

姜黄提取液喷雾干燥工艺优化

曾大洋, 蒋泓鸣, 覃柳娇, 王一垚, 罗渝欢, 李业航, 黄俊善, 陈卫卫*
(广西中医药大学药学院, 广西高校中药制剂共性技术与研发重点实验室, 广西南宁 530200)

摘要: 目的 优化姜黄提取液喷雾干燥工艺。方法 基于质量源于设计(QbD)理念, 通过失效模式与效应分析(FMEA)识别关键工艺参数(CPPs), 2020年版《中国药典》标准确定关键质量属性(CQAs), AHP-CRITIC混合加权法建立综合评分模型, 在单因素试验、全因子设计、最陡爬坡试验基础上根据星点设计-响应面法优化喷雾干燥工艺, 构建数学模型及设计空间。结果 最优设计空间为药液相对密度1.01~1.02, 进风温度166~168℃, 关键质量属性综合评分RSD<3%。结论 姜黄提取液喷雾干燥工艺设计空间可靠, 工艺稳定, 可为姜黄相关制剂的产业化生产提供参考。
关键词: 姜黄提取液; 喷雾干燥工艺; AHP-CRITIC混合加权法; 星点设计-响应面法; 设计空间; 质量源于设计(QbD)

中图分类号: R943 文献标志码: A 文章编号: 1001-1528(2026)03-0960-06
doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2026.03.035

姜黄是姜科植物姜黄 *Curcuma longa* L. 的干燥根茎, 已收载于2020年版《中国药典》和《广西壮族自治区壮药质量标准》^[1-2], 具有活血行气、通经止痛功效^[1]。现代研究证实, 姜黄具有抗凝、调脂、抗炎、抗肿瘤等药理活性^[3-6], 主要活性成分姜黄素药理作用多样, 但稳定性差、水溶性低限制了其应用^[7-9]。

传统的喷雾干燥工艺参数大多依赖经验调整, 缺乏对关键质量属性(CQAs)的系统控制, 易导致得率波动、成分降解及批次不均一。质量源于设计(QbD)理念通过风险评估来确定关键工艺参数(CPPs)与CQAs的关联, 并借助实验设计建立数学模型, 从而实现精准调控。因此, 本研究基于QbD理念, 通过识别CQAs结合单因素试验、全因子设计、最陡爬坡试验、星点设计-响应面法来解析CPPs交互作用, 建立姜黄提取液喷雾干燥工艺设计空间, 不仅为姜黄相关制剂中间体的产业化提供可复制的优化策略, 也为其他中药喷雾干燥工艺从“经验试错”向“数据驱动”转型提供理论支撑, 契合《“十四五”中医药发展规划》“推动中药生产工艺标准化与质量控制智能化”的战略需求。

1 材料

1.1 仪器 LC-2030 Plus 高效液相色谱仪(日本岛津公司); ML204T/02 电子天平[梅特勒-托利

多仪器(上海)有限公司]; PTHW 电热套(郑州长城科工贸有限公司); KQ-800DE 数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); 101-2 电热鼓风干燥箱(北京科伟永兴仪器有限公司); SHB-B95 循环水式多用真空泵(郑州长城科工贸有限公司); Mobile Minor 试验型喷雾干燥器(丹麦 GEA Niro 公司)。

1.2 试剂与药材 姜黄素对照品(批号 MUST-24011008, 纯度 99.69%) 购自成都曼思特生物科技有限公司。姜黄饮片购自玉林市中药材市场, 经广西中医药大学宁小清正高级实验师鉴定为正品, 符合2025年版《中国药典》一部相关质量标准要求。乙腈(批号 F22M78B202)、甲醇(批号 F24O9J204)均为分析纯, 购自赛默飞世尔科技(中国)有限公司; 磷酸(批号 C11983922)为分析纯, 购自上海麦克林生化科技有限公司; 水为超纯水。

