

基于多成分控制与颜色关联分析的槐米炮制工艺优化研究

孟凡淼¹, 李 宁^{1,2,3}, 张泽昭^{1,2,3}, 王鑫国^{1,2,3*}, 牛丽颖^{1,2,3*}

1. 河北中医药大学, 河北 石家庄 050091

2. 河北省中药配方颗粒技术创新中心, 河北 石家庄 050091

3. 中药材品质评价与标准化河北省工程研究中心, 河北 石家庄 050091

摘要: 目的 优化确定槐米 *Sophorae Japonicae* 2 种不同炮制品的最佳炮制工艺, 采用 UPLC 法建立指标成分的含量测定与色度值关联分析方法。方法 采用 UPLC 法测定槐米的 9 种成分 (5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、槲皮素、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷、山柰素、异鼠李素) 以及醇溶性浸出物含量为评价指标; 采用单因素实验结合 Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface methodology, BBD-RSM) 考察炒制功率、炒制时间、投料量 3 个因素。运用 CRITIC 权重赋值法计算 10 个考察指标的权重系数, 两者结合分析优化槐米 2 种炮制品的工艺。联合 IRIS 电子眼测定槐米不同炮制程度的颜色变化, 运用 SPSS 20.0 和 Origin 2024 进行颜色与指标性成分的相关性分析。结果 炒槐米的最佳炮制工艺为炒制功率 900 W, 炒制时间 5.5 min, 投料量为 115 g, 槐米炭的最佳炮制工艺为炒制功率 1 600 W, 炒制时间 3 min, 投料量为 100 g, 即得。分别制备 3 批样品进行验证, 平均综合评分分别为炒槐米 67.33, 槐米炭 78.98, RSD 分别为 2.29%、0.70%, 与预测值接近, 表明该炮制工艺稳定。色度值与 9 种指标成分相关性分析表明, L^* 与 b^* 值都与芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷 3 个成分呈显著正相关, 与山柰素和槲皮素、异鼠李素呈显著负相关, a^* 值与原儿茶酸、异槲皮苷、槲皮素、山柰素和异鼠李素呈显著正相关, 表明颜色与槐米内在成分变化有一定的相关性。结论 通过 BBD-RSM 及 CRITIC 权重赋值法优选的炒槐米、槐米炭炮制工艺稳定可行。炮制过程中内在成分的变化与色度值显著相关, 为炒槐米、槐米炭的炮制程度判断及其内在成分变化之间的关联提供了简单且直观的判断依据, 为二者的质量评价及临床应用提供了参考。

关键词: 槐米; 炮制工艺; Box-Behnken 设计-响应面法; CRITIC 权重赋值法; 智能感官技术; 电子眼; 色度值; 5-羟甲基糠醛; 原儿茶酸; 芦丁; 异槲皮苷; 槲皮素; 山柰酚-3-*O*-芸香糖苷; 水仙苷; 山柰素; 异鼠李素; 相关性分析

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)15-5859-15

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.15.008

Optimization of processing technology for *Sophora Japonica* based on correlation analysis between multi-component control and color correlation analysis

MENG Fanmiao¹, LI Ning^{1,2,3}, ZHANG Zezhao^{1,2,3}, WANG Xinguo^{1,2,3}, NIU Liying^{1,2,3}

1. Hebei University of Chinese Medicine, Shijiazhuang 050091, China

2. Hebei Traditional Chinese Medicine Formula Granule Engineering & Technology Innovate Center, Shijiazhuang 050091, China

3. Quality Evaluation & Standardization Hebei Province Engineering Research Center of Traditional Chinese Medicine, Shijiazhuang 050091, China

Abstract: Objective To optimize the optimal processing methods for two different preparations of Huaimi (*Sophorae Japonicae*, SJ) and establish a method for determining the content of marker components and analyzing their correlation with color values using UPLC. **Methods** UPLC was employed to determine nine components in SJ (5-hydroxymethylfurfural, protocatechuic acid, rutin, isoquercitrin, quercetin, kaempferol-3-*O*-rutoside, narcissin, kaempferol, and isorhamnetin) and alcohol-soluble extract content as evaluation indicators. A single-factor experiment combined with Box-Behnken design-response surface methodology (BBD-RSM) was employed to investigate three factors: roasting power, roasting time, and feedstock quantity. The weighting coefficient of the 10

收稿日期: 2026-02-16

基金项目: 河北省省级科技计划项目 (262W2501D); 河北省重点研发计划项目 (20372502D); 国家中医药管理局科技项目 (GZY-KJS-2023-030); 河北省中医药管理局项目 (2026373)

作者简介: 孟凡淼 (2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药分析及质量控制。E-mail: YJS20242132@hebcm.edu.cn

*通信作者: 牛丽颖, 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为中药分析及药效物质基础。E-mail: niuliying@hebcm.edu.cn

王鑫国, 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为药效物质基础及新药研发。E-mail: wangxinguo@hebcm.edu.cn

indicators was calculated using the criteria importance through inter-criteria correlation (CRITIC) method. Both approaches were integrated to analyze and optimize the processing techniques for the two prepared forms of SJ. The IRIS electronic eye was employed to measure color changes in SJ at different processing levels. SPSS 20.0 and Origin 2024 software were used to analyze the correlation between color and indicator components. **Results** The optimal processing conditions for stir-fried SJ were determined as frying power 900 W, 5 min processing time, and 115 g batch size. For charred SJ, the optimal conditions were frying power 1 600 W, 3 min processing time, and 100 g batch size. Three batches of samples were prepared for validation, yielding average composite scores of 67.33 and 78.98 with RSD of 2.29% and 0.70%, respectively. These values closely matched predicted values, indicating process stability. Correlation analysis between color values and nine components revealed that both L^* and b^* values showed significant positive correlations with rutin, kaempferol 3-*O*-rutinoside, and narcissin, while exhibiting significant negative correlations with kaempferol, quercetin, and isorhamnetin. The a^* value demonstrated significant positive correlations with protocatechuic acid, isoquercitrin, quercetin, kaempferol, and isorhamnetin, indicating a correlation between color and changes in internal components of SJ. **Conclusion** The processing methods for stir-fried SJ and charred SJ optimized through BBD-RSM and CRITIC weighting are stable and feasible. Changes in intrinsic components during processing showed significant correlation with color values, providing a simple and intuitive basis for assessing the degree of processing and the relationship between intrinsic component changes in stir-fried SJ and charred SJ, and offering reference for their quality evaluation and clinical application.

Key words: *Sophorae Japonicae*; processing techniques; Box-Behnken design-response surface methodology; CRITIC weighting method; intelligent sensory technology; electronic eye; colorimetric values; 5-hydroxymethylfurfural; protocatechuic acid; rutin; isoquercitrin; quercetin; kaempferol-3-*O*-rutinoside; narcissin; kaempferide; isorhamnetin; correlation analysis

槐米为豆科植物槐 *Sophora japonica* L.的干燥花蕾,夏季花蕾形成时采收,经干燥并除去枝、梗及杂质而得^[1]。其生品味苦性寒,归肝、大肠经,具有凉血止血、清肝泻火的功效^[2]。历代本草著作如《日华子本草》等均详细记载了槐米的炮制沿革^[3],同时《中国药典》《全国中药炮制规范》及地方规范明确要求其炮制品以炒黄(炒槐米)和炒炭(槐米炭)为主^[4]。研究表明,槐米的生品与不同炮制品药效有着明显差异,炒槐米清热凉血作用弱于生品但强于槐米炭,止血作用则介于二者之间;槐米炭止血作用显著增强,清热凉血作用极弱^[4],表明不同炮制程度对药效的影响。

槐米主要含黄酮类、皂苷类及鞣质等成分^[5]。炮制过程中,黄酮类和鞣质含量动态变化是其止血作用增强的物质基础,但炒槐米与槐米炭的作用机制存在差异^[6]。基于现存文献缺乏具体的炮制工艺参数研究(如炒制功率、炒制时间、投料量),导致饮片质量波动,难以保障临床疗效的稳定性和重现性。因此,对槐米炮制工艺的优化以及炮制程度的把控成为亟待解决的问题。

Box-Behnken 设计-响应面法(Box-Behnken design-response surface methodology, BBD-RSM)通过构建三维响应曲面解析多因素交互效应,在工艺优化中较正交设计等传统方法更具准确性^[7-8]。当前槐米炮制前后研究,主要集中在黄酮类及鞣质类成分含量变化研究,仅靠单一成分难以全面评价炮制

质量^[9],因此本研究采用 CRITIC 客观赋权法整合多成分含量数据,建立多指标综合评分体系^[10],并结合电子眼色度分析技术($L^*a^*b^*$ 色彩模型)^[11],探究炮制过程中,饮片外观颜色与化学成分的协同变化规律^[12-14],为炮制工艺的优化提供研究思路,为“以色控质”提供依据,为槐米炮制程度的精准判别提供技术支持,为槐米生品及炮制品的质量控制提供多维度研究方法,同时也为饮片生品与炮制品进一步开发与临床应用提供参考。

1 仪器与试药

1.1 仪器

C22-RT22E01 型电磁炉,广东美的生活电器制造有限公司;GR150A 型粉碎机,合肥荣事达小家电有限公司;TDZ5-WS 型低速离心机,中国湘南湘仪实验仪器开发有限公司;Agilent 1290 Infinity II 型系统超高效液相色谱仪,美国安捷伦科技有限公司;BSA224S-CW 型万分之一电子天平、CPA225D 型十万分之一电子天平,赛多利斯科学仪器北京有限公司;KQ-250E 型超声波清洗器,昆山市超声仪器有限公司;UPR-11-20L 型优普系列超纯水机,四川优普超纯科技有限公司;IRIS VA400 型电子眼系统,法国 Alpha MOS 公司。

1.2 试药

对照品 5-羟甲基糠醛(批号 160126)、槲皮素(批号 121120),均购自成都菲普德生物技术有限公司;对照品原儿茶酸(批号 PU0939-0025)、芦丁(批

号 PS1930-0100)、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷(批号 PS012599)、异槲皮苷(批号 PS012788)、山柰素(批号 PS0207-0025)、水仙苷(批号 PS011997)、异鼠李素(批号 PS012557)均购自成都普思生物科技有限公司;各对照品质量分数均 $\geq 98\%$ 。

