

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

张陈了一^{1,2}, 李阳阳^{1,2}, 李明星^{1,2}, 武俏欣^{1,2}, 周露晨^{1,2}, 王金宏², 王昊², 胡扬², 杨波², 贾绍华¹, 徐蓓蕾^{2,3,4,5*}, 李文兰^{2,3,4*}

1. 哈尔滨商业大学英才学院, 黑龙江 哈尔滨 150076
2. 哈尔滨商业大学药学院, 黑龙江 哈尔滨 150076
3. 抗肿瘤天然药物教育部工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150076
4. 黑龙江省预防与治疗老年性疾病药物研究重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150076
5. 中药制药与新药开发教育部工程研究中心, 北京 102488

摘要: 目的 探究表观颜色与内在品质之间相关性, 对党参 *Codonopsis Radix* 关键质量属性进行客观量化, 优选蜜炙、酒炙党参最佳炮制工艺。方法 以熵权法结合单因素、Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface method, BBD-RSM) 设计优化蜜炙、酒炙党参炮制工艺, 通过 HPLC 指纹图谱与已指认的共有峰成分紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 含量, 以及醇溶性浸出物、总多糖、总三萜、水分、颜色等质量属性综合评价炮制工艺, 并进行验证。同时, 以 Pearson 系数和偏最小二乘分析-变量投影重要性 (partial least squares-variable importance in projection, PLS-VIP) 分析反映颜色与内在质量之间的相关性。结果 蜜炙党参最佳炮制工艺为加蜜量 18%、闷润时间 6.5 h、炒制温度 113 °C; 酒炙党参最佳炮制工艺为炒制时间 9 min、闷润时间 3 h、炒制温度 107 °C。PLS-VIP 和 Pearson 相关性分析结果均显示醇溶性浸出物、水分、总多糖、党参炔苷、苍术内酯 III 与外观颜色变化高度相关联且变化显著。其中醇溶性浸出物与色度值 E_{ab}^* 呈负相关性, 水分、总多糖、党参炔苷、苍术内酯 III 与色度值 E_{ab}^* 呈正相关性。结论 所得蜜炙、酒炙党参最佳炮制工艺和颜色与内在质量相关性模型准确可行, 能得到更好控制党参炮制过程的方法, 根据色度可确定党参炮制终点, 为中药炮制过程中辨色判质的研究提供参考。

关键词: 党参; 蜜炙; 酒炙; 熵权法; Box-Behnken 设计-响应面法; 颜色; 关键质量属性; 指纹图谱; 紫丁香苷; 党参苷 I; 党参炔苷; 苍术内酯 III; 多糖; 三萜

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2024)23-8023-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2024.23.010

Optimization of processing technology and study on correlation between intrinsic key quality attributes and color of *Codonopsis Radix*

ZHANG Chenliaoyi^{1,2}, LI Yangyang^{1,2}, LI Mingxing^{1,2}, WU Qiaoxin^{1,2}, ZHOU Luchen^{1,2}, WANG Jinhong², WANG Hao², HU Yang², YANG Bo², JIA Shaohua¹, XU Beilei^{2,3,4,5}, LI Wenlan^{2,3,4}

1. Honors' School, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China
2. School of Pharmacy, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China
3. Engineering Research Center of Natural Anticancer Drugs, Ministry of Education, Harbin 150076, China
4. Heilongjiang Province Key Laboratory of Preventive and Therapeutic Drug Research of Senile Diseases, Harbin 150076, China
5. Engineering Research Center of Chinese Medicine Production and New Drug Development, Beijing 102488, China

Abstract: Objective The study explored the correlation between apparent color and intrinsic quality, objectively quantified the key quality attributes of Dangshen (*Codonopsis Radix*, CR), and optimized the optimal processing technology of honey-fried and wine-

收稿日期: 2024-06-22

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目 (202310240045); 黑龙江中医药管理局中医药科研课题 (ZHY2024-313)

作者简介: 张陈了一 (2002—), 女, 本科在读, 主要从事中药药效物质基础和质量评价研究。Tel: 15067672762 E-mail: zcly61502@163.com

*通信作者: 徐蓓蕾 (1983—), 女, 博士, 副教授, 主要从事中药药效物质基础和质量评价研究。

Tel: 15124515866 E-mail: xubeilei2006@163.com

李文兰 (1967—), 女, 博士, 教授, 主要从事中药药效物质与质量评价研究。Tel: 13936169153 E-mail: lwlzd@163.com

fried CR. **Methods** The processing technology of honey-fried and wine-fried CR was optimized by entropy weight method combined with a single factor and Box-Behnken design-response surface method (BBD-RSM). The processing technology was comprehensively evaluated and verified by HPLC fingerprint and identified common peak components such as syringin, tangshenoside I, lobetyolin and atractylenolide III, as well as quality attributes such as ethanol-soluble extractives, total polysaccharide, total triterpenoid, water content, and chrominance value. At the same time, pearson coefficient and the analysis of partial least squares-variable importance in projection (PLS-VIP) were used to reflect the correlation between color and intrinsic quality. **Results** The optimal processing technology of honey-fired CR was adding 18% honey, soaking for 6.5 h, and frying at 113 °C. As for the wine-fried CR, it was stir-fried for 9 min at a temperature of 107 °C, soaking for 3 h. The result of PLS-VIP and Pearson correlation analysis showed a high correlation and significant change in apparent color with ethanol-soluble extractives, water, total polysaccharide, lobetyolin and atractylenolide III. There was a negative correlation between the ethanol-soluble extractives and the chrominance value E_{ab}^* , while there was a positive correlation between water content, total polysaccharides, lobetyolin, atractylenolide III and the colorimetric value E_{ab}^* . **Conclusion** The optimal processing technology and the analysis model of the correlation between color and intrinsic quality of honey-fried and wine-fried CR determined is accurate and feasible. It can provide a better method for controlling the processing of CR, and determine the endpoint of CR processing based on chromaticity, which can provide a reference for the study of color analysis and quality judgment in traditional Chinese medicine processing.

Key words: *Codonopsis Radix*; honey-fried; wine-fried; entropy weight method; Box-Behnken design-response surface method; color; critical quality attributes; fingerprint; syringin; tangshenoside I; lobetyolin; atractylenolide III; polysaccharide; triterpenoid

党参来源于党参 *Codonopsis pilosula* (Franch.) Nannf.、素花党参 *C. pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen 或川党参 *C. tangshen* Oliv. 的干燥根, 有养血生津、健脾益肺的功效^[1-2]。党参的主要活性成分有: 糖类, 其中党参多糖有抗氧化和神经保护作用; 三萜类具有抗炎功效^[3], 其中, 党参炔苷可保护胃肠道黏膜^[4]; 倍半萜内酯类, 苍术内酯 III 具有提高免疫力、抗肿瘤^[5]等作用。上述成分皆为党参中的药效成分。中药经过炮制后可增效减毒, 蜜炙党参具有补中益气、润燥养阴、抗疲劳等功效^[4], 而酒炙能够制其寒性, 具有活血作用, 二者皆为传统应用中党参常用饮片。目前, 传统中药炮制过程中依据经验判断, 存在不准确性, 因此将色差分析技术引入中药领域, 可实现对党参颜色数字化分析, 建立一种客观量化的评价方法^[6-7]。熵权法可以更客观地确定各测定指标的权重系数, 综合评估多种因素, 选取最佳方案, 结合 Box-Behnken 设计-响应面法 (Box-Behnken design-response surface method, BBD-RSM) 能够更科学地优化现代炮制工艺^[8]。本研究针对中药炮制过程中饮片颜色这个关键质量属性的确定, 主要依靠经验判断的问题, 以蜜炙党参、酒炙党参为载体, 测定色度、水分、多糖、紫丁香苷、党参炔苷、党参苷 I、苍术内酯 III、醇溶性浸出物的含量, 运用熵权法计算内在指标的综合评分, 结合 BBD-RSM 优化蜜炙、酒炙党参炮制工艺, 明确颜色与其内在品质的关联性, 为党参饮片的炮制终点判断提供参考依据, 可用于党参饮片的质量控制。

