



基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术的不同植物基原山慈菇化学成分差异研究

徐忠玉¹, 夏雨婷¹, 王飞艳¹, 李依鸿¹, 吴梅², 陈子林³, 杨东风^{1,4}

(1. 浙江理工大学生命科学与医药学院, 杭州 310018; 2. 金华市农业科学研究院, 浙江金华 321000; 3. 磐安县中药创新发展研究院, 浙江金华 322300; 4. 浙江理工大学绍兴生物医药研究院有限公司, 浙江绍兴 312090)

摘要: 为探索不同植物基原山慈菇的化学成分特征及其差异, 采用超高效液相色谱串联四极杆飞行时间质谱 (Ultra-high performance liquid chromatography with quadrupole time-of-flight mass spectrometry, UPLC-Q-TOF-MS/MS) 分别对来自云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰基原的山慈菇药材进行化学表征, 并运用主成分分析、正交偏最小二乘法-判别分析和聚类热图分析系统筛选三者间差异代谢物; 在此基础上, 采用高效液相色谱 (High performance liquid chromatography, HPLC) 技术对山慈菇中的 5 种指标成分进行含量测定与对比分析。结果表明: 3 种不同植物基原的山慈菇药材间的次生代谢产物差异显著。首先从云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰的山慈菇中分别鉴定出 84、70、76 种化学成分; 进一步比较发现, 三者间存在 21 种差异代谢物, 主要是羧酸及其衍生物、有机含氧化合物和异黄酮类化合物; 最终定量分析表明, 云南独蒜兰中 5 个指标成分的含量显著高于独蒜兰和杜鹃兰, 从而揭示了不同植物基原山慈菇在化学成分上存在较大差异。该研究探索了 3 种山慈菇基原植物的化学成分差异, 为山慈菇的质量评价、鉴别及其药效基础的阐明提供了理论依据。

关键词: 山慈菇; 超高效液相色谱串联四极杆飞行时间质谱; 化学成分; 差异成分; 独蒜兰

中图分类号: O657.6; R28.6

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2026)05-0363-12

引文格式: 徐忠玉, 夏雨婷, 王飞艳, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术的不同植物基原山慈菇化学成分差异研究[J]. 浙江理工大学学报(自然科学), 2026, 55(3): 363-374.

Reference Format: XU Zhongyu, XIA Yuting, WANG Feiyan, et al. A comparative study on chemical constituents of *Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones* from diverse botanical origins by UPLC-Q-TOF-MS/MS[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2026, 55(3): 363-374.

A comparative study on chemical constituents of *Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones* from diverse botanical origins by UPLC-Q-TOF-MS/MS

XU Zhongyu¹, XIA Yuting¹, WANG Feiyan¹, LI Yihong¹, WU Mei², CHEN Zilin³, YANG Dongfeng^{1,4}

(1. College of Life Sciences and Medicine, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China; 2. Jinhua Academy of Agricultural Sciences, Jinhua 321000, China; 3. Pan'an Institute of Chinese Medicine Innovation and Development, Jinhua 322300, China; 4. Zhejiang Sci-Tech University Shaoxing Academy of Biomedicine, Shaoxing 312090, China)

Abstract: To explore the chemical constituent characteristics and differences in *Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones* (PCsP) from different botanical origins, this study employed ultra-high performance liquid chromatography with quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UPLC-Q-TOF-

收稿日期: 2025-09-17 网络出版日期: 2026-01-26

基金项目: 国家重点研发计划(2024YFC3506400); 磐安县科技计划(磐科农 202201)

作者简介: 徐忠玉(1999—), 女, 安徽滁州人, 硕士研究生, 主要从事中药材质量与活性成分方面的研究。

通信作者: 杨东风, E-mail: ydf807@sina.com

MS/MS) to perform chemical characterization of PCsP medicinal materials derived from *Pleione yunnanensis* Rolfe, *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe and *Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino, respectively. Additionally, principal component analysis (PCA), orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA), and cluster heat map analysis were applied to screen differential metabolites among the three. On this basis, high performance liquid chromatography (HPLC) was employed to determine and comparatively analyze the content of five indicator components in PCsP. The results indicated significant differences in secondary metabolites among PCsP from the three different botanical origins mentioned above. Firstly, a total of 84, 70, and 76 chemical constituents were identified from PCsP derived from *Pleione yunnanensis* Rolfe, *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe, and *Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino, respectively. Further comparative analysis revealed that there were 21 differential metabolites identified among them, mainly including carboxylic acids and their derivatives, organic oxygen-containing compounds, and isoflavone compounds. The final quantitative analysis revealed that *Pleione yunnanensis* Rolfe contains significantly higher levels of five characteristic components compared to *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe and *Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino, thereby revealing significant differences in the chemical composition of PCsP from different botanical origins. This study investigated the differences in chemical composition among three botanical origins of PCsP, providing a theoretical basis for its quality evaluation, identification, and elucidation of pharmacodynamic foundations.

Key words: *Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones*; UPLC-Q-TOF-MS/MS; chemical composition; differential ingredients; *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe

0 引言

山慈菇 (*Pseudobulbus Cremastrae seu Pleiones*, PCsP), 又名“毛慈菇”“冰球子”, 系兰科植物云南独蒜兰 (*Pleione yunnanensis* Rolfe)、独蒜兰 (*Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe) 或杜鹃兰 (*Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino) 的干燥假鳞茎^[1], 广泛用于治疗多种恶性疾病, 如乳腺癌、结肠癌和食管癌等^[2]。山慈菇的化学成分主要包括菲类、含氮杂环化合物(生物碱)类、联苕类及少量的苷类化合物等^[3-8], 复杂多样的次生代谢产物赋予其多种药理作用。已有研究表明, 山慈菇提取物可通过多种机制促进肿瘤细胞凋亡。张志强等^[9]发现山慈菇可有效抑制肝癌小鼠腹水模型中的肿瘤生长, 并对肝组织病理症状有所改善; 王洋等^[10]研究发现山慈菇提取物对人结肠癌 SW480 细胞具有显著的增殖抑制作用, 抑制率随培养时间及药物浓度增加而升高。山慈菇还具有显著的抑菌和抗痛风等药理作用, 余怡欣等^[11]发现山慈菇提取物对雷尔氏菌具有较好的抑制效果, 抑菌圈直径达到 8.5 mm; 丁云岗等^[12]证实, 山慈菇含有的秋水仙碱在临床上可用于治疗痛风性关节炎。综上所述, 山慈菇具有较好的抗肿瘤、抗菌、抗痛风等作用, 但基于不同植物基原的山慈菇内在化学成分差异研究报道较少。

中草药化学成分复杂多样, 是中药物物质基础研

究的重点和难点^[13]。近年来, 超高效液相色谱-四极杆飞行时间质谱(Ultra-High performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometer, UPLC-Q-TOF-MS/MS) 技术因具有高分辨率、高准确性、分析速度快、应用范围广和适于全面分析鉴定等优点, 在中药成分鉴定和复方制剂的化学成分的定性和定量研究中得到了广泛应用^[14-16]。果佳惠等^[17]采用 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术, 结合顺序窗口采集全理论碎片离子质谱法, 对地胆草中的 13 个成分进行含量测定, 该方法有效减少了分子量相近物质的干扰, 提升了定量分析的精确度, 为地胆草质量控制奠定了基础。乔灵芝等^[18]采用 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术, 从灵芝孢子中定性推测出 12 种三萜类成分, 为灵芝孢子质量控制和评价提供了理论依据。山慈菇虽为 2020 年版《中国药典》(一部) 收录中药之一, 但缺乏科学有效的质量控制标准, 加之山慈菇基原植物多, 导致市面上山慈菇伪品不断^[19]。司瑞涵等^[20]采用 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术对山慈菇提取物进行分析与鉴定, 结合高效液相色谱 (High-performance liquid chromatography, HPLC) 技术的数据进行主成分分析, 进一步通过活性导向策略将化学成分与药效相关联, 明确了质控的核心方向, 即应重点关注山慈菇中的乙酸乙酯、菲类及苯丙素类成分, 并将其作为关键质量监控指标。因此, 明确山慈菇化学成分, 不仅

