

基于正交试验与粒子群算法的多花黄精黄酮提取条件优化及各器官分布规律研究



谌 沅¹, 梁 巧¹, 潘文运¹, 李春晓¹, 李科莹¹, 张献文¹, 钟俊芳², 范宝磊¹

1. 湖北科技学院药学院 (湖北咸宁 437000)

2. 咸宁市第一人民医院健康管理科 (湖北咸宁 437000)

【摘要】目的 优化多花黄精中花旗松素、杨梅素、甘草素、芹菜素、柚皮素、黄芩素和异甘草素7种黄酮的提取条件, 明确各器官黄酮含量与分布特征。**方法** 以多花黄精不同营养器官为研究对象, 7种黄酮为检测指标, 采用单因素试验、正交试验结合粒子群优化(PSO)算法, 筛选适用于黄酮含量测定的提取条件。建立HPLC含量测定方法, 结合主成分分析、聚类分析及Spearman相关性分析, 解析多花黄精不同器官黄酮的分布规律与成分关联性。**结果** 7种黄酮线性关系良好($r > 0.999\ 0$), 且精密度、稳定性、重复性及准确度均符合定量分析要求。PSO算法优化的提取条件为: 提取溶剂为75%乙醇, 提取温度95℃, 提取时间1.5 h, 料液比1:20。在此条件下, 总黄酮提取率较正交试验优化结果提升了34.8%。花旗松素在叶中含量最高; 柚皮素与黄芩素主要富集于根茎; 花与须中各类黄酮含量均低于0.5 mg/g。主成分分析与聚类树将各器官划分为3类: 叶单独聚为一类, 根茎与地上茎聚为一类, 花与须聚为一类。**结论** 正交试验结合PSO算法协同优化的提取条件稳定高效, 所建立的HPLC定量方法准确度较高。多元统计分析表明, 7种黄酮在多花黄精各器官存在特异性分布, 为多花黄精资源开发与质量评价提供依据。

【关键词】 多花黄精; 黄酮; 粒子群优化算法; 高效液相色谱法; 主成分分析; 聚类分析; Spearman相关性分析

【中图分类号】 R284.2

【文献标识码】 A

Optimization of flavonoid extraction conditions from *Polygonatum cyrtoneura* by orthogonal test combined with particle swarm optimization and distribution patterns in different organs

SHEN Yuan¹, LIANG Qiao¹, PAN Wenyun¹, LI Chunxiao¹, LI Keying¹, ZHANG Xianwen¹, ZHONG Junfang², FAN Baolei¹

1. School of Pharmacy, Hubei University of Science and Technology, Xianning 437000, Hubei Province, China

2. Department of Health Management, Xianning First People's Hospital, Xianning 437000, Hubei Province, China

Corresponding authors: ZHONG Junfang, Email: zhongjunf@163.com; FAN Baolei, Email: fanbl_1980@163.com

DOI: 10.12173/j.issn.2097-4922.202603049

基金项目: 湖北省重大科技专项资金项目 (2022BCE066)

通信作者: 钟俊芳, 主任药师, Email: zhongjunf@163.com

范宝磊, 博士, 教授, Email: fanbl_1980@163.com

【Abstract】Objective To optimize the extraction conditions for 7 flavonoids (taxifolin, myricetin, liquiritigenin, apigenin, naringenin, baicalein, and isoliquiritigenin) from *Polygonatum cyrtonema*, and clarify the content and distribution characteristics of flavonoids in various organs. **Methods** Taking different vegetative tissues of *Polygonatum cyrtonema* as experimental materials and 7 flavonoids as detection indicators, single-factor test, orthogonal test and particle swarm optimization (PSO) algorithm were combined to determine the optimal extraction conditions for flavonoid quantification. An HPLC method was developed for simultaneous quantification of flavonoids. Principal component analysis, cluster analysis and Spearman correlation analysis were further applied to elucidate the distribution patterns and compositional correlations of flavonoids in different vegetative organs of *Polygonatum cyrtonema*. **Results** The 7 flavonoids showed good linear relationships ($r > 0.999\ 0$), and the precision, stability, repeatability and accuracy all satisfied the criteria for quantitative determination. The optimal extraction conditions optimized by PSO were 75% ethanol as the extraction solvent, extraction temperature of 95 °C, extraction duration of 1.5 h, and solid-liquid ratio of 1:20. Under these conditions, the total flavonoid extraction efficiency increased by 34.8% compared with that obtained from orthogonal tests. The content of taxifolin was highest in leaves, naringenin and baicalin were mainly enriched in rhizomes, and the content of various flavonoids in flowers and fibrous roots was less than 0.5 mg/g. All tested organs were classified into 3 groups based on principal component and hierarchical clustering analysis. Leaves formed an independent cluster, rhizomes and aerial stems were grouped together, while flowers and fibrous roots constituted the third category. **Conclusion** The extraction parameters collaboratively optimized by orthogonal test and PSO algorithm possess high stability and extraction efficiency. The established HPLC quantitative method has high accuracy. Multivariate statistical analysis showed that the 7 flavonoids exhibit distinct distribution patterns across various organs of *Polygonatum cyrtonema*, providing a basis for resource development and quality evaluation.

【Keywords】 *Polygonatum cyrtonema*; Flavonoids; Particle swarm optimization algorithm; HPLC; Principal component analysis; Cluster analysis; Spearman correlation analysis

黄精是百合科黄精属 (*Polygonatum*) 植物滇黄精 (*P.kingianum*)、黄精 (*P.sibiricum*) 或多花黄精 (*P.cyrtonema*) 的干燥根茎, 作为传统补益类中药被广泛应用于代谢性疾病治疗与免疫调节领域。黄酮类成分是黄精发挥抗氧化、抗炎、降血糖等核心活性的物质基础, 不仅直接决定药材质量与临床价值, 更在天然活性产物及功能性食品研发中具有关键应用潜力, 因此精准检测其含量与分布至关重要^[1]。然而, 传统开发多局限于根茎部位, 地上茎、须、花、叶等营养器官的黄酮资源潜力尚未得到系统挖掘, 造成资源浪费与利用不充分的问题。黄精的叶是黄酮等活性成分的合成源头, 地上茎承担物质运输枢纽功能, 根茎与须负责吸收储存, 花参与繁殖相关生理过程; 器官功能分化带来的黄酮分布差异规律也缺少系统性研究, 进而限制了对其全株资源价值的深度挖掘与高效利用^[2-3]。

目前, 黄精多糖研究已较为深入, 而黄酮类成分的系统研究相对薄弱, 尤其缺乏对不同营养器官中黄酮分布特征与差异规律的系统性探索^[4]。乙醇回流法作为黄酮提取的基础工艺, 操作稳定性高、参数易控, 更适合与正交试验-粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法形成协同优化逻辑^[5-6]。PSO 算法作为群体智能优化技术, 可突破正交试验离散水平限制, 通过动态寻优获取更优参数组合, 可用于黄酮提取条件的高效优化^[7-8]。HPLC 法灵敏度高、重现性好, 是黄酮类成分定量分析的常用方法^[9-10]。