2 方法与结果

2.1 药液制备 取药材 200 g, 加入 10 倍量水, 浸泡 30 min, 回流提取 1.5 h, 过滤, 再加入 10 倍量水, 回流提取 1.5 h, 过滤, 合并 2 次滤液, 浓缩至所需相对密度, 即得。

2.2 得粉率测定 取“2.1”项下药液 2 g, 置于快速水分测定仪中, 在 105℃下加热, 当其质量在

收稿日期: 2025-08-17

基金项目: 广西研究生创新计划项目/2023年广西学位与研究生教育改革课题(JGY2023179)

作者简介: 曾大洋(2002—), 男, 硕士在读, 从事药物新剂型、新制剂研发工作。E-mail: 710521059@qq.com

* 通信作者: 陈卫卫(1969—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 从事药物新剂型、新制剂研发工作。E-mail: weiweichen2012@sina.com

60 s 内不再变化时记录最终质量，计算固含量，公式为固含量 = (干燥后药液剩余质量/干燥前药液质量) × 100%，再计算得粉率，公式^[10]为得粉率 = [粉末质量 / (固含量 × 药液质量)] × 100%。

2.3 含水量测定 取喷雾干燥药材粉末 2 g，置于快速水分测定仪中，在 105 ℃ 下加热，当含水量在 60 s 内不再变化时记录含水量^[11]。

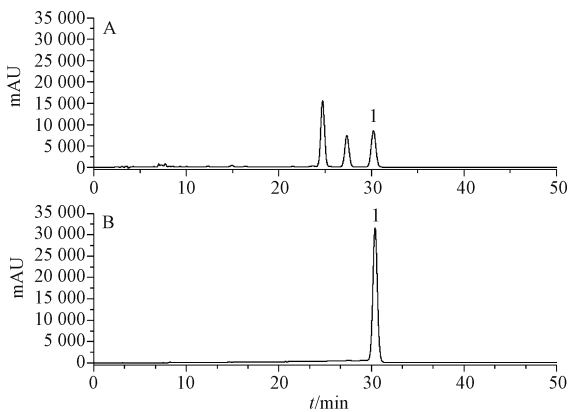
2.4 姜黄素含量测定 采用 HPLC 法。

2.4.1 色谱条件与系统适应性考察 Inertsil ODS-3 色谱柱 (4.6 mm × 260 mm, 5 μm)；流动相乙腈-甲醇-0.1% 磷酸 (36 : 18 : 46)；体积流量 0.8 mL/min；柱温 35 ℃；检测波长 428 nm；进样量 10 μL。

2.4.2 对照品溶液制备 精密称取姜黄素对照品适量，95% 乙醇溶解，制成质量浓度为 0.014 mg/mL 的溶液，摇匀，即得。

2.4.3 供试品溶液制备 取喷雾干燥药材粉末约 0.200 0 g，置于锥形瓶中，加入 10 mL 95% 乙醇，超声处理 30 min 溶解，取 1 mL，稀释至 5 mL，离心，取上清液，0.45 μm 微孔滤膜过滤，即得。

2.4.4 专属性试验 精密吸取对照品、供试品溶液各 10 μL，在“2.4.1”项色谱条件下进样测定，结果见图 1。



注：A、B 分别为供试品、对照品。

1. 姜黄素

图 1 姜黄素 HPLC 色谱图

2.4.5 线性关系考察 按“2.4.2”项下方法制备对照品溶液，分别精密吸取 0.25、1、2、3、4、5 mL，50% 甲醇定容至 5 mL 量瓶中，在“2.4.1”项色谱条件下进样测定。以对照品质量浓度为横坐标 (X)，峰面积为纵坐标 (Y) 进行回归，得方程为 $Y = 98\ 712\ 083.067\ 093X - 4\ 364.157\ 827$ ($r = 0.999\ 9$)，在 0.000 7~0.014 mg/mL 范围内线性关系良好。