有助于阐明其药效物质基础,还可用于药材基原的鉴定。

本文基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 对来自于云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰的 3 种不同植物基原山慈菇进行非靶向代谢组学分析,鉴定其化学成分;在此基础上,结合无监督的主成分分析(Principal component analysis, PCA)、有监督的正交偏最小二乘法-判别分析(Orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)和聚类热图,进一步探究 3 种不同植物基原山慈菇间的代谢物成分差异,筛选出差异性成分并将分析结果以直观的可视化形式呈现;为量化 3 种不同植物基原山慈菇的质量差异,采用 HPLC 技术对 3 种山慈菇中的 5 种指标成分进行含量测定和对比分析。本研究通过阐明不同植物基原山慈菇的化学成分差异,旨在丰富其物质基础研究,并为山慈菇药材的质量评价与科学鉴别提供理论依据,进而促进中药现代化进程。



图1 3种不同植物基原山慈菇的假鳞茎照片

质谱纯甲醇、乙腈和乙醇购自上海麦克林生化科技有限公司,贝母兰宁(Coelonin)、山药素Ⅲ(Batatasin III)、蜜勒胺(Miliarine)、秋水仙碱(Colchicine)和 2-O-葡萄糖基白及苷(Dactylorhin A)购自乐美天科技有限公司。

1.2 仪器设备

超高效液相色谱四极杆飞行时间高分辨质谱联用仪 ACQUITYTMUPLC/Q-TOF/MS、液相色谱柱 ACQUITY UPLC HSS T3、质谱检测器 Xevo G2-XS Q-ToF、质谱工作站 MassLynx V4.1、PDA 检测器 2998 和高效液相色谱仪 Waters2695(美国 Waters 公司)、旋转蒸发器 B-305 Bath 型(瑞士 BUCHI 有限公司)、台式冻干机 SCIENTZ-30ND(宁波新芝冻干设备股份有限公司)、超声仪 KQ-500DE(昆山市超声仪器有限公司)、台式微量冷冻离心机 Icen-24R(杭州奥盛仪器有限公司)、电子天平 XJ220A SCS(上海天美天平仪器有限公司)、高速粉碎机 ST-512 型(瑞安市赛特机电有限公司)和电热鼓风干燥箱 BXH280 型(上海毅行仪器科技有限公司)。

1 实验部分

1.1 材料与试剂

云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰的假鳞茎,均采自浙江省金华市磐安县。云南独蒜兰采收期为 9 月至 10 月,由浙江理工大学生命科学与医药学院杨东风教授鉴定为兰科(*Orchidaceae*)植物云南独蒜兰 *Pleione yunnanensis* Rolfe 的干燥假鳞茎。独蒜兰采收期为 10 月至 11 月,由浙江理工大学生命科学与医药学院杨东风教授鉴定为兰科植物独蒜兰 *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe 的干燥假鳞茎。杜鹃兰采收期为 10 月至 11 月,由浙江理工大学生命科学与医药学院杨东风教授鉴定为兰科植物杜鹃兰 *Cremastra appendiculata* (D. Don) Makino 的干燥假鳞茎。3 种不同植物基原山慈菇的假鳞茎药材图如图 1 所示,留样凭证保存于浙江省植物次生代谢重点实验室。

1.3 实验方法及数据处理

1.3.1 液质供试品溶液制备

去除山慈菇样品的假鳞茎部位泥沙和杂质,取 10.00 g 样品切成片状,放于冷冻干燥机中预冻 24 h,再于冻干条件下处理 72 h 后,将其烘干至恒重,经粉碎处理后过 60 目筛;取 0.02 g 供试样品粉末,加入 1 mL 体积分数为 70% 的甲醇溶液,超声萃取 1 h,12000 r/min 离心 10 min,取样品上清液通过 0.22 μm 的孔径滤膜过滤,所得滤液置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存、备用。

1.3.2 液相供试品溶液制备

将山慈菇样品放入 40 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱中烘干,直至重量稳定,称取 10.00 g 样品,粉碎后过 60 目筛;称量 0.02 g 供试样品粉末,加入 1 mL 体积分数 70% 的甲醇溶液,超声萃取 45 min,8000 r/min 离心 10 min,上清液经 0.22 μm 孔径的微孔滤膜过滤,即得液相供试品溶液,置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存、备用。

1.3.3 色谱条件

采用 Waters ACQUITY UPLC HSS T3(2.1 mm \times 100 mm,1.8 μm)液相色谱柱,柱温为 40 $^{\circ}\text{C}$,

流速为 0.4 mL/min,进样量为 1.0 μ L,检测波长为 254 nm,流动相为水(A)-乙腈溶液(B),梯度洗脱条件如表 1 所示。

表 1 色谱条件表

时间/min	体积分数/%	
	A	B
0~1	96→96	4→4
1~7	96→50	4→50
7~8	50→30	50→70
8~12	30→5	70→95
12~15	5→5	95→95
15~16	5→96	95→4
16~18	96→96	4→4

1.3.4 质谱条件

完整的扫描数据范围:50~1200 Da,源温度 100 $^{\circ}$ C,去溶剂化温度 40 $^{\circ}$ C,扫描频率 1.000 s,锥电压 40000 V,质量浓度 400 mg/mL,低碰撞能量扫描的碰撞能量为 6000 V,高碰撞能量扫描的碰撞能量为 30~70 V。

1.3.5 液相色谱条件

色谱柱为 Waters Sunfire C₁₈ (4.6 mm×250 mm,5 μ m),流速为 1.0 mL/min,检测波长为 223 nm,柱温为 30 $^{\circ}$ C,进样量为 10 μ L;以水(A)-乙腈(B)为流动相进行梯度洗脱,梯度条件如表 2 所示。

1.3.6 数据处理与统计方法

质谱数据处理采用 Waters 公司 QI 软件进行色谱峰自动识别、峰匹配、峰对齐、峰提取、峰积分和归一化处理。二级质谱数据,结合在线数据库

(SciFinder、MassBank of North America)与已报道的文献^[21]对代谢物进行鉴定;采用 SIMCA—多元变量统计分析软件(SIMCA-P 14.1)对数据进行处理,再进行 PCA 和 OPLS-DA 分析以获取 3 组样本间的总体代谢差异程度,并通过聚类热图分析将所得的数据进行可视化呈现。

表 2 液相色谱条件表

时间/min	体积分数/%	
	A	B
0~10	95→90	5→10
10~40	90→60	10→40
40~45	60→60	40→40
45~47	60→50	40→50
47~55	50→40	50→60
55~56	40→10	60→90