1 仪器与材料

1.1 仪器

UV-2450 型紫外可见分光光度计, 上海舜宇恒平科学仪器有限公司; UltiMate3000 型高效液相色谱仪, 赛默飞世尔科技有限公司; CM-5 型台式分光测色仪, 深圳市三恩时科技有限公司; 001-00S 型电热恒温鼓风干燥箱, 湖南兰思仪器有限公司; SK3310HP 型超声波清洗器, 上海科导公司; JM 型电子分析天平, 诸暨市超泽衡器设备有限公司。

1.2 饮片

党参, 批号 20220301, 产地甘肃, 中药饮片由黑龙江众信中药饮片有限公司提供, 经哈尔滨商业大学金哲雄教授鉴定, 为桔梗科党参属植物党参 *C. pilosula* (Franch.) Nannf. 的干燥根。

1.3 对照品及试剂

对照品白术内酯 III (批号 RP220914)、紫丁香苷 (批号 RP220821)、党参苷 I (批号 RP230123)、党参炔苷 (批号 RP220519) 均购买自成都麦德生科技有限公司, 质量分数均 $\geq 98\%$; 葡萄糖对照品, 批号 PS020418, 质量分数 $\geq 98\%$, 成都普思生物科技股份有限公司; 甲醇 (批号 20210658)、乙腈 (批号 1214030220) 均为色谱级, 德国默克公司。

2 方法与结果

2.1 样品的制备

2.1.1 蜜炙党参的制备 根据单因素和响应面的试验条件制备蜜炙党参饮片 (S1~S17)。称取党参饮片 100 g, 加入一定量的蜜水, 拌匀, 闷透, 待蜜水被

吸收完全后,将党参饮片投入设定好温度的热锅内,加热,不断翻炒至规定程度,取出,晾凉,即得。

2.1.2 酒炙党参的制备 根据单因素和响应面的试验条件制备酒炙党参饮片(S18~S34)。称取待炮炙党参饮片 100 g,加一定量的黄酒拌匀,闷透,置热锅内,设定温度,炒至规定程度时,取出,放凉,即得。

2.2 颜色测定

取样品于测试皿中,设置光源 D65,观察角度 10°,测量口径 ϕ 为 3 mm,测量波长 360~740 nm,透射 25.4 mm,用黑筒与白板对仪器进行校正^[9]。记录样品的亮度 (L^*)、红-绿轴 (a^*)、黄-蓝轴 (b^*),其中 a^* 值越大代表颜色越红, b^* 值越大代表颜色越黄。按公式总色值 (E_{ab}^*) = $(L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ^[10] 计算 E_{ab}^* ,每份样品测定 3 次,取平均值,结果见表 1。

表 1 蜜炙、酒炙党参饮片的色度值 (n = 3)

Table 1 Chromaticity values of honey-fried and wine-fried *Codonopsis Radix* slices (n = 3)

样品	L^*	a^*	b^*	E_{ab}^*	样品	L^*	a^*	b^*	E_{ab}^*
S1	95.11	-0.72	4.74	95.23	S18	93.09	-0.91	13.70	94.10
S2	93.51	-0.97	10.67	94.12	S19	94.59	-0.78	6.22	94.80
S3	94.49	-0.63	4.57	94.60	S20	94.59	-0.70	4.73	94.71
S4	92.71	-1.16	14.89	93.91	S21	95.44	-0.78	4.63	95.56
S5	95.10	-0.73	4.82	95.22	S22	95.67	-0.60	2.94	95.72
S6	95.30	-0.79	4.58	95.41	S23	94.70	-0.86	6.37	94.92
S7	89.70	-0.86	22.06	92.38	S24	94.95	-0.97	6.83	95.20
S8	94.92	-0.67	4.77	95.04	S25	92.41	-1.10	11.40	93.12
S9	93.17	-0.68	5.73	93.35	S26	94.25	-1.49	10.15	94.81
S10	90.44	-0.87	20.41	92.72	S27	94.98	-0.53	3.77	95.06
S11	94.67	-0.89	6.03	94.87	S28	95.38	-0.73	3.94	95.46
S12	94.77	-0.72	4.96	94.90	S29	95.25	-0.67	4.10	95.34
S13	94.45	-1.04	8.45	94.83	S30	95.32	-0.61	3.65	95.39
S14	94.77	-0.71	5.24	94.92	S31	92.13	-1.00	15.00	93.35
S15	94.87	-0.79	5.10	95.01	S32	92.34	-1.23	13.89	93.39
S16	95.08	-0.58	3.91	95.16	S33	95.32	-0.60	3.99	95.41
S17	93.06	-1.03	12.08	93.85	S34	91.42	-0.88	18.60	93.30

2.3 多糖测定

2.3.1 供试品溶液的制备 参照文献报道方法^[11-12],取党参粗粉 0.5 g,置于 100 mL 圆底烧瓶中,加入 50 mL 80%乙醇,水浴回流提取 2 h,滤过,残渣用 80%热乙醇洗涤,放置室温后用 30 mL 蒸馏水洗涤残渣,置烧瓶中,加入 20 mL 沸水,回流提取 60 min,趁热滤过,残渣及烧瓶用热水洗涤,洗液并入滤液,放冷后浓缩,将滤液于 100 mL 量瓶中定容,即得供试品溶液。

2.3.2 样品测定 采用苯酚-硫酸法在 490 nm 波长处测定多糖,以葡萄糖质量为横坐标 (X),吸光度值为纵坐标 (Y),得线性回归方程 $Y=9.860 X-0.0697$, $R^2=0.9995$,线性范围 0.02~0.10 mg。精密吸取供试品溶液 1.0 mL,测定吸光度,以所得标准曲线回归方程计算多糖含量。

2.4 总三萜测定

采用 5%香草醛-冰醋酸-高氯酸法在波长 540 nm 处测定三萜含量,以齐墩果酸质量为横坐标 (X),吸光度值为纵坐标 (Y),得线性方程 $Y=3.7812 X-0.0014$, $R^2=0.9990$,线性范围 0.02~0.08 mg。取“2.3.1”项下 80%乙醇提取液,测定吸光度,以所得标准曲线回归方程计算总三萜含量。

