

1138.

[13] 杨 亮, 曾 真, 高永跃, 等. 柴葛畅源汤预防新型冠状病毒肺炎机制的网络药理学探讨[J]. 贵州中医药大学学报, 2020, 42(3): 22-25.

[14] 黄冬芳, 韦金玉, 梁 洁, 等. 柴胡质量标志物的预测分析[J]. 中华中医药学刊, 2021, 39(10): 126-132.

[15] 朱卫丰, 邹 斌, 管咏梅, 等. 葛根质量标志物 (Q-marker) 探讨分析[J]. 中华中医药学刊, 2019, 37(4): 775-777.

[16] Shen M R, He Y, Shi S M. Development of chromatographic technologies for the quality control of Traditional Chinese Medicine in the Chinese Pharmacopoeia[J]. *J Pharm Anal*, 2021, 11(2): 155-162.

[17] Ma J Y, Li K L, Shi S L, *et al.* The application of UHPLC-HRMS for quality control of traditional Chinese medicine[J]. *Front Pharmacol*, 2022, 13: 922488.

[18] Wang Y, Zhang L, Gu S, *et al.* The current application of LC-MS/MS in pharmacokinetics of traditional Chinese medicines (recent three years): a systematic review[J]. *Curr Drug Metab*, 2020, 21(12): 969-978.

[19] Beccaria M, Cabooter D. Current developments in LC-MS for pharmaceutical analysis[J]. *Analyst*, 2020, 145 (4): 1129-1157.

[20] 姜锡娟. 基于液质联用与质谱库检索技术的前期胡化学成分分析[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2013.

[21] 朱国元, 陈光英, 李庆洋, 等. HPLC/MS/MS 技术在中药白花前胡成分鉴定中的应用[J]. 中国天然药物, 2004, 2(5): 51-55.

[22] 张丹丹, 欧阳 辉. 皂苷类成分液质联用定性定量测定技术研究进展[J]. 药学进展, 2017, 41(8): 608-613.

[23] 王俊芳, 任晓亮, 王 萌. 组分中药稳定性研究进展[J]. 中草药, 2022, 53(14): 4545-4553.

[24] 胡双飞, 张 奥, 王永刚, 等. 实时直接分析质谱法在中药质量研究中的应用进展[J]. 中草药, 2023, 54 (13): 4377-4384.

基于含量测定和多元统计分析评价不同寄主肉苁蓉质量

赵法法¹, 郭晔红^{1*}, 高培文¹, 贾存勤²

(1. 甘肃农业大学农学院, 干旱生境作物学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃汇勤生物科技有限公司, 甘肃 白银 730600)

摘要: **目的** 评价四翅滨藜、梭梭寄主肉苁蓉质量。**方法** 测定营养物质及化学成分 (总多糖、淀粉、脂肪、蛋白质、总多酚、总黄酮、维生素 C、原花青素、氨基酸、无机元素、脂肪酸)、苯乙醇苷 (2'-乙酰毛蕊花糖苷、管花苷 A、管花苷 B、红景天苷、毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷 A、松果菊苷、异毛蕊花糖苷、益母草苷、槲子苷) 的含量, 再检测差异代谢物, 进行主成分分析、正交偏最小二乘法判别分析、聚类分析。**结果** 四翅滨藜-肉苁蓉中总多糖、淀粉、总黄酮、维生素 C 含量高于梭梭-肉苁蓉中, 而脂肪、蛋白质、总多酚、原花青素含量更低。相较于梭梭-肉苁蓉, 四翅滨藜-肉苁蓉含有更丰富的氨基酸、无机元素、脂肪酸、苯乙醇苷。2 种寄主药材区分度良好, 共有 89 种差异代谢物, 并且大部分在四翅滨藜寄主时积累量更高。共识别出 12 条差异代谢物匹配度较高的通路, 其中戊糖和葡萄糖醛酸的相互转化最显著, 所含的差异代谢物最多。**结论** 2 种寄主肉苁蓉中营养物质、化学成分、苯乙醇苷含量具有显著差异, 可为该药材进一步寄主选择及质量控制研究提供重要依据。

关键词: 肉苁蓉; 四翅滨藜; 梭梭; 寄主; 质量评价; 含量测定; 多元统计分析

中图分类号: R283 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1528(2025)08-2496-11

doi: 10. 3969/j. issn. 1001-1528. 2025. 08. 003

收稿日期: 2024-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31860349); 甘肃省科技计划项目 (18YF1NA072)

作者简介: 赵法法 (1999—), 女, 硕士, 从事药用植物规范化栽培研究。Tel: 13309393350, E-mail: 2649155080@qq.com

* 通信作者: 郭晔红 (1968—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事药用植物资源利用研究。Tel: 13519652912, E-mail: guoyh@gsau. edu. cn

Quality evaluation of *Cistanche deserticola* from different hosts based on content determination and multivariate statistical analysis

