

层次分析法-熵权法结合Box-Behnken响应面法优化姜炭炮制工艺



钱宇航¹, 叶喜德¹, 冯小龙¹, 卜俊文¹, 吴宇¹, 钟凌云¹, 彭玲珍²

1. 江西中医药大学药学院 (南昌 330004)
2. 江西中医药大学附属医院肿瘤科 (南昌 330006)

【摘要】目的 采用多指标综合加权评分法结合 Box-Behnken 响应面法, 优选姜炭炮制工艺参数, 为其深入研究提供依据。方法 运用 HPLC 法测定姜炭中 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚和姜酮的含量。在单因素试验基础上, 以炒制温度、炒制时间、切片厚度为考察因素, 以 4 种成分的含量为评价指标, 采用层次分析法-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法, 系统考察各因素对姜炭炮制工艺的影响。结果 优选的炮制工艺参数为: 干姜片 25.0 g, 炒制温度 220℃, 炒制时间 9 min, 切片厚度 4 mm。按最佳工艺平行制备 3 份样品, 其综合评分的 RSD 为 0.56%。结论 优选的姜炭炮制工艺稳定可靠、科学合理, 可为姜炭的深入研究提供参考。

【关键词】干姜; 姜炭; 层次分析法; 熵权法; Box-Behnken 响应面法; 6-姜酚; 8-姜酚; 10-姜酚; 姜酮

【中图分类号】 TQ461

【文献标识码】 A

Optimization of ginger charcoal processing technology by analytic hierarchy process-entropy weight method combined with Box-Behnken response surface methodology

QIAN Yuhang¹, YE Xide¹, FENG Xiaolong¹, BU Junwen¹, WU Yu¹, ZHONG Lingyun¹, PENG Lingzhen²

1. School of Pharmacy, Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330004, China

2. Department of Oncology, Affiliated Hospital of Jiangxi University of Traditional Chinese Medicine, Nanchang 330006, China

Corresponding author: YE Xide, Email: 20070994@JXUTCM.edu.cn

【Abstract】 Objective To optimize the processing parameters of ginger charcoal using a multi-index comprehensive weighted scoring method combined with Box-Behnken response surface methodology, and provide a basis for further research. Methods The contents of 6-gingerol, 8-gingerol, 10-gingerol and gingerone in ginger charcoal were determined by HPLC. Based on single-factor tests, the frying temperature, frying time, and slice thickness were selected as the examining factors, and the contents of the 4 components served as evaluation indicators. Using the analytic hierarchy process and entropy weight method combined with Box-Behnken response surface methodology, the effect of various factors on the processing technology of ginger charcoal was systematically investigated. Results The optimized processing parameters were as follows: 25.0 g of dry ginger slices, frying temperature of 220 °C, frying time of 9 min, and slice thickness of 4 mm. Three samples were prepared in parallel by the optimal process, and the RSD of its comprehensive score was 0.56%. Conclusion The optimized processing

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202508084

基金项目: 江西省重点研发计划项目 (2023BBG70013)

通信作者: 叶喜德, 博士, 教授, 博士研究生导师, Email: 20070994@JXUTCM.edu.cn

technology of ginger charcoal is stable, reliable, and scientifically reasonable, which can provide a reference for further research on ginger charcoal.

【Keywords】Dry ginger; Charred ginger; Analytic hierarchy process; Entropy weight method; Box- Behnken response surface methodology; 6-Gingerol; 8-Gingerol; 10-Gingerol; Gingerone

姜炭来源于姜科植物姜 (*Zingiber officinale Roscoe*) 的干燥根茎, 经高温炒制而成, 古称“黑姜”或“炮姜”, 主产于四川、贵州等地, 素有“温中圣药”之称^[1]。其炮制历史可追溯至汉代《金匱要略》, 张仲景即以“姜炭”入药治疗虚寒出血; 后世历代医籍如《本草纲目》《本草备要》亦记载其具有“炒炭存性, 止血而不滞瘀”之效^[2]。姜炭味苦、涩, 性温, 归脾、胃、肾经, 功能温经止血、温中止痛, 主治脾胃虚寒引起的吐血、便血、崩漏及虚寒性腹痛、泄泻等^[3]。