2.5 水分、醇溶性浸出物测定

参考《中国药典》2020 年版通则 0832 水分测定法项下烘干法测定水分和通则 2201 醇溶性浸出物测定法项下的热浸法测定醇溶性浸出物。

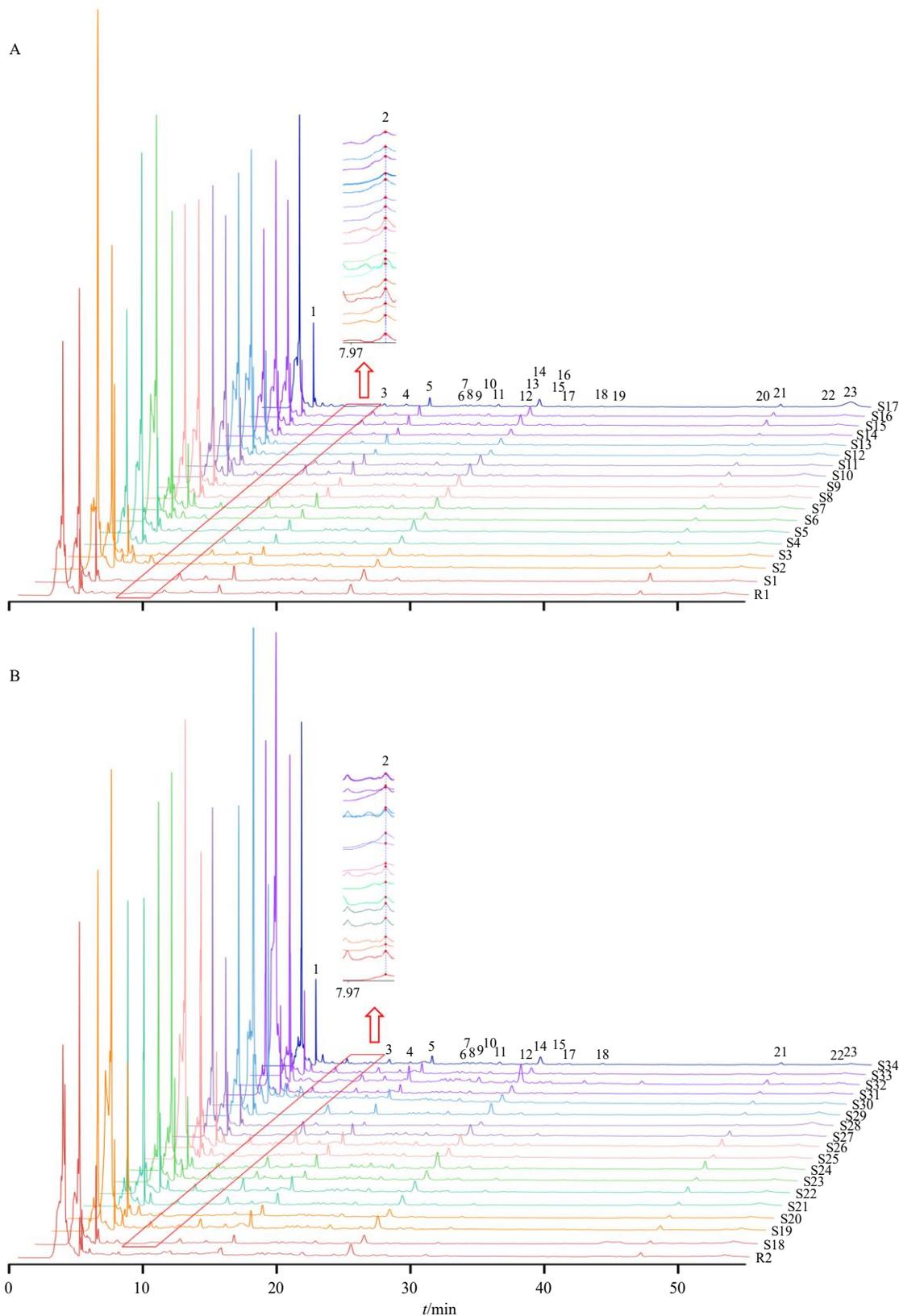
2.6 蜜炙党参和酒炙党参的指纹图谱研究

2.6.1 混合对照品溶液的制备 精密称定紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 对照品适量,加甲醇溶解并定容,得质量浓度分别为 0.010、0.140、0.140、0.035 mg/mL 的混合对照品溶液,甲醇稀释,备用。

2.6.2 供试品溶液的制备 取炮制后党参样品粉末 0.4 g,精密称定,置于圆底烧瓶中,加 80%乙醇 10 mL 回流提取,放冷,滤过,蒸干,甲醇溶解、定容,0.22 μ m 微孔滤膜滤过,即得供试品溶液。

2.6.3 色谱条件^[13] 色谱柱为 Ultimate XB-C₁₈(250 mm×4.6 mm, 5 μ m) 柱;流动相为乙腈-0.1%磷酸水溶液,梯度洗脱: 0~20 min, 10%~28%乙腈; 20~25 min, 28%~33%乙腈; 25~40 min, 33%~55%乙腈; 40~50 min, 55%~70%乙腈; 50~55 min, 70%~10%乙腈; 体积流量 1 mL/min; 检测波长 220 nm; 柱温 25 $^{\circ}$ C; 进样量 20 μ L。

2.6.4 指纹图谱的建立与分析 将 34 批样品的液相色谱图数据导入中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 版)进行分析,生成参照图谱(R1、R2),时间窗为 0.1 min,采用平均数法,经多点校正和 Mark 峰匹配后生成对照指纹图谱(图 1),相似度评价结果见表 2。蜜炙党参共标定 23 个共有峰,酒炙党参共标定 19 个共有峰,通过与对照品 HPLC 图(图 2)对比,指认出其中 4 个成分,分别为紫丁香苷(峰 2)、党参苷 I(峰 5)、党参炔苷(峰 14)、苍



2-紫丁香苷; 5-党参苷 I; 14-党参炔苷; 21-苍术内酯 III; 图 2 同。

2-syringin; 5-tangshenoside I; 14-lobetyolin; 21-atractylenolide III; same as figure 2.

图 1 蜜炙党参 (A) 和酒炙党参 (B) 的 HPLC 指纹图谱及其对照指纹图谱 (R1、R2)

Fig. 1 HPLC fingerprints of honey-fried *Codonopsis Radix* (A) and wine-fried *Codonopsis Radix* (B) and its control fingerprints (R1, R2)

表 2 指纹图谱相似度评价

Table 2 Similarity of fingerprint evaluation

样品	相似度	样品	相似度	样品	相似度	样品	相似度
S1	0.953	S10	0.954	S19	0.996	S28	0.969
S2	0.943	S11	0.985	S20	0.974	S29	0.952
S3	0.987	S12	0.932	S21	0.994	S30	0.949
S4	0.989	S13	0.989	S22	0.972	S31	0.983
S5	0.994	S14	0.997	S23	0.993	S32	0.95
S6	0.942	S15	0.976	S24	0.992	S33	0.981
S7	0.988	S16	0.962	S25	0.964	S34	0.997
S8	0.977	S17	0.992	S26	0.976		
S9	0.994	S18	0.992	S27	0.967		

