

层次分析-响应面法优化九制黄精 超声提取工艺

朱纪洲¹, 郑之恒¹, 谈俊翔², 许 鹏³, 唐德志¹, 李 来^{4,5}, 刘 军^{4,5*}

(1. 江西顺福堂中药饮片有限公司, 江西 吉安 331409; 2. 江西玉箭大健康产业有限公司, 江西 吉安 331409;
3. 峡江县福民农林专业合作社, 江西 吉安 331409; 4. 南昌大学资源与环境学院, 江西 南昌 330031;
5. 鹰潭市特色资源综合利用与智能装备开发重点实验室, 江西 鹰潭 335099)

摘要:采用层次分析-响应面法联用优化九制黄精超声提取工艺,以乙醇体积分数、超声温度、时间、液料比为考察因素,总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮、总氨基酸提取率为评价指标。通过层次分析法确定权重(总多糖 0.502 8,总皂苷 0.260 2,总酚 0.134 4,总黄酮 0.067 8,总氨基酸 0.034 8),计算综合评分后进行 Box-Behnken 设计与响应面分析。建立的二次回归模型极显著, R^2 为 0.962 3。最优条件:乙醇体积分数 2.6%,超声温度 75℃,时间 50 min,液料比 20:1 mL/g,综合评分实测与预测偏差 2.49%。该联用策略实现了多组分协同优化,工艺可行、重复性好,可推广至工业化应用。

关键词:黄精;层次分析法;响应面法;超声提取;综合评分

中图分类号:TS201.1

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2026)S2-0116-08

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.S2.021

Optimization of the ultrasonic extraction process of nine-steamed Polygonatum cyrtonema by combining analytic hierarchy process and response surface methodology

ZHU Ji-zhou¹, ZHENG Zhi-heng¹, TAN Jun-xiang², XU Peng³, TANG De-zhi¹,
LI Lai^{4,5}, LIU Jun^{4,5*}

(1. Jiangxi Shunfutang Traditional Chinese Medicine Decoction Pieces Co., Ltd., Ji'an 331409, China; 2. Jiangxi Yusi Great Health Industry Co., Ltd., Ji'an 331409, China; 3. Xiajiang County Fumin Agriculture and Forestry Professional Cooperative, Ji'an 331409, China; 4. School of Resources and Environment, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 5. Yingtan Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Characteristic Resources and Development of Intelligent Equipment, Yingtan 335099, China)

Abstract: Using analytic hierarchy process-response surface methodology (AHP-RSM) to optimize the ultrasonic extraction process of nine-steamed Polygonatum cyrtonema, the ethanol volume fraction, ultrasonic temperature, extraction time, and liquid-to-solid ratio were taken as investigation factors, and the extraction rates of total polysaccharides, total saponins, total phenols, total flavonoids, and total amino acids were used as evaluation indicators. The weights were determined by AHP (total polysaccharides 0.502 8, total saponins 0.260 2, total phenols 0.134 4, total flavonoids 0.067 8, total amino acids 0.034 8). After calculating the comprehensive score, Box-Behnken design and response surface analysis were performed. The established quadratic regression model was highly significant with an R^2 of 0.962 3. The optimal conditions were determined as follows: ethanol volume fraction of 2.6%, ultrasonic temperature of 75℃, extraction time of 50 min, and liquid-to-solid ratio of 20:1 mL/g. The relative deviation between the measured and predicted comprehensive score was 2.49%. This combined strategy achieved synergistic optimization of multiple components, and the process is feasible, reproducible, and suitable for industrial application.

Key words: polygonatum cyrtonema; analytic hierarchy process; response surface methodology; ultrasonic extraction; comprehensive score

黄精为百合科植物黄精、滇黄精或多花黄精的干燥根茎,具有补气养阴、健脾润肺、益肾填精之功效^[1]。现代研究证实其富含多糖、皂苷、黄酮、酚类

和氨基酸,具有抗氧化、免疫调节、降血糖及抗肿瘤等作用^[2-4]。“九蒸九制”是黄精代表性传统炮制方法,可降低刺激性、增强补益作用^[5]。炮制过程中

收稿日期:2026-04-27;修回日期:2026-06-10

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金-成果转化-乡村振兴项目(20261BDF030016);江西省财政厅“包干制”试点示范项目(ZBG20230428003)

作者简介:朱纪洲(1983-),男,本科,研究方向为中药资源开发及利用,18971434991@163.com;刘军(1989-),男,博士,工程师,研究方向为中药、食品、农产品高质加工技术与装备,通讯联系人,liujun20082914@163.com。

化学成分发生复杂转化:多糖总量下降,部分降解为小分子糖^[6-7];总黄酮与总多酚显著增加^[8-9];皂苷含量先升后稳^[10];多糖分子量及构象亦发生变化^[11-12]。因此,九制黄精的提取工艺优化宜采用多指标综合评分策略。

层次分析法(AHP)可将多指标的主观经验判断转化为客观权重赋值,已在多种中药提取及炮制工艺优化中得到应用^[13-15]。响应面法(RSM)能以较少实验建立高精度预测模型,分析多因素交互作用,是目前中药工艺优化中广泛使用的方法^[16-17]。二者联用可兼顾各活性成分贡献度,获得综合最优提取方案^[18-19]。