ZHAO Fa-fa¹, GUO Ye-hong^{1*}, GAO Pei-wen¹, JIA Cun-qin²
(1. State Key Laboratory for Aridland Crop Science; College of Agriculture, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730000, China; 2. Gansu Huiqin Biological Technology Co., Ltd., Baiyin 730600, China)

KEY WORDS: *Cistanche deserticola* Y. C. Ma; *Atriplex canescens* (Pursh) Nutt.; *Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge; hosts; quality evaluation; content determination; multivariate statistical analysis

肉苁蓉为列当科植物肉苁蓉 *Cistanche deserticola* Y. C. Ma 或管花肉苁蓉 *Cistanche tubulosa* (Schenk) Wight 的干燥带鳞叶肉质茎，始见于《神农本草经》，列为上品^[1-2]，具有补肾益精、润肠通便功效^[3-4]，含有丰富的化学成分，包括苯乙醇苷类、环烯醚萜类、糖类、氨基酸类等。其中，苯乙醇苷类为肉苁蓉中最主要、报道最多的活性物质^[5-6]。

肉苁蓉传统寄主梭梭存在年生长量少、造林成活率低等问题^[7]，近年来在四翅滨藜的根部成功接种，改变了它是专一性寄生植物的观念^[8]。研究表明，四翅滨藜在高盐碱地的造林成活率明显高于梭梭，而且年生长量大，肉苁蓉产量更高^[9]。另外，肉苁蓉因其特殊的生长环境、营养条件等因素，化学成分含量在不同寄主中存在一定差异^[10]，但目前关于四翅滨藜-肉苁蓉质量评价的文献较少，并且方法简单，测定指标有限，难以科学评价药材质量。因此，本实验对新寄主四翅滨藜是否能代替传统寄主梭梭及所寄生肉苁蓉的质量进行考察，以期为该药材品质的系统评价和资源的可持续性利用提供科学依据。

1 材料

1.1 仪器 UV2450 紫外分光光度计（北京普析通用仪器有限责任公司）；LA8080 氨基酸分析仪（日本 Hitachi 公司）；电感耦合等离子体质谱仪（美国 Thermo Fisher 公司）；DESKTOP-T2G6S78/6460 超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱仪、Agilent 7890B/5977A 气相色谱-质谱联用仪（美国 Agilent 公司）；FA2104B 电子天平（万分之一，上海越平科学仪器有限公司）；F-060SD 超声波清洗机（深圳福洋科技集团有限公司）；Scientz-10N 冷冻干燥机（宁波新芝生物科技股份有限公司）。

1.2 试剂 氯仿、甲醇、正己烷、氨基酸混标

（批号 2251791）、脂肪酸混标（批号 2104553）（上海安谱实验科技股份有限公司）；无机元素混标（批号 BWT30121-100-100）（坛墨质检标准物质中心）。2'-乙酰毛蕊花糖苷、管花苷 A、管花苷 B、红景天苷、毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷 A、松果菊苷、异毛蕊花糖苷、益母草苷、栀子苷对照品（批号 21053102、23031605、20120903、22051208、21102103、21060302、23041703、23022508、23082905、21092708）（成都普菲德生物技术有限公司）。吡啶 [批号 P141169-1L，阿拉丁试剂（上海）有限公司]；琥珀酸-*d*₄（293075-1G，美国 Sigma 公司）。水（杭州娃哈哈集团有限公司）。

1.3 药材 肉苁蓉采自甘肃、内蒙古和新疆，同时采取相同植龄长势良好的四翅滨藜-肉苁蓉、梭梭-肉苁蓉栽培品，洗净泥沙，干燥，粉碎，过筛，其中编号 A1~A6、H1~H6 者为同一产地 2 种寄主肉苁蓉中生物量一致的鲜品，纯水洗净，将各部位混匀后液氮冷冻，保存于-80℃冰箱中，经甘肃农业大学农学院郭晔红教授鉴定为列当科植物肉苁蓉 *Cistanche deserticola* Y. C. Ma 带鳞叶的肉质茎，具体见表 1。

2 方法

2.1 营养物质、化学成分含量测定 参照管彦辉^[11]、刘海民等^[12]报道的方法测定多糖、可溶性蛋白、总酚、黄酮、原花青素含量，GB 5009.9-2023 标准测定淀粉含量，GB 5009.6-2016 标准测定粗脂肪含量，2, 4-二硝基苯肼比色法测定维生素 C 含量，参照孔祥河等^[13]报道的方法测定氨基酸含量，参考徐勤科等^[14]报道的方法测定无机元素含量，参照 Li 等^[15]报道的方法测定脂肪酸含量。