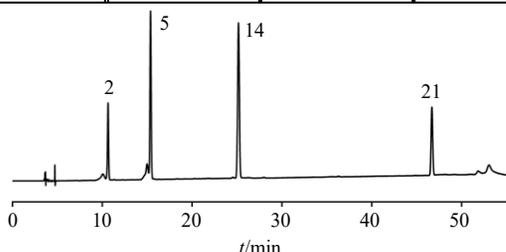


图 2 混合对照品 HPLC 图

Fig. 2 HPLC of mixed reference substances

术内酯 III (峰 21)。结果表明, 34 个样品指纹图谱与对照指纹图谱相似度均大于 0.9, 炮制过程中化学成分稳定性良好。

2.6.5 精密度试验 取 S2 供试品溶液, 在“2.6.3”项下色谱条件连续进样 6 次, 以 14 号峰为参照, 计算各个共有峰相对保留时间的 RSD 均 $\leq 0.15\%$, 相对峰面积的 RSD 均 $\leq 0.94\%$, 结果表明该仪器精密度良好。

2.6.6 稳定性试验 取 S2 供试品溶液, 于制备后 0、2、4、8、12、24 h 进样, 以 14 号峰为参照, 计算各个共有峰相对保留时间的 RSD 均 $\leq 0.12\%$, 相对峰面积的 RSD 均 $\leq 0.72\%$, 结果表明供试品溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.6.7 重复性试验 取同一批 S2 样品, 按“2.6.2”项下方法平行制备 6 份供试品溶液, 以 14 号峰为参照, 计算各个共有峰相对保留时间的 RSD 均 $\leq 0.13\%$, 相对峰面积的 RSD 均 $\leq 1.05\%$, 结果表明该方法重复性良好。

2.7 指标成分含量测定方法的建立及熵权法客观赋权计算综合评分

2.7.1 混合对照品溶液的制备 同“2.6.1”项。

2.7.2 供试品溶液的制备 同“2.6.2”项。

2.7.3 色谱条件 同“2.6.3”项。

2.7.4 线性关系考察 取已稀释的 7 个不同质量浓

度的混合对照品溶液, 按“2.6.3”项下色谱条件测定, 以质量浓度为横坐标(X), 峰面积为纵坐标(Y), 得各成分的回归方程与线性范围, 结果分别为紫丁香苷 $Y=0.8108X-0.0957$, $R^2=0.9994$, 线性范围 1.43~10.00 $\mu\text{g/mL}$; 党参苷 I $Y=0.2583X-1.6302$, $R^2=0.9993$, 线性范围 20.00~140.00 $\mu\text{g/mL}$; 党参炔苷 $Y=0.3663X+0.4528$, $R^2=0.9991$, 线性范围 20.00~140.00 $\mu\text{g/mL}$; 苍术内酯 III $Y=0.5877X-0.0776$, $R^2=0.9992$, 线性范围 5.00~35.00 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.7.5 精密度试验 取 S2 供试品溶液, 在“2.6.3”项条件下连续进样 6 次, 计算紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 各成分峰面积的 RSD 分别为 0.62%、0.35%、0.97%、1.83%, 表明精密度良好。

2.7.6 稳定性试验 取 S2 供试品溶液, 于 0、2、4、8、12、24 h 进样, 按“2.6.3”项下色谱条件进样, 计算紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 各成分含量 RSD 分别为 1.07%、0.58%、0.74%、1.42%, 表明供试品溶液 24 h 内稳定。

2.7.7 重复性试验 取同一批 S2 样品, 按“2.6.2”项下方法平行制备 6 份, 计算紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 各成分质量分数 RSD 分别为 2.14%、1.09%、1.08%、1.72%, 表明重复性良好。

2.7.8 加样回收率试验 精密称定 6 份已测知 4 种指标成分含量的 S2 样品, 加入等量 4 种对照品进行测定, 计算紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 的平均加样回收率分别为 100.60%、99.61%、102.67%、101.40%, RSD 分别为 1.36%、2.31%、1.67%、1.63%。

2.7.9 样品含量测定方法 取各供试品溶液, 按“2.6.3”项下色谱条件测定, 计算各成分含量。

2.7.10 熵权法客观赋权计算综合评分 熵权法依据指标的变异程度确定权重的高低。对 n 个评价对象 m 个指标进行正向化 (X_{ij})、标准化 (Z_{ij})、信息熵 (e_{ij}) 计算, 最后得出权重系数 (W_j) [13]。

(1) 构成正向化矩阵 X 后进行标准化处理。

$$Z_{ij} = X_{ij} / (\sum_{i=1}^n x_{ij}^2)^{0.5}$$

(2) 概率矩阵 (P_{ij}) 计算公式如下。

$$P_{ij} = Z_{ij} / \sum_{i=1}^n Z_{ij}$$

(3) e_i 计算公式如下。

$$e_i = - \sum_{j=1}^m P_{ij} \ln P_{ij} / \ln n, j=1, \dots, m$$

(4) 熵权法的 W_j 按下式计算。

$$W_j = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^m (1 - e_j), i = 1, \dots, n$$

(5) 综合评分 (U_i) 按下式计算。

$$U_i = \sum_{j=1}^m W_j Z_{ij}, i = 1, \dots, n$$

2.8 蜜炙党参炮制工艺单因素考察

2.8.1 加蜜量考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.1”项下方法进行炮制, 在固定闷润时间 6 h、炒制时间 10 min 及炒制温度 100 °C 的前提下, 改变加蜜量 (15%、18%、21%、24%、27%) 进行单因素实验, 以颜色、水分及多糖、总三萜类、醇溶性浸出物含量为测定指标, 结合熵权法确定各指标的 W_j (表 3), 计算综合评分, 考察加蜜量对蜜炙党参的影响, 结果见表 4。随着加蜜量的增加, 综合评分呈先增加后降低再增加的趋势, 当加蜜量为 18% 时综合评分最高, 故选择 15%、18%、21% 加蜜量用于后续蜜炙党参工艺考察。

表 3 单因素实验各指标 W_j 计算结果

Table 3 W_j results for each index of single factor test

评价指标	W_j		评价指标	W_j	
	蜜炙	酒炙		蜜炙	酒炙
水分	0.46	0.44	三萜	0.11	0.11
醇溶性浸出物	0.01	0.01	颜色	0.25	0.36
多糖	0.18	0.08			

表 4 加蜜量对蜜炙党参的影响

Table 4 Effects of honey added on honey-fried *Codonopsis Radix*

加蜜量/%	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
15	93.97	11.33	15.08	8.88	60.31	0.56
18	94.69	9.33	11.70	7.14	56.26	0.74
21	92.60	8.67	5.74	7.14	65.86	0.64
24	93.35	12.00	7.51	5.97	62.71	0.37
27	94.43	13.00	13.65	5.22	70.31	0.36

2.8.2 闷润时间考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.1”项下方法进行炮制, 在固定加蜜量 21%、炒制时间 10 min 及炒制温度 100 °C 的前提下, 改变闷润时间 (2、4、6、8、10 h) 进行单因素实验, 结果见表 5。随着闷润时间的增加, 当闷润时间为 6 h 时综合评分最高, 故选择闷润时间 4、6、8 h 用于后续蜜炙党参工艺考察。

2.8.3 炒制时间考察 准确称取 100 g 党参药材,

按照“2.1.1”项下方法进行炮制, 在固定加蜜量 21%、闷润时间 6 h 及炒制温度 100 °C 的前提下, 改变炒制时间 (4、7、10、13、16 min) 进行单因素实验, 结果见表 6。随着炒制时间的增加, 当炒制时间为 10 min 时综合评分最高, 由于炒制时间对综合评分影响较小, 故该因素不作为后续蜜炙党参工艺考察因素。