甲醇、乙腈,均为色谱纯,购自德国 Merck 公司;磷酸,色谱纯,购自上海赛默飞世尔科技有限公司;水为实验室自制超纯水。

1.3 药材

槐米,批号 1240802,收集于河北安国,生品(S1)经石家庄市中医医院主任医师郑倩鉴定,为豆科槐属植物槐 *S. japonica* L. 的干燥花蕾。

2 方法与结果

2.1 炒槐米、槐米炭炮制方法

采用 BBD-RSM 实验设计制备工艺。

2.1.1 炒槐米 根据炒槐米响应面法 3 因素 3 水平设计,以炒制功率、炒制时间和投料量为考察因素,取生品,按照《中国药典》2025 年版通则 0213 清炒法,分别炒至表面深黄色,得 17 批炒槐米饮片,样品编号为 H1~H17。

2.1.2 槐米炭 同上取生品,依据槐米炭响应面设计的 17 组工艺条件,按照《中国药典》2025 年版通则 0213 炒炭法,炒至表面焦褐色,得 17 批槐米炭饮片,样品编号为 T1~T17。

2.2 指标成分的定量测定

2.2.1 供试品溶液的制备 取样品粉末(过 4 号筛)约 0.1 g,精密称定,置具塞锥形瓶中,精密加入甲醇 50 mL,密塞,称定质量,超声处理(功率 250 W、频率 40 kHz) 30 min,放置室温,再称定质量,用甲醇补足减失的质量,摇匀,用 0.22 μm 微孔滤膜滤过,取续滤液,即得供试品溶液。

2.2.2 对照品溶液的制备 分别称取 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰素、异鼠李素对照品适量,精密称定,加甲醇溶解,制成质量浓度分别为 1.666、0.709、2.293、0.640、0.529、0.882、0.531、0.633、0.633 mg/mL 的对照品溶液,即得。

2.2.3 色谱条件 采用 Agilent 1290 Infinity II 超高效液相色谱系统,色谱柱为 Acquity BEH C₁₈ 柱(100 mm $\times$ 2.1 mm, 1.7 μm);流动相体系为乙腈-0.1%磷酸水溶液二元梯度系统,梯度洗脱程序:0~5 min, 12%~18%乙腈;5~9 min, 18%~19%乙腈;9~21 min, 19%~35%乙腈;21~25 min, 35%~90%乙

腈;25~27 min, 90%~12%乙腈;27~33 min, 12%乙腈;柱温 40 $^{\circ}\text{C}$;体积流量 0.2 mL/min;检测波长 257 nm;进样体积 1 μL 。供试品溶液与对照品溶液色谱图见图 1。

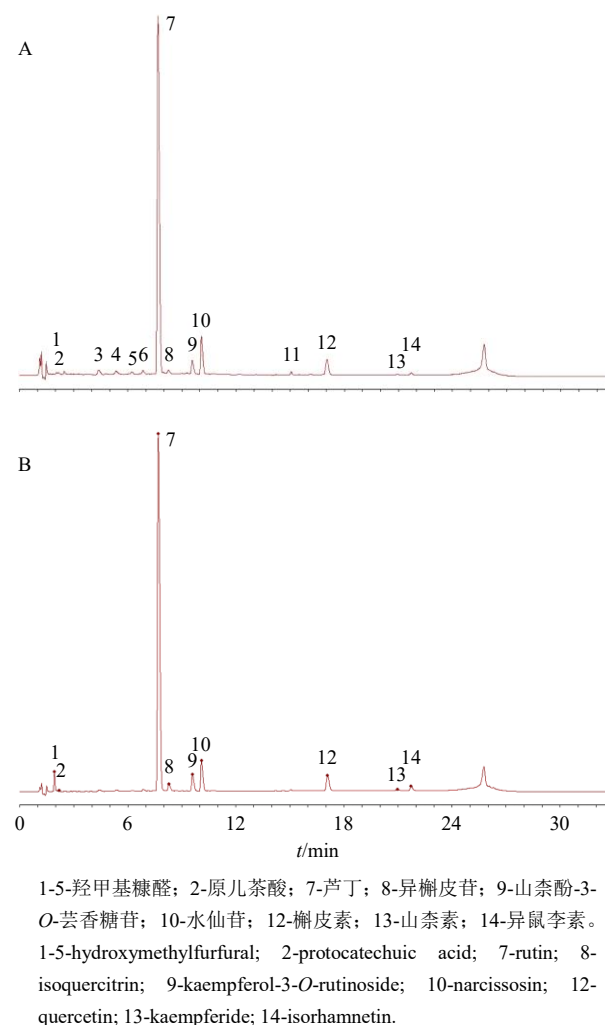


图 1 样品 S1 (A) 及混合对照品 (B) 的 UPLC 图
Fig. 1 UPLC of test sample S1 (A) and mixed reference substances (B)

2.2.4 线性关系考察 取“2.2.2”项下制备的 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰素、异鼠李素对照品溶液各 0.40、2.40、9.20、0.10、1.20、1.10、0.20、0.03、0.20 mL,分别放入同一 10 mL 量瓶中,加入甲醇定容至刻度,继而进行稀释处理,制得系列质量浓度的对照品溶液,在“2.2.3”项下色谱条件进样测定。以各对照品质量浓度为横坐标(X),峰面积为纵坐标(Y)进行线性回归,得回归方程分别为 5-羟甲基糠醛 $Y=6\,416.4\,X-0.494\,0$, $R^2=0.999\,4$,线性范围 0.708 0~7.788 0 $\mu\text{g/mL}$;原儿茶

酸 $Y=18\,019.0X-0.548\,6$, $R^2=0.999\,1$, 线性范围 $0.090\,8\sim0.998\,8\,\mu\text{g/mL}$; 异槲皮苷 $Y=29\,170.0X-27.134\,0$, $R^2=0.999\,0$, 线性范围 $4.347\,0\sim47.817\,0\,\mu\text{g/mL}$; 芦丁 $Y=7\,31.12X-52.332\,0$, $R^2=0.999\,7$, 线性范围 $4\,653.113\,0\sim49\,365.280\,6\,\mu\text{g/mL}$; 水仙苷 $Y=18\,439.0X-21.324\,0$, $R^2=0.999\,0$, 线性范围 $7.613\,4\sim83.747\,4\,\mu\text{g/mL}$; 槲皮素 $Y=72\,655.0X-39.988\,0$, $R^2=0.999\,3$, 线性范围 $2.156\,0\sim23.716\,0\,\mu\text{g/mL}$; 异鼠李素 $Y=20\,803.0X-10.026\,0$, $R^2=0.999\,1$, 线性范围 $2.372\,0\sim26.092\,0\,\mu\text{g/mL}$; 山柰酚-3-*O*-芸香糖苷 $Y=12\,734.0X-22.620\,0$, $R^2=0.999\,2$, 线性范围 $11.976\,0\sim131.736\,0\,\mu\text{g/mL}$; 山柰素 $Y=35\,397.0X-1.520\,7$, $R^2=0.999\,1$, 线性范围 $0.241\,5\sim2.657\,0\,\mu\text{g/mL}$; 结果表明各成分在各自线性范围内有良好的线性关系。

2.2.5 精密度试验 精密称取槐米样品(S1)粉末 1 份, 按照“2.2.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.2.3”项下色谱条件连续进样测定 6 次, 结果 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、山柰酚、异鼠李素峰面积的 RSD 分别为 0.86%、2.66%、2.34%、2.31%、2.27%、2.36%、2.10%、2.19%、2.36%, 表明该仪器的精密度良好。

2.2.6 稳定性试验 精密称取槐米样品(S1)粉末 1 份, 按照“2.2.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.2.3”项下色谱条件, 分别于制备后 0、5、10、15、20、24 h 进样测定, 结果 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、山柰酚、异鼠李素峰面积的 RSD 分别为 1.28%、2.75%、2.45%、2.17%、2.68%、2.11%、1.89%、1.74%、0.95%, 结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.2.7 重复性试验 精密称取槐米样品(S1)粉末共 6 份, 按照“2.2.1”项下方法制备供试品溶液, 按照“2.2.3”项下色谱条件进样测定, 结果 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、山柰酚、异鼠李素质量分数的 RSD 分别为 2.75%、2.13%、2.90%、2.98%、2.51%、1.92%、2.66%、2.85%、2.73%, 结果表明该方法重复性良好。

2.2.8 加样回收率试验 取已测知 9 种指标成分含量的 9 份槐米, 每份 0.05 g, 3 份为 1 组, 精密称定, 每组分别加入样品中各指标成分含量 50%、

100%和 150%的 9 种对照品, 按照“2.2.1”项下方法制成供试品溶液, 在“2.2.3”项下色谱条件进样分析, 计算回收率, 结果 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、山柰酚、异鼠李素的平均加样回收率分别为 100.0%、100.1%、100.3%、99.8%、99.9%、99.7%、100.3%、100.4%、100.4%, RSD 分别为 2.08%、2.01%、1.90%、1.90%、2.03%、1.76%、1.98%、1.89%、1.81%, 结果表明该方法加样回收率良好。

2.2.9 醇溶性浸出物的测定 参照《中国药典》2025 年版浸出物测定法(通则 2201)中的热浸法, 测定醇溶性浸出物含量。精密称定样品 2.0 g (M_1), 加入 30%甲醇 50 mL, 置于 100 mL 的锥形瓶中, 密闭, 称定质量, 静置 1 h 后, 连接回流装置, 加热至沸腾后保持微沸 1 h。冷却后, 补足减失的质量, 摇匀滤过。精密量取滤液 25 mL, 置于已干燥至恒定质量的蒸发皿中, 水浴上蒸干, 于 105 °C 干燥 3 h, 置于干燥器中冷却 30 min, 迅速精密称定质量 (M_2)。根据下列公式计算醇溶性浸出物含量。

$$\text{浸出物含量} = 50 \times M_2 / (25 \times M_1)$$

2.3 综合评价方法

CRITIC 法^[15-16]是一种衡量指标的客观权重赋值法, 与主观赋权法相比更具有科学性, 能够在考虑到指标变异性大小的同时, 兼顾指标之间的相关性, 故本实验采用 CRITIC 法对槐米炮制过程中的特征指标进行权重赋值。为方便赋权法计算, 将 10 个考察指标实验数据代入公式中 $Y=(X_i-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$ 进行归一化处理(X_i 为实际测定值, $X_{\max}$ 为各指标最小值, $X_{\min}$ 为各指标最大值, Y 为归一化值), 消除单位量纲, 将归一化后的数据导入 SPSS AU 在线网站中得到各指标成分的权重系数, 结果见表 1。

