

不同产地二色补血草多指标定量联合化学计量学及 TOPSIS-GRA 模型的质量差异评价

唐志华^{1,2}, 吴芳³, 张钊², 余露山^{1*}

1. 浙江大学药学院 药物代谢和药物分析研究所, 浙江 杭州 310058

2. 绍兴市人民医院(浙江大学绍兴医院)药学部, 浙江 绍兴 312000

3. 浙江大学医学院附属儿童医院 中医科, 浙江 杭州 310051

摘要: 目的 建立不同产地二色补血草 *Limonium bicolor* 多指标定量测定方法, 联合化学计量学及逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)-灰色关联度分析法(grey relational analysis, GRA)评价不同产地二色补血草的质量。方法 采用 HPLC 法, 以 Prep Scalar C₁₈ (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 为色谱柱; 检测波长 273、254、360、210 nm; 乙腈-0.2%磷酸为流动相, 梯度洗脱, 进样量 10 μL, 体积流量 1.0 mL/min, 柱温 30 ℃。同步检测 20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷的含量; 并检查浸出物、总灰分和酸不溶性灰分。利用 SPSS 26.0、SIMCA 14.1 统计软件对检测数据进行化学计量学分析, 对 20 批不同产地二色补血草进行分组, 筛选质量差异标志物, 进而构建 TOPSIS-GRA 法融合模型对其质量进行排序。结果 建立的多指标定量方法学考察结果均良好, 同一色谱条件下没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷均得到有效分离, 各成分含量存在产地差异。化学计量学分析结果显示 20 批二色补血草分组明显, 木犀草素、没食子酸、β-谷甾醇、芦丁、异鼠李素、槲皮素、圣草酚和杨梅苷为产地差异的主导成分。TOPSIS-GRA 法分析结果显示 20 批样品的综合相对贴适度存在差异, 以 S16、S18、S15、S17、S19、S20 综合相对贴适度较大, 分别为 0.642 1、0.634 2、0.626 1、0.614 8、0.595 4、0.593 0。结论 建立的多指标定量方法可以反映不同产地二色补血草的质量差异; 化学计量学联合加权 TOPSIS 与 GRA 融合模型全面地分析了不同产地二色补血草的质量状况, 为二色补血草质量分析和评价奠定基础。

关键词: 二色补血草; 化学计量学; 逼近理想解排序法; 灰色关联度分析法; 质量评价; 没食子酸; 香草酸; 杨梅苷; 圣草酚; 木犀草素; 异鼠李素; 柚皮素

中图分类号: R282.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)17-6955-10

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.17.025

Quality difference evaluation of multi-index quantitative determination combined with chemometrics and TOPSIS-GRA model of *Limonium bicolor* from different producing areas

TANG Zhihua^{1,2}, WU Fang³, ZHANG Ke², YU Lushan¹

1. Institute of Drug Metabolism and Pharmaceutical Analysis, School of Pharmacy, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

2. Department of Pharmacy, Shaoxing People's Hospital (Shaoxing Hospital of Zhejiang University), Shaoxing 312000, China

3. Department of Chinese Traditional Medicine, Children's Hospital of Zhejiang University School of Medicine, Hangzhou 310051, China

Abstract: Objective To establish a multi-index quantitative determination method for *Limonium bicolor* from different habitats, and to evaluate the quality of *L. bicolor* from different habitats by combining chemometrics and integrated TOPSIS-GRA method. **Methods** HPLC was performed on a Prep Scalar C₁₈ (250 mm × 4.6 mm, 5 μm) column. Detection wavelength:

收稿日期: 2026-02-16

基金项目: 浙江省“尖兵”“领雁”研发攻关计划项目(2023C03042)

作者简介: 唐志华(1975—), 男, 浙江绍兴人, 硕士, 主任药师, 研究方向为中药质控及药理、智慧药学。

Tel: (0575)88509711 E-mail: sxtzh@163.com

*通信作者: 余露山(1978—), 男, 浙江开化人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为药物代谢动力学。

Tel: (0571)88208407 E-mail: gcvnob@163.com

273, 254, 360 and 210 nm; acetonitrile-0.2% phosphoric acid was used as the mobile phase for gradient elution. The injection volume was 10 μ L, the flow rate was 1.0 mL/min, and the column temperature was 30 $^{\circ}$ C. The contents of gallic acid, vanillic acid, myricitrin, eriodictyol, rutin, luteolin, quercetin, kaempferol, isorhamnetin, naringenin, β -sitosterol, daucosterol in 20 batches of *L. bicolor* were determined simultaneously. The extractives, total ash and acid-insoluble ash of samples were examined. Utilize SPSS 26.0 and SIMCA 14.1 statistical software to perform chemometric analysis on detection data to group 20 batches of *L. bicolor* from different habitats, and the quality difference markers were screened, and then the TOPSIS-GRA method fusion model was constructed to sort the quality. **Results** The results of the established multi-index quantitative methodology were good. Under the same chromatographic conditions, gallic acid, vanillic acid, myricitrin, eriodictyol, rutin, luteolin, quercetin, kaempferol, isorhamnetin, naringenin, β -sitosterol, daucosterol were effectively separated. There were differences in the content of each component. The results of chemometrics analysis showed that the clustering of 20 batches of *L. bicolor* was obvious, and luteolin, gallic acid, β -sitosterol, rutin, isorhamnetin, quercetin, eriodictyol and myricitrin were the dominant components of origin difference. The results of TOPSIS-GRA analysis showed that there were differences in the comprehensive relative closeness of 20 batches of samples, and the comprehensive relative closeness of S16, S18, S15, S17, S19, S20 was larger, which was 0.642 1, 0.634 2, 0.626 1, 0.614 8, 0.595 4 and 0.593 0, respectively. **Conclusion** The established multi-index quantitative method can reflect the quality differences of *L. bicolor* rutin from different habitats. The fusion model combining chemometrics with weighted TOPSIS and GRA comprehensively evaluated the quality characteristics of from different origins, which established a foundation for the quality analysis and evaluation of *L. bicolor*.

Key words: *Limonium bicolor* (Bag.) Kuntze; chemometrics; technique for order preference by similarity to an ideal solution; grey relational analysis; quality evaluation; gallic acid; vanillic acid; myricitrin; eriodictyol; luteolin; isorhamnetin; naringenin

二色补血草为蓝雪科植物二色补血草 *Limonium bicolor* (Bag.) Kuntze 的干燥带根全草^[1], 主产于内蒙古、甘肃、陕西等地, 作为传统中药, 具有补血、止血、散瘀、调经、益脾、健胃之功效。现代药理学研究表明其具有抗菌消炎、保肝、抗癌、抗病毒等药理作用^[2], 可用于治疗宫颈癌和功能性子宫出血等症^[3]。二色补血草主要含有黄酮类、甾体、多糖、挥发油等化学成分^[4], 对其成分研究相对较多^[2,4-5], 但对二色补血草的质量控制及评价研究较少^[6], 陕西省药材标准(2015 年版)仅制定了性状、鉴别、检查、浸出物和炮制等项目, 未涉及含量测定。逼近理想解排序法^[7-8](technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)可根据评价对象与“正负理想解”的欧氏距离来判断评价对象的优劣, 结果科学客观; 灰色关联度分析法^[9-10](grey relational analysis, GRA)通过对数据进行统计分析, 能敏锐捕捉数据序列在动态发展趋势上的关联性, 二者联合使用, 评价更全面、稳健, 尤其适用于多成分的中药材的质量评价。为完善二色补血草的质量标准及评价方法, 现采用 HPLC 法建立二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷含量检测的方法, 同时检查其浸出物、总灰分和酸不溶性灰分, 并以化学计量学^[11-12]及 TOPSIS 与 GRA 融合

