

基于多指标定量及化学计量学联合 CRITIC-TOPSIS 法对不同产地黄姜花的质量差异评价

张立群¹, 冯 恺², 李怡然³, 刘 云², 徐 虹^{1,2*}

1. 上海交通大学医学院附属瑞金医院 药剂科, 上海 200025

2. 上海中医药大学中药学院, 上海 201203

3. 南方科技大学伦敦国王学院医学院, 广东 深圳 518055

摘要: **目的** 基于多指标含量测定, 采用主成分分析 (principal component analysis, PCA)、偏最小二乘-判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 及 CRITIC-TOPSIS 法评价不同产地黄姜花 *Hedychium flavum* 质量差异, 为进一步开发利用提供依据。 **方法** 采用 HPLC 法, BetaMax Neutral C₁₈ 色谱柱, 乙腈-0.4%磷酸水溶液梯度洗脱; 采集不同产地 17 批黄姜花, 检测原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇含量, 并检查浸出物和总灰分, 以 PCA 和 PLS-DA 方法对 17 批黄姜花进行分组, 筛选质量差异标志物; 以 CRITIC 法计算各指标权重, 采用 TOPSIS 法构建黄姜花综合质量评价模型。 **结果** 17 批黄姜花中以上 15 个指标含量分别为 0.121~0.295、0.044~0.091、0.036~0.104、0.400~1.071、0.300~0.515、0.902~1.677、0.089~0.153、0.473~0.916、0.177~0.378、0.136~0.249、0.068~0.117、0.223~0.453、0.240~0.863 mg/g, 11.4%~21.5%、3.1%~9.2%。PCA 分析得 2 个主成分的累积方差贡献率为 87.564%, 并将 17 批黄姜花分为 3 类; PLS-DA 分析筛选出山柰酚、姜花素 A、原儿茶酸、浸出物、 β -谷甾醇、异姜花素 D 和槲皮素为质量差异标志物; CRITIC-TOPSIS 法结果显示 17 批黄姜花样品的综合相对接近度为 0.421 6~0.618 1, 贵州和四川产地样品质量较优。 **结论** 所建立的多指标定量结合 PCA、PLS-DA 及 CRITIC-TOPSIS 法可综合评价不同产地黄姜花药材质量差异, 且该方法科学直观、准确可靠, 可为黄姜花的质量差异评价提供参考。

关键词: 黄姜花; 高效液相色谱法; 主成分分析; 偏最小二乘-判别分析; CRITIC-TOPSIS 法; 质量差异评价; 原儿茶酸; 对香豆酸; 阿魏醛; 异姜花素 D; 姜花素 D; 姜花素 A; 姜花素 E; 槲皮素; 山柰酚; 异鼠李素; 胡萝卜苷; 豆甾醇; β -谷甾醇

中图分类号: R282.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)14-5667-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.14.026

Quality difference evaluation of *Hedychium flavum* from different origins based on multi-index quantitation and chemometrics combined with CRITIC-TOPSIS method

ZHANG Liqun¹, FENG Kai², LI Yiran³, LIU Yun², XU Hong^{1,2}

1. Department of Pharmacy, Ruijin Hospital, Shanghai Jiao Tong University School of Medicine, Shanghai 200025, China

2. School of Pharmacy, Shanghai University of Traditional Chinese Medicine, Shanghai 201203, China

3. Southern University of Science and Technology-King's College London School of Medicine, Shenzhen 518055, China

Abstract: Objective To evaluate the quality difference evaluation of *Hedychium flavum* from different origins based on multi-index content determination, using principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) and CRITIC-TOPSIS methods, so as to provide a basis for further development and utilization. **Methods** HPLC was used with BetaMax Neutral C₁₈ column, acetonitrile-0.4%phosphoric acid solution as mobile phase with gradient elution, detection wavelength of 320, 230, 360 and 210 nm. A total of 17 batches of *H. flavum* from different origins were collected. The contents of 13 chemical constituents including protocatechuic acid, trans-4-hydroxycinnamic acid, coniferaldehyde, isocoronarin D, coronarin D, coronarin A, coronarin E,

收稿日期: 2026-01-09

基金项目: 海南省药物警戒创新研究课题 (HNPV20)

作者简介: 张立群 (1982—), 男, 江苏连云港人, 硕士, 主管药师, 研究方向为药物质量评价、药物分析。Tel: (021)64370045

*通信作者: 徐 虹 (1984—), 女, 江苏建湖人, 本科, 主管药师, 研究方向为药物质量评价、医院药学。

Tel: (021)64370045 E-mail: wejr36@163.com

quercetin, kaempferol, isorhamnetin, daucosterol, stigmasterol, β -sitosterol were detected, while extractives and total ash were examined. The 17 batches of *H. flavum* were grouped using PCA and PLS-DA methods, and quality differential markers were screened out. The weights of each index was calculated using the CRITIC method, and a comprehensive quality evaluation model for *H. flavum* was constructed using the TOPSIS method. **Results** The contents of the above 13 indexes among 17 batches of *H. flavum* were 0.121—0.295, 0.044—0.091, 0.036—0.104, 0.400—1.071, 0.300—0.515, 0.902—1.677, 0.089—0.153, 0.473—0.916, 0.177—0.378, 0.136—0.249, 0.068—0.117, 0.223—0.453, 0.240—0.863 mg/g, while the ranges of extractives and total ash were 11.4%—21.5% and 3.1%—9.2 %, respectively. PCA results showed that the cumulative variance contribution rate of two principal components was 87.564%, and 17 batches of *H. flavum* were divided into three categories. Kaempferol, coronarin A, protocatechuic acid, extractives, β -sitosterol, isocoronarin D and quercetin were selected as quality differential markers by PLS-DA methods. The results of CRITIC-TOPSIS method showed that the comprehensive relative proximities of 17 batches of *H. flavum* samples was 0.421 6—0.618 1. The quality of samples from Guizhou and Sichuan provinces exhibited superior comprehensive quality. **Conclusion** The established multi-index quantitative combined with PCA, PLS-DA and CRITIC-TOPSIS method can comprehensively evaluate the quality difference of *H. flavum* from different habitats. The method is scientific, intuitive, accurate and reliable, which can provide a theoretical and technical reference for the quality difference evaluation of *H. flavum*.