2.4.6 精密度试验 精密吸取同一份对照品溶液，在“2.4.1”项色谱条件下进样测定 6 次，测得姜黄素峰面积 RSD 为 0.58%，结果表明仪器精密度良好。

2.4.7 重复性试验 按“2.4.3”项下方法平行制备 6 份供试品溶液，在“2.4.1”项色谱条件下进样测定，测得姜黄素含量 RSD 为 1.83%，表明该方法重复性良好。

2.4.8 稳定性试验 按“2.4.3”项下方法制备供试品溶液，室温下于 0、2、4、8、16、24 h 在“2.4.1”项色谱条件下进样测定，测得姜黄素含量 RSD 为 0.59%，表明溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.4.9 加样回收率试验 精密吸取姜黄素含量已知的供试品溶液 6 份，每份 0.5 mL，精密加入等量对照品溶液，按“2.4.3”项下方法制备供试品溶液，在“2.4.1”项色谱条件下进样测定，计算回收率。结果，姜黄素平均加样回收率为 105.34%，RSD 为 2.04%。

2.5 关键质量属性 (CQAs) 确定 本实验参照 2020 年版《中国药典》和文献 [12-13] 报道，最终确定得粉率、姜黄素含量、含水量作为 CQAs。

2.6 关键工艺参数 (CPPs) 确定 本实验基于鱼骨图，见图 2，通过失效模式与效应分析 (FMEA) 对喷雾干燥风险因素进行 RPN (公式为 $RPN = S \times O \times D$) 定量评估，细则见表 1，结果见表 2，最终确定进风温度、药液相对密度、进料泵转速作为 CPPs。

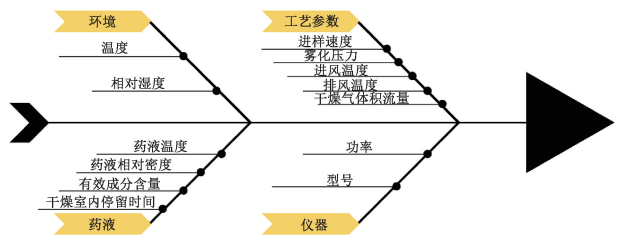


图 2 喷雾干燥风险因素鱼骨图

2.7 权重系数确定

2.7.1 AHP 法 各 CQAs 重要性排序依次为得粉率 > 姜黄素含量 > 含水量，建立判断矩阵，见表 3。再采用 SPSSAU 数据科学分析平台 (<https://spssau.com/index.html>)^[14] 分析结果，得到权重系数分别为得粉率 76.06%、姜黄素含量 15.76%、含水量 8.16%，CR 值为 0.001 < 0.1，印证了权重分配的有效性。

表 1 风险评估细则

参数	评分细则		
	1	2	3
S	影响不显著或不影响	对产品质量造成小的影响	对产品质量产生严重影响
O	失败的概率很低	失败的概率中等	失败的概率很高
D	容易检测到失败	一般能检测到失败	不容易检测到失败

表 2 风险评估结果

风险来源	参数	S	O	D	RPN	依据
药液	药液温度	2	1	2	4	药液可控性强,对喷雾干燥粉末得率及粉末有效成分含量影响大,风险高
	药液相对密度	3	3	2	18	
	有效成分含量	3	3	1	9	
	干燥室内停留时间	2	1	1	2	
工艺参数	进风温度	3	2	2	12	工艺参数可控性强,对最终喷雾干燥粉末得率及粉末有效成分含量、粉末含水量影响大,风险高
	排风温度	3	1	2	6	
	进样速度	3	2	2	12	
	雾化压力	3	1	1	3	
	干燥气体积流量	2	1	2	4	
环境	温度	1	1	1	1	进行实验的场所为符合 GMP 标准的实验室,环境温度、相对湿度变化不大,风险低
	相对湿度	1	1	2	2	
仪器	型号	3	2	1	6	使用固定设备,风险低
	功率	3	2	1	6	