手段^[13-14]对测量数据进行全面分析, 进一步评价二色补血草质量的区域差异性, 以期二色补血草质量控制指标的选择提供科学依据。

1 材料

1.1 试药

对照品没食子酸(批号 110831-202408, 质量分数 96.5%)、香草酸(批号 110776-202404, 质量分数 99.5%)、杨梅苷(批号 111860-202204, 质量分数 91.9%)、芦丁(批号 100080-202513, 质量分数 92.8%)、木犀草素(批号 111520-202107, 质量分数 96.3%)、槲皮素(批号 100081-202411, 质量分数 98.7%)、山柰酚(批号 110861-202515, 质量分数 96.1%)、异鼠李素(批号 110860-202513, 质量分数 98.0%)和 β -谷甾醇(批号 110851-201909, 质量分数 92.7%)购自中国食品药品检定研究院; 圣草酚(批号 T6S0232-234002, 质量分数 99.3%)、柚皮素(批号 T2838-114502, 质量分数 98.8%)和胡萝卜苷(批号 T3871-D33422, 质量分数 99.6%)购自上海陶术生物科技有限公司; 乙腈和磷酸(美国 Merck 公司, 色谱纯); 二色补血草药材采集后, 经浙江大学药学院唐志华主任药师根据陕西省药材标准(2015 年版)二色补血草标准鉴定, 样品为蓝雪科植物二色补血草 *L. bicolor* (Bag.) Kuntze 的带根全草, 晒干后保存, 样品信息见表 1。

表 1 20 批二色补血草来源信息

Table 1 Source information of 20 batches of *Limonium bicolor*

编号	采集地	采集时间	编号	采集地	采集时间
S1	宁夏贺兰县金贵镇	2025-09-21	S11	山东惠民县石庙镇	2025-10-24
S2	宁夏海原县七营镇	2025-09-15	S12	河北康保县芦家营乡	2025-09-09
S3	宁夏同心县河西镇	2025-09-18	S13	河北围场满族蒙古族自治县四道沟乡	2025-09-12
S4	山西山阴县古城镇	2025-10-20	S14	河北涿鹿县栾庄乡	2025-09-15
S5	山西阳曲县大盂镇	2025-10-16	S15	内蒙古武川县哈乐镇	2025-09-22
S6	山西稷山县太阳乡	2025-10-12	S16	内蒙古固阳县西斗铺镇	2025-09-26
S7	陕西周至县司竹镇	2025-09-08	S17	内蒙古巴林右旗宝日勿苏镇	2025-09-29
S8	陕西千阳县草碧镇	2025-09-05	S18	内蒙古鄂托克旗蒙西镇	2025-09-17
S9	陕西潼关县秦东镇	2025-09-01	S19	甘肃甘谷县白家湾乡	2025-10-10
S10	山东五莲县汪湖镇	2025-10-28	S20	甘肃民勤县蔡旗镇	2025-10-05

1.2 仪器

LC-2010AHT 型高效液相色谱仪, 日本岛津公司; FA1004N 型电子天平, 上饶市鸿翔实业有限公司; SK5200H 型超声波清洗器, 上海科导超声仪器有限公司。

2 方法与结果

2.1 溶液的配制

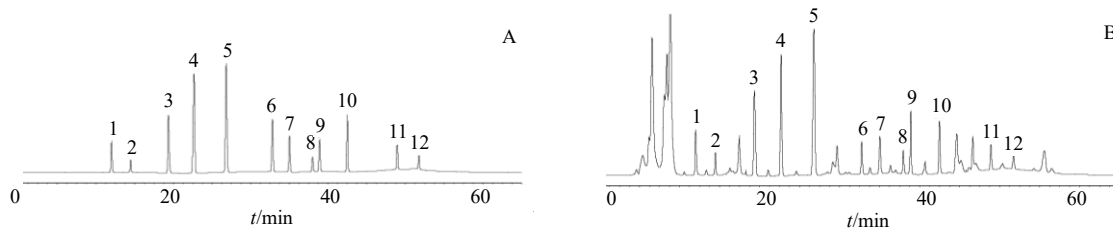
2.1.1 混合对照品溶液的制备 精密称取没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷对照品(按照纯度标示折算), 用 70% 甲醇混匀并制成各对照品质量浓度分别为 0.252、0.046、0.418、0.530、0.614、0.168、0.230、0.072、0.340、0.296、0.132、0.028 mg/mL 的混合对照品贮备液。精密吸取贮备液 1 mL, 用 70% 甲醇定容至 20 mL 量瓶, 制得含没食子酸 12.60 μ g/mL、香草酸 2.30 μ g/mL、杨梅苷 20.90 μ g/mL、圣草酚 26.50 μ g/mL、芦丁 30.70 μ g/mL、木犀草素 8.40 μ g/mL、槲皮素 11.50 μ g/mL、山柰酚 3.60 μ g/mL、异鼠李素 17.00 μ g/mL、柚皮素 14.80 μ g/mL、 β -谷甾醇 6.60 μ g/mL、

胡萝卜苷 1.40 μ g/mL 的混合溶液, 即得。

2.1.2 供试品溶液的制备 称取二色补血草粉末 0.5 g, 精密称定, 置 25 mL 量瓶中, 加 70% 甲醇适量, 超声提取 45 min, 冷却, 用 70% 甲醇定容至刻度, 摇匀, 经 0.45 μ m 滤膜滤过, 取续滤液即得。

2.2 色谱条件

色谱柱: Prep Scalar C₁₈ (250 mm $\times$ 4.6 mm, 5 μ m); 检测波长 273 nm (0~17 min 检测没食子酸和香草酸)、254 nm (17~29 min 检测杨梅苷、圣草酚和芦丁)、360 nm (29~45 min 检测木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素和柚皮素)、210 nm (45~65 min 检测 β -谷甾醇和胡萝卜苷); 流动相为乙腈(A)-0.2% 磷酸水溶液(B), 梯度洗脱 (0~10 min, 12.0% A; 10~17 min, 12.0%~16.0% A; 17~29 min, 16.0%~32.0% A; 29~45 min, 32.0%~46.0% A; 45~54 min, 46.0%~78.0% A; 54~65 min, 78.0%~12.0% A); 进样量 10 μ L, 柱温 30 $^{\circ}$ C, 体积流量 1.0 mL/min。上述色谱条件下, 没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷分离良好。见图 1。



1-没食子酸; 2-香草酸; 3-杨梅苷; 4-圣草酚; 5-芦丁; 6-木犀草素; 7-槲皮素; 8-山柰酚; 9-异鼠李素; 10-柚皮素; 11- β -谷甾醇; 12-胡萝卜苷。
1-gallic acid; 2-vanillic acid; 3-myricitrin; 4-eriodictyol; 5-rutin; 6-luteolin; 7-quercetin; 8-kaempferol; 9-isorhamnetin; 10-naringenin; 11- β -sitosterol; 12-daucosterol.