2 结果与讨论

2.1 基于山慈菇靶向数据库的成分鉴定结果

基于靶向数据库的鉴定分析,3 种不同植物基原的山慈菇提取物在正、负离子模式下分别鉴定出 84、70、76 种化学成分,共 91 种,结果如表 3 和表 4 所示。由表 3—表 4 可以看出:91 种代谢物中包括了 4 种生物碱及其衍生物,19 种苯衍生物,3 种脂类和类脂分子,4 种核苷、核苷酸及其类似物,22 种有机酸及其衍生物,7 种有机氮化合物,15 种有机氧化物,8 种有机杂环化合物以及 9 种苯基丙酮和多酮化合物。

表 3 3 种不同植物基原山慈菇正离子模式下的代谢产物鉴定结果表

序号	保留时间/min	加合离子	分子式	分子量	化合物名称
1	0.65	[M+H] ⁺	C ₆ H ₁₄ N ₂ O ₂	147.1124	L-赖氨酸
2	0.72	[M+H] ⁺	C ₅ H ₁₁ NO ₃ S	166.0528	甲硫氨酸亚砷
3	0.72	[M+H] ⁺	C ₉ H ₁₅ N ₃ O ₂ S	230.0952	L-麦角硫因
4	0.72	[M+H] ⁺	C ₉ H ₁₇ NO ₇	252.1071	胞壁酸
5	0.72	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₆ O ₅	277.1060	二氢醉椒素
6	0.75	[M+H] ⁺	C ₉ H ₈ O	133.0645	肉桂醛
7	0.75	[M+H] ⁺	C ₇ H ₇ NO ₂	138.0545	葫芦巴碱
8	0.75	[M+H] ⁺	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₃	147.0759	L-谷氨酰胺
9	0.75	[M+H] ⁺	C ₅ H ₉ NO ₄	147.1160	L-谷氨酸
10	0.75	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₂	225.0903	二氢黄酮
11	0.75	[M+H] ⁺	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	360.1489	α -乳糖
12	0.75	[M+Na] ⁺	C ₂₁ H ₃₀ O ₁₁	458.4600	裸子苷 I
13	0.79	[M+H] ⁺	C ₆ H ₁₃ N ₃ O ₃	176.1024	L-瓜氨酸
14	0.79	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₄ O ₂	239.1062	4'-甲氧基查耳酮
15	0.82	[M+H] ⁺	C ₄ H ₅ N ₅ O	112.0505	胞嘧啶
16	0.82	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₄ O ₄	271.0953	1,5-二甲氧基菲-2,7-二酮

表3(续)

序号	保留时间/min	加合离子	分子式	分子量	化合物名称
17	0.82	[M+H] ⁺	C ₁₀ H ₁₈ N ₄ O ₆	291.1289	精氨酸琥珀酸
18	0.82	[M+H] ⁺	C ₂₂ H ₁₈ O ₄	346.1205	1-[(4-羟苯基)甲基]-4-甲氧基-2,7-萘二醇
19	0.82	[M+H] ⁺	C ₂₂ H ₂₂ O ₄	350.4000	3,3'-二羟基-2-(4-羟苄基)-5-甲氧基联苄
20	0.89	[M+H] ⁺	C ₅ H ₇ NO ₃	130.0859	L-焦谷氨酸
21	0.89	[M+H] ⁺	C ₅ H ₅ N ₅ O	135.0299	鸟嘌呤
22	0.89	[M+H] ⁺	C ₅ H ₁₁ N ₃ O ₂	146.0920	4-胍基丁酸
23	1.03	[M+H] ⁺	C ₁₄ H ₂₀ O ₇	300.3070	红景天苷
24	1.06	[M+H] ⁺	C ₆ H ₆ O ₃	126.1100	5-羟甲基糠醛
25	1.10	[M+H] ⁺	C ₁₁ H ₂₀ N ₂ O ₃	229.1542	亮氨酸脯氨酸
26	1.10	[M+H] ⁺	C ₂₁ H ₂₂ O ₈	403.1393	川陈皮素
27	1.23	[M+H] ⁺	C ₁₉ H ₁₈ O ₆	342.3426	3',4',5,7-四甲氧基黄酮
28	1.27	[M+H] ⁺	C ₉ H ₈ O ₃	165.0542	2-羟基肉桂酸
29	1.27	[M+Na] ⁺	C ₃₄ H ₄₆ O ₁₈	742.2684	红门兰素
30	1.34	[M+H] ⁺	C ₁₃ H ₁₆ O ₆	268.2650	1-O-阿魏酰甘油
31	1.47	[M+H] ⁺	C ₁₀ H ₁₄ N ₅ O ₇ P	348.0695	腺苷一磷酸
32	1.58	[M+H] ⁺	C ₁₁ H ₂₀ N ₂ O ₅	261.1439	γ-谷氨酰亮氨酸
33	1.65	[M+H] ⁺	C ₁₂ H ₁₄ O ₂	190.2380	Z-藁本内酯
34	1.68	[M+H] ⁺	C ₂₉ H ₂₈ O ₅	456.1981	3,3'-二羟基-2,6-双(对羟基苄基)-5-甲氧基联苄
35	1.72	[M+H] ⁺	C ₅ H ₄ N ₄ O	137.0454	次黄嘌呤
36	1.85	[M+H] ⁺	C ₁₁ H ₁₂ O ₅	225.0751	芥子酸
37	2.47	[M+H] ⁺	C ₉ H ₈ O ₂	149.0593	肉桂酸
38	2.58	[M+H] ⁺	C ₁₁ H ₁₃ NO ₄	224.0909	N-乙酰-L-酪氨酸
39	2.78	[M+H] ⁺	C ₉ H ₁₇ NO ₅	220.1175	泛酸
40	2.78	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₄ O ₃	242.2700	卢西安赛素
41	3.36	[M+H] ⁺	C ₃₀ H ₂₆ O ₆	482.5240	布勒斯特醇 A
42	3.50	[M+H] ⁺	C ₂₂ H ₁₈ O ₄	347.1276	1-(对羟基苄基)-4-甲氧基萘-2,7-二醇
43	3.75	[M+H] ⁺	C ₁₀ H ₁₉ NO	170.1534	羽扇豆碱
44	3.95	[M+H] ⁺	C ₁₂ H ₁₂ O ₄	221.0803	6,7-二甲氧基-4-甲基香豆素
45	3.95	[M+H] ⁺	C ₁₉ H ₁₈ O ₈	375.1059	蔓荆子黄素
46	4.02	[M+H] ⁺	C ₉ H ₁₁ NO ₂	166.0857	D-苯丙氨酸
47	4.37	[M+H] ⁺	C ₁₀ H ₁₂ O ₃	181.0853	对羟基苯甲酸丙酯
48	4.71	[M+H] ⁺	C ₁₈ H ₂₉ NO ₃	308.2206	二氢辣椒素
49	4.84	[M+H] ⁺	C ₉ H ₁₀ O ₄	183.0647	丁香醛
50	5.02	[M+H] ⁺	C ₃₀ H ₂₄ O ₆	481.1645	4,4'-二甲氧基-9,10-二氢-[6,1'-联萘]-2,7,2',7'-四醇
51	5.12	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₈ O ₄	275.1279	石斛酚
52	5.26	[M+H] ⁺	C ₁₁ H ₁₂ O ₄	209.0804	反式-3,5-二甲氧基-4-羟基肉桂酸
53	5.50	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₃	241.0855	4-甲氧基萘-2,7-二醇
54	5.56	[M+H] ⁺	C ₁₀ H ₁₀ O ₂	163.0750	肉桂酸甲酯
55	5.84	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₄ O ₄	259.0959	异丹叶大黄素
56	6.67	[M+H] ⁺	C ₅ H ₁₄ NO ₄ P	184.0728	磷酸胆碱
57	6.80	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₂ O ₄	257.0814	4-甲氧基萘-2,3,7-三醇
58	7.46	[M+H] ⁺	C ₈ H ₈ O ₂	137.0593	对甲氧基苯甲醛
59	7.46	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₆ O ₃	245.1159	山药素 III
60	7.77	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₂ O ₅	285.0749	黄豆黄素
61	7.84	[M+H] ⁺	C ₆ H ₁₃ NO ₅	180.0861	氨基葡萄糖
62	8.01	[M+H] ⁺	C ₂₃ H ₂₂ O ₆	395.1478	鱼藤酮
63	8.73	[M+H] ⁺	C ₁₆ H ₁₈ O ₃	259.1334	3'-O-甲基山药素 III(异构体)
64	8.80	[M+H] ⁺	C ₁₅ H ₁₆ O ₂	229.1241	3-羟基-5-甲氧基联苄
65	8.93	[M+H] ⁺	C ₁₈ H ₃₀ O ₂	279.2318	α-亚麻酸
66	8.97	[M+H] ⁺	C ₁₈ H ₂₄ O ₃	289.1790	雌三醇
67	10.41	[M+H] ⁺	C ₇ H ₆ O ₃	139.0387	3,4-二羟基苯甲醛