表 3 各 CQAs 判断矩阵

CQAs	含水量	姜黄素含量	得粉率
含水量	1	0.5	0.111 1
姜黄素含量	2	1	0.2
得粉率	9	5	1

2.7.2 CRITIC 法 采用 SPSSAU 数据科学分析平台导入相关数据并进行归一化处理,公式为归一化值=[(实测值-最小值)/(最大值-最小值)]×100,再计算其权重值^[15]。

2.7.3 AHP-CRITIC 混合加权法 AHP 法作为主观赋权法,其权重结果依赖于决策者的认知判断,易受主观因素影响;CRITIC 法作为客观赋权法,其权重源于指标数据本身的对比强度和冲突性,但未能直接体现决策者对各指标相对重要性的主观偏好,故本实验将两者结合,它相较于单一赋权法能更有效地降低赋权偏差,提升权重分配区分度,从而使综合评价结果更具有科学性和合理性^[16-17],权重系数 $W_{AHP-CRITIC}$ 计算公式为 $W_{AHP-CRITIC} = W_{AHPij} \cdot W_{CRITICij} / \sum W_{AHPij} \cdot W_{CRITICij}$ 。

2.8 单因素试验

2.8.1 药液相对密度 固定进风温度 170 °C、进料泵转速 14 r/min,分别考察药液相对密度 1.02、1.04、1.06、1.08、1.1 对得粉率、含水量、姜黄素含量的影响,CRITIC 法所得三者权重分别为 23.11%、45.39%、31.49%,而 AHP-CRITIC 法所得分别为 64.39%、26.20%、9.41%,计算综合评

分,结果见图 3。由此可知,药液相对密度为 1.02 时综合评分最高,故选择其进行全因子设计。

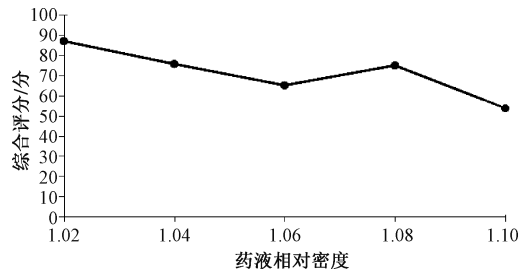


图 3 药液相对密度筛选结果

2.8.2 进风温度 固定药液相对密度 1.02、进料泵转速 14 r/min,分别考察进风温度 160、165、170、175、180 °C 对得粉率、含水量、姜黄素含量的影响,CRITIC 法所得三者权重分别为 21.65%、42.97%、35.38%,AHP-CRITIC 法所得分别为 63.03%、25.92%、11.05%,计算综合评分,结果见图 4。由此可知,进风温度为 165 °C 时综合评分最高,故选择其进行全因子设计。

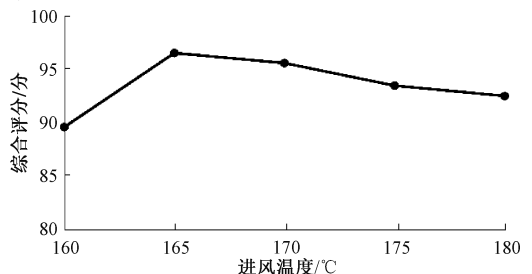


图 4 进风温度筛选结果

2.8.3 进料泵转速 固定药液相对密度 1.02、进风温度 165 ℃，分别考察进料泵转速 10、12、14、16、18 r/min 对得粉率、含水量、姜黄素含量的影响，CRITIC 法所得三者权重分别为 27.49%、39.78%、32.73%，AHP-CRITIC 法所得分别为 70.05%、21.00%、8.95%，计算综合评分，结果见图 5。由此可知，进料泵转速为 16 r/min 时综合评分最高，故选择其进行全因子设计。

