

基于多指标优化-智能感官联用的黄芩不同炮制品的炮制工艺研究及质量评价体系构建

李宇婷^{1,3,4,5}, 马俊楠², 卜竹林^{1,3,4,5}, 吴宇慧^{1,3,4,5}, 孟祥龙^{1,3,4,5}, 张朔生^{1,3,4,5*}

1. 山西中医药大学中药与食品工程学院, 山西 晋中 030619
2. 大连医科大学中西医结合学院 中药方剂教研室, 辽宁 大连 116044
3. 中药炮制技术传承基地(山西), 山西 晋中 030619
4. 中药炮制山西省重点实验室, 山西 晋中 030619
5. 中药材加工炮制传承与创新研究室, 山西 晋中 030619

摘 要: 目的 优化黄芩 *Astragali Radix* 不同炮制品(炒黄芩、黄芩炭、酒黄芩)的最佳炮制工艺, 探究其外观色泽、气味、滋味等感官性状与主要有效成分之间的相关性。方法 利用热分析技术分析热解温度范围, 并结合多指标-响应面法(response surface methodology, RSM), 以黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素含量及黄芩炮制品外观性状评分为评价指标, 利用层次分析法与熵权法计算各指标权重系数及综合评分; 进一步利用中心组合设计(central combination design, CCD)设计-RSM 考察炮制温度与炮制时间(酒黄芩增加闷润时间、黄酒比例)对炮制工艺的影响; 利用电子感官技术(电子眼、电子鼻、电子舌)分析不同炮制程度样品的响应值, 并通过相关性分析探究感官性状(色泽 L^* 、 a^* 、 b^* 值、气味传感器响应值、滋味传感器响应值)与化学成分之间的相关性。结果 确定最佳工艺参数: 炒黄芩为 205.4 °C、6.5 min, 黄芩炭为 227.4 °C、16 min, 酒黄芩为 180 °C、5 min(闷润 50 min, 黄酒用量 18.2%)。相关性分析表明, 不同炮制程度的黄芩具有可区分的传感器响应模式: 炒黄芩中气味传感器 S7、S10 与滋味传感器 P6、P10~P12 对黄芩苷与汉黄芩苷呈同步强正相关; 黄芩炭和酒黄芩中则普遍转为多传感器与黄芩苷的强负相关, 且汉黄芩素在黄芩炭中与多传感器呈强正相关, 而在炒黄芩中呈强负相关; 电子眼色度值 L^* 、 a^* 、 b^* 与炮制程度显著关联($\Delta E^*_{ab} > 1.5$)。结论 优化工艺稳定可行, 基于电子感官技术构建的质量评价体系可客观区分炮制程度, 揭示的“性状-成分”相关性为炮制终点判定及质量控制提供了理论依据与创新方法。

关键词: 黄芩; 工艺优化; 中心组合设计-响应面法; 层次分析法; 熵权法; 智能感官; 质量评价; 色泽; 气味; 滋味; 热分析技术; 黄芩苷; 黄芩素; 汉黄芩苷; 汉黄芩素; 电子眼; 电子鼻; 电子舌

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)02-0457-17

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.02.008

Research on processing technology and quality evaluation system construction of different processed *Scutellariae Radix* products based on multi index optimization intelligent sensory combination

LI Yuting^{1,3,4,5}, MA Junnan², BU Zhulin^{1,3,4,5}, WU Yuhui^{1,3,4,5}, MENG Xianglong^{1,3,4,5}, ZHANG Shuosheng^{1,3,4,5}

1. College of Chinese Medicine and Food Engineering, Shanxi University of Chinese Medicine, Jinzhong 030619, China
2. Traditional Chinese Medicine Formula Teaching and Research Office, College of Integrated Chinese and Western Medicine, Dalian Medical University, Dalian 116044, China
3. Technology Heritage Base for Chinese Herbal Processing, Jinzhong 030619, China
4. Shanxi Key Laboratory of Chinese Herbal Processing, Jinzhong 030619, China
5. Heritage and Innovation Laboratory for Chinese Medicinal Materials Processing, Jinzhong 030619, China

收稿日期: 2025-08-26

基金项目: 山西省中医药科技创新工程项目(CZ2023041_019); 中药炮制山西省重点实验室开放课题基金资助项目(2023PZKF002); 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); 山西省教育厅 2024 年度研究生教育创新计划研究生科研创新项目(2024SJ340); 山西中医药大学科技创新团队项目(2022TD1014); 山西省科研计划专项中药炮制山西省重点实验室建设(202404010920012); 中药炮制研究创新团队中药材加工炮制传承与创新重点实验室(zyyyjs2024020)

作者简介: 李宇婷(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药炮制学。E-mail: 2497147877@qq.com

***通信作者:** 张朔生(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为中药炮制现代研究。E-mail: zhangshuosheng@aliyun.com

Abstract: Objective To optimize the optimal processing technology of different processed products of Huangqin (*Scutellariae Radix*, SR) [fried *Scutellariae Radix* (fSR), *Scutellariae Radix* charcoal (SRc), wine *Scutellariae Radix* (wSR)], and explore the correlation between sensory traits such as appearance, color, odor, taste, and the main active ingredients. **Method** The multi-index response surface methodology (RSM) was used, with baicalin, baicalein, wogonoside, wogonin, and appearance trait scores as evaluation indicators. The analytic hierarchy process and entropy weight method were used to calculate the weight coefficients and comprehensive scores of each indicator. Further utilize central combination design (CCD)-RSM to investigate the effects of temperature and processing time (soaking time and the alcohol ratio) on the processing technology. Using electronic sensory technology (electronic eye, electronic nose, electronic tongue) to analyze the response values of samples with different processing levels, and exploring the correlation between sensory traits (color L^* , a^* , b^* value, odor sensor response value, taste sensor response value) and chemical composition through correlation analysis. **Results** The optimal process parameters were determined as follows: fSR at 205.4 °C, 6.5 min, SRc at 227.4 °C, 16 min, and wSR at 180 °C, 5 min (moistened for 50 min, with a yellow wine dosage of 18.2%). Correlation analysis shows that different degrees of processing of SR have distinguishable sensor response patterns: odor sensors S7 and S10 and taste sensors P6 and P10—P12 in fSR have a strong positive correlation with baicalin and wogonoside; In SRc and wSR, there is a strong negative correlation between multiple sensors and baicalin, while wogonin shows a strong positive correlation with multiple sensors SRc and a strong negative correlation with fSR. The electronic eye color values (L^* , a^* , b^*) are significantly correlated with the degree of processing ($\Delta E^*_{ab} > 1.5$). **Conclusion** Optimizing the process is stable and feasible. The quality evaluation system based on electronic sensory technology can objectively distinguish the degree of processing, and the correlation between characteristics and components revealed provides theoretical basis and innovative methods for determining the endpoint of processing and quality control.

Key words: *Scutellariae Radix*; process optimization; central combination design-response surface method; analytic hierarchy process; entropy weight method; intelligent sensory; quality evaluation; color; smell; taste; thermal analysis technology; baicalin; scutellarin; wogonoside; wogonin; electronic eye; electronic nose; electronic tongue

黄芩 *Scutellariae Radix* (SR) 来源于唇形科黄芩属植物黄芩 *Scutellaria baicalensis* Georgi 的干燥根^[1]。在我国已有两千多年的药用历史，味苦、性寒，有清热解毒、止血安胎等功效^[2]，为山西省道地药材，被誉为“十大晋药”之一。《中国药典》2025 年版^[3]中收录的黄芩包括黄芩片、酒黄芩 2 种饮片，《安徽省中药饮片炮制规范》2005 年版、《天津市中药饮片炮制规范》2022 年版、《山东省中药饮片炮制规范》2022 年版、《山西中药》1982 年版等多部地方标准中则记载包括炒黄芩、黄芩炭等炮制品^[4]。生品长于清热泻火，炮制后如酒黄芩可缓和苦寒之性、黄芩炭则增强止血作用^[5-6]。然而，目前《中国药典》2025 年版并未收录炒黄芩和黄芩炭，地方规范对其工艺参数（如“炒至微显火色”“武火炒至表面焦黑色”）描述模糊^[7]，缺乏客观终点判定标准，难以保证产品质量的均一性与稳定性，对黄芩不同炮制品，进行工艺优化及炮制终点的客观化表征至关重要。现代研究表明，黄芩主要含有如黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素、汉黄芩苷等黄酮类、挥发油类、多糖类以及铁、锌、铜、锰、铅、镉等微量元素^[8-10]，这些成分赋予其显著的抗炎、抗菌、抗病毒、抗肿瘤及抗器官纤维化等生物活性^[11]。在众多成分中，黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷和汉黄芩素是含量较高、

药理作用明确的主要黄酮类活性物质。值得注意的是，在黄芩炭的高温炮制过程中，汉黄芩苷极易发生降解，其含量显著降低甚至无法检出，导致其定量评价意义有限；同时，该成分的药理活性与黄芩炭的止血功效关联较弱。因此，本研究最终选择以黄芩苷、黄芩素和汉黄芩素的含量，并结合外观性状评分，作为黄芩炭炮制工艺的综合评价指标；而对于酒黄芩和炒黄芩，则仍以黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷及汉黄芩素共同作为质控指标。

热分析法可在程序控温下实时监测物质的理化变化，精确记录其质量、热量等性质与温度及时间的关系，近年来在中药炮制领域（如解析成分热解规律、指导炮制温度范围）的应用日益广泛^[12-14]。本实验通过热重（thermogravimetric, TG）以及微商热重（derivative thermogravimetry, DTG）模拟黄芩炮制过程，确定其适宜炮制的温度范围。

层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）作为主观赋权法可依据指标重要性赋权，而熵权法则属客观赋权法，能有效规避主观偏差^[15]；此外，以电子眼、电子鼻、电子舌为代表的智能感官技术，作为可客观量化评价外观色泽（ L^* 、 a^* 、 b^* 值）、气味及滋味的仿生手段，也已广泛应用于中药鉴别及炮制程度判定^[16-18]，其中，电子眼数值中 L 值代表

明度 (lightness), 从 0 (黑) 到 100 (白), 数值越大表明样品越亮; a 值代表红绿度 (red-green), 正值表示偏红, 负值表示偏绿; b 值代表黄蓝度 (yellow-blue), 正值表示偏黄, 负值表示偏蓝。这三者共同构成了国际通用的颜色空间体系, 能够精准、客观地描述饮片的颜色变化, 是替代传统主观经验描述的有效量化指标。

基于此, 本研究创新性地利用热分析技术分析热解温度范围, 并融合 AHP 与熵权法确定复合权重, 基于黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素含量及外观性状评分等指标计算综合评分, 结合中心组合设计 (central combination design, CCD)-响应面法 (response surface methodology, RSM), 系统优化炒黄芩、黄芩炭及酒黄芩的关键工艺参数, 旨在建立科学、稳定、可重复的最佳工艺; 同时引入电子眼、电子鼻、电子舌技术构建质量评价体系, 通过精准量化不同炮制程度样品的外观色泽 (L^* 、 a^* 、 b^*)、气味 (传感器响应值) 及滋味 (传感器响应值), 并运用相关性分析深入探究感官性状指标与关键黄酮类成分含量间的内在关联, 揭示炮制过程中“性状-成分”的变化规律, 从而为科学判定炮制终点、克服传统经验判断的主观性与模糊性、提升黄芩炮制品质量控制水平提供创新性方法及坚实的实验依据。

1 仪器与材料

1.1 仪器

STA449-F5 型热重-差热同步热分析仪, 德国耐驰公司; AR223CN 型分析天平, 奥豪斯仪器 (常州) 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; CYJ-600 型炒药机, 投料量范围 > 200 g, 瑞控智能科技霸州有限公司; RE-52AA 型旋转蒸发仪, 上海亚荣生化仪器厂; HH-2 型数显恒温水浴锅, 金坛市杰瑞尔电器有限公司; cNose 型电子鼻、Easytongue 型电子舌、c-Eye 型电子眼, 上海保圣实业发展有限公司; GZX-9076 型电热鼓风干燥箱, 上海博迅实业有限公司医疗设备厂; AR223CN 型电子分析天平, 奥豪斯仪器上海有限公司; DE-500g 型多功能粉碎机, 浙江红景天工贸有限公司; Agilent 1260 型高效液相色谱仪, 美国 Agilent 公司。