2.2 苯乙醇苷含量测定 参照 Zhao 等^[16]报道的 UPLC-QQQ-MS/MS 法，并作进一步优化。

表 1 肉苁蓉信息
Tab. 1 Information of *C. deserticola*

编号	采集地	寄主	采收时间	批数/批
S1	甘肃省白银市景泰县	四翅滨藜	2024 年 3 月	3
S2	内蒙古巴彦淖尔市磴口县	四翅滨藜	2024 年 3 月	3
S3	新疆阿克苏地区沙雅县	四翅滨藜	2024 年 3 月	3
S4	甘肃省白银市景泰县	梭梭	2024 年 3 月	3
S5	内蒙古巴彦淖尔市磴口县	梭梭	2024 年 3 月	3
S6	新疆阿克苏地区沙雅县	梭梭	2024 年 3 月	3
A1~A6	甘肃省白银市景泰县	四翅滨藜	2024 年 3 月	1
H1~H6	甘肃省白银市景泰县	梭梭	2024 年 3 月	1

2.2.1 色谱条件 Agilent Eclipse Plus C₁₈ 色谱柱 (2.1 mm×100 mm, 1.8 μm); 流动相 0.1% 甲酸 (A) -乙腈 (B), 梯度洗脱 (0~1.5 min, 10%~20% B; 1.5~3 min, 20%~40% B; 3~4 min, 40%~70% B; 4~4.5 min, 70%~90% B; 4.5~5.6 min, 90%~10% B; 5.6~7 min, 10% B); 体积流量 0.2 mL/min; 柱温 35 ℃; 进样量 2.0 μL。

2.2.2 质谱条件 负离子扫描; 多反应监测 (MRM) 模式; 离子源温度 350 ℃; 雾化气、干燥气、碰撞气 (氮气) 35 psi (1 psi=6.895 kPa)。

2.2.3 对照品溶液制备 精密称取 2'-乙酰毛蕊花糖苷、管花苷 A、管花苷 B、红景天苷、毛蕊花糖苷、肉苁蓉苷 A、松果菊苷、异毛蕊花糖苷、益母草苷、槲子苷对照品各 2.00 mg, 50% 甲醇制成 0.20 mg/mL 贮备液, 50% 甲醇定容, 即得 (各苯乙醇苷质量浓度均为 100 μg/mL)。

2.2.4 供试品溶液制备 精密称取药材粉末 0.50 g, 加入 50% 甲醇至 50 mL, 密塞, 摇匀, 称定质量, 静置 1 h, 超声 (功率 300 W, 频率 40 kHz) 提取 30 min, 50% 甲醇补足减失的质量, 静置, 取上清液, 0.22 μm 微孔滤膜过滤, 取续滤液, 即得。

2.3 代谢分析 采用 GC-MS 法。

2.3.1 样品前处理 将各样本转移至 50 mL 离心管中, 冻干后研磨成粉, 准确称取 30 mg, 置于 1.5 mL 离心管中, 加入 2 颗小钢珠、600 μL 50% 甲醇 (含 4 μg/mL 混合内标), 在 -40 ℃ 冰箱中预冷 2 min 后研磨 (60 Hz) 2 min, 冰水浴超声提取 30 min, 加入 150 μL 氯仿涡旋振荡 2 min, 冰水浴超声提取 30 min, 在 -40 ℃ 下静置 30 min, 4 ℃、12 000 r/min 离心 10 min, 取 30 μL 上清液, 装入玻璃衍生小瓶中, 离心浓缩, 干燥器挥干, 加入 80 μL 甲氧胺盐酸盐吡啶溶液 (15 mg/mL), 置于 37 ℃ 振荡培养箱中培养 60 min 进行肟化反应, 取出, 加入 50 μL BSTFA 衍生化试剂、20 μL 正己

烷, 再加入 10 种内标溶液各 10 μL, 在 70 ℃ 下反应 60 min, 取出, 室温静置 30 min。

2.3.2 分析条件

2.3.2.1 色谱 DB-5MS 毛细管柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm); 载气高纯氦气 (纯度不小于 99.999%); 体积流量 1.0 mL/min; 进样口温度 260 ℃; 进样量 1 μL; 程序升温 (初始 60 ℃, 保持 0.5 min, 以 8 ℃/min 升至 125 ℃, 8 ℃/min 升至 210 ℃, 15 ℃/min 升至 270 ℃, 20 ℃/min 升至 305 ℃, 保持 5 min)。