基于此, 本研究以花旗松素、杨梅素、甘草素、芹菜素、柚皮素、黄芩素和异甘草素 7 种特征黄酮为指标, 选取多花黄精的根茎、须、花、地上茎、叶等营养器官为研究对象 (图 1), 通过正交试验与 PSO 算法协同优化乙醇回流提取条件, 建立 HPLC 定性定量方法, 结合主成分分析

(principal component analysis, PCA) 与 Spearman 相关性分析, 系统揭示不同器官黄酮分布特征及关联规律, 既填补了多花黄精多营养器官黄酮系统研究的空白, 也为资源综合开发、质量评价体系完善提供科学依据。

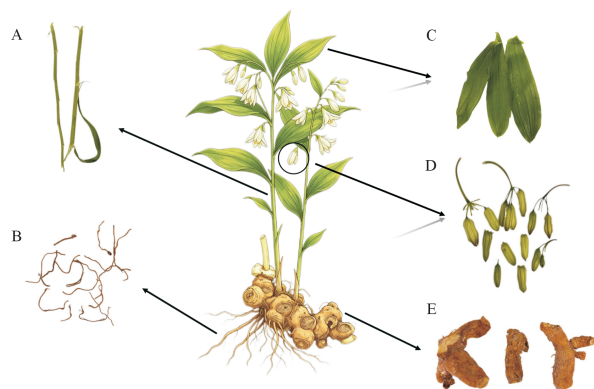


图1 多花黄精不同部位示意图
Figure 1. Diagram of different parts of
Polygonatum cyrtonema

注: A. 地上茎; B. 须; C. 叶; D. 花; E. 根茎。

1 仪器与材料

1.1 主要仪器

岛津 LC-16 液相色谱仪, 包括 SPD-16 紫外检测器 (日本岛津公司); FA2004B 型电子天平 (上海越平科学仪器有限公司); KW-1000DC 型数显恒温水浴锅 (江苏金坛市亿通电子有限公司); RE-5299 型旋转蒸发器 (郑州市亚荣仪器有限公司); SHZ-D (Ⅲ) 型循环水式多用真空泵 (郑州博科仪器设备有限公司); LGJ-10A 型冷冻干燥器 (上海贺帆仪器有限公司)。

1.2 主要药品与试剂

干燥的多花黄精根茎 (批号: 20250122-1)、须 (批号: 20250122-2)、花 (批号: 20250122-3)、地上茎 (批号: 20250122-4)、叶 (批号: 20250122-5) 均产自湖北省咸宁市通城县, 于 2025 年 1 月采挖, 经湖北科技学院药学院张志君博士鉴定, 确认为多花黄精 (*P. cyrtonema*) 的根茎、须、花、地上茎、叶。甘草素 (批号: AF21020763)、花旗松素 (批号: AF20041364)、异甘草素 (批号: AF21020851)、黄芩素 (批号: AF21021952)、芹菜素 (批号: AF90320080)、柚皮素 (批号: AF20110451)、杨梅素 (批号: AF90337068) 对照品, 纯度 $\geq 98\%$, 均购自成都

埃法生物科技有限公司; 乙腈和甲醇为色谱纯; 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 溶液的配制

2.1.1 供试品溶液

将多花黄精根茎、地上茎、叶、花、须样品分别洗净沥干后切碎, 置于 60°C 烤箱中烘干至恒重, 随后粉碎并过 18 目筛。精密称取 2.0 g 各多花黄精不同器官样品粉末, 置于 250 mL 圆底烧瓶内, 加入 20 mL 70% 乙醇, 在 90°C 水浴锅中回流提取 2 h, 抽滤后收集滤液; 滤渣按上述方法重复提取一次, 抽滤后合并 2 次滤液, 经减压浓缩至适当体积后进行冷冻干燥, 称定质量, 保存于干燥器中备用^[11]。

精密称取不同提取条件下所得各部位多花黄精提取物的干燥粉末 0.4 g, 用 70% 甲醇溶解后转移至 10 mL 量瓶中定容, 过 $0.45\ \mu\text{m}$ 微孔滤膜, 待测。

2.1.2 对照品溶液

精密称取对照品花旗松素 3.79 mg、杨梅素 3.82 mg、甘草素 4.71 mg、芹菜素 4.23 mg、柚皮素 4.57 mg、黄芩素 4.95 mg、异甘草素 3.91 mg, 置于 10 mL 量瓶中, 加 70% 甲醇溶解并定容至刻度, 摇匀, 制成 0.379、0.382、0.471、0.423、0.457、0.495、0.391 mg/mL 的混合对照品溶液。

2.2 HPLC 色谱条件

采用 Inertsil ODS-3 C_{18} 色谱柱 ($250\ \text{mm} \times 4.6\ \text{mm}$, $5\ \mu\text{m}$); 流动相为 0.05% 磷酸溶液 (A)–乙腈 (B), 梯度洗脱 (0 min, 30% B; 0~15.5 min, 30%→70% B; 15.5~17 min, 70% B; 17~17.5 min, 70%→71% B; 17.7~25 min, 71%→80% B); 柱温为 30°C ; 流速为 0.6 mL/min; 检测波长为 270 nm; 进样量为 $15\ \mu\text{L}$ ^[12]。

2.3 方法学考察

2.3.1 系统适用性试验

取空白溶剂 (甲醇)、混合对照品溶液及不同器官供试品溶液, 按“2.2”项下色谱条件分别进样测定, 记录色谱图 (图 2)。结果显示, 空白溶剂在目标峰位置无干扰; 每一个供试品中花旗松素、杨梅素、甘草素、芹菜素、柚皮素、黄芩素、异甘草素的色谱峰峰形良好, 与相邻色谱峰分离度符合要求, 表明该方法专属性良好, 能够满足植物不同器官含量测定需要。

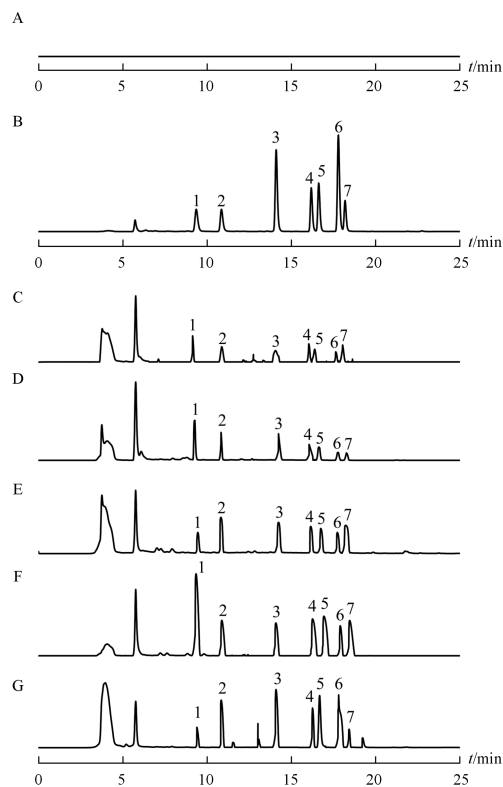


图2 HPLC 色谱图

Figure 2. HPLC chromatograms

注：A. 空白溶剂；B. 混合对照品溶液；C. 花供试品溶液；D. 地上茎供试品溶液；E. 须供试品溶液；F. 叶供试品溶液；G. 根茎供试品溶液；1. 花旗松素；2. 杨梅素；3. 甘草素；4. 芹菜素；5. 柚皮素；6. 黄芩素；7. 异甘草素。

