DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260520004
引用格式: 邱明鸣, 王欢, 张先林, 等. 多元统计分析评价食用与药用天麻酚类成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(17): 179–187.
Qiu Mingming, Wang Huan, Zhang Xianlin, et al. Evaluation of phenolic components in edible and medicinal *Gastrodia elata* by multivariate statistical analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(17): 179–187. (in Chinese with English abstract).

多元统计分析评价食用与药用天麻酚类成分

邱明鸣[1,2], 王 欢[2], 张先林[1,2,3], 孙乐明[2,3], 张天南[1,4*]

(1. 江苏省中医院, 南京 210029; 2. 贵州同德药业股份有限公司, 铜仁 554300; 3. 贵州信邦制药股份有限公司, 贵阳 550014; 4. 道地药材品质保障与资源持续利用全国重点实验室, 北京 100700)

摘 要: 目的 建立同时测定天麻中 6 种主要成分的超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC), 结合多元统计分析探讨食用与药用天麻的品质影响因素。**方法** 收集陕西、湖北、贵州 3 个产区 11 个产地、不同采收期天麻(食用和药用)共 30 批次天麻样品, 采用 UPLC 同时测定天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷 6 种成分的含量。通过指纹图谱相似度评价、主成分分析(principal components analysis, PCA)、正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)及双因素方差分析、多重比较进行综合评价。**结果** 30 批天麻样品指纹图谱相似度为 0.945~0.998。PCA 提取 2 个主成分, 累计方差贡献率 79.852%。OPLS-DA 模型 Q^2 为–0.0349, 表明食用与药用天麻化学特征高度相似。双因素方差分析显示, PC1 的采收期效应达到显著水平(P=0.048, 偏 η^2=0.153), 食用天麻边际估算平均值为 0.167, 药用天麻为–0.334, 表明食用天麻的综合品质得分显著高于药用天麻; 产地效应极显著, 表明陕西产区天麻品质最优。多重比较表明, 陕西产天麻的 PC1 得分显著高于湖北和贵州(P<0.001)。**结论** 食用采收期天麻在核心功能成分(天麻素及巴利森苷类)上显著优于药用采收期, 且与药用天麻化学谱高度一致。建议优先选择食用采收期及陕西产区的天麻用于功能食品开发。

关键词: 食用天麻; 功能食品; 采收期; 主成分分析; 药用天麻
中图分类号: TS201.2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)17–0179–09

Evaluation of phenolic components in edible and medicinal *Gastrodia elata* by multivariate statistical analysis

QIU Ming-Ming[1,2], WANG Huan[2], ZHANG Xian-Lin[1,2,3], SUN Le-Ming[2,3], ZHANG Tian-Nan[1,4*]

(1. *Jiangsu Province Hospital of Chinese Medicine*, *Nanjing* 210029, *China*; 2. *Guizhou Tongde Pharmaceutical Co*., *Ltd.*, *Tongren* 554300, *China*; 3. *Guizhou Xinbang Pharmaceutical Co*., *Ltd*., *Guiyang* 550014, *China*; 4. *State Key Laboratory for Quality Ensurance and Sustainable Use of Dao-di Herbs*, *Beijing* 100700, *China*)

收稿日期: 2026-05-20
基金项目: 国家重点研发计划课题项目(2021YFD1601002); 江苏省中药骨干人才高级研修项目(苏中医科教〔2025〕11 号); 铜仁市科技重大专项项目(铜市科研〔2025〕103 号); 江苏省老药工传承工作室建设项目(苏中医科教〔2024〕4 号); 全国老药工传承工作室建设项目(国中医药人教函〔2025〕181 号); 中央本级重大增减支项目(2060302)
第一作者: 邱明鸣(1989—), 男, 硕士, 副主任中药师, 主要研究方向为中药鉴定与资源。E-mail: 252766405@qq.com
***通信作者:** 张天南(1981—), 女, 硕士, 主任药师, 主要研究方向为中药质量分析。E-mail: 3272933341@qq.com

ABSTRACT: Objective To establish a method for the simultaneous determination of 6 kinds of main components in *Gastrodia elata* by ultra performance liquid chromatography (UPLC), and investigate the factors influencing the quality of edible and medicinal *Gastrodia elata* using multivariate statistical analysis. **Methods** The total of 30 batches of *Gastrodia elata* samples were collected from 11 locations across 3 producing regions (Shaanxi, Hubei and Guizhou) at different harvest times (edible and medicinal). The 6 kinds of components—gastrodin, p-hydroxybenzyl alcohol, parishin E, parishin C, parishin B and parishin were simultaneously determined by UPLC. Comprehensive evaluation was conducted using fingerprint similarity analysis, principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), two-way variance analysis and multiple comparisons. **Results** The fingerprint similarity of the 30 batches of *Gastrodia elata* samples ranged from 0.945 to 0.998. The PCA extracted 2 principal components with a cumulative variance contribution rate of 79.852%. The OPLS-DA model yielded a Q^2 value of –0.0349, indicating highly similar chemical profiles between edible and medicinal *Gastrodia elata*. The two-way variance analysis revealed that the harvest time effect on PC1 was statistically significant (P=0.048, partial η^2=0.153). The marginal estimated average value for edible *Gastrodia elata* was 0.167, while that for medicinal *Gastrodia elata* was –0.334, with edible *Gastrodia elata* scoring significantly higher than medicinal *Gastrodia elata* in overall quality. The origin effect was highly significant, with Shaanxi samples exhibiting the best quality. Multiple comparisons further confirmed that PC1 scores of Shaanxi samples were significantly higher than those from Hubei and Guizhou (P<0.001). **Conclusion** Edible *Gastrodia elata* harvestes at the optimal edible stage is significantly superior to medicinal *Gastrodia elata* in terms of core functional components (gastrodin and barishins), while maintaining a highly consistent chemical profile with its medicinal counterpart. It is recommended to prioritize *Gastrodia elata* from the edible harvest time and the Shaanxi producing region for functional food development.