1.2 药品与试剂

黄芩饮片购于山西国泰中药股份有限公司, 经山西中医药大学中药与食品工程学院张朔生教授

鉴定, 为唇形科黄芩属植物黄芩 *S. baicalensis* Georgi 的干燥根。没食子酸对照品, 批号 18032703, 质量分数 98.00%, 上海诗丹德标准技术服务有限公司; 对照品无水葡萄糖 (批号 131208, 质量分数 98.00%)、黄芩苷 (批号 21121404, 质量分数 98.03%)、黄芩素 (批号 23022804, 质量分数 98.57%)、汉黄芩素 (批号 22053002, 质量分数 99.25%)、汉黄芩苷 (批号 231220501, 质量分数 99.25%), 成都普菲德生物技术有限公司; 无水乙醇, 分析纯, 批号 2014-01-8, 天津市进丰化工有限公司; 明胶, 批号 20220702, 天津市天力化学试剂有限公司; 丙酮, 批号 20051009, 天津市耀华化学试剂有限责任公司; 磷钼钨酸, 批号 20230516, 北京华科盛精细化工产品贸易有限公司; 无水碳酸钠, 批号 20221108A, 天津市科密欧化学试剂有限公司; 干酪素, 批号 20210901, 天津市大茂化学试剂合伙企业 (有限合伙)。

2 方法与结果

2.1 热分析样品的制备

2.1.1 黄芩总黄酮样品的提取 取黄芩 20 g, 加入 60%乙醇 100 mL (料液比 1:50), 搅拌均匀后, 浸泡 45 min; 60 °C 下水浴加热提取 1.5 h, 待体系降温, 滤过除去固体废弃物, 合并滤液, 烘干。干燥提取物转入研钵中研成粉末状, 4 °C 下干燥, 密封保存^[19]。

2.1.2 黄芩总鞣质的提取 70%乙醇 200 mL 浸提 2 次, 每次 1 h, 提取液浓缩至原体积的 1/4, 加明胶到 4%浓度, 分离沉淀物, 用 50%丙酮溶解, 减压干燥得总鞣质, 密封干燥避光保存^[20]。为验证该方法对本品的适用性, 通过预实验采用明胶沉淀法测定总鞣质含量, 结果表明, 使用该方法从本研究的黄芩药材中提取的总鞣质质量分数为 26.77 mg/g, 表明该方法能够有效地从黄芩中富集鞣质组分, 制备的样品可用于热分析。

2.1.3 黄芩粗多糖样品的提取 采用蒸馏水 240 mL, 90 °C 下浸提 120 min、浸提 2 次, 提取液 4000 r/min 离心 (离心半径 6.5 cm) 15 min, 上清液浓缩至 100 mL 左右 (室温)。加入乙醇使乙醇体积分数达到 60%, 静置过夜。滤过, 取出沉淀, 真空烘箱干燥, 阴凉干燥处密封保存^[21]。

为验证该方法对本品的适用性, 通过预实验采用苯酚-硫酸法测定总多糖含量, 结果表明, 使用该方法从本研究的黄芩药材中提取的总多糖质量分

数为 85.23 mg/g, 表明该方法能够有效地从黄芩中富集多糖组分, 制备的样品可用于热分析。

2.1.4 黄芩醇浸出物的提取 60%乙醇 200 mL 回流提取 2 次, 每次 2 h。滤过后, 合并滤液和浓缩液, 冷冻干燥得到黄芩醇浸出物粉末, 4 °C 下干燥密封保存。

2.2 总黄酮含量的测定

2.2.1 对照品溶液的制备 精密称取黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素对照品适量, 分别放入 10 mL 量瓶中, 甲醇溶解定容, 制成黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素质量浓度分别为 0.26、0.12、0.18、0.17 mg/mL 的单一对照品溶液。

2.2.2 供试品溶液的制备 取生黄芩饮片, 粉碎, 过四号筛, 精密称取样品 0.3 g, 用 60%乙醇 40 mL, 浸提 2 h, 浸提 2 次, 合并滤液于 100 mL 量瓶中, 定容, 即得供试品溶液。

2.2.3 色谱条件 色谱柱为 DiamonsilC₁₈ 柱 (250 mm×4.6 mm, 5 μm); 以乙腈-0.1%磷酸水溶液为流动相; 梯度洗脱: 0~30 min, 15%~50%乙腈; 30~40 min, 50%~60%乙腈; 40~50 min, 60%~20%乙腈; 体积流量 1 mL/min; 进样量 10 μL; 柱温 30 °C; 检测波长 276 nm; 进样量 10 μL。

2.2.4 系统适用性 将 4 种对照品溶液 (黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素) 的色谱图进行比较。结果发现, 4 个对照品分别在 12、15、22、27 min 出现色谱峰, 且峰形良好, 结果见图 1。

2.2.5 方法学考察

(1) 精密度试验: 精密吸取“2.2.1”项下对照品溶液 10 μL, 按照“2.2.3”项下色谱条件连续进样 10 μL 黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素对照品溶液各 6 次, 记录各组分峰面积值, 计算黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素峰面积的 RSD 值分别为 0.9%、0.8%、1.0%、0.9%, 结果表明该仪器精密度高。

(2) 稳定性试验: 取同一供试品溶液 (“2.1.1”项下总黄酮样品), 分别于制备后 0、2、4、6、12 h, 按照“2.2.3”项下的色谱条件, 记录峰面积, 计算其 RSD。结果黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素峰面积的 RSD 值分别为 2.9%、3.2%、3.5%、2.8%, 结果表明供试品溶液置于室温下放置 12 h 内稳定。

(3) 重复性试验: 取同一供试品溶液 (“2.1.1”项下总黄酮样品), 按照“2.2.1”项下方法制备 6 份

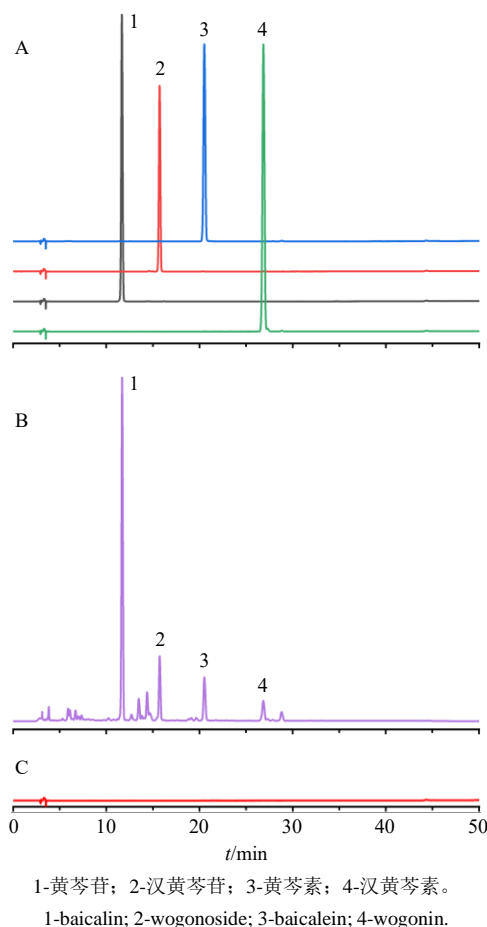


图 1 各对照品 (A)、黄芩生品 (B) 和空白样品 (C) 的 HPLC 图谱

Fig. 1 HPLC spectra of each reference substance (A), raw SR (B), and blank sample (C)

供试品溶液, 进样检测并计算 RSD, 结果黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素峰面积的 RSD 值分别为 1.8%、2.1%、2.3%、3.5%, 结果表明该方法重复性良好。

(4) 加样回收率试验: 精密称定已测知各指标成分含量的供试品溶液 (“2.1.1”项下总黄酮样品) 6 份, 分别加入黄芩素、黄芩苷、汉黄芩素对照品适量, 按照“2.2.3”项下的色谱条件进入高效液相色谱仪测定, 记录峰面积并计算加样回收率, 结果黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素的平均加样回收率分别为 101.1%、99.4%、100.3%、97.5%, RSD 值分别为 1.1%、1.2%、1.8%、1.6%。

2.2.6 线性回归方程的建立 取“2.2.1”项下对照品溶液, 分别稀释后进样分析, 以黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素质量浓度为横坐标 (X), 峰面积为纵坐标 (Y), 建立标准曲线, 进行线性回归, 得回归方程: 黄芩苷为 $Y=39.135X-37.815$, $R^2=$

0.999 2, 线性范围 1.04~5.20 $\mu\text{g/mL}$; 黄芩素为 $Y=32.777 X-33.169$, 线性范围 0.48~2.40 $\mu\text{g/mL}$; 汉黄芩苷为 $Y=23.935 X-24.499$, $R^2=0.999 3$, 线性范围 0.68~3.40 $\mu\text{g/mL}$; 汉黄芩素为 $Y=53.147 X-54.897$, $R^2=0.999$, 线性范围 0.72~3.60 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.3 热重分析实验

分别取生黄芩药材粉末、黄芩总黄酮提取物、黄芩总鞣质提取物、黄芩总多糖提取物、黄芩苷对照品、黄芩素对照品、没食子酸对照品、无水葡萄糖对照品、黄芩浸出物粉末等试样量 (15 mg), 水平均匀分散于中坩埚中, 通过 STA449-F5 型热重-差热同步热分析仪以模拟空气 ($\text{N}_2\text{-O}_2$ 4:1) 为载气, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C/min}$, 体积流量为 60 mL/min , 对其进行热解特性的研究, 从室温升 $600\text{ }^\circ\text{C}$, 每个样品平行试验 3 次。生黄芩粉末、醇浸出物、总黄酮提取物、黄芩苷、黄芩素、总多糖、无水葡萄糖、总鞣质及没食子酸热解特性曲线见图 2, 相关参数见表 1。表 1 中, “燃烧热阶段” 指该失重过程所对应的温度区间; DTG_{max} 指微分热重曲线在该阶段的最大失重速率, 其绝对值越大代表热解反应越剧烈; Mass 指样品在该热解阶段的质量损失百分比。

对比生黄芩粉末燃烧热解特性可知, $154.2\sim393.4\text{ }^\circ\text{C}$ 为主要热解阶段, 在 $305.8\text{ }^\circ\text{C}$ 出现强度为 $6.50\%/min$ 的热解燃烧阶段热失重速率峰值; 对比乙醇提取物燃烧热解特性可知, $164.5\sim245.4\text{ }^\circ\text{C}$ 为主要热解阶段, 在 $195.9\text{ }^\circ\text{C}$ 出现强度为 $7.08\%/min$ 的热解燃烧阶段热失重速率峰值; 对比总黄酮提取物、黄芩苷及黄芩素热解特性可知, $180\sim380\text{ }^\circ\text{C}$ 为总黄酮主要热解阶段, 其中, $180\sim270.4\text{ }^\circ\text{C}$ 为黄芩苷主要热解阶段, $270.4\sim380\text{ }^\circ\text{C}$ 为黄芩素主要热解阶段; 对比总多糖提取物及污水葡萄糖热解特性可知, $153.3\sim430.9\text{ }^\circ\text{C}$ 主要为无水葡萄糖在发生热解, 无水葡萄糖的热解主要分为 2 个阶段, $252.9\sim430.9\text{ }^\circ\text{C}$ 为其主要热解阶段; 对比总鞣质提取物及没食子酸热解特性曲线可知, $190\sim260\text{ }^\circ\text{C}$ 主要为没食子酸在发生热解; 遵循炒炭存性原则, 择黄芩素热解起始温度 $260\text{ }^\circ\text{C}$ 为黄芩炭炮制温度上限, 生品、总多糖提取物以及总鞣质等第 1 次热解阶段最大热失重速率峰峰温在 $210\sim220\text{ }^\circ\text{C}$, 故选择 $220\text{ }^\circ\text{C}$ 为黄芩炭炮制的起始温度, 由此可以推断黄芩炒炭最佳炮制温度为 $220\sim260\text{ }^\circ\text{C}$ 。