本研究以九制黄精为对象,选择乙醇体积分数、超声温度、超声时间和液料比为考察因素,以总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮和总氨基酸的提取率为评价指标,运用 AHP 确定指标权重,再结合 Box - Behnken 响应面法优化超声提取工艺,旨在为九制黄精的综合利用与质量控制提供参考。

1 材料、仪器与试剂

1.1 材料

九制黄精样品由江西顺福堂中药饮片有限公司提供,按传统工艺“九蒸九晒”法制备^[5],经江西省著名中医熊光明主任鉴定为百合科植物多花黄精的九蒸九晒炮制品。样品经切片、干燥、粉碎后过 80 目筛备用。

1.2 仪器及试剂

L8 紫外-可见分光光度计,上海佑科仪器仪表有限公司生产;LC-FA1004 电子分析天平,上海力辰邦西仪器科技有限公司生产;JM-05D-40 液晶单频超声波清洗仪器,广东洁盟超声实业有限公司生产;1500A 多功能粉碎机,永康市红太阳机电有限公司生产;SHS-2 电热恒温水浴锅,黄石市恒丰医疗器械有限公司生产;DF-101S 集热式恒温加热磁力搅拌器,杭州瑞佳精密科学仪器有限公司生产;TG-165 高速台式离心机,湖南沪康离心机有限公司生产;101-3B 电热鼓风干燥箱,绍兴市博特仪器设备有限公司生产。

L-谷氨酸($\geq 99.5\%$)、碳酸钠($\geq 99.9\%$)、亚硝酸钠(99.99%)、水合茛三酮(98%)、硝酸铝九水合物(99.99%)、磷酸盐缓冲液(pH=6.8)、福林酚(BR),没食子酸、人参皂苷 Rb1 和芸香叶苷均为分析对照品,购自上海麦克林生化科技股份有限

公司;葡萄糖、香草醛、氢氧化钠、乙醇、硫酸、乙酸、苯酚和高氯酸均为分析纯,购自西陇科学股份有限公司。

2 实验方法

2.1 对照品和样品制备

精密称取各对照品,分别配制葡萄糖(0.1 mg/mL)、人参皂苷 Rb1(1.0 mg/mL)、没食子酸(0.4 mg/mL)、芸香叶苷(0.4 mg/mL)、L-谷氨酸(0.1 mg/mL)标准溶液,4℃保存。取九制黄精粉末 2.0 g,精密称定,按设定工艺超声提取,过滤定容,即得样品溶液。

2.2 各成分测定方法

总多糖:采用苯酚-硫酸法^[20],以葡萄糖为对照品。精密吸取对照品溶液适量(0、0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mL),加蒸馏水至 2 mL,依次加入 5% 苯酚 1 mL(现配)和浓硫酸 5 mL,摇匀,室温放置 30 min,于 486 nm 处测定吸光度($n=3$)。

总皂苷:采用香草醛-冰醋酸比色法^[21],以人参皂苷 Rb1 为对照品。精密吸取对照品溶液(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 mL),挥干溶剂,加入 5% 香草醛-冰醋酸 0.2 mL(现配)和高氯酸 0.8 mL,摇匀,60℃水浴 15 min,冰浴 2 min,加冰醋酸 5 mL,摇匀,于 568 nm 处测定吸光度($n=3$)。

总酚:采用福林酚法^[22],以没食子酸为对照品。精密吸取对照品溶液(0、20、40、60、80、100、120、140、160 μ L),加蒸馏水 3.2 mL,福林酚试剂 200 μ L,振荡后静置 6 min,加 15% Na_2CO_3 溶液 500 μ L,避光反应 2 h,于 765 nm 处测定吸光度($n=3$)。

总黄酮:采用亚硝酸钠-硝酸铝比色法^[23],以芸香叶苷为对照品。精密吸取对照品溶液(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 mL),加 5% NaNO_2 溶液 0.3 mL,摇匀静置 6 min,加 10% $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$ 溶液 0.3 mL,静置 6 min,加 4% NaOH 溶液 2 mL,再用 50%乙醇定容,静置 15 min,于 510 nm 处测定吸光度($n=3$)。

总氨基酸:采用茛三酮比色法^[24],以 L-谷氨酸为对照品。精密吸取对照品溶液(0、0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mL),加 2%水合茛三酮 7 mL 和磷酸盐缓冲液 2 mL,沸水浴 15 min,冷却后加水定容,于 565 nm 处测定吸光度($n=3$)。

2.3 各成分含量计算

精密吸取待测样品溶液,按“2.2”项下方法测

定,代入各成分的标准曲线回归方程计算质量含量。提取率(Q_d)按式(1)计算。

$$Q_d = (CVE/MD) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为质量含量, $\mu\text{g/mL}$; D 为取样体积, mL ; E 为稀释体积, mL ; V 为提取液总体积, mL ; M 为样品质量, mg 。

2.4 单因素实验

精密称取九制黄精粉末 2.00 g,固定乙醇体积分数 10%、超声温度 50℃、液料比 15:1 mL/g、超声时间 50 min(相应因素除外),分别考察:超声时间(20、30、40、50、60 min);超声温度(40、50、60、70、80℃);液料比(10:1、15:1、20:1、25:1 mL/g);乙醇体积分数(0、10%、20%、30%、40%、50%、60%、70%、80%、90%)。

2.5 响应面实验

根据单因素结果,选取乙醇体积分数(A)、超声温度(B)、超声时间(C)、液料比(D)4个因素,以总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮、总氨基酸提取率及综合评分(S)为评价指标,采用 Box-Behnken 设计四因素三水平响应面实验,共 29 个实验点(含 5 个中心点)^[16,18],优化九制黄精的超声提取工艺。