表 5 闷润时间对蜜炙党参的影响

Table 5 Effects of moistening time on honey-fried *Codonopsis Radix*

闷润时间/h	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
2	94.36	13.00	11.73	4.85	63.18	0.35
4	94.81	11.67	7.08	7.02	58.43	0.47
6	94.67	11.00	10.56	4.93	58.80	0.55
8	94.59	12.00	16.13	8.76	60.60	0.49
10	94.85	14.00	17.47	10.09	57.95	0.35

表 6 炒制时间对蜜炙党参的影响

Table 6 Effects of processing time on honey-fried *Codonopsis Radix*

炒制时间/min	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
4	93.75	12.00	8.54	8.80	57.55	0.43
7	93.86	12.00	11.72	10.01	58.31	0.46
10	94.40	11.67	22.07	5.67	67.25	0.54
13	94.71	11.33	10.50	8.08	59.84	0.53
16	94.74	12.00	16.81	6.49	59.19	0.48

2.8.4 炒制温度考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.1”项下方法进行炮制, 在固定加蜜量 21%、闷润时间 6 h 及炒制时间 10 min 的前提下, 改变炒制温度 (70、85、100、115、130 °C) 进行单因素实验, 结果见表 7。随着炒制温度的增加, 当炒制温度为 115 °C 时综合评分最高, 故选择炒制温度 100、115、130 °C 用于后续蜜炙党参工艺考察。

表 7 炒制温度对蜜炙党参的影响

Table 7 Effects of processing temperature on honey-fried *Codonopsis Radix*

炒制温度/°C	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
70	95.01	13.00	6.87	7.69	65.35	0.34
85	94.55	12.00	16.55	5.07	57.60	0.47
100	95.11	12.00	16.42	5.89	57.45	0.47
115	94.81	9.00	7.73	13.37	70.63	0.75
130	92.38	10.33	16.60	8.72	56.43	0.57

2.9 酒炙党参炮制工艺单因素考察

2.9.1 加酒量考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.2”项下方法进行炮制, 在固定闷润时间 3 h、炒制时间 11 min 及炒制温度 105 °C 的前提下, 改变加酒量 (5%、10%、15%、20%、25%) 进行单因素实验, 以颜色、水分及多糖、总三萜类、醇溶性浸出物含量为测定指标, 结合熵权法确定各指标的 W_j (表 3), 计算综合评分, 考察加酒量对酒炙党参的影响, 结果见表 8。随着加酒量的增加, 当加酒量为 20% 时综合评分最高, 由于加酒量对综合评分影响较小, 故该因素不作为后续酒炙党参工艺考察因素。

表 8 加酒量对酒炙党参的影响
Table 8 Effects of wine added on wine-fried *Codonopsis Radix*

加酒量/%	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
5	94.71	11.33	20.35	6.34	57.38	0.55
10	94.12	10.67	11.84	10.21	60.12	0.62
15	94.24	9.00	7.69	5.07	55.99	0.69
20	93.71	8.67	10.30	6.96	60.43	0.73
25	94.73	11.00	15.04	8.23	59.10	0.58

2.9.2 闷润时间考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.2”项下方法进行炮制, 在固定加酒量 15%、炒制时间 11 min 及炒制温度 105 °C 的前提下, 改变闷润时间 (1、2、3、4、5 h) 进行单因素实验, 结果见表 9。随着闷润时间的增加, 当闷润时间为 3 h 时综合评分最高, 故选择闷润时间 2、3、4 h 用于后续酒炙党参工艺考察。

2.9.3 炒制时间考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.2”项下方法进行炮制, 在固定加酒量 15%、闷润时间 3 h 及炒制温度 105 °C 的前提下, 改变炒制时间 (5、8、11、14、17 min) 进行单因素实验, 结果见表 10。随着炒制时间的增加, 当炒制时间为

表 9 闷润时间对酒炙党参的影响

Table 9 Effects of moistening time on wine-fried *Codonopsis Radix*

闷润时间/h	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
1	94.35	12.33	15.57	5.52	58.09	0.47
2	94.45	10.33	16.90	4.60	64.19	0.61
3	93.98	9.33	13.32	5.54	62.89	0.70
4	93.89	11.00	18.76	6.96	58.18	0.57
5	95.44	14.00	17.42	3.92	55.15	0.30

8 min 时综合评分最高, 故选择炒制时间 5、8、11 min 用于后续酒炙党参工艺考察。

2.9.4 炒制温度考察 准确称取 100 g 党参药材, 按照“2.1.2”项下方法进行炮制, 在固定加酒量 15%、闷润时间 3 h 及炒制时间 11 min 的前提下, 改变炒制温度 (75、90、105、120、135 °C) 进行单因素实验, 结果见表 11。随着炒制温度的增加, 当炒制温度为 105 °C 时综合评分最高, 故选择炒制温度 90、105、120 °C 用于后续酒炙党参工艺考察。

表 10 炒制时间对酒炙党参的影响

Table 10 Effects of processing time on wine-fried *Codonopsis Radix*

炒制时间/min	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
5	94.81	13.00	17.95	8.39	59.08	0.45
8	93.97	7.33	13.60	6.96	59.66	0.84
11	93.37	8.67	14.68	4.79	62.46	0.66
14	93.39	10.00	14.65	7.96	56.48	0.58
17	92.62	8.33	11.39	6.12	65.81	0.55

表 11 炒制温度对酒炙党参的影响

Table 11 Effects of processing temperature on wine-fried *Codonopsis Radix*

炒制温度/°C	E_{ab}^*	质量分数/%				综合评分
		水分	多糖	总三萜类	醇溶性浸出物	
75	95.38	13.33	19.07	5.42	57.96	0.35
90	94.71	11.67	22.25	10.52	58.67	0.55
105	94.71	10.33	15.86	11.22	70.23	0.66
120	93.12	10.00	12.18	6.96	62.15	0.52
135	92.58	9.00	11.39	6.22	56.50	0.51

2.10 BBD-RSM 优化炮制工艺

2.10.1 BBD-RSM 因素和水平设计 根据单因素结果, 以加蜜量 (X_1)、炒制温度 (X_2)、闷润时间 (X_3) 为蜜炙考察因素, 炒制时间 (X_4)、炒制温度 (X_5)、闷润时间 (X_6) 为酒炙考察因素。以水分、醇溶性浸出物、多糖、三萜、紫丁香苷、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 为考察指标, 运用 BBD-RSM 优化工艺, 所得结果见表 12、13。熵权法确定各指标的 W_j , 结果见表 14。

2.10.2 回归模型建立及分析 通过 Design Expert 13 软件中 BBD-RSM 建立分析回归模型, 优化工艺, 建立蜜炙、酒炙党参综合评分 Y_1 、 Y_2 对 3 个因素回归方程模型 $Y_1 = 1.300 + 0.0567 X_1 - 0.0832 X_2 + 0.0239 X_3 - 0.0064 X_1 X_2 - 0.0260 X_1 X_3 - 0.0325 X_2 X_3 - 0.1858 X_1^2 - 0.3600 X_2^2 - 0.0735 X_3^2$; $Y_2 =$