现代研究表明, 姜炭的止血作用与其炮制过程中姜辣素类成分(如6-姜酚、8-姜酚)的氧化转化及姜酮等活性物质的生成密切相关, 而炮制工艺的差异会直接影响成分转化路径与药效强度^[4]。传统姜炭炮制以“武火炒炭, 存性为度”为核心, 但“存性”标准长期依赖经验判断, 炒制温度、时间及切片厚度等关键参数缺乏量化依据, 导致成品质量参差不齐^[5]。文献^[6]考证显示, 姜炭炮制方法历经演变: 唐代《食疗本草》载“姜块煅炭存性”, 宋代《太平惠民和剂局方》始见“麸炒法”, 至明清时期逐渐形成“控温炒炭”工艺。然而, 《中国药典(2025年版)》及各省炮制规范中, 仅粗略描述为“炒至表面焦黑、内部棕褐色”, 未明确具体工艺参数, 制约了姜炭的工业化生产与临床合理应用^[7]。

近年来, 相关研究多聚焦于单一成分(如姜酚)或药效评价, 忽视了炮制过程中多成分协同转化规律与内在质量的关联性^[8]。为此, 本研究采用层次分析-熵权法(analytic hierarchy process-entropy weight method, AHP-EWM)结合Box- Behnken响应面法, 以姜辣素类成分(6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚、姜酮)为综合评价指标, 系统优化姜炭炮制工艺^[9], 以期为姜炭的规范化生产及质量标准的提升提供参考。

1 材料

1.1 主要仪器

Agilent 1260 型高效液相色谱仪, 包括 1260

Infinity II 柱温箱和 1260 Infinity II 二极管阵列检测器(美国安捷伦仪器有限公司); KQ-500E 型超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); YF-111B 型高速中药粉碎机(瑞安市永历制药机械有限公司); JY 系列电子天平(上海衡平仪器仪表厂); BT25S 型十万分之一电子天平(北京赛多利斯仪器系统有限公司); QRZG-S60 型直线往复式切药机(杭州海善制药设备有限公司)。

1.2 主要药品与试剂

对照品 6-姜酚(批号: wkq22102710)、8-姜酚(批号: wkq22081209)、10-姜酚(批号: wkq23091307)、姜酮(批号: wkq22101308)均购自四川省维克奇生化技术公司, 纯度均 $\geq 98\%$; 干姜(批号: 231201, 产地: 安徽亳州)经江西中医药大学中药鉴定室刘应蛟副教授鉴定为姜科植物姜 (*Zingiber officinale Roscoe*) 的干燥根茎; 甲醇和乙腈为色谱纯, 其余试剂均为分析纯, 水为娃哈哈纯净水。

2 方法与结果

2.1 含量测定方法的建立

2.1.1 色谱条件

色谱柱: Syncronis C₁₈ 柱(150 mm × 4.6 mm, 5 μm); 流动相: 水(A)–乙腈(B), 梯度洗脱(0~30 min, 65%~30% A; 30~45 min, 30%~10% A; 45~46 min, 10%~65% A); 流速: 1.0 mL/min, 检测波长: 280 nm, 柱温: 30 $^{\circ}\text{C}$, 进样量: 20 μL ^[10]。

2.1.2 对照品溶液的制备

分别精密称取 6-姜酚 11.0 mg、8-姜酚 3.5 mg、10-姜酚 4.0 mg、姜酮 1.75 mg, 置于 25 mL 量瓶中, 用甲醇溶解并稀释至刻度, 摆匀, 制成浓度分别为 0.44、0.14、0.16、0.07 mg/mL 的混合对照品溶液, 备用。

2.1.3 供试品溶液的制备

精密称取姜炭粉末(过五号筛) 2.0 g, 置 250 mL 具塞锥形瓶中, 精密加入甲醇 50 mL, 密

塞, 摆匀, 称定重量。超声处理(功率: 500 W, 频率: 40 kHz) 45 min, 取出, 冷却至室温, 再次称重, 用甲醇补足减失的重量, 摆匀, 经 0.22 μm 微孔滤膜滤过, 取续滤液, 即得。

2.1.4 系统适用性试验

精密量取空白溶剂、混合对照品溶液及供试品溶液适量, 按“2.1.1”项下色谱条件进样分析, 记录色谱图(图1)。结果显示, 在该色谱条件下, 空白溶剂对测定无干扰; 供试品溶液中姜酮、6-姜酚、8-姜酚及10-姜酚的色谱峰与相邻杂质峰均能达到基线分离, 且峰形对称, 表明该方法专属性良好, 符合含量测定要求。