2.6 综合评分指标权重的确定

2.6.1 AHP 综合评价模型

采用层次分析法确定各指标的权重系数^[13-15]。利用实验数据计算方案层各指标下的比较矩阵,如果超声提取工艺的指标参数在 $[p, q]$ 之间,则为有效值,否则需要对第 i 个方案的第 k 个指标 $\hat{x}_i^{(k)} \notin [p, q]$ 利用式(2)进行调整。

$$x_i^{(k)} = \begin{cases} p, & \hat{x}_i^{(k)} \notin [p, q] \text{ 且为正向指标} \\ q, & \hat{x}_i^{(k)} \notin [p, q] \text{ 且为负向指标} \\ \hat{x}_i^{(k)}, & \hat{x}_i^{(k)} \in [p, q] \\ u - |u - \hat{x}_i^{(k)}|, & \text{中性指标} \end{cases} \quad (2)$$

式中, $x_i^{(k)}$ 为调整后的第 i 个方案的第 k 个指标值, u 为中性指标的最优点。

对调整后的指标参数利用公式(3)进行计算。

$$X_i^k = [x_i^{(k)} - \min(x^{(k)})] / [\max(x^{(k)}) - \min(x^{(k)})] \quad (3)$$

进行归一化后,方案层第 k 个指标下的比较矩阵 $A^{(k)}$ 如式(4)所示。

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} \exp[2\ln 3(X_i^{(k)} - X_j^{(k)})], & \text{参数为正向指标} \\ \exp[2\ln 3(X_j^{(k)} - X_i^{(k)})], & \text{参数为负向指标} \end{cases} \quad (4)$$

根据专家评分构造抉择层指标的比较矩阵。专家比较两两指标之间重要性,评分标准见表 1。

表 1 成对比较的指标量表

重要性	指标描述
1	同等重要
3	前者比后者略微重要
5	前者比后者明显重要
7	前者比后者强烈重要
9	前者比后者极端重要
2,4,6,8	相邻判断的中间值
倒数	若 A 比 B 的重要性为 3,则 B 比 A 的重要性为 1/3

运用公式(5)计算一致性指标 CI 。

$$CI = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (5)$$

式中, $\lambda_{\max}$ 为比较矩阵的最大特征值。

在表 2 中查找对应的平均随机一致性指标 RI ,运用式(6)计算一致性比例 CR 。

$$CR = CI / RI \quad (6)$$

如果 $CR < 0.05$,则可认为判断矩阵的一致性可以接受,否则需要对判断矩阵进行修正。

表 2 随机一致性指标(RI)表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.35	1.46	1.51	1.56

计算方案层第 k 个指标下比较矩阵的最大特征值对应的特征向量 $\gamma^{(k)}$,并用公式(3)对特征向量中的元素进行归一化得到第 k 个指标下各方案的权重 $\Gamma^{(k)}$;计算准则层比较矩阵的最大特征值对应的特征向量 ψ ,并用公式(3)对特征向量中的元素进行归一化得到各指标的权重 Ψ 。

各方案的得分 S 如式(7)所示。

$$S = (\Gamma^{(1)}, \Gamma^{(2)}, \Gamma^{(3)}, \dots, \Gamma^{(n)}) \times \Psi \quad (7)$$

式中, n 为指标个数。

2.6.2 评价模型求解

将九制黄精超声提取工艺优选设为目标层,总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮、总氨基酸为准则层(评价指标),超声时间、温度、乙醇体积分数、液料比为方案层。各指标均为正向指标,有效范围为 $[0, +\infty)$ 。依据各指标在黄精质量评价中的重要性,结合相关文献^[10,25]及专家咨询,确定优先级:总多糖>总皂苷>总酚>总黄酮>总氨基酸。根据多名专家综合评分,得到准则层的比较矩阵,见式(8)。

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 & 6 & 8 \\ 1/2 & 1 & 2 & 4 & 6 \\ 1/4 & 1/2 & 1 & 2 & 4 \\ 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1 & 2 \\ 1/8 & 1/6 & 1/4 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据公式(5)、(6),计算得到一致性比率 $CR = 0.01 < 0.05$,表明比较矩阵 B 具有满意的一致性^[15,26]。经计算,总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮、总氨基酸的权重分别为 0.502 8、0.260 2、0.134 4、0.067 8、0.034 8。

3 结果与分析

3.1 标准曲线

按“2.2”项下方法测定,以质量浓度为横坐标($\mu\text{g}/\text{mL}$),吸光度为纵坐标绘制标准曲线,结果见表 3,各指标成分在线性范围内线性关系良好($R^2 \geq 0.998\ 9$)。

表 3 各指标成分的标准曲线

对照品	回归方程	线性范围/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	R^2
葡萄糖	$y = 0.02837x - 0.01022$	1.25~12.5	0.9993
人参皂苷 Rb1	$y = 0.0039x - 0.00201$	16.39~104.48	0.9994
没食子酸	$y = 0.2568x + 0.08704$	1.02~7.88	0.9993
芸香叶苷	$y = 0.00948x + 0.01596$	4~40	0.9993
L-谷氨酸	$y = 0.6319x + 0.02909$	1~5	0.9989