表 12 蜜炙党参 BBD-RSM 试验设计及结果

Table 12 Design and results of BBD-RSM tests of honey-fried *Codonopsis Radix*

试验号	$X_1/\%$	$X_2/^\circ\text{C}$	X_3/h	质量分数/%				质量分数/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$				综合评分
				水分	醇溶性浸出物	多糖	三萜	紫丁香苷	党参苷 I	党参炔苷	苍术内酯 III	
S1	18 (0)	115 (0)	6 (0)	12.00	57.20	15.55	6.70	42.1	388.0	375.0	66.7	1.45
S2	15 (-1)	115	8 (+1)	9.00	62.71	13.20	4.82	19.1	245.2	236.6	66.2	0.99
S3	18	115	6	8.33	59.04	17.52	8.18	23.4	269.3	318.3	47.3	1.15
S4	18	130 (+1)	8	6.00	57.55	15.93	8.96	20.5	231.6	241.3	39.0	0.82
S5	15	100 (-1)	6	11.67	57.91	15.75	4.51	11.0	271.2	229.9	129.0	0.84
S6	18	115	6	13.00	55.48	15.59	8.42	35.9	348.7	439.7	68.3	1.41
S7	18	130	4 (-1)	7.67	60.00	7.73	16.16	21.4	193.5	163.6	31.7	0.82
S8	21 (+1)	115	4	12.67	57.26	11.83	4.74	31.3	251.8	406.6	62.1	1.13
S9	18	100	4	7.33	60.38	12.02	5.53	15.7	294.5	229.9	40.0	0.84
S10	21	100	6	7.33	59.64	8.66	4.12	40.2	289.5	265.1	39.5	0.91
S11	18	100	8	11.33	55.64	14.68	6.62	19.1	319.5	362.7	111.4	0.97
S12	18	115	6	10.67	57.24	11.70	7.10	44.5	352.9	341.5	62.1	1.24
S13	21	130	6	7.00	57.95	10.16	4.35	17.0	274.2	300.2	57.1	0.65
S14	15	130	6	8.33	55.11	7.24	2.32	29.3	301.3	342.3	74.6	0.60
S15	21	115	8	9.33	56.55	12.17	8.81	43.7	308.3	308.9	73.3	1.10
S16	18	115	6	10.00	55.48	14.44	7.41	39.6	377.6	352.4	57.7	1.22
S17	15	115	4	6.33	59.27	7.51	11.93	25.3	412.5	245.6	53.0	0.92

表 13 酒炙党参 BBD-RSM 试验设计及结果

Table 13 Design and results of BBD-RSM tests of wine stir-fried *Codonopsis Radix*

试验号	X_4/min	$X_5/^\circ\text{C}$	X_6/h	质量分数/%				质量分数/ $(\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1})$				综合评分
				水分	醇溶性浸出物	多糖	三萜	紫丁香苷	党参苷 I	党参炔苷	苍术内酯 III	
S18	5 (-1)	105 (0)	2 (-1)	10.33	60.13	7.95	6.78	14.4	464.4	219.8	40.5	0.87
S19	8 (0)	105 (+1)	3 (0)	10.67	65.50	9.95	7.04	24.6	289.2	269.8	49.0	1.16
S20	11 (+1)	120	3	10.00	56.07	8.19	7.64	13.0	414.6	283.6	55.8	0.78
S21	11	90 (-1)	3	13.00	55.44	11.92	2.63	16.5	314.4	534.0	123.6	0.73
S22	8	105	3	6.33	60.71	20.07	7.40	12.8	284.1	413.8	134.2	1.44
S23	5	120	3	11.00	55.41	16.40	2.09	18.6	378.0	291.2	94.7	0.75
S24	5	105	4 (+1)	8.67	57.39	16.90	3.81	9.6	289.4	381.4	80.2	0.77
S25	11	105	4	6.00	62.61	6.52	7.25	9.2	328.8	289.9	52.1	0.96
S26	8	105	3	8.33	61.84	17.05	6.07	8.6	380.2	158.7	76.6	1.03
S27	5	90	3	12.00	57.97	16.26	2.32	11.1	329.9	367.3	68.9	0.61
S28	8	90	2	13.33	55.84	14.54	2.95	19.6	436.0	613.8	51.2	0.77
S29	8	120	2	11.67	56.58	8.71	2.87	23.6	515.6	393.8	101.3	0.96
S30	8	120	4	12.33	56.20	18.44	2.24	23.4	323.8	345.0	98.0	0.84
S31	8	105	3	7.33	65.81	10.00	5.92	25.2	370.0	261.2	48.7	1.31
S32	11	105	2	9.67	59.10	11.97	9.36	24.8	254.4	279.7	63.6	1.12
S33	8	90	4	12.00	56.89	11.50	2.71	19.4	329.6	319.9	104.3	0.73
S34	8	105	3	8.67	63.34	12.41	8.93	18.6	285.5	249.9	57.0	1.20

$1.230+0.0749 X_1+0.0609 X_2-0.0522 X_3-0.0254 X_1X_2-0.0145 X_1X_3-0.0203 X_2X_3-0.2034 X_1^2-0.3063 X_2^2-0.0952 X_3^2$ 。蜜炙方差分析结果表明模型的 $P<0.05$, 该回归模型拟合精度好, 失拟项 $P>$

0.05, 所建立的模型具有统计学意义; 各因素的重要程度顺序为炒制温度 > 加蜜量 > 闷润时间; $R^2=0.9074$, 说明相关性好, 该模型能充分说明蜜炙党参炮制工艺过程的质量。酒炙党参的模型拟合方程

表 14 响应面指标各指标 W_j 计算结果

Table 14 W_j results of each index of response surface index

评价指标	W_j		评价指标	W_j	
	蜜炙	酒炙		蜜炙	酒炙
水分	0.32	0.40	紫丁香苷	0.30	0.25
醇溶性浸出物	0.34	0.23	党参苷 I	0.22	0.19
多糖	0.34	0.37	党参炔苷	0.21	0.29
三萜	0.27	0.28	苍术内酯 III	0.14	0.25

的 $R^2=0.8729$, $P<0.01$, 失拟项 $P>0.05$, 表明模型可靠性较强; 各因素重要程度顺序为炒制时间>炒制温度>闷润时间。等高线图越接近椭圆形表示 2 个因素之间的交互作用越显著^[14]。根据模型拟合结果, 蜜炙党参加蜜量 18.43%、闷润时间 6.33 h、炒制温度 113.14 °C (图 3); 酒炙党参炒制时间 8.56

min、闷润时间 2.70 h、炒制温度 106.53 °C (图 4)。

2.11 验证实验

以 BBD-RSM 设计为依据, 整合熵权法, 从炮制工艺实际情况出发, 优化关键工艺参数, 最终确定蜜炙党参最佳工艺为加蜜量 18%、闷润时间 6.5 h、炒制温度 113 °C; 酒炙党参最佳工艺为炒制时间 9 min、闷润时间 3 h、炒制温度 107 °C。按照上述工艺所得的综合评分如表 15 所示, 表明党参炮制工艺条件较为稳定可靠且重复性良好。