该原理对于槐米炮制的目的, 主要基于 2 个方面考量: 一是槐米炮制过程中, 其功效发生变化, 涉及到指标成分和浸出物的多指标协同作用, CRITIC 法客观反映各指标在炮制过程中的信息偏差, 避免主观赋权偏差, 故而对其进行多成分赋权。二是 CRITIC 法在确定的权重与槐米中成分含量差距有一定的相关性, 黄酮类成分是槐米主要的活性成分^[15], 芦丁、槲皮素、水仙苷、山柰酚和异鼠李素等为其主要的黄酮类成分, 芦丁和槲皮素的含量占总黄酮的 60%~70%^[16-17], 水仙苷、山柰酚等含量低于芦丁和槲皮素^[18-20], 原儿茶酸^[21]、5-羟甲基

表 1 炒槐米和槐米炭中各指标权重系数

Table 1 Weighting coefficients of multiple indicators in stir-fried *Sophorae Japonicae* (SJ) and charred SJ

考察指标	炒槐米				槐米炭			
	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重系数/%	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重系数/%
醇溶性浸出物	0.236	8.819	2.085	8.255 1	0.270	6.650	1.796	7.568 7
5-羟甲基糠醛	0.189	10.851	2.049	8.113 0	0.200	10.225	2.040	8.599 8
原儿茶酸	0.291	7.213	2.098	8.308 5	0.346	6.633	2.294	9.669 3
芦丁	0.327	9.583	3.130	12.393 8	0.333	7.983	2.662	11.219 2
异槲皮苷	0.336	7.314	2.457	9.728 1	0.335	6.187	2.074	8.743 0
山柰酚-3-O-芸香糖苷	0.286	9.618	2.752	10.897 6	0.318	8.410	2.675	11.274 0
水仙苷	0.312	9.913	3.096	12.259 5	0.321	8.144	2.618	11.034 0
槲皮素	0.281	8.750	2.461	9.745 5	0.364	6.409	2.331	9.825 0
山柰素	0.277	9.215	2.550	10.099 2	0.330	7.497	2.471	10.413 7
异鼠李素	0.280	9.196	2.576	10.199 8	0.326	8.473	2.765	11.653 2

糠醛^[22]在槐米中含量较低,随着温度升高炮制时间的延长,果糖、葡萄糖等在高温条件下进行分子内重排等多个步骤,脱水形成呋喃环结构的 5-羟甲基糠醛^[23],根据其含量的相对占比和炮制前后成分的相对变化,依据 CRITIC 法对以下 10 个考察指标进行赋值,经处理后得到 10 个考察指标醇溶性浸出物、5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰酚、异鼠李素的权重系数($w_1\sim w_{10}$),结果见表 1。按照公式综合评分= $w_1Y_1+w_2Y_2+w_3Y_3+w_4Y_4+w_5Y_5+w_6Y_6+w_7Y_7+w_8Y_8+w_9Y_9+w_{10}Y_{10}$,分别计算炒槐米和槐米炭的综合评分,其中, $Y_1\sim Y_{10}$ 分别对应的是醇溶性浸出物、5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰酚、异鼠李素的含量。

2.4 槐米炮制工艺单因素条件的筛选

基于前期预实验研究和《中国药典》2025 年版通则 0213 清炒法和炒炭法,本研究选取炒制功率、炒制时间以及投料量为考察因素,通过单因素考察试验初步确定影响因素最优水平。

2.4.1 投料量的考察 炒槐米、槐米炭:各取槐米

药材 5 份,分别为 20、50、100、150、200 g,预热锅底,炒槐米炒制功率为 800 W,炒制时间为 5 min 即得,槐米炭炒制功率为 1 600 W,炒制时间为 3 min 即得。分别测定每份炒槐米中 5-羟甲基糠醛、原儿茶酸、芦丁、异槲皮苷、山柰酚-3-O-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰酚、异鼠李素的含量,其综合评分结果见表 2、3。投料量为 100 g 时,两者综合评分最高,因此,选择 100 g 作为 BBD-RSM 优化试验中炒槐米和槐米炭投料量的中心点。

2.4.2 炒制功率的考察

(1) 炒槐米:取槐米药材 5 份,每份 100 g,炒制功率分别为 400、600、800、1 000、1 200 W 炒制 5 min 即得。同“2.4.1”项计算,其综合评分结果见表 4。炒制功率为 800 W 时,综合评分最高,因此,选择 800 W 作为 BBD-RSM 优化试验中炒槐米炒制功率的中心点。

(2) 槐米炭:取槐米药材 5 份,每份 100 g,炒制功率分别为 1 200、1 400、1 600、1 800、2 000 W 炒制 3 min 即得。同“2.4.1”项计算,其综合评分结果见表 5。炒制功率为 1 600 W 时,综合评分最高,因此,选择 1 600 W 作为 BBD-RSM 优化试验

表 2 炒槐米投料量单因素考察 ($n=3$)

Table 2 Single-factor investigation on input quantity of stir-fried SJ ($n=3$)

投料量/g	质量分数/(mg·g ⁻¹)										综合评分
	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素
20	489.592	0.685	0.842	490.394	2.013	12.751	33.099	2.775	0.230	2.026	66.86
50	492.496	0.741	0.909	490.901	2.273	13.946	35.031	2.723	0.237	1.594	68.85
100	498.400	0.736	0.898	497.866	2.068	12.907	33.247	2.711	0.244	2.039	69.85
150	497.525	0.729	0.831	494.043	2.231	12.853	35.390	2.394	0.251	1.744	68.02
200	490.954	0.404	0.853	497.198	2.100	8.027	24.307	2.590	0.250	1.414	52.11

表3 槐米炭投料量单因素考察 ($n=3$)Table 3 Single-factor investigation on input quantity of charred SJ ($n=3$)

投料	质量分数/(mg·g ⁻¹)											综合
量/g	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素	评分
20	506.947	0.801	0.747	411.550	2.730	12.222	30.496	2.476	0.242	1.174	61.06	
50	496.250	0.861	0.760	416.096	2.705	11.318	31.057	2.375	0.261	1.168	60.56	
100	502.513	0.860	0.749	450.498	2.714	13.139	30.940	2.303	0.258	1.038	62.11	
150	520.534	0.899	0.745	396.629	2.753	12.489	30.805	2.878	0.210	0.982	61.29	
200	506.255	0.846	0.814	402.973	2.634	12.833	28.623	3.043	0.226	1.090	61.14	

表4 炒槐米炒制功率单因素考察 ($n=3$)Table 4 Single-factor investigation on processing power of stir-fried SJ ($n=3$)

炒制功	质量分数/(mg·g ⁻¹)											综合
率/W	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素	评分
400	500.769	0.731	0.802	455.790	1.980	11.872		32.105	2.377	0.280	2.057	66.65
600	499.088	0.747	0.806	457.088	2.349	12.085		32.915	2.420	0.289	1.760	67.15
800	504.275	0.799	0.891	474.844	2.042	12.741		32.588	2.477	0.269	2.060	70.25
1 000	500.015	0.757	0.801	470.874	2.030	12.268		30.533	2.314	0.256	1.643	62.73
1 200	489.144	0.768	0.703	472.881	2.184	12.904		31.535	2.267	0.249	2.060	65.00

表5 槐米炭炒制功率单因素考察 ($n=3$)Table 5 Single-factor investigation on processing power of charred SJ ($n=3$)

炒制功	质量分数/(mg·g ⁻¹)											综合
率/W	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素	评分
1 200	509.592	0.722	0.833	493.002	2.184	13.531	34.221	3.029	0.269	1.988	72.47	
1 400	512.503	0.765	0.912	495.231	2.261	13.671	34.943	2.655	0.248	1.954	73.40	
1 600	518.400	0.793	0.902	502.833	2.288	14.117	35.225	2.938	0.230	1.895	74.21	
1 800	510.525	0.720	0.908	489.534	2.060	13.299	34.133	2.522	0.213	1.797	68.42	
2 000	506.941	0.779	0.869	500.281	2.326	14.132	35.456	2.582	0.213	1.851	71.30	

中槐米炭炒制功率的中心点。

2.4.3 炒制时间的考察

(1) 炒槐米: 取槐米药材 5 份, 每份 100 g, 炒制时间分别为 2、3、5、7、9 min, 炒制功率为 800 W 即得。同“2.4.1”项计算, 其综合评分结果见表 6。炒制时间为 5 min 时, 综合评分最高, 因此, 选择 5 min 作为 BBD-RSM 优化试验中炒槐米炒制时间的中心点。

(2) 槐米炭: 取槐米药材 5 份, 每份 100 g,

炒制时间为 1、2、3、4、5 min, 炒制功率为 1 600 W 即得。同“2.4.1”项计算, 其综合评分结果见表 7。炒制时间为 3 min 时, 综合评分最高, 因此, 选择 3 min 作为 BBD-RSM 优化试验中槐米炭炒制时间的中心点。

2.5 响应面优化槐米的炮制工艺

2.5.1 响应面实验设计及结果 经单因素试验结果表明, 选取炒制功率 (X_1)、炒制时间 (X_2) 和投料量 (X_3) 3 个因素进行 BBD-RSM 优化。应用 Design-

表6 炒槐米炒制时间单因素考察 ($n=3$)Table 6 Single-factor investigation on frying duration of stir-fried SJ ($n=3$)

炒制时	质量分数/(mg·g ⁻¹)											综合
间/min	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3- <i>O</i> -芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素	评分
2	499.576	0.797	0.222	388.534	1.934	10.000		32.388	2.485	0.191	1.683	49.62
3	499.075	0.847	0.314	394.333	1.976	12.043		35.267	2.532	0.200	1.701	55.72
5	507.875	0.885	0.422	398.394	2.013	12.751		33.099	2.775	0.210	1.726	59.02
7	507.322	0.841	0.309	390.901	1.973	12.546		35.031	2.723	0.173	1.594	55.21
9	504.674	0.772	0.326	395.978	1.901	12.562		35.420	2.555	0.188	1.587	54.98

表 7 槐米炭炒制时间单因素考察 ($n=3$)

Table 7 Single-factor investigation on frying duration of charred SJ ($n=3$)