2.4 AHP-熵权法系数确立

2.4.1 AHP 法主观权重系数 (W_{AHP}) 的计算 根据

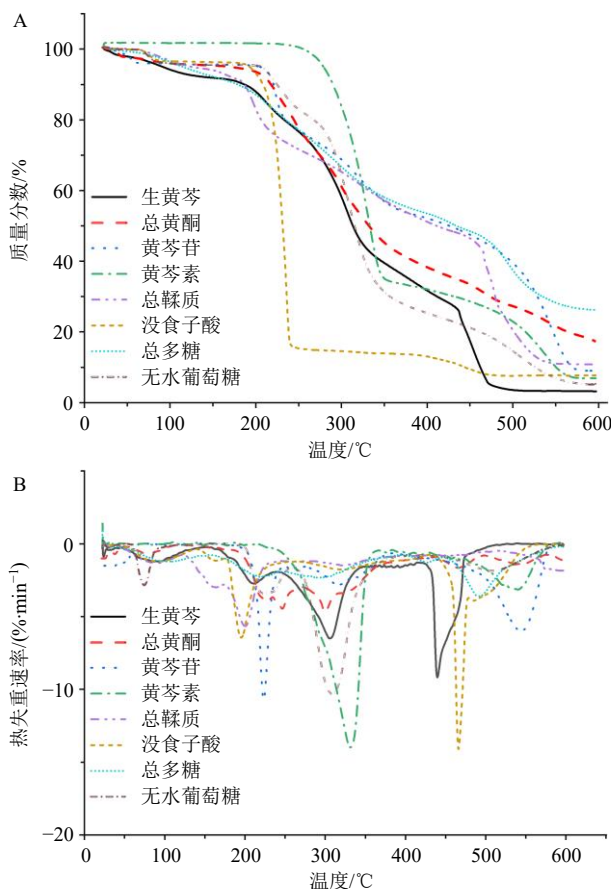


图 2 黄芩生品及其有效成分热解特性 TG 曲线图 (A) 以及 DTG 曲线图 (B)

Fig. 2 TG curve (A) and DTG curve (B) of pyrolysis characteristics of raw SR material and its active ingredients

炮制前、后黄芩化学成分的增减变化, 各指标的相对重要程度将评价黄芩质量的各指标予以量化。构建判断优先矩阵, 结果见表 2、3。利用 SPSS PRO 在线分析软件, 计算各指标的 W_{AHP} 。炒黄芩及酒黄芩中的黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的 W_{AHP} 分别为 0.465 8、0.277 1、0.161 1、0.096 0; 黄芩炭中的黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素、外观评分的 W_{AHP} 分别为 0.161 1、0.465 8、0.277 1、0.096 0, 查表得 R 值为 0.882, 通过一致性比率 (consistency ratio, CR) = $0.01 < 0.1$, 通过一致性检验。

2.4.2 熵权法主观权重系数 (W_{EWM}) 的计算 根据样本数量 m 和 n 构建原始数据矩阵 (X_{ij})。按照式 (1) 对原始数据进行标准化处理, 得到标准数据矩阵 Y_{ij} 。将 Y_{ij} 按照式 (2) 归一化处理得概率矩阵 (P_{ij}), 按照式 (3) 计算第 j 项指标的信息熵 (H_j), 按照式 (4) 计算第 j 项指标的权重系数 W_{EWM} 。由熵权法产生的炒黄芩中黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的 W_{EWM} 分别为 0.090 6、0.077 8、0.037 0、

表 1 黄芩生品及其有效成分的热解特性相关参数

Table 1 Relevant parameters of pyrolysis characteristics of SR and its active ingredients

样品	燃烧热阶段/℃	DTG _{max} /(%·min ⁻¹)	Mass/%
生黄芩	室温~154.2	1.22	8.17
	154.2~246.0	2.72	14.29
	246.0~393.4	6.50	44.96
	393.4~439.8	—	27.13
黄芩浸出物	室温~164.5	—	6.50
	164.5~245.4	7.08	22.92
	245.4~425.3	1.76	22.87
	425.3~523.4	8.73	41.61
总黄酮样品	室温~181.6	0.68	6.12
	181.6~270.4	4.46	24.37
	270.4~431.3	4.70	37.81
	431.3~600.0	—	18.59
黄芩苷对照品	室温~273.3	10.73	19.48
	273.3~381.8	2.82	20.91
	381.8~596.5	5.96	46.93
黄芩素对照品	室温~357.3	13.98	70.56
	357.3~596.5	3.14	28.49
总多糖样品	室温~156.6	1.22	8.07
	156.6~246.3	2.27	14.72
	246.3~397.5	2.32	25.23
	397.5~448.4	1.28	5.28
	448.4~593.2	3.61	23.43
葡萄糖对照品	室温~127.7	2.86	4.44
	127.7~259.9	3.43	14.83
	259.9~391.5	10.35	58.03
	391.5~588.9	1.89	21.95
总鞣质样品	室温~154.3	1.48	10.19
	154.3~270.4	3.09	19.22
	270.4~450.3	2.47	27.32
	450.3~548.1	13.42	38.89
没食子酸对照品	室温~128.8	2.64	—
	128.8~313.0	43.4	85.89
	313.0~420.0	1.08	6.86

“—”表示无此项数据。

“—” indicates that there is no such data.

表 2 炒黄芩、酒黄芩指标比较的判断优先矩阵

Table 2 Priority matrix for comparing indicators of stir fried SR and wine SR

指标	判断优先矩阵			
	黄芩苷	黄芩素	汉黄芩苷	汉黄芩素
黄芩苷	1	2	3.003	4
黄芩素	1/2	1	2	3.003
汉黄芩苷	1/3	1/2	1	2
汉黄芩素	1/4	1/3	1/4	1

表 3 黄芩炭指标比较的判断优先矩阵

Table 3 Priority matrix for judging comparison of charcoal indicators in SR

指标	判断优先矩阵			
	黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素	外观评价
黄芩苷	1	2	3.003	4
黄芩素	1/2	1	2	3.003
汉黄芩素	1/3	1/2	1	2
外观评价	1/4	1/3	1/4	1

0.028 4; 黄芩炭中黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素、外观评分的 W_{EWM} 分别为 0.059 1、0.123 8、0.044 6、0.019 8; 酒黄芩中黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的 W_{EWM} 分别为 0.116 8、0.076 7、0.036 4、0.023 6。

$$Y_{ij} = (X_{ij} - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) + 0.001 \quad (1)$$

$$P_{ij} = Y_{ij} / \sum_{i=1}^m Y_{ij} \quad (2)$$

$$H_j = -\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} / \ln m \quad (3)$$

$$W_{EWM} = (1 - H_j) / (n - \sum_{j=1}^n H_j) \quad (4)$$

2.4.3 复合权重系数 (W) 计算 以黄芩苷、黄芩素、汉黄芩苷、汉黄芩素的含量作为原始评价指标, 将所有实验组的每个指标测量值构成原始数据矩阵, 用于后续的熵权法计算。AHP 的判断矩阵则基于各成分的药理活性重要性构建。最终, 将 AHP 主观权重与熵权法客观权重结合, 得到复合权重, 并据此计算各样本的综合评分, 该综合评分即为后续单因素考察及 RSM 优化中的响应值。综合 AHP 所得 W_{AHP} 和熵权法所得 W_{EWM} , 按照式 (5) 计算得到各评价指标的 W 。通过 W 计算综合评分以进行后续单因素及 CCD-RSM 分析。炒黄芩中黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的综合评分分别为 0.393 0、0.316 4、0.193 4、0.097 0; 黄芩炭中黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素、外观评分的综合评分分别为 0.239 1、0.500 6、0.180 2、0.080 1; 酒黄芩中黄芩苷、汉黄芩苷、黄芩素、汉黄芩素的综合评分分别为 0.460 8、0.302 4、0.143 7、0.093 2。

$$W = W_{AHP} W_{EWM} / \sum_{j=1}^n W_{AHP} W_{EWM} \quad (5)$$

2.5 黄芩不同炮制品工艺优化

2.5.1 炒黄芩炮制工艺优化单因素考察 取黄芩饮片 5 份, 每份 500 g, 置炒药机内, 在温度为 180、190、200、210、220 ℃ 下炒制 6 min, 取出后晾凉, 即得不同温度炒黄芩饮片样品。同取黄芩饮片 5 份, 每份 500 g, 在温度为 200 ℃ 下分别炒制 4、5、6、7、8 min, 取出后晾凉, 即得不同时间炒黄芩饮片

样品。按照“2.2.3”项下色谱条件,测定 4 种黄酮类成分含量,计算综合评分。结果显示,炮制温度为 200 ℃时,炒黄芩综合评分最高,故确定炒黄芩炮制温度优化范围为 190~210 ℃;炮制时间为 6 min 时,炒黄芩综合评分最高,故确定炒黄芩炮制时间优化范围为 5~7 min。具体结果见表 4。

表 4 炒黄芩炮制工艺优化单因素考察结果

炮制温度/℃	炮制时间/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)				综合评分
		黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素	
180	6	3.774 9	1.782 2	2.310 6	1.297 6	0.762 1
190	6	4.244 6	2.696 2	1.993 0	1.372 8	0.808 7
200	6	3.190 2	2.441 1	1.924 8	1.494 8	0.830 8
210	6	2.970 1	3.390 6	1.451 5	1.688 2	0.778 8
220	6	2.222 1	3.969 8	1.187 6	1.839 9	0.741 1
200	4	3.110 7	2.079 6	1.980 7	1.364 8	0.762 1
200	5	3.299 1	2.068 2	2.033 9	1.369 5	0.779 7
200	7	2.810 3	2.647 6	1.731 9	1.545 4	0.818 5
200	8	2.549 3	2.887 3	1.635 4	1.582 9	0.828 8

2.5.2 黄芩炭炮制工艺优化单因素考察 取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,置炒药机内,在温度为 220、230、240、250、260 ℃下炒制 13 min,取出后晾凉,即得不同温度黄芩炭饮片样品。同取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,在温度为 230 ℃下分别炒制 7、10、13、16、19 min,取出后晾凉,即得不同时间黄芩炭饮片样品。按照“2.2.3”项下色谱条件,测定 4 种黄酮类成分含量,计算综合评分。结果显示,当炮制温度为 230 ℃时,黄芩炭综合评分最高,故确定黄芩炭炮制温度优化范围为 220~240 ℃;炮制时间为 13 min 时,黄芩炭综合评分最高,故确定黄芩炭炮制时间优化范围为 10~16 min。具体结果见表 5。

2.5.3 酒黄芩炮制工艺优化单因素考察 取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,置密闭容器内,加入 15% 的黄酒,闷润 10、20、30、40、50 min,置炒药机内,在温度为 180 ℃下炒制 5 min,取出后晾凉,即得不同闷润时间酒黄芩饮片样品。同取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,置密闭容器内,加入 15% 的黄酒,闷润 30 min,置炒药机内,在温度为 180 ℃下分别炒制 3、4、5、6、7 min,取出后晾凉,即得不同炮制时间酒黄芩饮片样品。同取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,置于密闭容器内,加入 5%、10%、15%、20%、25% 的黄酒,闷润 30 min,置炒药机内,在温度为 180

表 5 黄芩炭炮制工艺优化单因素考察结果

炮制温度/℃	炮制时间/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)			外观评价	综合评分
		黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素		
220	13	1.131 0	2.185 1	1.617 4	0.045 5	0.894 4
230	13	1.063 0	2.577 6	1.740 9	0.052 0	0.971 5
240	13	1.024 0	1.699 5	1.450 8	0.058 5	0.774 7
250	13	1.011 1	1.645 9	1.468 3	0.065 0	0.770 6
260	13	1.016 6	1.420 2	1.296 7	0.058 5	0.703 8
230	7	1.042 5	2.041 5	1.720 7	0.046 4	0.947 2
230	10	1.085 5	2.250 8	1.692 5	0.066 2	0.948 2
230	16	1.069 0	2.104 7	1.606 5	0.059 6	0.918 2
230	19	1.043 8	1.940 6	1.610 1	0.053 0	0.890 3