KEY WORDS: edible *Gastrodia elata*; functional food; harvest time; principal component analysis; medicinal *Gastrodia elata*

0 引 言

天麻(*Gastrodia elata*)为兰科天麻属多年腐生草本植物[1], 是我国传统名贵中药材之一, 具有息风止痉、平抑肝阳、祛风通络之功效, 常用于治疗头痛眩晕、肢体麻木、小儿惊风等症状[2]。现代药理学研究表明, 天麻具有神经保护[3–4]、改善学习记忆功能[5–6]、心脏保护[7–8]、血管调节[9]、抗抑郁及抗癌等多种生物活性[10]。天麻的化学成分复杂, 主要包括酚类及其苷类、多糖类、有机酸类等[10]。其中, 天麻素是天麻中研究最为深入的活性成分, 在神经系统[11]、心血管系统[12]等其他相关疾病[13–15]研究较多。对羟基苯甲醇是天麻素的苷元, 同样具有相关的药理活性[16]。巴利森苷类成分是由天麻素与柠檬酸形成的酯类化合物, 在天麻中含量丰富, 同样具有神经保护等活性[17–19]。

天麻的品质受多种因素影响, 其中产地和采收期是两个关键因子。我国天麻资源分布广泛, 主要的栽培产区包括陕西、湖北、贵州、云南、四川等地[20]。药典规定天麻的采收期在立冬后至次年清明前, 实际部分天麻在 9~10 月份就开始采收, 9 月份天麻鲜嫩, 口感适宜, 一般用作鲜品食用, 称为食用天麻; 在 12 月份后采收的天麻天麻较为成熟, 折干率高, 一般用作干品药用, 称为药用天麻。2023 年, 国家卫生健康委员会将天麻列入“按照传统既是食品又是中药材的物质”目录, 天麻的食品化利用迎来了重要机遇。然而, 目前对食用采收期(9~10 月早采)与药用采收期(12 月后)天麻的品质差异缺乏系统评价, 食用天麻是否具备与药用天麻相当或更优的功能成分积累尚不明确。

基于此, 本研究收集了陕西、湖北、贵州 3 个主产区 11 个产地、2 个采收期(食用和药用)共 30 批次天麻样品, 采用超高效液相色谱法(ultra performance liquid chromatography, UPLC)同时测定天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷 6 种成分的含量并比较天麻主要成分, 结合主成分(principal components analysis, PCA)分析、双因素方差分析、多重比较等统计方法, 旨在为天麻的功能食品开发提供品质依据。

1 材料与方法

1.1 试剂与材料

对照品天麻素(批号: 110807-202411, 纯度 98.8%)、对羟基苯甲醇(批号: 11970-202303, 纯度 97.4%)(中国食品药

品检定研究院); 巴利森苷(批号: 26010721, 纯度 97%)、巴利森苷 C(批号: 20010722, 纯度 98%)(上海同田生物技术有限公司); 巴利森苷 B(批号: 20460155, 纯度 98%)、巴利森苷 E(批号: 20350602, 纯度 98%)(上海萄普生物医药技术公司); 乙腈(色谱纯, 美国 Sigma 公司); 乙醇(分析纯, 天津市康科德科技有限公司); 磷酸(分析纯, 成都金山化学试剂有限公司)。

食用天麻与药用天麻经江苏省中医院张倩副主任中药师鉴定为兰科植物天麻 *Gastrodia elata* Bl.的块茎, 具体产地信息见表 1。

表 1　样品信息
Table 1　Information of sample

产地	食用天麻编号	药用天麻编号
贵州省毕节市七星关区杨家湾镇	S1	Y1
贵州省毕节市七星关区大银镇	S2	Y2
贵州省毕节市赫章县平山镇	S3	Y3
贵州省毕节市赫章县安乐溪乡	S4	Y4
贵州省毕节市大方县六龙镇	S5	Y5
湖北省黄冈市罗田县九资河镇	S6	Y6
湖北省宜昌市五峰县长乐坪镇	S7	Y7
湖北省宜昌市夷陵区下堡坪乡	S8	Y8
湖北省十堰市神农架林区红坪镇	S9	Y9
陕西省商洛市丹凤县武关镇	S10	Y10
陕西省汉中市略阳县接官亭镇	S11	Y11
陕西省汉中市略阳县五龙洞镇	S12	Y12
陕西省汉中市勉县长沟河镇	S13	Y13
陕西省汉中市略阳县观音寺镇	S14	Y14
陕西省汉中市宁强县燕子砭镇	S15	Y15

1.2　仪器与设备

赛默飞 Vanquish 超高效液相色谱仪(二级阵列管检测器, 美国赛默飞世尔科技公司); Waters BEH C_{18} 柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm, 美国 Waters 公司); 1000C 多功能粉碎机(永康市红太阳机电有限公司); ME204E 电子天平(精度 0.1 mg)、XPR2/AC 型电子天平(精度 1 μg)(梅特勒托利多国际有限公司); TST-UPB-40L 超纯水机(石家庄泰斯特仪器设备有限公司); KQ300DE 超声波清洗机(昆山市超声仪器有限公司); SHZ-D(III)循环水式多用真空泵(上海力辰邦西仪器科技有限公司); TG16WS 高速离心机(长沙湘智离心机仪器有限公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　对照品溶液的制备

分别精密称取适量对照品天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷加乙腈水溶液(乙腈:水为 3:97, *V*:*V*, 下同)溶解, 制成对照品储备液。

取以上 6 种对照品储备液适量, 加乙腈水溶液, 配制成天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷质量浓度分别为 39.00、39.33、19.27、38.52、42.14、33.30 μg/mL 的混合对照品溶液。通过倍半稀释法对混合对照品溶液进行稀释, 获得 6 个不同浓度的混合对照品溶液。

1.3.2　供试品溶液的制备

取天麻粉末(过三号筛)约 2 g, 精密称定, 置具塞锥形瓶中, 精密加入 60%乙醇 50 mL, 称定重量, 超声处理(功率 120 W, 频率 60 kHz) 30 min, 放冷, 再称定重量, 用 60%乙醇补足减失的重量, 4000 r/min 离心 5 min, 精密量取上清液 10 mL, 浓缩至近干无醇味, 残渣加乙腈水溶液溶解, 转移至 25 mL 量瓶中, 用乙腈水溶液稀释至刻度, 摇匀, 滤过, 即得。