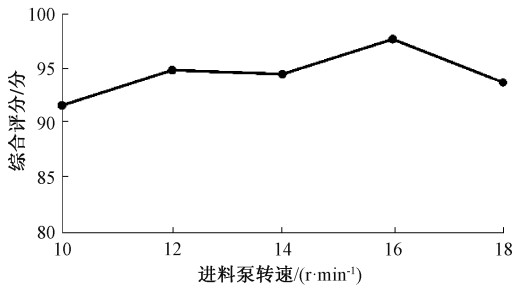


图 5 进料泵转速筛选结果

2.9 全因子设计 在单因素试验基础上，以药液

相对密度 (A)、进风温度 (B)、进料泵转速 (C) 为影响因素进行设计，水平及编码值见表 4，CRITIC 法所得得粉率、姜黄素含量、含水量权重分别为 23.97%、32.84%、43.18%，AHP-CRITIC 法所得分别为 67.70%、19.22%、13.08%，计算综合评分 (Y)，结果见表 5。

表 4 全因子设计水平及编码值

水平	A 药液相对密度	B 进风温度/℃	C 进料泵转速/(r·min ⁻¹)
1	1.04	160	16
-1	1.02	165	18

通过 Design expert 13.0 软件对表 5 数据进行回归，得方程为 $Y=84.34-9.67A+2.89B+1.26C$ ，方差分析见表 6，可知因素 A 有极显著影响 ($P<0.01$)，B、C 无显著影响 ($P>0.05$)。鉴于药液相对密度对实验结果的显著影响，以及进风温度在实际生产中的关键作用，本实验选择两者进行最陡爬坡试验。

表 5 全因子设计结果

试验号	A 药液相对密度	B 进风温度/℃	C 进料泵转速/(r·min ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%	姜黄素含量/(mg·g ⁻¹)	Y 综合评分/分
1	1.02	160	16	68.60	7.49	0.347 9	87.46
2	1.04	160	16	59.79	8.26	0.271 3	75.24
3	1.02	165	16	78.56	9.26	0.405 4	96.34
4	1.04	165	16	58.72	8.29	0.248 1	73.23
5	1.02	160	18	74.19	7.43	0.382 1	93.95
6	1.04	160	18	50.85	7.72	0.282 8	68.76
7	1.02	165	18	79.07	8.51	0.422 7	98.43
8	1.04	165	18	66.80	8.46	0.272 9	81.14

表 6 全因子试验方差分析结果

来源	离均差平方和	自由度	均方	F 值	P 值
模型	828.05	3	276.02	17.87	0.008 8
A	748.55	1	748.55	48.45	0.002 2
B	66.77	1	66.77	4.32	0.106 1
C	12.73	1	12.73	0.824 2	0.415 3
残差	61.80	4	15.45	—	—
总误差	889.85	7	—	—	—

2.10 最陡爬坡试验 由“2.9”项下回归方程可知， $A_{步长} = (1.04-1.02) / 2 = 0.01$ ； $B_{步长} = (2.89/$

$9.67) \times [(165-160) / 2] = 0.74$ ，但实际生产经验显示 $B_{步长}$ 由于仪器精度不足，无法精确执行，故将其调整为设备可实现的 2 ℃，同时保持 $A_{步长}$ 不变，CRITIC 法所得得粉率、姜黄素含量、含水量权重分别为 28.17%、27.67%、44.16%，AHP-CRITIC 法所得分别为 72.90%、14.84%、12.26%，计算综合评分，结果见表 7。由此可知，药液相对密度为 1.01、进风温度时 166 ℃时综合评分最高，故选择作为星点设计-响应面法的中心点。

表 7 最陡爬坡试验设计与结果

试验号	步长	药液相对密度	进风温度/℃	得粉率/%	姜黄素含量/(mg·g ⁻¹)	含水量/%	综合评分/分
1	0	1.04	160	64.73	1.602 6	7.77	82.47
2	0+1△	1.03	162	71.42	1.570 8	7.96	87.95
3	0+2△	1.02	164	68.77	1.788 2	8.26	86.83
4	0+3△	1.01	166	81.09	1.914 3	7.57	99.90
5	0+4△	1.01	168	79.83	1.900 2	7.51	98.76
6	0+5△	1.01	170	77.32	1.872 0	7.69	96.00