3.2 精密度、重复性与稳定性考察

精密吸取同一对照品溶液,按各方法连续测定 3 次,总多糖、总皂苷、总酚、总黄酮、总氨基酸的 RSD 依次为 1.93%、2.04%、2.17%、2.69%、2.86% (均 $<3\%$),表明仪器精密度良好。取同一批样品 3 份,平行制备并测定,上述 5 个指标的 RSD 依次为 2.24%、2.48%、2.77%、2.75%、2.89% (均 $<3\%$),表明重复性良好。取同一待测样品溶液,于 0、1、2、3、4 h 测定,5 个指标的 RSD 依次为 2.44%、2.46%、2.74%、2.88%、2.98% (均 $<3\%$),表明样品溶液在 4 h 内稳定。

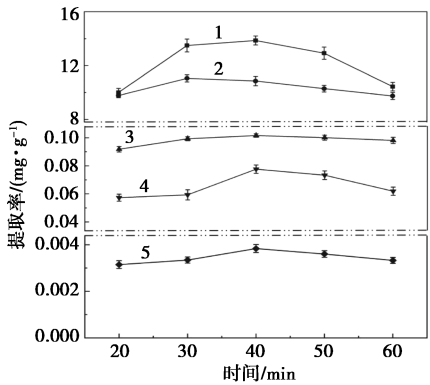
3.3 单因素实验

3.3.1 超声时间

超声时间对各成分提取率的影响见图 1。各成分提取率随超声时间延长先增后减,总多糖、总酚、总黄酮、总氨基酸在 40 min 达峰值,总皂苷在 30 min 达峰值。综合优先顺序,选定 30~50 min 为响应面水平。

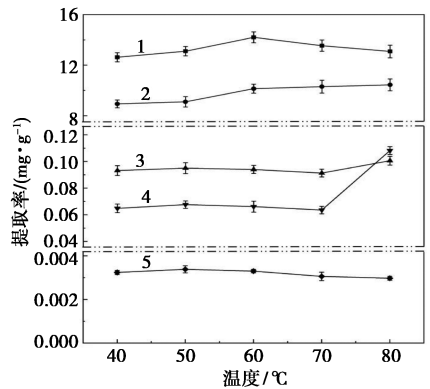
3.3.2 超声温度

超声温度对各成分提取率的影响见图 2。随温度升高,总皂苷缓慢增加;总多糖先增后减(60℃达峰);总酚、总黄酮在 80℃变化显著;总氨基酸先增后减(50℃达峰)。综合考虑,选定 60~80℃为响应面水平。



1—总多糖;2—总皂苷;3—总酚;4—总黄酮;5—总氨基酸

图 1 超声时间对各成分提取率的影响

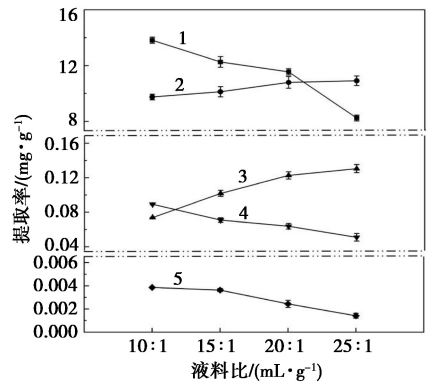


1—总多糖;2—总皂苷;3—总酚;4—总黄酮;5—总氨基酸

图 2 提取温度对各成分提取率的影响

3.3.3 液料比

液料比对各成分提取率的影响见图 3。随液料比增加,总多糖、总黄酮、总氨基酸逐渐减小,总皂苷、总酚逐渐增加。综合选定 10:1~20:1 mL/g 为响应面水平。

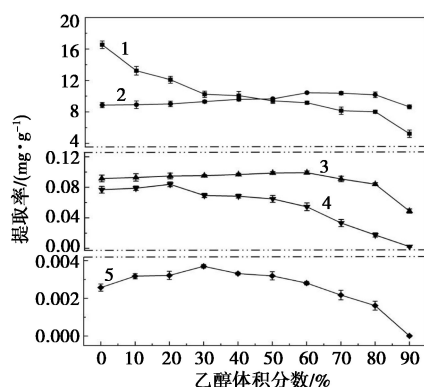


1—总多糖;2—总皂苷;3—总酚;4—总黄酮;5—总氨基酸

图 3 液料比对各成分提取率的影响

3.3.4 乙醇体积分数

乙醇体积分数对各成分提取率的影响见图 4。随乙醇体积分数增加,总多糖逐渐减小;总皂苷、总酚先增后减(60%达峰);总黄酮先增后减(20%达



1—总多糖;2—总皂苷;3—总酚;4—总黄酮;5—总氨基酸

图 4 乙醇体积分数对各成分提取率的影响

峰);总氨基酸先增后减(30%达峰)。综合选定 0~20%为响应面水平。

3.4 响应面实验

3.4.1 实验方案及结果

响应面各因素及水平见表 4,响应面实验方案及结果见表 5。

表 4 响应面因素及水平

水平	因素			
	A/%	B/℃	C/min	D/(mL·g ⁻¹)
-1	0	60	30	10:1
0	10	70	40	15:1
1	20	80	50	20:1