2.12 指标成分含量与颜色的相关性分析

2.12.1 Pearson 相关性分析 将蜜炙、酒炙党参炮制品 (S1~S34) 内在指标含量测定数据及与之对应的色度值测定数据, 导入 Origin 2021 软件进行 Pearson 相关性分析, 结果如图 5 所示。蜜炙、酒炙党参含

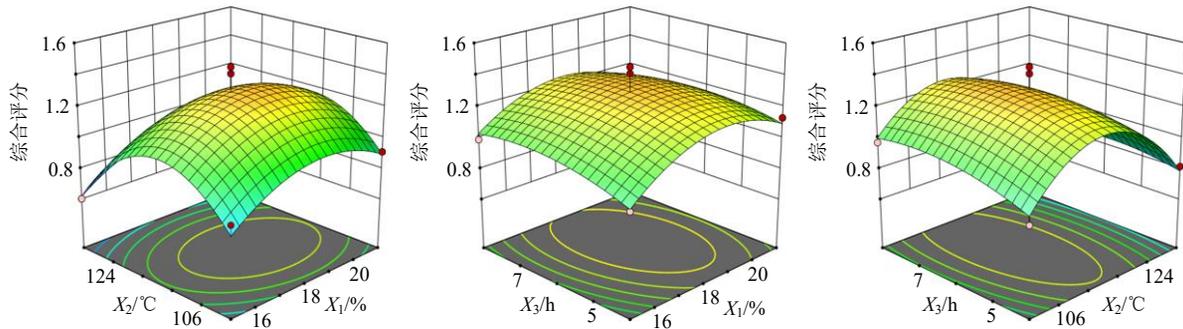


图 3 蜜炙党参各因素交互作用的三维响应面

Fig. 3 3D response surface of interaction between various factors of honey-fried *Codonopsis Radix*

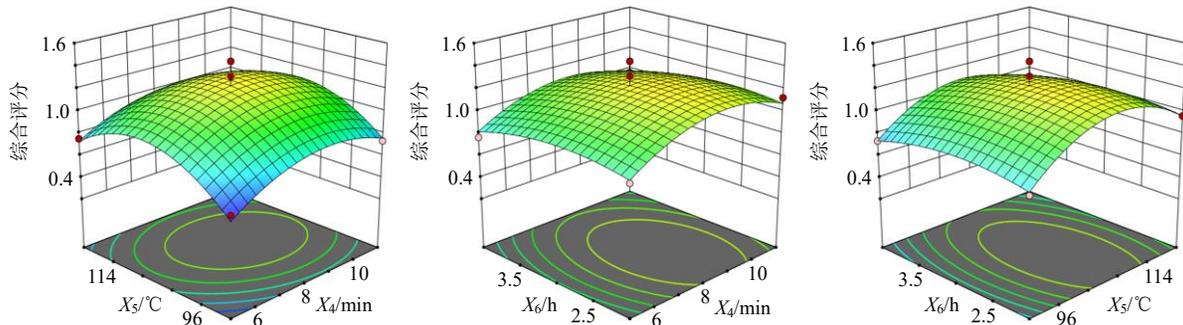


图 4 酒炙党参各因素交互作用的三维响应面

Fig. 4 3D response surface of interaction between various factors of wine-fried *Codonopsis Radix*

表 15 验证实验结果

Table 15 Results of verification test

炮制方式	试验号	质量分数/%				质量分数/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)				综合评分
		水分	醇溶性浸出物	多糖	三萜	紫丁香苷	党参苷 I	党参炔苷	苍术内酯 III	
蜜炙	1	10.33	56.43	13.73	10.33	37.6	369.4	369.8	67.3	1.17
	2	9.67	57.24	14.57	9.67	34.7	357.9	379.6	72.1	1.20
	3	10.00	56.99	14.43	10.00	38.8	343.3	358.0	67.5	1.17
酒炙	4	9.66	62.57	15.55	8.75	15.4	328.5	346.7	58.8	1.23
	5	11.00	63.57	12.59	6.90	21.5	302.1	339.5	73.5	1.20
	6	10.00	65.32	12.80	7.92	19.9	337.7	296.8	68.4	1.32

呈负相关的指标均为醇溶性浸出物、三萜含量，即党参饮片醇提液颜色越浅，水分、多糖、党参炔苷、苍术内酯 III 含量越高，而醇溶性浸出物和三萜类含量越低；蜜炙党参中红绿色 a^* 值与水分呈显著正相关，酒炙党参中 a^* 值与水分、党参炔苷呈显著正相关，表明党参饮片颜色越接近红色，上述含量越高；蜜炙党参黄蓝色 b^* 值与党参炔苷、苍术内酯 III、多糖、水分含量呈显著负相关，与醇溶性浸出物含量呈显著正相关，酒炙党参 b^* 值与党参炔苷、苍术内酯 III、水分含量呈显著负相关，与醇溶性浸出物、三萜含量呈显著正相关，表明颜色越接近黄色，呈正相关的成分含量越高，而呈负相关的成分含量越低。因此，上述结果说明炮制过程中党参饮片颜色能有效反映内在指标的变化，对判断饮片的质量提供了参考^[15-16]。

2.12.2 偏最小二乘回归-变量投影重要性 (partial least squares-variable importance in projection, PLS-VIP) 分析 PLS-VIP 能够反映各自变量对模型的贡献度^[17]。本研究利用 PLS-VIP 建立以各指标质量分数为自变量，颜色指标 E_{ab}^* 为因变量的模型。结果发现，蜜炙党参模型中， $R_x^2=0.689$ ， $R_y^2=0.815$ ， $Q^2=0.601>0.5$ ，表明该预测模型较为理想；酒炙党参模型中， $R_x^2=0.685$ ， $R_y^2=0.797$ ， $Q^2=0.532$ ，表明该模型稳定且可靠。根据 VIP 值 >1 原则，发现党参炔苷、水分、醇溶性浸出物、苍术内酯 III 对蜜炙党参的各颜色指标有显著影响，苍术内酯 III、三萜、醇溶性浸出物、水分、党参炔苷对酒炙党参的各颜色指标有显著影响，结果见图 6。

3 讨论

目前，大多数针对中药炮制过程监测的研究较为粗放，以外观性状和感官触觉为主要判断依据，因此，颜色在中药质量评价中具有重要意义，引入现代分析仪器色差仪将传统经验判定的外观颜色描述量化能够弥补主观评分的不足。张桂梅等^[8]考察了多糖、5-HMF、党参炔苷与颜色的相关性，米炒党参饮片党参炔苷、党参多糖与色度值 E_{ab}^* 呈正相关，周洁等^[18]研究发现党参中 5-HMF 和醇溶性浸出物与色度值 E_{ab}^* 值与呈负相关，党参炔苷和多糖含量与 E_{ab}^* 呈正相关，陈江鹏等^[19]对化学成分与颜色进行 Spearman 相关性分析表明 E_{ab}^* 均与党参炔苷和多糖含量呈显著正相关。本研究结果表明色差值 E_{ab}^* 与党参炔苷和多糖含量呈正相关，醇溶性浸出物含量与 E_{ab}^* 值与呈负相关，醇溶性浸出物与三

