蓣皂苷对照品适量, 按照“2.3.3”项下方法制备

供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 计算得薯蓣皂苷的平均加样回收率为 100.25%, RSD 分别为 1.22%, 表明该方法加样回收率良好。

**2.3.10 样品测定** 取各待测样品, 分别按照“2.3.3”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.3.1”项下色谱条件进样测定, 根据回归方程计算薯蓣皂苷的含量。

## 2.4 多糖含量测定

**2.4.1 对照品溶液的制备** 精密称取无水葡萄糖对照品 2.0 mg, 加蒸馏水溶解并定容于 10 mL 量瓶中, 得到质量浓度为 0.2 mg/mL 的葡萄糖对照品溶液。

**2.4.2 供试品溶液的制备** 精密称取麸炒山药粉末 (过五号筛) 5 g, 按照料液比 1:30 加入蒸馏水, 70  $^{\circ}\text{C}$  浸提 180 min, 超声 (功率 250 W、频率 40 kHz) 提取 40 min, 8 000 r/min 离心 (离心半径为 9.5 cm) 15 min 取上清液, 上清液旋转蒸发浓缩, 以无水乙醇醇沉至体系中含醇量为 80%, 4  $^{\circ}\text{C}$  过夜, 离心, 冷冻干燥即得麸炒山药多糖。精密称取麸炒山药多糖 1 mg 置于 10 mL 量瓶中, 加水定容, 即得供试品溶液。

**2.4.3 线性关系考察** 分别吸取 0.2 mg/mL 葡萄糖对照品溶液 0、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL 于具塞试管中, 加水至 1 mL, 摇匀, 加入 5% 苯酚溶液 0.5 mL, 摇匀, 加入浓硫酸 2.5 mL, 摇匀, 室温放置 10 min, 40  $^{\circ}\text{C}$  水浴加热 15 min 后冷却至室温, 490 nm 处测定吸光度 ( $A$ ) 值, 以葡萄糖质量为横坐标 ( $X$ ),  $A$  值为纵坐标 ( $Y$ ), 绘制标准曲线  $Y=3.335\,6X+0.094\,8$ ,  $R^2=0.998\,3$ , 线性范围为 0~0.2 mg。

**2.4.4 精密度考察** 精密吸取按照“2.4.2”项下方法制备的供试品溶液 0.5 mL, 按照“2.4.3”项下方法操作, 连续进样测定 6 次, 计算得  $A$  值的 RSD 为 2.19%, 结果表明该仪器精密度良好。

**2.4.5 稳定性考察** 精密吸取按照“2.4.2”项下方法制备的供试品溶液 0.5 mL, 按照“2.4.3”项下方法操作, 分别于操作后 0、10、20、30、40、50、60 min 测定  $A$  值, 计算得  $A$  值的 RSD 为 1.75%, 结果表明供试品溶液在 60 min 内稳定。

**2.4.6 重复性考察** 精密吸取按照“2.4.2”项下方法制备的供试品溶液 0.5 mL, 平行 6 份, 按照“2.4.3”项下方法操作并测定, 计算得无水葡萄糖质量分数的 RSD 为 1.52%, 结果表明该方法重复性良好。

**2.4.7 加样回收率试验** 精密称取 6 份已测知多糖含量的麸炒山药样品粉末, 每份 2.5 g, 分别按照 1:

1 的比例加入适量无水葡萄糖对照品,按照“2.4.2”项下方法制备供试品溶液,按照“2.4.3”项下方法操作并测定,计算得无水葡萄糖的平均加样回收率为 99.32%,RSD 为 1.87%,结果表明该方法加样回收率良好。

**2.4.8 含量测定** 参照文献报道方法<sup>[8-9]</sup>,精密吸取 0.5 mL 供试品溶液于具塞试管中,加入 5%苯酚溶液 0.5 mL,摇匀,加入浓硫酸 2.5 mL,摇匀,室温放置 10 min,40 ℃ 水浴加热 15 min 后冷却至室温,490 nm 处测定  $A$  值,代入标准曲线计算含量。

## 2.5 色度值的测定

**2.5.1 样品色度值的测定** 设定色差仪参数主光源为 D65,测量孔径 8 mm,含光方式为包含镜面正反射光 (specular component include, SCI),经黑白校正后进行测定。将饮片平铺于色差仪测试口平整处,扫描测定其切面颜色,每片扫描 3 次取平均值,根据色彩编码记录色度空间参数,以  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  ( $L^*$  值代表亮度,  $a^*$  代表红绿色度,  $b^*$  代表黄蓝色度) 对颜色进行量化表征。

**2.5.2 精密度考察** 取麸炒山药饮片平铺于色差仪测试口处,平行测定 6 次,记录色度值  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,结果三者 RSD 分别为 0.04%、0.16%、0.05%,表明该仪器精密度良好。

**2.5.3 稳定性考察** 取同一份麸炒山药饮片分别于 0、2、4、8、12、24 h 测量,记录色度值  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,结果三者 RSD 分别为 0.11%、0.83%、0.32%,表明样品在室温 24 h 内稳定性良好。

**2.5.4 重复性考察** 取 6 片麸炒山药饮片平铺于色差仪测试口处,记录色度值  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$ ,结果三者 RSD 分别为 0.26%、1.72%、0.82%,表明该方法重复性良好。

## 2.6 综合评价的确立

根据山药中主要活性成分的作用情况对山药功效的影响将各指标量化,指标的优先顺序依次为多糖含量>色度值>小分子成分含量>薯蓣皂苷含量,构建两两成对比较的判断优先矩阵,并计算得到各指标的权重系数,结果见表 1。一致性指标 (consistency index, CR) < 0.1,随机一致性指标 (random index, RI) = 0.882,表明上述的判断优先矩阵具有良好的一致性,得到的权重系数有效。