Key words: *Hedychium flavum* Roxb.; HPLC; PCA; PLS-DA; CRITIC-TOPSIS; quality difference evaluation; protocatechuic acid; trans-4-hydroxycinnamic acid; coniferaldehyde; isocoronarin D; coronarin D; coronarin A; coronarin E; quercetin; kaempferol; isorhamnetin; daucosterol; stigmasterol; β -sitosterol

黄姜花药材源于姜科植物黄姜花 *Hedychium flavum* Roxb. 的根茎^[1], 又名“夜寒苏”, 为贵州黔东南苗族民间地区用于食疗的药用植物^[2]。主要分布在我国贵州、四川、西藏、云南、广西等南部至西南部的地区^[3]。黄姜花具有祛风散寒、温经止痛的功效, 主要用于治疗风寒感冒、头痛身痛、风湿痹痛、脘腹冷痛、跌打损伤等^[4-5]。主要含有酚酸类、二苯庚烷类、黄酮类、甾体类和挥发性成分等^[6-7], 化学成分较为复杂, 研究发现黄姜花还具有抗炎、抗菌、抗氧化及镇痛等功能^[8-10]。黄姜花暂未被中国药典收录, 质量控制与评价均比较薄弱。主成分分析 (principal component analysis, PCA) 通过多变量数据衡量样品的相似性, 达到对样品归类, 显示不同样品间的差异; 偏最小二乘-判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 为潜变量回归分析方法, 克服了共线性问题, 保留了多变量的最大信息量, 能够更好地描述因变量和测量数据变量的特征, 这 2 种方法为化学计量学^[11]最常用的分析方法, 在中药材质量评价体系中的应用日趋广泛^[12-13]。相关性衡量准则重要性 (criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC) 法^[14]计算各指标权重过程中, 运用指标的变异性、冲突性和信息量, 数据关联性强^[13, 15]。逼近理想解排序 (TOPSIS) 法^[16]常与其他统计学方法联用, 以评价样本与理想目标的欧氏距离为参照, 对评价样本进行品质排序, 结果科学直观^[17-18]。本研究利用 HPLC 法检测 17 批黄姜花样品中原儿茶酸、对香豆

酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇含量, 并检查浸出物和总灰分, 利用化学计量学分析对不同产地黄姜花进行归类, 寻找黄姜花质量差异因子; 结合 CRITIC-TOPSIS 法构建黄姜花的多指标质量差异评估模型, 旨在为黄姜花的质量差异评价提供借鉴。

1 材料

1.1 试药

对照品槲皮素 (质量分数 98.7%, 批号 100081-202411)、原儿茶酸 (质量分数 97.5%, 批号 110809-202207)、异鼠李素 (质量分数 98.0%, 批号 110860-202513) 和山柰酚 (质量分数 96.1%, 批号 110861-202515), 中国食品药品检定研究院; 对香豆酸 (质量分数 98.3%, 批号 CFS201502)、阿魏醛 (质量分数 98.2%, 批号 CFS202301)、异姜花素 D (质量分数 98.3%, 批号 CFS202101)、姜花素 D (质量分数 98.6%, 批号 CFS202101)、 β -谷甾醇 (质量分数 98.5%, 批号 CFS202302)、姜花素 A (质量分数 98.0%, 批号 CFS202101)、姜花素 E (质量分数 98.0%, 批号 CFS202301)、胡萝卜苷 (质量分数 98.3%, 批号 CFS202202) 和豆甾醇 (质量分数 98.5%, 批号 CFS202301), 武汉天植生物技术有限公司; 色谱级乙腈和磷酸源于美国 Tedia 公司, 甲醇为分析纯; 黄姜花药材经上海中医药大学刘云高级实验师鉴定为姜科植物黄姜花 *H. flavum* Roxb. 的根茎, 采集信息见表 1。

表 1 样品信息

Table 1 Information of samples

编号	产地	采集时间	编号	产地	采集时间
S1	四川天全县	2025-09	S10	西藏察隅县	2025-09
S2	四川米易县	2025-09	S11	西藏左贡县	2025-09
S3	四川雷波县	2025-09	S12	云南凤庆县	2025-10
S4	贵州贞丰县	2025-10	S13	云南勐腊县	2025-10
S5	贵州望谟县	2025-10	S14	云南富宁县	2025-10
S6	贵州兴义市	2025-10	S15	广西融水县	2025-09
S7	贵州安龙县	2025-10	S16	广西那坡县	2025-09
S8	西藏墨脱县	2025-09	S17	广西南丹县	2025-09
S9	西藏波密县	2025-09			

1.2 仪器

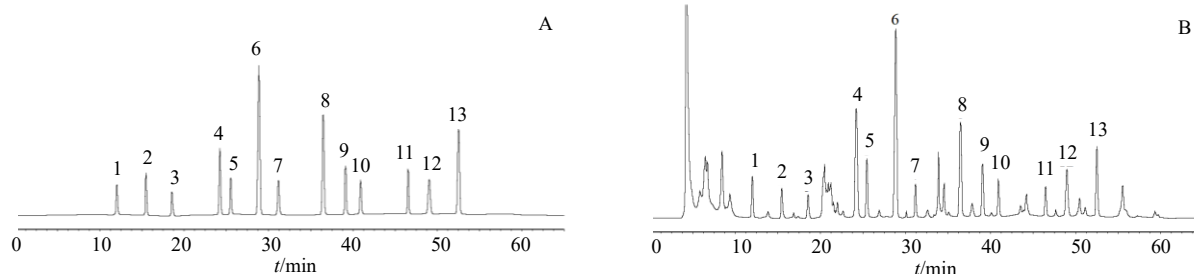
Dinex Ultimate3000 型高效液相色谱仪 (美国 Thermo Fisher 公司); CP225D 型分析天平 (德国 Sartorius 公司)。

2 方法与结果

2.1 色谱条件

采用 BetaMax Neutral C₁₈ (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 色谱柱; 检测波长: 320 nm (0~21 min, 原儿茶酸、对香豆酸和阿魏醛)、230 nm (21~34 min, 异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A 和姜花素 E)、360 nm (34~43 min, 槲皮素、山柰酚和异鼠李素)、

210 nm (43~65 min, 胡萝卜苷、豆甾醇和 β-谷甾醇), 乙腈 (A)-0.4%磷酸 (B) 梯度洗脱 (0~10 min, 15.0% A; 10~21 min, 15.0%~32.0% A; 21~34 min, 32.0%~56.0% A; 34~43 min, 56.0%~82.0% A; 43~55 min, 82.0%~90.0% A; 55~65 min, 90.0%~15.0% A); 柱温 30 °C, 进样体积 10 μL, 体积流量 1.0 mL/min。结果对照品溶液及供试品溶液中原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β-谷甾醇色谱峰对称度良好, 与周围色谱峰能完全分离 (图 1)。



1-原儿茶酸; 2-对香豆酸; 3-阿魏醛; 4-异姜花素 D; 5-姜花素 D; 6-姜花素 A; 7-姜花素 E; 8-槲皮素; 9-山柰酚; 10-异鼠李素; 11-胡萝卜苷; 12-豆甾醇; 13-β-谷甾醇。

1-protocatechuic acid; 2-trans-4-hydroxycinnamic acid; 3-coniferaldehyde; 4-socoronarin D; 5-coronaridin D; 6-coronaridin A; 7-coronaridin E; 8-quercetin; 9-kaempferol; 10-isorhamnetin; 11-daucosterol; 12-stigmasterol; 13-sitosterol.