炒制时 间/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)										综合 评分
	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素
1	509.902	0.745	0.835	496.449	2.141	13.447	35.036	2.311	0.273	1.939	71.37
2	520.119	0.721	0.854	496.436	2.148	13.725	34.773	2.471	0.290	1.778	72.31
3	529.592	0.737	0.839	485.392	2.113	13.152	33.798	2.618	0.268	2.069	73.13
4	522.503	0.763	0.857	495.972	2.192	13.724	34.633	2.648	0.210	2.009	72.05
5	518.400	0.717	0.841	489.790	2.117	13.306	33.630	2.618	0.210	2.053	70.02

Expert 13.0 软件, 根据单因素实验结果构建 3 因素 3 水平表见表 8、9。

2.5.2 模型拟合及方差分析 应用 Design-Expert 13.0 软件。进行数据拟合分析, 得到炒槐米的 2 元回归方程: $Y=61.240+2.240 X_1+0.570 X_2+3.810 X_3+4.110 X_1X_2+0.267 5 X_1X_3+7.180 X_2X_3-4.280 X_1^2-7.580 X_2^2-9.850 X_3^2$, 方差分析结果见表 10, 据表 10 所得结果显示, 模型 $P<0.05$ 显著, X_2X_3 、 X_2^2 、 X_3^2 均显著, X_1^2 和 X_1X_2 、 X_1X_3 不显著。槐米炭的二元回归方程: $Y=78.790+0.480 X_1+0.130 X_2+2.730 X_3-4.650 X_1X_2-4.840 X_1X_3+8.390 X_2X_3-13.010 X_1^2-17.130 X_2^2-15.460 X_3^2$, 方差分析结果见表 10, 据表 10 所得结果显示, 模型 $P<0.05$ 显著, 信噪比高 (8.89) >4 , 预测 R^2 (0.930 4) 与 R_{adj}^2

(0.840 8) 差值 $0.13<0.2$, 说明模型能有效揭示功率、时间和投料量交互作用对于炮制的关键影响, 失拟项显著, 表明在复杂的工艺优化中可能存在未控因素。 X_2^2 、 X_3^2 、 X_2X_3 和 X_1^2 均显著, X_1X_2 、 X_1X_3 不显著。

2.5.3 炮制工艺预测及验证实验 采用 Design-Expert 13.0 软件依据拟合方程绘制响应面图及等高线图 (图 2、3), 并理论优化得到 2 种炮制工艺的最佳参数: 炒槐米为炒制功率 882.647 W、炒制时间 5.590 min、投料量 115.321 g, 预测综合评分 67.42; 槐米炭为炒制功率 1 599.165 W、炒制时间 3.028 min、投料量 104.818 g, 预测综合评分 78.92。由于实际炮制仪器设备的显示与调控模块为整体化设计, 为实现参数的快速、准确读取与调节, 将

表 8 炒槐米 BBD 实验设计及结果

Table 8 BBD experimental design and results for stir-fried SJ

编号	X_1 /W	X_2 / min	X_3 /g	质量分数/(mg·g ⁻¹)										综合 得分
				醇溶性 浸出物	5-羟甲 基糠醛	原儿 茶酸	芦丁	异槲 皮苷	山柰酚	3-O- 芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠 李素
H1	600 (-1)	3 (-1)	100 (0)	516.197	1.002	0.424	549.303	1.802	10.253	17.592	1.466	0.124	0.838	46.09
H2	1 000 (+1)	3	100	517.322	1.068	0.470	547.913	1.652	9.890	17.242	1.335	0.113	0.790	44.31
H3	600	7 (+1)	100	504.674	1.068	0.699	484.055	2.029	9.043	15.704	2.044	0.132	0.974	47.42
H4	1 000	7	100	482.703	1.009	1.233	284.328	3.253	6.932	10.255	4.203	0.318	1.078	57.54
H5	600	5 (0)	50 (-1)	498.875	1.143	0.465	544.103	1.675	9.905	17.441	1.479	0.119	0.833	45.70
H6	1 000	5	50	436.500	0.551	0.936	75.318	2.789	3.291	3.739	6.420	0.404	2.511	48.03
H7	600	5	150 (+1)	503.400	1.056	0.561	496.692	1.890	9.424	16.427	2.250	0.164	1.055	48.85
H8	1 000	5	150	492.826	1.050	0.701	468.668	2.159	8.999	15.464	2.895	0.184	1.217	52.34
H9	800 (0)	3	50	529.268	1.109	0.529	533.058	1.918	9.539	17.098	1.905	0.137	0.964	48.53
H10	800	7	50	525.769	2.041	0.334	16.811	1.602	2.322	1.433	3.463	0.256	1.615	23.83
H11	800	3	150	496.076	1.136	0.522	537.571	1.968	9.952	17.665	2.001	0.150	0.950	50.72
H12	800	7	150	504.275	0.882	0.772	178.562	3.542	8.707	6.826	4.469	0.265	1.711	52.79
H13	800	5	100	537.766	1.127	0.916	522.766	2.774	9.816	16.938	4.311	0.120	1.797	65.75
H14	800	5	100	537.719	1.106	0.877	517.582	2.692	9.128	15.401	4.139	0.183	1.665	63.60
H15	800	5	100	556.144	1.040	1.185	518.551	3.554	8.052	12.751	4.041	0.238	1.557	68.29
H16	800	5	100	535.566	1.087	0.861	515.591	2.675	9.264	15.474	4.071	0.169	1.560	62.20
H17	800	5	100	542.092	1.123	0.852	521.385	2.732	8.907	14.864	3.943	0.180	1.621	62.23

表 9 槐米炭 BBD 实验设计及结果
Table 9 BBD experimental design and results for charred SJ

编号	X_1 / W	X_2 / min	X_3 / g	质量分数/(mg·g ⁻¹)										综合 得分
				醇溶性 浸出物	5-羟甲 基糠醛	原儿 茶酸	芦丁	异槲 皮苷	山柰酚 3- <i>O</i> - 芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠 李素	
T1	1 400 (-1)	2 (-1)	100 (0)	540.119	1.017	0.464	533.947	1.918	10.021	17.352	1.872	0.132	0.935	44.23
T2	1 800 (+1)	2	100	539.592	1.038	0.577	487.051	2.159	9.481	16.275	2.275	0.155	1.061	47.70
T3	1 400	4 (+1)	100	482.503	1.071	0.843	162.721	3.422	4.916	6.633	4.262	0.336	2.237	58.91
T4	1 800	4	100	398.400	0.466	1.154	64.209	2.387	3.013	3.251	5.129	0.329	2.154	43.77
T5	1 400	3 (0)	50 (-1)	480.528	0.754	0.849	250.917	2.771	6.511	9.500	2.929	0.209	1.432	43.05
T6	1 800	3	50	526.947	0.809	0.960	230.382	2.977	6.040	8.664	4.087	0.326	2.039	60.48
T7	1 400	3	150 (+1)	496.576	1.088	0.604	502.696	2.217	9.544	16.642	2.488	0.176	1.119	49.84
T8	1 800	3	150	498.075	1.113	0.601	463.239	2.283	9.053	15.639	2.513	0.175	1.129	47.93
T9	1 600 (0)	2	50	507.875	1.115	0.364	461.149	2.544	8.869	15.072	3.080	0.196	1.267	50.11
T10	1 600	4	50	544.264	2.264	0.484	69.349	1.958	2.882	2.216	1.791	0.186	2.003	28.50
T11	1 600	2	150	562.344	1.142	0.550	464.905	2.017	9.972	17.002	2.029	0.150	0.983	47.12
T12	1 600	4	150	496.250	0.882	0.920	329.919	3.015	6.929	11.184	4.317	0.260	1.666	59.07
T13	1 600	3	100	589.000	1.006	1.105	462.028	3.099	8.453	15.274	4.948	0.269	1.772	78.10
T14	1 600	3	100	582.413	1.204	1.067	479.170	3.069	8.609	15.538	4.958	0.267	1.709	78.34
T15	1 600	3	100	581.484	1.248	1.123	466.686	3.218	8.850	14.809	4.531	0.298	1.719	80.08
T16	1 600	3	100	584.242	1.059	1.084	463.051	3.068	8.268	15.362	5.294	0.268	1.780	78.52
T17	1 600	3	100	587.782	1.090	1.093	459.608	3.187	8.905	14.935	4.794	0.270	1.779	78.91

表 10 炒槐米和槐米炭方差分析
Table 10 Analysis of variance (ANOVA) for stir-fried SJ and charred SJ

误差 来源	自由度	炒槐米						槐米炭					
		平方和	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性		平方和	均方差	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值	显著性	
模型	9	234.59	137.18	4.01	0.040 3	显著		3 818.82	424.31	10.39	0.002 7	显著	
X_1	1	40.10	40.10	1.17	0.314 8			1.85	1.85	0.04	0.837 4		
X_2	1	2.57	2.57	0.07	0.792 1			0.14	0.14	0.00	0.953 6		
X_1	1	115.98	115.98	3.39	0.108 1			59.51	59.51	1.46	0.266 6		
X_1X_2	1	67.73	67.73	1.98	0.202 2			86.58	86.58	2.12	0.188 7		
X_1X_1	1	0.28	0.28	0.01	0.929 7			93.51	93.51	2.29	0.174 0		
X_2X_1	1	206.07	206.07	6.03	0.043 8			281.57	281.57	6.89	0.034 1		
X_1^2	1	77.13	77.13	2.26	0.176 9			712.26	712.26	17.44	0.004 2		
X_2^2	1	241.92	241.92	7.07	0.032 5			1 235.70	1 235.70	30.26	0.000 9		
X_1^2	1	408.41	408.41	11.94	0.010 6			1 006.20	1 006.20	24.64	0.001 6		
残差	7	239.41	34.20					285.86	40.84				
失拟项	3	161.18	53.73	2.75	0.176 8	不显著		283.43	94.48	108.40	0.000 1	显著	
纯误差	4	78.22	19.56					2.43	0.60				
总离差	16	1 473.99						4 104.67					

上述参数分别调整为便于操作的整数：炒槐米采用炒制功率 900 W、时间 5.5 min、投料量 115 g；槐米炭采用炒制功率 1 600 W、时间 3 min、投料量 100 g。对调整后的工艺进行 3 次验证，结果（表 11）显示，炒槐米平均综合评分 67.33，RSD 为 2.29%，槐米炭平均综合评分 78.98，RSD 为 0.70%，实际值与理论值接近，表明优化工艺稳定可行，设计方案