**2.6.1 AHP-CRITIC 复合加权法确定权重系数** 将 AHP 法和 CRITIC 法计算得到的相关权重系数按公式  $\omega_{\text{综合}} = \omega_{\text{AHP}}\omega_{\text{CRITIC}} / \sum \omega_{\text{AHP}}\omega_{\text{CRITIC}}$  ( $\omega_{\text{AHP}}$  表示 AHP

表 1 指标成对比较的判断优先矩阵

Table 1 Pairwise comparison judgment priority matrix of evaluation indicators

| 指标      | 薯蓣皂苷含量 | 小分子成分含量 | 色度值 | 多糖含量 | 权重值     |
|---------|--------|---------|-----|------|---------|
| 薯蓣皂苷含量  | 1      | 1/3     | 1/5 | 1/7  | 0.060 4 |
| 小分子成分含量 | 3      | 1       | 1/2 | 1/3  | 0.162 3 |
| 色度值     | 5      | 2       | 1   | 1/2  | 0.287 9 |
| 多糖含量    | 7      | 3       | 2   | 1    | 0.489 4 |

法计算的权重系数,  $\omega_{\text{CRITIC}}$  表示 CRITIC 法计算的权重系数) 进行复合加权,得到复合权重系数。采用 AHP-CRITIC 复合加权法较单用 AHP 法和 CRITIC 法确定权重系数更加科学合理。

**2.6.2 综合评价结果的比较** 分别采用经 CRITIC 法、AHP 法及 AHP-CRITIC 复合加权法得到的权重系数对试验结果分别进行综合评分。

综合评分 = (小分子成分的含量/小分子成分的含量最大值 × 小分子成分含量权重系数 + 薯蓣皂苷的含量/薯蓣皂苷的含量最大值 × 薯蓣皂苷含量权重系数 + 多糖的含量/多糖的含量最大值 × 多糖含量权重系数 + 色度值/色度值最大值 × 色度值权重系数) × 100

## 2.7 单因素实验

根据麸炒山药的炮制工艺要点,选取麦麸用量、炮制温度和炮制时间 3 个因素,以综合评分值作为考察指标进行单因素考察。

**2.7.1 麦麸用量考察** 采用 AHP-CRITIC 综合评分法对不同麦麸用量样品的小分子成分含量、多糖含量及色度值的结果进行综合评分。考察麦麸用量 5、10、15、20、25 g,结果见图 3 和表 2、3,结果显示,麦麸用量 15 g 样品的综合评分最高,且符合药



图 3 麦麸用量 (5、10、15、20、25 g) 的考察中麸炒山药饮片图

Fig. 3 Morphological characteristics of bran-fried DR slices processed with different bran dosages (5, 10, 15, 20, 25 g)

表 2 不同麦麸用量考察时麸炒山药饮片色度值测定结果及性状评判 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| Table 2 Results of colorimetric measurement and morphological evaluation of bran-fried DR slices with different bran dosages ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ ) |            |           |            |                    |       |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|------------|--------------------|-------|------|
| 麦麸用量/g                                                                                                                                                  | $L^*$      | $a^*$     | $b^*$      | 切面色泽               | 气味    | 焦斑   |
| 5                                                                                                                                                       | 54.61±0.96 | 3.71±0.05 | 10.34±0.10 | 白色或微黄色             | 无焦香气  | 无焦斑  |
| 10                                                                                                                                                      | 53.47±1.08 | 5.36±0.09 | 12.35±0.09 | 黄白色, 整体颜色不均匀       | 略有焦香气 | 偶见焦斑 |
| 15                                                                                                                                                      | 51.95±1.04 | 6.34±0.07 | 11.67±0.04 | 黄白色或微黄色, 整体颜色分布较均匀 | 略有焦香气 | 偶见焦斑 |
| 20                                                                                                                                                      | 51.11±1.12 | 6.74±0.08 | 11.07±0.06 | 棕黄色                | 焦香气较浓 | 较多焦斑 |
| 25                                                                                                                                                      | 50.98±1.07 | 6.35±0.04 | 10.90±0.03 | 深棕色或棕褐色            | 焦香气浓烈 | 许多焦斑 |

表 3 不同麦麸用量考察时麸炒山药饮片含量测定结果及加权分析综合评分 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| Table 3 Comprehensive score of content determination results and weighted analysis of bran-fried DR slices processed with different varying bran dosages ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ ) |                                           |            |           |                                              |                                        |                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|------------|-----------|----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
| 麦麸用量/<br>g                                                                                                                                                                          | 小分子成分/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |            |           | 薯蓣皂苷/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 多糖/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | AHP-CRITIC<br>综合评分 |
|                                                                                                                                                                                     | 腺苷                                        | 5-HMF      | 糠醛        |                                              |                                        |                    |
| 5                                                                                                                                                                                   | 49.95±0.03                                | 7.05±0.04  | 0.00±0.00 | 185.55±0.72                                  | 924.28±52.35                           | 59.51±0.18         |
| 10                                                                                                                                                                                  | 52.35±0.02                                | 10.05±0.01 | 0.00±0.00 | 212.30±0.58                                  | 980.80±65.47                           | 66.09±0.21         |
| 15                                                                                                                                                                                  | 52.35±0.01                                | 13.80±0.02 | 6.00±0.03 | 363.13±0.31                                  | 703.14±47.89                           | 69.49±0.23         |
| 20                                                                                                                                                                                  | 45.30±0.02                                | 12.15±0.02 | 5.40±0.05 | 71.23±0.44                                   | 1 170.26±62.56                         | 69.32±0.16         |
| 25                                                                                                                                                                                  | 60.45±0.01                                | 12.15±0.03 | 7.35±0.05 | 74.28±1.03                                   | 841.04±53.41                           | 57.09±0.19         |