表 5 响应面实验方案及结果

编号	A/%	B/℃	C/min	D/(mL·g ⁻¹)	总多糖/(mg·g ⁻¹)	总皂苷/(mg·g ⁻¹)	总酚/(mg·g ⁻¹)	总黄酮/(mg·g ⁻¹)	总氨基酸/(mg·g ⁻¹)	综合评分
1	10	70	30	10	13.39±0.24	9.87±0.07	0.0735±0.0015	0.0761±0.0041	0.003883±0.000158	0.0167
2	10	60	40	20	14.53±0.22	9.04±0.11	0.1115±0.0012	0.0657±0.0040	0.003071±0.000048	0.0188
3	10	80	40	10	16.22±0.21	9.31±0.15	0.0674±0.0012	0.1040±0.0028	0.003292±0.000141	0.0220
4	10	70	40	15	13.10±0.32	10.08±0.18	0.0981±0.0005	0.0828±0.0009	0.004142±0.000078	0.0186
5	10	80	50	15	16.37±0.37	9.15±0.12	0.0928±0.0010	0.0982±0.0042	0.002967±0.000069	0.0229
6	10	70	50	10	15.02±0.18	11.12±0.24	0.0672±0.0006	0.0816±0.0039	0.003686±0.000232	0.0262
7	10	70	40	15	12.81±0.22	9.67±0.09	0.0976±0.0010	0.0849±0.0010	0.004091±0.000244	0.0169
8	10	80	40	20	15.48±0.17	10.39±0.15	0.1070±0.0009	0.0852±0.0030	0.002641±0.000172	0.0248
9	20	70	40	10	14.16±0.15	11.17±0.19	0.0684±0.0007	0.0834±0.0022	0.003843±0.000121	0.0250
10	20	80	40	15	14.62±0.32	9.28±0.05	0.0964±0.0011	0.1006±0.0018	0.003248±0.000088	0.0193
11	20	60	40	15	13.47±0.37	8.85±0.16	0.0942±0.0015	0.0713±0.0020	0.003594±0.000173	0.0155
12	10	60	40	10	10.67±0.32	8.72±0.09	0.0730±0.0009	0.0687±0.0023	0.003213±0.000178	0.0104
13	10	60	50	15	13.87±0.33	9.08±0.18	0.0953±0.0009	0.0739±0.0035	0.003687±0.000244	0.0167
14	0	60	40	15	13.89±0.35	8.30±0.22	0.0930±0.0008	0.0656±0.0027	0.003694±0.000198	0.0154
15	10	70	40	15	12.32±0.35	10.36±0.07	0.0971±0.0001	0.0862±0.0012	0.003854±0.000229	0.0185
16	10	60	30	15	12.83±0.18	8.57±0.27	0.0859±0.0010	0.0661±0.0021	0.003215±0.000143	0.0134
17	0	70	40	20	17.08±0.27	10.76±0.10	0.1065±0.0009	0.0767±0.0022	0.003225±0.000085	0.0311
18	0	80	40	15	17.38±0.29	8.94±0.12	0.0880±0.0013	0.0920±0.0042	0.003411±0.000072	0.0253
19	0	70	40	10	13.76±0.24	9.62±0.25	0.0715±0.0003	0.0752±0.0014	0.004144±0.000060	0.0167
20	10	70	50	20	16.04±0.33	10.95±0.15	0.1137±0.0008	0.0697±0.0019	0.003241±0.000146	0.0298
21	10	70	40	15	12.81±0.26	10.33±0.17	0.0915±0.0009	0.0888±0.0040	0.004013±0.000265	0.0189
22	10	80	30	15	16.40±0.15	9.99±0.25	0.0936±0.0012	0.0873±0.0018	0.003021±0.000220	0.0247
23	10	70	40	15	12.15±0.29	10.19±0.06	0.0905±0.0007	0.0805±0.0036	0.004114±0.000190	0.0171
24	0	70	50	15	16.23±0.25	10.45±0.10	0.0911±0.0012	0.0747±0.0036	0.003993±0.000222	0.0260
25	10	70	30	20	15.67±0.16	11.19±0.28	0.1077±0.0011	0.0727±0.0031	0.003298±0.000191	0.0302
26	20	70	50	15	14.93±0.39	10.71±0.12	0.0927±0.0011	0.0781±0.0020	0.003749±0.000170	0.0243
27	20	70	30	15	14.04±0.39	10.36±0.07	0.0946±0.0014	0.0765±0.0025	0.003675±0.000247	0.0207
28	0	70	30	15	16.02±0.34	9.65±0.09	0.0946±0.0013	0.0789±0.0025	0.003877±0.000093	0.0228
29	20	70	40	20	13.18±0.38	10.90±0.09	0.1115±0.0009	0.0677±0.0033	0.003421±0.000061	0.0234

3.4.2 模型建立与方差分析

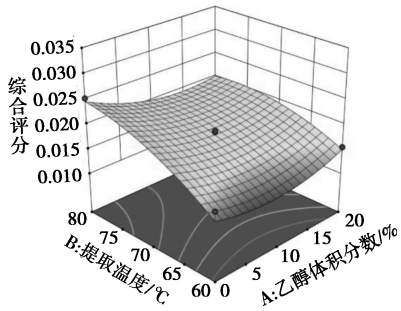
以综合评分为响应值,利用 Design-Expert 13 软件对实验数据进行多元回归拟合,得到二次回归方程($S = -0.155\ 089 + 0.001\ 66A + 0.004\ 462B - 0.001\ 066C + 0.001\ 067D - 0.000\ 015AB + 0.000\ 000\ 8AC - 0.000\ 084D - 0.000\ 013BC - 0.000\ 028BD - 0.000\ 049CD + 0.000\ 024A^2 - 0.000\ 021B^2 + 0.000\ 036C^2 + 0.000\ 146D^2$)。方差分析结果(表 6)显示:模型极显著($P < 0.01$);一次项 B 、 C 、 D ,交互项 AD 、 CD ,以及二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 均极显著($P < 0.01$); A 、 AB 、 AC 、 BC 、 BD 和失拟项不显著($P > 0.05$)。模型回归系数 $R^2 = 0.962\ 3$, $R^2_{\text{adj}} = 0.924\ 5$,表明拟合良好,可用于工艺预测。由 F 值可知,各因素影响顺序为:超声温度>液料比>超声时间>乙醇体积分数。