图 1 对照品 (A) 和供试品 (B) 溶液高效液相色谱图

Fig. 1 HPLC chromatograms of reference substance (A) and test sample (B) solutions

2.2 对照品溶液的制备

精密称取对照品原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇、β-谷甾醇, 用 70%甲醇混匀, 制成质量浓度分别为 0.098、0.034、0.026、0.290、0.162、0.590、0.056、0.270、0.144、0.078、0.042、0.130、0.216 mg/mL 的

混合对照品贮备液, 精密吸取贮备液, 用 70%甲醇稀释 20 倍, 混匀, 即得 (以上对照品质量浓度分别为 4.90、1.70、1.30、14.50、8.10、29.50、2.80、13.50、7.20、3.90、2.10、6.50、10.80 μg/mL)。

2.3 供试品溶液的制备

取黄姜花粉末 (过 3 号筛) 约 0.5 g, 精密称定, 加 70%甲醇 25 mL, 称量, 加热回流 30 min,

放冷,补足质量,摇匀,滤过,即得。

2.4 线性关系考察

精密量取“2.2”项混合对照品贮备液,用70%甲醇逐级稀释定容,制得不同质量浓度的混合对照品溶液。按照“2.1”项条件检测,收集原

儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇色谱峰面积,对各成分质量浓度与峰面积进行线性回归,结果见表 2。

表 2 各成分的回归方程与线性范围

Table 2 Regression equations and linear ranges of components

对照品	回归方程	线性范围/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	<i>r</i>
原儿茶酸	$Y=2.143\ 5\times 10^6 X+365.1$	0.49~24.50	0.999 7
对香豆酸	$Y=8.851\ 2\times 10^5 X+849.2$	0.17~8.50	0.999 6
阿魏醛	$Y=6.356\ 9\times 10^5 X-561.4$	0.13~6.50	0.999 8
异姜花素 D	$Y=5.299\ 6\times 10^6 X+1\ 128.9$	1.45~72.50	0.999 4
姜花素 D	$Y=3.370\ 8\times 10^6 X+2\ 027.5$	0.81~40.50	0.999 9
姜花素 A	$Y=5.895\ 4\times 10^6 X+601.3$	2.95~147.50	0.999 7
姜花素 E	$Y=1.488\ 7\times 10^6 X+1\ 594.3$	0.28~14.00	0.999 4
槲皮素	$Y=4.364\ 1\times 10^6 X-1\ 039.8$	1.35~67.50	0.999 6
山柰酚	$Y=2.991\ 2\times 10^6 X+754.7$	0.72~36.00	0.999 5
异鼠李素	$Y=1.804\ 3\times 10^6 X+465.2$	0.39~19.50	0.999 3
胡萝卜苷	$Y=1.127\ 1\times 10^6 X+806.5$	0.21~10.50	0.999 2
豆甾醇	$Y=2.587\ 6\times 10^6 X+953.7$	0.65~32.50	0.999 9
β -谷甾醇	$Y=3.702\ 3\times 10^6 X-1\ 150.4$	1.08~54.00	0.999 8

2.5 精密度试验

取黄姜花(S1)样品,按照“2.3”项方法制备供试品溶液,重复 6 次检测,收集原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇峰面积数据,计算各成分峰面积的 RSD 分别为 1.41%、1.76%、1.81%、1.09%、1.14%、0.96%、1.54%、1.04%、1.28%、1.37%、1.68%、1.32%、1.16%,均<2.0%,表明仪器精密度良好。

2.6 稳定性试验

取黄姜花(S1)样品,按照“2.3”项方法制备供试品溶液,于 0、2、4、8、16、24 h 检测,收集原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇峰面积数据,计算各成分峰面积的 RSD 分别为 1.51%、1.81%、1.89%、1.16%、1.41%、1.08%、1.64%、1.24%、1.43%、1.60%、1.72%、1.46%、1.35%,表明黄姜花供试品溶液具有 24 h 稳定性。

2.7 重复性试验

精密称取黄姜花(S1)粉末,按照“2.3”项方法制备供试品溶液 6 份,检测,计算原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇含量,结果各成分质量分数

的 RSD 分别为 1.58%、1.87%、1.93%、1.30%、1.51%、1.14%、1.76%、1.26%、1.49%、1.62%、1.75%、1.54%、1.32%,表明该方法重复性良好。

2.8 加样回收率试验

取已知原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇含量分别为 0.211、0.072、0.056、0.762、0.347、1.259、0.113、0.612、0.301、0.156、0.086、0.274、0.518 mg/g 的黄姜花(S1)共 9 份,每份 0.25 g,精密称定,3 份为一组,各加入 0.8、1.0、1.2 mL 混合对照品溶液(含 0.051 mg/mL 原儿茶酸、0.016 mg/mL 对香豆酸、0.013 mg/mL 阿魏醛、0.194 mg/mL 异姜花素 D、0.089 mg/mL 姜花素 D、0.312 mg/mL 姜花素 A、0.027 mg/mL 姜花素 E、0.156 mg/mL 槲皮素、0.074 mg/mL 山柰酚、0.038 mg/mL 异鼠李素、0.021 mg/mL 胡萝卜苷、0.071 mg/mL 豆甾醇和 0.124 mg/mL β -谷甾醇),再按照“2.3”项方法制成供试品溶液,进样,计算 13 个成分的平均加样回收率分别为 97.98%、97.59%、98.49%、99.26%、98.49%、100.05%、97.99%、100.13%、98.72%、98.51%、96.98%、98.86%和 99.34%,RSD 分别为 1.14%、1.44%、1.66%、1.67%、1.46%、0.63%、1.57%、0.89%、1.19%、1.39%、1.08%、1.53%和 1.39%,表明该方法准确可靠。

2.9 样品含量测定

制备 17 批黄姜花供试品溶液, 按照“2.1”项方法检测, 测定原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异

姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇的含量, 结果见表 3。各成分质量分数分别为

表 3 黄姜花中 13 个成分含量测定结果 ($n=3$)

Table 3 Determination results of 13 components in *Hedychium flavum* ($n=3$)

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)												
	原儿茶酸	对香豆酸	阿魏醛	异姜花素 D	姜花素 D	姜花素 A	姜花素 E	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	胡萝卜苷	豆甾醇	β -谷甾醇
S1	0.211	0.072	0.056	0.762	0.347	1.259	0.113	0.612	0.301	0.156	0.086	0.274	0.518
S2	0.270	0.091	0.060	0.719	0.374	1.159	0.103	0.656	0.347	0.169	0.095	0.308	0.602
S3	0.295	0.078	0.062	0.492	0.424	1.309	0.116	0.621	0.378	0.160	0.090	0.419	0.390
S4	0.243	0.082	0.074	0.594	0.399	1.286	0.108	0.695	0.342	0.186	0.083	0.370	0.491
S5	0.260	0.086	0.066	0.678	0.386	1.242	0.110	0.716	0.370	0.173	0.088	0.350	0.574
S6	0.253	0.076	0.071	0.576	0.422	1.376	0.116	0.738	0.378	0.179	0.081	0.387	0.462
S7	0.220	0.072	0.076	0.528	0.400	1.280	0.102	0.656	0.327	0.199	0.075	0.402	0.419
S8	0.172	0.086	0.043	0.436	0.324	0.905	0.096	0.869	0.215	0.142	0.073	0.344	0.280
S9	0.186	0.070	0.045	0.499	0.337	1.082	0.098	0.846	0.212	0.159	0.075	0.379	0.299
S10	0.132	0.066	0.036	0.400	0.312	0.902	0.093	0.916	0.232	0.146	0.068	0.453	0.270
S11	0.121	0.063	0.039	0.457	0.300	0.982	0.089	0.889	0.177	0.136	0.071	0.397	0.240
S12	0.195	0.060	0.097	0.859	0.483	1.516	0.143	0.522	0.330	0.200	0.110	0.268	0.792
S13	0.235	0.056	0.100	0.902	0.471	1.583	0.149	0.551	0.253	0.249	0.117	0.229	0.772
S14	0.164	0.053	0.093	0.943	0.515	1.614	0.140	0.506	0.353	0.211	0.105	0.331	0.737
S15	0.203	0.049	0.104	1.071	0.498	1.646	0.153	0.473	0.292	0.241	0.115	0.248	0.835
S16	0.159	0.046	0.090	0.986	0.447	1.659	0.146	0.576	0.193	0.224	0.112	0.223	0.863
S17	0.179	0.044	0.080	0.812	0.459	1.677	0.136	0.595	0.320	0.217	0.108	0.291	0.705

0.121~0.295、0.044~0.091、0.036~0.104、0.400~1.071、0.300~0.515、0.902~1.677、0.089~0.153、0.473~0.916、0.177~0.378、0.136~0.249、0.068~0.117、0.223~0.453、0.240~0.863 mg/g, 各成分含量上下浮动较大。

2.10 浸出物和总灰分含量测定

取 17 批黄姜花 (S1~S17), 分别精密称取 2 g, 加水 50 mL, 参照《中国药典》2025 年版四部^[19]热浸法操作, 以干燥品计算浸出物的量。取 17 批黄姜花 (S1~S17), 各精密称取 5 g, 置炽灼至恒定的坩埚中, 称量, 炽热至完全炭化时, 升温至 550 °C, 使完全灰化并至恒定, 计算总灰分的含量。结果见表 4。

表 4 浸出物和总灰分测定结果 ($n=3$)

Table 4 Determination results of extractives and total ash ($n=3$)

编号	浸出物/%	总灰分/%	编号	浸出物/%	总灰分/%
S1	20.6	3.2	S10	12.1	6.9
S2	19.8	3.1	S11	15.0	5.8
S3	20.4	3.6	S12	14.2	7.1
S4	20.1	3.3	S13	12.8	8.3
S5	21.5	4.1	S14	13.1	8.5
S6	21.2	3.8	S15	11.5	9.2
S7	16.5	5.4	S16	15.7	8.2
S8	11.4	5.5	S17	16.4	9.1
S9	13.8	6.5			

2.11 PCA

采用 SPSS 26.0 软件对 17 批黄姜花中 15 个指标含量数据进行 PCA, 以特征值 >1 , 且满足累积方差贡献率 $>85\%$ 为基准提取主成分。表 5 显示前 2 个主成分的累积方差贡献率为 87.564%, 特征值分别为 9.774 和 3.361。表 6 显示对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇对第 1 主成分贡献较大, 原儿茶酸、山柰酚、浸出物和总灰分对第 2 主成分贡献较大。利用 SIMCA 14.1 软件对以上数据进行 PCA, 结果见图 2, 显示 17 批不同产地黄姜花分为 3 组, 源于贵州和四川 S1~S7 为一组, 源于西藏 S8~S11 为一组, 源于云南和广西 S12~S17 为一组。SPSS 26.0 软件完成了 PCA 数值计算 (特征值、贡献率、载荷矩阵), 以获取客观的统计参数; 而 SIMCA 14.1 软件得到的 PCA 得分图更直观表达样品的分类, 具有可视化, 二者互为补充。

2.12 PLS-DA

在 PCA 将 17 批样品分为 3 组的基础上, 进一步运行 SIMCA 14.1 软件中的 PLS-DA 程序, 得到 PLS-DA 模型 (图 3), S1~S7 为第 1 组, S8~S11 为第 2 组, S12~S17 为第 3 组, 其中模型质量参数

表5 特征值与贡献率

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	9.774	65.158	65.158
2	3.361	22.406	87.564
3	0.772	5.148	92.712
4	0.424	2.826	95.538
5	0.243	1.623	97.161
6	0.139	0.925	98.086
7	0.105	0.698	98.784
8	0.069	0.458	99.242
9	0.045	0.297	99.539
10	0.030	0.197	99.736
11	0.020	0.135	99.871
12	0.009	0.059	99.930
13	0.007	0.049	99.979
14	0.003	0.019	99.998
15	0.000	0.002	100.000