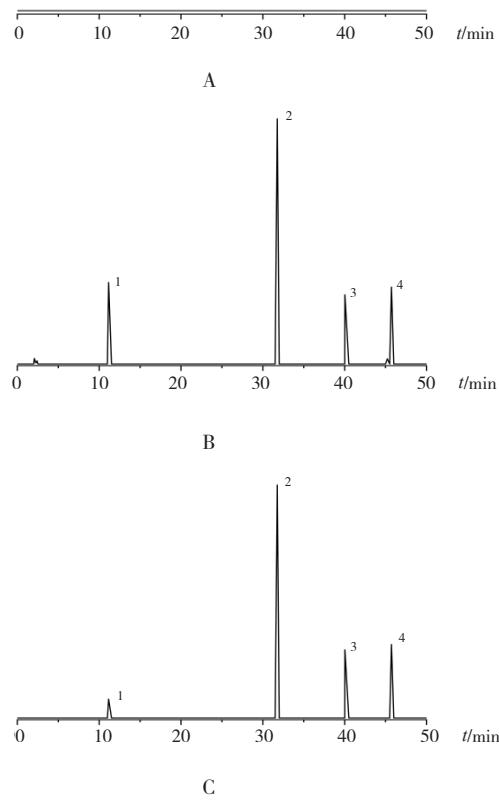


图1 HPLC 色谱图
Figure 1. HPLC chromatogram

注: A. 空白溶剂; B. 混合对照品溶液; C. 供试品溶液; 1. 姜酮; 2. 6-姜酚; 3. 8-姜酚; 4. 10-姜酚。

2.1.5 线性关系考察

取“2.1.2”项下混合对照品溶液, 用甲醇依次梯度稀释2、4、8、16、32、64倍, 得到6个不同浓度的对照品溶液。按“2.1.1”项下色谱条件依次进样测定, 以各成分质量浓度为横坐标(X , $\mu\text{g}/\text{mL}$)、色谱峰面积为纵坐标(Y)进行线性回归, 绘制标准曲线。结果见表1。

表1 4种成分的线性回归分析结果

Table 1. Linear regression analysis results of four components

成分	回归方程	r	线性范围($\mu\text{g}/\text{mL}$)
姜酮	$Y=22.805X-4.7241$	0.9999	2.250~72.000
6-姜酚	$Y=11.158X-10.7540$	1.0000	13.750~440.000
8-姜酚	$Y=9.974.8X-8.9942$	0.9999	4.375~140.000
10-姜酚	$Y=9.369.4X-8.8165$	0.9999	5.000~160.000

2.1.6 精密度考察

取同一份混合对照品溶液(姜酮、6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚浓度分别为0.035、0.220、0.070、0.080 $\mu\text{g}/\text{mL}$), 按“2.1.1”项下色谱条件连续进样6次, 记录各成分峰面积。结果显示, 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚及姜酮峰面积的RSD分别为0.22%、0.19%、0.45%、0.60%($n=6$), 表明仪器精密度良好。

2.1.7 稳定性考察

取同一份姜炭供试品溶液, 分别于制备后0、2、4、8、12、24 h按“2.1.1”项下色谱条件进样测定, 记录6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚及姜酮的峰面积。结果显示, 各成分峰面积的RSD分别为0.65%、1.09%、0.96%、2.74%($n=6$), 表明供试品溶液在24 h内稳定性良好。

2.1.8 重复性考察

精密称取同一批姜炭粉末(过五号筛)6份, 每份1.0 g, 按“2.1.3”项下方法平行制备6份供试品溶液, 再按“2.1.1”项下色谱条件依次进样测定, 计算各成分含量。结果显示, 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚与姜酮的平均含量分别为2.63、10.55、2.25、3.55 $\mu\text{g}/\text{g}$, 其峰面积的RSD分别为0.48%、0.37%、2.51%、2.03%($n=6$), 表明该方法重复性良好。

2.1.9 加样回收率试验

精密称取已知含量的同一批姜炭粉末(6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚、姜酮含量分别为2.63、10.55、2.25、3.55 $\mu\text{g}/\text{g}$)6份, 每份1.0 g, 分别精密加入与样品中含量相当的对照品(6-姜酚1.315 mg、8-姜酚5.275 mg、10-姜酚1.125 mg、姜酮1.775 mg), 按“2.1.3”项下方法制备供试品溶液, 并按“2.1.1”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积并计算回收率。结果显示, 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚及姜酮的平均加样回收率分别为99.2%、99.1%、99.5%、99.8%, RSD分别为1.8%、1.5%、1.2%、1.0%($n=6$), 表明该方法

准确度良好, 符合分析要求。

2.2 综合评分指标权重的确定

2.2.1 AHP权重确定

将 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚和姜酮 4 种活性成分作为评价指标进行层次分析。通过构建判断矩阵, 对各指标进行两两比较, 确定其相对重要性, 进而计算各指标权重, 结果见表 2。其中, 6-姜酚权重为 0.459 6, 8-姜酚为 0.294 5, 10-姜酚为 0.157 3, 姜酮为 0.088 6。一致性比率 (consistency ratio, CR) 为 0.017 (小于 0.1), 表明判断矩阵具有良好的一致性, 权重分配有效可靠。

