

槐米提取液喷雾干燥工艺优化

王一垚, 曾大洋, 覃柳娇, 罗渝欢, 李业航, 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** 优化槐米提取液喷雾干燥工艺。**方法** 在单因素试验基础上, 以进风温度、提取液相对密度、进料泵转速为影响因素, 芦丁含量、得粉率、含水量的 OD 值为评价指标, Box-Behnken 响应面法结合 AHP-CRITIC 法优化喷雾干燥工艺。再采用粒子群优化算法-反向传播人工神经网络 (PSO-BP-ANN) 进一步优化工艺参数, 以全局搜索能力提升预测精度。**结果** PSO-BP-ANN 优化后, 最佳条件为进风温度 180 ℃, 转速 14 r/min, 提取液相对密度 1.02, OD 值为 95.12, 高于优化前的 92.68。**结论** PSO-BP 神经网络稳定可靠, 应用潜力较大。本实验为槐米提取液喷雾干燥及工业化生产提供了科学依据, 同时为其他中药提取物相关工艺的优化提供了新思路。

关键词: 槐米提取液; 喷雾干燥工艺; Box-Behnken 响应面法; AHP-CRITIC 法; 粒子群优化算法-反向传播神经网络 (PSO-BP-ANN)

中图分类号: R943 文献标志码: A 文章编号: 1001-1528(2026)01-0237-07
doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2026.01.034

槐米为豆科植物槐 *Styphnolobium japonicum* (L.) Schott 的干燥花及花蕾, 富含芦丁 (含量达 40% 以上) 等黄酮类成分, 广西金槐为优质产区, 具有凉血止血、清肝泻火等功效^[1], 其药效源于黄酮、萜类等多成分协同作用^[2], 它所含的芦丁具有抗氧化、抗炎、降血脂等活性, 是 2020 年版《中国药典》其质量评价的关键指标成分, 可作为潜在质量标志物 (Q-marker)^[3]。随着中药配方颗粒及大健康产业发展, 槐米应用前景广阔^[4], 但其热敏性成分 (如芦丁) 在加工中易受温度、pH 等影响而降解, 从而制约产业化。

喷雾干燥技术凭借其瞬时干燥的特性能有效保护热敏成分, 是槐米提取物固化的首选工艺^[5], 但对参数交互作用的考虑不足。近年来, Box-Behnken 响应面法与反向传播人工神经网络 (BP-ANN) 的协同应用为复杂工艺优化提供了新思路, 前者可解析关键参数交互效应, 后者则能实现高精度非线性预测^[6]。因此, 本实验在单因素试验基础上, 采用 Box-Behnken 响应面法结合 AHP-CRITIC 法^[7]优化槐米提取液喷雾干燥工艺, 粒子群优化算法-反向传播人工神经网络 (PSO-BP-ANN)^[8]进一步优化工艺参数, 旨在系统探究该药材中间体制备技术, 为其配方颗粒工业化生产提供技术支撑, 并

为其他药食同源药材的精加工提供可推广范式^[9]。

1 材料

1.1 仪器 LC-2030 Plus 型高效液相色谱仪, 配置紫外检测器、溶剂输送泵、自动进样器柱温箱、LC-Solution 型数据工作站 (日本岛津公司); ML204T/02 型电子天平 [梅特勒-托利多仪器 (上海) 有限公司]; UPH-IV-20TN 型超纯水机 (四川优普超纯科技有限公司); KQ-800DE 型数控超声波清洗器 (昆山市超声仪器有限公司); 98-1-B 型电热套 (天津市泰斯特仪器有限公司)。

1.2 试剂与药材 芦丁对照品 (成都曼思特生物科技有限公司, 批号 MUST-24012304, 纯度 99.44%)。槐米 (广西玉林市玉州区中药材市场) 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》一部要求。乙腈 (色谱纯, 美国 Fisher 公司); 磷酸 (分析纯, 成都金山化学试剂有限公司, 批号 20191218); 甲醇 (分析纯, 四川西陇科学有限公司, 批号 2025010101)。

2 方法与结果

2.1 提取液制备 精密称取药材 200 g, 加入 10 倍量 (2 000 mL) 水浸泡 30 min, 回流提取 2 次, 每次 1.5 h, 过滤, 合并 2 次滤液, 浓缩至合适的密度, 即得。

收稿日期: 2025-06-30

基金项目: 广西壮瑶药重点实验室自主研发课题 (GXZYZZ2022-18)

