

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 (20232BBG70013)

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“姜块煨炭存性”, 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: Synchronis C₁₈ 柱 (150 mm \times 4.6 mm, 5 μ m); 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 $^{\circ}$ C, 进样量: 20 μ L^[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, 摇匀, 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,摇匀,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,摇匀,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。

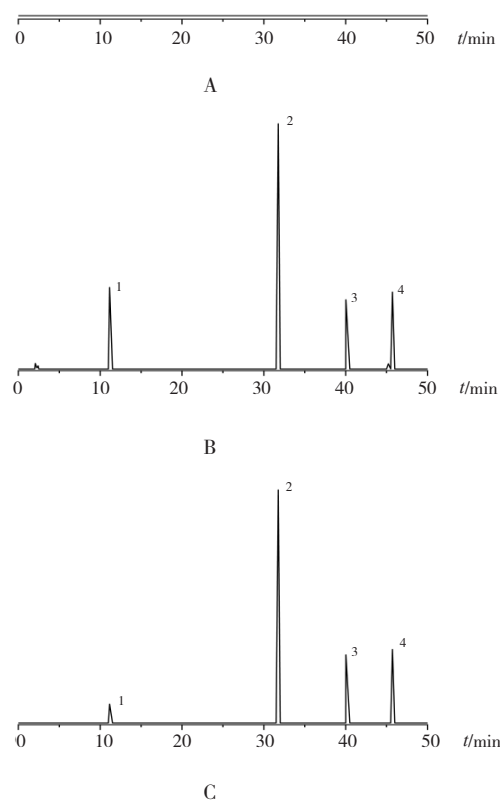


图1 HPLC 色谱图

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 , μg/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(μg/mL)
姜酮	$Y=22\ 805X-4.724\ 1$	0.999 9	2.250~72.000
6-姜酚	$Y=11\ 158X-10.754\ 0$	1.000 0	13.750~440.000
8-姜酚	$Y=9\ 974.8X-8.994\ 2$	0.999 9	4.375~140.000
10-姜酚	$Y=9\ 369.4X-8.816\ 5$	0.999 9	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 mg/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 mg/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 mg/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^[11]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。

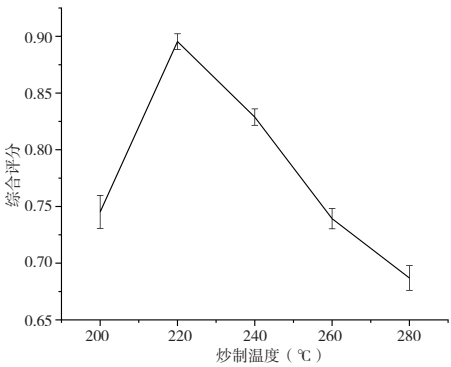


图2 炒制温度对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)

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

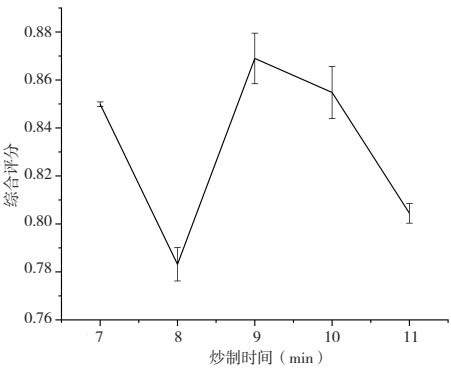


图3 炒制时间对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)

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。

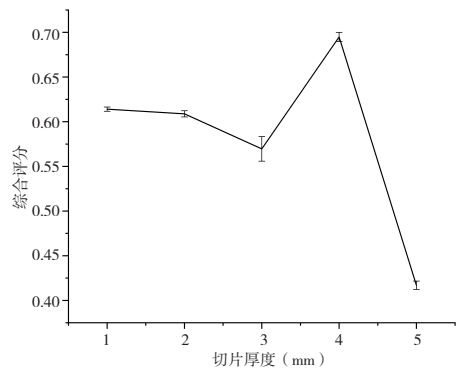


图4 切片厚度对姜炭指标综合评分的影响 (n=3)
Figure 4. Effect of slice thickness on the comprehensive score of the ginger charcoal index (n=3)