2.3.2 线性关系考察

取“2.1.2”项下混合对照品溶液，用70%甲醇依次梯度稀释1、4、16、64、256倍，得到5个不同浓度的对照品溶液。按“2.2”项下色谱条件依次进样测定，以对照品浓度为横坐标（X，μg/mL）、峰面积为纵坐标（Y）进行线性回归分析，结果见表1，在所选质量浓度范围内，各成分峰面积与浓度均呈良好线性关系，*r*值均大于0.999 0，表明该定量方法的线性关系良好。

2.3.3 精密度试验

精密吸取混合对照品溶液10 μL，按“2.2”项下色谱条件连续进样6次。结果显示，花旗松素、杨梅素、甘草素、芹菜素、柚皮素、黄芩素、异甘草素峰面积的*RSD*分别为1.05%、1.64%、1.53%、1.07%、1.23%、1.66%、1.37%（*n*=6），表明本方法精密度良好。

2.3.4 稳定性试验

精密吸取“2.1.1”项下各供试品溶液，室温下放置0、2、4、8、12、24 h后，按“2.2”项下

表1 各成分的线性回归分析结果

Table 1. Linear regression analysis results of each component

黄酮成分	线性方程	<i>r</i>	线性范围（μg/mL）
花旗松素	$Y=471.95X+159\ 821$	0.999 7	1.480~379.000
杨梅素	$Y=551.38X+106\ 337$	0.999 4	1.492~382.000
甘草素	$Y=1\ 160.4X+344\ 324$	0.999 4	1.840~481.000
芹菜素	$Y=144.25X+28\ 149$	0.999 8	1.652~423.000
柚皮素	$Y=1\ 845.9X+297\ 718$	0.999 3	1.785~457.000
黄芩素	$Y=2\ 440.2X+352\ 724$	0.999 6	1.934~531.000
异甘草素	$Y=151.71X+52\ 816$	0.999 3	1.527~391.000

色谱条件进样测定，记录各成分的峰面积。测定结果显示，多花黄精根茎中7种黄酮成分峰面积的*RSD*在1.57%~2.98%之间，地上茎、叶片、花、须的*RSD*分别为0.92%~2.80%、1.03%~2.51%、1.63%~2.76%、0.99%~2.69%（*n*=6），表明各器官供试品溶液在24 h内稳定性良好。

2.3.5 重复性试验

取同一批在相同条件下提取的多花黄精各器官样品，按“2.1.1”项下方法平行制备6份供试品溶液，再按“2.2”项下色谱条件进样测定，记录各成分的峰面积。表2结果显示，该方法重复性良好。

2.3.6 加样回收率试验

精密称取已知含量的多花黄精根茎、地上茎、叶、花及须供试品粉末各6份，每份2.0 g，分别精密加入与各样品中含量相当的混合对照品溶液，根茎样品依次加入2.16、1.18、1.78、0.90、3.78、3.86、0.64 mg，其余部位同法添加。按“2.1.1”项下方法制备供试品溶液，再按“2.2”项下色谱条件进样测定，并计算回收率。表3结果显示，该方法准确度良好，适用于多花黄精不同营养器官中7种黄酮成分的测定。

本文采用相同的提取与检测条件，对多花黄精不同营养器官进行提取及方法学验证，结果显示各项指标均符合要求，证明该提取与检测条件适用于多花黄精各器官中黄酮成分的提取与测定；各器官黄酮理化性质相近，提取参数不存在明显的组织特异性差异^[13]，且考虑到多花黄精根茎是常用药用部位，为黄酮类成分的主要富集部位，因此后续单因素试验、正交试验及PSO算法，均以多花黄精根茎为研究对象展开。

表2 不同营养器官中各黄酮的重复性试验结果 ($n=6$)Table 2. Repeatability test results of each flavonoid in different nutritional organs ($n=6$)

黄酮成分	根茎		地上茎		叶		花		须	
	平均含量 (mg/g)	RSD (%)	平均含量 (mg/g)	RSD (%)	平均含量 (mg/g)	RSD (%)	平均含量 (mg/g)	RSD (%)	平均含量 (mg/g)	RSD (%)
花旗松素	1.22	0.77	1.86	1.12	2.61	0.95	0.38	1.41	0.11	1.26
杨梅素	0.39	1.47	0.24	1.75	0.06	1.60	0.07	2.03	0.12	1.52
甘草素	0.59	1.89	0.61	1.34	0.03	2.01	0.03	1.66	0.19	1.88
芹菜素	0.45	2.23	0.31	0.96	0.09	1.37	0.12	1.19	0.08	2.05
柚皮素	1.09	2.07	0.18	1.58	0.06	1.82	0.08	1.94	0.06	1.39
黄芩素	1.53	1.77	0.08	2.10	0.02	1.55	0.02	0.71	0.04	1.79
异甘草素	0.32	1.65	0.11	1.43	0.08	2.18	0.09	1.28	0.09	1.61

表3 不同营养器官中各黄酮的加样回收率试验结果 ($n=6$)Table 3. Recovery results of each flavonoid in different nutritional organs ($n=6$)

黄酮成分	根茎		地上茎		叶		花		须	
	平均回收率 (%)	RSD (%)	平均回收率 (%)	RSD (%)	平均回收率 (%)	RSD (%)	平均回收率 (%)	RSD (%)	平均回收率 (%)	RSD (%)
花旗松素	104.11	2.27	97.62	1.41	101.87	0.95	96.94	1.33	99.73	2.52
杨梅素	99.32	2.53	100.18	2.15	97.29	2.29	98.81	2.61	103.48	0.86
甘草素	99.26	1.98	98.75	2.73	98.43	2.47	101.02	1.24	100.91	2.38
芹菜素	95.53	2.69	99.41	1.08	100.56	0.97	97.36	2.78	98.66	2.25
柚皮素	102.55	2.84	102.07	2.59	96.78	2.74	99.67	2.45	97.92	1.63
黄芩素	97.88	2.92	96.89	2.36	99.12	1.31	100.39	2.12	98.57	2.49
异甘草素	96.37	2.77	100.74	1.81	97.25	2.58	98.28	1.68	101.14	1.17