图 1 混合对照品溶液 (A) 和二色补血草供试品溶液 (B) 的 HPLC 图

Fig. 1 HPLC chromatograms of mixed reference substances (A) and *L. bicolor* sample (B)

2.3 方法学考察

2.3.1 线性关系考察 精密吸取混合对照品溶液采用倍比稀释法制备 6 个质量浓度的系列对照品溶液,按“2.2”项下色谱条件进样测定,记录各成分峰面积,以没食子酸、香草酸、杨

梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷的质量浓度为横坐标 (X),相应的峰面积为纵坐标 (Y),绘制标准曲线,对 12 个成分进行线性回归,结果见表 2。

表 2 12 种成分的线性关系

Table 2 Linear relationships of 12 components

成分	回归方程	线性范围/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)	R^2
没食子酸	$Y=2.940\ 3\times 10^6 X+916.5$	1.26~63.00	0.999 4
香草酸	$Y=8.892\ 7\times 10^5 X+542.7$	0.23~11.50	0.999 1
杨梅苷	$Y=4.980\ 2\times 10^6 X-1\ 130.9$	2.09~104.50	0.999 7
圣草酚	$Y=6.123\ 7\times 10^6 X+694.1$	2.65~132.50	0.999 5
芦丁	$Y=7.533\ 9\times 10^6 X+1\ 573.8$	3.07~153.50	0.999 8
木犀草素	$Y=2.164\ 2\times 10^6 X+417.5$	0.84~42.00	0.999 9
槲皮素	$Y=2.537\ 5\times 10^6 X+1\ 307.3$	1.15~57.50	0.999 4
山柰酚	$Y=1.320\ 6\times 10^6 X+581.6$	0.36~18.00	0.999 2
异鼠李素	$Y=4.290\ 1\times 10^6 X+1\ 838.4$	1.70~85.00	0.999 3
柚皮素	$Y=3.558\ 2\times 10^6 X-1\ 091.8$	1.48~74.00	0.999 7
β -谷甾醇	$Y=1.724\ 9\times 10^6 X+1\ 023.5$	0.66~33.00	0.999 2
胡萝卜苷	$Y=6.587\ 1\times 10^5 X+743.6$	0.14~7.00	0.999 6

2.3.2 精密度试验 取二色补血草 (S1) 适量,制成供试品溶液,按照“2.2”项色谱条件连续进样 6 次,记录数据。结果没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷峰面积的 RSD 依次为 1.38%、1.53%、1.18%、1.06%、0.93%、1.37%、1.32%、1.49%、1.21%、1.24%、1.41%、1.64%,表明仪器精密度良好。

2.3.3 重复性试验 取二色补血草 (S1) 适量,平行称定 6 份,每份约 0.5 g,分别按“2.1.2”项步骤制成供试品溶液,按照“2.2”项进样测定,记录数据并计算没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷含量,结果没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷含量的 RSD 依次为 1.52%、1.76%、1.34%、1.21%、1.22%、1.61%、1.56%、1.70%、1.32%、1.46%、1.66%、1.83%,表明所建方法重复性良好。

2.3.4 稳定性试验 取二色补血草 (S1) 供试品溶液,分别于 0、2、4、8、12、18、24 h 按照“2.2”项测定,记录数据。结果没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、

异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷含量 RSD 依次为 1.36%、1.78%、1.19%、1.22%、1.04%、1.58%、1.52%、1.69%、1.24%、1.29%、1.67%、1.81%,表明供试品溶液 24 h 内稳定性良好。

2.3.5 加样回收率试验 取已测没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷含量的二色补血草 (S1) 粉末 9 份,每份 0.25 g,精密称定,均分为 3 组,分别加混合对照品溶液(含没食子酸 0.149 mg/mL、香草酸 0.023 mg/mL、杨梅苷 0.217 mg/mL、圣草酚 0.268 mg/mL、芦丁 0.311 mg/mL、木犀草素 0.087 mg/mL、槲皮素 0.126 mg/mL、山柰酚 0.039 mg/mL、异鼠李素 0.189 mg/mL、柚皮素 0.154 mg/mL、 β -谷甾醇 0.067 mg/mL、胡萝卜苷 0.013 mg/mL) 0.8、1.0、1.2 mL,按“2.1.2”项方法制得供试品溶液,按照“2.2”项进样测定,记录数据,计算没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷的平均加样回收率分别为 99.00%、98.03%、100.02%、99.15%、99.85%、98.92%、97.98%、98.26%、100.13%、99.60%、98.87%、97.59%,RSD 分别为 1.05%、1.43%、0.83%、0.89%、0.72%、1.22%、1.26%、1.38%、1.03%、1.27%、1.02%、0.94%。

2.4 含量测定

取 20 批二色补血草 (S1~S20) 样品, 分别按照“2.1.2”项方法制成供试品溶液 (每批平行 3 份), 按照“2.2”项色谱条件进样检测, 计算样品中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷的

含量, 结果见表 3。20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷含量存在不同程度的波动, 其中样品 S19 中槲皮素含量是样品 S14 的 3.6 倍; S6 样品中没食子酸含量是 S11 的 1.6 倍。

表 3 20 批二色补血草中 12 个成分的含量 (n=3)
Table 3 Contents of 12 components in 20 batches of *L. bicolor* (n = 3)