2.11 星点设计-响应面法 以药液相对密度 (A)、进风温度 (B) 为影响因素，得粉率 (Y₁)、

姜黄素含量 (Y₂)、含水量 (Y₃) 为评价指标，因素水平见表 8，CRITIC 法所得各评价指标权重分别

为 27.79%、29.73%、42.48%，AHP-CRITIC 法所得分别为 72.17%、15.99%、11.84%，计算综合评分，结果见表 9。

表 8 星点设计-响应面法因素水平

因素	-1.414	-1	0	1	1.414
A 药液相对密度	1.005 86	1.01	1.02	1.03	1.034 14
B 进风温度/℃	163.172	164	166	168	168.828

表 9 星点设计-响应面法设计与结果

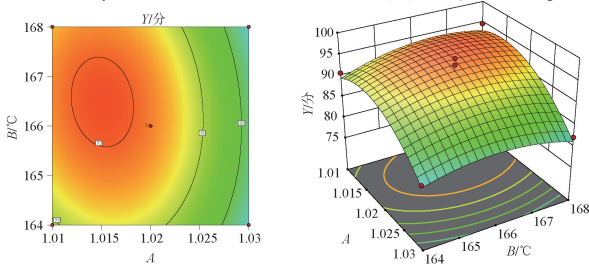
试验号	A 药液相对密度	B 进风温度/℃	Y ₁ 得粉率/%	Y ₂ 姜黄素含量/(mg·g ⁻¹)	Y ₃ 含水量/%	Y 综合评分/分
1	1.01	164	68.59	0.753 9	7.58	90.75
2	1.03	164	61.40	0.677 4	7.90	81.90
3	1.01	168	68.91	0.857 2	6.48	94.62
4	1.03	168	60.15	0.689 8	6.99	82.12
5	1.005 86	166	64.70	0.859 9	7.45	89.08
6	1.034 14	166	55.13	0.643 7	7.34	75.85
7	1.02	163.172	66.08	0.689 5	7.64	87.02
8	1.02	168.828	64.47	0.747 7	6.19	88.77
9	1.02	166	69.95	0.750 7	7.03	92.77
10	1.02	166	69.63	0.752 5	7.10	92.39
11	1.02	166	69.94	0.784 7	7.07	93.34
12	1.02	166	73.82	0.754 7	6.79	97.00
13	1.02	166	72.21	0.756 7	6.76	95.51

通过 Design expert 13.0 软件对表 9 数据进行回归，得方程为 $Y = 94.2 - 5.01A + 0.8217B - 0.9151AB - 5.33A^2 - 2.61B^2$ ，方差分析见表 10。由此可知，模型 $P < 0.01$ ，具有高度显著性；失拟项 $P > 0.05$ ，表明模型拟合良好；因素 A 有极显著影响 ($P < 0.01$)，B 影响不显著 ($P > 0.05$)。

表 10 星点设计-响应面法方差分析结果

来源	离均差平方和	自由度	F 值	P 值
模型	432.59	5	23.13	0.000 3
A	200.58	1	53.63	0.000 2
B	5.40	1	1.44	0.268 5
AB	3.35	1	0.895 7	0.375 5
A ²	197.27	1	52.75	0.000 2
B ²	47.42	1	12.68	0.009 2
残差	26.18	7	—	—
失拟项	10.57	3	0.902 9	0.514 0
纯误差	15.61	4	—	—
总误差	458.77	12	—	—