2.4 单因素试验

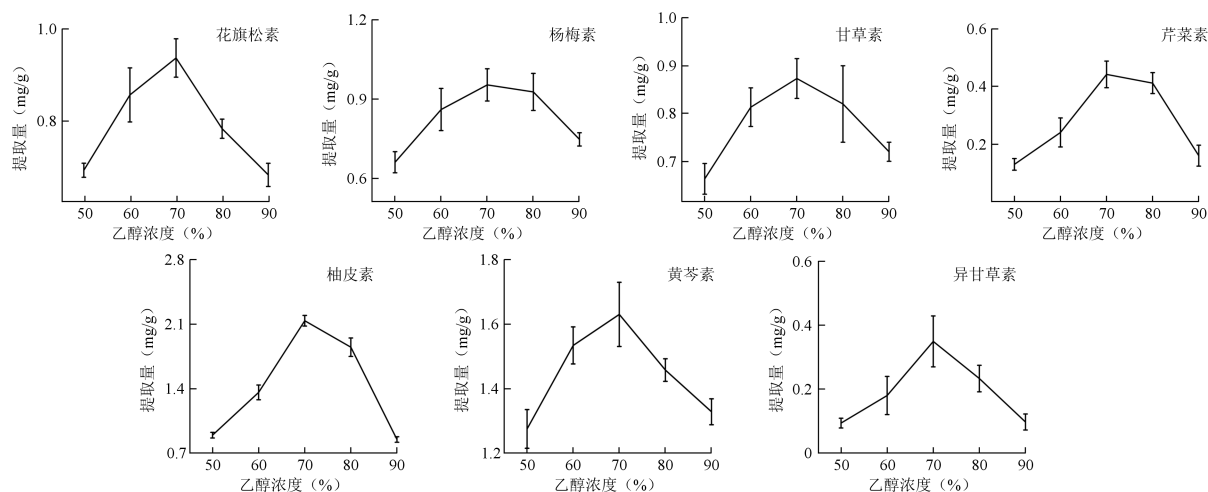
2.4.1 乙醇浓度

取同一批次、干燥至恒重的多花黄精根茎粉末5份, 每份2.0 g, 置于250 mL圆底烧瓶中, 分别加入50%、60%、70%、80%、90%乙醇溶液20 mL, 每个水平平行制备3份样品。其余操作参照“2.1.1”项下方法。按“2.2”项下色谱条件测定7种黄酮含量, 考察乙醇浓度对提取各黄酮含

量的影响。结果如图3所示, 当提取溶剂为70%乙醇时各黄酮的含量最高, 故选择70%乙醇为最优提取溶剂。

2.4.2 提取温度

取同一批次、干燥至恒重的多花黄精根茎粉末5份, 每份2.0 g, 置于250 mL圆底烧瓶中, 以70%乙醇为提取溶剂, 分别在60、70、80、90、100 °C条件下回流提取, 每个温度水平平行制备3份样品。

图3 乙醇浓度对各黄酮含量的影响 ($n=3$)Figure 3. Effect of ethanol concentration on individual flavonoid contents ($n=3$)

其余操作参照“2.1.1”项下方法,按“2.2”项下色谱条件测定7种黄酮含量,考察温度对提取各黄酮含量的影响。结果如图4所示,90℃时各黄酮的含量最高,故确定90℃为最优提取温度。

2.4.3 提取时间

取同一批次、干燥至恒重的多花黄精根茎粉末5份,每份2.0 g,置于250 mL圆底烧瓶中,以

70%乙醇为提取溶剂、90℃为提取温度,分别回流提取0.5、1、1.5、2、2.5 h,每个时间点平行制备3份样品。其余操作参照“2.1.1”项下方法,按“2.2”项下色谱条件测定7种黄酮含量,考察提取时间对提取各黄酮含量的影响。结果如图5所示,当提取时间为2 h时各黄酮的含量达到峰值,故确定2 h为最佳提取时间。

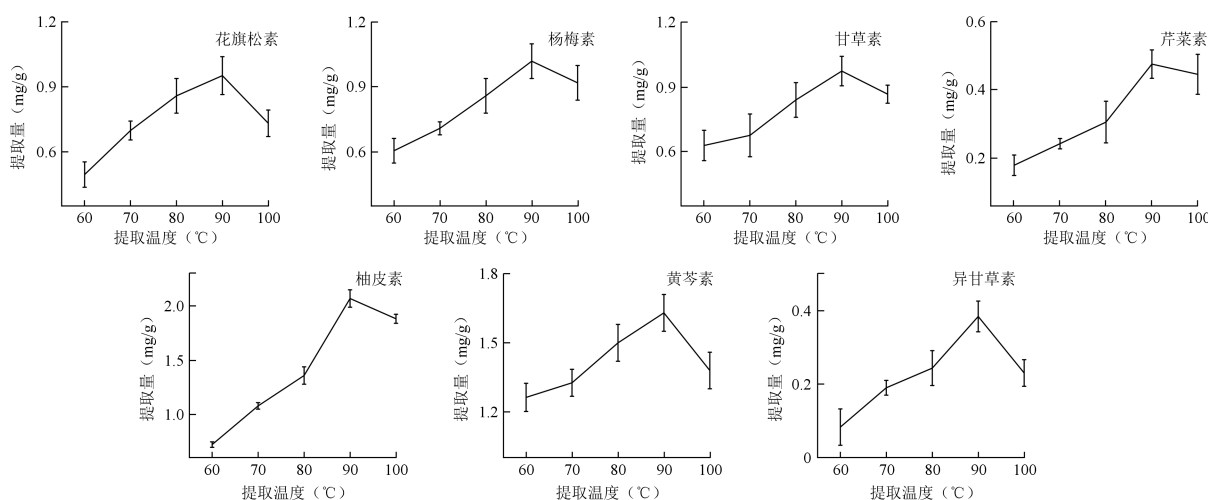


图4 提取温度对各黄酮含量的影响 ($n=3$)

Figure 4. Effect of extraction temperature on individual flavonoid contents ($n=3$)

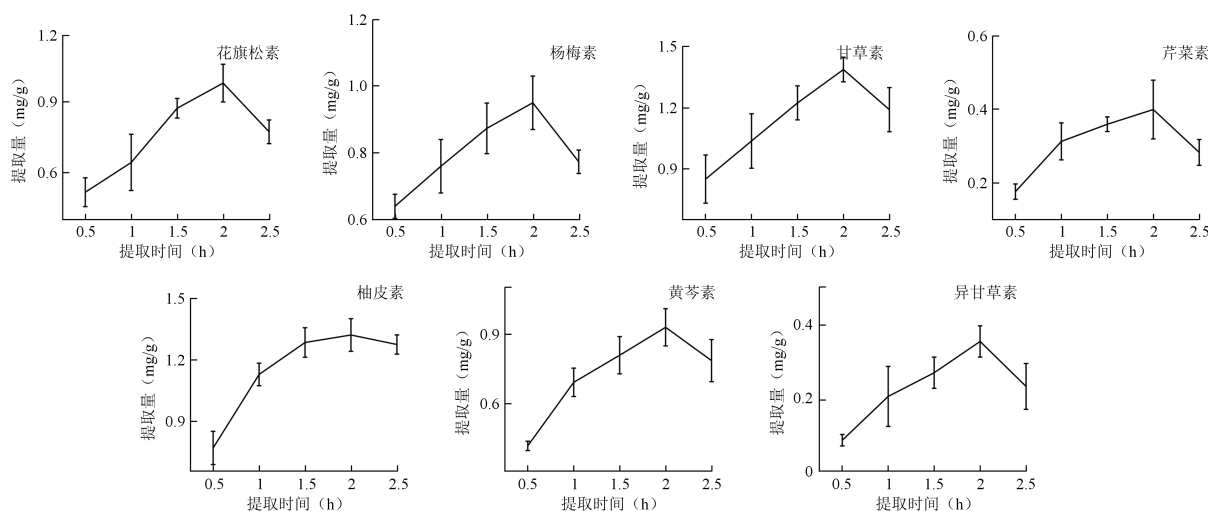


图5 提取时间对各黄酮含量的影响 ($n=3$)