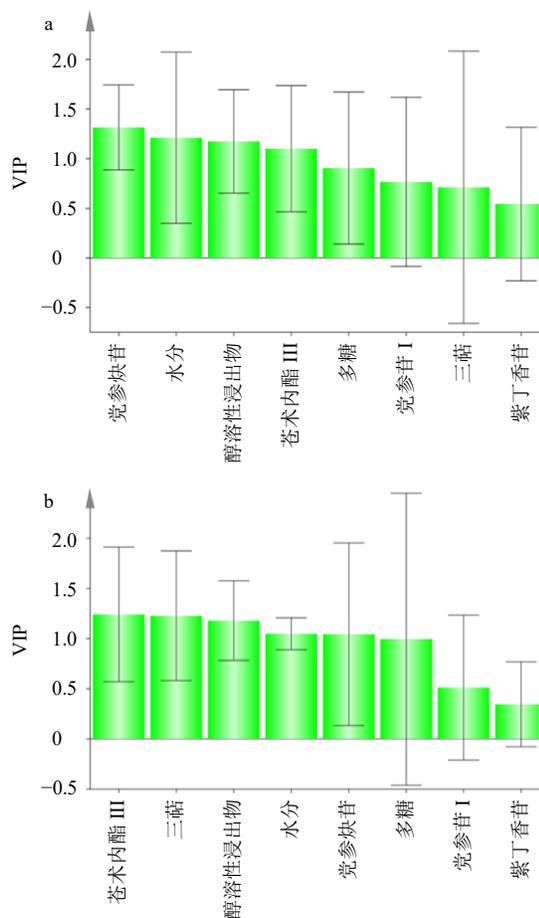


图 6 蜜炙 (a)、酒炙 (b) 党参颜色影响因素的 VIP 得分图
Fig. 6 Variable projection importance indicator(VIP) score plot of factors for color value of honey-fried (a) and wine stir-fried (b) *Codonopsis Radix*

萜含量越高颜色越偏向于黄棕色，多糖、党参苷 I、党参炔苷、苍术内酯 III 的含量越高，含水量越高，表面颜色越趋向于亮红，与相关研究结果一致，说明颜色与内在质量的变化联系紧密，建立的模型可靠性强，能够实现对党参炮制过程的质量监测和预测党参最佳炮制终点。

《中国药典》2020 年版中并没有记载有关党参指标性成分的含量测定项，目前，与党参相关的研究没有统一的质量评价指标性成分。王清浩等^[6]利用指纹图谱探寻化学成分与颜色的关联性，寻找米炒党参炮制过程中质量传递规律，但并未对相关峰进行指认，本研究通过前期查阅文献^[8]和预实验发现峰 2、5、14、21 在液相色谱中响应较高，且与色度值有较大的关联性，为了更好地阐述其与颜色之间的变化规律，本实验选择这些成分进行定量分析，与对照品溶液进行对比，建立蜜炙、酒炙党参 HPLC 指纹图谱，筛选出蜜炙、酒炙党参紫丁香苷、党参

昔 I、党参炆昔、苍术内酯 III 4 个共有成分，并以其作为指标性成分进行含量测定。水分含量与炮制的过程、以及在该过程中饮片颜色的变化均存在较为密切的关系，因此，应该与其他成分共同作为评价指标应用于炮制过程的监测。

本研究全面综合地考虑多指标的影响，在单因素的基础上筛选出合适的水平，利用熵权法结合响应面进行质量评价，优化党参炮制工艺参数，寻求各指标平衡的最佳点，同时探索颜色与综合得分之间的关联性，以颜色为主要监测点对炮制工艺进行评价及化学成分范围初步的判断，寻求炮制过程中饮片颜色变化与内在质量的关系，构建表里关联模型，更加综合科学合理的考察党参饮片质量，为规范其炮制工艺及质量评价提供依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2020: 293.
- [2] 苏圆锦, 奚佳玉, 史奇, 等. 药食同源中药党参的研究进展 [J]. 中草药, 2023, 54(8): 2607-2617.
- [3] Cha A, Choi Y, Jin Y, *et al.* Antilipogenic and anti-inflammatory activities of *Codonopsis lanceolata* in mice hepatic tissues after chronic ethanol feeding [J]. *J Biomed Biotechnol*, 2012, 2012: 141395.
- [4] 唐雅楠, 韩喜桃, 刘子琴, 等. 炮制因素对蜜炙党参的影响 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(11): 2975-2981.
- [5] Zhang D, Xiao X F, Song D Q, *et al.* Atractylenolide III induces apoptosis by regulating the Bax/Bcl-2 signaling pathway in human colorectal cancer HCT-116 cells *in vitro* and *in vivo* [J]. *Anti-Cancer Drugs*, 2022, 33(1): 30-47.
- [6] 王清浩, 王云, 张雪, 等. 基于“表里关联”的米炒党参炮制过程质量传递规律研究 [J]. 中草药, 2019, 50(12): 2848-2855.
- [7] 郑晓倩, 徐超, 金传山, 等. 基于颜色变化的“九蒸九晒”黄精炮制火候及内外在质量的相关性研究 [J]. 中草药, 2022, 53(6): 1719-1729.
- [8] 张桂梅, 岳珠珠, 王慧楠, 等. 基于 AHP-熵权法结合色差原理评价不同辅料大米对米炒党参饮片的影响 [J]. 中草药, 2021, 52(24): 7447-7454.
- [9] 陈鹏, 肖晓燕, 梅茜, 等. 基于仿生技术对薏苡仁麸炒过程中色泽气味变化研究 [J]. 中草药, 2022, 53(14): 4285-4297.
- [10] 邓李红, 王寿富, 陈仕妍, 等. 基于 UPLC 特征图谱结合多模式识别和色度值的槐角炮制前后差异研究 [J]. 中草药, 2022, 53(21): 6881-6887.
- [11] 张小慧, 仝立国, 王亦冰, 等. 不同商品规格等级党参药材的质量分析 [J]. 中国药房, 2023, 34(11): 1363-1367.
- [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] 张小婷, 张芮铭, 牛媛婧, 等. 基于多成分含量测定及化学计量学的党参质量评价 [J]. 中药材, 2022, 45(10): 2411-2417.
- [14] 黄宝泰, 刘星彤, 毛英民, 等. 响应面法结合层次分析法优化酒炙菟丝子的炮制工艺 [J]. 时珍国医国药, 2022, 33(8): 1890-1894.
- [15] 王梦琦, 谷云霞, 田静, 等. 蜘蛛香炒制过程中色泽与主要成分的相关性研究 [J]. 中草药, 2023, 54(18): 5916-5922.
- [16] 欧阳少琴, 陈慧荣, 拱健婷, 等. 基于颜色气味信息融合的苦杏仁走油程度判别分析与质量预测模型建立 [J]. 中草药, 2023, 54(12): 3806-3814.
- [17] 于淼, 代悦, 刘涛涛, 等. 基于物质基础与颜色变化相关性分析的制何首乌古今炮制方法探讨 [J]. 中草药, 2023, 54(11): 3480-3488.
- [18] 周洁, 周晶晶, 甄小龙, 等. 基于“表里关联”和化学计量学的红党参炮制过程中成分含量与色度相关性研究 [J]. 时珍国医国药, 2024, 35(4): 877-880.
- [19] 陈江鹏, 戴俊东, 裴纹萱, 等. 基于功效成分与形性指标相关性分析的米炒党参炮制工艺标准化研究 [J]. 中国中药杂志, 2018, 43(12): 2543-2551.

[责任编辑 郑礼胜]