编号	质量分数/(mg·g ⁻¹)										
	没食子酸	香草酸	杨梅苷	圣草酚	芦丁	木犀草素	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	柚皮素	β-谷甾醇
S1	0.587±0.011	0.098±0.003	0.876±0.017	1.079±0.118	1.252±0.135	0.347±0.008	0.492±0.063	0.157±0.011	0.736±0.069	0.631±0.009	0.274±0.003
S2	0.696±0.009	0.100±0.005	0.995±0.011	1.107±0.062	1.200±0.119	0.398±0.015	0.378±0.029	0.163±0.009	0.917±0.041	0.674±0.013	0.325±0.008
S3	0.626±0.007	0.110±0.002	0.943±0.019	1.075±0.035	0.972±0.068	0.412±0.006	0.471±0.017	0.150±0.005	0.807±0.026	0.648±0.015	0.339±0.006
S4	0.649±0.014	0.111±0.010	1.013±0.025	1.021±0.017	1.115±0.051	0.425±0.013	0.545±0.021	0.155±0.007	0.832±0.103	0.596±0.006	0.319±0.010
S5	0.704±0.021	0.105±0.011	0.945±0.008	0.993±0.021	1.358±0.019	0.445±0.010	0.572±0.038	0.143±0.011	0.782±0.079	0.698±0.008	0.316±0.007
S6	0.710±0.006	0.099±0.005	1.070±0.016	1.122±0.089	1.281±0.024	0.485±0.025	0.370±0.006	0.161±0.013	0.812±0.040	0.662±0.010	0.344±0.032
S7	0.584±0.013	0.111±0.004	1.006±0.037	1.102±0.104	1.492±0.156	0.400±0.017	0.466±0.101	0.150±0.007	0.975±0.028	0.611±0.023	0.312±0.009
S8	0.646±0.010	0.115±0.007	0.975±0.049	1.065±0.033	1.389±0.082	0.428±0.009	0.545±0.030	0.154±0.006	0.874±0.035	0.645±0.041	0.337±0.017
S9	0.611±0.008	0.105±0.006	1.009±0.115	1.097±0.026	1.597±0.071	0.361±0.005	0.398±0.044	0.142±0.009	1.003±0.121	0.551±0.008	0.297±0.006
S10	0.615±0.015	0.139±0.014	0.817±0.022	0.887±0.019	1.140±0.050	0.282±0.004	0.266±0.059	0.133±0.017	0.570±0.009	0.537±0.004	0.196±0.005
S11	0.444±0.018	0.135±0.016	0.850±0.034	0.928±0.127	1.279±0.144	0.306±0.018	0.284±0.009	0.136±0.010	0.592±0.016	0.551±0.009	0.193±0.043
S12	0.572±0.013	0.147±0.005	0.787±0.010	0.859±0.061	1.175±0.039	0.217±0.013	0.256±0.013	0.129±0.009	0.468±0.011	0.501±0.016	0.211±0.030
S13	0.541±0.011	0.120±0.006	0.829±0.015	0.931±0.024	0.934±0.075	0.333±0.007	0.477±0.027	0.128±0.005	0.625±0.017	0.610±0.022	0.225±0.006
S14	0.559±0.016	0.142±0.018	0.757±0.029	0.841±0.017	1.092±0.121	0.199±0.006	0.228±0.031	0.124±0.007	0.517±0.038	0.520±0.009	0.161±0.008
S15	0.546±0.017	0.084±0.003	1.218±0.122	1.299±0.075	1.605±0.069	0.320±0.052	0.753±0.016	0.198±0.023	1.272±0.055	0.808±0.017	0.300±0.005
S16	0.533±0.019	0.088±0.006	1.189±0.109	1.357±0.093	1.997±0.041	0.387±0.036	0.733±0.018	0.207±0.021	1.319±0.163	0.857±0.012	0.231±0.012
S17	0.514±0.023	0.081±0.004	1.299±0.017	1.383±0.030	1.692±0.028	0.271±0.014	0.700±0.034	0.194±0.006	1.225±0.110	0.773±0.019	0.321±0.026
S18	0.496±0.021	0.076±0.008	1.258±0.051	1.410±0.028	1.935±0.009	0.334±0.039	0.793±0.023	0.212±0.009	1.371±0.107	0.841±0.034	0.265±0.009
S19	0.477±0.012	0.092±0.010	1.128±0.063	1.328±0.067	1.797±0.117	0.261±0.009	0.820±0.009	0.203±0.015	1.177±0.093	0.822±0.037	0.176±0.019
S20	0.484±0.005	0.095±0.011	1.160±0.047	1.180±0.082	1.744±0.125	0.294±0.017	0.770±0.010	0.189±0.008	1.052±0.085	0.790±0.059	0.291±0.007

2.5 检查

2.5.1 浸出物 取 20 批二色补血草 (S1~S20) 样品, 70%乙醇为溶剂, 参照《中国药典》2025 年版四部 (通则 2301) [15] 中热浸法检查。结果见

表 4。

2.5.2 总灰分和酸不溶性灰分 取 20 批二色补血草 (S1~S20) 样品, 参照《中国药典》2025 年版四部 (通则 2302) [15] 检查。结果见表 4。

表 4 二色补血草中浸出物、总灰分和酸不溶性灰分检测结果 (n = 3)
Table 4 Determination results of extractives,, total ash and acid-insoluble ash in *L. bicolor* (n = 3)

编号	浸出物/%	总灰分/%	酸不溶性灰分/%	编号	浸出物/%	总灰分/%	酸不溶性灰分/%
S1	21.50±1.23	8.40±0.74	1.60±0.11	S11	9.40±1.53	8.10±0.58	1.80±0.18
S2	23.60±1.16	7.30±0.36	1.20±0.23	S12	11.70±1.66	8.50±0.29	2.30±0.16
S3	20.10±1.82	5.90±0.38	0.90±0.16	S13	9.60±1.75	9.30±0.31	1.90±0.34
S4	19.80±1.35	6.70±0.45	1.40±0.13	S14	12.30±2.11	7.90±0.92	2.00±0.27
S5	22.90±1.93	6.40±0.33	1.50±0.29	S15	28.90±2.20	5.60±0.56	0.90±0.25
S6	20.30±1.78	7.20±0.25	1.10±0.15	S16	30.10±1.46	5.10±0.36	0.50±0.11
S7	23.80±1.33	6.10±0.64	1.70±0.22	S17	29.40±2.31	6.40±0.28	0.80±0.14
S8	21.10±1.68	6.90±0.22	1.40±0.37	S18	29.80±2.06	5.20±0.70	0.70±0.16
S9	20.40±1.75	7.50±0.34	1.00±0.41	S19	31.80±3.11	6.80±0.68	1.50±0.10
S10	10.90±1.19	7.60±0.73	1.60±0.20	S20	33.40±2.59	7.50±0.55	1.40±0.28

2.6 化学计量学分析

2.6.1 聚类分析 以所测 20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷、浸出物、总灰分和酸不溶性灰分的量为观测值，其中样品批次为垂直变量，含量为水平变量，运用 SPSS26.0 软件进行系统聚类分析，结果见图 2。图 2 显示欧氏距离为 10 时，20 批样品分为 3 大类，宁夏、陕西和山西产 S1~S9 为一类，河北和山东产 S10~S14 为一类，内蒙古和甘肃产 S15~S20 为一类。结果表明相邻产地的二色补血草质量存在一定相似性，但药材质量受产地气候、降水、土质及周围环境因素的综合影响，不同产地的环境条件差异较大，导致组内批次间质量亦存在波动。其中 S10 与组内其他 4 批样品差异较大，S7、S9 与组内其他样品差异亦较为明显。

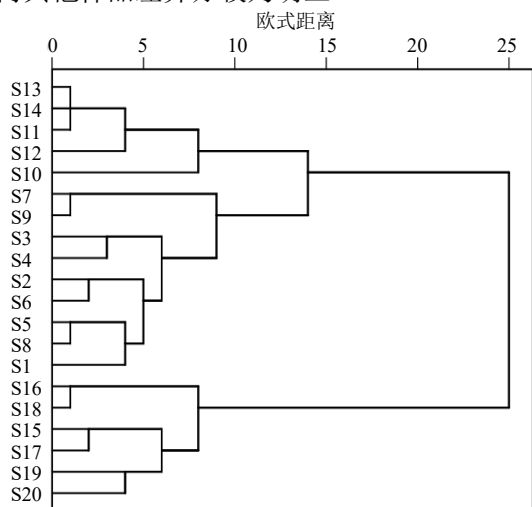


图 2 基于含量测定的二色补血草聚类分析

Fig. 2 Cluster analysis of *L. bicolor* based on content determination

2.6.2 主成分分析 以所测 20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷、浸出物、总灰分和酸不溶性灰分的含量为观测值，采用 SIMCA 14.1 软件，进行主成分分析，结果见图 3。图 3 显示 20 批样品分类与聚类分析结果一致，显示源于宁夏、陕西和山西样品 S1~S9 为一组，源于河北和山东样品 S10~S14 为一组，源于内蒙古和甘肃样品 S15~S20 为一组，且所有检测数据点均在 95% 置信区间内。