Figure 5. Effect of extraction time on individual flavonoid contents ($n=3$)

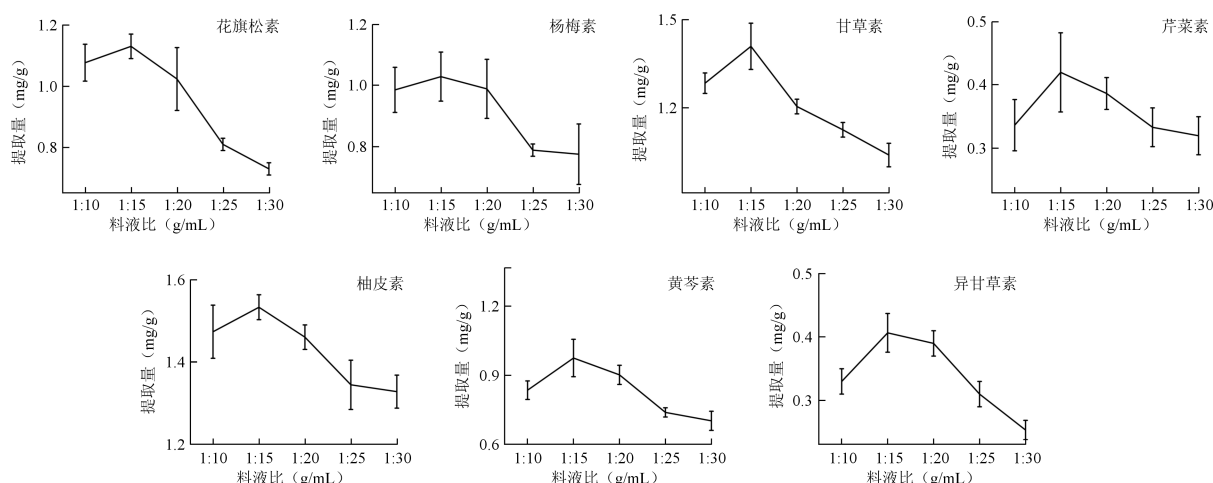
2.4.4 料液比

取同一批次、干燥至恒重的多花黄精根茎粉末5份,每份2.0g,置于250 mL圆底烧瓶中,以70%乙醇为提取溶剂、90℃为提取温度、2 h为提取时间,按1:10、1:15、1:20、1:25、1:30 (g/mL)的料液比加入提取溶剂,每个料液比平行制备3份样品。其余操作参照“2.1.1”项下方法,按“2.2”项下色谱条件测定7种黄酮

含量,考察料液比对各黄酮提取含量的影响。结果如图6所示,料液比为1:15时各黄酮含量最高,故确定1:15为最佳料液比。

2.5 正交试验

在单因素试验基础上,选取乙醇浓度(A)、提取温度(B)、提取时间(C)、料液比(D)4个关键参数作为考察因素,采用四因素三水平正交试验优化多花黄精根茎提取7种黄酮的条件,

图6 料液比对各黄酮含量的影响 ($n=3$)Figure 6. Effect of solid-to-liquid ratio on individual flavonoid contents ($n=3$)

各因素及其水平设置见表4。以7种黄酮成分的综合提取量(7种黄酮含量之和)为评价指标,采用 $L_9(3^4)$ 正交表设计试验,精密称取9份干燥至恒重的黄精粉末,每份2.0 g,按不同条件进行提取。正交试验设计及结果见表5,方差分析结果见表6。

由极差分析结果可知,各因素对黄酮含量的影响大小依次为A(乙醇浓度)>C(提取时间)

>B(提取温度)>D(料液比)。其中,因素A(乙醇浓度)对黄酮得率的影响显著($P<0.05$),而因素B、C、D的影响均未达到显著水平($P>0.05$)。基于上述分析,确定最优提取条件组合为 $A_2B_2C_1D_2$,即乙醇浓度70%、提取温度90℃、提取时间1.5 h、料液比1:15。

2.6 PSO算法

2.6.1 PSO算法优化提取条件

在本研究中,以多花黄精7种黄酮成分的综合提取量作为PSO的适应度函数,算法目标为搜索提取条件参数(乙醇浓度、温度、时间、料液比)的最优连续组合及对应总提取率。基于单因素与正交试验确定的参数边界,设置搜索范围为乙醇浓度50%~90%、提取温度70~110℃、提取

表4 正交试验因素与水平

Table 4. The factors and levels of orthogonal tests

水平	A 乙醇浓度 (%)	B 提取温度 (°C)	C 提取时间 (h)	D 料液比 (g/mL)
1	60	80	1.5	1:10
2	70	90	2	1:15
3	80	100	2.5	1:20

表5 正交试验设计及结果

Table 5. The design and result of orthogonal test

试验号	A	B	C	D	黄酮含量 (mg/g)							综合提取量 (mg/g)
					花旗松素	杨梅素	甘草素	芹菜素	柚皮素	黄芩素	异甘草素	
1	1	1	1	1	0.46	0.62	0.29	0.06	0.15	0.08	0.07	1.73
2	1	2	2	2	0.32	0.39	0.33	0.05	0.25	0.22	0.05	1.61
3	1	3	3	3	0.46	0.36	0.36	0.09	0.36	0.26	0.07	1.96
4	2	1	2	3	0.42	1.1	0.96	0.35	1.01	0.45	0.31	4.60
5	2	2	3	1	1.28	0.61	1.82	0.16	1.82	1.62	0.21	7.52
6	2	3	1	2	1.75	1.42	1.09	0.23	2.20	1.03	0.38	8.10
7	3	1	3	2	0.52	0.78	0.37	0.13	0.68	0.29	0.16	2.93
8	3	2	1	3	1.00	0.58	0.46	0.08	1.29	0.61	0.17	4.19
9	3	3	2	1	0.71	0.32	0.32	0.05	0.93	0.43	0.12	2.88
K1	1.767	3.087	4.673	4.043								
K2	6.740	4.440	3.030	4.213								
K3	3.333	4.313	4.137	3.583								
R	4.973	1.353	1.643	0.630								

表6 方差分析结果

Table 6. The result of the analysis of variance

方差来源	离均差平方和	自由度	<i>F</i>	<i>P</i>
A	39.429	2	30.88	< 0.05
B	3.988	2	3.12	> 0.05
C	4.852	2	3.8	> 0.05
D	0.637	2	0.50	> 0.05
误差 (D)	1.277	2		