℃下炒制 5 min,取出后晾凉,即得不同黄酒比例量酒黄芩饮片样品。同取黄芩饮片 5 份,每份 500 g,置密闭容器内,加入 15% 的黄酒,闷润 30 min,置炒药机内,在温度为 160、170、180、190、200 ℃下炒制 5 min,取出后晾凉,即得不同炒制时间酒黄芩饮片样品。按照“2.2.3”项下色谱条件,测定 4 种黄酮类成分含量,计算综合评分。结果显示,闷润时间为 30 min 时,酒黄芩综合评分最高,故确定酒黄芩的闷润时间优化范围为 20~40 min;炮制时间为 6 min 时,酒黄芩综合评分最高,故确定酒黄芩的炮制时间优化范围为 5~7 min;黄酒比例量为 20% 时,酒黄芩综合评分最高,故确定酒黄芩的黄酒比例量为 15%~25%;炮制温度为 180 ℃时,酒黄芩综合评分最高,故确定酒黄芩炮制温度优化范围为 170~190 ℃。具体结果见表 6。

2.6 CCD-RSM 优选黄芩不同炮制品炮制工艺及验证试验

结合上述单因素考察实验结果,利用 Design Expert 13.0 软件,按照 CCD 原理,对炒黄芩、黄芩炭、酒黄芩炮制工艺进一步优化。

2.6.1 炒黄芩炮制工艺 RSM 优化实验 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 CCD 原理优化炒黄芩炮制工艺实验方案,以炒黄芩炒制温度(X_1)和炒制时间(X_2)为因素,建立 2 因素 5 水平试验方案,5 水平分别以+2^{1/2}、+1、0、-1、-2^{1/2}进行编码,以综合得分为评价指标,确定炒黄芩的最佳炮制工艺,具体因素水平、试验设计及结果见表 7。得到 2 次多元式回归方程: $Y=0.867 3+0.038 3 X_1-0.012 8 X_2-0.032 2 X_1 X_2-0.091 6 X_1^2-0.029 8 X_2^2$, $R^2=0.962 2$ 。

表 6 酒黄芩炮制工艺优化单因素考察结果

Table 6 Results of single factor investigation on optimization of wine SR

闷润时 间/min	炮制时 间/min	黄酒比 例量/%	炮制温 度/℃	质量分数/(mg·g ⁻¹)				综合 评分
				黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素	
10	5	15	180	5.023 7	3.204 3	1.196 8	1.119 9	0.952 2
20	5	15	180	5.440 8	2.743 3	1.151 6	1.098 4	0.915 1
30	5	15	180	5.622 3	2.888 0	1.220 5	1.122 2	0.954 9
40	5	15	180	5.724 8	2.890 7	1.162 2	1.102 5	0.952 8
50	5	15	180	5.364 5	2.807 0	1.119 3	1.086 4	0.913 0
30	3	15	180	5.411 2	2.731 8	1.157 9	1.100 2	0.960 8
30	4	15	180	5.520 4	2.773 8	1.180 4	1.119 5	0.978 8
30	5	15	180	5.034 4	2.498 9	1.153 5	1.110 4	0.914 9
30	6	15	180	5.585 5	2.750 7	1.239 1	1.157 0	0.998 4
30	7	15	180	5.113 2	2.620 2	1.167 4	1.136 8	0.934 6
30	5	5	180	5.008 6	2.696 3	1.199 3	1.151 0	0.982 3
30	5	10	180	5.245 0	2.728 9	1.135 5	1.121 0	0.979 6
30	5	15	180	5.223 1	2.707 7	1.142 7	1.118 8	0.978 2
30	5	20	180	5.212 7	2.714 1	1.156 4	1.147 0	0.985 4
30	5	25	180	4.772 3	2.649 6	1.140 4	1.116 1	0.943 8
30	5	15	160	5.041 4	2.703 8	1.133 5	1.119 3	0.954 7
30	5	15	170	5.014 4	2.729 3	1.126 2	1.105 5	0.952 6
30	5	15	180	5.204 9	2.771 0	1.181 1	1.147 8	0.984 9
30	5	15	190	5.056 2	2.714 3	1.274 3	1.167 0	0.981 0
30	5	15	200	4.975 6	2.753 1	1.271 7	1.157 2	0.976 1

表 7 CCD 炒黄芩试验因素水平、试验设计与结果

Table 7 CCD stir fried SR experimental factor levels, experimental design, and results

试验号	$X_1/^\circ\text{C}$	X_2/min	质量分数/(mg·g ⁻¹)				综合 评分
			黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素	
1	200 (0)	7.0 (0)	2.989 3	2.967 3	1.983 5	1.829 1	0.797 4
2	200	5.5 (-2 ^{1/2})	4.747 1	2.298 7	1.350 5	1.369 8	0.834 8
3	200	7.0	3.089 3	2.987 3	2.098 3	1.809 1	0.815 1
4	200	7.0	3.084 3	2.992 3	2.023 6	1.909 4	0.814 0
5	185 (-2 ^{1/2})	7.0	5.257 3	2.623 9	1.140 1	1.162 7	0.722 9
6	190 (-1)	8.0 (+1)	4.825 4	2.758 8	1.358 6	1.368 8	0.823 5
7	210 (+1)	8.0	2.688 6	1.625 5	2.442 5	1.942 1	0.663 8
8	200	7.0	2.899 5	2.977 2	1.993 4	1.803 4	0.791 7
9	210	6.0 (-1)	3.858 0	2.141 7	1.791 1	1.559 5	0.737 7
10	214 (+2 ^{1/2})	7.0	2.491 0	1.518 9	2.405 1	2.077 8	0.640 8
11	200	7.0	4.418 7	1.995 9	1.859 6	1.593 7	0.869 9
12	200	8.4 (+2 ^{1/2})	3.801 3	1.649 6	2.259 0	1.743 6	0.775 9
13	190	6.0	5.459 2	2.764 3	1.272 3	1.278 8	0.768 4

由表 8 方差分析可知, 该拟合模型的 $P < 0.000 1$, 表明因素与响应值有极显著的相关性, 失拟项 $P > 0.05$, 说明该模型拟合度良好, 各因素对于 2 种考察指标的影响顺序为炒制时间 > 炒制温度, 2 次项 X_1^2 有极显著性 ($P < 0.000 1$), X_2^2 有显著性 ($P < 0.01$)。得炒黄芩的最佳炮制工艺为 205.411 $^\circ\text{C}$, 6.5 min, 与模型预测综合评分 (82.7) 的偏差较小, 且 RSD 为 1.11%, 结果见图 3。按最佳工艺炮制炒黄芩样品表面微焦, 具均匀焦斑, 色泽呈深黄至棕黄; 质脆易折, 味苦。

2.6.2 黄芩炭炮制工艺 RSM 优化结果 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 CCD 原理设计优化黄芩炭

表 8 炒黄芩回归方程的方差分析

Table 8 Variance analysis of regression equation for stir fried SR

误差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.077 8	5	0.015 6	35.62	<0.000 1
X_1	0.011 7	1	0.011 7	26.89	0.001 3
X_2	0.001 3	1	0.001 3	2.98	0.128 0
X_1X_2	0.004 2	1	0.004 2	9.52	0.017 7
X_1^2	0.058 3	1	0.058 3	133.54	<0.000 1
X_2^2	0.006 2	1	0.006 2	14.15	0.007 1
失拟项	0.003 1	7	0.000 4	0.93	0.5036
残差	0.001 3	3	0.000 4		
纯误差	0.001 8	4	0.000 5		
总和	0.080 8	12			

炮制工艺实验方案, 以黄芩炭炒制温度 (X_1) 和炒制时间 (X_2) 为因素, 建立 2 因素 5 水平试验方案, 5 水平分别以 +2^{1/2}、+1、0、-1、-2^{1/2} 进行编码, 以综合得分为评价指标, 确定黄芩炭的最佳炮制工艺, 具体因素水平、试验设计及结果见表 9。得到 2 次多元式回归方程: $Y = 0.843 3 + 0.021 1 X_1 + 0.032 0 X_2 - 0.043 7 X_1X_2 - 0.043 9 X_1^2 - 0.014 4 X_2^2$, $R^2 = 0.941 0$ 。由表 10 方差分析可知, 模型 $P < 0.01$ 表明因素与响应值有显著的相关性, 失拟项 $P > 0.05$ 说明该模型拟合度良好, 各因素对于 2 种指标的影响顺序为炒制时间 > 炒制温度, 2 次项 X_1^2 有显著性 ($P < 0.01$)。结合热重分析实验和 RSM 设计实验, 得黄芩炭的最佳炮制工艺为 227.415 $^\circ\text{C}$, 16 min, 与模型预测综合评分 (91.7) 偏差较小, 且 RSD 为 1.60%, 结果见图 4。按最佳工艺炮制黄芩炭样品表面焦黑色, 内部焦黄色, 质脆, 折断面可见焦黄与

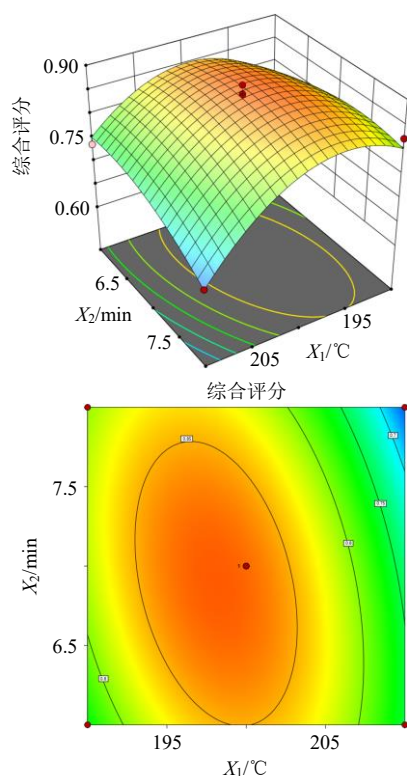


图 3 炒黄芩 RSM 实验三维曲面图及等高线图

Fig. 3 Three-dimensional surface plot and contour plot of response surface experiment for stir fried SR

表 9 CCD 黄芩炭试验因素水平、试验设计与结果

Table 9 CCD SR charcoal experimental factor levels, experimental design, and results

试验号	$X_1/^{\circ}\text{C}$	X_2/min	质量分数/($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)			外观性 状评分	综合 评分
			黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素		
1	230 (0)	13 (0)	2.512 0	3.044 2	1.637 3	9	0.842 3
2	230	13	2.434 3	3.189 6	1.605 4	9	0.858 1
3	230	17 (+2 ^{1/2})	2.595 0	3.169 9	1.703 7	10	0.881 0
4	230	13	2.348 7	3.205 3	1.617 8	9	0.857 4
5	215 (-2 ^{1/2})	13	4.659 3	1.884 2	1.529 6	5	0.738 5
6	240 (+1)	10 (-1)	1.958 1	3.058 5	1.675 5	9	0.819 9
7	240	16	1.692 9	2.934 6	1.691 4	8	0.780 3
8	220 (-1)	16 (+1)	3.514 8	2.729 9	1.549 7	7	0.819 5
9	230	13	2.443 8	3.033 3	1.625 8	9	0.835 9
10	230	13	2.354 4	3.132 6	1.607 8	9	0.809 2
11	244 (+2 ^{1/2})	13	1.532 7	3.067 1	1.665 7	8	0.790 4
12	220	10	3.973 5	1.923 6	1.323 3	6	0.685 5
13	230	8 (-2 ^{1/2})	3.070 5	2.519 6	1.500 2	8	0.766 7

黑色交织，味苦涩。

2.6.3 酒黄芩炮制工艺 RSM 优化结果 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 CCD 原理设计优化酒黄芩炮制工艺实验方案，以酒黄芩炒制温度 (X_1)、炒制

表 10 黄芩炭回归方程的方差分析

Table 10 Variance analysis of regression equation for SR charcoal

误差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	0.033 4	5	0.006 7	22.34	<0.01
X_1	0.003 6	1	0.003 6	11.88	<0.05
X_2	0.008 2	1	0.008 2	27.46	<0.01
X_1X_2	0.007 7	1	0.007 7	25.62	<0.01
X_1^2	0.013 4	1	0.013 4	44.93	<0.01
X_2^2	0.001 5	1	0.001 5	4.85	0.063 5
失拟项	0.002 1	7	0.000 3	1.80	0.287 3
残差	0.001 2	3	0.000 4		
纯误差	0.000 9	4	0.000 2		
总和	0.035 5	12			

