

基于 HS-GC-IMS 法分析不同基原川贝母药材挥发性成分及其标志物

赖楠楠¹, 胡本祥¹, 杨冰月¹, 徐胜¹, 杨洁¹, 李铂², 张小飞¹, 周静¹, 陆博³, 颜永刚¹, 彭亮^{1*}

1. 陕西中医药大学 药学院/陕西省秦岭中草药应用开发工程技术研究中心, 陕西 咸阳 712046

2. 陕西中医药大学 陕西中药资源产业化省部共建协同创新中心, 陕西 咸阳 712046

3. 柞水县科技开发中心, 陕西 商洛 711400

摘要:目的 探讨 6 种基原川贝母挥发性有机物组成及其差异特征, 为川贝母药材基原鉴别和质量评价提供参考。方法 采用顶空-气相色谱-离子迁移谱技术 (headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS) 对川贝母 *Fritillaria cirrhosa*、暗紫贝母 *F. unibracteata*、甘肃贝母 *F. przewalskii*、梭砂贝母 *F. delavayi*、太白贝母 *F. taipaiensis* 和瓦布贝母 *F. unibracteata* var. *Wabuensis* 的干燥鳞茎进行挥发性成分分析。通过 GC-IMS Library Search 内置 NIST 数据库和 IMS 数据库进行定性匹配, 并结合主成分分析 (principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘法-判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA) 及层次聚类分析评价不同基原样品间挥发性成分差异。**结果** 共鉴定出 90 种挥发性有机物, 主要包括醛类、醇类、酮类、酯类、羧酸类、吡嗪类、含硫化合物等, 其中醛类、醇类和酮类为主要组成类别。PCA 和 OPLS-DA 结果显示, 6 种基原川贝母样品可实现较好区分。基于变量重要性投影值筛选出 17 个差异标志物, 包括醋酸乙酯、2-丙酮、 α -水芹烯、3-羟基-2-丁酮、乙酸甲酯、2-丙硫醇、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、乙酸丙酯、3-甲基丁醛、1-丁醇、2-甲基-2-丙烯醛、己醛、3-甲基-1-戊醇、2-甲基丙酸、3-丁烯腈、苯甲醛和 2-辛酮。聚类热图进一步表明, 上述差异成分可反映不同基原川贝母的挥发性代谢特征。**结论** HS-GC-IMS 结合化学计量学方法能够有效表征不同基原川贝母挥发性有机物差异, 可为川贝母基原鉴别、质量评价及特征成分筛选提供技术参考。

关键词: 川贝母; 基原鉴别; 顶空-气相色谱-离子迁移谱; 挥发性有机物; 差异标志物

中图分类号: R282.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)13-5244-13

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.13.026

Analysis of volatile components and markers from different original species of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* based on HS-GC-IMS

LAI Nannan¹, HU Benxiang¹, YANG Bingyue¹, XU Sheng¹, YANG Jie¹, LI Bo², ZHANG Xiaofei¹, ZHOU Jing¹, LU Bo³, YAN Yonggang¹, PENG Liang¹

1. Shaanxi Qinling Application Development and Engineering Center of Chinese Herbal Medicine, College of Pharmacy, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xiayang 712046, China

2. Shaanxi Provincial and Ministerial Co-construction Collaborative Innovation Center for Industrialization of Traditional Chinese Medicine Resources, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xiayang 712046, China

3. Zhashui County Science and Technology Development Center, Zhashui 711400, China

Abstract: Objective To investigate the composition and differential characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* (FCB) from six legally authorized origins, and provide a reference for origin identification and quality evaluation of FCB. **Methods** Headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) was employed to analyze the volatile components in dried bulbs of *Fritillaria cirrhosa*, *F. unibracteata*, *F. przewalskii*, *F. delavayi*, *F. taipaiensis* and *F. unibracteata* var. *Wabuensis*. Qualitative matching was performed using the built-in NIST and IMS database of GC-IMS Library

收稿日期: 2026-02-02

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2023YFD1600402, 2024YFC3506400); 陕西省科技厅社发重点项目 (No.2024SF-GJHX-05); 中央引导地方科技发展专项项目 (2025ZY-XCZXZS-22, 2024ZY-CGZY-12); 陕西省中医药管理项目 (2021-QYZL-02, 2025-CXTD-01)

作者简介: 赖楠楠, 女, 硕士研究生, 主要从事中药资源品质评价研究。E-mail: lainann07@126.com

*通信作者: 彭亮, 男, 教授, 主要从事中药资源评价与利用、分子生药学研究。E-mail: ppengliang@126.com

Search. Principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), and hierarchical cluster analysis (HCA) were applied to evaluate the differences in volatile components among samples from different origins. **Results** A total of 90 volatile organic compounds were preliminarily identified, mainly including aldehydes, alcohols, ketones, esters, carboxylic acids, pyrazines, and sulfur-containing compounds. Among them, aldehydes, alcohols, and ketones were the major categories. PCA and OPLS-DA results indicated that FCB samples from the six origins could be well distinguished. Based on variable importance in projection (VIP) values, 17 potential differential markers were screened out, including ethyl acetate, 2-propanone, α -phellandrene, 3-hydroxy-2-butanone, methyl acetate, 2-propanethiol, 2-isobutyl-3-methoxypyrazine, propyl acetate, 3-methylbutanal, 1-butanol, 2-methyl-2-propenal, hexanal, 3-methyl-1-pentanol, 2-methylpropanoic acid, 3-butenenitrile, benzaldehyde, and 2-octanone. Cluster heatmap analysis further demonstrated that the above differential compounds could reflect the volatile metabolic characteristics of FCB from different origins. **Conclusion** HS-GC-IMS combined with chemometrics can effectively characterize the differences in volatile organic compounds among FCB from different origins, providing technical reference for origin identification, quality evaluation, and characteristic component screening of FCB.

Key words: *Fritillariae Cirrhosae Bulbus*; origin identification; headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile organic compounds; differential markers

川贝母为百合科 (Liliaceae) 贝母属 *Fritillaria* L. 多种植物的干燥鳞茎, 是我国传统名贵中药材之一, 始载于历代本草, 临床应用历史悠久^[1]。其性微寒, 味苦、甘, 归肺、心经, 具有清热润肺、化痰止咳、散结消痈等功效, 是治疗呼吸系统疾病, 尤其是咳嗽、哮喘及慢性气道炎症相关疾病的重要药材^[2-3]。贝母属植物资源丰富, 全球约有 140 种, 我国分布 20 余种^[4]。《中国药典》2025 年版收载的川贝母来源于川贝母 *Fritillaria cirrhosa* D. Don. (又名卷叶贝母)、暗紫贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia.、甘肃贝母 *F. przewalskii* Maxim.、梭砂贝母 *F. delavayi* Franch.、太白贝母 *F. taipaiensis* P. Y. Li. 和瓦布贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia var. *wabuensis* (S. Y. Tanget S. C. Yue) Z. D. Liu, S. Wang et S. C. Chen. 的干燥鳞茎, 主产于四川、西藏、云南、青海、甘肃和陕西等地^[5]。由于川贝母基原复杂、产区跨度大、生态环境差异明显, 不同基原药材在形态性状、资源分布、化学组成及市场价格等方面均存在一定差异, 给药材真伪鉴别、质量控制和临床合理应用带来挑战^[6-7]。

川贝母含有甾体生物碱、有机酸及其酯类、核苷、甾醇及其苷类、多糖、皂苷和挥发性成分等^[8]。其中, 贝母类生物碱长期以来被认为是川贝母镇咳、祛痰、平喘等药理作用的重要活性基础^[9], 也是目前川贝母质量评价研究中关注较多的一类成分。有机酸、核苷、多糖及其他极性成分则在抗炎、抗氧化、免疫调节等方面发挥作用^[10-11]。贝母挥发性成分兼具抗炎、抗菌及镇痛等活性, 同时也是构成川贝母气味特征的物质基础^[12-13]。传统典籍仅记载川贝母“气微, 味微苦”, 并未对不同基原间的气

味差异进行明确区分。郭嘉鑫等^[14]采用超临界 CO₂ 萃取结合 GC-MS 技术, 从暗紫贝母挥发油中鉴定出 32 个化合物, 为暗紫贝母挥发性成分研究提供了系统数据。冯文豪等^[15]、郭凤柳等^[16]则利用 GC-IMS 和电子鼻等技术证实了川贝母与伊贝母、平贝母等近缘品种的挥发性物质组成存在显著差异, 在气味、苦味、腥气等方面存在可区分差异, 可作为客观鉴别指标。