较准确。基于此工艺参数进行验证实验，说明该模型为工艺稳定提供了可靠依据。

2.6 槐米样品与炮制品的色度值测定

采用电子眼对槐米样品与不同炮制工艺样品的粉末色度值进行测定，使用 24 色色彩校正板校准仪器，光圈采用 5 mm，光源使用 D65。照明模式设置为顶部及底部照明，单一快照模式拍照。平行测定

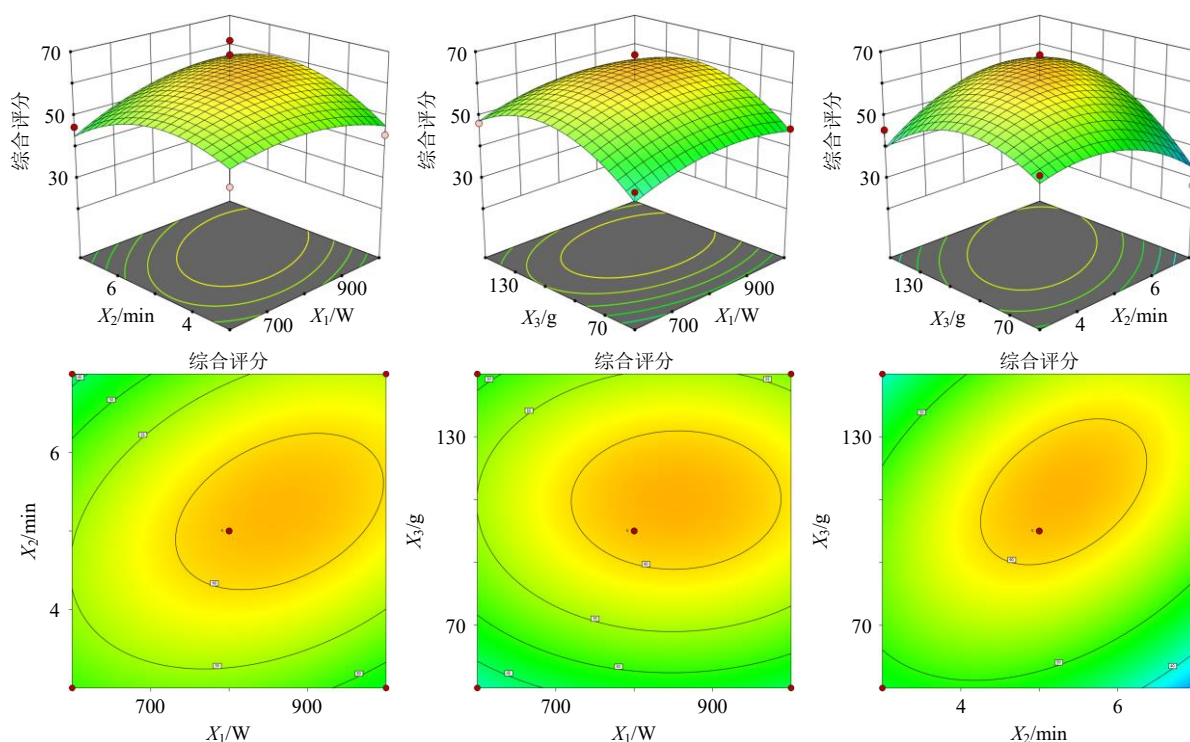


图2 炒槐米 X_1 、 X_2 、 X_3 交互作用的等高线图和三维响应面图

Fig. 2 Contour plots and 3D response surface plots showing interaction effects of X_1 , X_2 , and X_3 for stir-fried SJ

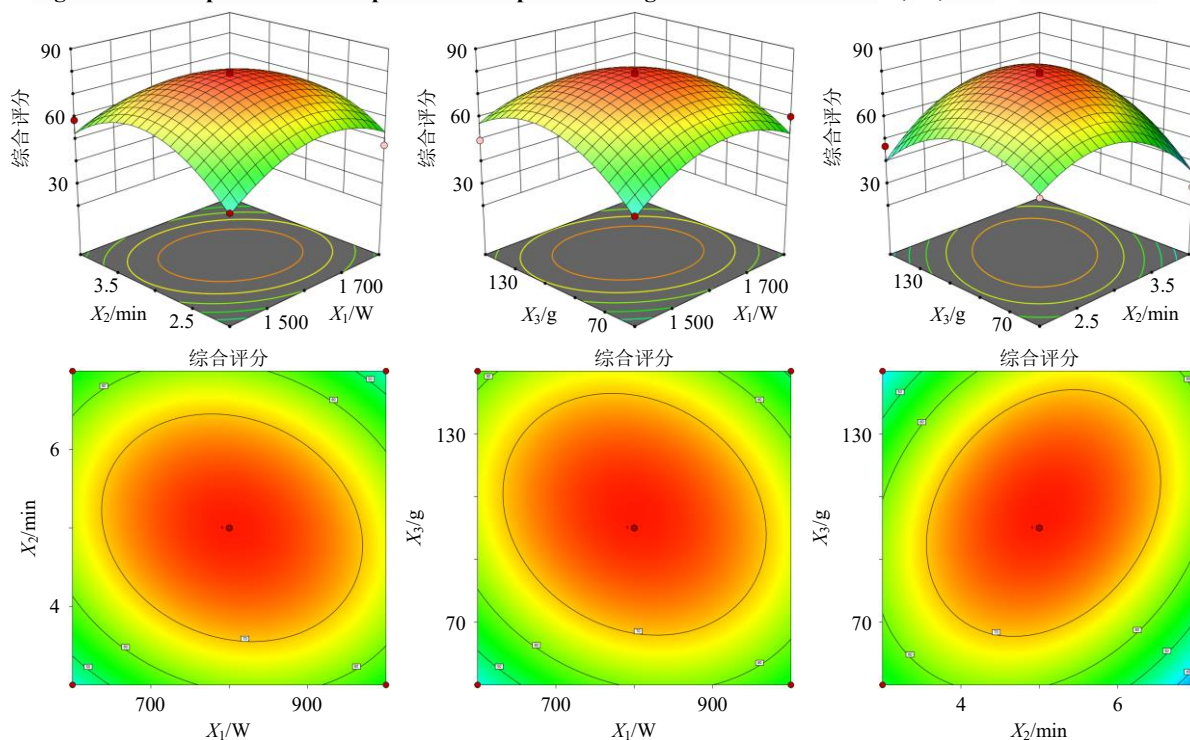


图3 槐米炭 X_1 、 X_2 、 X_3 交互作用的等高线图和三维响应面图

Fig. 3 Contour plots and 3D response surface plots showing interaction effects of X_1 , X_2 , and X_3 for charred SJ

5次,取平均值,收集 L^* 、 a^* 、 b^* 及总色度值 E_{ab}^* 数据,结果见图4~6,色度值测定结果见表12。

为阐明炮制过程中槐米粉末色度值的动态变化^[24],采用电子眼对槐米样品及不同炮制程度样品

(炒黄H1~H17,炒炭T1~T17)进行色度分析。记录 L^* 、 a^* 、 b^* 值 E_{ab}^* 值,基于CIE Lab颜色空间计算得,公式为 $E_{ab}^*=(\Delta L^{*2}+\Delta a^{*2}+\Delta b^{*2})^{1/2}$,结果见表12,炒槐米BBD试验结果表明样品经过不同工艺炮制之

表 11 炒槐米、槐米炭验证实验结果
Table 11 Experimental validation results for stir-fried SJ and charred SJ

验证 样品	质量分数/(mg·g ⁻¹)										综合 评分
	醇溶性浸出物	5-羟甲基糠醛	原儿茶酸	芦丁	异槲皮苷	山柰酚	3-O-芸香糖苷	水仙苷	槲皮素	山柰素	异鼠李素
炒槐米 1	554.061	1.328	0.801	547.507	1.782	12.698	19.924	2.681	0.236	1.711	66.49
炒槐米 2	567.972	1.308	0.799	538.141	1.763	12.609	19.938	2.553	0.263	1.858	69.12
炒槐米 3	560.160	1.309	0.827	541.848	1.684	12.466	19.082	2.620	0.249	1.878	66.39
槐米炭 1	599.910	1.032	1.041	464.219	2.996	10.665	17.938	3.492	0.311	1.712	79.30
槐米炭 2	589.941	1.020	1.049	467.281	3.006	10.671	17.970	3.685	0.310	1.728	79.30
槐米炭 3	599.850	1.032	1.018	465.516	3.009	10.568	17.584	3.459	0.309	1.658	78.33