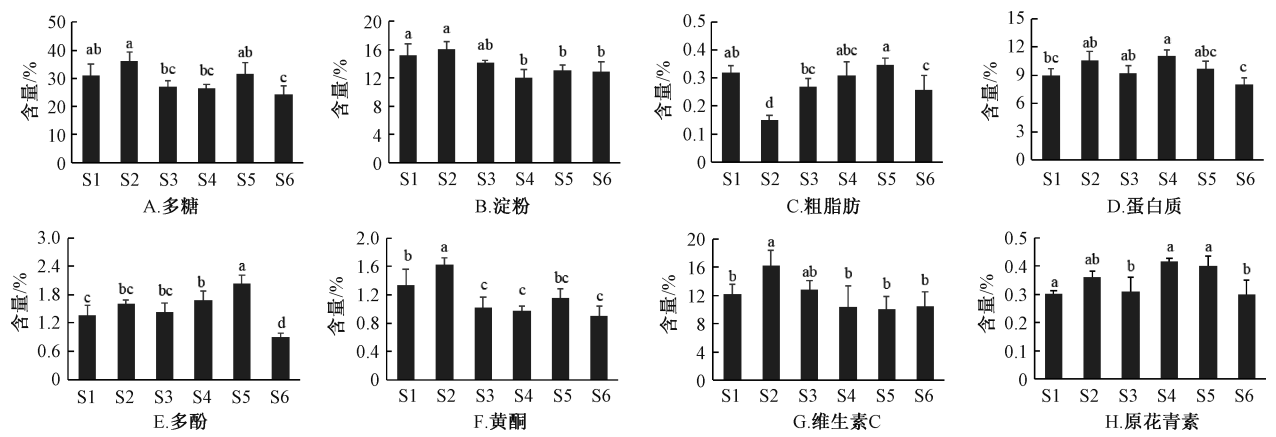
2.3.2.2 质谱条件 电子轰击离子源 (EI), 温度 230 ℃; 四极杆温度 150 ℃; 电子能量 70 eV; 全扫描模式 (SCAN), 质量扫描范围 *m/z* 50~500。

2.4 数据分析 采用 Microsoft Excel 2019 软件进行数据统计和作图, SPSS 26.0 软件进行分析。将 GC-MS 数据导入 Excel 软件中进行整理, 其矩阵导入 SIMCA-P 软件中进行主成分分析和多元回归偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA), 选择 OPLS-DA 模型投影中 VIP 值>1、*P*<0.05 的阈值筛选差异代谢物。再采用 KEGG 数据库 (<http://www.kegg.jp/kegg/pathway.html>) 对代谢途径进行富集和筛选, SIMCA-P 软件和欧易云在线绘图。

3 结果

3.1 营养物质含量 图 1 显示, 四翅滨藜寄主药材中总多糖、淀粉、总黄酮、维生素 C 含量均高于梭梭寄主药材中, 但脂肪、蛋白质、总多酚、原花青素含量更低, 并且内蒙古产 2 种寄主药材中营养物质总含量最高。

表 2 显示, 2 种寄主药材中所有氨基酸均被检出, 其中 Cys、Met、His、Pro 平均含量无显著差异 (*P*>0.05), 除 Glu 外其余氨基酸平均含量均在四翅滨藜寄主药材中更高; 滋味氨基酸中甜味含量最高, 苦味次之; 内蒙古产 2 种寄主药材中氨基酸含量最高。



注：同组不同字母表示差异有统计学意义（ $P<0.05$ ）。

图 1 肉苁蓉中各营养物质含量比较（ $\bar{x}\pm s$ ， $n=3$ ）

Fig. 1 Comparison of various nutrient substance contents in *C. deserticola* ($\bar{x}\pm s$ ， $n=3$)

表 2 肉苁蓉中各氨基酸含量比较（%， $\bar{x}\pm s$ ， $n=3$ ）

Tab. 2 Comparison of various amino acid contents in *C. deserticola*（%， $\bar{x}\pm s$ ， $n=3$ ）