1.3.3　色谱条件

Waters BEH C_{18} 色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm), 流动相为 0.1%磷酸水(A)-乙腈(B) 溶液梯度洗脱(0~3 min, 3% B; 3~5 min, 3%~8% B; 5~12 min, 8%~12% B; 12~17 min, 12%~18% B; 17~23 min, 18% B; 23~28 min, 18%~95% B; 28~32 min, 95% B; 32~33 min, 95%~3% B); 33~40 min, 3% B; 流速 0.2 mL/min, 柱温 30 ℃, 检测波长 220 nm, 进样量 3 μL。

1.4　数据处理

数据经 WPS 软件(12.1.0.25225 版)整理后, 采用中药色谱指纹图谱相似度评价系统(2012 年版)进行图谱分析, 含量结果采用 GraphPad Prism 8 进行显著性分析, PCA、双因素方差分析采用 SPSS 26.0 进行分析, 正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)采用 Simca 14.1 进行分析。

2　结果与分析

2.1　方法学考察

2.1.1　线性关系考察

取各对照品混合溶液适量, 按照 1.3.3 项下色谱条件进样, 以对照品溶液质量浓度为横坐标(*X*, μg/mL), 峰面积为纵坐标(*Y*), 计算回归方程并绘制标准曲线, 结果见表 2, 结果表明线性关系良好。根据 3 倍和 10 倍信噪比计算各成分的检出限(limit of detection, LOD)和定量限(limit of quantitation, LOQ)。结果显示, 天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷的 LODs 分别为 0.018、0.040、0.044、0.036、0.035、0.029 μg/mL, LOQs 分别为 0.061、0.134、0.146、0.121、0.116、0.096 μg/mL。

各成分的 LODs 和 LOQs 均处于较低水平，表明该方法灵敏度高，能够满足天麻中 6 种成分的定量分析要求。

表 2 6 个成分的线性关系考察结果

Table 2 Linear relationship investigation results of 6 components

对照品	标准曲线方程	线性范围/(μg/mL)	决定系数 r^2
天麻素	Y=0.3483X–0.0753	0.98~31.20	0.9999
对羟基苯甲醇	Y=0.6263X–0.1568	0.98~31.47	0.9997
巴利森苷 E	Y=0.18X–0.0522	0.48~15.42	0.9980
巴利森苷 C	Y=0.2814X–0.0609	0.96~30.82	0.9997
巴利森苷 B	Y=0.2404X–0.0704	1.05~33.71	0.9996
巴利森苷	Y=0.2479X–0.0024	0.83~26.64	0.9998

2.1.2 精密度试验考察

取天麻供试品溶液，按照 1.3.3 项下色谱条件进行测定，连续进样 6 次进行测定，记录天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷的峰面积，计算相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)分别为 0.12%、0.16%、0.09%、0.21%、0.19%、0.22%，表明该仪器精密度良好。

2.1.3 重复性试验考察

取 S1 批次天麻样品 6 份，按 1.3.2 项方法制备，按照 1.3.3 项下色谱条件进行测定，计算上述 6 个成分的峰面积 RSDs 分别为 0.22%、0.31%、0.18%、0.25%、0.39%、0.37%，表明该方法重复性良好。

2.1.4 稳定性试验考察

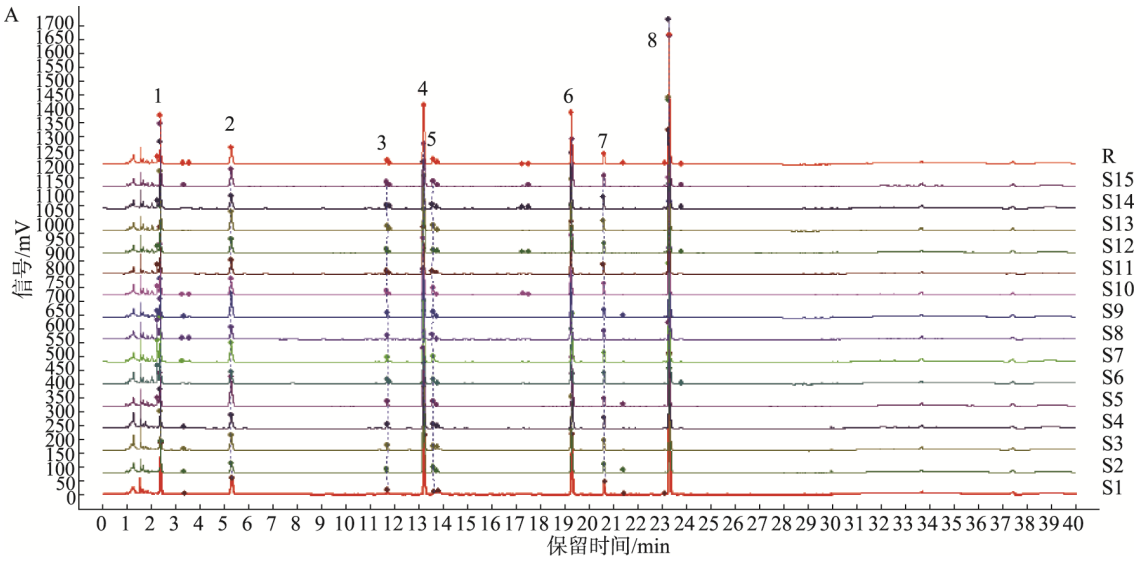
取 S1 批次天麻样品，按 1.3.2 项方法制备，按照 1.3.3 项下色谱条件分别于 0、2、4、8、12、24 h 进样测定，记录 6 个成分的峰面积。结果显示 6 个成分的峰面积 RSDs 分别为 0.44%、0.52%、0.30%、1.02%、0.65%、0.97%，表明供试品溶液在 24 h 内稳定良好。

2.1.5 加样回收率考察

精密称取 S1 批次天麻粉末 6 份，每份约 2 g，按对照品与样品含量 1:1 的比例加入天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷对照品，按 1.3.2 项方法制备，按照 1.3.3 项下色谱条件进行测定。天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷的加样回收率分别为 100.53%、101.22%、102.07%、99.87%、99.65%、101.69%。RSDs 分别为 1.23%、0.88%、2.01%、0.31%、1.65%、0.94%，表明方法准确度较好。