典规定麸炒山药性状“切面黄白色或微黄色, 偶见焦斑, 略有焦香气”, 即最佳麦麸用量为 15 g。

**2.7.2 炮制温度考察** 采用 AHP-CRITIC 综合评分法对不同炮制温度样品的小分子成分含量、多糖含量及色度值的结果进行综合评分。考察炮制温度 250、300、350、400、450 °C, 结果见图 4 和表 4、5, 结果显示, 炮制温度 350 °C 样品的综合评分最高, 且符合药典规定麸炒山药性状“切面黄白色或微黄色, 偶见焦斑, 略有焦香气”, 即最佳炮制温度为 350 °C。

**2.7.3 炮制时间考察** 采用 AHP-CRITIC 综合评分法对不同炮制时间样品的小分子成分含量、多糖含量及色度值的结果进行综合评分。考察炮制时间 1.00、1.25、1.50、1.75、2.00 min, 结果见图 5 和表

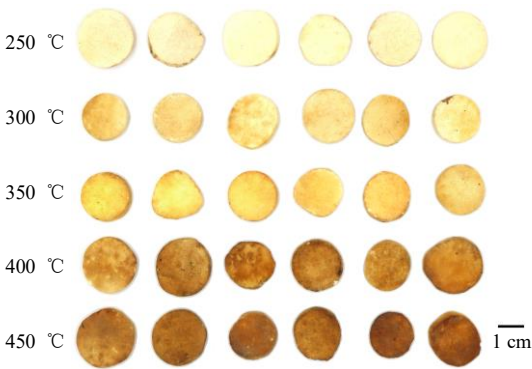


图 4 炮制温度 (250、300、350、400、450 °C) 的考察中麸炒山药饮片图

Fig. 4 Morphological characteristics of bran-fried DR slices processed at different temperatures (250, 300, 350, 400, 450 °C)

表 4 不同炮制温度考察时麸炒山药饮片色度值测定及性状评判结果 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| Table 4 Colorimetric parameters and morphological evaluation of bran-fried DR slices processed at different temperatures ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ ) |            |           |            |         |       |      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|------------|---------|-------|------|
| 炮制温度/°C                                                                                                                                             | $L^*$      | $a^*$     | $b^*$      | 切面色泽    | 气味    | 焦斑   |
| 250                                                                                                                                                 | 53.91±0.73 | 4.46±0.03 | 10.69±0.05 | 白色或微黄色  | 无焦香气  | 无焦斑  |
| 300                                                                                                                                                 | 53.66±1.10 | 5.26±0.09 | 12.31±0.12 | 微黄色     | 无焦香气  | 偶见焦斑 |
| 350                                                                                                                                                 | 51.99±0.56 | 6.50±0.06 | 12.10±0.08 | 黄白色或微黄色 | 略有焦香气 | 偶见焦斑 |
| 400                                                                                                                                                 | 51.44±0.92 | 6.81±0.07 | 12.05±0.06 | 深棕色     | 焦香气较浓 | 较多焦斑 |
| 450                                                                                                                                                 | 47.61±0.45 | 7.17±0.01 | 7.66±0.03  | 棕褐色     | 焦香气浓烈 | 许多焦斑 |

6、7, 结果显示, 炒制时间 1.50 min 样品的综合评分最高, 且符合药典规定麸炒山药性状“切面黄白

色或微黄色, 偶见焦斑, 略有焦香气”, 即最佳炮制时间为 1.50 min。

表 5 不同炮制温度考察时麸炒山药饮片含量测定及加权分析综合评分结果 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| 炮制温度/<br>℃ | 小分子成分/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |            |           | 薯蓣皂苷/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 多糖/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | AHP-CRITIC<br>综合评分 |
|------------|-------------------------------------------|------------|-----------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------|
|            | 腺苷                                        | 5-HMF      | 糠醛        |                                              |                                            |                    |
| 250        | 48.03±0.02                                | 6.45±0.03  | 0.00±0.00 | 158.08±0.65                                  | 903.78±54.27                               | 57.56±0.14         |
| 300        | 46.65±0.02                                | 9.60±0.02  | 3.90±0.03 | 130.30±0.82                                  | 987.64±63.58                               | 63.13±0.22         |
| 350        | 57.90±0.01                                | 11.85±0.02 | 4.80±0.04 | 426.58±0.38                                  | 914.96±55.13                               | 81.84±0.19         |
| 400        | 51.30±0.02                                | 10.50±0.01 | 3.45±0.02 | 236.73±0.53                                  | 735.44±49.62                               | 61.09±0.15         |
| 450        | 74.70±0.03                                | 18.15±0.04 | 5.55±0.05 | 68.55±0.91                                   | 873.34±53.06                               | 58.06±0.11         |

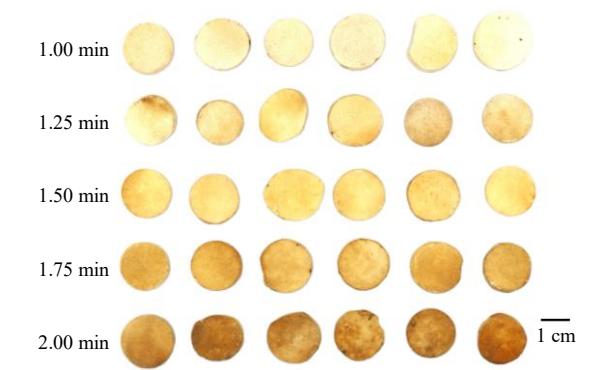


图 5 炮制时间 (1.00、1.25、1.50、1.75、2.00 min) 的考察中麸炒山药饮片图

Fig. 5 Morphological characteristics of bran-fried DR slices processed for different durations (1.00, 1.25, 1.50, 1.75, 2.00 min)