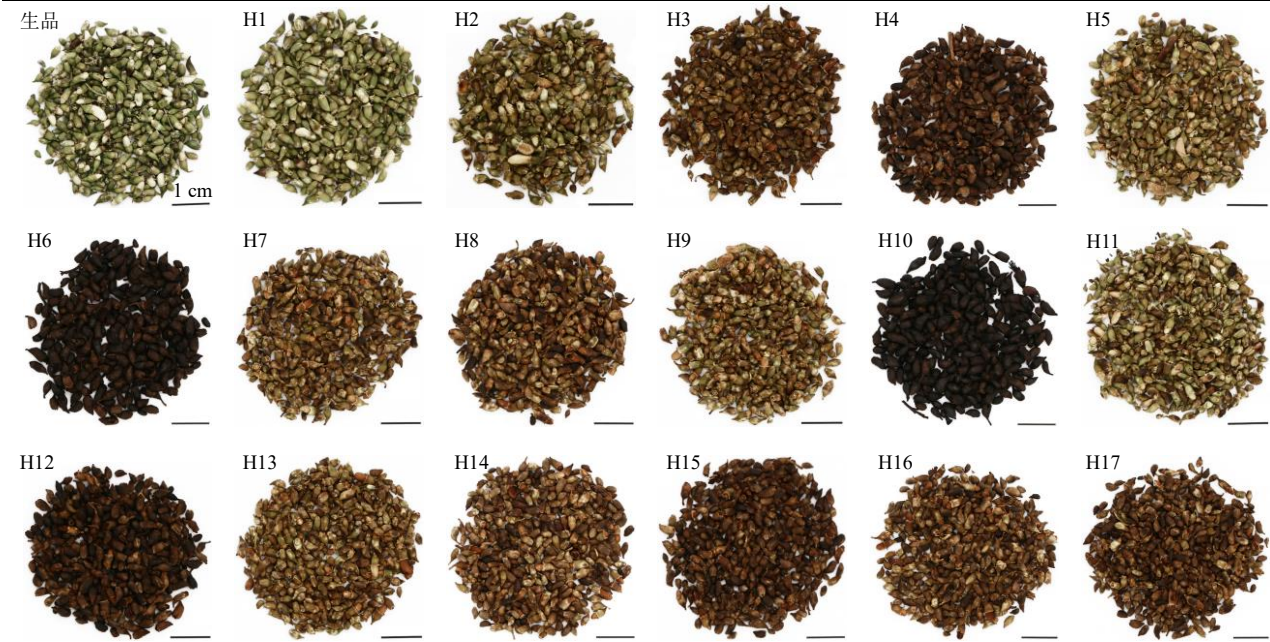


图 4 不同工艺炮制的炒槐米样品

Fig. 4 Samples of stir-fried SJ processed with different technologies



图 5 不同工艺炮制的槐米炭样品

Fig. 5 Samples of charred SJ processed with different technologies

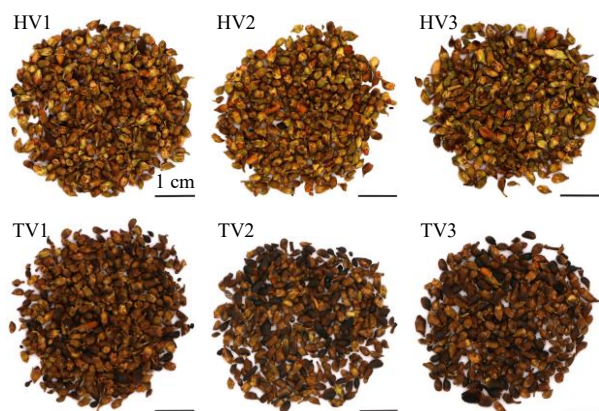


图 6 炒槐米 (HV)、槐米炭 (TV) 响应面的 3 次验证
Fig. 6 Three-fold validation of response surface for stir-fried SJ (HV) and charred SJ (TV)

表 12 炒槐米及槐米炭色度值比较分析

Table 12 Comparative analysis of colorimetric values between stir-fried and charred SJ

样品	L^*	a^*	b^*	E_{ab}^*	样品	L^*	a^*	b^*	E_{ab}^*
S1	97.341	2.358	0.609		S1	97.341	2.358	0.609	
H1	74.330	1.486	42.204	47.544 2	T1	69.775	3.424	41.262	49.129 7
H2	69.753	4.528	43.149	50.749 4	T2	61.185	6.303	36.831	51.331 4
H3	60.564	7.335	38.406	52.971 6	T3	43.161	7.789	18.590	57.344 4
H4	47.702	8.068	24.324	55.309 3	T4	36.057	7.352	8.029	61.934 1
H5	67.198	5.358	42.774	51.918 6	T5	44.689	7.888	20.713	56.631 0
H6	38.951	7.779	12.175	59.771 6	T6	43.508	7.782	18.753	57.067 6
H7	63.418	6.545	39.661	51.898 1	T7	60.262	6.424	35.465	51.052 8
H8	58.861	7.231	36.672	52.962 8	T8	56.945	6.893	32.722	51.804 6
H9	67.327	5.868	43.167	52.195 7	T9	57.460	7.130	33.934	52.190 9
H10	34.362	7.307	5.109	63.334 0	T10	31.890	7.006	0.509	65.616 7
H11	68.172	4.670	40.922	49.813 3	T11	67.533	4.098	38.647	48.357 9
H12	49.855	7.783	26.229	54.229 3	T12	47.943	7.537	22.931	54.454 9
H13	64.022	6.488	41.530	52.932 0	T13	54.604	7.469	30.812	52.582 0
H14	58.602	7.488	36.670	53.174 1	T14	52.091	7.397	28.554	53.422 4
H15	54.860	7.962	32.032	53.136 8	T15	52.640	7.055	28.637	52.970 6
H16	58.718	7.666	37.118	53.412 4	T16	52.659	7.559	28.611	52.987 9
H17	56.911	7.759	34.454	53.002 9	T17	54.177	7.315	30.822	52.920 7
炒槐米 1	64.226	6.404	41.339	52.649 4	槐米炭 1	48.912	7.446	16.993	51.378 7
炒槐米 2	59.347	7.258	36.117	52.234 4	槐米炭 2	49.211	7.384	16.540	50.947 4
炒槐米 3	55.465	7.820	31.728	52.458 5	槐米炭 3	49.744	7.492	16.945	50.584 4

后,与样品的色度差 E_{ab}^* 先升高后降低,再趋于稳定;炒槐米和槐米炭两者的 L^* 值逐渐降低,明度降低, a^* 值升高,颜色偏红, b^* 值升高,颜色偏黄;从生品绿色变为深褐色至黑色 (H13 呈深褐色, T17 趋近黑色)。

通过对 3 批验证数据发现,炒槐米色度值结果:明度 L^* 值为 55.47~64.23,红绿色度 a^* 值为 6.40~

7.82,黄蓝色度 b^* 值为 31.73~41.34,总色度值 E_{ab}^* 值介于 52.23~52.65。槐米炭的色度结果为 L^* 值分布于 48.91~49.74, a^* 值 7.38~7.49, b^* 值 16.54~16.99, E_{ab}^* 值在 50.58~51.38。数据表明,色度参数较为集中,表明 2 种工艺所得批次间差异较小,可通过电子眼的色度检测达到“以色控质”的要求。

2.7 槐米炒制过程中含量测定与色度值动态变化分析

将炒槐米和槐米炭 10 个指标成分的含量分别与 $L^*a^*b^*$ 的色度值导入 SPSS 20.0 软件,分析两者相关性分析。用 Origin 2024 做热图, Pearson 相关性分析热图见图 7、8。结果表明,炒槐米中芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷、槲皮素、山柰素、异鼠李素与 L^* 和 b^* 值双检验概率均为 0.000, $P < 0.05$; 原儿茶酸、异槲皮苷、水仙苷、槲皮素、山柰素和异鼠李素与 a^* 值双检验概率分别为 0.005、0.008、0.041、0.001、0.017、0.011, $P < 0.05$; 表明芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷与 L^* 值和 b^* 值呈正相关,槲皮素、山柰素、异鼠李素与 L^* 值和 b^* 值呈负相关,原儿茶酸、异槲皮苷、槲皮素、山柰素和异鼠李素与 a^* 值呈正相关,水仙苷与 a^* 值呈负相关,在一定程度上 L^* 值和 b^* 值越大,芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷含量越高,槲皮素、山柰素、异鼠李素含量就越低, a^* 值越大,原儿茶酸、异槲皮苷、槲皮素、山柰素和异鼠李素含量越高,水仙苷含量就越低。

槐米炭中芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷与 L^* 和 b^* 值的 P 值均小于 0.05; 原儿茶酸、槲皮素、山柰素和异鼠李素与 a^* 值的 P 值均小于 0.05; 芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷与 L^* 和 b^* 值呈正相关,色度值越大,含量越高,原儿茶酸、异槲皮苷、槲皮素、山柰素和异鼠李素与 a^* 值正相关,色度值越大,含量越高。

据图 7、8 可知, SPSS 20.0 相关性分析与 Origin 2024 得到的相关性热图基本一致,表明颜色与槐米内在成分变化有着紧密的关系^[25],也可根据颜色变化来快速判断槐米炮制程度,结合 UPLC、BBD 试验来判断其最佳的炮制工艺。

2.8 炒槐米与槐米炭色度值的多元统计分析

采用 SIMCA-P 14.1 软件进行系统聚类分析,特征变量表示的炒槐米和槐米炭各 17 组样品的色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 和 9 种成分含量的相对变化值,所得结果见图 9。由图 9 可知,槐米 2 种炮制品可聚为 2 类:

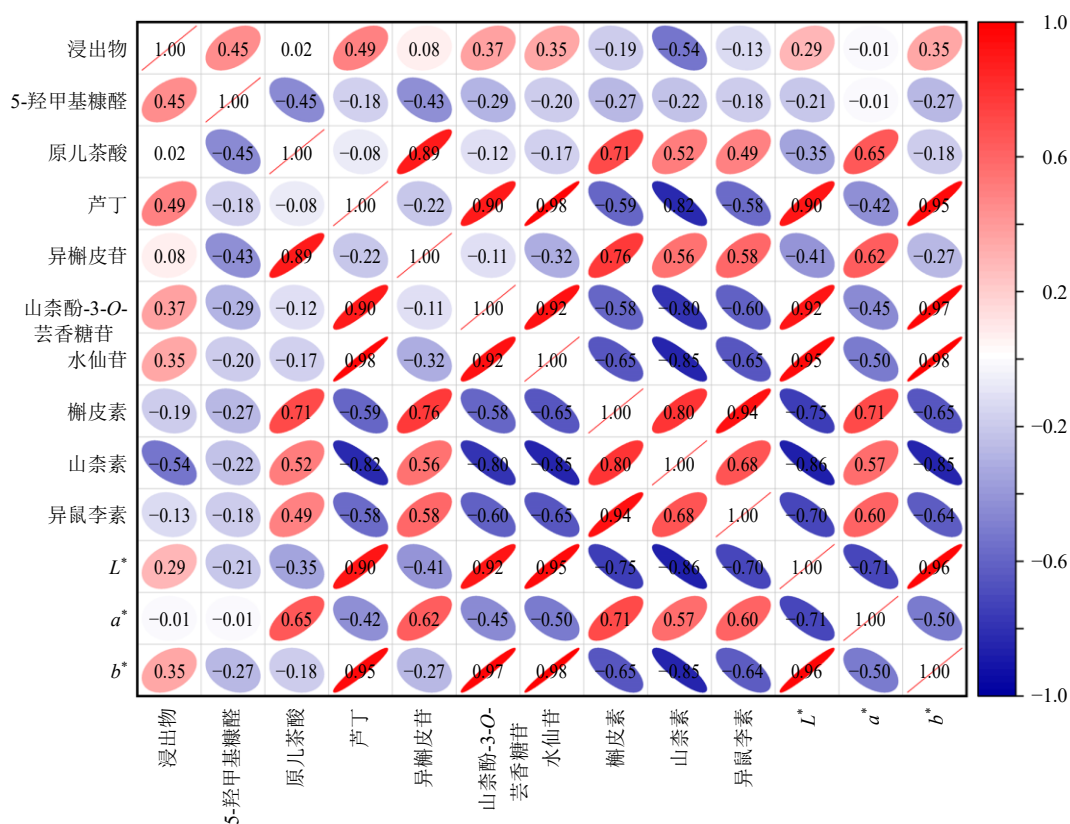


图7 炒槐米の色度値与10个指标的 Pearson 相关性分析

Fig. 7 Pearson correlation analysis between chromatic values of stir-fried SJ and ten indicators