顶空-气相色谱-离子迁移谱技术 (headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS) 与传统水蒸气蒸馏、固相微萃取及 GC-MS 等方法相比, 具有检测速度快、灵敏度高、响应直观等特点^[17-18]。近年来, 已在当归、甘草、远志等中药材的基原鉴别、真伪鉴定与质量控制研究中, 展现出良好的应用前景^[19-21]。基于此, 本研究采用 HS-GC-IMS 技术, 联合主成分分析 (principal component analysis, PCA)、正交偏最小二乘法-判别分析 (orthogonal partial least squares-discriminant analysis, OPLS-DA)、变量权重值 (variable importance projection, VIP) 筛选及聚类分析等多元统计分析方法, 系统比较 6 种法定基原川贝母的挥发性成分组成与相对丰度差异, 筛选具有基原特异性的差异挥发性标志物, 旨在进一步丰富川贝母挥发性成分研究数据, 为多基原川贝母的快速基原鉴别、真伪区分与质量评价提供科学、可靠的实验依据与方法学参考。

1 仪器与试剂

1.1 仪器

FlavourSpec® 风味分析仪, 配备顶空自动进样器、气相色谱分离系统及离子迁移谱检测器, 德国

G.A.S.公司; QUINTIX213-1CN 型电子分析天平, 北京多利斯科学仪器有限公司; DFY-400 型高速粉碎机, 浙江温岭市林大机械有限公司; DHG-9245A 型电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; SB-5200DT 型台式超声波清洗器, 宁波新芝生物科技股份有限公司; 20 mL 顶空进样瓶及配套密封垫, 德国 G.A.S.公司。

1.2 试药

本研究所用样品具体信息见表 1。所有样品由

陕西中医药大学胡本祥教授鉴定, 依次为百合科贝母属川贝母 *F. cirrhosa* D. Don.、暗紫贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia.、甘肃贝母 *F. przewalskii* Maxim.、梭砂贝母 *F. delavayi* Franch.、太白贝母 *F. taipaiensis* P. Y. Li. 和瓦布贝母 *F. unibracteata* Hsiao et K. C. Hsia. var. *wabuensis* (S. Y. Tanget S. C. Yue) Z. D. Liu, S. Wang et S. C. Chen. 的鳞茎, 凭证标本保存于陕西省秦岭中草药应用开发工程技术研究中心。

表 1 不同基原川贝母药用植物样品信息

Table 1 Information on different legal original species of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* samples

样品信息	编号	经度	纬度	海拔/m	采集地点	采集时间	凭证标本号
川贝母	Fc1~5	101°48'58"	29°11'54"	3 748	四川松潘	2024-07-12	QLZCY-Fc-240712
暗紫贝母	FuC1~5	103°37'17"	32°43'10"	3 150	四川松潘	2024-07-10	QLZCY-FuC-240710
甘肃贝母	Fp1~5	104°04'27"	34°51'47"	2 900	甘肃章县	2024-07-15	QLZCY-Fp-240715
梭砂贝母	Fd1~5	101°30'31"	29°20'48"	4 560	四川九龙	2024-07-25	QLZCY-Fd-240725
太白贝母	Ft1~5	107°24'18"	34°03'39"	1 720	陕西太白	2024-07-18	QLZCY-Ft-240718
瓦布贝母	Fu1~5	103°41'12"	31°51'35"	2 850	四川茂县	2024-07-20	QLZCY-Fu-240720

2 方法

2.1 样品处理

新鲜鳞茎用清水迅速洗净表面泥土及杂质, 沥干表面水分后置于电热鼓风干燥箱内, 40~45 °C 干燥至恒定质量, 粉碎过四号筛 (250 μm、40 目) 混匀, 精密称取样品粉末 0.20 g, 置于 20 mL 顶空进样瓶中, 立即加盖密封。每个样品平行制备 5 份并测定, 以保证数据的稳定性和可重复性。

2.2 检测条件

2.2.1 顶空进样条件 顶空孵育温度为 80 °C, 孵育时间为 10 min, 孵育振荡转速为 500 r/min; 顶空进样针温度为 85 °C; 进样体积为 500 μL; 采用不分流进样模式。

2.2.2 气相色谱条件 色谱柱为 FS-SE-54-CB-0.5 柱, 规格为 15 m×0.53 mm; 柱温为 60 °C; 分析时间为 20 min; 载气为高纯氮气, 纯度≥99.999%。载气体积流量程序为: 初始体积流量 2 mL/min, 保持 2 min; 2~5 min 线性升至 15 mL/min; 5~10 min 线性升至 50 mL/min; 10~15 min 线性升至 100 mL/min; 15~20 min 线性升至 150 mL/min。

2.2.3 离子迁移谱 漂移管温度为 45 °C; 漂移气为高纯氮气, 纯度≥99.999%; 漂移气体积流量为 150 mL/min; IMS 检测器温度为 45 °C。样品分析过程中保持仪器运行状态稳定, 所有样品在相同检测条件下

完成测定, 以保证不同基原样品间数据的可比性。

2.3 数据处理与统计分析

采用仪器配套软件处理 HS-GC-IMS 检测数据, 通过 Library Search 软件结合内置 NIST 及 IMS 数据库, 依据挥发性化合物保留时间、保留指数、离子迁移时间及漂移时间进行匹配, 完成挥发性有机物初步定性, 并根据数据库匹配结果及谱图特征, 标注同一化合物 IMS 检测中出现的单体与二聚体信号峰。利用 Reporter 插件构建不同基原川贝母挥发性有机物三维谱图、二维俯视图及差异谱图, 直观比较成分分布及信号强度差异; 通过 Gallery Plot 插件生成挥发性有机物指纹图谱。

提取各挥发性成分峰体积或峰强度数据并归一化, 以归一化相对峰体积表示化合物相对含量。采用 Microsoft Excel 整理数据及基础计算, Origin 9.0 绘制图表并进行统计分析, SIMCA 14.1 软件完成 PCA、OPLS-DA 分析, MetaboAnalyst 在线平台绘制聚类热图。根据变量重要性投影值筛选对不同基原川贝母样品区分贡献较大的潜在差异挥发性成分, 其中变量权重值 (variable importance projection, VIP) > 1.2 的化合物作为重点差异变量进行后续分析^[22]。聚类热图分析前, 对差异成分峰强度数据进行 Z-score 标准化以消除响应强度差异影响, 通过颜色梯度反映各基原样品特征成分相对丰度。