注: $F_{0.05}(2,2)=19.00$ 。

时间 0.5~3 h、料液比 1 : 5~1 : 40 (g/mL); 算法参数设置为种群数量 30、迭代次数 100, 且粒子飞行速度与位置严格限制在上述范围内, 以确保结果的实际可行性。PSO 在 100 次迭代内实现收敛 (图 7): 在迭代过程中, 初始阶段适应度值快速上升, 20 次迭代后趋于稳定, 100 次迭代时达到全局最优。最终得出 PSO 优化结果为: 乙醇浓度 75%、提取温度 95 ℃、提取时间 1.5 h、料液比 1 : 20。

2.6.2 验证试验

分别按正交试验与 PSO 优化所得最佳提取条件开展验证试验, 各进行 3 次平行测定。正交试

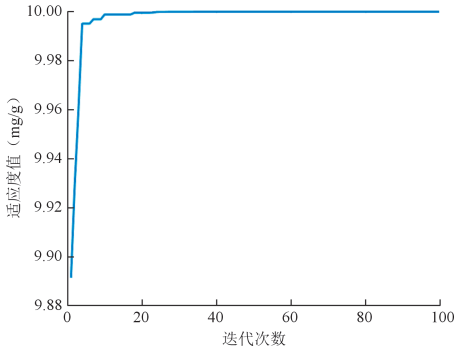


图7 PSO算法寻优过程

Figure 7. Optimization process of the PSO algorithm

验优化提取条件下, 7 种黄酮平均含量为 0.193~1.957 mg/g, *RSD* 为 0.49%~2.95% ($n=3$); 其综合提取量平均值为 6.075 mg/g, 在 PSO 优化提取条件下, 7 种黄酮平均含量为 0.283~2.157 mg/g, *RSD* 为 0.77%~1.56% ($n=3$), 其综合提取量平均值达 8.189 mg/g, 较正交试验提升 34.8%, 提取效率更优, 结果见表 7。PSO 预测的综合提取量 (10.00 mg/g) 略高于实际验证值 (8.189 mg/g), 相对偏差为 18.1%, 在可接受范围内且变化趋势一致, 表明模型预测性良好、参数设置合理。

表7 验证试验结果 ($n=3$)

Table 7. Results of verification tests ($n=3$)

黄酮成分	正交试验		PSO 算法	
	平均含量 (mg/g)	<i>RSD</i> (%)	平均含量 (mg/g)	<i>RSD</i> (%)
花旗松素	0.913	2.95	1.413	1.05
杨梅素	0.747	1.29	1.347	0.77
甘草素	0.893	1.68	0.913	0.98
芹菜素	0.343	2.80	0.493	1.44
柚皮素	1.957	0.49	2.157	1.56
黄芩素	1.030	1.46	1.583	1.46
异甘草素	0.193	2.49	0.283	1.49

2.7 多花黄精不同器官黄酮含量与分布特征

2.7.1 含量测定

综合正交试验与 PSO 算法优化结果, 提取多花黄精的不同器官, 包括根茎、花、叶、须及地上茎。将各器官置于 60 ℃烤箱中烘干至恒重, 随后粉碎并过 18 目筛。精密称取根茎、花、叶、须及地上茎粉末各 2.0 g, 置于 250 mL 圆底烧瓶中, 按 1 : 20 的投料比加入 75% 乙醇 50 mL, 在 95 ℃ 水浴锅中回流提取 1.5 h, 抽滤并收集滤液。滤渣重复提取 1 次, 再次抽滤, 合并 2 次滤液, 减压

浓缩至适当体积, 冷冻干燥后称重, 保存于干燥器中备用。

精密称取不同提取条件下获得的多花黄精提取物干燥粉末 0.4 g, 用 70% 甲醇溶解并转移至 10 mL 量瓶中定容, 经 0.45 μm 微孔滤膜过滤后, 分别按照 “2.2” 项下色谱条件进行 HPLC 定量分析。结果显示, 多花黄精根茎、花、叶、须及地上茎中均含有花旗松素、杨梅素、甘草素、芹菜素、柚皮素、黄芩素、异甘草素 7 种黄酮单体, 测定结果见图 8。多花黄精不同部位的黄酮类成分含量存在显著差异: 叶中花旗松素含量尤为突

出, 在总黄酮组成中占比显著; 根茎中柚皮素与黄芩素含量优势明显; 地上茎中各黄酮成分分布相对均衡, 花与须的黄酮含量整体偏低, 花中各成分含量均在 0.5 mg/g 以下, 须中除杨梅素外, 其余成分含量均低于 0.3 mg/g。这种分布差异明确了多花黄精不同部位黄酮类成分的独特特征, 为其针对性开发与合理利用提供了更为严谨的科学依据。

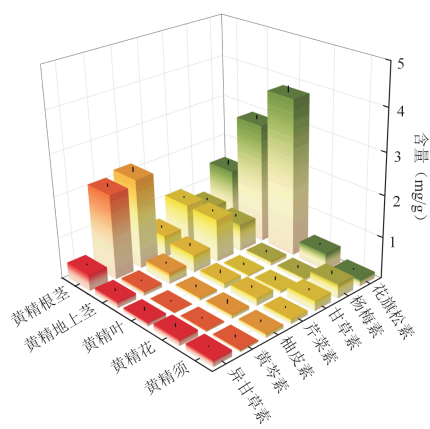


图8 多花黄精各营养器官中7种黄酮含量柱状图

Figure 8. Column chart of the contents of 7 flavonoids in different nutritional organs of *Polygonatum cyrtonema*

2.7.2 PCA 及聚类树分析

多花黄精各营养器官中7种黄酮的PCA与聚类树分析结果相互印证如图9所示, PCA显示前3个主成分累计方差贡献率达99.11%, PC1 (71.01%) 由6种黄酮共同驱动, PC2 (16.95%) 以花旗松素为核心载荷, 叶因花旗松素含量显著高于其他器官, 在PCA空间中独立分布, 凸显其黄酮合成的核心功能, 根茎与地上茎、花与须分别呈现相近的分布特征; 聚类树则将5个部位划分为3大类, 叶单独成簇, 与PCA结果完全对应, 反映其黄酮组成的独特性; 根茎与地上茎、花与须分别聚为一组, 根茎富集柚皮素、黄芩素, 地上茎成分分布均衡, 二者物质转运与储存功能相近, 聚类关系紧密; 花与须黄酮整体含量偏低, 合成积累能力弱, 聚类特征一致, 该结果与各部位生理功能相契合, 从黄酮组成层面明确了器官功能分化的物质基础, 为多花黄精不同部位的靶向开发提供了分类学依据^[14]。

2.7.3 Spearman 相关性分析

对多花黄精不同部位所含的黄酮单体含量进行Spearman相关性分析, 图10结果显示, 杨梅素与甘草素、柚皮素与黄芩素呈显著正相关, 花旗松素与异甘草素呈负相关。