成分	S1	S2	S3	S4	S5	S6
天冬氨酸(Asp)	0.97±0.03 ^b	1.09±0.01 ^a	0.93±0.01 ^c	0.82±0.00 ^d	0.94±0.01 ^c	0.72±0.01 ^e
苏氨酸(Thr)	0.52±0.01 ^a	0.54±0.03 ^a	0.35±0.01 ^c	0.37±0.01 ^c	0.48±0.03 ^b	0.21±0.00 ^d
丝氨酸(Ser)	0.37±0.01 ^b	0.43±0.00 ^a	0.38±0.01 ^b	0.22±0.01 ^d	0.28±0.01 ^c	0.16±0.02 ^e
谷氨酸(Glu)	0.98±0.02 ^c	1.11±0.01 ^a	1.02±0.02 ^b	0.91±0.02 ^d	1.02±0.03 ^b	0.34±0.01 ^e
甘氨酸(Gly)	0.28±0.01 ^e	0.49±0.01 ^a	0.38±0.01 ^b	0.32±0.01 ^d	0.35±0.02 ^c	0.13±0.00 ^f
丙氨酸(Ala)	0.41±0.00 ^b	0.53±0.01 ^a	0.32±0.01 ^d	0.33±0.01 ^d	0.38±0.01 ^c	0.20±0.01 ^e
半胱氨酸(Cys)	0.38±0.01 ^b	0.44±0.01 ^a	0.30±0.01 ^d	0.31±0.01 ^{cd}	0.33±0.00 ^c	0.18±0.02 ^e
缬氨酸(Val)	0.60±0.02 ^b	0.67±0.02 ^a	0.48±0.01 ^d	0.47±0.03 ^d	0.52±0.03 ^c	0.36±0.01 ^e
甲硫氨酸(Met)	0.23±0.01 ^e	0.41±0.01 ^a	0.37±0.01 ^b	0.31±0.00 ^d	0.35±0.01 ^c	0.20±0.01 ^f
异亮氨酸(Ile)	0.35±0.01 ^b	0.41±0.01 ^a	0.34±0.02 ^{bc}	0.32±0.01 ^c	0.33±0.01 ^{bc}	0.22±0.01 ^d
亮氨酸(Leu)	0.53±0.01 ^b	0.60±0.05 ^a	0.49±0.03 ^{bc}	0.46±0.03 ^c	0.54±0.05 ^{ab}	0.35±0.01 ^d
酪氨酸(Tyr)	0.35±0.01 ^b	0.39±0.01 ^a	0.36±0.02 ^b	0.31±0.02 ^c	0.34±0.01 ^b	0.17±0.01 ^d
苯丙氨酸(Phe)	0.44±0.01 ^b	0.51±0.01 ^a	0.39±0.01 ^c	0.40±0.04 ^c	0.40±0.02 ^c	0.32±0.01 ^d
赖氨酸(Lys)	0.46±0.04 ^b	0.52±0.01 ^a	0.46±0.03 ^b	0.44±0.01 ^b	0.46±0.02 ^b	0.36±0.00 ^c
组氨酸(His)	0.24±0.02 ^b	0.29±0.03 ^a	0.23±0.01 ^b	0.26±0.02 ^{ab}	0.25±0.01 ^b	0.17±0.01 ^c
精氨酸(Arg)	0.47±0.04 ^b	0.60±0.05 ^a	0.47±0.04 ^b	0.45±0.01 ^b	0.43±0.01 ^b	0.28±0.03 ^c
脯氨酸(Pro)	0.29±0.03 ^c	0.35±0.01 ^a	0.30±0.01 ^{bc}	0.28±0.01 ^c	0.32±0.01 ^b	0.14±0.01 ^d
总氨基酸	7.87±0.27 ^b	9.38±0.30 ^a	7.57±0.85 ^{bc}	6.98±0.23 ^c	7.72±0.48 ^{bc}	4.52±0.16 ^d
必需氨基酸	3.37±0.05 ^b	3.95±0.14 ^a	3.12±0.05 ^c	3.03±0.10 ^c	3.33±0.13 ^b	2.20±0.07 ^d
非必需氨基酸	4.03±0.08 ^b	4.83±0.11 ^a	3.99±0.10 ^b	3.50±0.07 ^c	3.96±0.06 ^b	2.04±0.05 ^d
酸味氨基酸	2.19±0.03 ^b	2.49±0.05 ^a	2.18±0.04 ^b	1.99±0.03 ^c	2.21±0.03 ^b	1.23±0.04 ^d
甜味氨基酸	1.87±0.03 ^b	2.34±0.04 ^a	1.73±0.02 ^d	1.52±0.03 ^c	1.81±0.05 ^c	0.84±0.02 ^f
苦味氨基酸	3.21±0.09 ^b	3.88±0.10 ^a	3.14±0.07 ^b	2.98±0.06 ^c	3.16±0.10 ^b	2.08±0.04 ^d
鲜味氨基酸	2.41±0.04 ^b	2.72±0.04 ^a	2.41±0.04 ^b	2.17±0.02 ^c	2.42±0.04 ^b	1.42±0.03 ^d
药用氨基酸	5.06±0.11 ^b	6.13±0.08 ^a	5.22±0.17 ^b	4.74±0.09 ^c	5.16±0.07 ^b	3.10±0.12 ^d

注：同行不同字母表示差异有统计学意义（ $P<0.05$ ）。

表 3 显示，2 种寄主药材所有无机元素均被检出，其中 Mg、Ca、K 等植物必需元素含量普遍高于其他元素含量；不同产地四翅滨藜寄主药材中 Mg 等 18 种无机元素含量均高于梭梭寄主药材中，但 Zn 等其他 7 种无机元素含量更低。另外，2 种寄主药材中 Pb 含量≤5 mg/kg，Cr 含量≤1 mg/kg，As 含量≤2 mg/kg，Cu 含量≤20 mg/kg，均符合

2020 年版《中国药典》中药材及饮片检查项下重金属及有害元素规定。

以对照品质量浓度为横坐标（ X ），峰面积为纵坐标（ Y ）进行回归，结果见表 4，可知均在 0~45 mg/L 范围内线性关系良好。另外，37 种脂肪酸在 2 种寄主药材中均鉴定出 31 种，其中十五烷酸等 4 种脂肪酸的平均含量无显著差异（ $P>0.05$ ）；

丁酸等 15 种脂肪酸的平均含量在四翅滨藜寄主药材中更高，其余 16 种的均在梭梭寄主药材中更高；四翅滨藜寄主药材中总脂肪酸平均含量高于梭梭寄主药材中。

表 3 肉苁蓉中各无机元素含量比较 ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

Tab. 3 Comparison of various inorganic element contents in *C. deserticola* ($\bar{x}\pm s$, $n=3$)