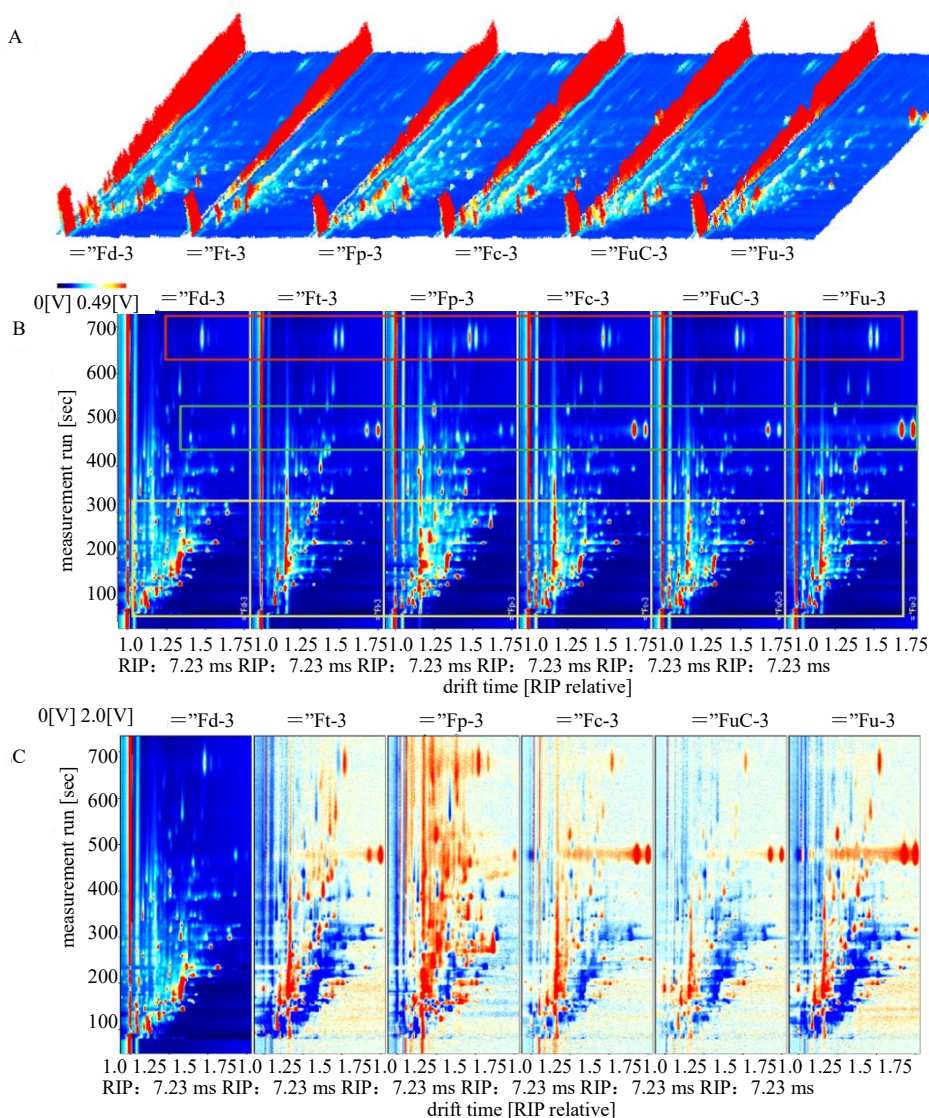
3 结果与分析

3.1 6种基原川贝母挥发性有机物整体谱图比较

采用 HS-GC-IMS 仪器自带分析软件对 6 种基原川贝母进行三维比对, 结果见图 1-A, X 轴表示用于识别的离子漂移时间, Y 轴表示 GC 的保留时间, Z 轴表示用于定量的离子反应峰强。三维谱图可以直观比较不同基原川贝母挥发性成分在出峰位置、数量和强度上的差异。

将三维谱图转换为二维俯视图进行分析, 结果见图 1-B。二维谱图以蓝色为背景, 归一化反应离子峰 (reactive ion peak, RIP) 位于横坐标 1.0 附近, 并以

红色垂直线表示。RIP 两侧的每个信号点代表一个挥发性成分或其离子峰信号, 信号颜色反映该成分的相对峰强度, 颜色由白色向红色加深表示相对丰度逐渐升高。由图 1-B 可知, 6 种基原川贝母样品的主要挥发性信号多集中于保留时间 100~500 s、漂移时间 1.0~1.75 ms 内, 表明该区域为川贝母挥发性有机物的主要分布区。不同基原样品在多个特征区域呈现出明显的信号强度差异, 其中甘肃贝母在部分区域显示较强信号, 而川贝母、瓦布贝母等样品亦在特定区域呈现相对较高的峰强度, 提示不同基原川贝母中挥发性成分存在差异化积累。



A-三维谱图; B-二维俯视图; C-差异对比图。

A-three-dimensional spectrogram; B-two-dimensional top view; C-difference comparison diagram.

图 1 6种基原川贝母挥发性有机物 HS-GC-IMS 谱图

Fig. 1 HS-GC-IMS spectra of volatile organic compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

以梭砂贝母作为参比样品, 对其余样品谱图进行扣减处理, 获得差异对比图 (图 1-C)。在差异谱图中, 白色区域表示样品与参比样品在相应位置的信号强度基本一致; 红色区域表示该样品中相应挥发性成分信号强度高于参比样品; 蓝色区域表示低于参比样品。结果显示, 以梭砂贝母为参比时, 甘肃贝母差异信号最为明显, 差异斑点数量较多且信号强度变化显著, 提示其挥发性有机物谱图与梭砂贝母差异较大。太白贝母、川贝母、暗紫贝母和瓦布贝母的差异谱图中亦可观察到不同程度的红色或蓝色信号区域, 说明这些基原样品与梭砂贝母在挥发性成分相对丰度方面同样存在差异。上述结果表明, 6 种基原川贝母挥发性有机物既具有共同的化学背景, 又存在可区分的谱图特征, 可为后续基于挥发性成分的基原鉴别和差异标志物筛选提供依据。

3.2 6 种基原川贝母挥发性成分定性分析

按化学结构类型分类, 主要包含醛类、醇类、酮类、羧酸类、酯类、含硫化合物、吡嗪类、呋喃类、萜烯芳香烃、内酯类、腈类及醚类共 12 大类。其中, 醛类化合物数量最多, 共 17 个, 占已初步定性化合物总数的 22.67%; 其次为醇类 16 个, 占 21.33%; 酮类 12 个, 占 16.00%; 羧酸类、含硫化合物和酯类各 6 个, 均占 8.00%; 吡嗪类 4 个, 占 5.33%; 内酯类与呋喃类各 3 个, 占 4.00%; 萜烯芳香烃 2 个, 占 2.67% 及内酯类、腈类、醚类各 1 个,

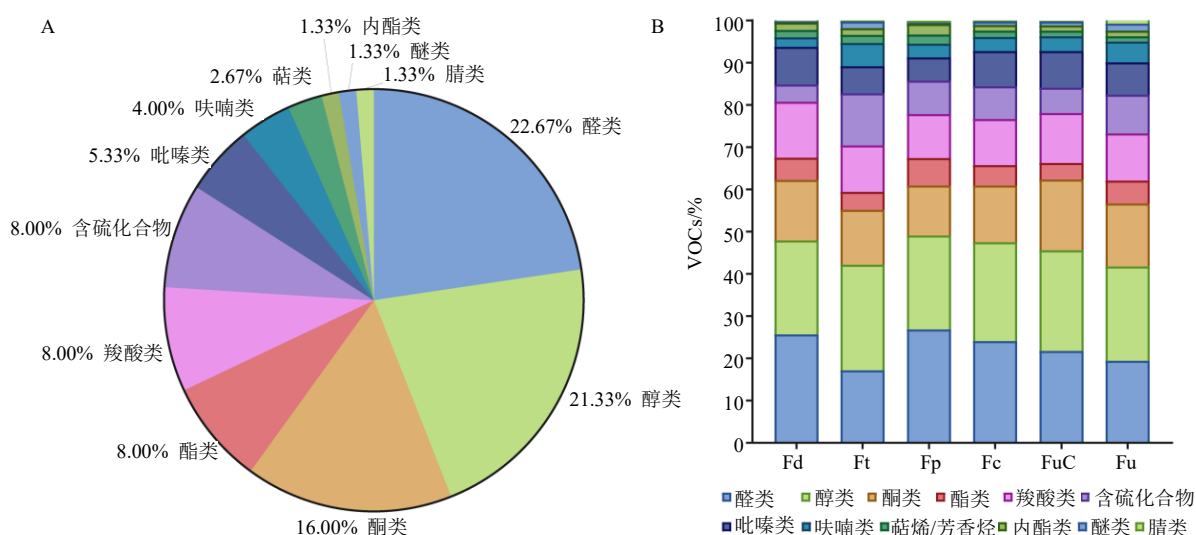
各占 1.33% (图 2-A)。总体来看, 醛类、醇类和酮类为川贝母挥发性有机物的主要组成类别, 三者合计占 60.00%, 是构成川贝母挥发性成分谱的重要化学基础。

为进一步比较不同基原川贝母样品中各类挥发性成分的组成差异, 依据各类化合物归一化后的相对峰体积绘制相对含量柱状图 (图 2-B)。结果显示, 6 种基原川贝母样品中挥发性成分类别总体相近, 说明不同基原川贝母挥发性代谢背景具有一定共性; 但不同类别化合物在各基原样品中的相对丰度存在明显差异, 提示物种遗传背景、产地生态环境及样品内在代谢差异可能共同影响挥发性有机物的积累。该结果进一步说明, 仅依赖单一类别成分难以全面反映不同基原川贝母间的化学差异, 而基于多成分整体谱图和化学计量学方法的综合分析更有利于实现其基原区分。

结合挥发性成分的保留时间、保留指数、离子迁移时间及 NIST 数据库和 IMS 数据库匹配结果, 对 6 种基原川贝母样品中的挥发性有机物进行初步定性分析。共检测并鉴定出 90 个挥发性有机物信号峰, 见表 2, 去除同一化合物的单体和二聚体等重复信号后, 共获得 75 个挥发性化合物。

3.3 6 种基原川贝母挥发性有机物 GC-IMS 指纹图谱分析

为进一步比较 6 种基原川贝母样品中特征挥发性成分的差异, 采用 Reporter 和 Gallery Plot 插件构建不



A-所有 VOCs 的分类; B-各类 VOCs 含量百分比。

A-classification of all VOCs; B-percentage content of each class of VOCs.

