DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250903001
引用格式: 林涛, 胡正旭, 王静, 等. 低温超声辅助低共熔溶剂-超高效液相色谱-串联质谱法测定云南铁皮石斛和紫皮石斛中 7 种活性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(5): 44–50.
LIN T, HU ZX, WANG J, *et al*. Determination of 7 kinds of active components in *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* in Yunnan Province by low-temperature ultrasonic-assisted deep eutectic solvents-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(5): 44–50. (in Chinese with English abstract).

低温超声辅助低共熔溶剂-超高效液相色谱-串联质谱法测定云南铁皮石斛和紫皮石斛中 7 种活性成分

林 涛[1], 胡正旭[2], 王 静[2], 何绍鸿[3], 张 娇[1], 刘宏程[1], 唐艳梅[3*]

(1. 云南省农业科学院质量标准与检测技术研究所, 昆明 650205;
2. 龙陵县农业技术推广中心, 保山 678300;
3. 云南经济管理学院医学院, 昆明 650106)

摘 要: 目的 建立低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DESs)-甲醇-水提取的超高效液相色谱-串联质谱法测定云南省特色的云南铁皮石斛和紫皮石斛中 7 种活性成分的方法, 对云南的特色云南铁皮石斛和紫皮石斛进行鉴别研究。**方法** 样品经 DESs-甲醇-水溶液冰浴下超声提取后, 采用超高效液相色谱-串联质谱法, 多反应监测模式测定, 化学计量学进行数据分析。**结果** 7 种活性成分在一定质量浓度范围内的相关系数较好, 检出限和定量限的范围分别为 0.006~0.030 mg/kg 和 0.020~0.100 mg/kg, 精密度、重复性和稳定性的相对标准偏差范围为 0.95%~5.45%, 相对于铁皮石斛, 紫皮石斛在金圣草素、异槲皮素、芹菜素和原儿茶酸的含量上调, 圣草酚的含量下调, 而柚皮素和香草酸的含量在两种石斛中的差异不大。**结论** 方法的灵敏度和稳定性较好, 铁皮石斛和紫皮石斛可通过正交偏最小二乘判别分析进行有效的鉴别, 该研究结果可对云南省特色石斛的质量评价提供参考。

关键词: 低共熔溶剂; 超高效液相色谱-串联质谱法; 铁皮石斛; 紫皮石斛; 活性成分; 鉴别

收稿日期: 2025-09-03
基金项目: 云南省农业联合专项面上项目(202301BD070001-049); 云南省应用基础研究专项重点项目(202501AS070033); 云南省教育厅科学研究基金项目(2024J1358); 云南省庞国芳院士工作站项目(202305AF150015)
第一作者: 林涛(1987—), 男, 硕士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: lintaonj@126.com
***通信作者:** 唐艳梅(1973—), 女, 硕士, 教授, 主要研究方向为药物分析研究。E-mail: 1036186131@qq.com

Determination of 7 kinds of active components in *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* in Yunnan Province by low-temperature ultrasonic-assisted deep eutectic solvents-ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry

LIN Tao[1], HU Zheng-Xu[2], WANG Jing[2], HE Shao-Hong[3], ZHANG Jiao[1], LIU Hong-Cheng[1], TANG Yan-Mei[3*]

(1. *Quality Standards and Testing Technology Research Institute*, *Yunnan Academy of Agricultural Sciences*, *Kunming* 650205, *China*; 2. *Longling County Agricultural Technology Extension Center*, *Baoshan* 678300, *China*; 3. *School of Medicine*, *Yunnan University of Business Management*, *Kunming* 650106, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a method for the determination of 7 kinds of active components in the characteristic *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* in Yunnan Province by deep eutectic solvents (DESs)-methanol-water extraction and ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, and conduct identification research on the characteristic *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* in Yunnan Province. **Methods** After ultrasonic extraction of the samples in a DESs-methanol-water solution ice bath, ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry was employed for analysis in multiple reaction monitoring mode, with chemometric data analysis conducted. **Results** The correlation coefficients for the 7 kinds of active ingredients within a certain mass concentration range were relatively good. The limits of detection and limits of quantitation ranged from 0.006 mg/kg to 0.030 mg/kg and 0.020 mg/kg to 0.100 mg/kg, respectively. The relative standard deviations ranged for precision, repeatability and stability were 0.95% to 5.45%. Compared to *Dendrobium officinale*, *Dendrobium devonianum* exhibited higher levels of ginsenoside, isoquercitrin, apigenin and protocatechuic acid, while showing lower levels of ginsenoside; the content of naringin and vanillic acid remained relatively consistent between the 2 kinds of species. **Conclusion** The sensitivity and stability of the method are relatively good. *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum* can be effectively discriminated by orthogonal partial least squares discriminant analysis. The research results can provide a reference for the quality evaluation of the characteristic dendrobium in Yunnan Province.