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： $Y=0.969-0.005A-0.013\ 6B-0.000\ 4C-0.015\ 5AB-0.000\ 1AC+0.004\ 1BC-0.098\ 6A^2-0.275\ 1B^2-0.013\ 5C^2$ 。方差分析结果见表 6。模型整体 $P<0.000\ 1$ ，表明回归模型具有高度显著性；失拟项 $P=0.250\ 0\ (>0.05)$ ，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℃、炒制时间 9.01 min、切片厚度 4.13 mm，此时综合评分预测值为 0.970 2。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℃、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℃、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 0.981 2，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 (℃)	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 (℃)	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	0.443 7	12.186 3	3.274 4	6.128 8	0.973 7
2	200	8	4	0.157 6	8.083 4	2.266 7	3.783 7	0.594 9
3	220	10	5	0.346 6	8.791 1	2.266 5	3.469 0	0.668 3
4	200	9	5	0.257 1	11.164 7	3.026 3	5.870 7	0.851 5
5	220	10	3	0.183 8	8.091 9	2.403 5	4.696 1	0.649 5
6	220	8	3	0.263 4	8.601 0	2.517 4	4.713 8	0.700 7
7	240	10	4	0.194 1	7.800 7	2.138 4	3.113 7	0.564 7
8	220	8	5	0.260 9	8.475 9	2.681 2	4.546 9	0.703 1
9	220	9	4	0.424 8	12.183 5	3.261 7	5.964 3	0.959 8
10	220	9	4	0.416 7	12.165 8	3.164 9	6.119 8	0.954 7
11	200	10	4	0.159 8	8.141 1	2.610 4	3.525 1	0.614 6
12	220	9	4	0.443 5	12.135 3	3.259 0	6.121 6	0.970 8
13	220	9	4	0.427 9	12.159 8	3.175 0	6.826 6	0.985 9
14	200	9	3	0.249 2	10.824 7	3.140 1	6.267 8	0.863 5
15	240	9	5	0.423 3	10.646 9	3.054 0	4.601 6	0.850 1
16	240	9	3	0.386 9	10.397 2	3.102 4	5.350 6	0.862 6
17	240	8	4	0.242 6	8.011 9	2.126 9	3.659 1	0.607 0

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
A ²	0.040 9	1	0.040 9	188.29	<0.000 1
B ²	0.318 7	1	0.318 7	1 466.44	<0.000 1
C ²	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			

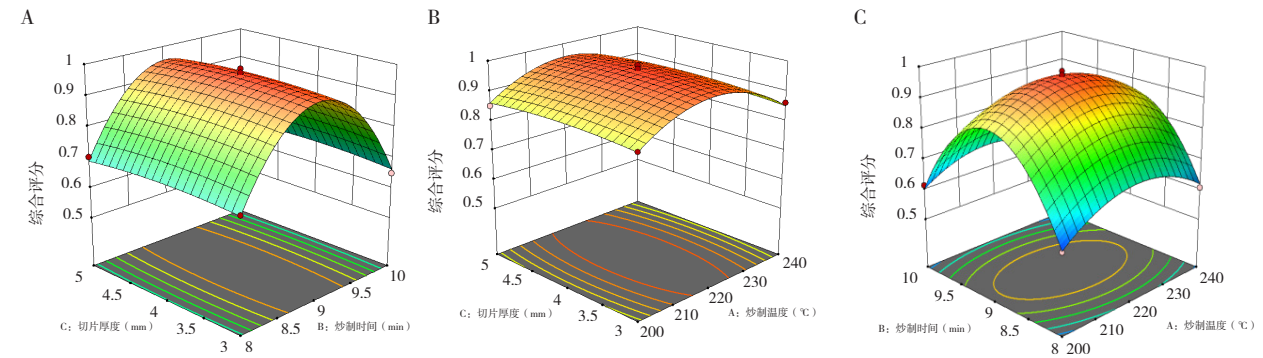


图5 各因素交互作用对姜炭综合评分影响的响应面图

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](https://doi.org/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.cjmm.20220120.201](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjmm.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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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.cjmm.20250603.203](https://doi.org/10.19540/j.cnki.cjmm.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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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](https://doi.org/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