2.2 指纹图谱的建立及相似度评价

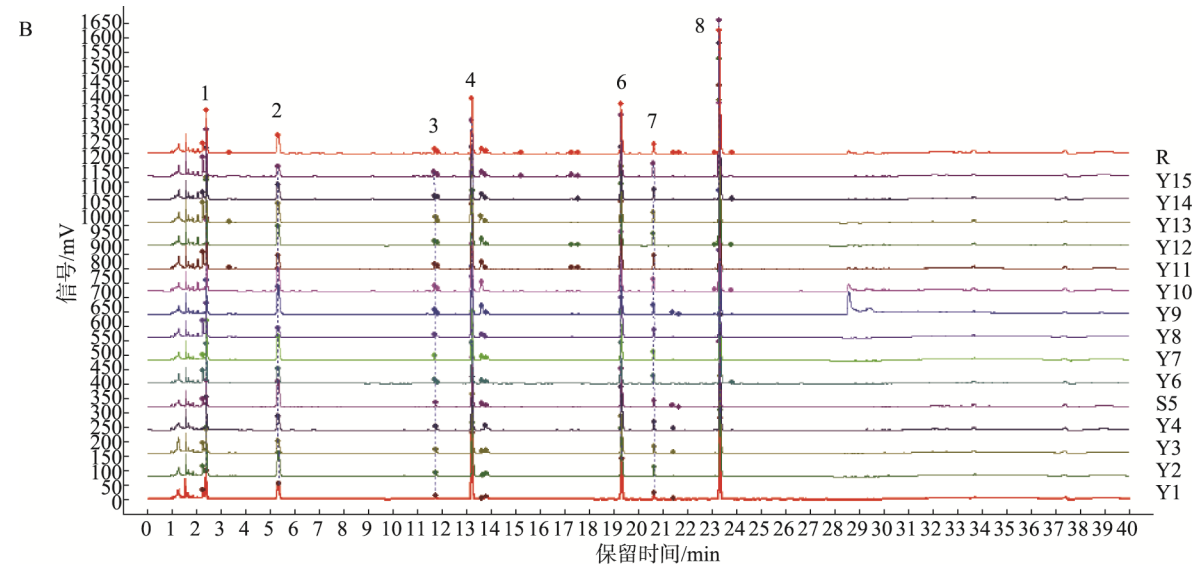
取 15 批食用天麻和 15 批药用天麻，按 1.3.2 项下方法制备供试品溶液，按 1.3.3 项下色谱条件进样测定，记录色谱图。分别导入《中药色谱指纹图谱相似度评价系统》(2012 年版)进行图谱分析[21]，设定 S1 和 Y1 样品图谱作为参照图谱，时间窗宽度为 0.1 min，采用中位数法结合多点校正，进行色谱峰匹配，生成对照图谱和叠加图谱。15 批食用天麻指纹图谱共标定 8 个共有峰，15 批药用天麻指纹图谱共标定 7 个共有峰，主要是由峰 5 具有细微差异导致共有峰减少。经混合对照品比对，指认其中 6 个色谱峰，依次为天麻素(峰 1)、对羟基苯甲醇(峰 2)、巴利森苷 E(峰 4)、巴利森苷 C(峰 6)、巴利森苷 B(峰 7)、巴利森苷(峰 8)。15 批食用天麻和 15 批药用天麻指纹图谱叠加图及其对照指纹图谱见图 1，混合对照品图谱见图 2。15 批食用天麻与药用天麻分别与对照图谱进行相似度评价分析，结果见表 3，食用天麻相似度为 0.959~0.998，药用天麻相似度为 0.945~0.997，二者相似度均较高，可用于天麻的整体质量控制。



注：1. 天麻素；2. 对羟基苯甲醇；4. 巴利森苷 E；6. 巴利森苷 C；7. 巴利森苷 B；8. 巴利森苷，图 2 同。R 为对照指纹图谱。

图 1 15 批食用天麻(A)和 15 批药用天麻(B)指纹图谱叠加图及其对照指纹图谱

Fig.1 Overlay of fingerprints and their reference fingerprints of 15 batches of edible *Gastrodia elata* (A) and 15 batches of medicinal *Gastrodia elata* (B)



注: 1. 天麻素; 2. 对羟基苯甲醇; 4. 巴利森苷 E; 6. 巴利森苷 C; 7. 巴利森苷 B; 8. 巴利森苷，图 2 同。R 为对照指纹图谱。

图 1(续)　15 批食用天麻(A)和 15 批药用天麻(B)指纹图谱叠加图及其对照指纹图谱

Fig.1　Overlay of fingerprints and their reference fingerprints of 15 batches of edible *Gastrodia elata* (A) and 15 batches of medicinal *Gastrodia elata* (B)

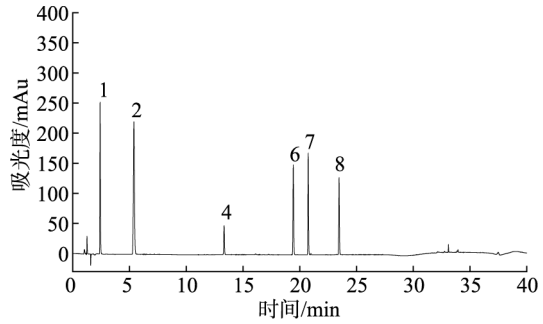


图 2　混合对照品图谱

Fig.2　Chromatogram of mixed reference substances

2.3　含量结果分析

对 11 个产地、2 个采收期共 30 批次天麻样品按 1.3.2 项下方法制备供试品溶液，按 1.3.3 项下色谱条件进样测定 6 个主要成分的峰面积，采用外标法计算含量。结果显示，食用采收期天麻的天麻素、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷及总巴利森苷类的平均值总体上高于药用采收期(图 3)，对羟基苯甲醇含量在两组间基本持平。进一步以 PC1 得分(反映天麻素及巴利森苷类综合水平)为指标进行双因素方差分析[22]，结果显示食用采收期的综合品质显著高于药用采收期(P=0.048)，表明食用天麻在核心功能成分上具有统计上的优势。

按产地进行统计(图 4)，陕西产地的天麻素、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷、天麻素+对羟基苯甲醇及总巴利森苷等品质指标上均高于湖北和贵州。值得注意的是，贵州产天麻的巴利森苷 E 含量相对较高，而巴利森苷及总巴利森苷含量明显低于陕西和湖北。