表 6 响应面二次模型方差分析

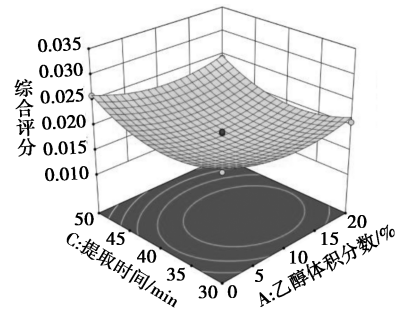
方差来源	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	0.0007	14	0.0001	25.50	<0.0001	极显著
A	6.798×10^{-6}	1	6.798×10^{-6}	3.37	0.0876	不显著
B	0.0002	1	0.0002	99.15	<0.0001	极显著
C	0.0000	1	0.0000	12.32	0.0035	极显著
D	0.0001	1	0.0001	69.80	<0.0001	极显著
AB	9.088×10^{-6}	1	9.088×10^{-6}	4.51	0.0520	不显著
AC	2.585×10^{-8}	1	2.585×10^{-8}	0.0128	0.9115	不显著
AD	0.0001	1	0.0001	31.65	<0.0001	极显著
BC	6.666×10^{-6}	1	6.666×10^{-6}	3.31	0.0905	不显著
BD	7.991×10^{-6}	1	7.991×10^{-6}	3.96	0.0664	不显著
CD	0.0000	1	0.0000	12.03	0.0038	极显著
A^2	0.0000	1	0.0000	18.97	0.0007	极显著
B^2	0.0000	1	0.0000	14.41	0.0020	极显著
C^2	0.0001	1	0.0001	40.66	<0.0001	极显著
D^2	0.0001	1	0.0001	42.59	<0.0001	极显著
残差	0.0000	14	2.016×10^{-6}			
失拟项	0.0000	10	2.473×10^{-6}	2.83	0.1636	不显著
净误差	3.491×10^{-6}	4	8.727×10^{-7}			
总误差	0.0007	28				

3.4.3 交互作用分析

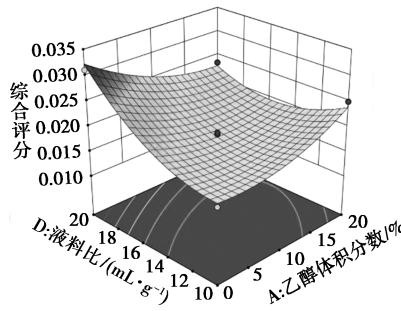
各因素交互作用 3D 响应面图见图 5,响应面愈陡峭,因素间交互作用愈显著。各因素交互作用显著程度次序为 $AD > CD > AB > BD > BC > AC$,其中 AD 和 CD 的协同效应较显著,而 AB 、 BD 、 BC 、 AC 不显著,与方差分析结果一致。



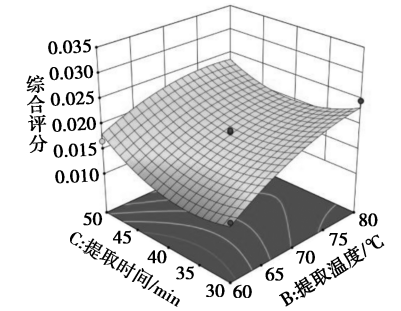
(a) AB 交互作用



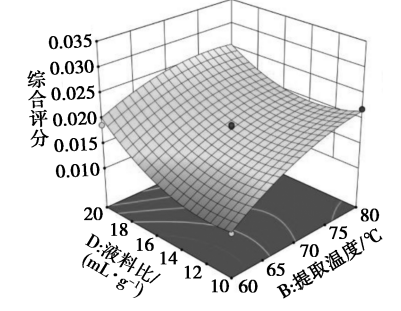
(b) AC 交互作用



(c) AD 交互作用



(d) BC 交互作用



(e) BD 交互作用

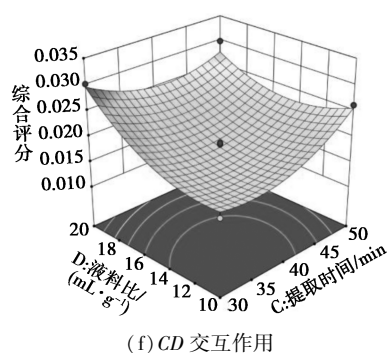


图 5 各因素交互作用 3D 响应面图

3.4.4 工艺验证

最优工艺条件为:乙醇体积分数 2.6%, 超声温度 75℃, 时间 50 min, 液料比 20:1 mL/g, 预测综合评分为 0.032。按此条件进行 3 次平行验证, 实验结果见表 7, 平均综合评分为 0.032 796, 与预测值的相对偏差为 2.49%, 表明模型准确、工艺可行、重复性好, 具备工业化应用潜力。