图 2 6 种基原川贝母挥发性有机物分类

Fig. 2 Classification of volatile organic compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

表2 6种基原川贝母挥发性物质定性分析

Table 2 Qualitative analysis of volatile compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

序号	化合物	CAS号	分子式	相对分子质量	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
1	2-异丁基-3-甲氧基吡嗪	C24683009	C ₉ H ₁₄ N ₂ O	166.2	1 186.3	906.8	1.829 4
2	二丙基二硫醚	C629196	C ₆ H ₁₄ S ₂	150.3	1 106.4	678.312	1.483 7
3	(E)-2-辛烯醛	C2548870	C ₈ H ₁₄ O	126.2	1 057.8	569.034	1.337 1
4	苯乙醛	C122781	C ₈ H ₈ O	120.2	1 034.3	523.337	1.258 4
5	1-辛烯-3-醇	C3391864	C ₈ H ₁₆ O	128.2	977.0	428.598	1.162 7
6	2-戊基呋喃	C3777693	C ₉ H ₁₄ O	138.2	985.0	440.589	1.257 3
7	3-辛醇	C589980	C ₈ H ₁₈ O	130.2	999.0	462.391	1.406 5
8	α-水芹烯	C99832	C ₁₀ H ₁₆	136.2	1 007.7	476.562	1.679 3
9	(E)-2-庚烯醛(单体)	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	112.2	954.4	396.986	1.260 5
10	3-呋喃甲醇	C4412913	C ₅ H ₆ O ₂	98.1	976.2	427.508	1.108 1
11	二氢-5-甲基-2(3H)-呋喃酮(单体)	C108292	C ₅ H ₈ O ₂	100.1	943.6	382.815	1.132 2
12	二氢-5-甲基-2(3H)-呋喃酮(二聚体)	C108292	C ₅ H ₈ O ₂	100.1	943.6	382.815	1.425 8
13	2-甲基-3-甲硫基呋喃	C63012975	C ₆ H ₈ OS	128.2	947.8	388.265	1.154 7
14	3-庚烯-2-酮	C1119444	C ₇ H ₁₂ O	112.2	943.8	382.999	1.225 2
15	(E)-2-庚烯醛(二聚体)	C18829555	C ₇ H ₁₂ O	112.2	951.7	393.338	1.672 9
16	γ-丁内酯(单体)	C96480	C ₄ H ₆ O ₂	86.1	912.1	344.823	1.082 7
17	γ-丁内酯(二聚体)	C96480	C ₄ H ₆ O ₂	86.1	912.1	344.823	1.303 2
18	二乙基二硫醚	C110816	C ₄ H ₁₀ S ₂	122.2	914.2	347.209	1.140 5
19	3-甲硫基丙醛	C3268493	C ₄ H ₈ OS	104.2	914.9	348.005	1.394 6
20	2-庚酮(单体)	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	887.7	318.578	1.264 2
21	2-庚酮(二聚体)	C110430	C ₇ H ₁₄ O	114.2	886.9	317.782	1.635 3
22	庚醛(单体)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	896.8	328.121	1.334 1
23	庚醛(二聚体)	C111717	C ₇ H ₁₄ O	114.2	894.1	325.204	1.701 0
24	1-己醇(单体)	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	872.1	303.174	1.328 6
25	1-己醇(二聚体)	C111273	C ₆ H ₁₄ O	102.2	870.0	301.108	1.641 8
26	苯乙烯	C100425	C ₈ H ₈	104.2	894.7	325.892	1.433 0
27	2,5-二甲基吡嗪	C123320	C ₆ H ₈ N ₂	108.1	903.7	335.531	1.118 1
28	异戊酸	C503742	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	865.6	296.978	1.492 2
29	2-己烯醛(单体)	C505577	C ₆ H ₁₀ O	98.1	848.9	281.832	1.182 5
30	2-己烯醛(二聚体)	C505577	C ₆ H ₁₀ O	98.1	846.5	279.766	1.521 8
31	2-甲基-1-戊醇	C105306	C ₆ H ₁₄ O	102.2	848.9	281.832	1.302 5
32	糠醛(单体)	C98011	C ₅ H ₄ O ₂	96.1	824.0	261.178	1.085 1
33	糠醛(二聚体)	C98011	C ₅ H ₄ O ₂	96.1	824.0	261.178	1.339 1
34	环戊酮	C120923	C ₅ H ₈ O	84.1	803.1	245.344	1.105 9
35	己醛(单体)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	797.4	241.213	1.260 8
36	己醛(二聚体)	C66251	C ₆ H ₁₂ O	100.2	789.5	235.706	1.563 5
37	丁酸(单体)	C107926	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	805.3	246.894	1.162 2
38	1-戊醇(单体)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	764.5	219.342	1.255 3
39	1-戊醇(二聚体)	C71410	C ₅ H ₁₂ O	88.1	760.7	217.017	1.515 8
40	2,3-丁二醇	C513859	C ₄ H ₁₀ O ₂	90.1	790.5	236.389	1.366 2
41	甲基吡嗪	C109080	C ₅ H ₆ N ₂	94.1	792.8	237.959	1.398 4
42	(E)-2-戊烯醛	C1576870	C ₅ H ₈ O	84.1	748.4	209.670	1.106 9
43	甲酸丁酯(单体)	C592847	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	746.7	208.641	1.208 5
44	3-羟基-2-丁酮	C513860	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	712.4	190.124	1.329 8

表 2 (续)

序号	化合物	CAS号	分子式	相对分子质量	保留指数	保留时间/s	迁移时间/ms
45	丙酸	C79094	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	689.9	179.323	1.283 7
46	2-甲基-1-丁醇	C137326	C ₅ H ₁₂ O	88.1	712.4	190.124	1.236 2
47	3-戊酮	C96220	C ₅ H ₁₀ O	86.1	693.3	180.866	1.113 5
48	戊醛(单体)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	685.4	177.265	1.187 4
49	丁酸(二聚体)	C107926	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	833.6	269.264	1.157 0
50	2-甲基丙酸	C79312	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	764.7	218.797	1.161 0
51	乙酸丙酯	C109604	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	722.4	194.088	1.161 4
52	1-戊烯-3-酮	C1629589	C ₅ H ₈ O	84.1	676.9	171.782	1.077 3
53	戊醛(二聚体)	C110623	C ₅ H ₁₀ O	86.1	687.2	176.478	1.426 3
54	1-丁醇(单体)	C71363	C ₄ H ₁₀ O	74.1	661.4	165.031	1.182 4
55	1-丁醇(二聚体)	C71363	C ₄ H ₁₀ O	74.1	659.9	164.444	1.382 2
56	3-甲基丁醛	C590863	C ₅ H ₁₀ O	86.1	644.7	158.281	1.202 4
57	1-羟基-2-丙酮	C116096	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	654.3	162.096	1.229 8
58	醋酸乙酯(单体)	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	612.1	146.247	1.097 3
59	醋酸乙酯(二聚体)	C141786	C ₄ H ₈ O ₂	88.1	610.4	145.660	1.337 0
60	2-甲基-1-丙醇	C78831	C ₄ H ₁₀ O	74.1	626.9	151.530	1.171 9
61	丁醛	C123728	C ₄ H ₈ O	72.1	595.3	140.671	1.292 8
62	2-丁酮	C78933	C ₄ H ₈ O	72.1	592.6	139.790	1.248 7
63	2-甲基-2-丙烯醛	C78853	C ₄ H ₆ O	70.1	583.2	136.855	1.218 2
64	乙酸甲酯	C79209	C ₃ H ₆ O ₂	74.1	562.3	130.692	1.188 8
65	2-丙硫醇	C75332	C ₃ H ₈ S	76.2	575.4	134.507	1.152 0
66	丙醇	C71238	C ₃ H ₈ O	60.1	546.2	126.289	1.252 9
67	2-丙酮	C67641	C ₃ H ₆ O	58.1	513.0	118.071	1.117 3
68	1,2-二甲氧基乙烷	C110714	C ₄ H ₁₀ O ₂	90.1	649.2	160.042	1.317 0
69	2-甲基丁酸	C116530	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	845.1	279.103	1.456 8
70	2,6-壬二烯醛	C557482	C ₉ H ₁₄ O	138.2	1 184.2	908.359	1.905 1
71	2-苯乙醇	C60128	C ₈ H ₁₀ O	122.2	1 103.1	676.102	1.519 4
72	1-辛醇	C111875	C ₈ H ₁₈ O	130.2	1 056.8	571.682	1.462 6
73	2-辛酮	C111137	C ₈ H ₁₆ O	128.2	1 007.5	479.893	1.753 8
74	2-辛醇	C123966	C ₈ H ₁₈ O	130.2	996.9	462.464	1.467 7
75	2-乙基-1-己醇	C104767	C ₈ H ₁₈ O	130.2	1 035.5	529.854	1.425 1
76	5-甲基糠醛	C620020	C ₆ H ₆ O ₂	110.1	975.1	428.769	1.414 9
77	5-甲基-3-庚酮	C541855	C ₈ H ₁₆ O	128.2	946.8	389.265	1.287 1
78	甲硫基丙醛	C3268493	C ₄ H ₈ OS	104.2	894.0	326.523	1.404 6
79	(E,E)-2,4-己二烯醛	C142836	C ₆ H ₈ O	96.1	910.1	344.311	1.451 9
80	糠醇	C98000	C ₅ H ₆ O ₂	98.1	866.9	299.093	1.353 7
81	丙酸丙酯	C106365	C ₆ H ₁₂ O ₂	116.2	796.2	240.167	1.220 5
82	甲酸丁酯(二聚体)	C592847	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	734.3	200.608	1.508 3
83	3-丁烯腈	C109751	C ₄ H ₅ N	67.1	645.4	158.544	1.133 7
84	壬醛	C124196	C ₉ H ₁₈ O	142.2	1 104.4	679.196	1.956 1
85	5-乙基-2,3-二甲基吡嗪	C15707343	C ₈ H ₁₂ N ₂	136.2	1 090.7	646.231	1.226 5
86	苯甲醛	C100527	C ₇ H ₆ O	106.1	945.8	387.906	1.474 1
87	3-甲基-1-戊醇	C589355	C ₆ H ₁₄ O	102.2	838.6	273.522	1.616 0
88	异亚丙基丙酮	C141797	C ₆ H ₁₀ O	98.1	797.7	241.214	1.444 6
89	戊酸	C109524	C ₅ H ₁₀ O ₂	102.1	895.0	327.565	1.226 9
90	丙酸异丁酯	C540421	C ₇ H ₁₄ O ₂	130.2	862.7	295.091	1.273 8