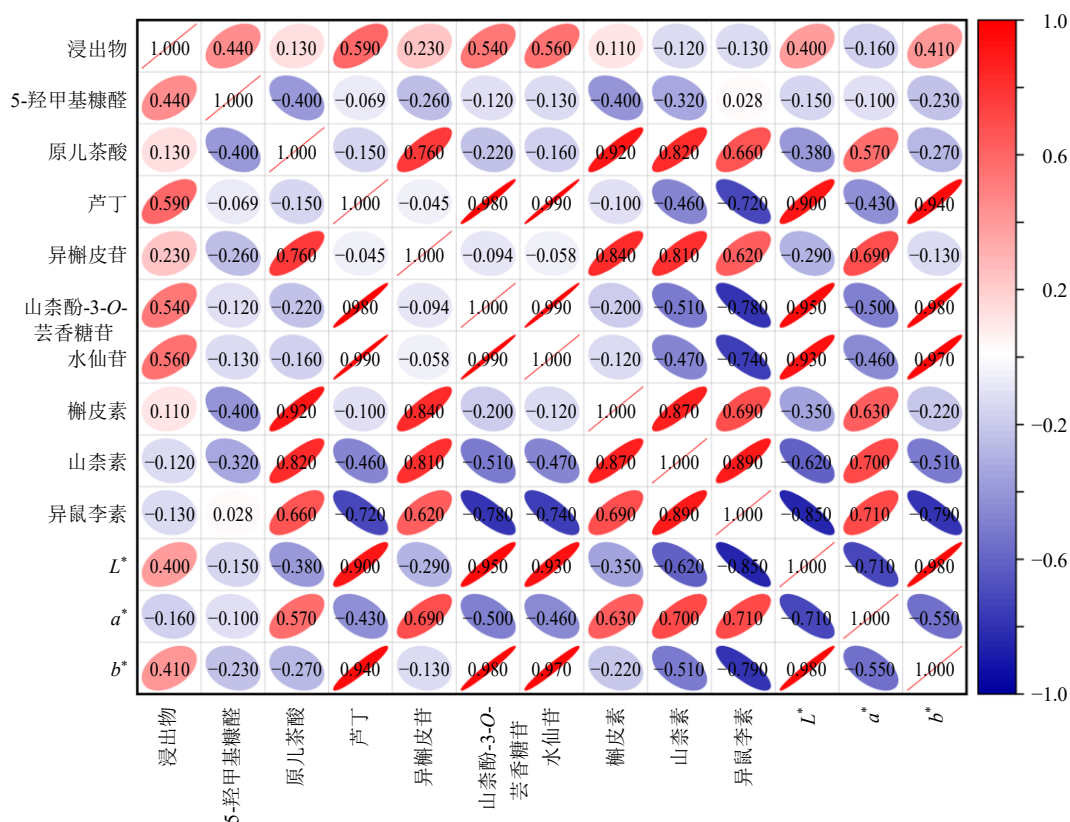


图8 槐米炭の色度値与10个指标的 Pearson 相关性分析

Fig. 8 Pearson correlation analysis between chromatic values of charred SJ and ten indicators

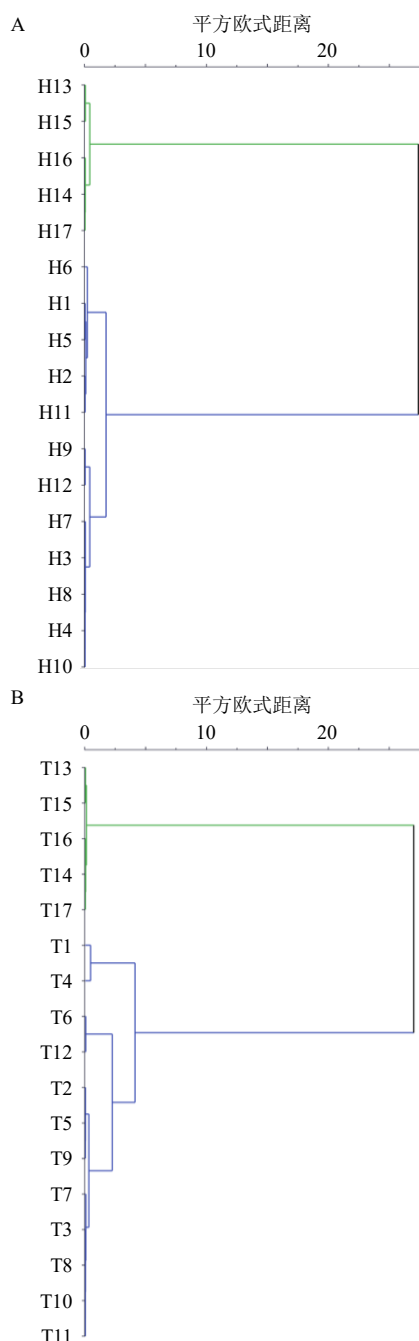


图 9 炒槐米 (A) 和槐米炭 (B) 的 HCA 图

Fig. 9 HCA plots of stir-fried SJ (A) and charred SJ (B)
H1~H12、T1~T12 样品聚为一类，H13~H17、T13~T17 样品聚为另一类，2 图结果一致。用 SPSS20.0 对其进行因子分析，结果如图 10 所示，表明 2 种炮制品异槲皮苷、原儿茶酸、槲皮素、芦丁、山柰酚-3-O-芸香糖苷、水仙苷、 L^* 、 b^* 可能是槐米炮制过程中的差异性成分，在槐米质量评价中可作为相对重要的评价指标。

3 讨论

中药炮制工艺的规范化、标准化是影响饮片质

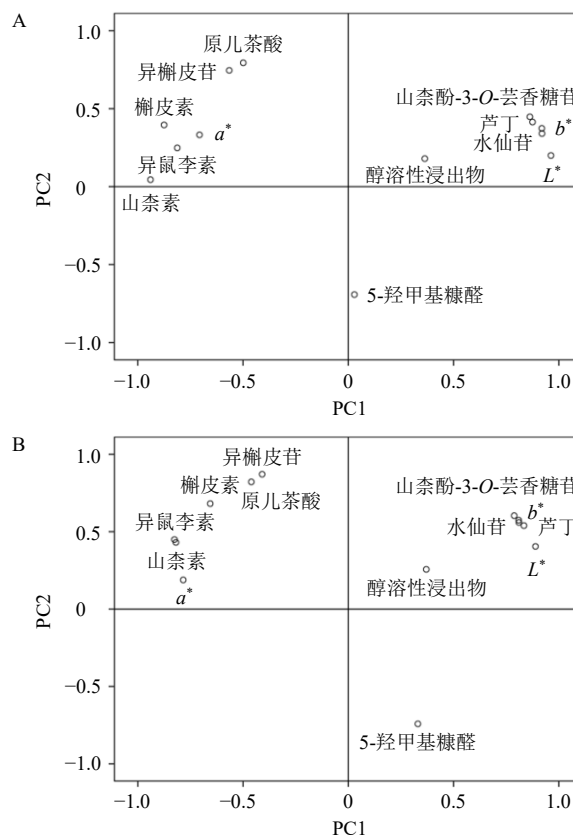


图 10 炒槐米 (A) 和槐米炭 (B) 的 PCA 载荷图

Fig. 10 PCA loading plots of stir-fried SJ (A) and charred SJ (B)

量控制的关键因素。目前槐米炮制品主要靠模糊的颜色判断确定炮制终点^[26]，化学成分、浸出物等对药效有直接影响的多维度质量控制体系尚不明确，其炮制过程中化学成分、浸出物的动态变化与炒黄、炒炭程度的关系亟待量化以保障炮制品的质量及临床疗效^[27-28]。本研究将“颜色-成分-浸出物”进行多维度关联^[29]，通过 BBD-RSM^[30]系统量化炮制参数与多维度指标变化的动态关联，建立并优化炮制工艺的多维度综合评价方法，克服了传统炮制终点模糊的判断，提升炮制工艺质控水平。

槐米传统炮制终点的判断仅靠外观颜色，其内部颜色及整体理化性质的改变不清晰，本研究通过打粉、过筛的方式制备样品，将颜色、化学成分及浸出物有机地整合到一起，既保障了“颜色-成分-浸出物”综合评判方法的统一性，又体现了整体颜色及理化性质的变化。据 3 批验证结果显示，炒槐米、槐米炭各批次间波动较小，工艺重现性良好，为“以色控质”提供了参考依据。

黄酮类成分是槐米中的主要活性成分^[31-32]，本研究质量控制所选择的指标成分为槐米中含量高

且有明显药理活性的关键成分,其大多数有止血的药理作用^[33],与炮制品的临床应用关系密切。临床常用槐米炭作为止血药^[34-37],有研究表明,槐米炒炭后止血效果增强与黄酮类成分发生变化有关^[38],如槐米中的芦丁^[34,39-40]、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷具有抗肿瘤、止血等作用^[41-42]。故选择具有明显止血效果和含量较高的芦丁、槲皮素、水仙苷、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷等9种有明显药理作用的成分作为指标性成分。

由相关性分析可知,槲皮素、山柰素与 a^* 值正相关,随着槲皮素、山柰素的含量升高,绿度随之降低, L^* 值和 b^* 值与芦丁、山柰酚-3-*O*-芸香糖苷、水仙苷正相关,随着其含量的升高,色度逐渐变暗变黄,随着炮制程度的转变,槲皮素^[43-44]、山柰素、异鼠李素苷元含量上升,槲皮素是通过作用于内、外源性凝血系统而具有显著促进凝血作用^[45-46],山柰素^[47]和异鼠李素^[48-49]则是通过增强血小板活化并激活凝血,这意味着槐米随炒制过程止血作用逐渐增强^[50]。通过本研究验证,可通过 L^* 值、 a^* 值和 b^* 值对槐米炮制品进行动态控制,通过简单的色度观测,稳定槐米炮制品临床用药功效。且文献研究表明槐米炒至表面颜色适中时,内在成分可能存在偏差^[38],故采用电子眼对响应面不同炮制程度的药材粉末进行测定,弥补了传统经验鉴别造成的误差,通过颜色变化来判断炮制终点提供了依据。