表4 3种不同植物基原山慈菇负离子模式下的代谢产物鉴定结果表

序号	保留时间/min	加合离子	分子式	分子量	化合物名称
1	0.69	[M-H] ⁻	C ₅ H ₁₂ N ₂ O ₂	131.0813	鸟氨酸
2	0.69	[M-H] ⁻	C ₆ H ₉ N ₃ O ₂	154.0617	L-组氨酸
3	0.72	[M-H] ⁻	C ₅ H ₈ O ₄	131.0345	戊二酸
4	0.72	[M-H] ⁻	C ₅ H ₁₀ N ₂ O ₃	145.0619	丙氨酰甘氨酸
5	0.75	[M-H] ⁻	C ₆ H ₁₀ O ₆	178.1400	葡萄糖酸内酯
6	0.75	[M-H] ⁻	C ₁₂ H ₂₂ O ₁₁	341.1084	肌醇半乳糖苷
7	0.96	[M+HCO] ⁻	C ₂₁ H ₁₈ O ₁₂	462.1309	木犀草素-7-O-β-D-葡萄糖醛酸苷
8	1.06	[M-H] ⁻	C ₅ H ₄ O ₃	111.0088	3-呋喃甲酸
9	1.06	[M-H] ⁻	C ₆ H ₆ O ₆	173.0164	反式乌头酸
10	1.27	[M-H] ⁻	C ₆ H ₁₂ O ₆	180.0633	D-半乳糖
11	1.34	[M-H] ⁻	C ₄ H ₆ O ₄	117.0182	D-赤藓糖酸内酯
12	1.99	[M-H] ⁻	C ₁₃ H ₁₇ O ₇	285.0994	天麻素
13	2.51	[M-H] ⁻	C ₂₁ H ₂₆ O ₈	406.1628	山药素 III-3-O-葡萄糖苷
14	2.99	[M-H] ⁻	C ₆ H ₆ O ₂	109.0290	邻苯二酚
15	3.95	[M-H] ⁻	C ₁₄ H ₂₄ O ₁₀	351.1291	白及素 C
16	4.23	[M-H] ⁻	C ₉ H ₁₅ N ₃ O ₂ S	228.0811	麦角硫因
17	4.64	[M-H] ⁻	C ₉ H ₈ O ₃	163.0401	对香豆酸
18	4.84	[M-H] ⁻	C ₄₀ H ₅₆ O ₂₂	887.3159	2-O-葡萄糖基白及苷
19	4.98	[M-H] ⁻	C ₁₄ H ₁₂ O ₄	243.0674	芪三酚
20	5.09	[M-H] ⁻	C ₈ H ₁₂ O ₄	171.0654	1,4-环己烷二羧酸
21	5.09	[M-H] ⁻	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	193.0579	异阿魏酸
22	5.74	[M-H] ⁻	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	286.2363	2'-羟基染料木素
23	6.53	[M-H] ⁻	C ₁₀ H ₁₀ O ₃	177.0552	阿魏醛
24	7.49	[M-H] ⁻	C ₁₅ H ₁₆ O ₃	243.1027	软木花椒素

2.2 3种不同植物基原山慈菇差异代谢物比较

将基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术采集的数据导入 SIMCA-P 14.1 软件,进行 PCA 分析,每个样本设置 3 个重复,以确保分析结果的稳定性和可靠性,结果如图 2 所示。图 2 显示:3 种不同植物基原山慈菇的代谢物样本沿预测成分(方差贡献率 47.65%)、正交成分(方差贡献率 32.76%)方向均呈现分离趋势,2 个主成分的累计贡献率超过 80%,表明组间差异显著;此外,同组样本点聚集紧密,显示组内差异较小。

为精确地筛选 3 种不同植物基原山慈菇间的差异代谢物,基于 PCA 分析结果,采用化学计量统计法对 3 组样本的代谢组数据进行多组间 OPLS-DA 比较分析。为确保分析结果的可靠性,对 OPLS-DA 模型进行系统性评价,结果如图 3 所示。该模型的拟合度(R^2Y)为 0.998,预测度(Q^2)为 0.992,表明所建模型具有出色的解释能力和预测性能;此外,置换检验结果显示, Q^2 回归线与 y 轴的截距小于 0,表明 OPLS-DA 模型未出现过拟合的现象,验证了该模型的稳定性和可靠性,确认其适用于后续差异代谢物的筛选与分析。

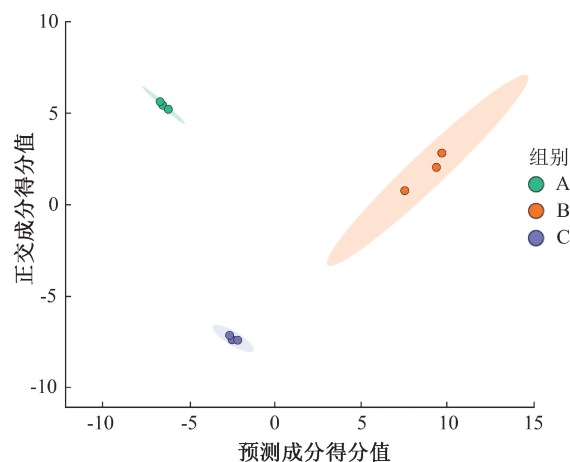


图2 3种不同植物基原山慈菇的 PCA 散点图

注:样本 A、B、C 分别代表云南独蒜兰、独蒜兰、杜鹃兰的假鳞茎。

基于 OPLS-DA 模型分析结果,以 VIP 值 >1 、 $P < 0.05$ 为条件筛选 3 种不同植物基原山慈菇样本间的差异代谢物,结果如图 4 所示。图 4 显示:3 组样本在 OPLS-DA 得分图的预测成分方向呈明显分离,方差贡献率为 33.7%,组间距离较大,表明 3 种不同植物基原山慈菇的代谢物组成存在较大差异;在正交成分方向,方差贡献率为 46.5%,各组样本聚集紧密,离散程度较低,反映出组内样本间代谢物