同基原川贝母挥发性有机物指纹图谱，见图3。指纹图谱中每一列代表1个挥发性有机物信号峰，每一行代表

一个样品，斑点颜色反映对应化合物在样品中的信号强度，颜色由蓝色向红色变化表示相对丰度逐渐升高。

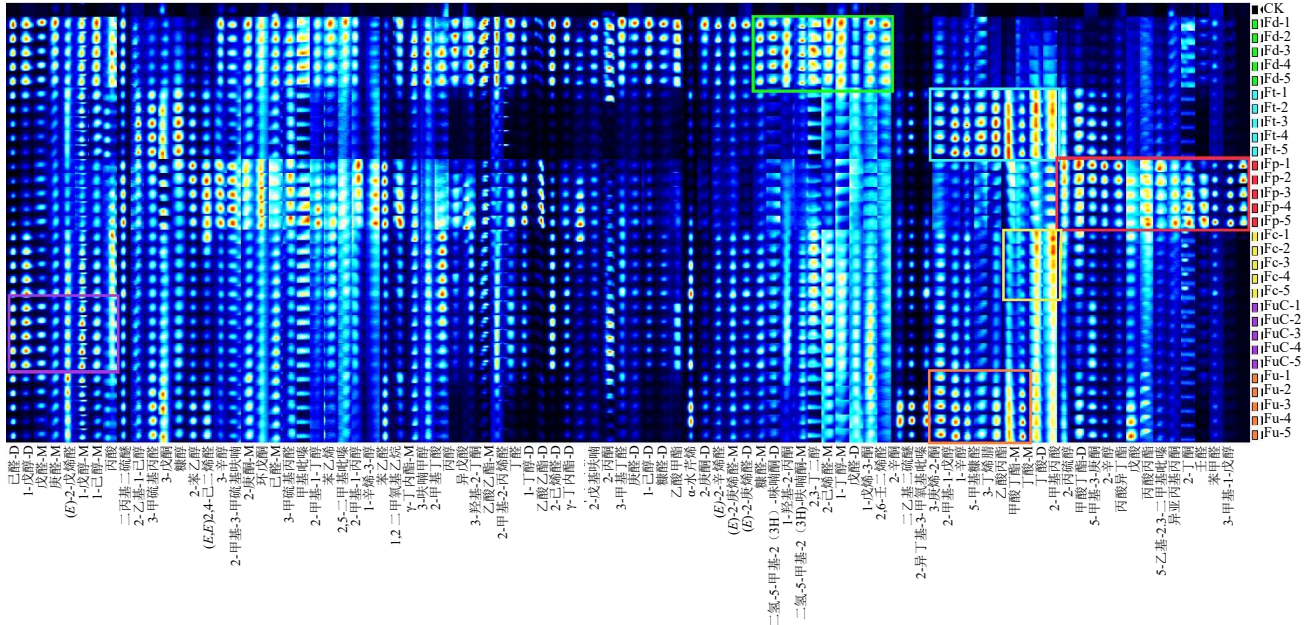


图3 6种基原川贝母挥发性有机物指纹图谱

Fig. 3 Fingerprint profiles of volatile organic compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

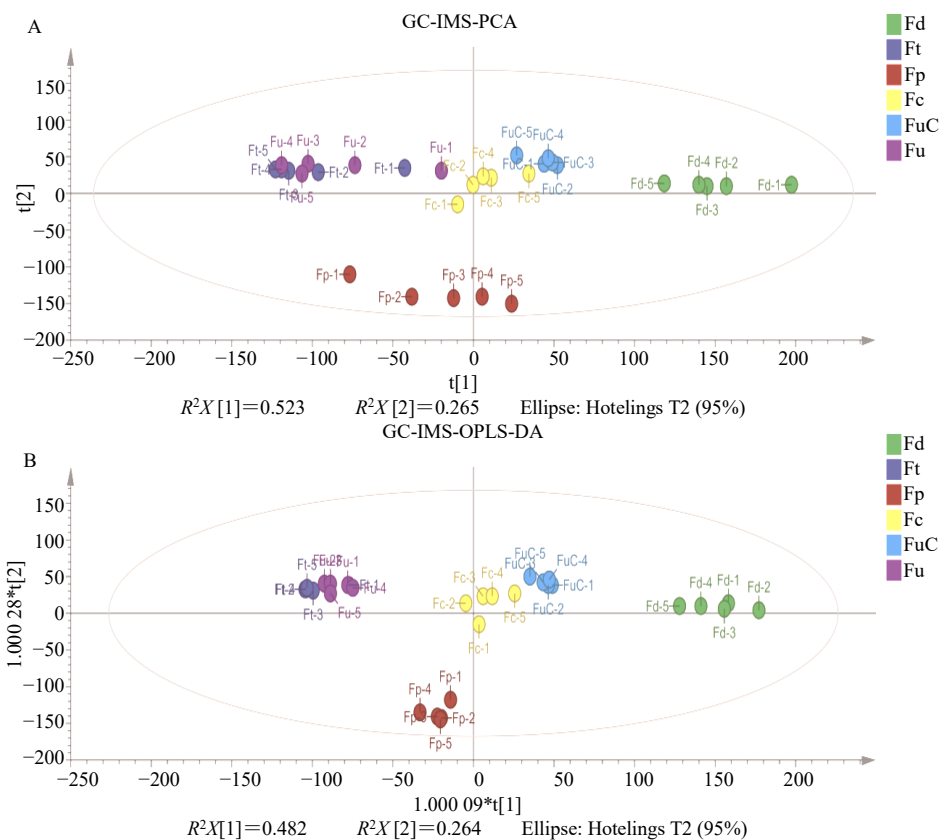
由图3可见，6种基原川贝母样品均检测到一定数量的共有挥发性成分，其挥发性成分组成具有相似的基础轮廓；同时，各基原样品在多个特征峰区域呈现出明显的信号强度差异，不同基原川贝母具有各自相对特异的挥发性成分谱。梭砂贝母中多种挥发性成分信号相对较强，其中糠醛、二氢-5-甲基-2(3H)-咪喃酮、1-羟基-2-丙酮、2,3-丁二醇、2-己烯醛、1-丁醇、戊醛、1-戊烯-3-酮及二乙基二硫醚等成分的相对丰度高于其他基原样品，提示这些成分可能是梭砂贝母挥发性特征的重要贡献物质。甘肃贝母中2-甲基丙酸、2-丙硫醇、甲酸丁酯、5-甲基-3-庚酮、2-辛醇、丙酸异丁酯、戊酸、丙酸丙酯、5-乙基-2,3-二甲基吡嗪、4-甲基-3-戊烯-2-酮、2-丁酮、壬醛、苯甲醛和3-甲基-1-戊醇等成分信号较强，显示出较为明显的挥发性成分富集特征，提示其与其他基原川贝母存在较突出的化学差异。相比之下，川贝母和暗紫贝母中多数挥发性成分信号相对较弱，整体挥发性成分丰度较低；其中川贝母中2-甲基丁酸和丁酸等少数成分相对丰度较高，可作为其与部分基原样品区分的参考变量。太白贝母与瓦布贝母的指纹图谱较为相似，二者在多个挥发性成分区域呈现相近的信号分布特征。其中，3-庚烯-2-酮、2-甲基-1-戊醇、1-辛醇、5-甲基糠醛、3-丁烯腈、乙酸丙酯及丁酸等成分在二者中相对丰度较高，提