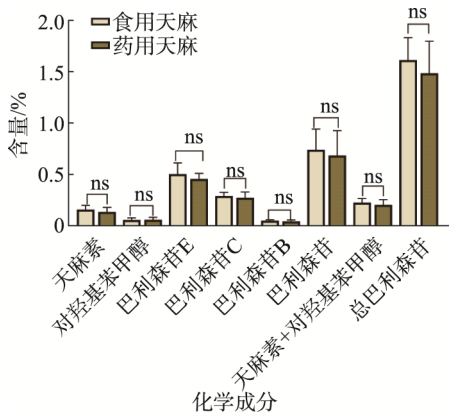
2.4　主成分分析结果

将 30 批天麻的 6 个主要成分的峰面积导入 SPSS 26.0 软件进行主成分分析(principal component analysis, PCA)，取样适切性量数(kaiser-meyer-olkin measure of sampling

表 3　食用与药用天麻相似度评价结果

Table 3　Similarity evaluation results of edible and medicinal *Gastrodia elata*

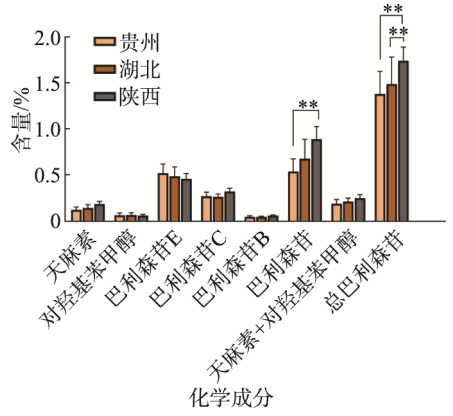
编号	相似度	编号	相似度
S1	0.998	Y1	0.972
S2	0.961	Y2	0.945
S3	0.986	Y3	0.978
S4	0.992	Y4	0.996
S5	0.959	Y5	0.955
S6	0.988	Y6	0.997
S7	0.988	Y7	0.996
S8	0.975	Y8	0.982
S9	0.992	Y9	0.991
S10	0.994	Y10	0.984
S11	0.995	Y11	0.992
S12	0.988	Y12	0.989
S13	0.998	Y13	0.997
S14	0.980	Y14	0.993
S15	0.987	Y15	0.991



注: ns 无显著差异(P>0.05)。

图 3 食用天麻与药用天麻主要化学成分含量对比

Fig.3 Comparison of main chemical component content between edible and medicinal *Gastrodia elata*



注: **表示差异极显著(P<0.01)。

图 4 不同产地天麻主要化学成分含量对比

Fig.4 Comparison of main chemical component content of *Gastrodia elata* from different geographical origins

adequacy, KMO)检验值为 0.580, Bartlett 球形检验 P<0.01, 表明数据基本满足 PCA 的前提条件[23]。以特征值大于 1 为筛选标准, 共得到 2 个主要成分, 结果见图 5, 第一、二主要成分特征值分别为 3.353 和 1.437, 方差贡献率分别为 55.561%和 24.264%, 累计方差贡献率为 79.852%(表 4)表明这两个 PCA 可代表 30 批天麻的大部分化学成分信息。天麻的 PCA 因子载荷矩阵结果见表 4, 天麻素、巴利森苷、巴利森苷 C、巴利森苷 B 在 PC1 上载荷绝对值较大; 对羟基苯甲醇和巴利森苷 E 在 PC2 上载荷绝对值较大。经最大方差法旋转后, 两个 PCA 的载荷结构更加清晰(表 5), 表明以天麻素、对羟基苯甲醇、巴利森苷 E、巴利森苷 C、巴利森苷 B、巴利森苷 6 个成分为食用和药用天麻的主要质量评价指标是可行的[24]。PCA 得分(F_1~F_2)通过公式计算: F=Z_X×t, 其中, Z_X 为标准化后的数据矩阵, t 为载荷矩阵[25]。以各成分的方差贡献率为权重系数, 计算综合得分并进行排序, 即 $F_{综}$=0.55561×F_1+0.24264×F_2, 见表 6。排名靠前的包含食用天麻与药用天麻。

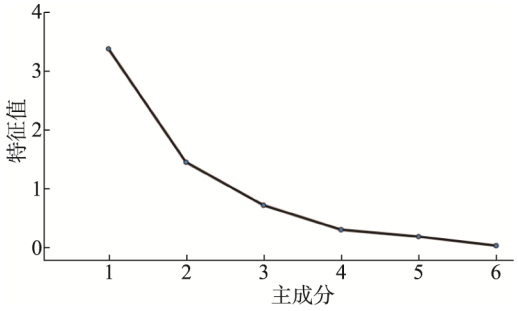


图 5 主成分碎石图

Fig.5 Scree plot of principal component

表 4 天麻的 PCA 因子载荷矩阵及方差贡献率

Table 4 PCA component matrix and variance contribution rates of *Gastrodia elata*

成分	PC1	PC2
巴利森苷 B	0.966	–0.054
巴利森苷 C	0.899	–0.043
巴利森苷	0.892	0.083
天麻素	0.882	0.227
巴利森苷 E	0.036	–0.865
对羟基苯甲醇	–0.193	0.791
特征值	3.353	1.437
方差贡献率/%	55.561	24.264
累计方差贡献率/%	79.852	

表 5 旋转后的 PCA 因子载荷矩阵

Table 5 PCA factor loading matrix after rotation

成分	PC1	PC2
巴利森苷 B	0.956	0.150
天麻素	0.900	–0.138
巴利森苷	0.896	0.007
巴利森苷 C	0.890	0.132
巴利森苷 E	–0.051	0.864
对羟基苯甲醇	–0.113	–0.806

2.5 正交偏最小二乘判别分析

30 批天麻 6 个主要成分峰面积经 Simca 14.1 软件建模分析后进行 OPLS-DA[26], 结果见图 6。Q^2 为–0.0349, 表明该模型无效。这一结果说明, 基于 6 种主要成分的化学谱无法有效区分食用与药用天麻, 与 PCA 结果一致, 即两种采收期天麻的化学特征高度相似, 从食品开发角度, 这意味着食用天麻在化学成分谱上与药用天麻具有一致性, 为其作为功能食品原料的替代使用提供了化学依据。