2.2.2 EWM权重确定

参考文献^[1]方法生成初始数据矩阵, 并将其转换为概率矩阵, 计算第 i 个评价指标的信息熵 (H_i) 及指标的权重系数 (W_j), 结果见表 3。

表2 AHP矩阵
Table 2. AHP matrix

指标	6-姜酚	8-姜酚	10-姜酚	姜酮	权重系数
6-姜酚	1	2	3	4	0.459 63
8-姜酚	0.5	1	2	4	0.294 50
10-姜酚	0.333	0.5	1	2	0.157 25
姜酮	0.25	0.25	0.5	1	0.088 62

表3 各指标熵值及权重系数

Table 3. Entropy value and weight coefficient of each index

指标	H_i	W_j
姜酮	0.868	0.351 99
6-姜酚	0.946	0.143 61
8-姜酚	0.934	0.176 21
10-姜酚	0.877	0.328 19

2.2.3 复合权重确定

基于 AHP 与 EWM 所得权重系数, 采用线性加权法计算各指标的综合权重。结果显示, 6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚与姜酮的综合权重分别为 0.155 4、0.328 9、0.258 6、0.257 1。

2.3 单因素试验

2.3.1 炒制温度

取同一批次、大小均匀且切片厚度为 3 mm 的干姜样品 5 份, 每份 25.0 g。在固定炒制时间为 9 min 的条件下, 分别于 200、220、240、260、280 ℃下进行炒制, 每个温度水平平行制备 3 份姜炭样品。测定各样品中指标成分含量并计算综合评分, 结果见图 2。由图可知, 在 220 ℃ 时样品综合评分最高, 因此确定炒制温度的适宜优化区间为 200~240 ℃。

2.3.2 炒制时间

取同一批次、大小均匀且切片厚度为 3 mm 的干姜样品 5 份, 每份 25.0 g。在固定炒制温度为 220 ℃ 的条件下, 分别设置 7、8、9、10、11 min 的炒制时间, 每个时间点平行制备 3 份姜炭样品。测定各样品中指标成分含量并计算综合评分, 结果见图 3。由图可知, 炒制时间为 9 min 时样品综合评分最高, 因此确定炒制时间的适宜优化区间为 8~10 min。

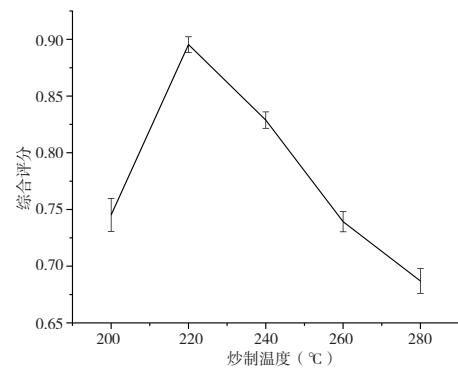


图2 炒制温度对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)

Figure 2. Effect of frying temperature on the comprehensive score of the ginger charcoal index (n=3)

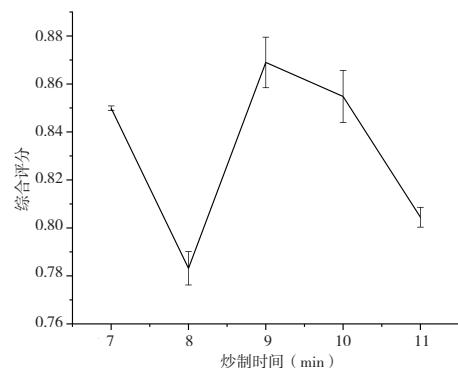


图3 炒制时间对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)

Figure 3. Effect of frying time on the comprehensive score of ginger charcoal index (n=3)

2.3.3 切片厚度

取同一批次干姜样品 5 份, 每份 25.0 g, 将其置于 40℃ 烘箱中软化 2 h 后, 采用经校准的中药切片机分别切成 1、2、3、4、5 mm 的厚度。在固定炒制温度 220 ℃、炒制时间 9 min 的条件下翻炒制备姜炭样品, 每个厚度水平平行操作 3 份。测定各样品中指标成分含量并计算综合评分, 结果见图 4。由图可知, 4 mm 厚度样品的综合评分最高, 故确定切片厚度的适宜优化区间为 3~5 mm。