KEY WORDS: deep eutectic solvents; ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry; *Dendrobium officinale*; *Dendrobium devonianum*; active ingredient; identification

0　引　言

铁皮石斛(*Dendrobium officinale*)和紫皮石斛(*Dendrobium devonianum*)是我国重要的石斛种类，在中国很早就作为食品和中药材广泛食用，铁皮石斛现已作为药食同源物质，具有较强的生物保健功效而闻名世界。我国的云南省作为石斛的主产区，主要种植了铁皮石斛和紫皮石斛，其中的活性物质种类和含量也各不相同[1–2]。目前，中国药典只对于铁皮石斛中的多糖和甘露糖进行了含量的规定，鲜少有对紫皮石斛中的相关物质含量进行限定，这对于云南省的特色紫皮石斛资源的质量控制和产品开发带来了一定的局限[3]；同时针对《中国药典》中规定的铁皮石斛中多糖和甘露糖的测定方法较为复杂，仅将糖类物质作为铁皮石斛的评价指标较为单一，不具备系统性，有必要对于石斛中的酚酸类、黄酮类活性物质进行系统研究。

石斛中的化学成分复杂，特别是多糖含量较高，黏性较大，常常会影响其他物质的准确测定[4]，目前对于石斛中相关成分的测定方法主要包括了气相色谱法[5–6]、液相色谱法[7]、气相色谱-质谱法[8–9]和液相色谱法-质谱法[10–11]等，测定的成分主要包括了黄酮[12–13]、生物碱[14–15]、多酚[16]、氨基酸[17–18]等活性物质，而提取的溶剂通常是采用甲醇、乙腈等中等极性的有机溶剂，但由于石斛的基质复杂，单一溶剂的提取具有局限性，常常达不到最佳的提取效果，采用低共熔溶剂(deep eutectic solvents, DESs)能够有效的渗透至植物体细胞内部，提高活性物质的溶解度，实现对目标物质的高效提取，对复杂基质进行提取具有较好的应用前景[19–21]。

DESs有亲水性和疏水性两类，亲水性DESs的应用较广，但是对于弱极性化合物的提取效果较差[22]，而将疏水DESs 与其他有机溶剂混合后，可进一步扩大提取化合物的极性范围，目前对于基质复杂的石斛中的相关活性物质

的提取还鲜少见报道。因此, 针对石斛中的常见的活性化合物, 本研究选取了云南省特色的紫皮石斛和铁皮石斛, 采用 DESs 等用于评价石斛活性化合物的提取效果并进行相关的鉴别研究和质量评价, 以期为云南省的特色石斛资源的评价提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

30 个石斛样品, 其中紫皮石斛和铁皮石斛各 15 个, 分别采自云南省保山市龙陵县和文山市广南县。

柚皮素、芹菜素、异鼠李素、金丝桃苷、圣草酚、原儿茶酸、香草酸标准品(纯度大于 98%, 上海源叶生物科技有限公司); 甲醇(色谱纯, 德国默克公司); 薄荷醇、月桂醇(纯度大于 99%, 上海阿拉丁生化科技股份有限公司); 氨水(色谱纯, 美国 Fisher 公司)。

ExionLC AD 超高效液相色谱仪(美国 AB Sciex 公司); AB QTRAP 5500 三重四极杆串联质谱仪(美国 AB Sciex 公司); ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱(1 mm× 50 mm, 1.7 μm, 美国 Waters 公司); KQ-500DE 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); TDL-5000bR 台式离心机(上海安亭科学仪器厂); JD200-2 分析天平(精度 10 mg, 沈阳龙腾电子有限公司); IKA MS3 漩涡混合器(德国 IKA 公司); Milli-Q 去离子水发生器(美国 Millipore 公司); DHG-9023A 干燥箱(上海善志仪器设备有限公司)。

1.2 实验方法

1.2.1 石斛样品准备

分别将采集的石斛新鲜样品切成 2 cm 左右, 60 ℃缓慢烘干, 烘干后经高速粉碎后, 过 0.28 μm 筛后, 4 ℃ 避光保存。

1.2.2 标准溶液的配制

分别将柚皮素、芹菜素、异鼠李素、金丝桃苷、圣草酚、原儿茶酸、香草酸利用甲醇溶解后, 配成 1 mg/mL 的标准储备溶液, 再分别吸取各标准储备溶液混合后得到 100 μg/mL 的混合标准溶液, 装入棕色储液瓶中于–4 ℃下保存。

1.2.3 DESs 的制备

参照文献[23]中的方法, 选取薄荷醇和月桂醇按 1:1 摩尔比例制备得到 DESs。

1.2.4 样品前处理

准确称取 1.0 g 石斛粉末于 25 mL 离心管中, 加入按 1.2.3 制备的 DESs 5.00 mL 和 60%甲醇-水溶液 5.00 mL, 涡旋混匀后, 冰浴下 80 Hz 超声 30 min, 5000 r/min 离心 5 min, 上清液过 0.22 μm 滤膜后测定。