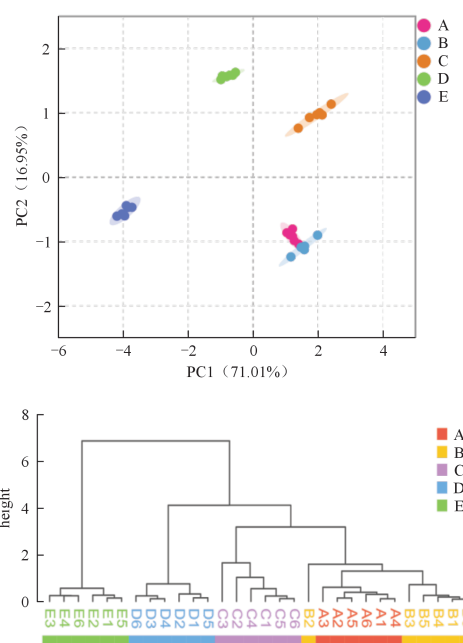


图9 多花黄精各营养器官中7种黄酮的PCA及聚类树分析

Figure 9. PCA and cluster tree analysis of 7 flavonoids in different nutritional organs of *Polygonatum cyrtonema*
注: A. 须; B. 花; C. 叶; D. 地上茎; E. 根茎。

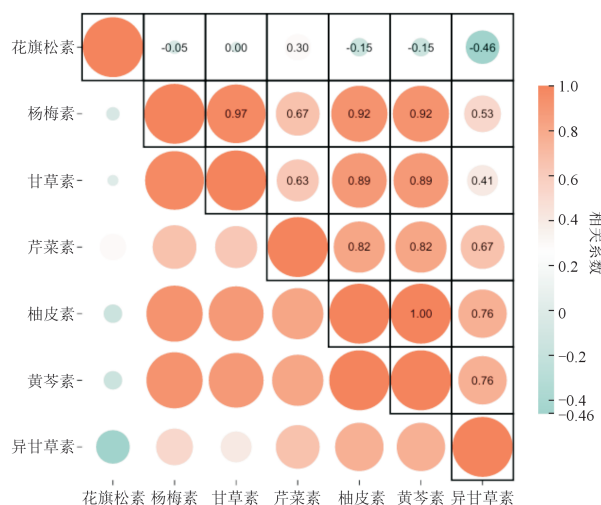


图10 多花黄精各营养器官中7种黄酮含量的Spearman相关性分析

Figure 10. Spearman correlation analysis of the contents of 7 flavonoids in different nutritional organs of *Polygonatum cyrtonema*

3 讨论

多花黄精作为传统补益中药, 黄酮类成分是其发挥抗氧化、抗炎、降血糖等活性的关键物质基础, 精准解析其分布特征、优化提取条件, 对资源高效利用意义重大^[15]。本研究结果证实,

黄酮组分在多花黄精不同营养器官中存在明显的分布差异,具备显著组织特异性;叶、根茎为黄酮高富集部位,具备优先开发价值。这种分布特征与各器官合成、转运、贮藏的生理功能特点相匹配,也进一步佐证了黄酮类成分合成转运具备组织专属特性的研究结论^[16]。

本研究采用 HPLC 定量检测,方法精准、结果可靠。相较于传统研究多单一聚焦多花黄精根茎的局限,本研究系统覆盖植株全部营养器官,明确了多花黄精叶与根茎的核心开发价值。流速选择 0.6 mL/min 是因为可延长 7 种结构相似黄酮类化合物的保留时间,改善重叠峰的分离度。提取条件优化是黄酮高效获取的核心。单因素料液比试验显示,超过 1:15 后黄酮提取量持续下降,是因为过量萃取溶剂可能在稀释黄酮浓度时提取更多杂质^[17-18]。PSO 算法优化结果(乙醇浓度 75%、提取温度 95 °C、提取时间 1.5 h、料液比 1:20)与正交试验最优提取条件(乙醇浓度 70%、提取温度 90 °C、提取时间 1.5 h、料液比 1:15)存在显著差异,核心原因在于 2 种方法的搜索特性不同:正交试验仅覆盖 3 个水平离散参数组合,其最优解是离散水平内的最佳组合,但无法捕捉因素间连续交互作用,如 75% 乙醇与 95 °C 的协同效应;而 PSO 算法突破正交试验离散限制,通过连续空间搜索,挖掘出更优组合,不仅收敛速度显著更快,能快速逼近最优解,且参数调节更为简单,提取率较正交试验提升 34.8%,充分凸显智能算法在中药材多活性组分提取条件优化中的应用价值,与文献报道的 PSO 算法在多组分提取优化中的高效性相一致,为工业化高效提取提供了科学参数^[19]。

黄酮成分的相关性特征可有效反映其体内合成代谢的内在关联。杨梅素与甘草素均以 C6-C3-C6 为基本骨架,共享苯丙素生物合成途径的上游前体,黄精体内可能存在对黄酮合成上游步骤的共同调控机制,使得不同分支路径的黄酮单体在器官水平上表现出同步积累的特征^[20]。柚皮素与黄芩素结构特征均为黄酮母核衍生物,二者在 A 环、B 环取代模式相近,其共享上游苯丙氨酸途径关键酶,在转录调控与底物竞争层面具有一致性^[21];花旗松素与异甘草素呈显著负相关,源于二者共享查尔酮类共同前体,在黄酮合成通路中存在底物竞争分配机制。根茎作为黄酮

主要储存器官,倾向优先积累异甘草素等稳定型黄酮;而地上茎是物质转运枢纽,优先向叶片供给花旗松素合成所需底物,导致异甘草素积累较低。这种器官功能差异决定的底物流向分化,是二者含量呈负相关的组织特异性原因^[22]。这也证实不同黄酮单体之间存在协同合成与底物竞争的动态调控关系,可为后续多花黄精黄酮合成机制的调控研究提供理论参考与研究线索。该研究结果不仅能够完善多花黄精的质量评价体系,推动其药用资源的综合开发与高效利用,同时也为其他药用植物的活性成分挖掘与机制研究提供了可行的研究范式。

参考文献

- 1 宋添力,张钰,肖强,等.黄精化学成分以及药用价值的研究进展[J].中华中医药学刊,2024,42(11):119-26. [Song TL, Zhang Y, Xiao Q, et al. Research progress on chemical constituents and medicinal value of *Polygonatum Rhizoma*[J]. Chinese Archives of Traditional Chinese Medicine, 2024, 42(11): 119-126.] DOI: 10.13193/j.issn.1673-7717.2024.11.024.
- 2 李彦力,苏艺,袁晚晴,等.黄精主要活性成分、功能及其作用机制研究进展[J].现代食品科技,2023,39(12):354-363. [Li YL, Su Y, Yuan WQ, et al. Research progress on main active components, functions and action mechanisms of *Polygonatum Rhizoma*[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 354-363.] DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.12.1564.
- 3 Lin HY, Wang WH, Peng MQ, et al. Pharmacological properties of *Polygonatum* and its active ingredients for the prevention and treatment of cardiovascular diseases[J]. Chin Med, 2024, 19(1): 1. DOI: 10.1186/s13020-023-00871-0.
- 4 Ye XP, Hu YY, Chen YX, et al. Flavonoids from the genus *Polygonatum*: biological activities and biosynthesis mechanism[J]. Front Nutr, 2025, 12: 1574182. DOI: 10.3389/fnut.2025.1574182.
- 5 祝艺星,朱海青,过利敏,等.雪菊总黄酮提取工艺优化及不同溶剂萃取物的抗氧化活性研究[J].新疆农业科学,2026,63(1):107-116. [Zhu YX, Zhu HQ, Guo LM, et al. Optimization of extraction technology for total flavonoids from *Coreopsis tinctoria* and antioxidant activity of extracts with different solvents[J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2026, 63(1): 107-116.] DOI: 10.6048/j.issn.1001-4330.2026.01.010.
- 6 Wang Z, Yang SL, Gao YJ, et al. Extraction and purification of antioxidative flavonoids from *Chionanthus retusa* leaf[J]. Front Bioeng Biotechnol, 2022, 10: 1085562. DOI: 10.3389/fbioe.2022.1085562.
- 7 杜妹玲,陈志红,朱轩池,等.响应面和粒子群-人工神经网络模型优化微波辅助提取赤芍总苷工艺[J].食品工业科技,2023,44(15):248-257. [Du ML, Chen ZH, Zhu XC, et al. Optimization of microwave-assisted extraction process for total paeoniflorins from *Paeonia lactiflora* by response surface methodology and particle