作者简介: 王一垚 (2001—), 男, 硕士在读, 从事药物新制剂、新剂型研究与开发工作。E-mail: 1085218564@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、新制剂研究与开发工作。E-mail: 630893310@qq.com

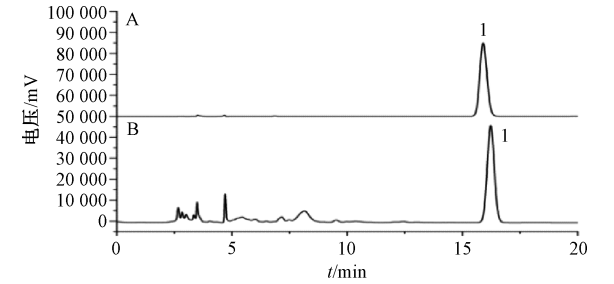
2.2 芦丁含量测定 采用 HPLC 法。

2.2.1 色谱条件 Inertsil ODS-3 色谱柱(250 mm×4.6 mm, 5 μm); 流动相乙腈-0.1% 磷酸 (19 : 81), 洗脱 20 min; 体积流量 0.8 mL/min; 柱温 30 ℃; 检测波长 256 nm; 进样量 10 μL。

2.2.2 对照品溶液制备 精密称取芦丁对照品 4.52 mg, 50% 甲醇定容至 25 mL, 摇匀, 即得 (0.18 mg/mL)。

2.2.3 供试品溶液制备 精密称取药材喷雾干燥粉末 0.1 g, 置于具塞锥形瓶中, 精密加入 25 mL 50% 甲醇, 超声处理 30 min, 冷却至室温, 50% 甲醇补足减失的质量, 吸取 1 mL 至 10 mL 量瓶中定容, 摇匀, 过滤, 即得。

2.2.4 专属性试验 吸取“2.2.2”项下对照品溶液、“2.2.3”项下供试品溶液适量, 在“2.2.1”项色谱条件下进样测定, 结果见图 1。由此可知, 该方法专属性良好。



注: A 为对照品, B 为供试品。
1. 芦丁

图 1 芦丁 HPLC 色谱图

2.3 方法学考察

2.3.1 线性关系考察 分别精密吸取“2.2.2”项下对照品溶液 0.5、1、2、3、4、5 mL, 置于 5 mL 量瓶中, 50% 甲醇定容, 制成质量浓度分别为 0.009、0.036、0.072、0.108、0.145、0.181 mg/mL 的溶液, 在“2.2.1”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 $Y = 22\,991X - 39.347$ ($R^2 = 0.999\,7$), 在 9.04~180.5 mg/mL 范围内线性关系良好。

2.3.2 精密度试验 取芦丁含量已知的对照品溶液适量, 在“2.2.1”项色谱条件下进样测定 6 次, 测得芦丁峰面积 RSD 为 0.41%, 表明仪器精密度良好。

2.3.3 稳定性试验 取供试品溶液适量, 于 0、2、4、6、8、12、24 h 在“2.2.1”项色谱条件下进样测定, 测得芦丁峰面积 RSD 为 1.17%, 表明

溶液在 24 h 内稳定性良好。

2.3.4 重复性试验 取药材喷雾干燥粉末 6 份, 按“2.1.3”项下方法制备供试品溶液, 在“2.2.1”项色谱条件下进样测定 6 次, 测得芦丁峰面积 RSD 为 1.17%, 表明该方法重复性良好。

2.3.5 加样回收率试验 精密称取芦丁含量已知的药材喷雾干燥粉末 6 份, 加入适量对照品, 按“2.1.3”项下方法制备供试品溶液, 在“2.2.1”项色谱条件下进样测定, 计算回收率。结果, 芦丁平均加样回收率为 102.16%, RSD 为 1.97%。

2.4 得粉率测定 取不同相对密度提取液各约 2.0 g, 置于卤素快速水分测定仪中, 在 105 ℃下加热至水分蒸发, 当质量不再变化的时间大于 30 s 时停止加热, 读取最终质量, 计算固含量, 公式为固含量 = (干燥后剩余质量/样品质量) × 100%, 再计算得粉率, 公式为得粉率 = [粉末质量 / (固含量 × 药液体积)] × 100%。