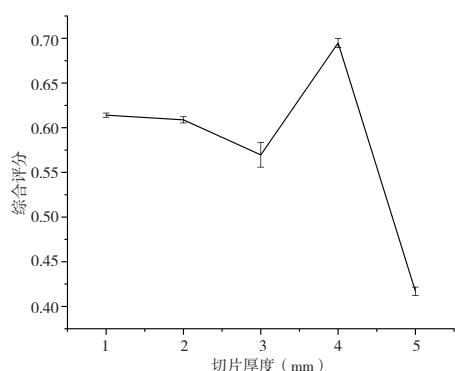


图4 切片厚度对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)

Figure 4. Effect of slice thickness on the comprehensive score of the ginger charcoal index (n=3)

2.4 Box-Behnken响应面试验

2.4.1 试验设计

根据单因素试验结果,选取炒制温度(A)、炒制时间(B)和切片厚度(C)为自变量,以综合评分为响应值,采用Box-Behnken响应面法设计三因素三水平试验,因素与水平设计见表4,试验方案及结果见表5。

2.4.2 模型建立与显著性分析

采用Design-Expert 13软件对表5中的试验数据进行二次多项式回归拟合与方差分析,得到回归方程: $Y=0.969-0.005A-0.0136B-0.0004C-0.0155AB-0.0001AC+0.0041BC-0.0986A^2-0.2751B^2-0.0135C^2$ 。方差分析结果见表6。模型整体 $P<0.0001$,表明回归模型具有高度显著性;失拟项 $P=0.2500 (> 0.05)$,说明失拟不显

著,模型拟合良好,可用于姜炭炮制工艺的预测与分析。因素A(炒制温度)对综合评分影响极显著($P<0.01$),因素B(炒制时间)影响显著($P<0.05$),因素C(切片厚度)影响不显著。各因素对炮制效果的影响程度依次为: $A>B>C$ 。

2.4.3 响应面分析

采用Design-Expert 13软件分析各因素间的交互作用,响应面图见图5。基于模型预测,得出姜炭最佳炮制工艺的理论参数为:炒制温度220.51°C、炒制时间9.01 min、切片厚度4.13 mm,此时综合评分预测值为0.9702。结合实际生产条件与操作便利性,将最终工艺参数调整为:炒制温度220°C、炒制时间9 min、切片厚度4 mm。

2.4.4 最佳工艺验证

取净干姜25.0 g,按优化工艺参数(炒制温度220°C、炒制时间9 min、切片厚度4 mm)平行制备3批姜炭样品,结果见表7。3批样品的平均综合评分为0.9812, RSD为0.56% (n=3),表明该工艺稳定可行,重复性良好,可用于姜炭的规范化制备。

表4 Box-Behnken试验设计因素与水平
Table 4. Factors and levels of Box-Behnken experimental design

水平	因素		
	A 炒制温度 (°C)	B 炒制时间 (min)	C 切片厚度 (mm)
-1	200	8	3
0	220	9	4
1	240	10	5

表5 Box-Behnken试验设计方案与结果

Table 5. Scheme and results of Box-Behnken experimental design

序号	A 炒制温度 (°C)	B 炒制时间 (min)	C 切片厚度 (mm)	姜酮 (mg/g)	6-姜酚 (mg/g)	8-姜酚 (mg/g)	10-姜酚 (mg/g)	综合评分
1	220	9	4	0.4437	12.1863	3.2744	6.1288	0.9737
2	200	8	4	0.1576	8.0834	2.2667	3.7837	0.5949
3	220	10	5	0.3466	8.7911	2.2665	3.4690	0.6683
4	200	9	5	0.2571	11.1647	3.0263	5.8707	0.8515
5	220	10	3	0.1838	8.0919	2.4035	4.6961	0.6495
6	220	8	3	0.2634	8.6010	2.5174	4.7138	0.7007
7	240	10	4	0.1941	7.8007	2.1384	3.1137	0.5647
8	220	8	5	0.2609	8.4759	2.6812	4.5469	0.7031
9	220	9	4	0.4248	12.1835	3.2617	5.9643	0.9598
10	220	9	4	0.4167	12.1658	3.1649	6.1198	0.9547
11	200	10	4	0.1598	8.1411	2.6104	3.5251	0.6146
12	220	9	4	0.4435	12.1353	3.2590	6.1216	0.9708
13	220	9	4	0.4279	12.1598	3.1750	6.8266	0.9859
14	200	9	3	0.2492	10.8247	3.1401	6.2678	0.8635
15	240	9	5	0.4233	10.6469	3.0540	4.6016	0.8501
16	240	9	3	0.3869	10.3972	3.1024	5.3506	0.8626
17	240	8	4	0.2426	8.0119	2.1269	3.6591	0.6070