示太白贝母与瓦布贝母挥发性成分组成具有较高相似性。二者之间仍存在一定差异，如太白贝母中2-乙基-1-己醇、3-甲硫基丙醛、2-咪喃甲醇及丁酸等成分信号相对高于瓦布贝母，可作为进一步区分二者的潜在特征变量。整体来看，指纹图谱能够清晰反映6种基原川贝母挥发性成分的相似性与差异性，为后续多元统计分析提供了直观依据。

3.4 PCA 和 OPLS-DA

为从整体水平评价6种基原川贝母挥发性有机物组成差异，以各挥发性成分的信号强度为变量进行主成分分析。PCA结果见图4-A，PC1和PC2的累积贡献率为75.8%，说明前2个主成分能够解释样品挥发性有机物数据中的大部分变异信息。6种基原川贝母样品在PCA得分图中呈现一定的分离趋势，其中梭砂贝母和甘肃贝母与其他基原样品在空间分布上相对分离，提示其挥发性成分整体特征与其他基原存在较明显差异。川贝母与暗紫贝母分布距离较近，太白贝母与瓦布贝母之间的空间距离亦相对较小，说明这2组基原样品的挥发性成分组成及相对丰度具有一定相似性。该结果与前述HS-GC-IMS指纹图谱分析结果基本一致，表明HS-GC-IMS结合PCA可有效反映不同基原川贝母样品间的挥发性成分差异。

为进一步增强不同基原川贝母样品间差异



A-PCA 得分图; B-OPLS-DA 得分图。

A-PCA score plot; B-OPLS-DA score plot.

图 4 6 种基原川贝母挥发性有机物多元统计分析

Fig. 4 Multivariate statistical analysis of volatile organic compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

别能力，并筛选对样品区分贡献较大的关键挥发性成分，采用有监督的 OPLS-DA 对 90 个挥发性有机物信号峰的归一化峰体积数据进行建模分析。OPLS-DA 结果见图 4-B。6 种基原川贝母样品在模型中呈现较好的聚类与分离趋势，说明其挥发性有机物谱能够有效反映基原间差异。模型参数显示， $R^2_X=0.746$ ， $R^2_Y=0.912$ ， $Q^2(\text{cum})=0.840$ ，表明该模型具有较好的拟合优度和预测能力。

3.5 挥发性标志物筛选

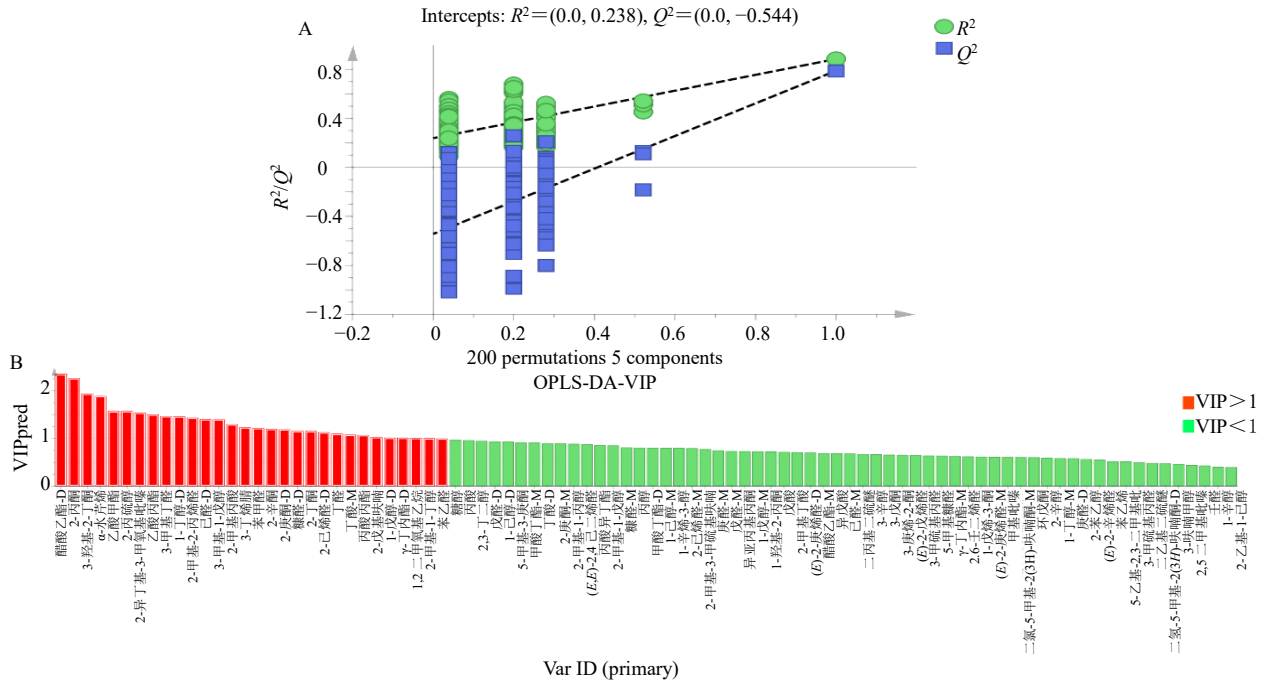
为评估 OPLS-DA 模型的稳定性和可靠性，进行了 200 次置换检验，结果见图 5-A。置换检验结果显示， R^2 回归线截距为 0.238， Q^2 回归线截距为 -0.544，其中 Q^2 截距小于 0，且置换模型的 Q^2 值整体低于原始模型，提示模型未出现明显过拟合，具有较好的稳健性和统计可靠性。因此，该 OPLS-DA 模型可用于后续差异挥发性成分筛选。

变量重要性投影值可用于评价各变量对 OPLS-DA 模型分类判别的贡献程度^[23]。VIP 值越

大，表明该挥发性成分对不同基原川贝母样品区分的贡献越高。本研究以 $VIP > 1.2$ 为筛选阈值，共筛选出 17 个对 6 种基原川贝母区分贡献较大的潜在差异挥发性成分（图 5-B）。

筛选得到的 17 个潜在差异挥发性成分分别为醋酸乙酯（ $VIP=2.35555$ ）、2-丙酮（ $VIP=2.26368$ ）、3-羟基-2-丁酮（ $VIP=1.94212$ ）、 α -水芹烯（ $VIP=1.89279$ ）、乙酸甲酯（ $VIP=1.57421$ ）、2-丙硫醇（ $VIP=1.57373$ ）、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪（ $VIP=1.54363$ ）、乙酸丙酯（ $VIP=1.50566$ ）、3-甲基丁醛（ $VIP=1.47049$ ）、1-丁醇（ $VIP=1.46539$ ）、2-甲基-2-丙烯醛（ $VIP=1.43616$ ）、己醛（ $VIP=1.40753$ ）、3-甲基-1-戊醇（ $VIP=1.40345$ ）、2-甲基丙酸（ $VIP=1.30168$ ）、3-丁烯腈（ $VIP=1.23770$ ）、苯甲醛（ $VIP=1.22261$ ）和 2-辛酮（ $VIP=1.20517$ ）。

从化合物类别来看，上述差异成分涵盖酯类、酮类、醛类、醇类、羧酸类、吡嗪类、萜烯类及含硫化合物多个类型，说明不同基原川贝母挥发性差



A-200 次置换检验图；B-VIP 值图。
A-diagram of 200 permutation tests; B-VIP value plot.