的相对一致性。该结果与 PCA 分析结论一致,共同表明 3 种不同植物基原山慈菇在代谢物组成上存在系统性差异。

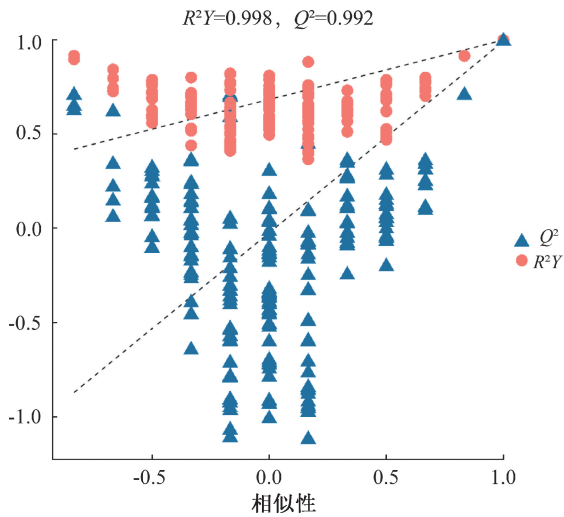


图 3 OPLS-DA 模型的置换检验示意图

如表 5 所示,3 种样本共筛选出 21 种差异代谢物,根据其化学结构和分类特征,可系统归纳为 4 个主要类别:第一类是以 L-焦谷氨酸、亮氨酸脯氨酸等为代表的有机酸及其衍生物;第二类为苯丙素和

聚酮类化合物,包括软木花椒素和 2-羟基肉桂酸等次生代谢产物;第三类为有机氧化合物,主要为肌醇半乳糖苷、D-半乳糖等碳水化合物及其缀合物;第四类为结构特殊的化合物,如苯环型化合物二氢辣椒素、有机杂环化合物胞嘧啶以及多个尚未在人类代谢组数据库(The human metabolome database, HMDB)中收录的联苳类和菲类衍生物。

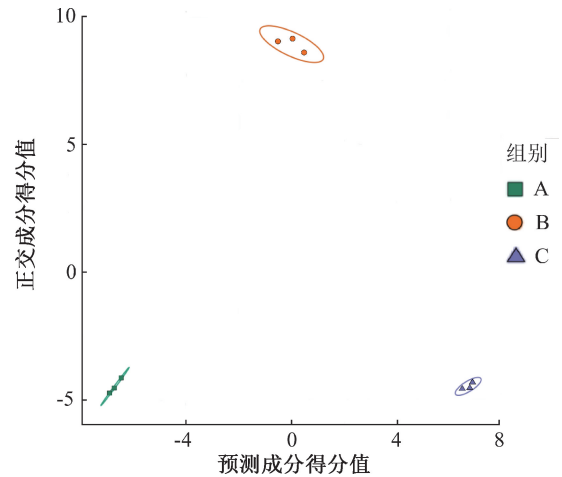


图 4 3 种不同植物基原的山慈菇 OPLS-DA 得分图

注:样本 A、B、C 分别代表云南独蒜兰、独蒜兰、杜鹃兰的假鳞茎部位。

表 5 3 种不同植物基原山慈菇差异代谢产物结果

代谢物名称	人类代谢组数据库编号	类别	亚类
软木花椒素	HMDB0302544	苯丙素和聚酮类化合物	
L-焦谷氨酸	HMDB0000267	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
红门兰素			
亮氨酸脯氨酸	HMDB0011175	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
甘氨酸-L-亮氨酸	HMDB0028929	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
γ-谷氨酰亮氨酸	HMDB0011171	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
肌醇半乳糖苷	HMDB0005826	有机氧化合物	碳水化合物及其缀合物
D-苯丙氨酸	HMDB0250791	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
二氢辣椒素	HMDB0038457	苯环型化合物	甲氧基苯酚类
D-半乳糖	HMDB0000143	有机氧化合物	碳水化合物及其缀合物
白及素 C			
2-O-葡萄糖基白及苷			
胞嘧啶	HMDB0000630	有机杂环化合物	嘧啶及其衍生物
环亮氨酸	HMDB0062225	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
山药素 III	HMDB0030636	苯丙素和聚酮类化合物	
精氨酸琥珀酸	HMDB0000052	有机酸及其衍生物	氨基酸、肽及其类似物
2-羟基肉桂酸	HMDB0002641	苯丙素和聚酮类化合物	羟基肉桂酸及其衍生物
4,4'-二甲氧基-9,10-二氢-[6,1'-联菲]-2,7,2',7'-四醇			
3,3'-二羟基-2,6-双(对羟基苳基)-5-甲氧基联苳			
1-O-阿魏酰甘油			
1-(对羟基苳基)-4-甲氧基菲-2,7-二醇			

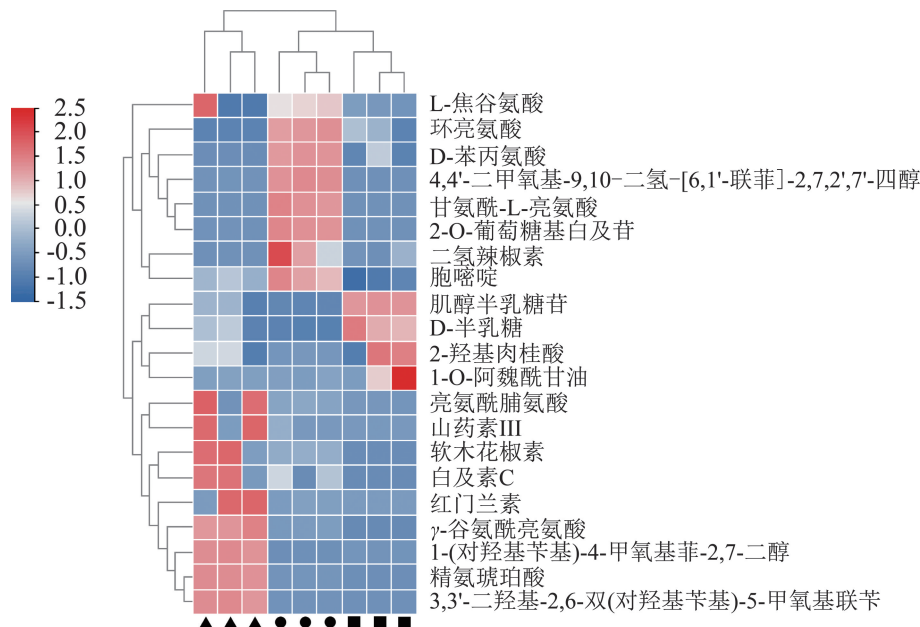
2.3 差异代谢物聚类热图分析

基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 技术鉴定的化学成分,对 3 种不同植物基原山慈菇样本进行聚类热

图分析,分析结果如图 5 所示。图 5 显示:3 种不同植物基原山慈菇在热图中呈现明显的聚类区分,表明不同植物基原山慈菇间的代谢物积累模式存在显

著差异,其中杜鹃兰与其他2种独蒜兰的代谢特征区分尤为明显。软木花椒素与山药素Ⅲ在独蒜兰假鳞茎部位的山慈菇中显著富集,软木花椒素因其显著的抗肿瘤活性^[22]、抗凝特性^[23]以及抗炎效果^[24]而被广泛研究,山药素Ⅲ则在缓解疼痛^[25]、抗炎^[26]以及抗肿瘤^[27]方面表现出良好的潜力。相比之下,二氢辣椒素和2-O-葡萄糖基白及苷在云南独蒜兰