表6 因子载荷矩阵

指标	因子载荷	
	主成分 1	主成分 2
原儿茶酸	0.048	0.926
对香豆酸	-0.713	0.573
阿魏醛	0.951	0.163
异姜花素 D	0.949	0.003
姜花素 D	0.926	0.197
姜花素 A	0.957	0.140
姜花素 E	0.982	-0.006
槲皮素	-0.910	-0.312
山柰酚	0.186	0.872
异鼠李素	0.937	-0.007
胡萝卜苷	0.964	0.058
豆甾醇	-0.807	0.073
β -谷甾醇	0.962	0.108
浸出物	-0.222	0.852
总灰分	0.652	-0.697

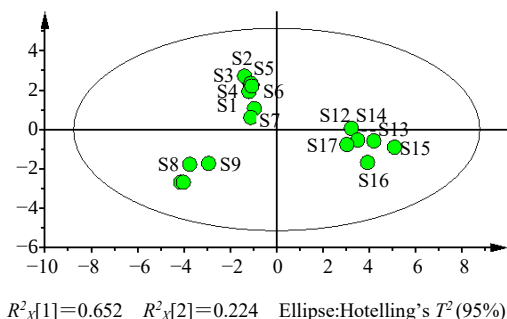


图2 17批黄姜花样品 PCA 得分图

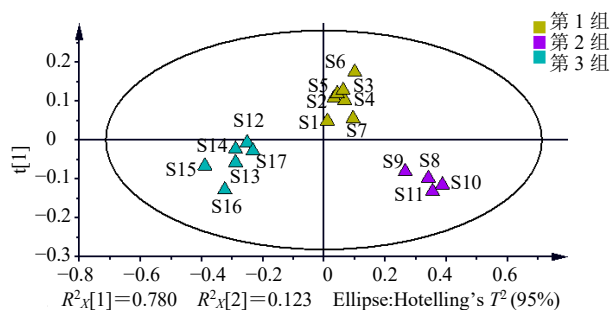
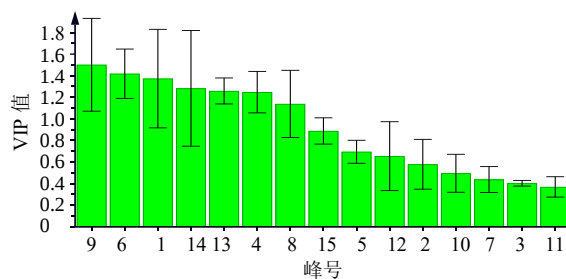
Fig. 2 Score plot of PCA for 17 batches of *H. flavum*

图3 17批黄姜花样品 PLS-DA 得分图

Fig. 3 Score plot of PLS-DA for 17 batches of *H. flavum*

R^2_X 为 0.903, R^2_Y 为 0.914, Q^2 为 0.895, 表明构建的 PLS-DA 模型区分度好。根据 15 个指标的变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) 值, 以 $VIP > 1$ 为标准^[20], 筛选具有统计学意义的 7 个差异标志物: 山柰酚、姜花素 A、原儿茶酸、浸出物、 β -谷甾醇、异姜花素 D 和槲皮素 (图 4)。进一步对 PLS-DA 模型置换检验 200 次 (图 5), 结果 Q^2 的回归线截距小于 0, 表明建立的 PLS-DA 模型未出现过拟合。



1-原儿茶酸; 2-对香豆酸; 3-阿魏醛; 4-异姜花素 D; 5-姜花素 D; 6-姜花素 A; 7-姜花素 E; 8-槲皮素; 9-山柰酚; 10-异鼠李素; 11-胡萝卜苷; 12-豆甾醇; 13- β -谷甾醇; 14-浸出物; 15-总灰分。
1-protocatechuic acid; 2-trans-4-hydroxycinnamic acid; 3-coniferinaldehyde; 4-isocoronarin D; 5-coronaridin; 6-coronaridin A; 7-coronaridin E; 8-quercetin; 9-kaempferol; 10-isorhamnetin; 11-dausterol; 12-stigmasterol; 13- β -sitosterol; 14-extract; 15-total ash.

图4 PLS-DA 中各成分 VIP 图

Fig. 4 VIP plot of each component in PLS-DA

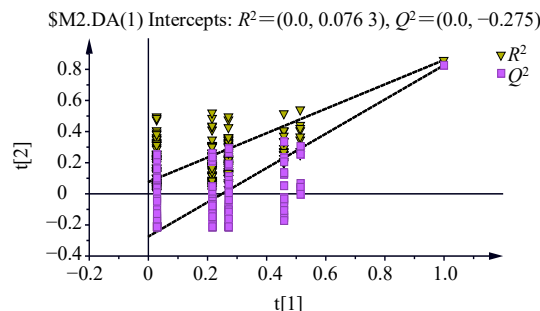


图5 PLS-DA 置换检测结果图

Fig. 5 Permutation test plot of PLS-DA model

2.13 CRITIC-TOPSIS 分析模块的建立

2.13.1 含量原始数据标准化处理 黄姜花中原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡

萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇、浸出物为正向指标，总灰分为逆向指标，同时各指标含量差异较大，且单位不一致，分别使用公式对含量原始数据进行标准化处理^[20]，结果见表 7。

表 7 黄姜花中的 15 个指标含量原始数据标准化处理结果

Table 7 Processing results of standardized of original data for 15 index contents in *H. flavum*