1.2.5 色谱与质谱条件

色谱和质谱条件参照文献[24], 采用梯度洗脱和负离子多反应监测(multiple reaction monitoring, MRM)模式进行测定, 梯度系统程序为: 流动相 A 为: 甲醇; 流动相 B 为: 0.1%氨水-水溶液; 梯度洗脱条件: 0~3.0 min, 5% A~40% A, 3.0~5.0 min, 40% A~60% A, 5.0~8.0 min, 60% A~95% A, 8.0~10.0 min, 95% A; 10.0~10.3 min, 95% A~5% A; 10.3~13.0 min, 5% A; 进样量: 1 μL。各活性化合物的检测离子对为: 柚皮素 271.0/150.9 *m*/*z*、芹菜素 268.8/116.9 *m*/*z*、异鼠李素 463.0/300.0 *m*/*z*、金丝桃苷 463.01/300.0 *m*/*z*、圣草酚 286.7/134.9 *m*/*z*、原儿茶酸 153.3/109.1 *m*/*z*、香草酸 167.0/152.0 *m*/*z*[25]。

1.3 数据处理

采用 Soft Independent Modeling of Class Analogy, Simca 14.1 软件对石斛样品中的 7 种活性成分进行正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)分析, 利用变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)值分析筛选出差异较大的特征成分, 并进行相关性分析、热图和火山图分析等。

2 结果与分析

2.1 DESs 配比的优化选择

薄荷醇和月桂醇的化合物极性不同, 因此其不同的配比肯定会对不同化合物的提取效果产生较大的影响, 实验中分别比较了不同摩尔比例的薄荷醇和月桂醇(1:9、3:7、5:5、7:3、9:1, 每个比例 3 个平行)对于石斛中 7 种活性化合物的提取效果, 由于石斛中这 7 种活性化合物的含量差异较大, 为了较好地查看不同摩尔比例的薄荷醇和月桂醇对于不同化合物的提取效果, 本研究中将不同提取比例得到的各化合物含量进行归一化处理, 即每种化合物在不同摩尔比例下的提取含量, 将含量最高的定为“1”, 其他摩尔比例下的提取含量分别与该最高含量所得的比值进行柱形图的绘制, 结果如图 1 所示, 不同比例薄荷醇和月桂醇对于 7 种活性化合物的提取效果各不相同, 当薄荷醇和月桂醇的摩尔比例为 3:7 和 5:5 时的提取效果较好, 综合比较, 选择薄荷醇和月桂醇的摩尔比例为 5:5 作为优选。

2.2 DESs 与甲醇溶液的筛选

为提高提取效率, 进一步优化了以 DESs 为主的二相溶剂, 分别比较了 DESs+60%甲醇、DESs+甲醇、DESs+水以及 DESs、60%甲醇水对于 7 种活性化合物的提取效果, 每种组合 3 个平行, 结果如图 2 所示, 随着 DESs 体系中 60%甲醇-水溶液的加入, 进一步提高了提取的效率, 但是 DESs 与纯水的混合溶液的提取效果较差, 综合比较, 最终选择 DESs+60%甲醇作为优选的 DESs 提取溶液, 在该提取条件下, 7 种活性化合物的峰形较好, 响应较高, 色谱图如图 3 所示。

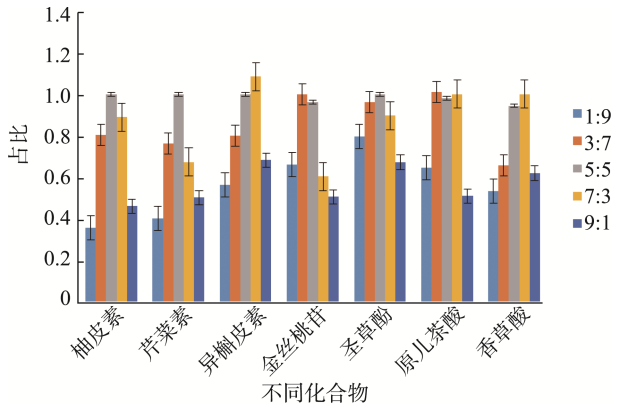


图 1　不同摩尔比的薄荷醇和月桂醇对于化合物的提取效果

Fig.1　Extraction efficiencies of menthol and lauryl alcohol at different molar ratios on compounds

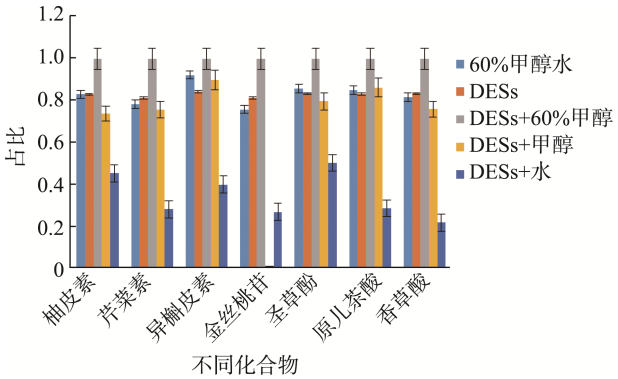


图 2　DESs 与不同溶剂组合对于化合物的提取效果

Fig.2　Extraction efficiencies of DESs combined with different solvents on compounds