2.8 BBD-RSM 优化麸炒山药炮制工艺

2.8.1 BBD-RSM 试验设计与结果 根据单因素考察的实验结果,选择各因素最优水平,应用 Design-Expert 13.0 软件设计 BBD-RSM 优化麸炒山药炮制工艺实验方案,以麦麸用量 ( $X_1$ )、炮制温度 ( $X_2$ )、炮制时间 ( $X_3$ ) 为因素,建立 3 因素 3 水平试验方案,3 水平分别以 1、0、-1 进行编码,具体因素水平表见表 8,以综合得分为评价指标,具体试验设计与结果见表 8。

2.8.2 小分子成分含量测定 将小分子成分含量进行数据归一化处理,采用 CRITIC 法对 17 组样品中的小分子成分含量进行权重分析,权重分析结果见表 9,通过权重指数计算各样品小分子成分的综合评分,结果见表 8。

表 6 不同炮制时间考察时麸炒山药饮片色度值测定及性状评判结果 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| 炮制时间/min | $L^*$      | $a^*$     | $b^*$      | 切面色泽             | 气味    | 焦斑   |
|----------|------------|-----------|------------|------------------|-------|------|
| 1.00     | 53.20±0.83 | 4.68±0.05 | 11.01±0.04 | 白色或黄白色           | 略有焦香气 | 无焦斑  |
| 1.25     | 52.49±0.17 | 4.91±0.09 | 10.44±0.10 | 黄白色,整体颜色分布不均匀    | 略有焦香气 | 偶见焦斑 |
| 1.50     | 52.45±0.59 | 6.57±0.02 | 11.25±0.06 | 黄白色或微黄色,整体颜色分布均匀 | 略有焦香气 | 偶见焦斑 |
| 1.75     | 49.98±0.62 | 6.55±0.03 | 10.19±0.05 | 棕黄色              | 焦香气较浓 | 偶见焦斑 |
| 2.00     | 49.21±0.91 | 6.73±0.06 | 7.39±0.08  | 深棕色或棕褐色          | 焦香气浓烈 | 许多焦斑 |

表 7 不同炮制时间考察时麸炒山药饮片含量测定及加权分析综合评分结果 ( $\bar{x} \pm s, n = 3$ )

| 炮制时间/<br>min | 小分子成分/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |            |           | 薯蓣皂苷/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 多糖/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | AHP-CRITIC<br>综合评分 |
|--------------|-------------------------------------------|------------|-----------|----------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
|              | 腺苷                                        | 5-HMF      | 糠醛        |                                              |                                        |                    |
| 1.00         | 55.80±0.02                                | 14.70±0.03 | 7.20±0.04 | 154.95±0.68                                  | 803.14±51.37                           | 65.30±0.14         |
| 1.25         | 68.10±0.01                                | 16.80±0.02 | 6.75±0.04 | 201.23±0.55                                  | 696.30±48.25                           | 63.94±0.20         |
| 1.50         | 47.85±0.02                                | 17.55±0.04 | 8.55±0.05 | 461.50±0.35                                  | 855.32±54.89                           | 85.45±0.09         |
| 1.75         | 75.30±0.03                                | 18.15±0.04 | 7.50±0.04 | 254.98±0.50                                  | 650.96±47.93                           | 70.31±0.17         |
| 2.00         | 66.45±0.01                                | 16.05±0.03 | 4.35±0.03 | 177.45±0.72                                  | 677.04±49.12                           | 65.03±0.18         |

表 8 BBD-RSM 试验因素水平、试验设计与结果

Table 8 Levels of experimental factors, experimental design, and results of BBD-RSM