2.5 含水量测定 参照 2025 年版《中国药典》四部通则 0832 水分测定法中的烘干法, 取药材喷雾干燥粉末约 2 g, 精密称定, 平铺于干燥至恒重的量瓶中, 厚度不超过 5 mm, 精密称定质量, 在 105 ℃下开启瓶盖干燥 5 h, 盖上瓶盖, 转移至干燥器中, 放冷 1 h, 精密称定质量, 在上述温度下再干燥 1 h, 重复上述操作至连续 2 次测定结果的差异不超过 5 mg, 根据减失质量来计算含水量。

2.6 单因素试验

2.6.1 进风温度 控制提取液相对密度 1.06 (25 ℃), 进料泵转速 16 r/min, 分别考察进风温度 140、150、160、170、180 ℃对芦丁含量、得粉率和含水量的影响, 结果见表 1。由此可知, 进风温度为 170 ℃时各指标最优。

表 1 进风温度筛选结果

进风温度/℃	芦丁含量/(mg·g ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%
140	130.87	72.58	8.58
150	126.85	72.67	7.25
160	157.47	74.12	6.50
170	155.93	96.80	5.24
180	79.13	88.72	4.89

2.6.2 进料泵转速 控制提取液相对密度 1.06 (25 ℃), 进风温度 170 ℃, 分别考察进料泵转速 10、12、14、16、18 r/min 对芦丁含量、得粉率和含水量的影响, 结果见表 2。由此可知, 转速为 14 r/min 时各指标最优。

2.6.3 提取液相对密度 控制进风温度 170 ℃, 进料泵转速 14 r/min, 分别考察提取液相对密度

表 2 进料泵转速筛选结果

进料泵转速/(r·min ⁻¹)	芦丁含量/(mg·g ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%
10	71.73	79.88	4.57
12	74.97	86.55	4.95
14	161.61	87.70	4.99
16	155.06	85.49	4.40
18	69.88	62.88	5.73

1.02、1.05、1.06、1.08（25℃）对芦丁含量、得粉率和含水量的影响，结果见表 3。由此可知，相对密度为 1.06 时各指标最优。

表 3 提取液相对密度筛选结果

提取液相对密度	芦丁含量/(mg·g ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%
1.02	71.73	63.05	4.57
1.04	74.97	46.85	4.95
1.06	161.61	75.99	4.99
1.08	155.06	25.65	4.40

2.7 Box-Behnken 响应面法 在单因素试验基础上，选择进风温度（A）、提取液相对密度（B）、进料泵转速（C）作为影响因素，芦丁含量、得粉率、含水量作为评价指标，通过 Design Expert 10.0 软件进行设计，因素水平见表 4。

表 4 Box-Behnken 响应面法因素水平

水平	A 进风温度/℃	B 提取液相对密度	C 进料泵转速/(r·min ⁻¹)
-1	140	1.02	10
0	160	1.05	14
1	180	1.08	18

2.7.1 权重系数计算

2.7.1.1 AHP 法 结果见表 5。

表 5 各指标权重系数（AHP 法）

指标	得粉率	芦丁含量	含水量	权重系数
得粉率	1	1	0.143	12.117
芦丁含量	7	1	1	81.591
含水量	0.5	0.08	1	6.292

2.7.1.2 CRITIC 法 结果见表 6。

表 6 各指标权重系数（CRITIC 法）

指标	指标变异性	指标冲突性	信息量	权重
得粉率	0.007	2.392	0.016	36.78
芦丁含量	0.003	1.706	0.005	11.25
含水量	0.008	2.665	0.023	51.96

2.7.1.3 AHP-CRITIC 法 将 AHP 法、CRITIC 法所得权重系数 ω_{AHPij} 、 $\omega_{CRITICij}$ 代入公式 $\omega_{AHP-CRITICij} = \omega_{AHPij} \omega_{CRITICij} / \sum \omega_{AHPij} \omega_{CRITICij}$ 计算综合权重 $\omega_{AHP-CRITICij}$ 。结果，得粉率、芦丁含量、含水量综合权重分别为 25.85%、54.41%、19.74%。

2.7.1.4 计算方法结果 比较 AHP 法、CRITIC 法、AHP-CRITIC 法所得权重系数，计算总评“归

一值”（OD 值）^[10]，结果见表 7。

表 7 OD 值计算结果

序号	AHP 法	CRITIC 法	AHP-CRITIC 法
1	94.36	83.94	90.57
2	94.68	91.15	92.31
3	84.94	77.10	81.95
4	88.61	96.02	90.81
5	86.51	80.01	83.93
6	88.31	74.00	82.75
7	92.13	74.09	85.56
8	95.04	89.65	93.37
9	94.35	82.50	89.19
10	88.31	80.51	84.95
11	95.46	76.79	88.47
12	86.80	64.21	78.22
13	92.13	77.47	86.39
14	98.81	95.74	97.97
15	95.27	89.53	92.84
16	93.15	86.23	90.93
17	84.89	83.80	84.32