无机元素	S1	S2	S3	S4	S5	S6
Mg	1 581.96±233.71 ^c	5 106.70±714.36 ^b	8 231.52±645.54 ^a	8 578.49±200.15 ^a	3 598.87±1 521.07 ^b	3 664.15±1 389.40 ^b
Ca	287.93±163.06 ^c	1 020.40±297.61 ^{ab}	1 244.67±189.41 ^a	1 314.42±221.30 ^a	682.40±171.05 ^{bc}	585.83±201.06 ^c
K	14 021.32±1 228.71 ^{ab}	19 523.45±2 905.24 ^a	16 804.44±3 850.70 ^{ab}	12 766.80±4 001.59 ^b	13 823.15±1 986.21 ^{ab}	14 427.63±2 680.93 ^{ab}
Na	264.91±108.08 ^d	1 263.50±241.71 ^b	1 177.30±113.96 ^{bc}	1 774.87±267.69 ^a	757.39±100.88 ^c	1 363.39±425.90 ^{ab}
Al	371.53±41.15 ^{bc}	284.43±48.52 ^{cd}	200.33±78.83 ^d	493.62±89.07 ^b	761.28±109.41 ^a	162.11±15.11 ^d
Fe	456.86±33.36 ^{bc}	969.32±325.04 ^a	343.04±88.81 ^{bc}	406.32±150.04 ^{bc}	633.72±208.91 ^b	279.28±72.75 ^c
Zn	34.21±4.83 ^b	38.71±7.76 ^b	42.41±11.25 ^{ab}	49.77±9.48 ^{ab}	42.04±11.30 ^{ab}	59.86±13.26 ^a
Mn	2.32±0.29 ^c	4.96±1.13 ^{bc}	6.55±0.69 ^b	17.54±4.47 ^a	3.90±1.09 ^{bc}	2.39±0.44 ^c
B	7.44±2.17 ^{bc}	7.41±1.46 ^{bc}	8.03±1.71 ^b	3.83±0.81 ^c	11.74±2.84 ^a	9.75±2.30 ^{ab}
Cu	2.11±0.14 ^b	1.71±0.19 ^{bc}	1.33±0.11 ^c	2.78±0.21 ^a	3.16±0.19 ^a	3.15±0.40 ^a
Ni	1.52±0.09 ^a	0.85±0.04 ^c	0.38±0.04 ^d	1.32±0.15 ^b	0.74±0.07 ^c	0.33±0.02 ^d
V *	55.43±10.25 ^b	137.36±27.63 ^a	28.91±7.22 ^b	60.87±7.09 ^b	113.44±31.01 ^a	29.60±6.05 ^b
Cr	0.76±0.14 ^a	0.12±0.04 ^b	0.62±0.09 ^a	0.64±0.16 ^a	0.81±0.17 ^a	0.32±0.10 ^b
Tl *	2.55±0.29 ^b	1.68±0.46 ^b	8.69±3.04 ^a	0.64±0.10 ^b	1.00±0.12 ^b	2.68±0.61 ^b
Co *	64.62±10.40 ^a	60.93±12.64 ^a	17.33±3.08 ^b	26.30±6.62 ^{bc}	36.41±5.23 ^b	17.36±3.71 ^c
Mo	0.05±0.01 ^{cd}	0.07±0.02 ^{bc}	0.13±0.02 ^a	0.04±0.00 ^d	0.05±0.01 ^{cd}	0.08±0.02 ^b
Sn *	17.13±3.27 ^b	4.96±1.05 ^d	4.01±0.60 ^d	11.03±2.69 ^c	6.47±1.44 ^{cd}	26.63±5.69 ^a
As *	8.12±2.07 ^b	27.32±6.40 ^a	7.60±1.65 ^b	13.32±4.00 ^b	21.90±4.55 ^a	12.16±2.70 ^b
Se *	12.27±2.33 ^c	94.68±19.94 ^a	26.39±2.54 ^c	14.34±2.05 ^c	55.60±12.84 ^b	8.35±1.60 ^c
Cd *	14.17±3.17 ^a	6.25±1.93 ^b	8.22±2.75 ^b	4.57±1.70 ^b	4.25±0.29 ^b	4.32±1.26 ^b
Sb *	9.29±2.67 ^b	0.96±0.22 ^c	23.34±5.74 ^a	0.54±0.10 ^c	3.53±0.77 ^c	0.35±0.07 ^c
Ba	0.21±0.09 ^b	0.61±0.20 ^a	0.22±0.06 ^b	0.21±0.05 ^b	0.68±0.14 ^a	0.21±0.06 ^b
Ti	1.11±0.45 ^b	2.95±0.48 ^a	1.59±0.72 ^b	2.16±0.67 ^{ab}	2.19±0.90 ^{ab}	1.20±0.21 ^b
Pb *	190.99±29.74 ^a	27.48±4.18 ^b	5.41±1.63 ^{bc}	15.72±3.83 ^{bc}	28.49±7.50 ^b	2.06±0.35 ^c
Sr	0.81±0.24 ^c	5.31±1.55 ^{ab}	8.96±3.92 ^a	2.81±1.07 ^{bc}	4.88±2.05 ^b	4.57±1.88 ^{bc}