| 组别 | $X_1/\text{g}$ | $X_2/^\circ\text{C}$ | $X_3/\text{min}$ | 小分子成分/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ |       |      |                          | 薯蓣皂苷/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ | 多糖/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$ | 色度值   |       |       |                          | 综合评分  |        |            |
|----|----------------|----------------------|------------------|------------------------------------------|-------|------|--------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|--------|------------|
|    |                |                      |                  | 腺苷                                       | 5-HMF | 糠醛   | $\omega_{\text{CRITIC}}$ |                                         |                                       | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\omega_{\text{CRITIC}}$ | AHP   | CRITIC | AHP-CRITIC |
| 1  | 10 (-1)        | 300 (-1)             | 1.50 (0)         | 67.50                                    | 7.35  | 3.45 | 0.613 3                  | 133.35                                  | 618.98                                | 47.69 | 4.21  | 10.38 | 0.710 9                  | 72.55 | 61.21  | 67.96      |
| 2  | 20 (+1)        | 300                  | 1.50             | 79.80                                    | 8.40  | 3.60 | 0.674 0                  | 121.70                                  | 525.46                                | 49.52 | 3.61  | 12.61 | 0.715 1                  | 65.09 | 57.73  | 60.90      |
| 3  | 10             | 400 (+1)             | 1.50             | 59.40                                    | 6.45  | 4.50 | 0.684 8                  | 138.33                                  | 478.71                                | 51.10 | 4.01  | 10.12 | 0.694 8                  | 63.11 | 59.70  | 59.77      |
| 4  | 20             | 400                  | 1.50             | 88.80                                    | 13.65 | 4.50 | 0.898 5                  | 66.78                                   | 541.06                                | 45.94 | 6.73  | 7.43  | 0.856 9                  | 73.03 | 57.01  | 66.72      |
| 5  | 10             | 350 (0)              | 1.25 (-1)        | 94.95                                    | 10.50 | 3.15 | 0.724 5                  | 161.30                                  | 529.06                                | 44.83 | 4.36  | 10.28 | 0.716 0                  | 69.15 | 66.37  | 66.08      |
| 6  | 20             | 350                  | 1.25             | 98.85                                    | 12.60 | 4.95 | 0.928 9                  | 104.80                                  | 494.30                                | 44.63 | 3.58  | 10.11 | 0.644 1                  | 66.66 | 60.88  | 64.21      |
| 7  | 10             | 350                  | 1.75 (+1)        | 99.90                                    | 12.45 | 3.45 | 0.791 9                  | 143.33                                  | 475.11                                | 46.90 | 6.22  | 7.00  | 0.804 5                  | 68.69 | 64.83  | 64.60      |
| 8  | 20             | 350                  | 1.75             | 72.90                                    | 9.90  | 5.10 | 0.830 2                  | 112.10                                  | 571.04                                | 45.21 | 5.83  | 8.08  | 0.792 7                  | 73.23 | 62.62  | 68.42      |
| 9  | 15 (0)         | 300                  | 1.25             | 68.10                                    | 4.95  | 2.25 | 0.455 1                  | 214.65                                  | 583.05                                | 55.92 | 3.32  | 10.42 | 0.652 1                  | 67.55 | 68.44  | 65.11      |
| 10 | 15             | 400                  | 1.25             | 73.95                                    | 7.20  | 4.20 | 0.700 1                  | 115.55                                  | 607.03                                | 53.84 | 3.32  | 9.58  | 0.628 7                  | 70.08 | 59.25  | 66.55      |
| 11 | 15             | 300                  | 1.75             | 84.75                                    | 7.50  | 1.65 | 0.490 5                  | 205.23                                  | 637.06                                | 49.59 | 5.42  | 9.49  | 0.799 2                  | 75.92 | 71.03  | 71.38      |
| 12 | 15             | 400                  | 1.75             | 69.60                                    | 8.70  | 5.25 | 0.820 8                  | 113.65                                  | 559.05                                | 45.13 | 4.61  | 7.03  | 0.661 4                  | 68.93 | 60.95  | 65.77      |
| 13 | 15             | 350                  | 1.50             | 95.10                                    | 9.45  | 4.80 | 0.844 1                  | 257.90                                  | 788.13                                | 51.67 | 4.74  | 10.00 | 0.757 3                  | 90.20 | 91.74  | 88.80      |
| 14 | 15             | 350                  | 1.50             | 96.00                                    | 9.90  | 4.65 | 0.837 2                  | 255.45                                  | 804.79                                | 51.08 | 4.76  | 10.14 | 0.760 6                  | 90.23 | 91.24  | 88.68      |
| 15 | 15             | 350                  | 1.50             | 94.80                                    | 9.45  | 5.40 | 0.900 6                  | 252.98                                  | 780.90                                | 50.69 | 5.22  | 10.00 | 0.796 6                  | 92.19 | 92.91  | 90.45      |
| 16 | 15             | 350                  | 1.50             | 94.05                                    | 9.60  | 5.25 | 0.890 0                  | 265.68                                  | 818.08                                | 50.76 | 4.86  | 10.29 | 0.771 8                  | 91.53 | 94.37  | 90.37      |
| 17 | 15             | 350                  | 1.50             | 93.75                                    | 9.15  | 4.95 | 0.850 6                  | 246.05                                  | 816.88                                | 50.95 | 4.77  | 10.23 | 0.762 9                  | 90.10 | 90.03  | 88.36      |

表 9 小分子成分 CRITIC 权重分析

Table 9 CRITIC weight analysis of small-molecule components

| 指标    | 指标变异性 | 指标冲突性 | 信息量   | 权重/%   |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| 腺苷    | 0.009 | 1.106 | 0.010 | 22.318 |
| 5-HMF | 0.014 | 0.900 | 0.013 | 28.312 |
| 糠醛    | 0.016 | 1.434 | 0.022 | 49.370 |

2.8.3 薯蓣皂苷、多糖含量测定结果 薯蓣皂苷、多糖含量测定结果见表 8。

2.8.4 色度值测定结果 使用色差仪对 17 份样品进行测量。将各组样品的  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  进行数据统一化处理, 采用 CRITIC 法对色度值进行权重分析, 权重分析结果见表 10。根据权重系数计算各样品色度值的综合评分, 结果见表 8。

2.8.5 AHP-CRITIC 复合加权法分析 结合小分子成分含量、薯蓣皂苷含量、麸炒山药多糖含量和色度值 4 个因素的综合评分, 进行综合权重分析, 结果见表 11, 综合评分见表 8。

表 10 色度值权重分析结果

Table 10 Results of chromaticity value weight analysis

| 色度值   | 指标变异性 | 指标冲突性 | 信息量   | 权重/%   |
|-------|-------|-------|-------|--------|
| $L^*$ | 0.004 | 1.972 | 0.008 | 11.927 |
| $a^*$ | 0.012 | 3.108 | 0.039 | 58.417 |
| $b^*$ | 0.009 | 2.221 | 0.020 | 29.656 |

表 11 CRITIC 综合权重分析结果

Table 11 Results of CRITIC comprehensive weight analysis

| 项目      | 指标变异性 | 指标冲突性 | 信息量   | 权重/%   |
|---------|-------|-------|-------|--------|
| 小分子成分含量 | 0.011 | 2.433 | 0.027 | 26.461 |
| 多糖含量    | 0.012 | 1.633 | 0.019 | 19.154 |
| 薯蓣皂苷含量  | 0.023 | 1.898 | 0.043 | 42.895 |
| 色度值     | 0.005 | 2.204 | 0.012 | 11.490 |