2.3　线性范围、检出限、定量限、精密度、重复性和稳定性

将 7 种活性化合物利用甲醇稀释成不同的浓度，以各化合物的质量浓度为横坐标(X，μg/mL)，以对应的峰面积为纵坐标(Y)，计算线性回归方程，分别以 S/N=3 和 S/N=10 分别计算检出限和定量限。参照文献[25]中的方法验证的方法，对仪器的精密度、重复性和稳定性等进行考察。精密度试验采用同一个石斛样品提取溶液，连续进样 6 次，记录各化合物含量，并计算其相对标准偏差(relative standard deviation, RSD)值。重复性试验采用同一个石斛样品提取溶液，平行制备 6 份，并进样分析，记录各化合物含量，并计算 7 种被测成分含量的 RSD。稳定性试验采用同一个石斛样品提取溶液，在 0、2、4、8、16、24 h 时进样分析，记录不同时间下各化合物含量，并计算其 RSD 值。7 种活性化合物的方法学参数如表 1 所示，在一定质量浓度范围内的相关系数较好(r^2>0.999)，检出限和定量限的范围分别为 0.006~0.030 mg/kg 和 0.020~0.100 mg/kg，精密度、重复性和稳定性的 RSDs 范围为 0.95%~5.45%，方法的灵敏度较高，稳定性较高，满足石斛中相关活性化合物的检测要求。

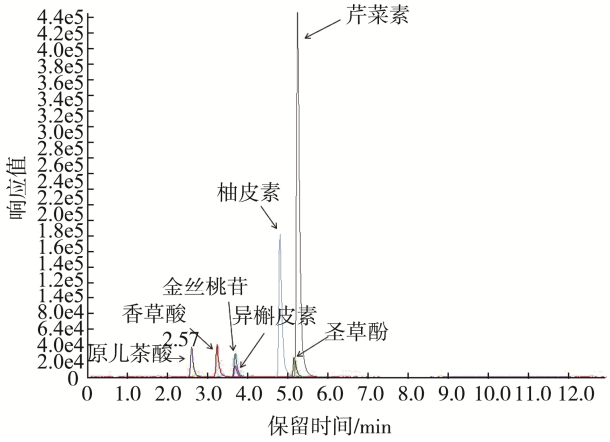


图 3　7 种活性化合物的色谱图

Fig.3　Chromatograms of 7 kinds of active compounds

2.4　云南铁皮石斛和紫皮石斛鉴别研究

2.4.1　云南铁皮石斛和紫皮石斛的溯源研究

云南的广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛都是国家地理标志保护产品，具有较好的知名度和生物保健功效。为有效地鉴别两种石斛，本研究中采用了 OPLS-DA，基于 7 种活性成分对两种石斛进行鉴别，结果如图 4 所示，两种石斛能够较好地区别开，说明了两种石斛在活性成分种类和含量等方面具有一定的差异。置换检验结果如图 5 所示，R^2Y的截距小于 0.3，Q^2Y的截距小于 0.05，表明该模型的可

表 1　7 种化合物的线性范围、相关系数、检出限、定量限、精密度、重复性和稳定性

Table 1　Linear ranges, correlation coefficients, limits of detection, limits of quantitation, precisions, repeatabilities and stabilities of 7 kinds of compounds

化合物	线性范围/(μg/mL)	相关系数(r^2)	检出限/(mg/kg)	定量限/(mg/kg)	精密度 RSDs/%	重复性 RSDs/%	稳定性 RSDs/%
圣草酚	0.008~10.000	0.9999	0.025	0.080	5.31	4.69	1.82
金丝桃苷	0.005~10.000	0.9998	0.015	0.050	1.41	1.98	1.66
异槲皮素	0.002~10.000	0.9996	0.006	0.020	1.00	1.19	0.95
柚皮素	0.002~10.000	0.9995	0.006	0.020	3.56	2.57	3.17
原儿茶酸	0.01~10.00	0.9995	0.030	0.100	3.95	2.22	1.75
香草酸	0.02~10.00	0.9993	0.060	0.200	3.79	2.17	5.45

预测性和可靠性较强。研究结果也表明，选取的 7 种活性成分具有较好的代表性，这也表明了石斛中的多酚和黄酮等化合物在不同的品种间存在较大的差异，这也为后续其他石斛品种的鉴别提供参考。

VIP 分析结果表明(图 6)，金圣草素、异槲皮素、圣草酚和芹菜素的 VIP 值大于 1，在两种石斛中的含量差异较大，可能是云南广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛的质量评价的特征化合物，还有待于进一步的研究。