表6 回归模型方差分析
Table 6. Regression model analysis of variance

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.380 3	9	0.042 3	194.45	<0.000 1
A	0.000 2	1	0.000 2	0.925 0	0.368 2
B	0.001 5	1	0.001 5	6.78	0.035 2
C	1.361×10^{-6}	1	1.361×10^{-6}	0.006 3	0.939 1
AB	0.001 0	1	0.001 0	4.42	0.073 5
AC	6.250×10^{-8}	1	6.250×10^{-8}	0.000 3	0.986 9
BC	0.000 1	1	0.000 1	0.309 4	0.595 4
A2	0.040 9	1	0.040 9	188.29	<0.000 1
B2	0.318 7	1	0.318 7	1 466.44	<0.000 1
C2	0.000 8	1	0.000 8	3.52	0.102 8
残差	0.001 5	7	0.000 2		
失拟项	0.000 9	3	0.000 3	2.05	0.250 0
纯误差	0.000 6	4	0.000 2		
总误差	0.381 8	16			

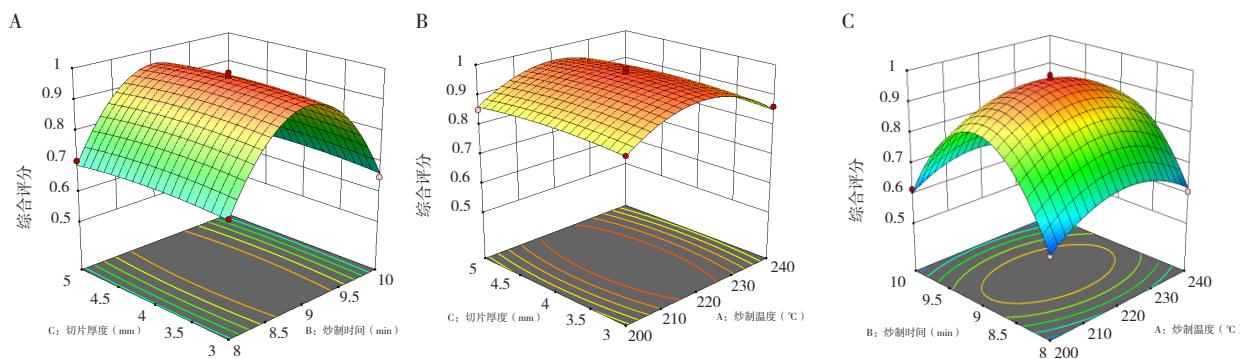


图5 各因素交互作用对姜炭综合评分影响的响应面图

Figure 5. Response surface diagram of the interaction of various factors on the comprehensive score of ginger charcoal
注: A. 炒制时间和切片厚度; B. 炒制温度和切片厚度; C. 炒制时间和炒制温度。

表7 最佳工艺验证试验结果
Table 7. Verification test results of the best process

序号	姜酮 (mg/g)	6-姜酚 (mg/g)	8-姜酚 (mg/g)	10-姜酚 (mg/g)	综合评分
1	0.427 9	12.159 8	3.175	6.826 6	0.985 9
2	0.428	12.16	3.174	6.825	0.982 54
3	0.427 8	12.1596	3.176	6.828	0.975 16
平均值	0.427 9	12.1598	3.175	6.826 5	0.981 2
RSD (%)	0.02	0.01	0.05	0.03	0.56

3 讨论

干姜的化学成分主要包括挥发油、姜辣素类及二苯基庚烷类等^[12]。其中, 姜辣素类作为关键功能成分, 依据其侧链结构差异可进一步分为姜酚类、姜烯酚类和姜酮类等^[13]。在姜辣素类成分中, 以6-姜酚、8-姜酚和10-姜酚为代表的姜酚类物质被认为是干姜最主要的生物活性组分。基于干姜的化学成分特征及其核心药理活性, 本研究确定姜酮、6-姜酚、8-姜酚和10-姜酚为其质量标志物^[11]。

现代药理学研究表明, 上述成分具有广泛的药理活性。6-姜酚可通过阻断核因子-κB通路发挥抗炎镇痛作用, 并能诱导癌细胞凋亡、增强胰岛素敏感性^[14]; 8-姜酚可抑制炎症介质生成, 调节细胞周期以抑制肿瘤生长, 同时改善脂质代谢^[15]; 10-姜酚则能促进软骨蛋白聚糖、糖胺聚糖和II型胶原纤维的合成, 减缓软骨流失与破坏^[16]; 姜酮具有增强肠黏膜屏障功能以抵抗炎症、抑制血小板活化及促进血管舒张的作用, 有助于预防血栓形成^[17]。此外, 干姜所含的多酚类物质, 特别是二苯基庚烷类化合物, 因其分子结构中含