2.8.6 模型拟合与方差分析 采用 Design-Expert 13.0 软件对综合评分进行数据分析, 得到二次多元回归方程: 综合评分 =  $89.330 + 0.230 X_1 - 0.817 X_2 + 1.030 X_3 + 3.500 X_1 X_2 + 1.420 X_1 X_3 - 1.760 X_2 X_3 - 13.430 X_1^2 - 12.060 X_2^2 - 10.070 X_3^2$ ,  $R^2 = 0.997 2$ ,  $R_{\text{adj}}^2 = 0.993 6$ 。由表 12 方差分析可知, 模型  $F = 277.12$ ,  $P < 0.000 1$ , 表明模型极具显著性, 方程失拟项  $F = 0.632 3$ ,  $P = 0.631 9 > 0.05$ , 失拟项不显著, 表明该回归方程在整个回归区域内的拟合情况良好。从  $F$  值可知 3 个因素对综合评分的影响顺序为  $X_3$  (炮制时间)  $> X_2$  (炮制温度)  $> X_1$  (麦麸用量)。 $X_2$ 、 $X_3$  差异显著 ( $P < 0.01$ ),  $X_1$  差异不显著 ( $P > 0.05$ );  $X_1 X_2$ 、 $X_2 X_3$  交互差异极显著 ( $P < 0.01$ ),  $X_1 X_3$  交互差异显著 ( $P < 0.05$ ); 二次项  $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$  差异均极显著 ( $P < 0.01$ )。

2.8.7 响应面分析 采用 Design-Expert 13.0 软件

表 12 回归模型方差分析结果

Table 12 ANOVA results of regression model

| 方差来源     | 平方和      | 自由度 | 均方     | F值     | P值       | 显著性 | 方差来源    | 平方和      | 自由度 | 均方     | F值     | P值       | 显著性 |
|----------|----------|-----|--------|--------|----------|-----|---------|----------|-----|--------|--------|----------|-----|
| 模型       | 2 090.73 | 9   | 232.30 | 277.12 | <0.000 1 | 极显著 | $X_1^2$ | 759.97   | 1   | 759.97 | 906.59 | <0.000 1 | 极显著 |
| $X_1$    | 0.42     | 1   | 0.42   | 0.50   | 0.500 4  |     | $X_2^2$ | 612.37   | 1   | 612.37 | 730.51 | <0.000 1 | 极显著 |
| $X_2$    | 5.35     | 1   | 5.35   | 6.38   | 0.039 5  | 显著  | $X_3^2$ | 426.95   | 1   | 426.95 | 509.32 | <0.000 1 | 极显著 |
| $X_3$    | 8.45     | 1   | 8.45   | 10.08  | 0.015 6  | 显著  | 残差      | 5.87     | 7   | 0.84   |        |          |     |
| $X_1X_2$ | 49.07    | 1   | 49.07  | 58.54  | 0.000 1  | 极显著 | 失拟项     | 1.89     | 3   | 0.63   | 0.63   | 0.631 9  |     |
| $X_1X_3$ | 8.09     | 1   | 8.09   | 9.66   | 0.017 1  | 显著  | 纯误差     | 3.98     | 4   | 1.00   |        |          |     |
| $X_2X_3$ | 12.43    | 1   | 12.43  | 14.82  | 0.006 3  | 极显著 | 总和      | 2 096.60 | 16  |        |        |          |     |

依据回归方程式,在回归模型方差分析结果的基础上绘制响应面图及等高线,分析麦麸用量( $X_1$ )、炮制温度( $X_2$ )、炮制时间( $X_3$ )对综合评分的影响。各因素的交互作用对响应值的影响可用等高线图和响应面图表示,响应面图和等高线图可以直接反映

交互作用对响应值的作用情况,曲面越陡,等高线越密集,影响越显著;等高线越接近椭圆,代表 2 个因素的交互作用越强,具体结果见图 6。结合分析得出两两因素之间对综合评分的影响大小顺序为  $X_1X_2 > X_2X_3 > X_1X_3$ 。