表 7 超声提取工艺验证 ($n=3$)

序号	总多糖/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总皂苷/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总酚/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总黄酮/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	总氨基酸/ ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	综合 评分
1	17.52	11.50	0.1152	0.0794	0.003509	0.034430
2	17.44	11.39	0.1131	0.0778	0.003416	0.033069
3	17.38	11.14	0.1102	0.0759	0.003395	0.030889
平均值	17.45	11.34	0.1128	0.0777	0.003440	0.032796

4 结论

本研究采用 AHP 与 RSM 联用策略, 系统优化了九制黄精的超声提取工艺。AHP 将多指标评价中的主观经验转化为客观权重, 通过一致性检验保证了权重分配的合理性。结合九制黄精功效特点与活性成分研究基础, 确定总多糖与总皂苷为核心指标(权重合计 76.3%), 总酚与总黄酮次之(合计 20.22%), 总氨基酸权重较低。该分配既反映了各成分的相对重要性, 也兼顾了传统药效与现代药理共识。

在单因素实验基础上, RSM 构建了二次回归模型, 考察了乙醇体积分数、超声温度、时间、液料比对综合评分的影响。方差分析显示模型极显著, 失拟项不显著, 表明所建模型具有良好的拟合度和预测能力。各因素影响程度依次为: 超声温度 > 液料比 > 超声时间 > 乙醇体积分数。超声温度影响最大, 可能与细胞壁破坏、分子扩散及热稳定性有关; 液料比次之, 过大反而稀释目标成分; 超声时间影响较小;

乙醇体积分数影响最小, 可能与九制黄精中活性成分极性分布广、低体积分数乙醇即可有效溶出有关。

交互作用分析表明, 乙醇体积分数与超声温度、超声时间与液料比之间存在显著协同效应, 其他交互项不显著, 说明因素间整体独立性较强, 工艺调控稳定性好。验证实验在最优条件(乙醇体积分数 2.6%, 超声温度 75℃, 时间 50 min, 液料比 20:1 mL/g)下, 平均综合评分为 0.032 796, 与预测值相对偏差仅 2.49%, 证实模型准确、工艺可行、重复性好, 具备工业化应用潜力。

综上, 本研究的 AHP-RSM 联用策略实现了九制黄精多组分的协同提取优化, 克服了单指标或经验权重评价的局限性, 为黄精炮制品的综合利用与质量控制提供了方法学参考。

参考文献

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 一部[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 319-320.
- [2] Cui X, Wang S, Cao H, et al. A review: The bioactivities and pharmacological applications of Polygonatum sibiricum polysaccharides[J]. Molecules, 2018, 23(5): 1170.
- [3] Zhao P, Zhao C, Li X, et al. The genus Polygonatum: A review of ethnopharmacology, phytochemistry and pharmacology[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2018, 214: 274-291.
- [4] Li L, Thakur K, Cao Y, et al. Anticancerous potential of polysaccharides sequentially extracted from Polygonatum cyrtonema Hua in Human cervical cancer Hela cells[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 148: 843-850.
- [5] Liu J, Zhang Z, Huai X, et al. Development and application of the new integrated equipment and process of the Nine-Steam-Nine-Bask method in the processing of Polygonatum cyrtonema[J]. Processes, 2022, 10(6): 1044.
- [6] 杨茂会. 提取方法对黄精多糖的化学组成、结构特征以及生物活性影响研究[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2023.
- [7] 张俊顺, 李煜琪, 罗娟娟, 等. 不同加工方式对黄精主要功能成分影响的研究进展[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-10[2026-04-24]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.045409>.
- [8] 仇国平, 李雯斓, 朱树杰, 等. 蒸制处理对多花黄精原料特性及体外消化特性的影响[J/OL]. 食品工业科技, 1-19[2026-04-24]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025110100>.
- [9] 蒋沂彤, 白璐璐, 翁鸿莹, 等. 九蒸九制过程中黄精主要成分与性状的多元分析及活性变化[J/OL]. 食品工业科技, 1-18[2026-04-24]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2025070358>.
- [10] 郭信东, 袁小凤, 杨昌贵, 等. 黄精酒制后活性成分的变化研究[J]. 时珍国医国药, 2022, 33(6): 1366-1368.
- [11] Wu W, Huang N, Huang J, et al. Effects of the steaming process on the structural properties and immunological activities of polysaccha-