编号	Y_{ij}														
	原儿茶酸	对香豆酸	阿魏醛	异姜花素 D	姜花素 D	姜花素 A	姜花素 E	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	胡萝卜苷	豆甾醇	β -谷甾醇	浸出物	总灰分
S1	0.517 2	0.595 7	0.294 1	0.539 5	0.218 6	0.460 6	0.375 0	0.313 8	0.616 9	0.177 0	0.367 3	0.221 7	0.446 2	0.910 9	0.983 6
S2	0.856 3	1.000 0	0.352 9	0.475 4	0.344 2	0.331 6	0.218 8	0.413 1	0.845 8	0.292 0	0.551 0	0.369 6	0.581 1	0.831 7	1.000 0
S3	1.000 0	0.723 4	0.382 4	0.137 1	0.576 7	0.525 2	0.421 9	0.334 1	1.000 0	0.212 4	0.449 0	0.852 2	0.240 8	0.891 1	0.918 0
S4	0.701 1	0.808 5	0.558 8	0.289 1	0.460 5	0.495 5	0.296 9	0.501 1	0.820 9	0.442 5	0.306 1	0.639 1	0.402 9	0.861 4	0.967 2
S5	0.798 9	0.893 6	0.441 2	0.414 3	0.400 0	0.438 7	0.328 1	0.548 5	0.960 2	0.327 4	0.408 2	0.552 2	0.536 1	1.000 0	0.836 1
S6	0.758 6	0.680 9	0.514 7	0.262 3	0.567 4	0.611 6	0.421 9	0.598 2	1.000 0	0.380 5	0.265 3	0.713 0	0.356 3	0.970 3	0.885 2
S7	0.569 0	0.595 7	0.588 2	0.190 8	0.465 1	0.487 7	0.203 1	0.413 1	0.746 3	0.557 5	0.142 9	0.778 3	0.287 3	0.505 0	0.623 0
S8	0.293 1	0.893 6	0.102 9	0.053 7	0.111 6	0.003 9	0.109 4	0.893 9	0.189 1	0.053 1	0.102 0	0.526 1	0.064 2	0.000 0	0.606 6
S9	0.373 6	0.553 2	0.132 4	0.147 5	0.172 1	0.232 3	0.140 6	0.842 0	0.174 1	0.203 5	0.142 9	0.678 3	0.094 7	0.237 6	0.442 6
S10	0.063 2	0.468 1	0.000 0	0.000 0	0.055 8	0.000 0	0.062 5	1.000 0	0.273 6	0.088 5	0.000 0	1.000 0	0.048 2	0.069 3	0.377 0
S11	0.000 0	0.404 3	0.044 1	0.084 9	0.000 0	0.103 2	0.000 0	0.939 1	1.000 0	0.000 0	0.061 2	0.756 5	0.000 0	0.356 4	0.557 4
S12	0.425 3	0.340 4	0.897 1	0.684 1	0.851 2	0.792 3	0.843 8	0.110 6	0.761 2	0.566 4	0.857 1	0.195 7	0.886 0	0.277 2	0.344 3
S13	0.655 2	0.255 3	0.941 2	0.748 1	0.795 3	0.878 7	0.937 5	0.176 1	0.378 1	1.000 0	1.000 0	0.026 1	0.853 9	0.138 6	0.147 5
S14	0.247 1	0.191 5	0.838 2	0.809 2	1.000 0	0.918 7	0.796 9	0.074 5	0.875 6	0.663 7	0.755 1	0.469 6	0.797 8	0.168 3	0.114 8
S15	0.471 3	0.106 4	1.000 0	1.000 0	0.920 9	0.960 0	1.000 0	0.000 0	0.572 1	0.929 2	0.959 2	0.108 7	0.955 1	0.009 9	0.000 0
S16	0.218 4	0.042 6	0.794 1	0.873 3	0.683 7	0.976 8	0.890 6	0.232 5	0.079 6	0.778 8	0.898 0	0.000 0	1.000 0	0.425 7	0.163 9
S17	0.333 3	0.000 0	0.647 1	0.614 0	0.739 5	1.000 0	0.734 4	0.275 4	0.711 4	0.716 8	0.816 3	0.295 7	0.746 4	0.495 0	0.016 4

2.13.2 CRITIC 法计算权重 根据公式 (1) 和 (2) 计算变异性 (S_j)，采用公式 (3) 计算冲突性 (R_j)。再根据公式 (4) 和 (5) 计算信息量 (C_j) 和权重 (w_j)，则原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇、浸出物和总灰分的权重分别为 0.050 6、0.082 1、0.053 0、0.056 7、0.050 9、0.056 4、0.059 1、0.106 2、0.057 9、0.054 3、0.059 5、0.091 3、0.057 4、0.074 4 和 0.090 2。

$$X_j = (\sum_{i=1}^n X_{ij}) / n \quad (1)$$

$$S_j = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{ij} - X_j) / (n-1)} \quad (2)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n (1 - r_{ij}) \quad (3)$$

$$C_j = S_j \times R_j \quad (4)$$

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (5)$$

花质量差异^[21] 将上述 15 个指标的权重与标准化处理后数据相乘得 CRITIC 决策矩阵 (Z_{ij})，具体数据见表 8，以矩阵中每个指标的最大值为最优方案 (Z_j^+)，最小值为最劣方案 (Z_j^-)，利用公式 (6) ~ (8)，计算各指标到 Z_j^+ 的距离 (D_i^+)、到 Z_j^- 的距离 (D_i^-) 及各指标最优解的欧氏贴近度 (C_i)，结果见表 9。根据 C_i 值对不同产地黄姜花质量差异进行排序，结果显示贵州和四川产地黄姜花排名靠前， C_i 均值为 0.567 8。

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^+)^2} \quad (6)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Z_{ij} - Z_j^-)^2} \quad (7)$$