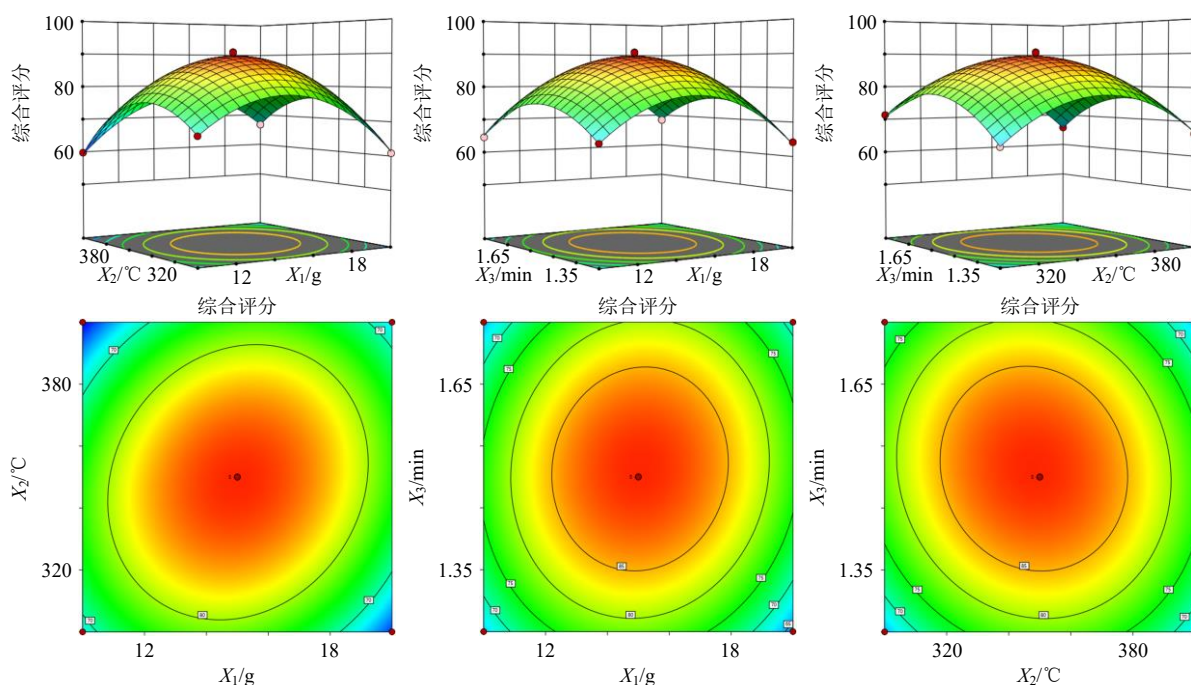


图 6 各因素交互作用 3D 曲面图和等高线图

Fig. 6 3D response surface plots and contour maps of interaction of various factors

**2.8.8 最佳工艺预测** 根据响应面软件优化后得到麸炒山药最佳炮制工艺为锅预热后,100 g 山药加入 15.0 g 麦麸,348.1 °C 炒制 1.51 min。结合操作实际,将炮制工艺调整为锅预热后,100 g 山药加入 15.0 g 麦麸,350 °C 炒制 1.5 min。

**2.8.9 验证试验** 按照确定的炮制工艺进行 3 批次验证试验,按照《中国药典》2020 年版 0213 炮制通则“麸炒法”制备 3 批次麸炒山药,计算上述 6 份样品综合评分,结果见表 13。3 批次验证试验样品的综合评分平均值为 88.97, RSD 为 0.49%,接近

预测值 89.38,且与传统工艺制备的麸炒山药饮片差异较小,说明优选的最佳工艺与传统工艺制备的麸炒山药饮片质量较为接近,工艺稳定、可行。本实验优选的最佳工艺量化了山药麸炒的炮制工艺参数,可为麸炒山药饮片的质量控制提供参考。

### 3 讨论

现代研究发现,山药含有多糖类、皂苷类、尿囊素和腺苷等活性成分<sup>[10-12]</sup>。本实验研究发现,由于尿囊素极性较大,在反相色谱柱上保留时间极短,导致色谱图中出现溶剂峰与尿囊素色谱峰重叠

表 13 工艺验证结果

Table 13 Results of process validation

| 组别   | 批次 | 小分子成分/( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) |       |      |                          | 薯蓣皂苷/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 多糖/<br>( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ) | 色度值   |       |       |                          | AHP-CRITIC<br>综合评分 | 平均值   |
|------|----|-------------------------------------------|-------|------|--------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------|-------|
|      |    | 腺苷                                        | 5-HMF | 糠醛   | $\omega_{\text{CRITIC}}$ |                                              |                                            | $L^*$ | $a^*$ | $b^*$ | $\omega_{\text{CRITIC}}$ |                    |       |
| 最佳工艺 | 1  | 94.23                                     | 9.62  | 4.73 | 0.842 1                  | 263.50                                       | 789.32                                     | 50.78 | 4.87  | 10.28 | 0.772 7                  | 89.35              | 88.97 |
|      | 2  | 94.58                                     | 9.57  | 4.47 | 0.818 6                  | 263.43                                       | 819.28                                     | 50.68 | 4.71  | 10.15 | 0.755 5                  | 88.50              |       |
|      | 3  | 94.40                                     | 9.65  | 4.79 | 0.848 1                  | 256.88                                       | 796.50                                     | 50.40 | 4.82  | 10.23 | 0.766 5                  | 89.05              |       |
| 传统工艺 | 1  | 93.57                                     | 9.45  | 4.68 | 0.832 7                  | 251.50                                       | 780.90                                     | 50.65 | 4.92  | 10.14 | 0.773 6                  | 88.54              | 88.58 |
|      | 2  | 94.28                                     | 9.60  | 4.53 | 0.824 1                  | 254.43                                       | 788.13                                     | 50.59 | 4.75  | 10.05 | 0.756 6                  | 88.22              |       |
|      | 3  | 94.14                                     | 9.45  | 4.67 | 0.833 2                  | 261.88                                       | 803.71                                     | 50.29 | 4.86  | 10.18 | 0.768 5                  | 88.98              |       |

的现象,对检测结果的准确性产生了显著干扰,故未对尿囊素的含量进行测定。5-HMF 和糠醛作为炮制过程中糖类美拉德反应产生的中间产物,也是中药炮制过程中色泽与气味变化的内在影响因素,其含量高低与炮制时间和加热方式密切相关<sup>[13]</sup>。故本研究从整体性角度出发,选择多糖、薯蓣皂苷、腺苷、5-HMF 和糠醛<sup>[14-15]</sup>作为麸炒山药炮制工艺的评价指标,对于优化麸炒山药炮制工艺及提升其内在质量具有重要意义。

中药饮片的色泽是传统判定炮制终点和饮片质量的重要依据,但该评判标准存在主观性和经验性的弊端。近年来,诸多学者将中药饮片外观颜色进行数字化表征,以色差值为指标进行炮制工艺优化<sup>[16]</sup>、中药炮制辅料优选<sup>[17]</sup>、饮片质量评判<sup>[18]</sup>等方面研究,丰富了中药炮制工艺和中药质量的数字化评判体系。本研究采用色差仪对麸炒山药的外观颜色进行数字化表征,有效避免了主观因素的干扰,为麸炒山药炮制工艺的数字化、标准化提供了科学依据。