的假鳞茎部位积累较多,在另2种样本中表达水平相对较低,其中二氢辣椒素具有镇痛^[28]、肿瘤治疗^[29]及心血管保护^[30]等作用,而2-O-葡萄糖基白及苷则显示出抗肾癌的活性^[31]。此外,其他差异代谢物如3,3'-二羟基-2,6-双(对羟基苄基)-5-甲氧基联苄也被证实具有抗炎活性^[32]。综上所述,3种不同植物基原山慈菇在次生代谢产物组成上存在显著差异。



▲ 独蒜兰的假鳞茎样本; ● 云南独蒜兰的假鳞茎样本; ■ 杜鹃兰的假鳞茎样本

图5 差异代谢物聚类热图

2.4 不同植物基原山慈菇中5个指标成分的含量测定

通过测量不同浓度对照品溶液的峰面积,并以峰面积作为纵轴(y)和浓度(x)作为横轴制作标准曲线,获得5个指标成分:贝母兰宁(Coelonin)、山药素Ⅲ(Batatasin III)、蜜勒胺(Miliarine)、秋水仙碱(Colchicine)、2-O-葡萄糖基白及苷(Dactylorhin A)的回归公式,结果如表6所示。表6显示:5种指标成分的定量分析标准曲线参数,为后续含量测定提供了准确的计量依据;5种成分在0.2~20 μg 范

围内均呈现良好的线性关系,其中贝母兰宁的标准曲线斜率达到2808431.2,说明了该仪器具有较高的检测灵敏度;山药素Ⅲ和秋水仙碱的决定系数均为0.9999,显示二者在此浓度范围内线性关系优异;蜜勒胺和2-O-葡萄糖基白及苷的决定系数分别为0.9972和0.9943,略低于前3种成分,但仍符合定量分析的基本要求。本文建立的标准曲线为上述5种成分含量的准确测定提供了方法学基础,也为评价不同植物基原山慈菇的质量差异提供了技术支持。

表6 5个指标成分回归公式表

标准品	标准曲线	决定系数	线性范围/ μg
贝母兰宁	$y=2808431.2x+222387.8$	0.9996	0.2~20.0
山药素Ⅲ	$y=688218.7x-46420.3$	0.9999	0.2~20.0
蜜勒胺	$y=39034.4x+12716.7$	0.9972	0.2~20.0
秋水仙碱	$y=634087.1x-6770.8$	0.9999	0.2~20.0
2-O-葡萄糖基白及苷	$y=25083.5x+16879.0$	0.9943	0.2~20.0

采用HPLC技术对山慈菇中5种指标成分进行含量测定,结果如图6所示。图6显示:5种指标成分能够实现有效分离,各色谱峰型对称且尖锐,未见明显重叠或拖尾现象,表明所建立的

色谱方法具有良好的适用性,满足准确定量要求。对3种不同植物基原山慈菇的色谱图进行比较分析,结果显示各指标成分在不同样品中的含量存在明显差异:云南独蒜兰样品中各色谱峰

响应值普遍较高,表明其目标成分含量较为丰富,独蒜兰样品中各峰响应相对较低,杜鹃兰样

品在特定保留时间处呈现出独特的峰型分布特征。

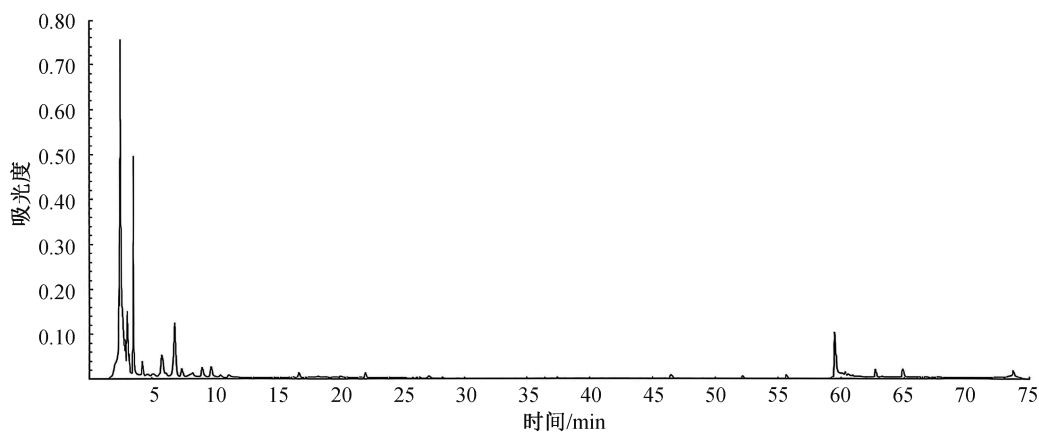
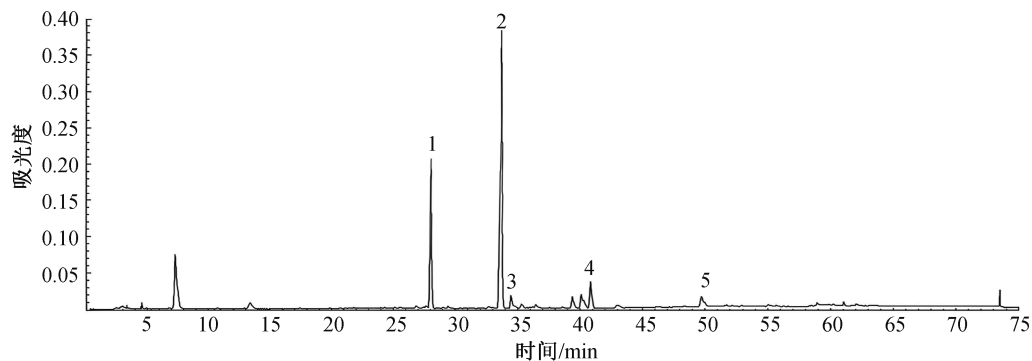
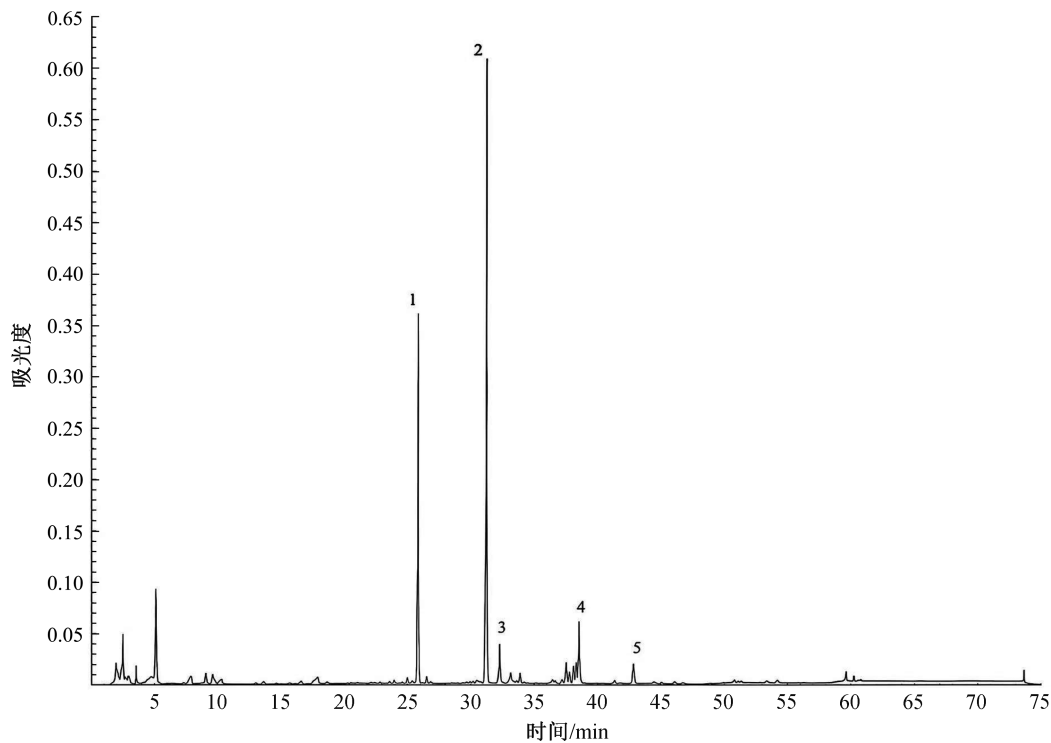