有酚羟基等还原性基团，表现出显著的抗氧化活性，并在抗炎、抗菌、抗病毒及抗肿瘤等方面显示出潜在药理价值^[18]。

在姜炭炮制工艺研究中，本研究基于前期预试验结果，选定炒制温度、炒制时间和切片厚度作为关键考察因素，以排除其他不确定性因素的干扰，该思路与炮制工艺优化的研究目标一致^[19]。通过系统试验设计与化学计量学分析，科学揭示了各指标成分与姜炭“炒炭存性”之间的内在联系。单因素试验结果表明，各成分含量随炒制强度的变化呈现规律性变化：姜酚类成分（6-姜酚、8-姜酚、10-姜酚）总体呈下降趋势，反映其在高温作用下通过脱水反应转化为相应姜烯酚类化合物；而姜酮含量则呈现先升后降的趋势，提示其作为姜酚类热转化产物的动态积累与后续降解过程。上述成分的动态变化揭示了“炒炭存性”的本质，即在于实现药效成分保留与转化的最佳平衡。

为更科学、客观地评价工艺，本研究综合运用AHP、EWM与Box-Behnken响应面法的优势，采用AHP-EWM组合赋权模型确定各指标的综合权重系数^[20]。该方法融合了主观经验判断与客观数据赋权，使权重分配更具科学性与合理性。基于成分转化规律构建的综合评分，成为量化评价“存性”程度的可靠指标。通过Box-Behnken响应面法在炒制温度、时间与切片厚度的多维工艺参数空间中进行优化，最终确定最佳工艺条件为：炒制温度220℃、炒制时间9 min、切片厚度4 mm。在此工艺条件下所得姜炭样品的外观性状（表面焦黑、内部棕褐）与传统“炒炭存性”的经验标准高度一致。

本研究通过阐明成分动态转化规律，建立量化评价模型，并实现工艺精准优化，将“炒炭存性”的传统经验转化为基于化学物质基础的现代科学标准。研究结果为姜炭炮制工艺的标准化与质量控制提供了可靠依据，对促进干姜资源的深度开发与利用具有重要意义。

参考文献

- 1 中国药典 2025年版.一部 [S]. 2025: 16.
- 2 李时珍,著.本草纲目(校点本)[M].北京:人民卫生出版社,1982: 867.
- 3 张廷模,主编.临床中药学[M].上海:上海科学技术出版社,2012: 234.
- 4 周逸群,吴萍,唐宇,等.炒炭炮制对干姜质量控制、化学成分和药理作用的影响[J].数字中医药(英文版),2023,6(3): 341–356. [Zhou YQ, Wu P, Tang Y, et al. Effects of carbonization processing on quality control, chemical compositions, and pharmacological mechanism of Ganjiang (Zingiberis Rhizoma)[J]. Digital Chinese Medicine, 2023, 6(3): 341–356.] DOI: 10.1016/j.dcm.2023.10.009.
- 5 黄宇婷,孙悦,孟江,等.姜炭炮制前后饮片差异质量标志物研究[J].中国中药杂志,2022,47(7): 1765–1775. [Huang YT, Sun Y, Meng J, et al. Quality markers of Zingiberis Rhizoma Carbonisata before and after processing[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2022, 47(7): 1765–1775.] DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20220120.201.
- 6 王孝涛,叶定江,主编.历代中药炮制法汇典(现代部分)[M].南昌:江西科学技术出版社,1998: 201.
- 7 叶定江,主编.中药炮制学[M].北京:人民卫生出版社,2011: 176.
- 8 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. [Chen DY, Wang YT, Pan L, et al. Analysis on the correlation between index composition and powder color during processing of carbonized ginger[J]. Chinese Journal of Pharmaceutical Analysis, 2023, 43(10): 1800–1810.] DOI: 10.16155/j.0254-1793.2023.10.19.
- 9 江瑜.基于“生熟异治”质量标志物的干姜、炮姜质量控制研究[D].合肥:安徽中医药大学,2021. DOI: 10.26922/d.cnki.ganzc.2021.000196.
- 10 高伟城,王小平,沈晓华,等.不同干姜炮制品姜酚类成分含量的研究[J].中医临床研究,2020,12(34): 22–25. [Gao WC, Wang XP, Shen XH, et al. A quantitative analysis of the different contents of gingerols in different processed Zingiberis Rhizoma[J]. Clinical Journal of Chinese Medicine, 2020, 12(34): 22–25.] DOI: 10.3969/j.issn.1674-7860.2020.34.007.
- 11 李申澳,余卫东,许寅,等.生姜与干姜的化学成分、药理作用、处方应用研究进展及其质量标志物预测分析[J].中国中药杂志,2025,50(2): 5641–5657. [Li SA, Yu WD, Xu Y, et al. Research progress on chemical constituents, pharmacological effects, and prescription application of Zingiberis Rhizoma Recens and Zingiberis Rhizoma and prediction of their quality markers[J]. China Journal of Chinese Materia Medica, 2025, 50(2): 5641–5657.] DOI: 10.19540/j.cnki.cjcm.20250603.203.
- 12 吴萍,蒯梦妮,李乐,等.干姜化学成分和药理作用研究进展[J].亚太传统医药,2024,20(11): 242–246. [Wu P, Kuai MN, Li L, et al. Research progress on chemical constituents and pharmacological effects of dried ginger[J]. Asia-Pacific Traditional Medicine, 2024, 20(11): 242–246.] DOI: 10.11954/ytctyy.202411048.
- 13 李承哲,彭成,周勤梅,等.山姜属二苯基庚烷类化合物及其生物活性研究进展[J].成都中医药大学学报,2023,46(5): 57–65. [Li CZ, Peng C, Zhou QM, et al. Research progress on diarylheptanoids of Alpinia genus and their biological activity[J].