注：同行不同字母表示差异有统计学意义 ($P<0.05$)。无*的无机元素含量单位为 mg/kg，有*的为 μg/kg。

3.2 苯乙醇苷含量

3.2.1 方法学考察

3.2.1.1 线性关系考察 取对照品溶液适量，甲醇制成系列质量浓度，在“2.2.1”“2.2.2”项条件下进样测定。以对照品峰面积（Y）对其质量浓度（X）进行回归，结果见表 5，可知各苯乙醇苷在各自范围内线性关系良好。

3.2.1.2 精密度试验 精密吸取对照品溶液适量，在“2.2.1”“2.2.2”项条件下进样测定 6 次，测得 S1~S6 中苯乙醇苷峰面积 RSD 分别为 0.47%、1.16%、0.80%、0.17%、1.29%、1.32%，表明仪器精密度良好。

3.2.1.3 重复性试验 称取药材粉末（S2）6 份，每份 0.100 0 g，按“2.2.4”项下方法制备供试品溶液，在“2.2.1”“2.2.2”项条件下进样测定，测得苯乙醇苷峰面积 RSD 分别为 0.71%、0.97%、1.02%、0.52%、1.75%、1.06%，表明方法重复性良好。

3.2.1.4 稳定性试验 精密吸取供试品溶液 2500

（S2）适量，于 0、2、4、8、12、24 h 在“2.2.1”“2.2.2”项条件下进样测定，测得苯乙醇苷峰面积 RSD 分别为 1.46%、1.26%、0.65%、1.33%、1.14%、1.53%，表明溶液在 24 h 内稳定性良好。

3.2.1.5 加样回收率试验 称取药材粉末（S2）6 份，每份 0.100 0 g，按 100% 水平加入对照品，按“2.2.4”项下方法平行制备 3 份供试品溶液，在“2.2.1”“2.2.2”项条件下进样测定，计算回收率。结果，苯乙醇苷平均加样回收率分别为 95.81%、96.66%、100.41%、94.61%、99.04%、102.71%，RSD 分别为 1.24%、1.66%、2.08%、3.39%、1.77%、2.62%。

3.2.2 样品含量测定 2020 年版《中国药典》规定，肉苁蓉中松果菊苷、毛蕊花糖苷总含量应不低于 0.3%，而本实验所得结果均远高于该规定。表 6 显示，2 种寄主药材中各苯乙醇苷含量均有显著性差异 ($P<0.05$)，内蒙古产者中其总含量最高；四翅滨藜寄主药材中苯乙醇苷总含量高于梭梭寄主药材中。

表 4 肉苁蓉中各脂肪酸含量比较 (%)

Tab. 4 Comparison of various fatty acid contents in *C. deserticola* (%)