- swarm optimization-artificial neural network model[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(15): 248–257.] DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2022110133](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022110133).
- 8 Jahandideh-Tehrani M, Bozorg-Haddad O, Loćiciga HA. Application of particle swarm optimization to water management: an introduction and overview[J]. Environ Monit Assess, 2020, 192(5): 281. DOI: [10.1007/s10661-020-8228-z](https://doi.org/10.1007/s10661-020-8228-z).
 - 9 李运, 王苗, 刘晓玲, 等. 基于HPLC指纹图谱结合多成分含量测定和化学模式识别的大山楂丸质量评价[J]. 中国药学杂志, 2024, 59(24): 2372–2783. [Li Y, Wang M, Liu XL, et al. Quality evaluation of Dashanzha pills based on HPLC fingerprint combined with multi-component content determination and chemical pattern recognition[J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2024, 59(24): 2372–2383.] DOI: [10.11669/cpj.2024.24.010](https://doi.org/10.11669/cpj.2024.24.010).
 - 10 Xu SL, Luo HY, Chen HW, et al. Optimization of extraction of total trans-resveratrol from peanut seeds and its determination by HPLC[J]. J Sep Sci, 2020, 43(6): 1024–1031. DOI: [10.1002/jssc.201900915](https://doi.org/10.1002/jssc.201900915).
 - 11 徐胜, 屈曾义, 毕健丽, 等. 基于BP-ANN优化提取HPLC特征图谱测定3种黄精辐照前后黄酮含量变化[J]. 食品工业科技, 2021, 42(5): 257–264. [Xu S, Qu ZY, Bi JL, et al. Determination of flavonoid content changes in three *Polygonatum species* before and after irradiation by HPLC characteristic chromatogram based on BP-ANN optimized extraction[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(5): 257–264.] DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2020050171](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050171).
 - 12 向泽栋, 薛晴, 于海涛, 等. HPLC波长切换法同时测定经典名方槐花散中5种成分的含量[J]. 中国药房, 2021, 32(16): 1964–1968. [Xiang ZD, Xue Q, Yu HT, et al. Simultaneous determination of five components in classical prescription Huaihua San by HPLC with wavelength switching[J]. China Pharmacy, 2021, 32(16): 1964–1968.] DOI: [10.6039/j.issn.1001-0408.2021.16.08](https://doi.org/10.6039/j.issn.1001-0408.2021.16.08).
 - 13 Lezoul NEH, Belkadi M, Habibi F, et al. Extraction processes with several solvents on total bioactive compounds in different organs of three medicinal plants[J]. Molecules, 2020, 25(20): 4672. DOI: [10.3390/molecules25204672](https://doi.org/10.3390/molecules25204672).
 - 14 Wan XL, Xiao Q. Integrative analysis of the metabolome and transcriptome provides insights into the mechanisms of flavonoid biosynthesis in *Polygonatum*[J]. PloS One, 2025, 20(1): e0318026. DOI: [10.1371/journal.pone.0318026](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0318026).
 - 15 Wan K, Ban JJ, Yang FJ, et al. Transcriptomic analysis reveals the flavonoid biosynthesis pathway involved in rhizome development in *Polygonatum cyrtoneura* Hua[J]. Plants (Basel), 2024, 13(11): 1524. DOI: [10.3390/plants13111524](https://doi.org/10.3390/plants13111524).
 - 16 Han ZJ, Gong QQ, Huang SY, et al. Machine learning uncovers accumulation mechanism of flavonoid compounds in *Polygonatum cyrtoneura* Hua[J]. Plant Physiol Biochem, 2023, 201: 107839. DOI: [10.1016/j.plaphy.2023.107839](https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2023.107839).
 - 17 Mo XC, Wang L, Yu CH, et al. Combined metabolomics and transcriptomics analysis of the distribution of flavonoids in the fibrous root and taproot of *Polygonatum kingianum* Coll. et Hemsl[J]. Genes, 2024, 15(7): 828. DOI: [10.3390/genes15070828](https://doi.org/10.3390/genes15070828).
 - 18 郭海涛, 姜媛媛, 刘浩, 等. 滇黄精多糖的提取工艺优化、纯化及其抗衰老活性研究[J]. 药学报, 2025, 60(10): 3214–3221. [Guo HT, Jiang YY, Liu H, et al. Optimization of extraction process, purification and anti-aging activity of polysaccharides from *Polygonatum kingianum*[J]. Acta Pharmaceutica Sinica, 2025, 60(10): 3214–3221.] DOI: [10.16438/j.0513-4870.2025-0600](https://doi.org/10.16438/j.0513-4870.2025-0600).
 - 19 Li S, Cui HL, Wang JY, et al. Qualitative and quantitative analysis on flavonoid distribution in different floral parts of 42 hemerocallis accessions[J]. Front Plant Sci, 2021, 12: 670506. DOI: [10.3389/fpls.2021.670506](https://doi.org/10.3389/fpls.2021.670506).
 - 20 Liu CL, Xu FR, Zhang Q, et al. Ultrasound-assisted enzyme extraction of total flavonoids from lotus leaf (*Nelumbo nucifera* Gaertn.) and its antioxidant activity[J]. LWT, 2025, 215: 117224. DOI: [10.1016/j.lwt.2024.117224](https://doi.org/10.1016/j.lwt.2024.117224).
 - 21 Zhao C, Xu J, Liu Y, et al. Extraction and purification of flavonoids and antiviral and antioxidant activities of *Polygonum perfoliatum* L.[J]. 2025, 30(1): 29. DOI: [10.3390/molecules30010029](https://doi.org/10.3390/molecules30010029).
 - 22 Xu MH, Cao L, Lu DW, et al. Application of swarm intelligence optimization algorithms in image processing: a comprehensive review of analysis, synthesis, and optimization[J]. Biomimetics, 2023, 8(2): 235. DOI: [10.3390/biomimetics8020235](https://doi.org/10.3390/biomimetics8020235).

收稿日期: 2026 年 03 月 13 日 修回日期: 2026 年 07 月 07 日
 本文编辑: 钟巧妮 沈静怡