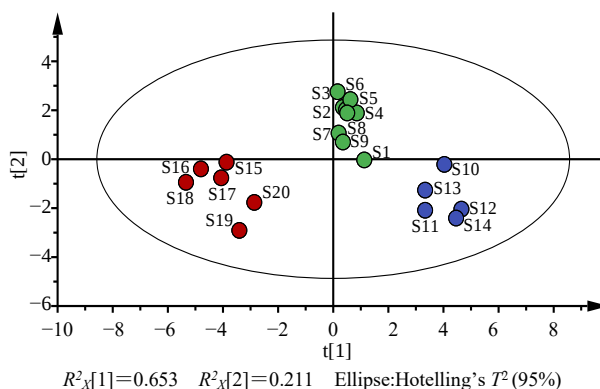


图 3 20 批二色补血草的 PCA 得分图

Fig. 3 PCA score plot for 20 batches of *L. bicolor*

2.6.3 偏最小二乘-判别分析 (partial least squares-discriminant analysis, PLS-DA) 主成分分析将 20 批二色补血草分为 3 组，继续运行 SIMCA 14.1 软件 PLS-DA 程序^[16]，设定与主成分分析一致的分组信息，选择“Par”的缩放类型，建构 20 批二色补血草的 PLS-DA 得分图 (图 4)，结果模型参数 $R^2_X=0.897$ 、 $R^2_Y=0.861$ 、 $Q^2=0.827$ ，表明模型稳定性和可靠性较好。再以各指标的变量重要性投影 (variable importance projection, VIP) 值大小对 20 批二色补血草中 15 个变量对质量的影响程度进行排序，结果见图 5，其中木犀草素、没食子酸、 β -谷甾醇、芦丁、异鼠李素、槲皮素、圣草酚的 VIP>1，杨梅苷 VIP 值为 0.990 0，接近 1。杨梅苷具有抗氧化、抗炎、抗病毒等药理活性^[5]，且 20 批样品中杨梅苷含量的 RSD 值为 16.33%，表明不同产地间杨梅苷含量存在较大差异。此外，Wang 等^[17]研究证实盐胁迫可显著影响二色补血草中黄酮类及酚酸类成分的积累，进一步提示杨梅苷等成分对环境因子的响应较为敏感。故将上述 8 个成分 (含杨梅苷) 作为不同产地二色补血草的质量差异因子。

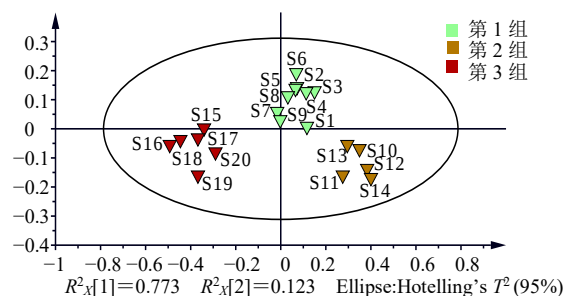
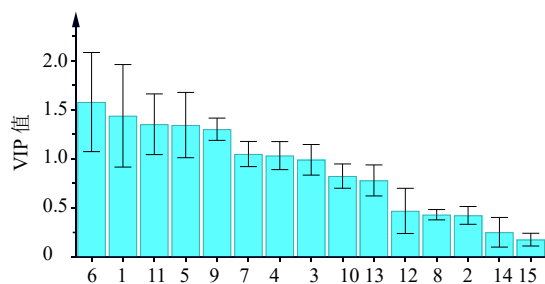


图 4 20 批二色补血草的 PLS-DA 得分图

Fig. 4 PLS-DA score plot of 20 batches of *L. bicolor*



1-没食子酸; 2-香草酸; 3-杨梅苷; 4-圣草酚; 5-芦丁; 6-木犀草素; 7-槲皮素; 8-山柰酚; 9-异鼠李素; 10-柚皮素; 11-β-谷甾醇; 12-胡萝卜苷; 13-浸出物; 14-总灰分; 15-酸不溶性灰分。
1-gallic acid; 2-vanillic acid; 3-myricitrin; 4-eriodictyol; 5-rutin; 6-luteolin; 7-quercetin; 8-kaempferol; 9-isorhamnetin; 10-naringenin; 11-β-sitosterol; 12-daucosterol; 13-extract; 14-total ash; 15-acid-insoluble ash.

图 5 各指标含量 PLS-DA 模型的 VIP 值

Fig. 5 VIP value of PLS-DA model of each index content

2.7 熵权 TOPSIS 与 GRA 融合模型

2.7.1 熵权 TOPSIS 分析模型 二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-

谷甾醇、胡萝卜苷和浸出物为正向指标,总灰分和酸不溶性灰分为负向指标,且 20 批样品中各指标含量差异较大,以所测 20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷、浸出物、总灰分和酸不溶性灰分的量为观测值,其中样品的序号为垂直变量,含量为水平变量,分别使用正向指标、负向指标^[18]对原始数据进行同向化处理得到 Y_{ij} 值^[19],结果见表 6。采用熵权法计算各指标的权重值分别为 0.056 0、0.068 0、0.071 7、0.076 2、0.074 0、0.051 1、0.077 6、0.093 5、0.070 3、0.077 9、0.055 9、0.064 1、0.076 0、0.043 6、0.044 0,与表 5 数据相乘得加权矩阵 (Z_{bc}),根据公式 (1) (2) 分别计算各样品与 Z_c^+ 的距离 (D_b^+) 与 Z_c^- 的距离 (D_b^-)。