2.4.2 云南铁皮石斛和紫皮石斛中活性成分的相关性分析

将铁皮石斛和紫皮石斛中 7 种活性化合物采用 Spearman 相关性分析，结果如图 7 所示，正相关关系较强

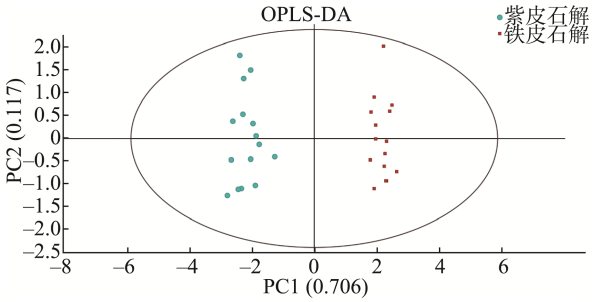


图 4 铁皮石斛和紫皮石斛的 OPLS-DA 图

Fig.4 OPLS-DA plot of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

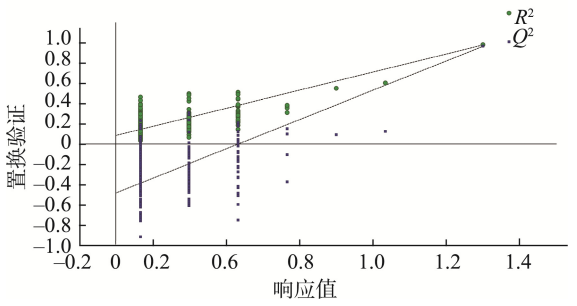


图 5 铁皮石斛和紫皮石斛的置换检验图

Fig.5 Replacement test diagram of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