- rides from *Polygonatum cyrtoneura* [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 88: 104866.
- [12] Zhu S, Liu P, Wu W, *et al.* Multi-constituents variation in medicinal crops processing: Investigation of nine cycles of steam-sun drying as the processing method for the rhizome of *Polygonatum cyrtoneura* [J]. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, 2022, 209: 114497.
- [13] 夏提古丽·塔西买买提, 赵媛, 刘艺, 等. 熵权法-层次分析法结合 Box-Behnken 响应面法优化雪莲益肾方的提取工艺 [J]. *中国药房*, 2023, 34(15): 1858-1862.
- [14] 王君怡, 郑敏, 何国华, 等. 层次分析法-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化加味桔梗汤水提醇沉工艺 [J]. *上海中医药杂志*, 2026, 60(3): 71-80, 87.
- [15] 钱宇航, 叶喜德, 冯小龙, 等. 层次分析法-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化姜炭炮制工艺 [J]. *药学前沿*, 2025, 29(11): 1838-1845.
- [16] 赵艳丽, 苏锁财, 李婧媛, 等. AHP-EWM 结合 Box-Behnken 响应面法优化重楼-三七药对的提取工艺 [J]. *中药材*, 2025, 48(8): 2037-2043.
- [17] 廖香莲, 吴新, 陈志元, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化蒲公英多成分提取工艺 [J]. *药物评价研究*, 2026, 49(1): 191-201.
- [18] 石双慧, 王梦琳, 魏晓彤, 等. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选黄精酒制工艺及其炮制前后药效对比研究 [J]. *中草药*, 2023, 54(14): 4467-4480.
- [19] 李冬玉, 翟小婷, 陈家全. AHP-熵权法结合 Box-Behnken 响应面法优化牛耳枫中黄酮和酚酸类化合物的提取工艺及抗氧化活性研究 [J]. *中药材*, 2026, (1): 165-172.
- [20] 钱舒琪, 宋信莉, 龙韦, 等. 响应面法优化黄精多糖超声提取工艺及含量测定 [J]. *贵州科学*, 2025, 43(3): 40-45, 96.
- [21] 戴万生, 毕露露, 邱斌, 等. 黄精总皂苷的提取和含量测定方法研究 [J]. *云南中医中药杂志*, 2023, 44(2): 73-76.
- [22] 韦国兰, 吴超群, 胡秀虹, 等. 黄精总黄酮的提取工艺优化及抗氧化研究 [J]. *广州化工*, 2023, 51(13): 127-130.
- [23] 王佳琪. 林下滇黄精黄酮提取分离、纯化及抗氧化活性研究 [D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023.
- [24] 韦国兰, 龙杰凤, 王翔, 等. 黄精浸膏的制备工艺及有效成分的测定 [J]. *凯里学院学报*, 2025, 43(3): 1-8.
- [25] 黄金月, 崔美岩, 郑时嘉, 等. 响应面优化黄精根茎总皂苷、总黄酮提取方法及其在不同产地黄精成分含量比较中的应用 [J]. *中医药学报*, 2021, 49(9): 56-61.
- [26] 邓庆庆, 王小平, 王亚丽. 层次分析-熵权复合权重法结合 Box-Behnken 响应面优化疏筋解毒方的提取工艺 [J]. *华西药科学杂志*, 2026, 41(1): 55-61. ■

(上接第 115 页)

- [12] 张景富, 肖雨, 何继江, 等. 原儿茶醛对环磷酸腺苷诱导急性肾损伤的保护作用及机制研究 [J]. *药物评价研究*, 2024, 47(6): 1217-1223.
- [13] Liberman A, Mendez N, Trogler C W, *et al.* Synthesis and surface functionalization of silica nanoparticles for nanomedicine [J]. *Surface Science Reports*, 2014, 69(2/3): 132-158.
- [14] 杨世瑜, 肖雨, 安春娜, 等. 原儿茶醛的神经保护作用机制研究进展 [J]. *中草药*, 2024, 55(7): 2463-2471.
- [15] 丁伟宏. 多孔纳米复合材料的构筑及其对蛋白质结合毒素吸附清除性能的研究 [D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [16] Yang P, Gai S, Lin J. Functionalized mesoporous silica materials for controlled drug delivery [J]. *Chemical Society Reviews*, 2012, 41(9): 3679-3698.
- [17] Mao X, Chen K, Zhao Y, *et al.* Bioinspired surface functionalization of biodegradable mesoporous silica nanoparticles for enhanced lubrication and drug release [J]. *Friction*, 2022, 11(7): 1194-1211.
- [18] Xu H J, Wang W, Lee J, *et al.* A type of phenolic compound, hydroxyacetophenone: Tyrosinase inhibition mechanism evaluation by application of biochemical assay and computational molecular dynamics [J]. *Journal of Biomolecular Structure & Dynamics*, 2025, 44(3): 11-13.
- [19] 曾静, 孟令奎, 杨旸, 等. 微型核磁共振波谱仪在药物化学实验教学中的应用 [J]. *药学教育*, 2025, 41(3): 91-95.
- [20] 封海波, 杜夕辉, 黄玲, 等. 介孔二氧化硅纳米颗粒在生物材料的应用研究进展 [J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(1): 26-33.
- [21] Bianca D, Verónica C, María V, *et al.* Natural biopolymers as smart coating materials of mesoporous silica nanoparticles for drug delivery [J]. *Pharmaceutics*, 2023, 15(2): 447.
- [22] Tiburcius S, Krishnan K, Patel V, *et al.* Triple surfactant assisted synthesis of novel core-shell mesoporous silica nanoparticles with high surface area for drug delivery for prostate cancer: Article for masterpiece materials with functional excellence [J]. *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 2022, 95(2): 331-340.
- [23] Croissant G J, Zhang D, Alsaiari S, *et al.* Protein-gold clusters-capped mesoporous silica nanoparticles for high drug loading, autonomous gemcitabine/doxorubicin co-delivery, and in-vivo tumor imaging [J]. *Journal of Controlled Release*, 2016, 229: 183-191.
- [24] Khalbas H A, Albayati M T, Ali S N, *et al.* Drug loading methods and kinetic release models using of mesoporous silica nanoparticles as a drug delivery system: A review [J]. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2024, 50: 261-280. ■