$$D_b^+ = \sqrt{\sum_{c=1}^{15} (Z_{bc} - Z_c^+)^2} \quad (1)$$

$$D_b^- = \sqrt{\sum_{c=1}^{15} (Z_{bc} - Z_c^-)^2} \quad (2)$$

Z_c^+ 、 Z_c^- 为正理想样本、负理想样本

表 6 各指标同向化处理结果

Table 6 Results of same direction processing of each index

编号	Y_{ij}														
	没食子酸	香草酸	杨梅苷	圣草酚	芦丁	木犀草素	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	柚皮素	β-谷甾醇	胡萝卜苷	浸出物	总灰分	酸不溶性灰分
S1	0.537 6	0.309 9	0.219 6	0.418 3	0.299 2	0.517 5	0.445 9	0.375 0	0.296 8	0.365 2	0.617 5	0.547 6	0.504 2	0.214 3	0.388 9
S2	0.947 4	0.338 0	0.439 1	0.467 5	0.250 2	0.695 8	0.253 4	0.443 2	0.497 2	0.486 0	0.896 2	0.809 5	0.591 7	0.476 2	0.611 1
S3	0.684 2	0.478 9	0.343 2	0.411 2	0.035 7	0.744 8	0.410 5	0.295 5	0.375 4	0.412 9	0.972 7	0.642 9	0.445 8	0.809 5	0.777 8
S4	0.770 7	0.493 0	0.472 3	0.316 3	0.170 3	0.790 2	0.535 5	0.352 3	0.403 1	0.266 9	0.863 4	0.761 9	0.433 3	0.619 0	0.500 0
S5	0.977 4	0.408 5	0.346 9	0.267 1	0.398 9	0.860 1	0.581 1	0.215 9	0.347 7	0.553 4	0.847 0	0.904 8	0.562 5	0.690 5	0.444 4
S6	1.000 0	0.323 9	0.577 5	0.493 8	0.326 4	1.000 0	0.239 9	0.420 5	0.381 0	0.452 2	1.000 0	0.666 7	0.454 2	0.500 0	0.666 7
S7	0.526 3	0.493 0	0.459 4	0.458 7	0.524 9	0.702 8	0.402 0	0.295 5	0.561 5	0.309 0	0.825 1	0.738 1	0.600 0	0.761 9	0.333 3
S8	0.759 4	0.549 3	0.402 2	0.393 7	0.428 0	0.800 7	0.535 5	0.340 9	0.449 6	0.404 5	0.961 7	0.809 5	0.487 5	0.571 4	0.500 0
S9	0.627 8	0.408 5	0.464 9	0.449 9	0.623 7	0.566 4	0.287 2	0.204 5	0.592 5	0.140 4	0.743 2	0.547 6	0.458 3	0.428 6	0.722 2
S10	0.642 9	0.887 3	0.110 7	0.080 8	0.193 8	0.290 2	0.064 2	0.102 3	0.113 0	0.101 1	0.191 3	1.000 0	0.062 5	0.404 8	0.388 9
S11	0.000 0	0.831 0	0.171 6	0.152 9	0.324 6	0.374 1	0.094 6	0.136 4	0.137 3	0.140 4	0.174 9	0.500 0	0.000 0	0.285 7	0.277 8
S12	0.481 2	1.000 0	0.055 4	0.031 6	0.226 7	0.062 9	0.047 3	0.056 8	0.000 0	0.000 0	0.273 2	0.428 6	0.095 8	0.190 5	0.000 0
S13	0.364 7	0.619 7	0.132 8	0.158 2	0.000 0	0.468 5	0.420 6	0.045 5	0.173 9	0.306 2	0.349 7	0.357 1	0.008 3	0.000 0	0.222 2
S14	0.432 3	0.929 6	0.000 0	0.000 0	0.148 6	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.054 3	0.053 4	0.000 0	0.381 0	0.120 8	0.333 3	0.166 7
S15	0.383 5	0.112 7	0.850 6	0.804 9	0.631 2	0.423 1	0.886 8	0.840 9	0.890 4	0.862 4	0.759 6	0.309 5	0.812 5	0.881 0	0.777 8
S16	0.334 6	0.169 0	0.797 0	0.906 9	1.000 0	0.657 3	0.853 0	0.943 2	0.942 4	1.000 0	0.382 5	0.238 1	0.862 5	1.000 0	1.000 0
S17	0.263 2	0.070 4	1.000 0	0.952 5	0.713 1	0.251 7	0.797 3	0.795 5	0.838 3	0.764 0	0.874 3	0.166 7	0.833 3	0.690 5	0.833 3
S18	0.195 5	0.000 0	0.924 4	1.000 0	0.941 7	0.472 0	0.954 4	1.000 0	1.000 0	0.955 1	0.568 3	0.095 2	0.850 0	0.976 2	0.888 9
S19	0.124 1	0.225 4	0.684 5	0.855 9	0.811 9	0.216 8	1.000 0	0.897 7	0.785 2	0.901 7	0.082 0	0.047 6	0.933 3	0.595 2	0.444 4
S20	0.150 4	0.267 6	0.743 5	0.595 8	0.762 0	0.332 2	0.915 5	0.738 6	0.646 7	0.811 8	0.710 4	0.000 0	1.000 0	0.428 6	0.500 0

2.7.2 GRA 模型 以所测 20 批二色补血草中没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、β-谷甾醇、胡萝卜苷、浸出物、总灰分和酸不溶性灰分的量为观测值，其中样品的序号为垂直变量，含量为水平变量，按照

相关公式^[19]对矩阵数据进行规格化处理，规格化值结果见表 7。确定正理想样本和负理想样本，按照相关公式^[13]计算各样品相对于正、负理想样本的关联系数、被评价对象相对于正理想样本的关联度 (R_{ib})、被评价对象相对于负理想样本的关联度 (R_{is})。

表 7 原始数据规格化处理结果
Table 7 Results of normalized processing of original data

编号	规格化值														
	没食子酸	香草酸	杨梅苷	圣草酚	芦丁	木犀草素	槲皮素	山柰酚	异鼠李素	柚皮素	β-谷甾醇	胡萝卜苷	浸出物	总灰分	酸不溶性灰分
S1	1.012 6	0.909 9	0.870 6	0.978 1	0.892 8	1.004 9	0.953 7	0.972 7	0.821 2	0.947 0	1.008 5	1.036 9	0.998 1	1.196 6	1.176 5
S2	1.200 6	0.928 5	0.988 9	1.003 4	0.855 7	1.152 6	0.732 7	1.009 9	1.023 1	1.011 6	1.196 2	1.230 2	1.095 6	1.039 9	0.882 4
S3	1.079 9	1.021 4	0.937 2	0.974 4	0.693 1	1.193 2	0.913 0	0.929 4	0.900 4	0.972 5	1.247 7	1.107 2	0.933 1	1.084 0	0.661 8
S4	1.119 5	1.030 6	1.006 8	0.925 5	0.795 1	1.230 8	1.056 4	0.960 3	0.928 3	0.894 5	1.174 1	1.195 1	0.919 2	1.054 4	1.029 4
S5	1.214 4	0.974 9	0.939 2	0.900 1	0.968 4	1.288 7	1.108 7	0.886 0	0.872 5	1.047 6	1.163 0	1.300 5	1.063 1	1.091 7	1.102 9
S6	1.224 8	0.919 2	1.063 4	1.017 0	0.913 5	1.404 6	0.717 2	0.997 5	0.905 9	0.993 5	1.266 1	1.124 8	0.942 4	1.025 6	0.808 8
S7	1.007 4	1.030 6	0.999 8	0.998 9	1.064 0	1.158 4	0.903 3	0.929 4	1.087 8	0.917 0	1.148 3	1.177 5	1.104 9	0.868 9	1.250 0
S8	1.114 4	1.067 8	0.969 0	0.965 4	0.990 5	1.239 5	1.056 4	0.954 2	0.975 1	0.968 0	1.240 3	1.230 2	0.979 6	0.982 9	1.029 4
S9	1.054 0	0.974 9	1.002 8	0.994 4	1.138 8	1.045 5	0.771 5	0.879 8	1.119 0	0.827 0	1.093 1	1.036 9	0.947 1	1.068 4	0.735 3
S10	1.060 9	1.290 6	0.812 0	0.804 0	0.813 0	0.816 7	0.515 6	0.824 0	0.635 9	0.805 9	0.721 4	1.370 8	0.506 0	1.082 6	1.176 5
S11	0.765 9	1.253 5	0.844 8	0.841 2	0.912 1	0.886 2	0.550 5	0.842 6	0.660 5	0.827 0	0.710 3	1.001 8	0.436 4	1.153 8	1.323 5
S12	0.986 7	1.364 9	0.782 2	0.778 6	0.837 9	0.628 4	0.496 2	0.799 3	0.522 1	0.751 9	0.776 6	0.949 0	0.543 2	1.210 8	1.691 2
S13	0.933 2	1.114 2	0.823 9	0.843 9	0.666 0	0.964 4	0.924 6	0.793 1	0.697 3	0.915 5	0.828 1	0.896 3	0.445 7	1.324 8	1.397 1
S14	0.964 3	1.318 5	0.752 3	0.762 3	0.778 7	0.576 3	0.441 9	0.768 3	0.576 8	0.780 4	0.592 6	0.913 9	0.571 0	1.125 4	1.470 6
S15	0.941 9	0.779 9	1.210 5	1.177 5	1.144 5	0.926 7	1.459 6	1.226 8	1.419 2	1.212 7	1.104 2	0.861 2	1.341 7	0.797 7	0.661 8
S16	0.919 4	0.817 1	1.181 7	1.230 1	1.424 1	1.120 8	1.420 8	1.282 5	1.471 6	1.286 2	0.850 2	0.808 4	1.397 4	0.726 5	0.367 6
S17	0.886 7	0.752 1	1.291 0	1.253 6	1.206 6	0.784 8	1.356 9	1.202 0	1.366 7	1.160 1	1.181 5	0.755 7	1.364 9	0.911 7	0.588 2
S18	0.855 6	0.705 7	1.250 2	1.278 1	1.379 9	0.967 3	1.537 1	1.313 5	1.529 6	1.262 2	0.975 3	0.703 0	1.383 5	0.740 7	0.514 7
S19	0.822 8	0.854 2	1.121 0	1.203 8	1.281 5	0.755 9	1.589 5	1.257 7	1.313 2	1.233 7	0.647 8	0.667 8	1.476 3	0.968 7	1.102 9
S20	0.834 9	0.882 1	1.152 9	1.069 6	1.243 7	0.851 4	1.492 5	1.171 0	1.173 7	1.185 7	1.071 0	0.632 7	1.550 6	1.068 4	1.029 4