Journal of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2023, 46(5): 57–65.] DOI: 10.13593/j.cnki.51-1501/r.2023.05.057.

14 闵瑞雪 . 6-姜酚生理功能及其作用机制的研究进展 [A]// 第十四届亚洲营养大会亚洲营养学会联合会 [C]. 2023: 208. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2023.076178.

15 张晓平, 邵骏菁, 马大龙, 等. 天然药物抗肿瘤活性成分及其作用机制研究进展 [J]. 药学学报, 2019, 54(11): 1949–1957. [Zhang XP, Shao JJ, Ma DL, et al. Research on antitumor active components and mechanisms of natural products[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2019, 54(11): 1949–1957.] DOI: 10.16438/j.0513-4870.2019-0669.

16 孙晨皓 . 10-姜酚通过 Keap1–Nrf2–ARE 信号通路延缓骨关节炎进展的研究 [D]. 江苏扬州 : 扬州大学, 2023. DOI: 10.27441/d.cnki.gyzdu.2023.000818.

17 卢萌, 庄艳, 郑松柏 . 肠黏膜屏障老化研究进展 [J]. 国际老年医学杂志, 2016, 37(4): 180–185, 193. [Lu M, Zhuang Y, Zheng SB. Research advances in aging of intestinal mucosal barrier[J]. International Journal of Geriatrics, 2016, 37(4): 180–185, 193.] DOI: 10.3969/j.issn.1674-7593.2016.04.011.

18 杨秀娟, 王佳佳, 郭晶晶, 等. 生姜、干姜、炮姜的性效考证及其化学成分、药理活性的研究进展 [J]. 中药新药与临床药理, 2024, 35(4): 595–605. [Yang XJ, Wang JJ, Guo JJ, et al. Research progress of medicinal properties and efficacy, chemical composition and pharmacological activity of Zingiberis Rhizoma Recens, Zingiberis Rhizoma and Zingiberis Rhizoma Praeparatum[J]. Traditional Chinese Drug Research and Clinical Pharmacology, 2024, 35(4): 595–605.] DOI: 10.19378/j.issn.1003-9783.2024.04.018.

19 高学侠, 武子锋, 胡中盛, 等. 探索传统工艺与新一代信息技术相结合的姜炭炮制工艺 [J]. 电子元器件与信息技术, 2022, 6(6): 5–8. [Gao XX, Wu ZF, Hu ZS, et al. Exploring the processing technology of ginger charcoal combined with traditional technology and new generation of information technology[J]. Electronic Components and Information Technology, 2022, 6(6): 5–8.] DOI: 10.19772/j.cnki.2096-4455.2022.6.002.

20 王慧楠, 张桂梅, 杨子烨, 等. 多信息 G1–熵权组合赋权法优选醋当归炮制工艺 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(7): 1254–1259. [Wang HN, Zhang GM, Yang ZY, et al. Optimization of processing technology of Angelicae Sinensis Radix with vinegar based on multi-information G1–entropy combined weighting method[J]. Modern Chinese Medicine, 2021, 23(7): 1254–1259.] DOI: 10.13313/j.issn.1673-4890.20200901002.

收稿日期: 2025 年 08 月 30 日 修回日期: 2025 年 11 月 05 日

本文编辑: 钟巧妮 李阳