2.6　产地与采收期效应的方差分析与多重比较

2.6.1　产地与采收期对 PC1 的双因素方差分析

以 PC1 的得分(F_1)为因变量, 以产地(陕西、湖北、贵州)和采收期(食用、药用)为固定因子, 进行 3×2 双因素方差分析。结果(表 7)显示产地效应达到极显著水平(F=17.823, P<0.001, 偏 η^2=0.598), 解释了总变异的 59.8%, 表明产地是 PC1 的首要决定因素, 陕西产地天麻边际估算平均值 0.854 优于湖北–0.399 与贵州产地–0.705; 采收期效应达到显著水平(F=4.340, P=0.048, 偏 η^2=0.153), 根据边际估算平均值, 食用组平均值 0.167, 药用组平均值为–0.334, 因此食用采收期的综合品质得分显著高于药用采收期。产地与采收期的交互作用未达显著水平(F=2.915, P=0.074, 偏 η^2=0.195), 但呈现一定的趋势。修正模型整体极显著(P<0.001), R^2=0.652, 表明产地和采收期联合解释了综合品质因子 65.2%的变异。

2.6.2　产地与采收期对 PC2 的双因素方差分析

以 PC2 的得分 F_2 为因变量, 进行同样的 3×2 双因素方差分析。结果表 8 显示: 修正模型整体不显著(F=1.058, P=0.407, R^2=0.181), 产地效应不显著(P=0.599), 采收期效应不显著(P=0.219), 产地×采收期交互作用亦不显著(P=0.226)。这表明巴利森苷 E 与对羟基苯甲醇的转化比例不受产地和采收期的显著影响。

2.6.3　不同产地 PC1 的多重比较

采用最小显著差异法对不同产地天麻的 F_1 得分进行多重比较[27], 结果表 9 显示, 陕西产天麻的 PC1 极显著高于湖北和贵州(P<0.001), 平均值差值分别为 1.253 和 1.558; 湖北与贵州之间差异不显著(P=0.331)。陕西产天麻的 F_1 得分均值达 0.854, 而湖北和贵州分别为–0.399 和–0.705, 陕西产地天麻品质优于湖北与贵州产地, 与双因素方差分析结果一致。

表 6　30 批天麻样品 PCA 得分及排序

Table 6　PCA scores and ranking of 30 batches of *Gastrodia elata* samples

样品	F_1	F_2	$F_{综}$	排序
S1	1.13	0.36	0.90	5
S2	–0.99	2.75	0.15	15
S3	–0.16	0.67	0.09	16
S4	–0.01	1.06	0.31	10
S5	–0.78	–1.26	–0.92	28
S6	1.39	1.33	1.37	1
S7	–0.34	0.08	–0.21	19
S8	–0.71	1.35	–0.09	18
S9	–0.66	–1.36	–0.87	27
S10	0.91	0.37	0.75	7
S11	0.66	–0.32	0.36	9
S12	0.23	–0.43	0.03	17
S13	0.51	–0.47	0.21	11
S14	1.46	–0.30	0.92	3
S15	0.68	–0.99	0.17	14
Y1	–1.45	0.57	–0.84	26
Y2	–0.41	–0.90	–0.56	20
Y3	–1.70	0.55	–1.01	29
Y4	–0.92	0.11	–0.61	22
Y5	–1.76	–1.30	–1.62	30
Y6	–0.77	–0.66	–0.73	24
Y7	–0.40	–1.14	–0.62	23
Y8	–1.23	0.96	–0.56	21
Y9	–0.48	–1.35	–0.75	25
Y10	1.51	–1.23	0.68	8
Y11	1.48	0.92	1.31	2
Y12	1.39	–0.40	0.85	6
Y13	0.19	0.21	0.20	13
Y14	0.32	–0.06	0.20	12
Y15	0.91	0.89	0.91	4

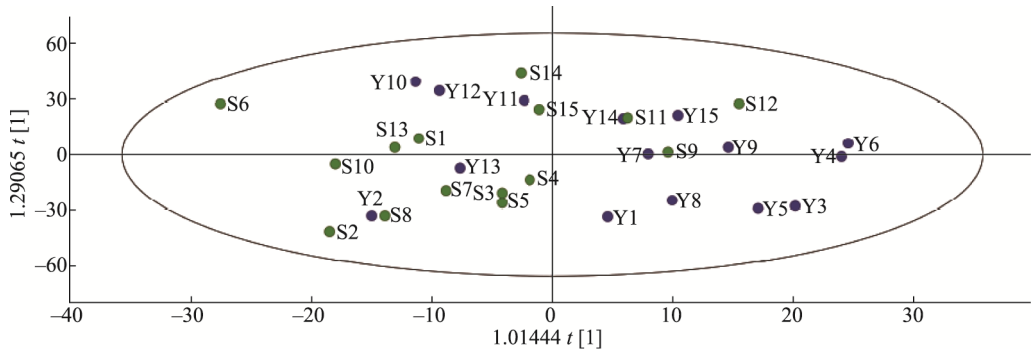


图 6　30 批天麻样品 OPLS-DA 得分图

Fig.6　OPLS-DA score plot of 30 batches of *Gastrodia elata* samples

表 7　F_1 的双因素方差分析

Table 7　Two-way variance analysis of F_1

变异来源	III 类平方和	自由度	均方	F	P	偏 η^2
修正模型	18.909[a]	5	3.782	8.994	<0.001	0.652
截距	0.204	1	0.204	0.484	0.493	0.020
产地	14.988	2	7.494	17.823	<0.001	0.598

表 7(续)

变异来源	III 类平方和	自由度	均方	F	P	偏 η^2
采收期	1.825	1	1.825	4.340	0.048	0.153
产地×采收期	2.451	2	1.226	2.915	0.074	0.195
误差	10.091	24	0.420	-	-	-

注: [a] 表示 R^2=0.652, 调整后 R^2=0.580; -表示无信息, 表 9 同。

表 8 F_2 的双因素方差分析

Table 8 Two-way variance analysis of F_2

变异来源	III 类平方和	自由度	均方	F	P	偏 η^2
修正模型	5.239[a]	5	1.048	1.058	0.407	0.181
产地	1.038	2	0.519	0.524	0.599	0.042
采收期	1.577	1	1.577	1.593	0.219	0.062
产地×采收期	3.132	2	1.566	1.582	0.226	0.116
误差	23.761	24	0.990	-	-	-