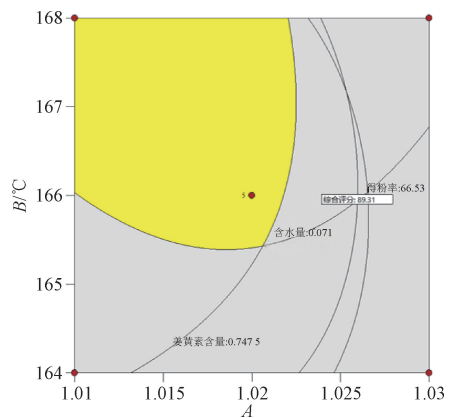
响应面分析见图 6，由此可知，药液相对密度为 1.015、进风温度为 166℃ 时综合评分最高。



注：左图为等高线图，右图为三维曲面图。A、B、Y 分别为药液相对密度、进风温度、综合评分。

图 6 各因素响应面图

2.12 设计空间建立 通过 Design Expert 13 软件进行构建，优化目标设定为得粉率 $> 66.53\%$ ，姜黄素含量 $> 0.7475 \text{ mg/g}$ ，含水量 $< 7.10\%$ ，综合评分 > 89.31 分，即优于星点设计-响应面法所得，以期保证喷雾干燥工艺在生产中的适用性，最终确定为药液相对密度 1.01~1.02，进风温度 166~168℃，设计空间见图 7。于设计空间内外各选取 1 个点平行进行 3 批验证试验，结果见表 11，可知设计空间预测效果良好，工艺稳定可靠。



A、B 分别为药液相对密度、进风温度。

图 7 喷雾干燥工艺设计空间

3 讨论

采用水提取法提取中药时，虽然操作简便，成本较低，但其提取液干燥困难，而且长时间高温干燥易导致成分发生降解^[18-19]。因此，本实验选择喷雾干燥工艺，该技术通过快速干燥能有效减少姜黄素损失^[20]，同时提高姜黄提取物粉末溶解度，

表 11 设计空间验证试验结果 (n=3)

空间位置	药液相对密度	进风温度/℃	得粉率/%	姜黄素含量/(mg·g ⁻¹)	含水量/%	综合评分/分
外部	1.03	164	55.95	0.634 4	7.39	72.41
			56.22	0.632 0	7.56	72.38
			54.35	0.666 4	7.33	71.50
			平均值	0.644 3	7.43	72.20
	RSD/%	1.82	2.98	1.61	0.68	
空间位置	药液相对密度	进风温度/℃	得粉率/%	姜黄素含量/(mg·g ⁻¹)	含水量/%	综合评分/分
内部	1.015	166	77.35	0.897 8	6.42	97.86
			78.91	0.895 5	6.63	98.87
			78.60	0.936 1	6.36	99.71
			平均值	0.909 8	6.47	98.80
	RSD/%	1.05	2.50	2.19	0.94	

延长保存期限。

本实验基于 QbD 理念,采用设计空间优化姜黄提取液喷雾干燥工艺。设计空间是指经证明能持续保证产品质量的 CQAs 与 CPPs 的多维组合及其交互作用范围,该空间内的变动在监管层面不被视为工艺变更,对实际生产具有重要意义。因此,科学构建设计空间可提升产品质量的稳定性和均一性,有助于提高中药制品的整体质量水平^[21]。

全因子试验发现,姜黄素含量偏低,可能是因为使用了不同批次药材,但鉴于本实验核心目的是组内比较以筛选对 CQAs 有显著影响的 CPPs,故该现象不影响筛选结论。最陡爬坡试验发现,药液相对密度降至 1.01 后不再继续降低,其原因为下一梯度将降至 1.00,等同于纯水,考虑到工艺可行性及能源效率,后续实验点序号 4~6 的药液相对密度均固定为可操作的最低值 1.01。

参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 年版四部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.

[2] 广西壮族自治区食品药品监督管理局. 广西壮族自治区壮药质量标准 (第二卷) [S]. 南宁: 广西科学技术出版社, 2008: 18.