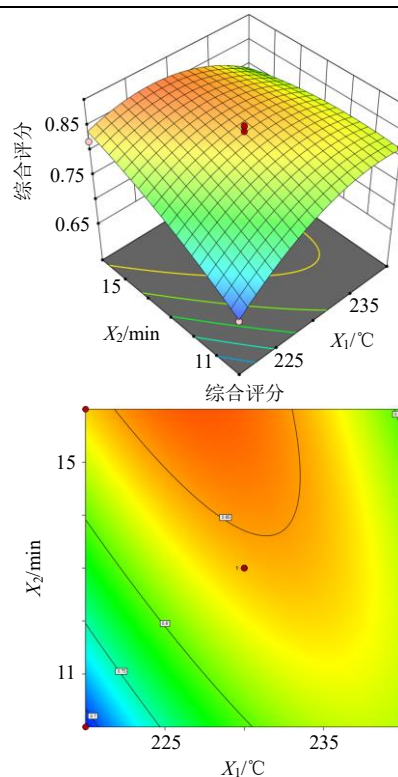


图 4 黄芩炭 RSM 实验等高线图及曲面图

Fig. 4 Contour and surface plots of response surface experiment for SR charcoal

时间 (X_2)、黄酒用量 (X_3) 和闷润时间 (X_4) 为因素，建立 4 因素 5 水平试验方案，5 水平分别以 +2、+1、0、-1、-2 进行编码，以综合得分为评价指标，确定酒黄芩的最佳炮制工艺，具体因素水平、试验设计及结果见表 11。得到 2 次多元式回归方程： $Y = 0.968 9 - 0.002 4 X_1 - 0.005 9 X_2 - 0.002 6 X_3 + 0.000 6 X_4 - 0.010 94 X_1X_2 - 0.002 6 X_1X_3 - 0.003 2 X_1X_4 + 0.009 1 X_2X_3 - 0.016 7 X_2X_4 - 0.001 1 X_3X_4 - 0.000 8 X_1^2 - 0.013 9 X_2^2 - 0.014 3 X_3^2 - 0.010 5 X_4^2$ ， $R^2 =$

表 11 CCD 酒黄芩试验因素水平、试验设计与结果

Table 11 CCD wine SR experimental factor levels, experimental design, and results

试验号	$X_1/$ ℃	$X_2/$ min	$X_3/$ %	$X_4/$ min	质量分数/(mg·g ⁻¹)				综合 评分	试验号	$X_1/$ ℃	$X_2/$ min	$X_3/$ %	$X_4/$ min	质量分数/(mg·g ⁻¹)				综合 评分
					黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素							黄芩苷	汉黄芩苷	黄芩素	汉黄芩素	
1	190 (+2)	6 (0)	20 (0)	40 (0)	5.269 9	3.123 8	1.181 5	1.148 0	0.932 8	16	160 7		15 50		5.622 4	3.229 0	1.187 1	1.135 5	0.970 3
2	170 (0)	4 (-2)	20	40	5.283 4	2.632 6	1.135 4	1.125 7	0.8580 4	17	160 5		15 50		5.257 9	2.892 6	1.198 2	1.139 5	0.911 6
3	170	6	20	20 (-2)	5.563 4	2.865 8	1.166 8	1.134 8	0.929 7	18	180 5		25 30		5.237 0	2.920 8	1.245 0	1.147 6	0.918 4
4	170	6	30 (+2)	40	5.534 0	3.185 2	1.176 7	1.132 8	0.957 8	19	170 6		20 40		5.331 4	2.915 1	1.202 9	1.127 7	0.919 2
5	160 (-1)	5 (-1)	25 (+1)	30 (-1)	5.216 3	2.794 4	1.172 6	1.145 3	0.896 8	20	170 6		20 60 (+2)		5.037 7	3.097 7	1.178 0	1.104 8	0.908 0
6	170	6	20	40	5.068 4	3.170 7	1.165 0	1.112 6	0.916 3	21	180 5		15 30		5.047 4	2.822 5	1.175 7	1.103 5	0.882 9
7	170	6	20	40	4.895 8	2.956 5	1.281 8	1.178 6	0.901 0	22	180 7		15 30		5.062 7	2.913 0	1.832 1	1.160 5	0.898 9
8	170	6	10 (-2)	40	5.454 8	3.073 3	1.214 0	1.143 2	0.946 1	23	180 7		25 30		5.305 3	3.059 7	1.246 0	1.150 4	0.939 1
9	180 (+1)	5	15 (-1)	50 (+1)	5.679 1	3.129 3	1.171 3	1.108 3	0.961 6	24	180 7		15 50		5.606 0	3.238 8	1.193 0	1.099 3	0.967 6
10	170	6	20	40	5.257 8	2.804 3	1.182 4	1.123 4	0.900 4	25	170 6		20 40		5.767 2	3.078 3	1.238 8	1.143 9	0.974 3
11	160	5	25	50	5.216 4	2.869 5	1.169 7	1.155 8	0.904 3	26	170 8 (+2)		20 40		5.452 9	3.077 6	1.237 8	1.139 5	0.948 7
12	150 (-2)	6	20	40	5.501 2	2.870 5	1.104 7	1.100 4	0.915 4	27	160 5		15 30		4.918 4	3.274 1	1.241 7	1.167 9	0.926 9
13	180	5	25	50	5.270 6	3.019 1	1.108 2	1.085 6	0.910 0	28	180 7		25 50		5.625 8	3.178 5	1.174 3	1.130 2	0.964 0
14	160	7 (+1)	15	30	5.336 3	3.061 6	1.128 4	1.098 6	0.922 5	29	160 7		25 50		5.270 0	3.123 9	1.181 6	1.148 0	0.932 8
15	160	7	25	30	5.527 4	3.152 5	1.192 3	1.122 3	0.955 1	30	170 6		20 40		5.336 4	3.061 7	1.128 4	1.098 7	0.929 5

0.927 1。由表 12 方差分析可知,模型 $P < 0.000 1$ 表明因素与响应值有极显著的相关性,失拟项 $P > 0.05$ 说明该模型拟合度良好,各因素对于 4 种指标的影响顺序为炒制温度 > 黄酒用量 > 炒制时间 > 闷

表 12 酒黄芩回归方程的方差分析

Table 12 Variance analysis of regression equation for wine SR

误差来源	平方和	自由度	离差平方和	F 值	P 值
模型	0.020 4	14	0.001 5	15.33	<0.000 1
X_1	0.000 1	1	0.000 1	12.27	0.267 6
X_2	0.000 8	1	0.000 8	2.19	0.013 7
X_3	0.000 2	1	0.000 2	3.08	0.244 9
X_4	9.027×10^{-6}	1	9.027×10^{-6}	5.29	0.775 3
X_1X_2	0.001 9	1	0.001 9	15.56	0.000 8
X_1X_3	0.000 1	1	0.000 1	20.49	0.328 0
X_1X_4	0.000 2	1	0.000 2	1.68	0.233 0
X_2X_3	0.001 3	1	0.001 3	0.253 5	0.003 2
X_2X_4	0.004 5	1	0.004 5	6.21	<0.000 1
X_3X_4	0.000 0	1	0.000 0	0.016 3	0.672 8
X_1^2	0.000 0	1	0.000 0	1.98	0.674 1
X_2^2	0.005 3	1	0.005 3	15.12	<0.000 1
X_3^2	0.005 6	1	0.005 6	127.00	<0.000 1
X_4^2	0.003 0	1	0.003 0	31.60	<0.000 1
失拟项	0.001 6	15	0.000 1	1.35	0.388 4
残差	0.001 2	10	0.000 1		
纯误差	0.000 4	5	0.000 1		
总和	0.022 0	29			

润时间,因素交互作用 X_1X_2 极显著 ($P < 0.001$), X_2X_3 显著 ($P < 0.01$), 2 次项 X_2^2 、 X_3^2 、 X_4^2 均有极显著性 ($P < 0.000 1$)。得酒黄芩的最佳炮制工艺为炒制温度 180 ℃、炒制时间 5 min、闷润时间 50 min、黄酒用量 18.2%,与模型预测综合评分 (97.4) 偏差较小 ($RSD = 1.02\%$),结果见图 5。按最佳工艺炮制酒黄芩样品表面棕黄色,微有酒香气,质脆,味苦。

2.7 基于电子仿生感官技术的黄芩不同炮制品分析

2.7.1 样品制备 依据“2.6”项下所述最佳工艺参数,将生黄芩饮片分别制备为 4 类样本:生品组、炮制不及组、炮制适中组及炮制太过组。其中,炮制不及组选取 RSM 设计中各因素水平均低于最优值的组合:炒黄芩 (185 ℃、7 min)、黄芩炭 (215 ℃、13 min)、酒黄芩 (160 ℃炒制 5 min,黄酒用量 15%,闷润 30 min)。炮制适中组采用 RSM 预测的最优工艺:炒黄芩 (205.4 ℃、6.5 min)、黄芩炭 (227 ℃、16 min)、酒黄芩 (180 ℃炒制 5 min,黄酒用量 18.2%,闷润 50 min)。炮制太过组则选取各因素水平均高于最优值的组合:炒黄芩 (214 ℃、7 min)、黄芩炭 (244 ℃、13 min)、酒黄芩 (190 ℃炒制 6 min,黄酒用量 20%,闷润 40 min)。

2.7.2 色泽测定方法和条件 根据“2.7.1”项下试验分组进行测色试验。以明度值 (L^*)、红绿度值 (a^*) 和黄蓝度值 (b^*) 来表示色号,并通过公式 $E_{ab}^* =$