本研究通过“颜色-成分-浸出物”多维度指标判别方法对炒槐米和槐米炭的进行炮制工艺研究,体现了颜色与理化指标的高度相关性,创新性地提出了通过槐米整体颜色关联理化指标、药理活性的方法,在既有研究揭示炮制过程颜色-成分变化规律的基础上,推进了槐米止血功效物质群的研究,将“以色控质”从经验观察推进到定量关联与空间定位的新层次。但实验中缺少相关动物模型进行验证,后续可进行相关实验研究,以期对槐米不同炮制品的质量控制研究提供新思路。

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. 2025: 380-382.
- [2] 胡婷婷, 李金洋, 左亚锋, 等. 槐花和槐米的本草考证 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2023, 25(11): 138-146.
- [3] 李婉婉, 原思通. 中药槐花炮制历史沿革研究 [J]. 中国中药杂志, 2004, 29(11): 1094-1098.
- [4] 日华子, 常敏毅. 日华子本草辑注 [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2016: 70.
- [5] 王笑, 王雨, 张冰, 等. 槐不同药用部位本草学、化学成分和药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(18): 4461-4467.
- [6] 张倩倩, 朱娟娟, 周巧, 等. 槐花、槐米本草考证及古今临床应用研究进展 [J]. 中成药, 2025, 47(12): 4065-4069.
- [7] 史永洁, 张少萌, 孙堂强, 等. Box-Behnken 设计-响应面法优化醋艾叶炮制工艺及其对镇痛活性的影响 [J]. 南京中医药大学学报, 2025, 41(8): 1075-1086.
- [8] 王悦, 王亚倩, 丁银, 等. Box-Behnken 响应面法优化大籽蒿膏的炮制工艺及其质量控制研究 [J]. 中国新药杂志, 2025, 34(1): 94-101.
- [9] 张倩倩, 朱娟娟, 周巧, 等. 槐花、槐米标准概况与现代研究进展 [J/OL]. 中华中医药学刊, (2025-07-23) [2025-12-31]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20250722.2004.002>.
- [10] 陈发贵, 李翠华, 庾洋, 等. 基于 CRITIC 结合 Box-Behnken 响应面法优选桂枝炒制工艺 [J]. 中药材, 2022, 45(8): 1848-1852.
- [11] 富尧, 马丽娜, 郑长辉, 等. 中心复合设计-响应面法结合电子眼技术的炒柴胡炮制工艺优化及成分与色度相关性分析 [J]. 中草药, 2025, 56(18): 6591-6601.
- [12] 曲珍妮, 吕畅, 毕钰, 等. 基于电子仿生感官技术的山楂不同炮制品颜色、味道变化研究 [J]. 中草药, 2024, 55(20): 6929-6939.
- [13] 尚超凡, 周巧, 朱娟娟, 等. 电子感官技术在中药质量辨识及炮制的应用概况 [J]. 中草药, 2024, 55(24): 8654-8663.
- [14] 郝佳琪, 李新悦, 曹广尚, 等. 多指标-响应面法优化麸炒山药炮制工艺 [J]. 中草药, 2025, 56(18): 6558-6568.
- [15] 肖禹圣, 常言言, 李冰, 等. 槐米化学成分、药理活性与应用的研究进展 [J]. 中药新药与临床药理, 2025, 36(7): 1194-1201.
- [16] 宗淑梅, 王海英, 沈丽霞. 槐米中槲皮素的提取与含量测定 [J]. 时珍国医国药, 2013, 24(2): 308-309.
- [17] Fan S H, Yang G G, Zhang J H, et al. Optimization of ultrasound-assisted extraction using response surface methodology for simultaneous quantitation of six flavonoids in *Flos Sophorae Immaturus* and antioxidant activity [J]. *Molecules*, 2020, 25(8): 1767.
- [18] 张蕾, 王璐瑶, 付学奇, 等. 山柰酚的优化提取及生化性质 [J]. 吉林大学学报: 理学版, 2022, 60(1): 175-181.
- [19] Xue Z H, Song W C, Gao X, et al. Structure identification and evaluation of chemical components from the *Flos Sophorae Immaturus* for inhibitory effects against HepG2 [J]. *Curr Top Nutraceutical Res*, 2021, 19(4): 452-457.
- [20] Liu T, Wang S S, Ma H F, et al. Microwave-assisted extraction combined with in-capillary $[\text{Fe}(\text{ferrozine})_3]_2^{2+}$

- CE-DAD to screen active components with the ability to chelate ferrous ions from *Flos Sophorae Immaturus* (*Flos Sophorae*) [J]. *Molecules*, 2019, 24(17): 3052.
- [21] Song J, He Y N, Luo C H, *et al.* New progress in the pharmacology of protocatechuic acid: A compound ingested in daily foods and herbs frequently and heavily [J]. *Pharmacol Res*, 2020, 161: 105109.
- [22] 郭旭升. 5-羟甲基糠醛及其氧化衍生物的制备研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2025.
- [23] 吴菲菲. 基于 HPLC 检测酒地黄中 5-羟甲基糠醛含量变化的研究 [J]. *实验室检测*, 2025, 3(18): 35-37.
- [24] 徐春梦, 刘占, 张倩倩, 等. 槐花、槐米炒炭过程的成分变化及其“炒炭存性”表征研究 [J]. *中国药房*, 2024, 35(21): 2622-2628.
- [25] 刘绍姜, 钟凌云, 张弘弢, 等. 基于 AHP-CRITIC 法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选盐麸泻炮制工艺及药效研究 [J]. *中草药*, 2025, 56(8): 2773-2785.
- [26] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 31.
- [27] 钱晨, 朱辰奇, 陈志鹏. 炮制中的归经理论与靶向制剂的关系 [J]. *南京中医药大学学报*, 2018, 34(1): 30-34.
- [28] 余秋平, 韩佳瑞, 焦拥政, 等. 论经方煎煮法中的量效关系 [J]. *中医杂志*, 2012, 53(3): 187-189.
- [29] 解旺洋, 张雪, 裴科, 等. 焦苍术炮制工艺优化及其性状-成分关联性与抗氧化活性变化研究 [J]. *中草药*, 2025, 56(22): 8162-8174.
- [30] 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.
- [31] He X R, Bai Y J, Zhao Z F, *et al.* Local and traditional uses, phytochemistry, and pharmacology of *Sophora japonica* L.: A review [J]. *J Ethnopharmacol*, 2016, 187: 160-182.
- [32] Wang T W, Tan J, Li L Y, *et al.* Combined analysis of inorganic elements and flavonoid metabolites reveals the relationship between flower quality and maturity of *Sophora japonica* L. [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 14: 1255637.
- [33] Ishida H, Umino T, Tsuji K, *et al.* Studies on the antihemostatic substances in herbs classified as hemostatics in traditional Chinese medicine. I. : On the antihemostatic principles in *Sophora japonica* L. [J]. *Chem Pharm Bull*, 1989, 37(6): 1616-1618.
- [34] 赵雍, 郭静, 刘婷, 等. 槐花制炭后新止血成分的药理研究 [J]. *中国中药杂志*, 2010, 35(17): 2346-2349.
- [35] 李婉婉, 原思通, 李志宏, 等. 槐花炭化学成分的研究 [J]. *中国中药杂志*, 2005, 30(16): 1255-1257.
- [36] 赵新芝, 郭长强, 韩莉, 等. 槐米炮制研究进展 [J]. *时珍国医国药*, 2000, 11(2): 183-184.
- [37] 徐志. 槐米炭凝血止血作用的实验研究 [J]. *广西中医药*, 1990(1): 44-45.
- [38] 陈叶青. 凉血止血药炒炭时黄酮类成分的变化规律与止血作用的相关性研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2016.
- [39] 李惠, 原桂东, 金亚宏, 等. 槐花饮片及其提取物止血作用的实验研究 [J]. *中国中西医结合杂志*, 2004, 24(11): 1007-1009.
- [40] 付朝晖. 中药中止血成分的研究进展 [J]. *中国中医药信息杂志*, 2001, 8(S1): 27-29.
- [41] 王丹, 王文君. 水仙苷的药理活性 [J]. *辽宁大学学报: 自然科学版*, 2024, 51(2): 113-120.
- [42] Guo L Q, Zhou L, Li S N, *et al.* Integrating network pharmacology and *in vivo* model to reveal the cardiovascular protective effects of kaempferol-3-O-rutinoside on heart failure [J]. *Acta Pharm*, 2025, 75(1): 119-132.
- [43] Sachetto A T A, Rosa J G, Santoro M L. Rutin (quercetin-3-rutinoside) modulates the hemostatic disturbances and redox imbalance induced by *Bothrops jararaca* snake venom in mice [J]. *PLoS Negl Trop Dis*, 2018, 12(10): e0006774.
- [44] Nguyen H C, Hoang H T T, Miyamoto A, *et al.* Effects of roasting on antibacterial and antioxidant properties of *Sophora japonica* buds: The involvements of rutin and quercetin constituents [J]. *Plants*, 2024, 13(23): 3337.
- [45] Manikanta K, NaveenKumar SK, Hemshekhar M, *et al.* Quercetin inhibits platelet activation and ER-stress mediated autophagy in response to extracellular histone. *Phytomedicine*. 2025, 138:156386.
- [46] 付毛毛, 任润馨, 武旭, 等. 槐米炒炭过程中颜色、成分含量的变化规律和相关性分析 [J]. *中草药*, 2025, 56(18): 6602-6611.
- [47] Zhang Z Y, Lv X Y, Zhou X P, *et al.* The mechanism of quercetin in treating intracerebral hemorrhage was investigated by network pharmacology and molecular docking [J]. *Medicine*, 2024, 103(40): e40010.
- [48] Chu H W, Chen W J, Liu K H, *et al.* Carbonization of quercetin into nanogels: A leap in anticoagulant development [J]. *J Mater Chem B*, 2024, 12(22): 5391-5404.
- [49] 单鸣秋. 侧柏叶的干燥加工与炒炭止血机制研究 [D]. 南京: 南京中医药大学, 2013.
- [50] 吴怀恩, 甄汉深, 韦志英, 等. 侧柏叶不同炮制品中槲皮苷与槲皮素的含量测定 [J]. *时珍国医国药*, 2009, 20(2): 354-356.

[责任编辑 郑礼胜]