2.7.3 构建熵权 TOPSIS 法与 GRA 融合 对以上得到的 D_b^+ 、 D_b^- 、 R_{ib} 、 R_{is} 数据进行无量纲化处理，并计算融合无量纲化后的欧氏贴近度 (d_i^+ 、 d_i^-) 和灰色关联度 (r_{ib} 、 r_{is})。由公式 (3) (4) 计算得到融合无量纲化后的欧氏距离和灰色关联度 E_i^+ 、 E_i^- 。再按照公式 (5) 计算综合相对贴近度 (γ_i)，并根据 γ_i 对样品质量进行排序^[8]。结果见表 8，其中源于内蒙古和甘肃的 S15~S20 样品的综合相对贴近度为 0.593 0~0.642 1，高于其他批次，表明这几个产地的二色补血草质量较优；源于宁夏、陕西和山西 S1~S9 样品的综合相对贴近度为 0.467 6~0.547 3，

$$E_i^+ = 0.5 d_i^+ + 0.5 r_{ib} \quad (3)$$

$$E_i^- = 0.5 d_i^- + 0.5 r_{is} \quad (4)$$

$$\gamma_i = \frac{E_i^+}{E_i^+ + E_i^-} \quad (5)$$

位于中间，表明这几个产地的二色补血草质量居中；源于河北和山东的 S10~S14 样品的综合相对贴近度为 0.330 3~0.399 2，低于其他批次，表明这几个产地的二色补血草质量较差。

3 讨论

3.1 检测成分选择

二色补血草所含化学成分复杂，主要涉及到酚酸类、黄酮类和甾醇类等物质。研究表明其酚酸类化合物香草酸具有抗炎、抗氧化应激的作用^[20]；没食子酸可通过抑制肿瘤增殖、诱导凋亡、调控表观遗传和调节肿瘤微环境等多重机制发挥抗肿瘤作用^[21]。二色补血草中黄酮类活性代表成分有杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素和柚皮素等，是其发挥抗炎、抗氧化、抗菌及止血作用的主要物质基础^[22-23]。研究表明，甾

表 8 20 批二色补血草样品质量评价结果
Table 8 Quality evaluation results of 20 batches of *L. bicolor*

编号	d_i^+	d_i^-	r_{ib}	r_{is}	E_i^+	E_i^-	γ_i	排序
S1	0.691 2	0.489 6	0.723 2	0.689 3	0.606 4	0.690 3	0.467 6	15
S2	0.597 9	0.644 5	0.811 2	0.646 7	0.727 9	0.622 3	0.539 1	10
S3	0.663 4	0.594 4	0.743 6	0.724 2	0.669 0	0.693 8	0.490 9	13
S4	0.639 4	0.598 5	0.774 0	0.670 1	0.686 3	0.654 8	0.511 7	12
S5	0.615 8	0.658 1	0.833 9	0.650 3	0.746 0	0.633 1	0.540 9	9
S6	0.606 0	0.658 5	0.854 3	0.648 2	0.756 4	0.627 1	0.546 7	8
S7	0.593 1	0.618 3	0.775 8	0.648 8	0.697 1	0.621 0	0.528 9	11
S8	0.578 2	0.645 4	0.815 5	0.630 2	0.730 5	0.604 2	0.547 3	7
S9	0.663 0	0.562 8	0.730 9	0.691 3	0.646 9	0.677 2	0.488 6	14
S10	0.897 6	0.463 9	0.706 2	0.863 3	0.585 1	0.880 5	0.399 2	16
S11	0.908 4	0.358 2	0.654 0	0.886 6	0.506 1	0.897 5	0.360 6	19
S12	0.972 6	0.373 1	0.711 5	0.928 9	0.542 3	0.950 8	0.363 2	18
S13	0.900 2	0.343 7	0.695 6	0.841 3	0.519 7	0.870 8	0.373 8	17
S14	1.000 0	0.340 1	0.646 1	1.000 0	0.493 1	1.000 0	0.330 3	20
S15	0.422 3	0.888 0	0.894 7	0.642 2	0.891 4	0.532 3	0.626 1	3
S16	0.406 4	0.974 7	0.965 9	0.675 3	0.970 3	0.540 9	0.642 1	1
S17	0.469 0	0.888 9	0.913 2	0.660 1	0.901 1	0.564 6	0.614 8	4
S18	0.460 4	1.000 0	1.000 0	0.693 4	1.000 0	0.576 9	0.634 2	2
S19	0.529 3	0.878 5	0.904 6	0.682 6	0.891 6	0.606 0	0.595 4	5
S20	0.514 8	0.818 4	0.878 4	0.649 8	0.848 4	0.582 3	0.593 0	6

体类成分有抗炎、抗病毒、抗过敏等药理活性^[24],其活性代表成分有 β -谷甾醇和胡萝卜苷等。故本研究选择没食子酸、香草酸、杨梅苷、圣草酚、芦丁、木犀草素、槲皮素、山柰酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇、胡萝卜苷作为检测指标。

3.2 结果分析

目前针对蓝雪科补血草属 *Limonium* L.植物的质量控制研究,多集中于单一或少数几个黄酮苷元的含量测定^[6],较少涉及酚酸类和甾醇类成分的同步定量。本研究所测 12 个成分中,涉及到酚酸类、黄酮类和甾醇类,其中香草酸、圣草酚、异鼠李素、柚皮素、 β -谷甾醇和胡萝卜苷为二色补血草质量控制中首次系统报道,填补了该药材多指标同步定量的空白。且本研究采用的 HPLC 多波长切换法显著提升了定量检测的专属性。此外, Jia 等^[25]研究表明二色补血草乙醇提取物可通过减轻炎症反应和恢复肠道菌群失调改善小鼠溃疡性结肠炎,进一步证实了二色补血草多成分协同抗炎的药理作用基础。本研究采用 HPLC 法检测了 20 批二色补血草中 12 个成分含量,发现各成分含量具有一定的地域特点,但同一产地仅采集一批样品,不能充分表征该产地二色补血草的质量。后续将扩大样品采集量,在同一产地采集至少 6 批样品进行研究。通过化学计量学分析筛选出的 8 个质量差异标志成分(木犀草素、没食子酸、 β -谷甾醇、芦丁、异鼠李素、槲皮素、圣草酚、杨梅苷)均具有明确的药理活性,