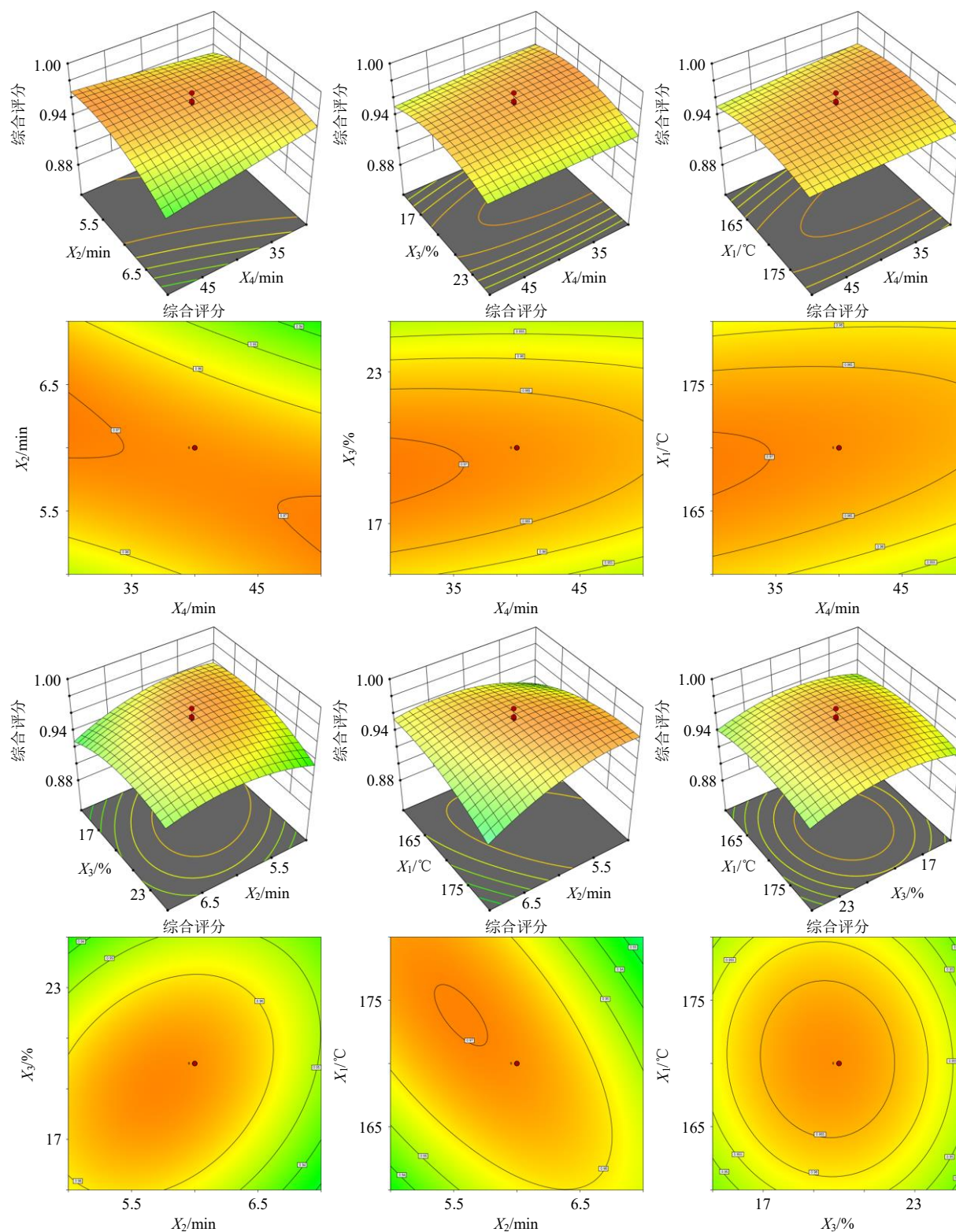


图 5 酒黄芩 RSM 实验三维曲面图和等高线图

Fig. 5 Response surface and contour map experimental curve of wine SR

$(L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 得出总色度值 (E_{ab}^{*}), E_{ab}^{*} 越大颜色越浅, 其中, L^{*} 由 0~100 表示颜色由黑到白; a^{*} 由正到负表示颜色由红到绿色; b^{*} 由正到负表示颜色由黄到蓝, 可用总色差值 (ΔE_{ab}^{*}) 表示 2 个色号

之间的色差, 计算公式为 $\Delta E_{ab}^{*} = (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2}$, 规定当 $\Delta E_{ab}^{*} > 1.5$ 时, 表示待测样品颜色间有明显差异。

2.7.3 电子眼对黄芩生品及不同炮制程度的黄芩

炮制品外观颜色的鉴定 黄芩生品及不同炮制程度黄芩炮制品色度值见表 13。结果表明,暗明度值(L^*)随炮制程度加深呈显著下降趋势,生黄芩的 L 值最高(69.48),而炮制适中的酒黄芩、炒黄芩和黄芩炭分别降至 60.831、17.267 和 11.906,这一变化表明炮制后饮片颜色由浅变深、由亮变暗的过程,尤其在炒黄芩和黄芩炭中, L 值的急剧降低清晰地指示了炭化过程的推进。红绿值 a^* 的变化表明颜色色调的转变,生黄芩 a^* 值为负(-7.048),偏向绿色调,炮制后,炒黄芩和黄芩炭的 a^* 值虽仍为负值,但已显著向零点靠近,则表明绿色调减弱,其中酒黄芩的 a^* 值从炮制不及的-1.145转变为炮制适中的正值 3.853,并随着炮制过度进一步增至 6.657,这一由负转正的过程,客观量化并验证了传统经验中“酒润后色转棕红”的性状特征。黄蓝值 b^* 的下降趋势则表明炮制过程中黄色调逐渐减退,这与黄芩中黄酮类成分的变化及炭化外观相一致;总色差值 ΔE^*_{ab} 在各炮制品的“不及”“适中”“太过”组间均远大于 1.5 的视觉辨识阈值,这确证了不同炮制程度样品间存在肉眼可辨的颜色差异,黄芩炮制后,整体上明度变暗、红色度值升高、颜色变深。生黄芩及各黄芩炮制品外观见图 6。

2.7.4 气味测定方法和条件 取“2.7.1”项下各组黄芩饮片 10 g,密封于 50 mL 顶空瓶中,在烘箱中加热后,用电子鼻探头对顶空瓶中气体进行测定,设置清洗时间 120 s,分析时间 60 s,气体体积流量为 1 L/min。每组平行制备 6 份,重复测定 3 次取平均值。

表 13 电子眼测定不同炮制程度的黄芩不同炮制品色度值
 L^* 、 a^* 、 b^*

Table 13 Color values L^* , a^* , b^* of different processed SR products with different degrees of processing determined by electronic eye

样品	炮制程度	L^*	a^*	b^*
生黄芩		69.480	-7.048	61.542
炒黄芩	炮制不及	22.588	-3.097	13.823
	炮制适中	17.267	-1.893	10.630
	炮制太过	15.150	-2.766	6.985
黄芩炭	炮制不及	14.787	-2.002	3.671
	炮制适中	11.906	-2.009	5.985
	炮制太过	10.857	-2.033	1.560
酒黄芩	炮制不及	64.319	-1.145	56.641
	炮制适中	60.831	3.853	51.697
	炮制太过	52.082	6.657	47.752

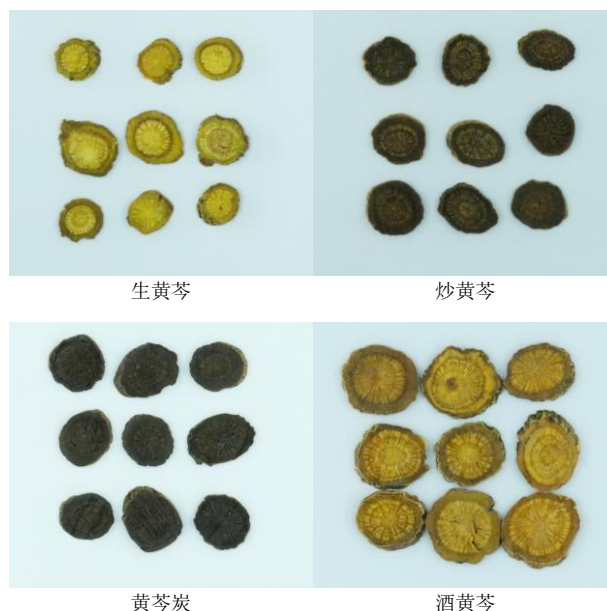


图 6 生黄芩、炒黄芩、黄芩炭及酒黄芩饮片样品图

Fig. 6 Sample images of raw SR, stir fried SR, SR charcoal, and wine SR decoction pieces

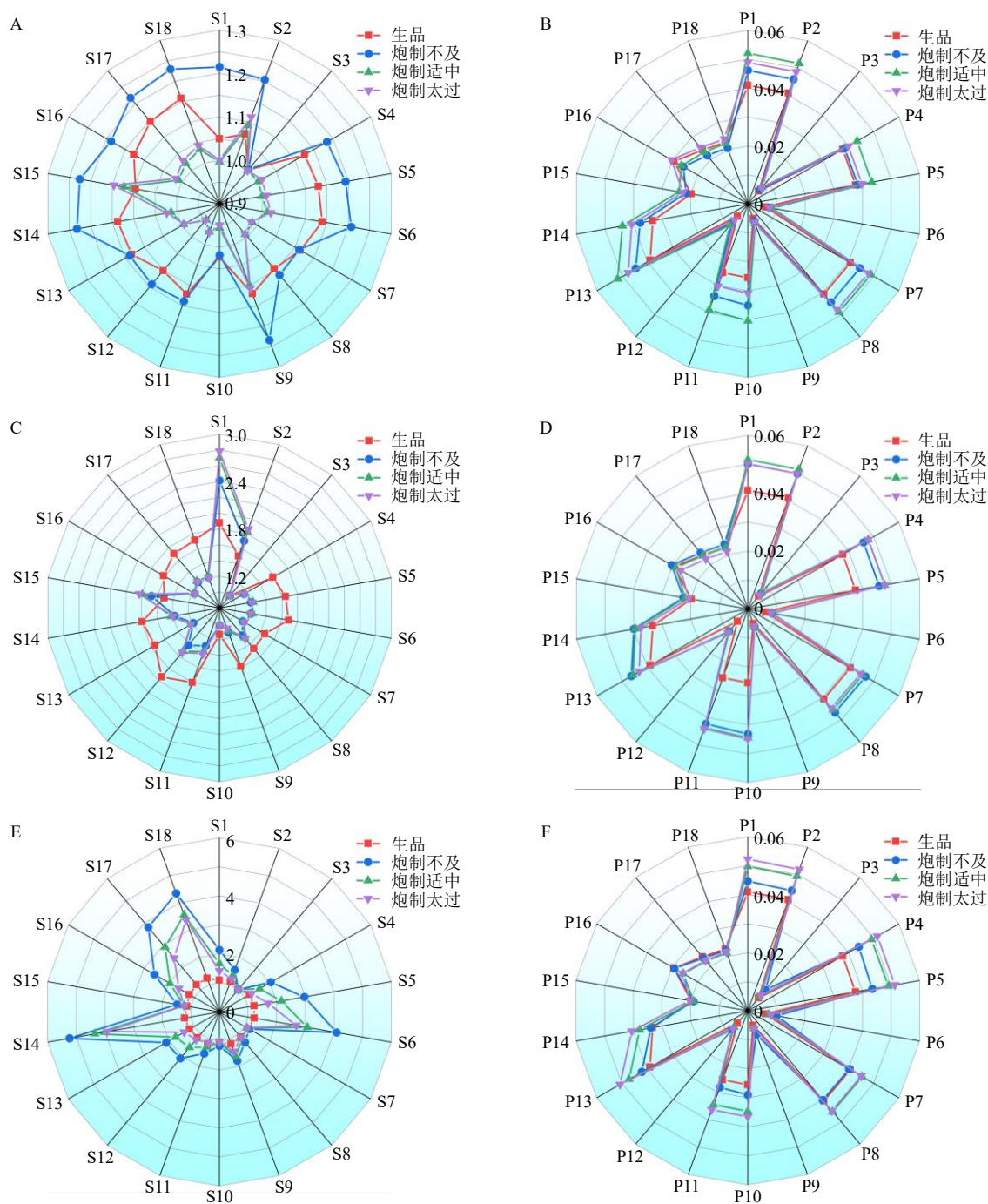
2.7.5 电子鼻对黄芩生品及不同炮制程度的黄芩炮制品气味的判别 不同炮制程度炒黄芩的电子鼻雷达图叠加见图 7-A。炮制适中与炮制太过样品的雷达图传感器响应趋势基本一致,但与生品及炮制不及样品存在显著差异。值得注意的是,炮制适中样品在 2、6、15 号传感器(S2、S6、S15)上的响应值均低于炮制太过样品。

不同炮制程度黄芩炭的电子鼻雷达图叠加见图 7-C。所有炮制程度的黄芩炭样品在 1 号传感器(S1)上均呈现高响应值,且该值随炮制程度加深而持续增大,表明炮制过程对 1 号传感器(S1)敏感物质的生成具有显著影响。

不同炮制程度酒黄芩的电子鼻雷达图叠加见图 7-E。不同炮制程度酒黄芩样品在 6、14、18 号传感器(S6、S14、S18)上的响应值普遍较高,而炮制适中样品的响应值在所有关键传感器(S6、S14、S18 号)上均低于炮制不足及炮制太过样品。

2.7.6 滋味测定方法和条件 取“2.7.1”项下各组饮片 2 g,粉碎过四号筛,置于 100 mL 具塞锥形瓶中,加入 100 mL 去离子水,搅拌,超声(功率 250 W、频率 40 kHz) 30 min,3 000 r/min 离心(离心半径 6.5 cm) 10 min,滤过,取滤液 30 mL,浸入电子舌分析探头,采集时间为 120 s,清洗时间 30 s,记录各传感器响应信号。

2.7.7 电子舌对黄芩生品及不同炮制程度的黄芩炮



A、B-不同炮制程度炒黄芩样品电子鼻、电子舌雷达图；C、D-不同炮制程度黄芩炭样品电子鼻、电子舌雷达图；E、F-不同炮制程度酒黄芩样品电子鼻、电子舌雷达图。

A, B-electronic nose and electronic tongue radar images of fried SR with different processing levels; C, D-electronic nose and electronic tongue radar images of SR charcoal samples with different processing levels; E, F-electronic nose and electronic tongue radar images of wine SR samples with different processing levels.