2.7.2 方程拟合和响应面分析 采用 AHP-CRITIC 法^[11] 计算 OD 值，结果见表 8。再通过 Design Expert 10.0.1 软件进行拟合，得方程为 OD 值 = 86.911 2 + 0.077 7A - 2.053 8B - 1.303 6C + 3.492 5AB - 2.134 8AC - 4.285 5BC + 1.620 3A² - 3.963 7B² + 4.472 1C²，方差分析见表 9，可知模型 P<0.05，具有高度显著性；各因素影响程度依次为转速>相对密度>进风温度。

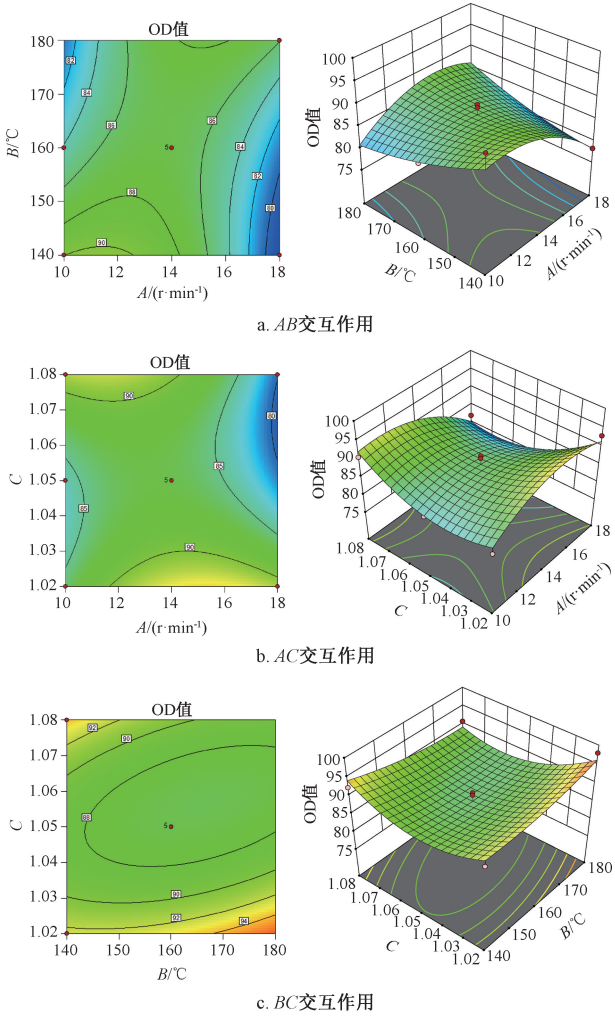
响应面分析见图 2。最终确定，最优工艺为进风温度 180℃，进料泵转速 16 r/min，提取液相对密度 1.02。

2.8 PSO-BP-ANN 建立 BP-ANN 是一种基于梯度下降法的多层前馈神经网络，通过正向传播和反向传播来实现学习，但由于本身算法的原因，容易使初始参数敏感陷入局部极小值，导致训练结果次优，并且传统的算法收敛速度与效率也较慢，故将其与粒子群优化算法（PSO）相结合^[12]。PSO 是一种启发式优化算法，通过模拟鸟群、鱼群等粒子群体协作搜索食物的行为来寻找问题最优解，其核心原理是通过算法来优化 BP-ANN 初始权值和阈值，利用其全局搜索能力避免后者陷入局部极小值^[13]。

2.8.1 模型参数 BP-ANN 输出节点有 3 个，分别为进料泵转速、进风温度和提取液相对密度；输出节点有 1 个，为 OD 值。为了增加训练样本的密度，本实验基于 Box-Behnken 响应面法结果，每组数据增加 8 个虚拟样本（共 153 组数据，每组数据增加 1 个 $\Delta \pm X$ ， $X = \pm 0.2\%$ ）^[14]，将数据分为训练集、测试集、验证集，占比分别为 70%、15%、