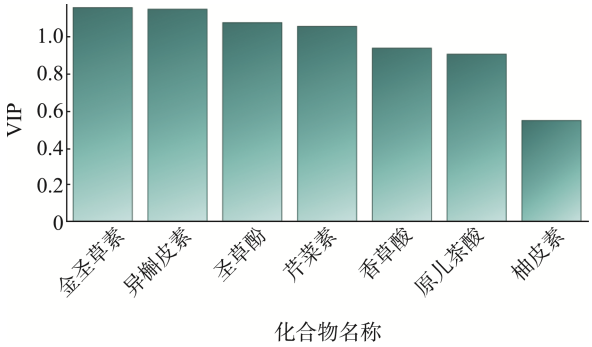


图 6 铁皮石斛和紫皮石斛的 VIP 值

Fig.6 VIP values of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

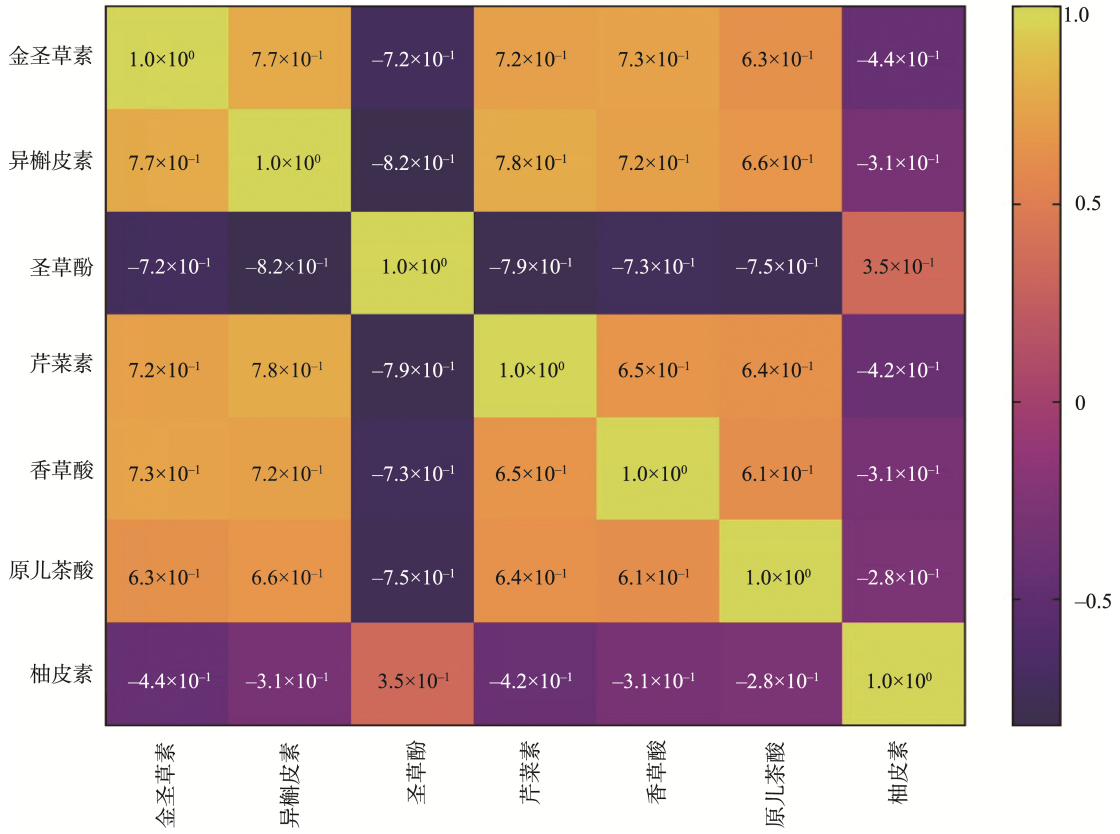


图 7 铁皮石斛和紫皮石斛的 Spearman 相关性分析

Fig.7 Spearman correlation analysis of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

的主要是金圣草素和异槲皮素、异槲皮素和芹菜素，负相关关系较强的主要是异槲皮素和圣草酚，圣草酚和芹菜素等，这些化合物都是具有黄酮 C6-C3-C6 结构，推测在石斛的生长过程中，经过系列酶的催化，异槲皮素脱去糖基后反应转化成金圣草素或芹菜素[26]，同时异槲皮素也可经加成反应和脱去糖基后转化为圣草酚[27]，而圣草酚经去饱和反应后转化成芹菜素[28]。黄酮类化合物是石斛中的主要活性化合物之一，在石斛中的含量较高且种类较多，其相关的生物转化途径还有待于进一步的验证。

2.4.3　云南铁皮石斛和紫皮石斛的热图和火山图分析

云南铁皮石斛和紫皮石斛的热图结果表明，图 8，金圣草素、异槲皮素和圣草酚在两种石斛中的分布差异较大，与 VIP 分析的结果一致；通过 7 种活性化合物，云南铁皮石斛和紫皮石斛可以具有较为明显的聚合为 2 类。

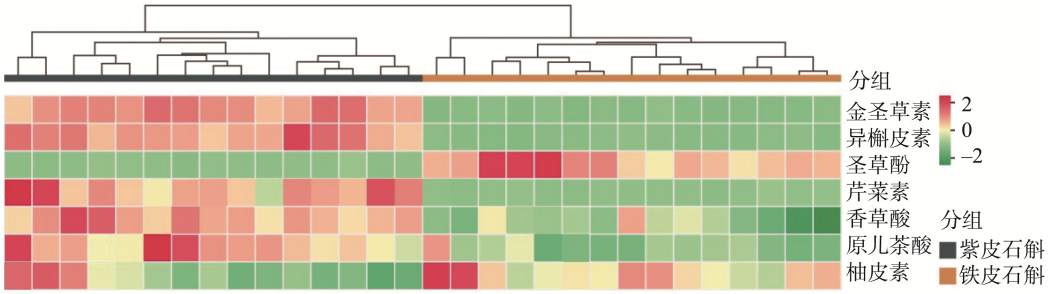


图 8　铁皮石斛和紫皮石斛的热图分析

Fig.8　Heat map analysis of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

通过图 9 的火山图分析，相对于铁皮石斛，紫皮石斛在金圣草素、异槲皮素、芹菜素和原儿茶酸的含量上调，圣草酚的含量下调，而柚皮素和香草酸的含量在两种石斛中的差异不大，结合以上 VIP 和热图分析的结果，推测圣草酚可能为云南广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛中的特征化合物，相关文献也报道了圣草酚具有抗炎、抗氧化和神经保护等生物活性[29−30]，后续可作为广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛质量评价的活性化合物之一。