图 7 不同炮制程度黄芩炮制品电子鼻、电子舌雷达图

Fig. 7 Radar images of electronic nose and electronic tongue of SR processed products with different degrees of processing

制品滋味的鉴定 不同炮制程度黄芩不同炮制品的电子舌雷达图叠加见图 7。电子舌检测表明，各炮制程度黄芩样品（生品、炮制不足、炮制适中、过度炮制）的雷达图响应模式高度一致，主要差异

体现在响应强度而非响应趋势。所有样品均在以下 10 个传感器上呈现较高响应值：1、2、4、5、7、8、10、11、13、14 号传感器（P1、P2、P4、P5、P7、P8、P10、P11、P13、P14）。

2.8 气味、滋味变化与成分的相关性分析

采用 SPSS Statistics 及 Chiplot 在线分析软件对“2.7.5”和“2.7.7”项下不同炮制品样品的成分含量及气味值、滋味值变化趋势做相关性分析。

2.8.1 气味与有效成分的相关性分析 电子鼻各传感器响应物质代表见表 14。将 3 种样品不同炮制程度的电子鼻传感器响应值与其有效成分的相对含量进行相关性分析并绘制可视化热图，相关系数 r 的绝对值 $|r| > 0.8$ 时认为强相关， $0.5 \leq |r| \leq 0.8$ 时认为中等相关， $0.3 \leq |r| < 0.5$ 时认为低相关， $|r| < 0.3$ 时认为基本不相关。气味特征与有效成分含量相关性见图 8-A~10-A。由图 8-A 可知，炒黄芩中 S7、S10 与黄芩苷呈强正相关 ($P < 0.0001$)，S7、S10 与汉黄芩苷呈强正相关 ($P < 0.0001$)，S8、S13 与黄芩素呈强负相关 ($P < 0.0001$)，S7、S10 与汉黄芩素呈强负相关 ($P < 0.0001$)；由图 9-A 可知，黄芩炭中 S1、S2、S7、S8、S10~S13、S15 与黄芩苷呈强负相关 ($P < 0.01$)，S3~S5、S14、S17 与汉黄芩素呈强正相关 ($P < 0.0001$)；由图 10-A 可知，酒黄芩中 S1、S2、S4~S6、S8~S13、S15、S18 与黄芩苷呈强负相关 ($P < 0.0001$)，S3 与汉黄芩苷呈强负相关 ($P < 0.0001$)，S14 与汉黄芩素呈强正相关 ($P < 0.0001$)。

2.8.2 滋味与有效成分的相关性分析 将 3 种样品不同炮制程度的电子舌传感器响应值与其有效成分的相对含量进行相关性分析并绘制可视化热图，相

表 14 电子鼻各传感器响应物质代表

Table 14 Representative response substances of each sensor in electronic nose

传感器	响应物质	传感器	响应物质
S1	烷烃、烟雾类	S10	氢气
S2	醇类、醛类、短链烷烃类	S11	烯丙基硫化物
S3	臭氧	S12	酮类、醇类
S4	硫化物、硫化氢	S13	甲烷
S5	氮化物、氨气	S14	可燃气体类
S6	有机气体、苯酮类、醇醛类、芳香化合物	S15	挥发性有机物和异味气体
S7	短链烷烃类、天然气、沼气	S16	丁烷、液化气
S8	短链烷烃类	S17	甲烷，天然气
S9	对部分有机溶剂敏感	S18	丙烷、丁烷

关系数 r 的绝对值 $|r| > 0.8$ 认为强相关， $0.5 \leq |r| \leq 0.8$ 认为中等相关， $0.3 \leq |r| < 0.5$ 认为低相关， $|r| < 0.3$ 时认为基本不相关。滋味特征与有效成分含量的相关性见图 8-B~10-B。由图 8-B 可知，炒黄芩中 P6、P10~P12 与黄芩苷呈强正相关 ($P < 0.0001$)，P6、P10~P12 与汉黄芩苷呈强正相关 ($P < 0.0001$)，P6、P10~P12 与汉黄芩素呈强负相关 ($P < 0.0001$)；由图 9-B 可知，黄芩炭中 P4、P5、P10~P12 与黄芩苷呈强负相关 ($P < 0.0001$)，P7~P9、P13~P15 与汉黄芩素呈强正相关 ($P < 0.0001$)；由图 10-B 可知，酒黄芩中 P3、P6、P9、P12 与黄芩苷为强负相关 ($P < 0.0001$)。

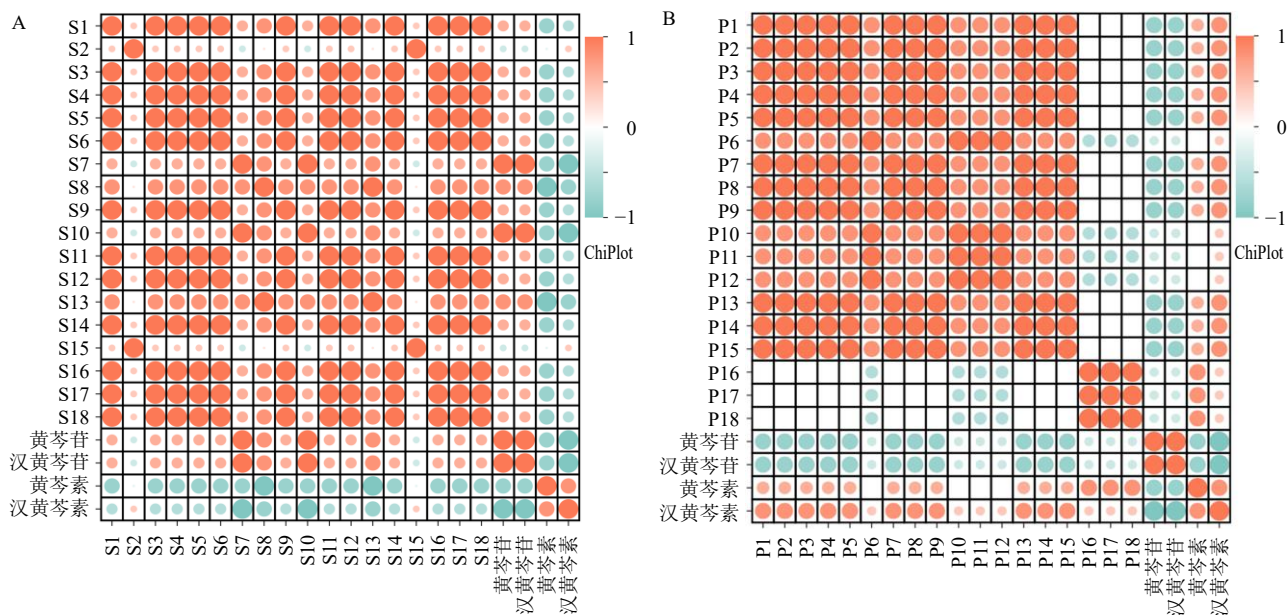


图 8 炒黄芩气味-成分 (A) 和滋味-成分 (B) 相关性热图

Fig. 8 Heat map of correlation between odor-component (A) and flavor-component (B) of fried SR

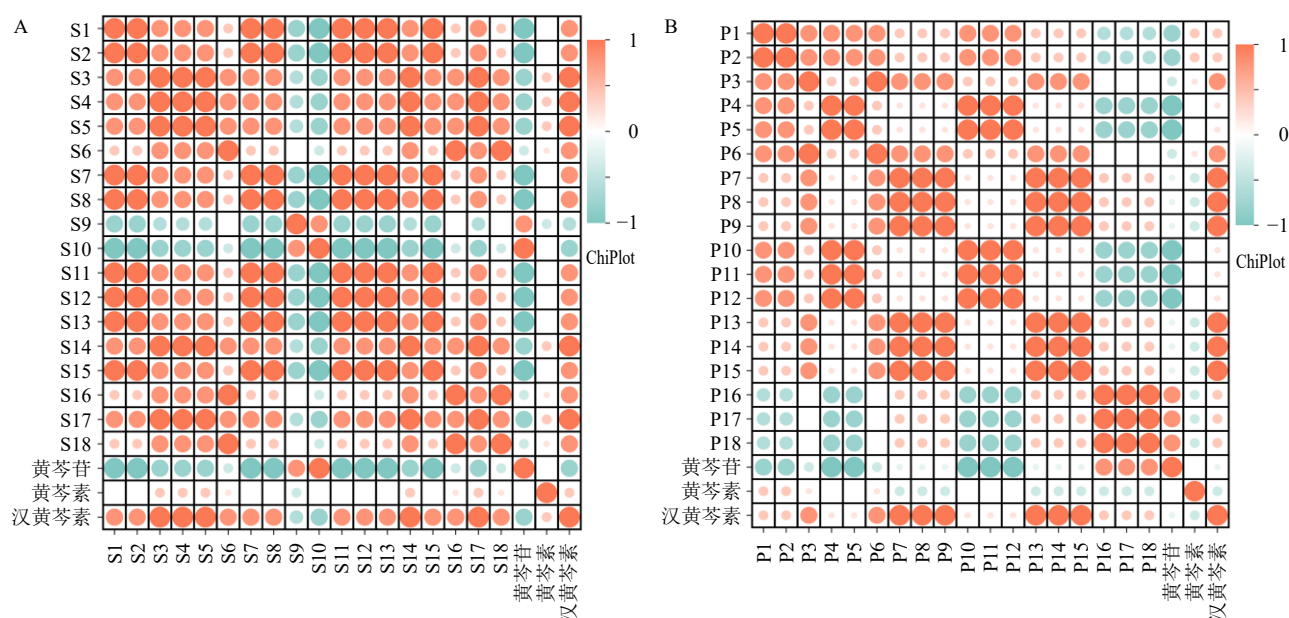


图 9 黄芩炭气味-成分 (A) 和滋味-成分 (B) 相关性热图

Fig. 9 Heat map of correlation between odor-component (A) and flavor-component (B) of SR charcoal

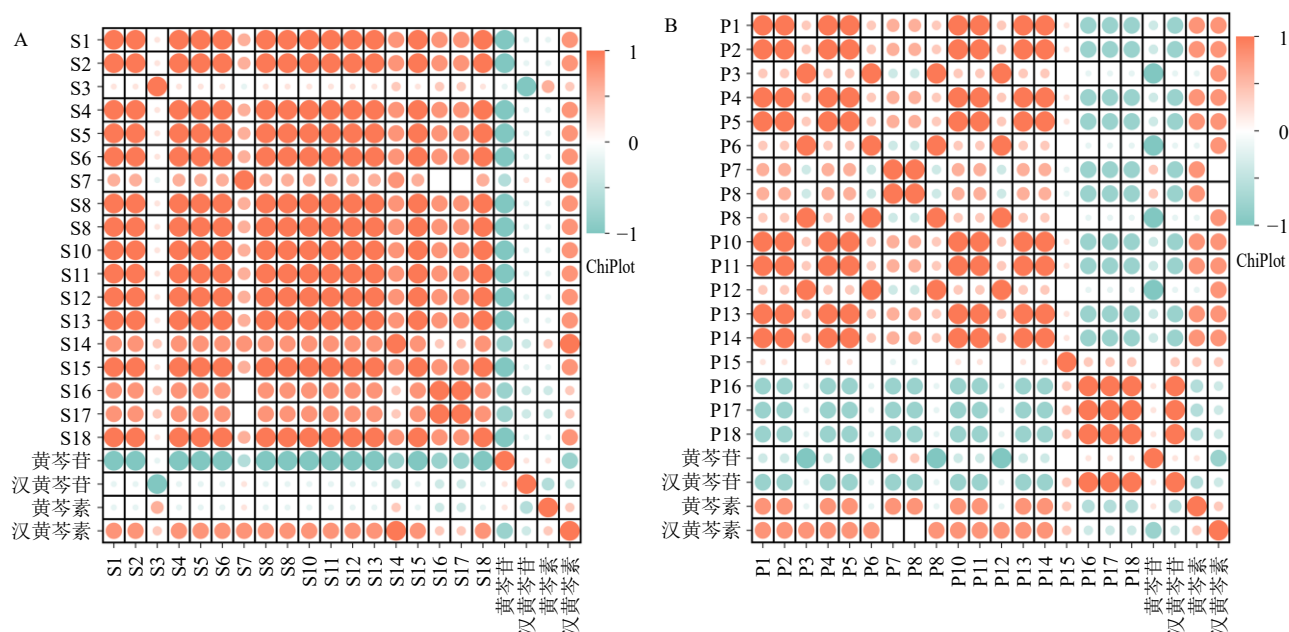


图 10 酒黄芩气味-成分 (A) 和滋味-成分 (B) 相关性热图

Fig. 10 Heat map of correlation between odor-component (A) and flavor-component (B) of wine SR