图 5 OPLS-DA 模型验证及差异变量筛选

Fig. 5 OPLS-DA model validation and differential variable screening

异并非由单一化合物或单一类别成分决定，而是由多种挥发性成分共同构成的整体化学特征所驱动。其中，醋酸乙酯、2-丙酮、3-羟基-2-丁酮和 α -水芹烯的 VIP 值相对较高，提示其在 6 种基原川贝母样品分类判别中贡献较大，可作为后续基原鉴别和质量评价研究中重点关注的标志物。

3.6 基于差异挥发性成分的聚类热图分析

为进一步验证所筛选出的 17 个潜在差异挥发性成分对 6 种基原川贝母的区分能力，基于其峰强度数据进行 Z-score 标准化处理，并绘制聚类热图，结果见图 6。热图中红色表示该成分在相应样品中相对丰度较高，蓝色表示相对丰度较低。

聚类热图结果显示，6 种基原川贝母样品基于 17 种差异挥发性成分可呈现较为清晰的分组趋势，说明这些成分能够较好地反映不同基原样品的挥发性特征差异。甘肃贝母中苯甲醛、1-丁醇和 3-甲基-1-戊醇等成分相对丰度较高，这些成分可能是甘肃贝母区别于其他基原川贝母的重要挥发性特征变量。太白贝母和瓦布贝母在聚类结果中距离较近，说明二者挥发性成分谱具有一定相似性；其中 2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、 α -水芹烯和 2-辛酮等成分对其与其他基原样品的区分具有一定贡献。梭砂贝

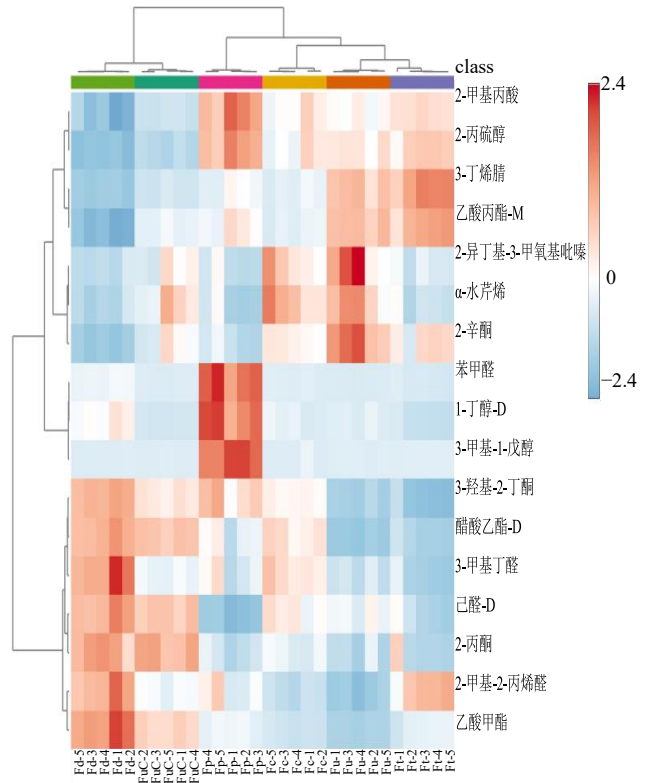


图 6 6 种基原川贝母差异挥发性成分聚类热图
Fig. 6 Cluster heatmap of differential volatile compounds in *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from six legal origins

母与暗紫贝母在部分差异成分上表现出相似的丰度变化趋势,其中2-甲基丙酸和2-丙硫醇可作为二者与其他基原川贝母区分的参考变量;而3-甲基丁醛和2-甲基-2-丙烯醛在二者之间呈现一定差异,可作为进一步区分相关基原样品的潜在指标。

此外,太白贝母中部分差异挥发性成分整体呈现相对较低丰度特征,提示其挥发性成分谱具有一定特异性。该结果与PCA、OPLS-DA及指纹图谱分析结果基本一致,进一步说明筛选出的17个差异挥发性成分能够较好地反映6种基原川贝母样品间的化学差异,具有作为川贝母基原鉴别差异标志物组合的应用价值。

4 讨论

川贝母为典型的多基原名贵中药材,不同基原植物在形态性状、生态分布、资源蕴藏量、市场价格及化学组成等方面均存在一定差异。由于川贝母药材来源复杂、外观性状相近,传统经验鉴别受样品完整性、加工方式及鉴别人员经验等因素影响较大,难以完全满足现代中药质量控制和市场监管的需求^[24-25]。因此,建立客观、快速、灵敏且适用于多基原川贝母鉴别的化学评价方法,对于保障临床用药安全有效、促进川贝母资源合理利用和产业规范化发展具有重要意义。

目前,川贝母质量评价研究主要集中于甙体生物碱、有机酸、核苷、皂苷、多糖等非挥发性成分。其中,贝母类甙体生物碱被认为是川贝母镇咳、祛痰、平喘等药理作用的重要物质基础,也是川贝母质量标准和活性成分研究中的重点关注对象^[26]。近年来,随着中药整体质量评价理念的发展,DNA条形码、叶绿体基因组超级条形码、LC-MS代谢组学、红外光谱及近红外光谱等技术已被用于川贝母基原鉴别和质量评价,并取得了一定进展^[27-30]。然而,上述研究多侧重于遗传信息或非挥发性化学成分,对不同基原川贝母挥发性有机物组成及其差异规律的系统认识仍相对不足。挥发性有机物不仅是中药材气味特征形成的重要物质基础,也可反映药材基原、产地、生长环境、加工方式和贮藏状态等多种因素的综合影响^[31]。因此,从挥发性成分角度解析川贝母多基原差异,可为现有质量评价体系提供有益补充。

本研究采用HS-GC-IMS技术对6种法定基原川贝母干燥鳞茎中的挥发性有机物进行分析,共检测鉴定出90个挥发性有机物信号峰,去除同一化

合物的单体和二聚体等重复信号后,共获得75个挥发性化合物,主要包括醛类、醇类、酮类等12大类。其中,醛类、醇类和酮类化合物数量较多,是川贝母挥发性成分谱的重要组成部分。醛类化合物通常具有较低的气味阈值,常与青草香、脂肪香、坚果香或芳香气味相关^[32];醇类化合物多与清香、草本香及轻微果香等气味特征有关^[33];酮类和酯类成分则可能对药材的甜香、果香及整体气味协调性产生影响^[34]。此外,吡嗪类和含硫化合物虽然数量相对较少,但通常气味阈值较低,可能对整体气味轮廓产生较大贡献。上述成分类别共同构成了川贝母挥发性成分的化学基础。

从整体谱图和指纹图谱结果来看,6种基原川贝母挥发性成分类别总体相近,提示不同基原川贝母具有一定共同的挥发性代谢背景,但不同基原样品在特征峰数量、出峰位置、信号强度和相对丰度方面存在明显差异,说明其挥发性成分谱具有基原特异性。梭砂贝母中糠醛、二氢-5-甲基-2(3*H*)-呋喃酮、1-羟基-2-丙酮、2,3-丁二醇、2-己烯醛、1-丁醇、戊醛、1-戊烯-3-酮及二乙基二硫醚等成分相对丰度较高;甘肃贝母中2-甲基丙酸、2-丙硫醇、甲酸丁酯、5-甲基-3-庚酮、2-辛醇、丙酸异丁酯、戊酸、丙酸丙酯、5-乙基-2,3-二甲基吡嗪、2-丁酮、壬醛、苯甲醛和3-甲基-1-戊醇等成分具有较明显的富集特征;太白贝母与瓦布贝母挥发性成分谱较为相似,二者在3-庚烯-2-酮、2-甲基-1-戊醇、1-辛醇、5-甲基糠醛、3-丁烯腈和乙酸丙酯等成分上表现出较接近的信号特征。上述差异说明,不同基原川贝母的挥发性成分并非简单的有无差异,而更多表现为多成分相对丰度的差异化组合。

化学计量学分析进一步验证了HS-GC-IMS挥发性指纹图谱在川贝母基原区分中的适用性。PCA结果显示,6种基原川贝母样品在得分图中呈现一定分离趋势,其中梭砂贝母和甘肃贝母与其他基原样品距离较远,提示其挥发性成分整体特征差异较为明显;川贝母与暗紫贝母、太白贝母与瓦布贝母之间距离相对较近,说明其挥发性成分组成及相对丰度具有一定相似性。OPLS-DA模型进一步增强了不同基原样品间的区分效果,上述结果说明,HS-GC-IMS结合多元统计分析能够较好地捕捉多基原川贝母挥发性有机物的整体差异。