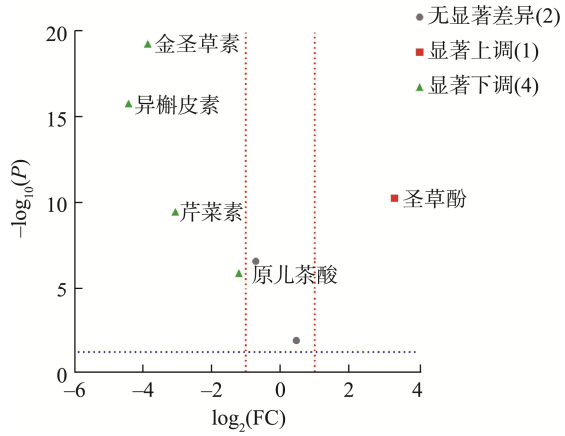


图 9　铁皮石斛和紫皮石斛的火山图

Fig.9　Volcano plot of *Dendrobium officinale* and *Dendrobium devonianum*

3　结　论

本研究优选了 1:1 摩尔比的薄荷醇和月桂醇作为 DESs，与 60%甲醇-水溶液低温超声提取石斛中的 7 种活性化合物，得到了较好的提取效率。7 种活性化合物通过超高效液相色谱-串联质谱法测定，在一定质量浓度范围内的相关系数较好，检出限和定量限的范围分别为 0.006~0.030 mg/kg 和 0.020~0.100 mg/kg，精密度、重复性和稳定性的 RSDs 范围为 0.95%~5.45%，方法的灵敏度较高，稳定性较高。本研究采用了 OPLS-DA 能够有效的将广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛进行鉴别，金圣草素、异槲皮素、圣草酚和芹菜素的 VIP 值大于 1，在两种石斛中的含量差异较大。相对于铁皮石斛，紫皮石斛在金圣草素、异槲皮素、芹菜素和原儿茶酸的含量上调，圣草酚的含量下调，而柚皮素和香草酸的含量在两种石斛中的差异不大，推测圣草酚可能为云南广南铁皮石斛和龙陵紫皮石斛中的特征化合物。

参考文献

[1] LIN T, CHEN X, DU L, *et al*. Traceability research on *Dendrobium devonianum* based on SWATHtoMRM [J]. Foods, 2023, 12(19): 3608.

[2] LIN T, CHEN XL, WANG J, *et al*. Application of time of flight mass spectrometry in the identification of *Dendrobium devonianum* paxt and *Dendrobium officinale* Kimura et Migo grown in Longling Area of Yunnan, China [J]. Separations, 2022, 9(5): 108.

[3] 国家药典委员会. 中国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.
Chinese Pharmacopoeia Commission. Pharmacopoeia of the People's Republic of China [M]. Beijing: China Medical Science and Technology Press, 2020.

[4] GUO Q, MA Q, XUE Z, *et al*. Studies on the binding characteristics of three polysaccharides with different molecular weight and flavonoids from corn silk (*Maydis stigma*) [J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 198: 581–588.

[5] WANG L, WANG C, PAN Z, *et al*. Application of pyrolysis-gas chromatography and hierarchical cluster analysis to the discrimination of

the Chinese traditional medicine *Dendrobium candidum* Wall. ex Lindl [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2011, 90(1): 13–17.

[6] 华茉莉, 杨洋, 沈志伟. 气相色谱法测定金钗石斛药材中石斛碱的含量[J]. 中药材, 2006, 29(4): 338–339.
HUA ML, YANG Y, SHEN ZW. Determination of dendrobine content in *Dendrobium nobile* by gas chromatography [J]. Journal of Chinese Medicinal Materials, 2006, 29(4): 338–339.

[7] 李墅, 王春兰, 郭顺星. 高效液相色谱法测定金钗石斛中石斛碱含量[J]. 中国药学杂志, 2009, 44(4): 252–254.
LI S, WANG CL, GUO SX. Determination of dendrobin in *Dendrobium nobile* by HPLC analysis [J]. Chinese Pharmaceutical Journal, 2009, 44(4): 252–254.

[8] PAUDEL MR, PANT B. Cytotoxic activity of crude extracts of *Dendrobium amoenum* and detection of bioactive compounds by GC-MS [J]. Botanica Orientalis: Journal of Plant Science, 2017, 11: 38–42.

[9] YANG WH, HAO JW, CHEN ND, *et al*. Development of a joint derivatization protocol for the unequivocal identification of the monosaccharide composition in four *dendrobium* polysaccharides and free monosaccharide by GC-MS [J]. Biomedical Chromatography, 2023, 37(12): e5743.

[10] NAM B, JANG HJ, HAN AR, *et al*. Chemical and biological profiles of *Dendrobium* in two different species, their hybrid, and gamma-irradiated mutant lines of the hybrid based on LC-QToF MS and cytotoxicity analysis [J]. Plants, 2021, 10(7): 1376.

[11] SHI MZ, SHI Y, JIN HF, *et al*. An efficient mixed enzymes-assisted mechanical bio-extraction of polysaccharides from *Dendrobium officinale* and determination of monosaccharides by HPLC-Q-TOF/MS [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 227: 986–1000.

[12] 普冉, 赫京生, 吴雅文, 等. 6 种石斛的化学成分对比分析与质量评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(20): 71–77.
PU R, HAO JS, WU YW, *et al*. Comparative analysis and quality evaluation of chemical constituents of 6 kinds of *Dendrobium* species [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(20): 71–77.

[13] ZHOU C, XIE Z, LEI Z, *et al*. Simultaneous identification and determination of flavonoids in *Dendrobium officinale* [J]. Chemistry Central Journal, 2018, 12(1): 40.

[14] SONG C, ZHANG Y, MANZOOR MA, *et al*. Identification of alkaloids and related intermediates of *Dendrobium officinale* by solid-phase extraction coupled with high-performance liquid chromatography tandem mass spectrometry [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 952051.

[15] 陈洁, 洪梦杰, 蒋成功, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 技术鉴定金钗石斛生物碱类成分及其活性研究[J]. 沈阳药科大学学报, 2025, 42(9): 820–828.
CHEN J, HONG MJ, JIANG CG, *et al*. Identification of alkaloid components in *Dendrobium nobile* Lindl. based on UPLC-Q-TOF-MS technique and its bioactivity analysis [J]. Journal of Shenyang Pharmaceutical University, , 2025, 42(9): 820–828.