AHP-CRITIC 混合加权法通过整合 AHP 法在指标权重主观判断方面的优势与 CRITIC 法对指标客观差异的量化分析,可获得更为科学合理的综合权重评价体系。在此基础上,BBD-RSM 作为一种高效的实验设计方法,可以系统分析多因素及其交互作用对目标响应值的影响,并通过建立数学模型实现实验条件的优化<sup>[19-20]</sup>。通过系统优化,确定麸炒山药最佳工艺参数为麦麸用量 15%,炮制温度 350 °C,炮制时间 1.5 min。该工艺条件能够在保证饮片外观颜色符合药典规定的同时,最大限度地保留山药的有效成分,提高饮片的质量稳定性。

课题组前期研究发现,锅体温度低于 300 °C 时,难以达到传统工艺“麸下烟起”的关键炮制条件<sup>[17]</sup>,故选择 300 °C 为最低炮制温度参数。也有研

究麸炒白芍的最佳炮制工艺参数为以 350 °C 撒入麦麸,控制锅底温度 330 °C 炒制 4 min,且高温短时麸炒工艺制备的饮片在外观性状、成分含量等方面与传统工艺制品具有一致性<sup>[21]</sup>,这一研究结果为麸炒工艺的温度参数设定提供了科学依据。本研究结果不仅为麸炒山药的标准化生产提供了科学依据,其采用的综合评价方法和工艺优化策略也可为其其它中药炮制工艺的现代化研究提供参考。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 30.
- [2] 夏新风, 张天翼, 胡佳亮, 等. 基于感官评价的中药制剂工艺实验设计研究进展 [J]. 中国新药杂志, 2021, 30(18): 1687-1691.
- [3] 胡雨, 张丽君, 高波, 等. 正交试验法优选麸炒山药炮制工艺 [J]. 中南农业科技, 2023(10): 27-29.
- [4] 郑美娟, 刁全红. 基于尿囊素及饮片性状变化的麸炒山药炮制工艺量化优选 [J]. 甘肃中医药大学学报, 2020, 37(6): 46-50.
- [5] 黄莉, 杨磊, 金凯, 等. AHP-CRITIC 综合加权联用响应面法的蜜百合炮制工艺优选及颜色相关性分析 [J]. 中草药, 2024, 55(18): 6174-6185.
- [6] 袁楚, 刘想, 高如汐, 等. 基于多指标-响应面法优化土炒白术的炮制工艺 [J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(14): 1956-1964.
- [7] 高如汐, 王凡一, 刘想, 等. 基于多指标-响应面法优选酒蒸地黄炮制工艺 [J]. 医药导报, 2024, 43(11): 1833-1843.
- [8] 刘驰, 于艳, 龚伟, 等. 趁鲜切制山药片与传统切制山药饮片总多糖含量的比较研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(14): 3199-3202.
- [9] Dubois M, Gilles K, Hamilton J K, et al. A colorimetric method for the determination of sugars [J]. Nature, 1951, 168(4265): 167.
- [10] Ren X, Hu J H, Hong Y J, et al. Extraction, separation and

- efficacy of yam polysaccharide [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 281: 136167.
- [11] 王彦平, 杨庆莹, 孙瑞琳, 等. 不同酶法辅助提取紫山药皮薯蓣皂苷及其抗氧化活性研究 [J]. 食品工业科技, 2017, 38(10): 200-204.
- [12] 刘应蛟, 楚世峰, 袁志鹰, 等. HPLC 法同时测定山药饮片、麸炒及土炒山药中尿囊素、腺苷和苯丙氨酸的含量 [J]. 时珍国医国药, 2019, 30(3): 568-570.
- [13] 崔小兵. 基于 Maillard 反应研究麸炒增加“焦香健脾”作用的共性物质 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2013.
- [14] 宿婷婷, 赵旭, 汪坤, 等. 山药的质量控制现状及质量标志物预测分析 [J]. 中国医院药学杂志, 2025, 45(12): 1424-1430.
- [15] 董宁, 陈西, 李旭博, 等. 基于颜色-多糖-抗氧化活性关联分析探究黄精九蒸九制质量变化 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 476-486.
- [16] 张陈了一, 李阳阳, 李明星, 等. 党参炮制工艺优化及颜色与其内在关键质量属性相关性研究 [J]. 中草药, 2024, 55(23): 8023-8034.
- [17] 丁宁, 任榕霞, 王杨, 等. 色空间法结合化学计量学研究麦麸含水量、粒径及其用量对麸炒山药外观颜色的影响 [J]. 中草药, 2023, 54(19): 6286-6294.
- [18] 陈高源, 曹皇亮, 涂济源, 等. 基于物性表征-内在指标结合化学模式识别比较不同醋淬方法对醋鳖甲质量的影响 [J]. 中草药, 2024, 55(22): 7653-7662.
- [19] 陈祥宁, 程世云, 李腾飞, 等. 基于 AHP-CRITIC 综合加权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选建曲发酵工艺 [J]. 中草药, 2025, 56(3): 785-794.
- [20] 刘梦云, 闫小景, 王宸, 等. 基于多指标-响应面法优选甘草制巴戟天工艺及其总寡糖体外抗氧化活性研究 [J]. 中草药, 2024, 55(23): 7989-7998.
- [21] 孟冉, 张振凌, 王胜超, 等. BOX-Behnken 响应面法优选麸炒白芍工艺 [J]. 中华中医药学刊, 2019, 37(2): 357-360.

[责任编辑 郑礼胜]