基于OPLS-DA模型的VIP值,本研究筛选出17个对6种基原川贝母区分贡献较大的潜在差异

挥发性成分,包括醋酸乙酯、2-丙酮、3-羟基-2-丁酮、 α -水芹烯、乙酸甲酯、2-丙硫醇、2-异丁基-3-甲氧基吡嗪、乙酸丙酯、3-甲基丁醛、1-丁醇、2-甲基-2-丙烯醛、己醛、3-甲基-1-戊醇、2-甲基丙酸、3-丁烯腈、苯甲醛和2-辛酮。涵盖多个类别化合物,提示不同基原川贝母的挥发性差异是多类成分共同作用的结果,而非由单一化合物决定。聚类热图结果进一步表明,17个差异挥发性成分能够较好地地区分不同基原川贝母,并能直观呈现各类成分在不同基原样品中的相对丰度变化。因此,与单一指标成分相比,基于多成分组合的挥发性标志物更适合用于多基原川贝母的整体鉴别和质量评价。

综上,HS-GC-IMS结合化学计量学方法能够有效表征不同基原川贝母挥发性有机物差异,具有前处理简单、检测快速、灵敏度高和结果可视化等特点,可为川贝母基原鉴别、质量评价及挥发性成分指纹图谱构建提供技术参考。需指出的是,本研究以单一产地样本探讨不同基原川贝母的挥发性差异,虽能反映不同基原间挥发性成分的整体差异,但代表性存在一定局限,未来可结合标准品验证、多批次样品外部验证及药效关联分析,进一步提高结论的可靠性与适用性。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 王淑慧,梁鸿,张庆英,等.川贝母资源与生产技术研究进展[J].中国现代中药,2025,27(4):593-600.
- [2] 代琪,马珑珂,叶俏波,等.不同基原川贝母化学成分和药理作用研究进展[J].亚太传统医药,2024,20(6):239-243.
- [3] 刘思美,周婷,王曙,等.川贝母提取物对慢性阻塞性肺病大鼠炎症反应及氧化应激的影响[J].天然产物研究与开发,2025,37(9):1724-1732.
- [4] Wang D, Chen X, Atanasov A G, et al. Plant resource availability of medicinal *Fritillaria* species in traditional producing regions in Qinghai-Tibet plateau [J]. *Front Pharmacol*, 2017, 8: 502.
- [5] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 40-41.
- [6] Liu Z Y, Pei Y F, Chen T Z, et al. Molecular quantification of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* and its adulterants [J]. *Chin Med*, 2024, 19(1): 138.
- [7] Kumar P, Ashrita, Acharya V, et al. Comparative transcriptome analysis infers bulb derived *in vitro* cultures as a promising source for sipeimine biosynthesis in *Fritillaria cirrhosa* D. Don (Liliaceae, syn. *Fritillaria roylei* Hook.) - High value Himalayan medicinal herb [J]. *Phytochemistry*, 2021, 183: 112631.
- [8] 崔治家,马艳珠,张小荣,等.川贝母化学成分和药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J].中草药,2021,52(9):2768-2784.
- [9] 黄雅彬,刘红梅,方成鑫,等.不同品种川贝母生物碱镇咳、抗炎作用比较[J].中药新药与临床药理,2018,29(1):19-22.
- [10] 刘梓贤,张佳奇,汪雨欣,等.川贝母化学成分及生物活性研究进展[J].中国林副特产,2022(6):87-91.
- [11] 徐顺连,曾中兰,林青,等.贝母化学成分及药理作用的研究[J].青海草业,2021,30(1):43-46.
- [12] 姚欢,江春阳,王悦珩,等.太白贝母挥发油提取的工艺优化及其成分分析[J].食品与发酵工业,2024,50(16):235-241.
- [13] 李旭领,郭月婷,王一佳,等.药用植物挥发油的抗菌作用及机制研究进展[J].动物医学进展,2022,43(5):97-101.
- [14] 郭嘉鑫,雷有庭,韩鸿萍,等.超临界CO₂萃取暗紫贝母挥发油及其化学成分分析[J].青海师范大学学报:自然科学版,2022,38(4):68-76.
- [15] 冯文豪,田亮玉,施钧瀚,等.电子鼻技术应用于川贝母真伪及规格辨识的可行性分析[J].中国实验方剂学杂志,2021,27(13):108-118.
- [16] 郭凤柳,熊蕊,刘晓慧,等.基于气相色谱离子迁移谱技术的川贝母差异性探索[J].中国现代中药,2021,23(9):1590-1594.
- [17] 党小琳,杨冰月,姬海月,等.基于HS-GC-IMS技术解析远志及其炮制品中挥发性有机物的差异性[J].中草药,2024,55(18):6363-6371.
- [18] Li P, Zhou H, Wang Z Q, et al. Analysis of flavor formation during the production of Jinhua dry-cured ham using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. *Meat Sci*, 2022, 194: 108992.
- [19] 杨冰月,罗瑶,姬海月,等.基于HS-GC-IMS技术分析款冬花蜜炙前后挥发性有机物的差异性[J].中草药,2022,53(6):1854-1861.
- [20] 刘自强,胡培,韩童童,等.顶空固相微萃取-气相色谱-质谱结合 Heracles NEO 超快速气相电子鼻分析太子参不同加工品的挥发性成分[J].中草药,2024,55(20):6874-6888.
- [21] 罗瑶,杨冰月,净易尧,等.顶空-气相色谱-离子迁移谱技术结合化学模式识别分析远志属6种药用植物的挥发性成分种类和差异[J].中草药,2024,55(13):4535-4544.
- [22] Guo J, Qiu M M, Li L, et al. Comparative transcriptomic analysis and volatile compound characterization of *Aspergillus tubingensis* and *Penicillium oxalicum* during

- their infestation of Japonica rice [J]. *Food Microbiol*, 2025, 125: 104626.
- [23] Zheng R, Chen Z, Guan Z Y, *et al.* Variable importance for projection (VIP) scores for analyzing the contribution of risk factors in severe adverse events to Xiyanping injection [J]. *Chin Med*, 2023, 18(1): 15.
- [24] 熊浩荣, 马朝旭, 国慧, 等. 川贝母野生基原植物资源分布和保育研究进展 [J]. *中草药*, 2020, 51(9): 2573-2579.
- [25] 谢俊杰, 谭鹏, 郝露, 等. 基于广义中药学探讨川贝母产业发展现状、策略与方法 [J]. *中草药*, 2022, 53(7): 2150-2163.
- [26] Wang Y, Peng M, Yang X, *et al.* Total alkaloids in *Fritillaria cirrhosa* D. Don alleviate OVA-induced allergic asthma by inhibiting M2 macrophage polarization [J]. *J Ethnopharmacol*, 2025, 337(Pt 3):118935.
- [27] Zhong Y C, Wang H Y, Wei Q H, *et al.* Combining DNA barcoding and HPLC fingerprints to trace species of an important traditional Chinese medicine *Fritillariae Bulbus* [J]. *Molecules*, 2019, 24(18): 3269.
- [28] Han G, Qi L, He D, *et al.* Multidimensional quality evaluation and traceability study of *Fritillariae Cirrhosae Bulbus* from different sources [J]. *Front Plant Sci*, 2025, 16:1648434.
- [29] Chen Q, Hu H S, Zhang D Q. DNA barcoding and phylogenomic analysis of the genus *Fritillaria* in China based on complete chloroplast genomes [J]. *Front Plant Sci*, 2022, 13: 764255.
- [30] Tang Y C, Guo X T, Zhao J Q, *et al.* Intelligent species identification of *Fritillaria* spp. based on multispectral feature fusion [J]. *Spectrochim Acta Part A Mol Biomol Spectrosc*, 2026, 348: 127210.
- [31] De Flaviis R, Sacchetti G, Mastrocola D. Wheat classification according to its origin by an implemented volatile organic compounds analysis [J]. *Food Chem*, 2021, 341: 128217.
- [32] Zhang J, Lu J L, Yu X W, *et al.* Characterization of aroma differences in Jiangxiangxing Baijiu with varying ethanol concentrations: Emphasis on olfactory threshold changes of aroma compounds [J]. *Food Chem*, 2025, 469: 142506.
- [33] Liu Q R, Zhang S H, Zhu Z J, *et al.* Ratio limitation of burnt-bitter-aroma compounds in strong-aroma Baijiu [J]. *Food Chem*, 2026, 513: 148966.
- [34] Niu Y W, Zhu Q, Xiao Z B. Characterization of perceptual interactions among ester aroma compounds found in Chinese Moutai Baijiu by gas chromatography-olfactometry, odor intensity, olfactory threshold and odor activity value [J]. *Food Res Int*, 2020, 131: 108986.

[责任编辑 时圣明]