表 8 Box-Behnken 响应面法设计与结果

试验号	A 进风温度/℃	B 提取液相对密度	C 进料泵转速/(r·min ⁻¹)	芦丁含量/(mg·g ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%	OD 值
1	160	1.08	10	138.39	81.37	5.88	90.57
2	140	1.08	14	138.52	73.04	4.70	92.31
3	160	1.08	18	124.33	72.60	6.23	81.95
4	180	1.08	14	125.18	83.60	4.54	90.81
5	160	1.05	10	126.25	74.24	5.91	83.93
6	180	1.05	18	131.65	67.92	6.54	82.75
7	160	1.05	14	137.71	73.12	6.99	85.56
8	140	1.05	10	137.19	89.78	5.54	93.37
9	160	1.05	14	140.36	69.22	5.47	89.19
10	160	1.05	14	129.81	70.88	5.70	84.95
11	160	1.05	14	143.03	73.24	6.57	88.47
12	140	1.05	18	132.23	59.81	7.97	78.22
13	160	1.05	14	137.33	70.58	6.21	86.39
14	180	1.02	14	141.85	94.98	5.11	97.97
15	160	1.02	18	138.76	81.49	5.19	92.84
16	140	1.02	14	134.98	86.87	5.82	90.93
17	160	1.02	10	122.08	77.55	5.53	84.32



注：左边 3 张小图为等高线图，右边 3 张小图为三维曲面图。
A、B、C 分别为进料泵转速、进风温度、提取液相对密度。

图 2 各因素响应面图

表 9 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	342.28	9	38.03	4.42	0.031 5
A	0.048	1	0.048	0.005 619	0.942 3
B	33.74	1	33.74	3.92	0.088 2
C	13.59	1	13.59	1.58	0.249 1
AB	48.79	1	48.79	5.67	0.048 8
AC	18.23	1	18.23	2.12	0.188 9
BC	73.46	1	73.46	8.54	0.022 3
A ²	11.05	1	11.05	1.28	0.294 4
B ²	66.15	1	66.15	7.69	0.027 6
C ²	84.21	1	84.21	9.78	0.016 7
残差	60.24	7	8.61	—	—
失拟项	46.67	3	15.56	4.58	0.087 7
纯误差	13.57	4	3.39	—	—
总离差	402.52	16	—	—	—

15%，通过调整迭代次数、隐藏层个数、参考数据整体均方误差（MSE）及决定系数（R²）、剩余预测残差（RPD）、平均绝对误差（MAE）来确定最佳运行环境，见图 3。

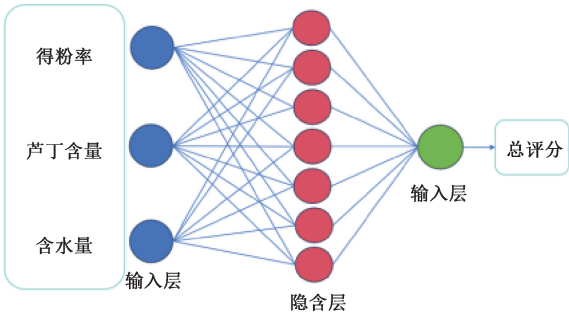


图 3 BP-ANN 模型

2.8.2 评价指标 参照文献 [15] 报道，选择

MSE、 R^2 、RPD、MAE 作为评价指标。其中，MSE 为预测值与真实值误差平方的平均值，其数值越小，数据越好，理论最佳值为 0，计算公式^[16]为

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$
;
$$R^2$$
 为衡量模型对目标变量变异的解释能力，最大值为 1，其数值越大，拟合程度越好，计算公式为 $R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}$ ；RPD 为数据标准差（Std）与均方根误差（RMSE）的比值，其数值越大越好，一般情况下要求大于 2，计算公式为 $RPD = \frac{Std}{RMSE}$ ；MAE 为预测值与真实值绝对误差的平均值，能直接反映两者之间的差异，计算公式为 $MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \bar{y}|$ 。

2.8.3 隐藏层数 选择 1~10 层，平行 5 次，取平均值并进行归一化处理，各指标给予同等权重后计算 OD 值，结果见表 10、图 4，最终确定为 9 层。

表 10 隐藏层数考察结果

隐藏层数/层	MSE	MAE	RPD	R^2	OD 值
1	11.633	2.682	1.355	0.452	37.34
2	5.127	1.748	2.062	0.758	62.18
3	4.687	1.669	2.158	0.779	65.15
4	2.396	1.193	3.033	0.887	91.68
5	2.461	1.273	2.947	0.884	88.93
6	2.591	1.296	2.958	0.878	87.45
7	2.787	1.297	2.794	0.869	84.54
8	2.354	1.137	3.087	0.889	93.63
9	2.027	1.085	3.258	0.904	100.00
10	2.636	1.307	2.894	0.876	86.39