[16] ZHU AL, HAO JW, LIU L, *et al*. Simultaneous quantification of 11 phenolic compounds and consistency evaluation in four *Dendrobium* species used as ingredients of the traditional Chinese medicine Shihu [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 771078.

[17] 乔禹, 李庆聪, 冯岩晃, 等. 云南不同来源齿瓣石斛中氨基酸营养价值评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(10): 309–317.
QIAO Y, LI QC, FENG YH, *et al*. Evaluation on the nutritional value of amino acids in *Dendrobium devonianum* Paxt. from different sources in Yunnan Province [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(10): 309–317.

[18] HAO JW, ZHU AL, CHEN ND, *et al*. Simultaneous analysis of 20 free amino acids by a single marker combined with an HPLC fingerprint evaluation of *Dendrobium huoshanense* [J]. Journal of Food Science, 2021, 86(11): 4828–4839.

[19] 秦安琪, 任育鹏, 张文森, 等. 绿色低共熔溶剂提取生物碱类化合物的研究进展[J]. 精细化工中间体, 2025, 55(1): 7–12, 27.
QIN ANQ, REN YP, ZHANG WS, *et al*. Research progress on the extraction of alkaloid compounds using green deep eutectic solvents [J]. Fine Chemical Intermediates, 2025, 55(1): 7–12, 27.

[20] 周立锦, 董哲, 杜会枝. 低共熔溶剂在中药成分提取中的研究进展[J]. 中草药, 2020, 51(1): 236–244.
ZHOU LJ, DONG Z, SHE HZ. Research progress on deep eutectic solvents in extraction of Chinese materia medica ingredients [J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs, 2020, 51(1): 236–244.

[21] FERREIRA C, SARRAGUÇA M. A comprehensive review on deep eutectic solvents and its use to extract bioactive compounds of pharmaceutical interest [J]. Pharmaceuticals, 2024, 17(1): 124.

[22] 张仙, 胡西洲, 郑丹, 等. 基于疏水性低共熔溶剂分散液液微萃取气相色谱-串联质谱法测定水中拟除虫菊酯农药残留[J]. 分析试验室, 2025, 44(6): 881–887.
ZHANG X, HU XZ, ZHENG D, *et al*. Determination of pyrethroid pesticide residuesin water by hydrophobic deep eutectic solvent baseddispersive liquid-liquid microextraction and gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2025, 44(6): 881–887.

[23] HUANG A, DENG W, LI X, *et al*. Long-chain alkanol-alkyl carboxylic acid-based low-viscosity hydrophobic deep eutectic solvents for one-pot extraction of anthraquinones from *Rhei radix* et Rhizoma [J]. Journal of Pharmaceutical Analysis, 2022, 12(1): 87–95.

[24] 林涛, 田恒, 唐艳梅, 等. 云南龙陵地区产紫皮石斛和铁皮石斛中 9 种功能活性物质测定及鉴别研究[J]. 现代食品, 2023, 29(17): 207–215.
LIN T, TIAN H, TANG YM, *et al*. Study on the determination of 9 functional active substances and identification the *Dendrobium devonianum* and *Dendrobium officinale* produced in Longling area of Yunnan Province [J]. Modern Food, 2023, 29(17): 207–215.

[25] BETZ JM, BROWN PN, ROMAN MC. Accuracy, precision, and reliability of chemical measurements in natural products research [J]. Fitoterapia, 2011, 82(1): 44–52.

[26] VANDER-AUWERA A, PEETERS L, FOUBERT K, *et al*. *In vitro* biotransformation and anti-inflammatory activity of constituents and metabolites of *Filipendula ulmaria* [J]. Pharmaceutics, 2023, 15(4): 1291.

[27] JOUBERT E, GELDERBLOM WCA, DE-BEER D. Phenolic contribution of South African herbal teas to a healthy diet [J]. Natural Product Communications, 2009, 4(5): 701–718.

[28] NAGAYOSHI H, MURAYAMA N, KIM V, *et al*. Oxidation of naringenin, apigenin, and genistein by human family 1 cytochrome P450 enzymes and comparison of interaction of apigenin with human P450 1B1.1 and scutellaria P450 82D.1 [J]. Chemical Research in Toxicology, 2023, 36(11): 1778–1788.

[29] YIN H, LI Y, FENG Y, *et al*. The extraction, biosynthesis, health-promoting and therapeutic properties of natural flavanone eriodictyol [J]. Nutrients, 2024, 16(23): 4237.

[30] GUO S, XING N, XIANG G, *et al*. Eriodictyol: A review of its pharmacological activities and molecular mechanisms related to ischemic stroke [J]. Food & Function, 2023, 14(4): 1851–1868.

(责任编辑: 韩晓红 安香玉)