[3] 仇 瑜, 张洪兵, 郭 虹, 等. 姜黄的研究进展及质量标志物 (Q-Marker) 的预测分析[J]. 中草药, 2021, 52(15): 4700-4710.

[4] 谯明鸣, 熊 亮, 刘 宇, 等. 姜黄与莪术活血功效差异的物质基础研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2020, 22(7): 2531-2539.

[5] Kim D C, Ku S K, Bae J S. Anticoagulant activities of curcumin and its derivative[J]. *BMB Rep*, 2012, 45(4): 221-226.

[6] Abdel-Lateef E, Mahmoud F, Hammam O, et al. Bioactive chemical constituents of *Curcuma longa* L. rhizomes extract inhibit the growth of human hepatoma cell line (HepG2) [J]. *Acta Pharm*, 2016, 66(3): 387-398.

[7] 田韦韦, 唐碧华, 刘 俐, 等. 姜黄素改善慢性低度炎症及其相关疾病研究进展[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(10):

2607-2618.

[8] Momtazi A A, Sahebkar A. Difluorinated curcumin: a promising curcumin analogue with improved anti-tumor activity and pharmacokinetic profile[J]. *Curr Pharm Des*, 2016, 22(28): 4386-4397.

[9] 王宇航, 张 涵, 张超晶, 等. 姜黄素提取及姜黄素纳米粒的制备及优化[J]. 中国组织工程研究, 2026, 30(2): 362-374.

[10] 谢谭芳, 何结思, 程 哲, 等. 滇桂艾纳香配方颗粒喷雾干燥工艺的优化[J]. 中成药, 2022, 44(5): 1575-1579.

[11] 王 晴, 徐 冰, 王 芬, 等. 桂枝茯苓胶囊内容物吸湿性预测建模研究[J]. 中国中药杂志, 2020, 45(2): 242-249.

[12] 谢 平, 温仁华, 魏海峰, 等. 凉粉草浸膏喷雾干燥工艺优化[J]. 中成药, 2024, 46(2): 556-561.

[13] 陈江平, 梁志毅, 施文婷, 等. 基于质量源于设计理念的麦门冬汤提取液喷雾干燥工艺研究[J]. 广东药科大学学报, 2021, 37(2): 11-17.

[14] 王晓丽, 沈哲苑, 李丽萍, 等. 基于正交试验结合基准关联度和 AHP-熵权法优化经典名方黄连汤提取工艺[J]. 中草药, 2023, 54(15): 4804-4811.

[15] 陆 思, 魏江存, 白 海, 等. 退热解毒合剂提取工艺优化及其质量标准建立[J]. 中成药, 2025, 47(1): 217-222.

[16] 史俊祖, 王雪峰, 武瑞莉, 等. 基于 AHP-CRITIC 结合 Box-Behnken 响应面法优选小儿定喘颗粒的提取工艺[J]. 时珍国医国药, 2023, 34(12): 2928-2932.

[17] 李学娥, 张 蜀, 邓 红, 等. 基于 AHP-CRITIC 法赋权的星点设计-响应面法优化瓜子金乳膏处方及其质量评价[J]. 中国药房, 2020, 31(21): 2615-2621.

[18] 俞一冰, 刘玉红, 左 言, 等. 枇杷叶多糖的提取与纯化、结构特征及生物活性研究进展[J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(2): 105-111.

[19] 张 涵. 昆布多糖的提取分离、结构分析及生物利用度初步研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2024.

[20] 唐培渝, 王学成, 王晓辉, 等. 反应工程法在研究中中药喷雾干燥过程中单液滴干燥行为的应用展望[J]. 中国中药杂志, 2023, 48(22): 6011-6020.

[21] 李培荣, 洪婉婷, 梁浩明, 等. 基于质量源于设计理念的小续命汤提取液喷雾干燥工艺及其物理指纹图谱研究[J]. 广东药科大学学报, 2023, 39(2): 60-66.