图 6 3 种不同植物基原山慈菇液相图

注:样本 1、2、3、4 和 5 分别代表 2-O-葡萄糖基白及苷、蜜勒胺、秋水仙碱、贝母兰宁和山药素Ⅲ。

5种指标成分的洗脱顺序如表7所示。表7显示:5种成分按极性从大到小依次出峰,2-O-葡萄糖基白及苷、蜜勒胺、秋水仙碱、贝母兰宁和山药素Ⅲ的出峰时间分别为27.271、32.830、33.426、40.695 min和47.289 min。云南独蒜兰的山慈菇中5种指标成分的含量分别为(4.7700±0.2900)、(6.1400±0.4500)、(0.0200±0.0010)、(0.0040±0.0005)、(0.0170±0.0007) μg/mg;独蒜兰的山慈菇中5种指标成分的含量分别为(3.8700±0.1300)、(3.8000±0.1800)、(0.0100±0.0030)、(0.0020±0.0003)、(0.0110±0.0006) μg/mg。经检测,因含量较低,在杜鹃兰的山慈菇中未发现这5种指标成分。综上所述,3种不同植物基原的山慈菇在成分积累上存在显著差异,其中蜜勒胺和2-O-葡萄糖基白及苷在两种独蒜兰中含量显著高于其他3种成分,这种成分

表7 山慈菇成分含量表

序号	成分	出峰时间/min	云南独蒜兰含量/(μg·mg ⁻¹)	独蒜兰含量/(μg·mg ⁻¹)
1	2-O-葡萄糖基白及苷	25.829	4.7700±0.2900	3.8700±0.1300
2	蜜勒胺	31.224	6.1400±0.4500	3.8000±0.1800
3	秋水仙碱	32.288	0.0200±0.0010	0.0100±0.0030
4	贝母兰宁	38.548	0.0040±0.0005	0.0020±0.0003
5	山药素Ⅲ	42.861	0.0170±0.0007	0.0110±0.0006

3 结论

本文采用基于UPLC-Q-TOF-MS/MS技术的非靶向代谢组学的方法,对云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰这3种不同植物基原的山慈菇进行系统的化学成分表征,分析了不同基原山慈菇的化学物质差异,主要结论如下:

a)在云南独蒜兰、独蒜兰和杜鹃兰的山慈菇中分别鉴定出84、70、76种化学成分,共91种。其中包括:4种生物碱及其衍生物,19种苯衍生物,3种脂类和类脂分子,4种核苷、核苷酸及类似物,22种有机酸及其衍生物,7种有机氮化合物,15种有机氧化合物,8种有机杂环化合物以及9种苯基丙酮和多酮化合物。

b)3种不同植物基原山慈菇的样本呈现显著组间分离与良好组内聚集。基于VIP>1且P<0.05的标准,共鉴定出21种差异代谢物,按其结构特征可归纳为4大类:有机酸及其衍生物、苯丙素和聚酮类化合物、有机氧化合物、联苳类和菲类衍生物。

c)云南独蒜兰中山慈菇的5种指标成分的含量均高于独蒜兰,而杜鹃兰样品因含量较低未能检测到上述成分,表明不同植物基原的山慈菇在指标成

积累差异化特征具有重要的药学意义,蜜勒胺和2-O-葡萄糖基白及苷作为山慈菇的主要成分,其抗肿瘤^[33]、抗炎^[34-35]和神经保护^[36-37]等活性构成了山慈菇的药效基础;秋水仙碱虽含量较低,但其显著的抗癌^[38]和抗痛风^[39]等药理作用提示其在山慈菇质量评价中仍需给予充分重视。未来山慈菇的质量控制不能仅测定秋水仙碱这一单一指标,而应构建一个基于多成分且区分基原的质量评价方法。该方法应以独蒜兰属中含量较高的蜜勒胺和2-O-葡萄糖基白及苷为重要指标,设立相应的含量下限,同时兼顾低含量特征成分的质控价值,更全面地表征山慈菇药材的内在质量,并针对杜鹃兰独特的成分组成,为其制定独立的质量标准,并进一步优化HPLC/UPLC技术的检测方法,全面提升质量控制的准确度与可靠性。

分的含量上存在显著差异。

本文基于代谢组学分析,揭示了3种不同植物基原山慈菇在化学成分和内在质量上的差异性,为建立更加科学、全面的山慈菇质量评价标准提供了理论指导,也为山慈菇的进一步研究和开发提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典:一部:2020年版[M]. 北京:中国医药科技出版社,2020:34.
- [2] 董海玲,郭顺星,王春兰,等. 山慈菇的化学成分和药理作用研究进展[J]. 中草药,2007,38(11):1734-1738.
- [3] 张丽娜,桂阳,王沁,等. 不同产地独蒜兰种质资源的遗传多样性分析[J]. 中草药,2017,48(5):979-984.
- [4] 张凡,赵明波,李军,等. 独蒜兰的化学成分研究[J]. 中草药,2013,44(12):1529-15.
- [5] 季漪,吴勉华. 山慈菇化学成分及其抗肿瘤作用机制研究进展[J]. 中华中医药学刊,2018,36(3):596-598.
- [6] 王宏伟,田欣圆,于蕾. 山慈菇的化学成分及其抗肿瘤作用机制研究进展[J]. 内蒙古医科大学学报,2022,44(3):305-309.
- [7] 原文珂,覃彬华,李小平,等. 山慈菇的化学成分研究[J]. 中国现代中药,2017,19(5):639-641.
- [8] 李琦,陈宇纵,辛海量. 山慈菇的化学成分及药理作用研究进展[J]. 药学实践杂志,2014,32(4):250-253.