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (8)$$

3 讨论

3.1 评价指标的选择

黄姜花化学成分复杂，主要涉及酚酸类、二苯

2.13.3 CRITIC-TOPSIS 法融合评价不同产地黄姜

表 8 CRITIC-矩阵
Table 8 CRITIC-matrix

编号	W_j														
	原儿茶酸	对香豆酸	阿魏醛	异姜花素 D	姜花素 D	姜花素 A	姜花素 E	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	胡萝卜苷	豆甾醇	β -谷甾醇	浸出物	总灰分
S1	0.026 2	0.048 9	0.015 6	0.030 6	0.011 1	0.026 0	0.022 2	0.033 3	0.035 7	0.009 6	0.021 9	0.020 2	0.025 6	0.067 8	0.088 7
S2	0.043 3	0.082 1	0.018 7	0.027 0	0.017 5	0.018 7	0.012 9	0.043 9	0.049 0	0.015 9	0.032 8	0.033 7	0.033 4	0.061 9	0.090 2
S3	0.050 6	0.059 4	0.020 3	0.007 8	0.029 4	0.029 6	0.024 9	0.035 5	0.057 9	0.011 5	0.026 7	0.077 8	0.013 8	0.066 3	0.082 8
S4	0.035 5	0.066 4	0.029 6	0.016 4	0.023 4	0.027 9	0.017 5	0.053 2	0.047 5	0.024 0	0.018 2	0.058 3	0.023 1	0.064 1	0.087 2
S5	0.040 4	0.073 4	0.023 4	0.023 5	0.020 4	0.024 7	0.019 4	0.058 3	0.055 6	0.017 8	0.024 3	0.050 4	0.030 8	0.074 4	0.075 4
S6	0.038 4	0.055 9	0.027 3	0.014 9	0.028 9	0.034 5	0.024 9	0.063 5	0.057 9	0.020 7	0.015 8	0.065 1	0.020 5	0.072 2	0.079 8
S7	0.028 8	0.048 9	0.031 2	0.010 8	0.023 7	0.027 5	0.012 0	0.043 9	0.043 2	0.030 3	0.008 5	0.071 1	0.016 5	0.037 6	0.056 2
S8	0.014 8	0.073 4	0.005 5	0.003 0	0.005 7	0.000 2	0.006 5	0.094 9	0.010 9	0.002 9	0.006 1	0.048 0	0.003 7	0.000 0	0.054 7
S9	0.018 9	0.045 4	0.007 0	0.008 4	0.008 8	0.013 1	0.008 3	0.089 4	0.010 1	0.011 1	0.008 5	0.061 9	0.005 4	0.017 7	0.039 9
S10	0.003 2	0.038 4	0.000 0	0.000 0	0.002 8	0.000 0	0.003 7	0.106 2	0.015 8	0.004 8	0.000 0	0.091 3	0.002 8	0.005 2	0.034 0
S11	0.000 0	0.033 2	0.002 3	0.004 8	0.000 0	0.005 8	0.000 0	0.099 7	0.000 0	0.000 0	0.003 6	0.069 1	0.000 0	0.026 5	0.050 3
S12	0.021 5	0.027 9	0.047 5	0.038 8	0.043 3	0.044 7	0.049 9	0.011 7	0.044 1	0.030 8	0.051 0	0.017 9	0.050 9	0.020 6	0.031 1
S13	0.033 2	0.021 0	0.049 9	0.042 4	0.040 5	0.049 6	0.055 4	0.018 7	0.021 9	0.054 3	0.059 5	0.002 4	0.049 0	0.010 3	0.013 3
S14	0.012 5	0.015 7	0.044 4	0.045 9	0.050 9	0.051 8	0.047 1	0.007 9	0.050 7	0.036 0	0.044 9	0.042 9	0.045 8	0.012 5	0.010 4
S15	0.023 8	0.008 7	0.053 0	0.056 7	0.046 9	0.054 1	0.059 1	0.000 0	0.033 1	0.050 5	0.057 1	0.009 9	0.054 8	0.000 7	0.000 0
S16	0.011 1	0.003 5	0.042 1	0.049 5	0.034 8	0.055 1	0.052 6	0.024 7	0.004 6	0.042 3	0.053 4	0.000 0	0.057 4	0.031 7	0.014 8
S17	0.016 9	0.000 0	0.034 3	0.034 8	0.037 6	0.056 4	0.043 4	0.029 2	0.041 2	0.038 9	0.048 6	0.027 0	0.042 8	0.036 8	0.001 5

表 9 17 批黄姜花品质排序
Table 9 Ranking of quality score of 17 batches of *H. flavum*

编号	D_i^+	D_i^-	C_i	排序
S1	0.151 6	0.148 4	0.494 7	7
S2	0.130 3	0.174 3	0.572 2	5
S3	0.128 2	0.178 5	0.582 0	4
S4	0.117 8	0.173 5	0.595 6	3
S5	0.114 6	0.177 8	0.608 1	2
S6	0.111 4	0.180 3	0.618 1	1
S7	0.140 8	0.143 0	0.503 9	6
S8	0.184 0	0.142 1	0.435 8	15
S9	0.171 4	0.130 0	0.431 3	16
S10	0.193 5	0.150 3	0.437 2	14
S11	0.189 7	0.138 3	0.421 6	17
S12	0.161 2	0.145 9	0.475 1	8
S13	0.177 1	0.151 7	0.461 4	10
S14	0.170 8	0.148 7	0.465 4	9
S15	0.195 6	0.159 0	0.448 4	12
S16	0.183 6	0.145 5	0.442 1	13
S17	0.171 2	0.139 6	0.449 2	11

庚烷类、黄酮类及甾体类等活性物质。其中，酚酸类化合物（原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛）具有抗炎、抑菌、抗癌及抗氧化等生物活性^[22-23]；二苯庚烷类成分（异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E）被报道具有抗氧化及细胞毒作用^[24]；黄酮

类化合物（槲皮素、山柰酚、异鼠李素）表现出良好的抗氧化及酶抑制活性^[25]；甾体类成分（胡萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇）则具有消炎、抗过敏及免疫调节等作用^[26-27]。浸出物中可溶性物质，反映了中药材的内在物质基础和品质优劣；总灰分易受清洗、去皮等前处理影响，主要反映中药材纯净度。因此，本研究选取上述 13 种化学成分，联合浸出物与总灰分共 15 个指标，构建黄姜花多指标质量评价体系。

3.2 供试品前处理方法的确定

试验以提取方法（超声、加热回流）、提取时间（20、30、40 min）、提取溶剂（60%、70%、80%、100%甲醇水）对黄姜花药材中原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇含量的影响，选定 70%甲醇加热回流提取 30 min 为黄姜花供试品的前处理方法。

3.3 检测波长的确定

取原儿茶酸、对香豆酸、阿魏醛、异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A、姜花素 E、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、胡萝卜苷、豆甾醇、 β -谷甾醇对照品溶液，在 190~400 nm 波长进行扫描，发现原儿茶酸、对香豆酸和阿魏醛在 320 nm 波长处均有显著吸收，

异姜花素 D、姜花素 D、姜花素 A 和姜花素 E 在 230 nm 波长处峰型明显; 槲皮素、山柰酚和异鼠李素在 360 nm 波长响应值较大; 胡萝卜苷、豆甾醇和 β -谷甾醇在近紫外处有最大吸收, 故选择在 210 nm 波长处检测。本研究据此采用波长切换法, 以实现 13 种化学成分的同时、灵敏检测。