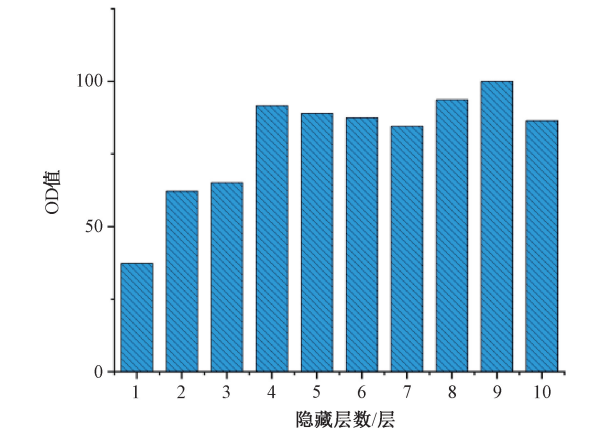


图 4 隐藏层数对 OD 值的影响

2.8.4 迭代次数 选择 50~250 层，平行 5 次，取平均值并进行归一化处理，各指标给予同等权重并计算 OD 值，结果见表 11、图 5，最终确定为 200 次。

表 11 迭代次数考察结果

迭代次数/次	MSE	MAE	RPD	R^2	OD 值
50	5.771	1.898	1.996	0.728	52.10
100	2.027	1.085	3.258	0.904	87.23
150	1.796	0.901	3.470	0.915	95.72
200	1.617	0.886	3.638	0.924	100.00
250	1.648	0.907	3.619	0.922	98.80

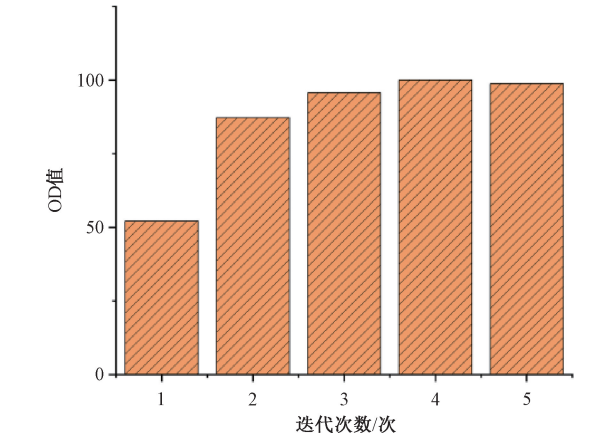


图 5 迭代次数对 OD 值的影响

2.8.5 寻优 以进料泵转速、进风温度、提取液相对密度为输入层，OD 值为输出结果，将 153 组数据以 70%、15%、15% 分为训练集、测试集、验证集^[17]，隐藏层设置为 9 层，迭代次数设置为 200 次，对模型进行训练，寻求最大 OD 值及对应组合，结果见图 6~8。最终确定，最优工艺为进风温度 180℃，进料泵转速 14 r/min，提取液相对密度 1.02。

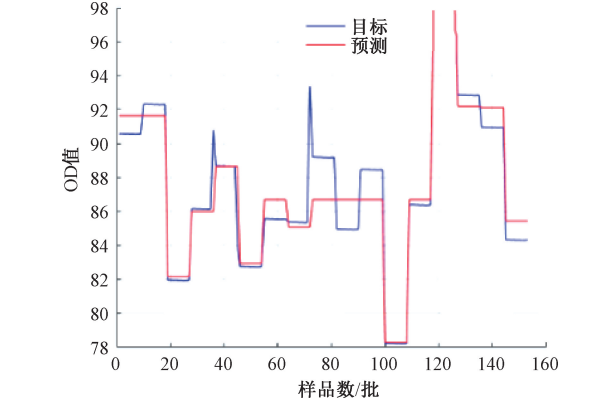


图 6 PSO 优化网络输出图

2.9 验证试验 分别按“2.7.2”“2.8.5”项下优化工艺进行 3 批验证试验（编号 BBD1~BBD3、BP-PSO-1~BP-PSO-3），结果见表 12。由此可知，PSO-BP-ANN 优化后 OD 值高于优化前的，表明该方法稳定可靠。