- [9] 张志强, 魏毅强, 杨亚莉, 等. 山慈菇多糖对肝癌腹水荷瘤小鼠症状的改善机制[J]. 西北药学杂志, 2023, 38(3): 74-80.
- [10] 王洋, 唐娟, 孙鹏, 等. 山慈菇提取物对人结直肠癌 SW480 细胞增殖和凋亡的影响[J]. 中国中医基础医学杂志, 2021, 27(11): 1754-1758.
- [11] 余怡欣, 陈龙惠, 曹丹, 等. 山慈菇活性成分微波提取工艺优化. 指纹图谱与抗植物病菌活性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(5): 204-212.
- [12] 丁云岗, 黄育新. 秋水仙碱治疗痛性关节炎的安全性评价[J]. 中国基层医药, 2006, 13(7): 1085-1086.
- [13] Thakur N, Murali K, Bhadoriya K, et al. Phytochemical exploration of neolitsea pallens leaves using UPLC-Q-TOF-MS/MS approach[J]. Scientific Reports, 2024, 14(1): 7770-7770.
- [14] 吴晓莹, 张安然, 杨丹阳, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 分析白术及其不同炮制品化学成分及其差异[J]. 时珍国医国药, 2023, 34(10): 2395-2403.
- [15] 张思彤, 胡先润, 刘文康, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS/MS 的丹参饮体内外成分鉴定[J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 1-12.
- [16] Wang S Q, Li W N, Zhang X F, et al. Metabolomics study of different germplasm resources for three *Polygonatum* species using UPLC-Q-TOF-MS/MS[J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13:826902.
- [17] 果佳慧, 蔡于罗, 田伟, 等. 基于 UPLC-Q TOF MS/MS 技术结合 SWATH 采集法同时定性定量分析地胆草中的化学成分[J]. 药物分析杂志, 2024, 44(8): 1331-1342.
- [18] 乔灵芝, 卢晨娜, 刘晓谦, 等. 灵芝孢子中三萜类成分 UPLC-Q-TOF-MS/MS 定性分析和 HPLC 含量测定研究[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(20): 5487-5496.
- [19] 刘婷婷, 于栋华, 刘树民. 山慈菇的本草考证及现代研究进展[J]. 中国药房, 2020, 31(24): 3055-3059.
- [20] 司函瑞. 山慈菇的化学成分及抗肝癌作用的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 21-43.
- [21] 王静, 肖秋肖, 周祖英, 等. 基原为云南独蒜兰的山慈菇的化学成分鉴定与分析[J]. 中国药房, 2022, 33(10): 1165-1171.
- [22] Nodooshan S J, Amini P, Ashrafizadeh M, et al. Suberosin attenuates the proliferation of MCF-7 Breast cancer cells in combination with radiotherapy or hyperthermia[J]. Current Drug Research Reviews, 2021, 13(2): 148-153.
- [23] Golfakhrabadi F, Abdollahi M, Ardakani M R, et al. Anticoagulant activity of isolated coumarins (suberosin and suberenol) and toxicity evaluation of *Ferulago carduchorum* in rats[J]. Pharmaceutical Biology, 2014, 52(10): 1335-1340.
- [24] Chen Y C, Tsai W J, Wu M H, et al. Suberosin inhibits proliferation of human peripheral blood mononuclear cells through the modulation of the transcription factors NF-AT and NF-kappaB[J]. British Journal of Pharmacology, 2007, 150(3): 298-31.
- [25] Hasriadi, Wasana P W D, Sritularak B, et al. Batatasin III, a constituent of *dendrobium scabringue*, improves murine pain-like behaviors with a favorable CNS safety profile[J]. Journal of Natural Products, 2022, 85(7): 1816-1825.
- [26] Lei M C, Liu H F, Tan X, et al. Design, synthesis, anti-inflammatory activity evaluation, preliminary exploration of the mechanism, molecule docking, and structure-activity relationship analysis of Batatasin III analogs[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 2023, 96: 129527.
- [27] Pinkhie T, Petpiroon N, Sritularak B, et al. Batatasin III inhibits migration of human lung cancer cells by suppressing epithelial to mesenchymal transition and FAK-AKT signals[J]. Anticancer Research, 2017, 37(11): 6281-6289.
- [28] Cortright D N, Szallasi A. Biochemical pharmacology of the vanilloid receptor TRPV1. an update[J]. European Journal of Biochemistry, 2004, 271(10): 1814-1819.
- [29] Shi S M, Li C Y, Zhang Y L, et al. Dihydrocapsaicin inhibits cell proliferation and metastasis in melanoma via down-regulating β -Catenin pathway [J]. Frontiers in Oncology, 2021, 11: 648052.
- [30] Thongin S, Den-Udom T, Uppakara K, et al. Beneficial effects of capsaicin and dihydrocapsaicin on endothelial inflammation, nitric oxide production and antioxidant activity [J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2022, 154: 113521.
- [31] Ratnayake R, Covell D, Ransom T T, et al. Englerin A, a selective inhibitor of renal cancer cell growth, from *phyllanthus engleri*[J]. Organic Letters, 2009, 11(1): 57-60.
- [32] Li J Y, Yang L, Hou B, et al. Poly p-hydroxybenzyl substituted bibenzyls and phenanthrenes from *Bletilla ochracea* Schltr with anti-inflammatory and cytotoxic activity [J]. Fitoterapia, 2018, 129: 241-248.
- [33] Jia X Y, Li Q Q, Xu M W, et al. Advances in militarine: Pharmacology, synthesis, molecular regulation and regulatory mechanisms[J]. Heliyon, 2024, 10(2): e24341.
- [34] Yu T, Shim J, Yang Y Y, et al. 3-(4-(tert-Octyl)phenoxy) propane-1, 2-diol suppresses inflammatory responses via inhibition of multiple kinases[J]. Biochemical Pharmacology, 2012, 83(11): 1540-1551.
- [35] Li Y, Wang Y, Xu M, et al. Anti-inflammatory and analgesic activities of *Pleione bulbocodioides* (Franch.) Rolfe and its main constituents[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2016, 189: 264-272.
- [36] Zhao W, Yang Z, Fu H, et al. Dactylorhin A and B, new neuroprotective compounds from the orchid *Dactylorhiza hatagirea*[J]. Journal of Natural Products, 2001, 64(6): 776-779.
- [37] 陈诗, 赵玥, 王振, 等. 山慈菇药理作用及临床应用研究进展[J]. 中华中医药学刊, 2023, 41(6): 247-250.
- [38] 韦秋琴, 张祖隆. 秋水仙碱抗炎、抗纤维化及抗肿瘤的研究进展[J]. 中国现代医学杂志, 2020, 30(4): 76-81.
- [39] Martinon F, Pétrilli V, Mayor A, et al. Gout-associated uric acid crystals activate the NALP3 inflammasome[J]. Nature, 2006, 440(7081): 237-241.

团队介绍

杨东风教授团队专注于中药资源与天然产物生物合成研究,主要研究方向包括中药丹参的活性成分的合成与调控机制、中草药活性成分的液质联用分析等。团队包括教授1名,硕博研究生20余名。杨东风教授于2016年至2017年任英国约翰·莫纳斯中心访问学者,主持国家重点研发计划、国家自然科学基金重点基金、面上项目,浙江省自然科学基金重大项目、浙江省杰出青年基金等各类项目50余项,在 *Plant biotechnology Journal*、*Biotechnology Advances*、*Plant Physiology* 等国内外期刊发表论文100余篇,授权发明专利21项,获得教育部科学技术一等奖、浙江省科技进步二等奖、三等奖、浙江省教学成果一等奖、中国商业联合会科技进步特等奖、大北农科技奖二等奖等多项奖励。团队近期在药用植物表观遗传调控领域取得了突破性进展,系统揭示了DNA甲基化与去甲基化动态协同调控丹参酚酸生物合成的分子机制,绘制了该途径的表观遗传调控网络图谱,研究水平处于国际前列。

(责任编辑:张会巍)