3 讨论

3.1 黄芩不同炮制品的炮制工艺优选

炮制“太过”或“不及”都会影响其药效^[22], 为进一步规范黄芩不同炮制品的炮制工艺, 本研究的关键创新在于将热分析技术作为工艺优化的先导工具。热分析实验结果表明显示, 黄芩中苷类成分 (180~270 °C) 与苷元成分 (270~380 °C) 的热解区间呈显著分离, 黄芩素于 357.3 °C 开始剧烈失重, 提示黄芩炭“存性”上限不应超过 357 °C, 在实验

过程中结合“炒炭存性”原则及总多糖、鞣质在 210~220 °C 即出现第 1 次失重峰的事实, 从而将黄芩炭的优化温度范围科学地锁定在 220~260 °C, 即该范围既避免黄酮骨架过度裂解, 又可使饮片表面炭化完全, 与后续 RSM 给出的 227.4 °C 最优温度点高度吻合, 说明热分析技术可在工艺优化前为实验设计提供合适的热解温度范围。优化结果与热分析预测范围高度吻合, 印证了热分析技术在指导炮制工艺开发中的前瞻性和可靠性。该方法不仅得

出了精确的工艺参数,更重要的是提供了一种“先定范围,再找最优”的科学思路,克服了传统 RSM 因因素水平设置不当而导致优化失败的风险。

3.2 黄芩不同炮制品内在成分与气味、滋味相关性分析

中药的性味判定是传统质量评价中的重要方式,但传统性状评价存在主观性,难以准确控制饮片的质量好坏^[23-24]。近代,谢宗万^[25]依据传统经验评价理论提出“辨状论质”理论,其中,“状”指药材的外观性状,如形状、大小、颜色、气味等;“质”则是药材的内在品质。通过观察药材的外观性状,依据经验对其进行分析与总结,以此评判药材的内在品质^[26]。有研究表明,中药材经炮制后,其化学成分发生变化的同时,色泽、滋味和气味也会发生相应改变^[27-29]。为了建立炮制质量评价体系,本研究将不同炮制程度的 3 种黄芩炮制品的有效成分含量与滋味、气味相关联,探讨内在成分与其相关性。

电子眼数据显示, L^* 值随炮制程度加深由 69.5 骤降至 11.2, $\Delta E^*_{ab} > 1.5$ 即可肉眼区分“不及/适中/太过”,即表明 L^* 值颜色深浅可作为炒黄芩、黄芩炭炮制终点的快速判据,而酒黄芩因黄酒浸渍导致 L^* 下降幅度较小,需结合 a^* (红值)共同判定,验证了“酒润后色转棕红”的传统经验。

电子鼻检测分析显示,不同黄芩炮制品多次与传感器 S3、S7、S10、S13、S2、S6 呈强相关。据此推测 S7 传感器(短链烷烃)和 S13 传感器(甲烷)可作为炒制(炒黄、炒炭)工艺的“平衡指标”,其高响应值可能指示苷类成分得以保留而苷元发生分解,提示其可用于监控炒制火候;S2 传感器(醇类)、S6 传感器(芳香化合物)和 S15 传感器(挥发性有机化合物和异味气体)则与黄芩苷呈强相关,推测酒制工艺可能通过挥发性物质(如乙醇、酯类)影响苷类成分。基于此,可考虑设定相关传感器响应阈值以监控炮制终点,为构建客观的黄芩炮制品质量评价体系提供依据。电子舌进一步揭示滋味与成分的定量关联,传感器 P3、P13、P15~P18 的响应值与黄芩苷呈强正相关,而与黄芩素、汉黄芩素呈强负相关,该发现并为滋味的客观量化提供依据。

本研究以山西道地药材黄芩为样本,工艺参数是否适用于其他产地尚需验证,电子鼻、电子舌传感器阵列对炮制过程产生的差异灵敏度有限,后续可引入 GC-MS/MS 或 UPLC-QTOF-MS 与电子感官

数据融合,构建多模态深度学习模型,实现炮制终点更深层次的判定。

3.3 创新、局限与展望

与既往研究^[30-33]相比,本研究的创新性主要体现在首次将热分析(TGA-DTG)与 AHP-熵权法赋权、CCD-RSM 优化及智能感官技术(电子眼、鼻、舌)相结合,构建了一套从工艺参数预测、多指标优化到产品质量客观评价的完整研究体系,不仅证实了炮制过程中色变与质变的同步性,更初步探明了引起气变和味变的潜在物质类别,这是对传统“辨状论质”理论的现代化诠释。

然而,本研究仍存在一定局限性:工艺优化基于山西产黄芩,其结论在其他产地的黄芩上应用的普适性有待进一步验证。其次,电子鼻、电子舌检测的是整体气味和滋味指纹图谱,虽能灵敏区分差异并找到相关传感器,但无法像 GC-MS 或 LC-MS 那样直接鉴定出导致该差异的具体化合物;此外,研究中未将优化工艺与《中国药典》或地方标准收录的工艺进行系统性对比,未能直接证实优化工艺在成分保留、性状一致性或能耗效率等方面的优越性,这是未来研究中需优先完善的重要环节。

基于以上分析,未来研究可收集多产地黄芩样本,验证本工艺的稳定性;联用 GC-MS/MS 和 UPLC-QTOF-MS 等尖端分析技术,对电子鼻、电子舌响应差异显著的样品进行定向分析,直接鉴定出与性状变化对应的物质基础,从而构建更精准的“性状-成分”关联模型,最终实现炮制过程的智能在线监控。本研究通过热分析技术结合 AHP-熵权法与 CCD-RSM,优化黄芩炒制品、炭制品及酒制品的最佳炮制工艺,并基于电子眼、电子鼻、电子舌的智能感官技术可客观量化炮制性状差异,建立了可量化的质量评价体系,通过揭示“性状-成分”的内在关联,为炮制终点判定及饮片质量控制提供了创新方法与科学依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 朱彤,郭梦佳,杨立新,等.基于性状-显微-化学特征的甘肃黄芩与正品黄芩比较研究[J].中成药,2024,46(9): 3171-3175.
- [2] 钱锦秀,孟武威,赵佳琛,等.经典名方中黄芩的本草考证[J].中国实验方剂学杂志,2023,29(5): 84-93.
- [3] 中国药典[S].一部.2025: 323.
- [4] 李利华,王巍,张一美,等.多指标综合评价结合层次

- 分析法优化黄芩的微波酒蜜炮制工艺 [J]. 现代药物与临床, 2023, 38(9): 2195-2201.
- [5] 凡梦豪, 于小慧, 朱琳, 等. 黄芩炮制历史沿革研究概况 [J]. 中国民族民间医药, 2021, 30(20): 53-57.
- [6] 李金瑾, 马华根, 屈会化, 等. 基于中药炮制理论辨析不同黄芩炮制品临证应用 [J]. 辽宁中医药大学学报, 2023, 25(10): 87-90.
- [7] 陈智, 马玉坤, 李佳旭. 黄芩炭最佳炮制工艺的研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(1): 114-117.
- [8] 李伟, 贾志春, 徐伟, 等. 黄芩的化学成分、药理作用以及临床应用 [J]. 山西大同大学学报: 自然科学版, 2024, 40(5): 85-90.
- [9] 田童心, 李修平, 吴恒梅, 等. 黄芩主要活性成分提取工艺及药理活性研究进展 [J]. 农业与技术, 2025, 45(12): 26-30.
- [10] 刘晓金. 黄芩化学成分和药理作用研究进展及质量标志物预测分析 [J/OL]. 中华中医药学刊. (2025-05-06) [2025-08-26]. <https://link.cnki.net/urlid/21.1546.R.20250506.1510.059>.
- [11] 姚雪, 吴国真, 赵宏伟, 等. 黄芩中化学成分及药理作用研究进展 [J]. 辽宁中医杂志, 2020, 47(7): 215-220.
- [12] 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.
- [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] 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.
- [15] 梅佳华, 查学志, 柯瑾, 等. 基于 AHP-熵权法及化学计量学的虎力散提取工艺研究 [J]. 中草药, 2025, 56(13): 4643-4653.
- [16] 荆文光, 张权, 程显隆, 等. 基于电子鼻、电子舌技术的姜厚朴炮制机理探讨 [J]. 河北工业科技, 2021, 38(5): 414-422.
- [17] 丁羽, 戴慧莲, 姜德利, 等. 基于智能感官和近红外光谱技术结合化学计量学的酒当归炮制程度快速辨识研究 [J]. 中草药, 2025, 56(1): 68-78.
- [18] 万毅, 吴杨倩, 张小兰, 等. 基于智能感官技术结合多元统计分析的酒乌梢蛇炮制程度快速辨识研究 [J]. 中草药, 2025, 56(20): 7309-7320.
- [19] 延永, 张亦琳, 王学军. 黄芩总黄酮提取工艺优化及其抗氧化活性 [J]. 广西林业科学, 2023, 52(1): 113-118.
- [20] 杨敏, 奚军伟. 厚朴中总鞣质提纯工艺及抗菌活性研究 [J]. 湖北农业科学, 2023, 62(6): 129-134.
- [21] 刘鹏, 李金香, 冷敦鹏, 等. 黄芩多糖提取纯化、结构及生物活性研究进展 [J]. 家禽科学, 2024(6): 60-66.
- [22] 邹婷, 王晶, 武旭, 等. 基于颜色-成分关联探讨金银花“炒炭存性”的科学内涵 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(4): 175-182.
- [23] 黄建萍, 夏泽冰, 井亚江, 等. 基于“辨状论质”理论分析不同采收期黄芩外观性状与内在质量的相关性 [J]. 中草药, 2024, 55(10): 3487-3496.
- [24] 马栋, 李小琴, 薛幸媛, 等. 关于中药黄芩“辨状论质”的本草考证研究 [J]. 中药材, 2022, 45(10): 2516-2521.
- [25] 谢宗万. 中药品种传统经验鉴别“辨状论质”论 [J]. 时珍国药研究, 1994, 5(3): 19-21.
- [26] 李佳园, 魏晓嘉, 万国慧, 等. “辨状论质”的历史沿革与现代研究进展 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(6): 189-196.
- [27] 陈丹燕, 王瑜婷, 潘玲, 等. 姜炭炮制过程中化学成分与粉末色泽关联性分析 [J]. 药物分析杂志, 2023, 43(10): 1800-1810.
- [28] 周颖欣, 潘玲, 王文丽, 等. 基于外观性状及内在成分的钩藤药材综合质量评价研究 [J]. 中药材, 2025, 48(2): 412-418.
- [29] 李志强, 席啸虎, 王爽. 炙甘草炮制后外观及成分变化 [J]. 中国药物与临床, 2023, 23(1): 6-9.
- [30] 胡恋琪, 熊优, 王雅琪, 等. 黄芩饮片加工工艺标准化的初步研究 [J]. 中国中药杂志, 2019, 44(15): 3281-3286.
- [31] Zhang L W, Zhang X M, Liang Z S. Post-harvest processing methods have critical roles in the contents of active ingredients of *Scutellaria baicalensis* Georgi [J]. *Molecules*, 2022, 27(23): 8302.
- [32] 李利华, 王巍, 张一美, 等. 多指标综合评价结合层次分析法优化黄芩微波酒制工艺 [J]. 药学研究, 2023, 42(11): 875-880.
- [33] 孙静. 基于三性指标体系的黄芩炭炮制终点及机理研究 [D]. 北京: 北京中医药大学, 2023.

[责任编辑 郑礼胜]