3 讨论与结论

本实验所采用的 Box-Behnken 响应面法、PSO-

241

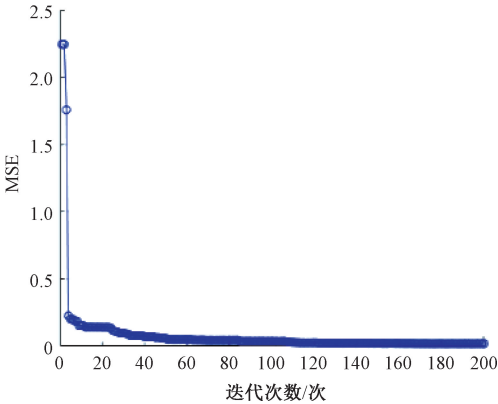


图 7 PSO 优化过程图

BP-ANN 揭示了不同方法在参数预测、模型稳定性及综合性能上的差异，为中药提取物工艺优化提供了新的技术路径^[18]。其中，前者通过建立二次回归模型有效捕捉了工艺参数（进风温度、转速、相对密度）与评价指标（芦丁含量、得粉率、含水量）之间的非线性关系，但其优化结果受限于局部极值的搜索能力，预测精度不足^[19]；后者通过粒子群算法来优化初始权值与阈值，提升了模型的全局搜索能力与泛化性能，并且 OD 值高于前者，验证了人工智能技术在复杂工艺优化中的优势^[20]。

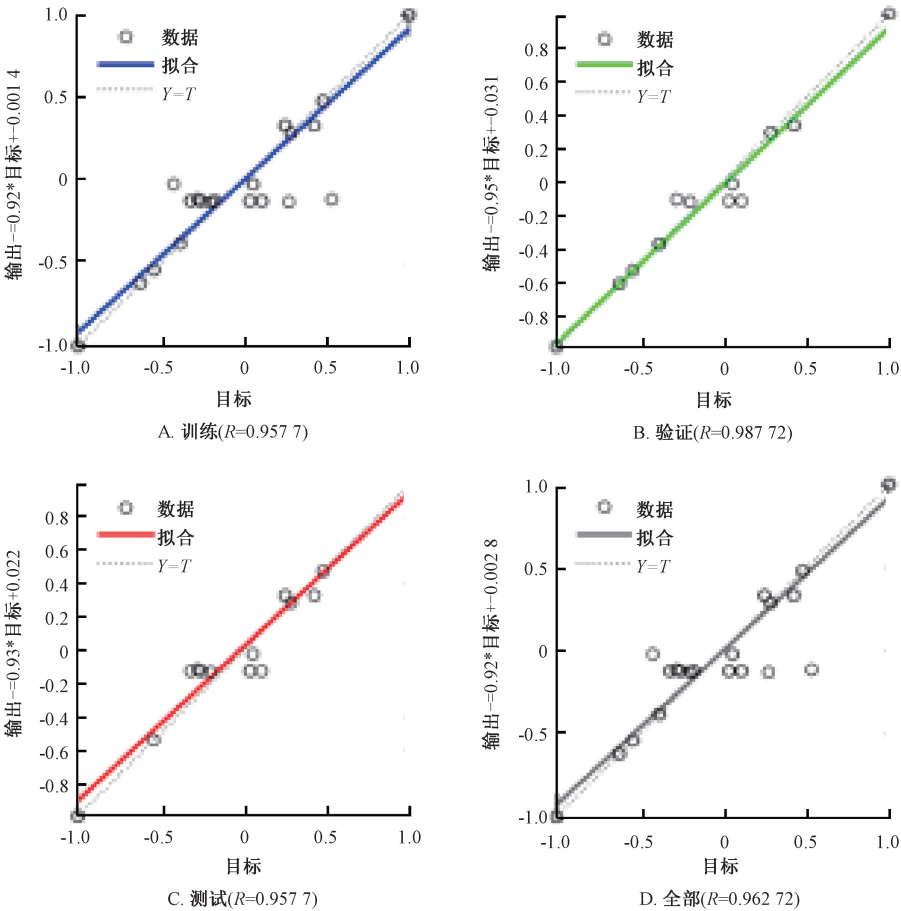


图 8 PSO 优化训练回归分析图

表 12 验证试验结果 (n=3)