各成分的相互协同构成了二色补血草“补血止血、抗菌消炎”药效的化学本质。TOPSIS-GRA 融合模型分析结果显示 S15~S20(内蒙古及甘肃)样品中上述 8 个标志成分含量整体较高,综合质量排序靠前,可能与以下因素有关:首先,研究表明环境因子对药用植物次生代谢产物的积累具有显著调控作用^[26],内蒙古和甘肃属典型大陆性气候,日照时间长、昼夜温差大,有利于黄酮类和酚酸类次生代谢产物的积累;其次 Wang 等^[17]研究发现盐胁迫可改变二色补血草的化学成分组成,适度盐分胁迫可诱导黄酮类成分的积累,内蒙古和甘肃部分地区土壤含盐量较高,可能促进了黄酮类成分的合成;此外,这两地土壤多为沙质或灰钙土,排水性好、矿质元素丰富,也可能间接提高黄酮类成分的含量;内蒙古和甘肃部分地区海拔较高,可能会诱导植物体内抗氧化活性成分的富集。而河北、山东产地(S10~S14)样品中多数黄酮类成分含量偏低,可能与这些产地的土壤黏性及湿度较高、昼夜温差较低有关。

4 结论与展望

二色补血草为多年生草本,未考察样品的生长年限,也未对比二色补血草在初花期、盛花期、种子成熟期的质量差异;同一产地采集样品量少,代表性不强,后续将在内蒙古和甘肃等重点产地扩大采样量(同一产地至少 6 批),并连续多年进行考察;未对 VIP 值大于 1 的木犀草素、没食子酸、 β -

谷甾醇、芦丁、异鼠李素、槲皮素、圣草酚和杨梅苷进行药理学、药效学方面研究(尤其是止血活性、抗炎等方面),后续将开展相关研究。

本研究建立了同步测定二色补血草中 12 个化学成分的含量方法,构建了更全面的质量控制体系,弥补了二色补血草质量控制研究的不足。将化学计量学与 TOPSIS-GR A 法相结合,筛选了不同产地二色补血草的质量差异主导因子,对其质量进行了排序,提高了评价结果的准确度及可信度,为其质量评价提供了新思路。但也存在一定的不足之处:本研究基于多指标定量、化学计量学、TOPSIS-GR A 法的二色补血草质量评价模型,是二色补血草质量评价的相对有效工具,为二色补血草质量控制和评价提供了数据支撑。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 陕西省食品药品监督管理局. 陕西省药材标准: 2015 年版 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2016: 58-62.
- [2] 徐燕玉, 袁芳. 二色补血草化学成分与药理作用研究进展 [J]. 济南大学学报: 自然科学版, 2019, 33(6): 572-577.
- [3] 李乃国, 余欢, 苗彦霞. 二色补血草止血的机理初探 [J]. 陕西中医, 2014, 35(6): 753-754.
- [4] 徐悦, 白玮, 冯霞霞, 等. 二色补血草的化学成分研究 [J]. 陕西中医药大学学报, 2019, 42(1): 96-99.
- [5] Wang L S, Chen J, Teng J H, et al. Flavonoids isolated from the flowers of *Limonium bicolor* and their *in vitro* antitumor evaluation [J]. *Phcog Mag*, 2017, 13(50): 222.
- [6] 许欢, 王菲, 张丽, 等. 高效液相色谱法测定二色补血草中杨梅苷、圣草酚、木犀草素、槲皮素的含量 [J]. 陕西中医药大学学报, 2017, 40(3): 198-206.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 杨鑫嵎, 刘宁, 吴金伟, 等. 基于熵权-灰色关联分析法对不同产地猫爪草的质量评价 [J]. 中南农业科技, 2024, 45(7): 91-93.
- [10] 王青霞, 汪滨, 汤样华, 等. 多组分定量联合化学计量学及灰色关联度分析骨力胶囊质量评价 [J]. 中国药物应用与监测, 2024, 21(1): 29-33.
- [11] 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.
- [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] 宋怡, 王泉. 基于一测多评法结合化学模式识别及加权 TOPSIS 与灰色关联度融合模型评价不同产地款冬花的质量 [J]. 药物分析杂志, 2025, 45(8): 1442-1457.
- [14] 刘仟禧, 刘梦云, 曹素芹, 等. 基于指纹图谱、化学计量学及熵权 TOPSIS-GR A 融合模型法评价不同产地大青叶的质量 [J]. 中草药, 2025, 56(6): 2148-2157.
- [15] 中国药典 [S]. 四部. 2025: 307, 309.
- [16] 王瑶, 郭佳龙, 叶陈辉, 等. HPLC 指纹图谱分析竹节参茎叶化学成分的累积特征 [J]. 华西药学杂志, 2024, 39(3): 303-308.
- [17] Wang L S, Li W L, Ma L, et al. Salt stress changes chemical composition in *Limonium bicolor* (Bag.) Kuntze, a medicinal halophytic plant [J]. *Ind Crops Prod*, 2016, 84: 248-253.
- [18] 梁美锋, 廖念, 朱珊珊, 等. 多指标成分定量联合化学计量学、加权 TOPSIS 与灰色关联度融合模型评价不同产地飞扬草药材质量 [J]. 中药新药与临床药理, 2025, 36(1): 125-133.
- [19] 李思阳, 李更东, 闫宇辉. 基于 HPLC-QAMS 多指标成分联合 OPLS-DA 及加权 TOPSIS 模型的喜树果药材质量评价 [J]. 世界科学技术—中医药现代化, 2025, 27(5): 1376-1385.
- [20] 于庆贺, 蔡子鸣, 吴锦涛, 等. 香草酸抑制终板软骨细胞炎症反应和细胞外基质降解 [J]. 中国组织工程研究, 2025, 29(30): 6391-6397.
- [21] 陈海波, 戴蓓英. 没食子酸抗癌作用的机制及前沿研究进展 [J]. 药学研究, 2025, 44(9): 887-892.
- [22] 王君, 陈新, 张兆英, 等. 响应面法优化二色补血草总黄酮提取工艺及生理活性研究 [J]. 饲料研究, 2021, 44(22): 78-83.
- [23] 欧莉, 苗彦霞, 高峰, 等. 二色补血草总黄酮治疗功能性子宫出血的止血作用及机制研究 [J]. 吉林中医药, 2019, 39(5): 638-641.
- [24] 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.
- [25] Jia W, Yu S Y, Liu X, et al. Ethanol extract of *Limonium bicolor* improves dextran sulfate sodium-induced ulcerative colitis by alleviating inflammation and restoring gut microbiota dysbiosis in mice [J]. *Mar Drugs*, 2024, 22(4): 175.
- [26] Li Y Q, Kong D X, Fu Y, et al. The effect of developmental and environmental factors on secondary metabolites in medicinal plants [J]. *Plant Physiol Biochem*, 2020, 148: 80-89.

[责任编辑 时圣明]