注: [a] 表示 R^2=0.181, 调整后 R^2=0.010。

表 9 不同产地 F_1 得分的多重比较

Table 9 Multiple comparisons of F_1 scores among different geographical origins

对比组	平均值差值	标准误差	P	95%置信区间
陕西与湖北	1.253	0.296	<0.001	[0.642, 1.864]
陕西与贵州	1.558	0.278	<0.001	[0.985, 2.132]
湖北与贵州	0.305	0.308	0.331	[–0.329, 0.940]

3 讨论与结论

早在 2002 年天麻被列入《可用于保健食品的物品名单》, 在 2019 年被纳为“按照传统既是食品又是中药材的物质”管理的试点品种[28], 2023 年被卫健委纳入目录, 天麻的安全性与有效性体现其巨大开发价值[29]。本研究基于天麻的 6 种主要酚类成分发现, 食用采收期天麻 PC1 综合品质得分上显著高于药用采收期, 结合 OPLS-DA 分析结果, 食用与药用天麻的化学谱高度相似, 具备作为功能食品原料的物质基础。虽然单个成分的差异未达到统计学显著水平, 但多成分综合加权后呈现出系统性优势, 这反映了天麻素与巴利森苷类成分在积累上的协同性。另外, 食用天麻在核心神经保护活性成分[11,17–19](天麻素、巴利森苷类)上优于药用天麻, 且采收期更早, 可缩短种植周期、降低生产成本, 具有更高的经济价值。与采收期相比, 产地效应解释了综合品质 59.8%的变异, 是影响天麻品质的首要因素。陕西产区天麻的 PC1 得分极显著高于湖北和贵州, 这可能与秦巴山区独特的地质背景、气候生态因子和微生物群落的协同作用有关[30]。

根据种植经验, 早采天麻的纤维化程度较低、苦味较淡, 口感更佳, 这有待后续感官评价验证; 本研究中仅测定了 6 种酚类成分, 未涵盖多糖、核苷等天麻中其他类型活性成分, 后续可结合更广泛的化学成分谱进行评价, 此外, 产地效应背后的具体环境驱动因子如土壤、气候、微生物等尚未测定, 也有待于后续进行研究, 以全面完善食用与药用天麻质量评价。

综上所述, 本研究通过指纹图谱、化学计量学分析与指标成分含量测定、双因素分析、多重比较分析方法相结合, 构建了天麻不同采收期的综合评价体系, 为天麻的采收时间与食品化利用开发提供参考。

参考文献

[1] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志-第十八卷-被子植物门 单子叶植物纲 兰科(二)[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 31.
Wu Zhengyi, Raven P H, Hong Deyuan. Flora of China. volume 18. Scrophulariaceae through Gesneriaceae [M]. Beijing: Science Press, 1999: 31.

[2] 王晓杰, 姜枫, 李运伦. 天麻古今功效浅析[J]. 辽宁中医药大学学报, 2022, 24(4): 74–79.
Wang Xiaojie, Jiang Feng, Li Yunlun. Analysis of effect of Tianma (*Gastrodiae rhizoma*) [J]. Journal of Liaoning University of Traditional Chinese Medicine, 2022, 24(4): 74–79.

[3] 左涵珺. 天麻素通过调控活化小胶质细胞中 PI_3K/AKT 信号通路对缺氧缺血性脑损伤保护作用的机制研究[D]. 昆明: 昆明医科大学, 2024: 1.
Zuo Hanjun. Study on protective mechanism *Gastrodin* on hypoxicischemic brain damage by regulating PI_3K/AKT signaling pathway in activated microglia [D]. Kunming: Kunming Medical University, 2024: 1.

[4] 高玉梅, 王晓玲, 胡晓霞, 等. 天麻对 APP/PS1 痴呆小鼠模型的神经保护作用及其对衰老相关蛋白的影响[J]. 中国老年学杂志, 2023, 43(23): 5767–5772.
Gao Yumei, Wang Xiaoling, Hu Xiaoxia, et al. Neuroprotective effect of rhizome *Gastrodiae* on APP/PS1 dementia mouse model and its effects on aging-related proteins [J]. Chinese Journal of Gerontology, 2023, 43(23): 5767–5772.

[5] 董研, 付天娇, 苑广信. 天麻多糖提取及对东莨菪碱诱导小鼠学习记忆障碍的改善作用[J]. 北华大学学报(自然科学版), 2025, 26(6): 736–744.
Dong Yan, Fu Tianjiao, Yuan Guangxin. Extraction of polysaccharides from *Gastrodia elata* blume and their ameliorative effects on learning and memory impairments induced by scopolamine in mice [J]. Journal of Beihua University (Natural Science), 2025, 26(6): 736–744.

[6] Shakir M Z, Ullah I, Usmani M W, et al. *Gastrodia elata* Blume (Tianma) extract mitigates simulated microgravity-induced oxidative stress and

enhance learning and memory in *Caenorhabditis elegans* [J]. Life Sciences in Space Research, 2026, 52: 154–169.

[7] 李鹏, 陈凡, 冯瑞兴, 等. 天麻素对小鼠放射性心脏损伤的保护作用[J]. 中国高原医学与生物学杂志, 2019, 40(3): 174–179.
Li Peng, Chen Fan, Feng Ruixing, et al. Effects of *Gastrodin* on radiation induced heart injury in mice [J]. Chinese High Altitude Medicine and Biology, 2019, 40(3): 174–179.

[8] Han Xiao, Shi Hai, Liu Kun, et al. Protective effect of *Gastrodin* on myocardial ischemia-reperfusion injury and the expression of Bax and Bcl-2 [J]. Experimental and Therapeutic Medicine, 2019, 17(6): 4389–4394.

[9] Wang Jianli, Wu Minghua. The up-regulation of miR-21 by *Gastrodin* to promote the angiogenesis ability of human umbilical vein endothelial cells by activating the signaling pathway of PI3K/Akt [J]. Bioengineered, 2021, 12(1): 5402–5410.

[10] Gong Mengqi, Lai Feifan, Chen Jianzhen, et al. Traditional uses, phytochemistry, pharmacology, applications, and quality control of *Gastrodia elata* Blume: a comprehensive review [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 319: 117128.

[11] Xiang Hongchun, Tan Chen, Long Man, et al. Unraveling the neuroprotective mechanism of *Gastrodin* against CRS-induced depression in adult male mice *via* Notch3: integration of proteomics, transcriptomics, molecular docking, and cellular validation [J]. Phytomedicine, 2026, 150: 157705.