3.4 产地质量差异分析与评价结果

本实验对 17 批不同产地黄姜花药材中 15 个指标进行了含量测定, 结果显示各指标含量在不同产地间存在较大波动: 13 种成分含量范围分别为 0.121~0.295、0.044~0.091、0.036~0.104、0.400~1.071、0.300~0.515、0.902~1.677、0.089~0.153、0.473~0.916、0.177~0.378、0.136~0.249、0.068~0.117、0.223~0.453、0.240~0.863 mg/g, 浸出物为 11.4%~21.5%, 总灰分为 3.1%~9.2%。通过 PCA 及 PLS-DA 方法对上述 15 个指标进行分析, 17 批样品被分为 3 类: 贵州和四川产地的 S1~S7 为一组, 西藏产地的 S8~S11 为一组, 云南和广西产地的 S12~S17 为一组。PLS-DA 筛选出的 7 个 VIP>1 的指标(山柰酚、姜花素 A、原儿茶酸、浸出物、 β -谷甾醇、异姜花素 D 和槲皮素)是造成黄姜花产地间差异的主要成分。基于此, 建议将上述 7 个指标纳入黄姜花质量标准的潜在控制指标, 并初步以其含量均值的 80%作为限度, 即: 山柰酚不得低于 0.24 mg/g、姜花素 A 不得低于 1.06 mg/g、原儿茶酸不得低于 0.16 mg/g、浸出物不得少于 13.0%、 β -谷甾醇不得低于 0.44 mg/g、异姜花素 D 不得低于 0.55 mg/g、槲皮素不得低于 0.54 mg/g。CRITIC-TOPSIS 法分析结果显示, 17 批样品的相对接近度 (C_i) 在 0.421 6~0.618 1, 排名前 7 位的样品均来自贵州和四川产地, 其 C_i 均值为 0.567 8, 显著高于西藏产地 (0.431 5) 及云南、广西产地 (0.457 0)。表明在本研究样本范围内, 贵州和四川产地黄姜花排名靠前。本研究亦存在一定不足之处, 如采用的样品数量有限, 有待后续在贵州和四川产地采集更多黄姜花加以考证。本研究为基于化学指标的质量评价, 所得结论仅反映化学成分层面的产地差异, 尚未与药效学指标建立直接关联, 特别是 6 个 VIP 值大于 1 的化学成分, 后续将建立“含量-活性”相关性模型。

本实验采用多指标定量、PCA、PLS-DA 及 CRITIC-TOPSIS 法建立了 17 批黄姜花质量差异评价模型, 所建方法客观科学, 可用于不同产地黄姜花的质量差异评价, 为黄姜花优良药材资源的开发

提供了参考依据。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 汪毅. 中国天然药物彩色图集 (第 1 卷) [M]. 贵阳: 贵州科技出版社, 2010: 563.
- [2] 贵州省中医研究所. 贵州草药 (第 2 集) [M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 1970: 670.
- [3] 黄宏文. 中国迁地栽培植物志 药用植物 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2021: 416.
- [4] Panigrahy S K, Kumar A, Bhatt R. *Hedychium coronarium* rhizomes: Promising antidiabetic and natural inhibitor of α -amylase and α -glucosidase [J]. *J Diet Suppl*, 2020, 17(1): 81-87.
- [5] 吴相欢. 黄姜花药理活性及其相关机制研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2020.
- [6] 周曦曦, 王进喜, 杨坤, 等. 苗药夜寒苏根茎化学成分定性研究 [J]. 中国民族医药杂志, 2017, 23(6): 35-36.
- [7] 王进喜, 周曦曦, 蒋太白, 等. 苗药夜寒苏的化学成分研究 [J]. 中药材, 2017, 40(11): 2583-2585.
- [8] 何楚楚, 李朗, 蒋嘉馨, 等. 苗药夜寒苏不同提取物的体外抗氧化及降血糖活性研究 [J]. 微量元素与健康研究, 2025, 42(4): 64-73.
- [9] Ray A, Jena S, Dash B, et al. *Hedychium coronarium* extract arrests cell cycle progression, induces apoptosis, and impairs migration and invasion in HeLa cervical cancer cells [J]. *Cancer Manag Res*, 2019, 11: 483-500.
- [10] Sangeeta S, Mohammad S A, Achinto S, et al. Anti inflammatory and analgesic effects of *Hedychium coronarium* Koen [J]. *J Pharm Sci*, 2007, 20(1): 47-51.
- [11] 久欣, 张慧文, 刘宏, 等. 化学计量学方法在中药质量标志物中的应用 [J]. 中成药, 2021, 43(12): 3416-3421.
- [12] 陈雪婷, 张婷, 王思丰, 等. 基于氨基酸类成分定量结合化学计量学评价不同产地的地龙质量 [J]. 中药新药与临床药理, 2025, 36(5): 791-797.
- [13] 李佳佳, 张杏芬, 徐增瑞, 等. 不同产地珍珠透骨草多指标定量及化学计量学联合 CRITIC-TOPSIS 法的质量差异评价 [J]. 中草药, 2026, 57(2): 665-674.
- [14] 闫嘉, 李荣, 姬生国. CRITIC-逼近理想解排序法综合评价益智药材的质量 [J]. 华西药学杂志, 2024, 39(3): 299-302.
- [15] 陈祥宁, 程世云, 李腾飞, 等. 基于 AHP-CRITIC 综合加权法结合 Box-Behnken 设计-响应面法优选建曲发酵工艺 [J]. 中草药, 2025, 56(3): 785-794.
- [16] 徐齐利. TOPSIS 综合评价系统设计与实现 [J]. 信息与管理研究, 2020, 5(2): 70-81.
- [17] 张美琴, 王云, 贾哲, 等. 基于熵权-TOPSIS 对不同产

- 地桑白皮药材的品质评价 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(13): 130-139.
- [18] 宋思蒙, 刘文婷, 龚莉, 等. 基于熵权法的灰色关联法-TOPSIS 法对不同产地远志的品质评价 [J]. 现代中药研究与实践, 2025, 39(5): 6-11.
- [19] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 307.
- [20] 王娟娟, 翟英英, 王海燕. 金樱子 HPLC 多组分定量控制及化学计量学综合质量评价 [J]. 药物评价研究, 2024, 47(2): 369-376.
- [21] 田芳, 张英, 吴孟华, 等. HPLC 特征图谱结合多模式识别及熵权 TOPSIS 法的不同基原蒲黄药材质量评价 [J]. 中草药, 2025, 56(4): 1377-1384.
- [22] 何雅静, 张群琳, 谷利伟, 等. 柑橘中酚酸类化合物及其生物活性与机理的研究进展 [J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 301-306.
- [23] 王静, 丁海燕. 酚酸类化合物抑菌作用研究进展 [J]. 中成药, 2022, 44(6): 1906-1911.
- [24] 杨雷香, 周长新, 黄可新, 等. 生姜中二苯庚烷类化合物的抗氧化和细胞毒活性研究 [J]. 中国中药杂志, 2009, 34(3): 319-323.
- [25] 丁芙蓉, 贾小演, 吴相欢, 等. 黄姜花花的化学成分、抗氧化、酶抑制活性及抗炎作用研究 [J]. 天然产物研究与开发, 2024, 36(1): 13-25.
- [26] 金军. 贵州黎、榕、三、丹少数民族地区黄姜的资源调查及甾体化合物的合成研究 [D]. 贵阳: 贵州民族大学, 2017.
- [27] 陈硕, 王崇川, 朱德强, 等. 植物天然甾体化合物研究进展 [J]. 齐鲁工业大学学报, 2023, 37(2): 66-73.

[责任编辑 时圣明]