编号	进料泵转速/ (r·min ⁻¹)	进风温度/℃	提取液相对 密度	芦丁含量/ (mg·g ⁻¹)	得粉率/%	含水量/%	OD 值	平均 OD 值	RSD/%
BBD-1	16	180	1.02	179.99	81.43	4.09	92.49	92.68	2.38
BBD-2	16	180	1.02	167.79	84.59	3.68	90.57		
BBD-3	16	180	1.02	177.85	88.16	3.42	94.97		
BP-PSO-1	14	180	1.02	179.13	95.78	3.56	93.73	95.12	1.92
BP-PSO-2	14	180	1.02	181.29	89.59	3.42	94.45		
BP-PSO-3	14	180	1.02	188.14	87.30	3.33	97.19		

另外，进风温度与相对密度的交互作用对芦丁热稳定性影响显著。其中，当前者超过 170 ℃ 时，含水量虽然降低，但芦丁降解风险增加；较低的后（1.02）结合较高的转速（14 r/min）可缩短物料停留时间，有效减少热敏成分损失，为平衡干燥效率与活性成分保留提供了关键参数组合。

综上所述，本实验采用 Box-Behnken 响应面法、AHP-CRITIC 法、PSO-BP-ANN 融合策略，不仅为槐米提取液喷雾干燥工艺提供了高效的优化方案，也为其他中药现代化生产中复杂工艺的智能化调控提供了理论参考与技术支持。

参考文献：

[1] 徐春梦, 卢 琪, 赵新芝, 等. 基于半制备液相色谱法从槐米水提液中制备芦丁[J]. 山东中医药大学学报, 2025, 49(2): 224-229.

[2] 杨诗宇, 宋基正, 杨山景, 等. 芦丁药理作用与新剂型的研究进展[J]. 中国现代应用药学, 2022, 39 (10): 1360-1370.

[3] 中华中医药学会《中药质量标志物研究技术指南》编写组. 中药质量标志物研究技术指南[J]. 中草药, 2025, 56(7): 2249-2252.

[4] 田吉麒, 张 倩, 王丹霞, 等. 地榆槐米蜜饮加工工艺研究[J]. 农产品加工, 2022(4): 33-35; 39.

[5] 宋祖坤, 张万尧, 安亚中, 等. 喷雾干燥技术的研究现状与发展趋势[J]. 广东化工, 2023, 50(22): 63-66.

[6] 刘雅婷, 莫丽萍, 甘 夏, 等. 青钱柳叶速溶粉的制备工艺研究[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(13): 57-62.

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

[8] 李一汀, 乔宇超, 王旭春, 等. Logratio 变换与 PSO-BP 神经网络在多目标混料设计药物处方配比优化中的应用[J]. 中国卫生统计, 2025, 42(1): 44-49.

[9] 任 晶. 槐米配方颗粒制备工艺及质量标准研究[D]. 长春: 长春中医药大学, 2024.

[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] 刘相岑, 董琳琳, 钟以凝, 等. 祛瘀解毒刮痧膏成型工艺及体外透皮试验的研究[J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(21): 3010-3015.

[12] 李 敏, 高岳林. 基于改进粒子群优化的 BP 神经网络图像压缩方法[J]. 南京理工大学学报, 2023, 47(6): 756-766.

[13] 刘洪丞, 丁国超. 基于粒子群算法的牛乳酪蛋白颗粒粒径分布反演[J]. 现代化农业, 2025(6): 85-87.

[14] 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.

[15] 王晓曼, 吕建雄, 李贤军, 等. 基于 PSO-BP 神经网络模型的浸胶竹束干燥过程含水率预测[J]. 林业科学, 2025, 61(5): 187-198.

[16] 李一汀, 乔宇超, 王旭春, 等. Logratio 变换与 PSO-BP 神经网络在多目标混料设计药物处方配比优化中的应用[J]. 中国卫生统计, 2025, 42(1): 44-49.

[17] 王申申, 张 超, 王艳梅. 基于 GA-BP 神经网络优化北五味子籽油微胶囊制备工艺[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(23): 117-125.

[18] 王跃生, 欧阳 旭, 王丹辉, 等. 数学模式试验设计方法的优缺点比较及其在中药研究应用中的适宜性分析[J]. 中药新药与临床药理, 2010, 21(2): 207-210.

[19] 毛绍云, 柏 倩, 徐 倩. 混菌发酵茯苓实制备抗氧化肽及其结构的鉴定[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(7): 50-60.

[20] 杨振宇, 张日晖, 张 雷, 等. 揭开医学图像分析算法的黑箱：医学图像分析中可解释人工智能的最新进展[J]. 科学通报, 2025(6): 1-21.