[12] Du Ruochen, Guo Ying, Zhong Wanting, et al. *Gastrodin* alleviates myocardial infarction by inhibiting inflammation, and apoptosis and promoting endothelial cell proliferation [J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2025, 42: 102014.

[13] Xu Qiang, Xuan Ge, Zhu Chongying, et al. *Gastrodin* produces therapeutic effects against preeclampsia by activating Wnt 3a signaling and inhibiting ferroptosis [J]. Experimental Cell Research, 2026, 454(1): 114827.

[14] Jiang Wei, Zhang Lifeng, Shan Wenshan, et al. *Gastrodin* promotes osteogenic differentiation by stimulating the Wnt/*β*-catenin signaling pathway [J]. Molecular and Cellular Probes, 2025, 82: 102035.

[15] Zhang Qingxiu, Chen Xingyi, Liao Meijuan, et al. *Gastrodin* ameliorates nonalcoholic fatty liver disease *via* inhibiting hepatic ferroptosis by the Keap1/Nrf2 signaling pathway [J]. Phytomedicine, 2026, 151: 157762.

[16] Ma Wenxin, Wang Shuang, Yang Xiyao, et al. *Gastrodin* and *Gastrodigenin*: advancing neurogenesis in neurological disease management [J]. Food Research International, 2026, 232: 118882.

[17] Liu Xiaoxue, Zhou Hejiang, Yang Na, et al. Parishin from *Gastrodia elata* ameliorates DSS induced colitis and anxiety-like behavior in mice by regulating intestinal barrier function and microviota-gut-brain axis [J]. Phytomedicine, 2025, 145: 157019.

[18] Akhtar A, Singh P, Admane N, et al. Parishin C modulates the amyloid transformation of alpha-synuclein protein by apparently interacting with the NAC domain [J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Proteins and Proteomics, 2025, 1873(4): 141076.

[19] Jiang Ning, Yao Caihong, Zhang Yiwen, et al. Antidepressant effects of Parishin C in chronic social defeat stress-induced depressive mice [J]. Journal of Ethnopharmacology, 2024, 325: 117891.

[20] 丁铃, 周涛, 吴桃生, 等. 天麻产区变迁与产业发展现状及建议[J]. 中药材, 2025, 48(1): 1–7.
Ding Ling, Zhou Tao, Wu Taosheng, et al. Status and suggestions of changes of producing area and industrial development of *Gastrodia elata* [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2025, 48(1): 1–7.

[21] 陈祥祥, 高松, 陈娜娜, 等. 基于超高效液相色谱指纹图谱结合化学模式识别和多成分定量的不同产地花椒质量评价[J]. 中南药学, 2026, 24(5): 272–277.
Chen Xiangxiang, Gao Song, Chen Nana, et al. Quality evaluation of *Zanthoxylum bungeanum* from different areas based on UPLC fingerprint combined with chemical pattern recognition and multi-component quantification [J]. Central South Pharmacy, 2026, 24(5): 272–277.

[22] 戴金辉, 韩存. 双因素方差分析方法的比较[J]. 统计与决策, 2018, 34(4): 30–33.
Dai Jinhui, Han Cun. A comparative study on two-way ANOVA [J]. Statistics and Decision, 2018, 34(4): 30–33.

[23] 方可儿, 陈磊, 叶宇, 等. 基于多模式识别结合高效液相色谱法指纹图谱的不同产地三叶青的质量比较[J]. 中华中医药杂志, 2026, 41(2): 432–438.
Fang Keer, Chen Lei, Ye Yu, et al. Comparative study on the quality of *Tetrastigma hemsleyanum* from different producing areas based on multi-pattern recognition combined with HPLC fingerprint [J]. China Journal of Traditional Chinese Medicine and Pharmacy, 2026, 41(2): 432–438.

[24] 陆礼和, 夏伟军, 叶兴蓉, 等. 基于高效液相色谱指纹图谱法结合化学计量学对不同厂家红花黄进行质量评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(11): 214–221.
Lu Lihe, Xia Weijun, Ye Xingrong, et al. Quality evaluation of safflower yellow extracts from different manufacturers based on high performance liquid chromatography fingerprint combined with chemometrics [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(11): 214–221.

[25] 杨丽, 陈洁姗, 陈宏基, 等. 基于指纹图谱与多成分定量分析的荷叶药材质量评价[J]. 中药材, 2025, 48(8): 2020–2025.
Yang Li, Chen Jieshan, Chen Hongji, et al. Quality evaluation of lotus leaf based on fingerprint and multi-component quantitative analysis [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2025, 48(8): 2020–2025.

[26] 杜娟, 丛珊, 刘峰, 等. 不同产地艾叶药材 UPLC 指纹图谱的建立和多指标成分含量测定[J]. 中药材, 2025, 48(8): 2026–2032.
Du Juan, Cong Shan, Liu Feng, et al. Establishment of UPLC fingerprint of *Artemisia argyi* from different habitats and determination of multi-index components [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2025, 48(8): 2026–2032.

[27] 王祺茹. 苦参总黄酮自微乳的研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2017: 30–33.
Wang Qiru. The research of total flavonoids from *Sophora* Flavescens self-microemulsifying drug delivery system [D]. Harbin: Heilongjiang University of Chinese Medicine, 2017: 30–33.

[28] 单锋, 周良云, 蒋长顺, 等. 天麻的食用历史及发展建议[J]. 中国食品药品监管, 2021(3): 110–115.
Shan Feng, Zhou Liangyun, Jiang Changshun, et al. Edible history and development suggestions of *Gastrodia elata* [J]. China Food & Drug Administration Magazine, 2021(3): 110–115.

[29] 上官晨虹, 赵博, 陈琛. 药食两用天麻的安全性评价研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5946–5954.
Shangguan Chenhong, Zhao Bo, Chen Chen. Research progress on safety evaluation of edible and medicinal *Gastrodia elata* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5946–5954.

[30] 张建. 秦巴山区汉中略阳发展天麻产业的路径策略[J]. 中国农村科技, 2026(3): 37–39.
Zhang Jian. Path strategy of developing *Gastrodia elata* industry in Lveyang, Hanzhong qinba mountain area [J]. China Rural Science & Technology, 2026(3): 37–39.

(责任编辑: 曹岱琳　韩晓红)