脂肪酸	回归方程	R^2	S1	S2	S3	S4	S5	S6
丁酸 C4 : 0	$Y=0.014\ 6X+0.003\ 1$	0.999\ 7	1.07	1.35	0.94	1.05	1.07	1.05
己酸 C6 : 0	$Y=0.017\ 9X+0.002\ 1$	0.999\ 4	0.45	0.63	0.46	0.38	0.61	0.51
辛酸 C8 : 0	$Y=0.019\ 7X+0.005\ 1$	0.999\ 8	0.05	0.07	0.07	0.06	0.07	0.07
癸酸 C10 : 0	$Y=0.021\ 0X+0.005\ 6$	0.999\ 8	0.59	0.56	0.55	0.46	0.58	0.59
十一烷酸 C11 : 0	$Y=0.010\ 3X+0.002\ 2$	0.999\ 8	0.11	0.15	0.13	0.10	0.15	0.10
月桂酸 C12 : 0	$Y=0.021\ 2X+0.005\ 6$	0.999\ 8	0.11	0.13	0.14	0.09	0.13	0.13
十三烷酸 C13 : 0	$Y=0.010\ 6X+0.002\ 8$	0.999\ 8	0.11	0.13	0.11	0.10	0.13	0.09
肉豆蔻酸 C14 : 0	$Y=0.021\ 9X+0.010\ 4$	0.999\ 7	0.45	0.45	0.45	0.58	0.48	0.50
肉豆蔻烯酸 C14 : 1	$Y=0.010\ 6X+0.003\ 3$	0.999\ 8	0.21	0.23	0.21	0.19	0.23	0.22
十五烷酸 C15 : 0	$Y=0.010\ 9X+0.005\ 1$	0.999\ 7	0.28	0.28	0.23	0.27	0.28	0.24
顺-10-十五烯酸 C15 : 1	$Y=0.010\ 6X+0.003\ 8$	0.999\ 8	—	—	—	—	—	—
棕榈酸 C16 : 0	$Y=0.033\ 3X+0.016\ 4$	0.999\ 7	18.26	18.96	17.60	19.90	19.88	17.10
棕榈油酸 C16 : 1	$Y=0.010\ 9X+0.003\ 1$	0.999\ 8	0.75	0.82	0.76	0.91	0.81	0.74
十七烷酸 C17 : 0	$Y=0.011\ 2X+0.003\ 9$	0.999\ 8	0.33	0.33	0.34	0.26	0.33	0.34
顺-10-十七烯酸 C17 : 1	$Y=0.011\ 1X+0.006\ 6$	0.999\ 5	0.45	0.45	0.46	0.52	0.47	0.51
硬脂酸 C18 : 0	$Y=0.022\ 8X+0.0127$	0.999\ 6	2.12	2.03	2.04	1.90	1.73	2.26
反油酸 C18 : 1n9t	$Y=0.011\ 3X+0.004\ 4$	0.999\ 8	0.72	0.77	0.72	0.08	0.66	0.71
油酸 C18 : 1n9c	$Y=0.028\ 0X+0.002\ 3$	0.999\ 8	14.58	14.45	15.65	13.67	13.30	13.50
反亚油酸 C18 : 2n6t	$Y=0.010\ 1X+0.004\ 5$	0.999\ 8	0.15	0.19	0.19	0.05	0.16	0.17
亚油酸 C18 : 2n6c	$Y=0.010\ 2X+0.006\ 7$	0.999\ 4	51.91	50.05	51.44	51.65	50.77	53.74
γ -亚油酸 C18 : 3n6	$Y=0.024\ 0X+0.008\ 3$	0.999\ 9	0.30	0.31	0.30	0.35	0.27	0.25
α -亚油酸 C18 : 3n3	$Y=0.007\ 9X+0.002\ 8$	0.999\ 8	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
花生酸 C20 : 0	$Y=0.011\ 9X+0.006\ 2$	0.999\ 7	0.34	0.34	0.39	0.20	0.31	0.28
花生油酸 C20 : 1n9	$Y=0.008\ 8X+0.004\ 1$	0.999\ 7	2.18	2.36	2.26	2.48	2.39	2.28
二十一碳酸 C21 : 0	$Y=0.011\ 7X+0.003\ 3$	0.999\ 9	2.20	2.49	2.14	2.40	2.53	2.25
11,14-二十碳二烯酸 C20 : 2	$Y=0.008\ 9X+0.003\ 5$	0.999\ 8	0.33	0.50	0.36	0.36	0.47	0.33
二十碳三烯酸(EETS) C20 : 3n6	$Y=0.023\ 9X+0.005\ 4$	0.999\ 8	0.32	0.35	0.31	0.33	0.34	0.31
花生四烯酸 C20 : 4n6	$Y=0.008\ 8X+0.002\ 8$	0.999\ 8	0.18	0.21	0.21	0.33	0.22	0.22
顺-11,14,17-二十碳三烯酸 C20 : 3	$Y=0.013\ 4X-0.001\ 8$	0.998\ 4	0.36	0.35	0.35	0.28	0.38	0.35
二十二烷酸 C22 : 0	$Y=0.007\ 0X+0.005\ 4$	0.998\ 9	—	—	—	—	—	—
芥酸 C22 : 1n9	$Y=0.006\ 9X+0.001\ 6$	0.999\ 4	—	—	—	—	—	—
二十碳五烯酸(EPA) C20 : 5	$Y=0.012\ 0X+0.001\ 7$	0.999\ 8	0.28	0.25	0.29	0.25	0.30	0.31
二十三角酸 C23 : 0	$Y=0.010\ 6X+0.004\ 3$	0.999\ 8	—	—	—	—	—	—
顺-13,16-二十碳二烯酸 C22 : 2	$Y=0.006\ 3X+0.002\ 2$	0.999\ 7	—	—	—	—	—	—
木蜡酸 C24 : 0	$Y=0.023\ 1X+0.000\ 1$	0.999\ 7	0.51	0.47	0.56	0.49	0.64	0.52
神经酸 C24 : 1n9	$Y=0.011\ 8X+0.004\ 3$	0.999\ 8	0.04	0.06	0.05	0.04	0.06	0.05
二十二碳六烯酸(DHA) C22 : 6n3	$Y=0.005\ 3X+0.001\ 6$	0.999\ 8	—	—	—	—	—	—

注：—表示低于检出限或未检出。

表 5 各苯乙醇苷线性关系

Tab. 5 Linear relationships of various phenylethanol glycosides

苯乙醇苷	回归方程	R^2	线性范围/ ($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$)
2'-乙酰毛蕊花糖苷	$Y=1.208\ 544X+354.674\ 0$	0.999\ 7	1.239\ 9~9.896\ 4
管花苷 A	$Y=0.193\ 997X+30.490\ 9$	0.999\ 5	0.195\ 8~0.882\ 4
管花苷 B	$Y=1.329\ 476X+272.411\ 7$	0.999\ 8	1.353\ 5~6.804\ 9
红景天苷	$Y=0.011\ 964X+0.932\ 5$	0.999\ 7	0.012\ 1~0.048\ 4
毛蕊花糖苷	$Y=1.167\ 787X+540.690\ 2$	0.998\ 9	1.212\ 2~14.181\ 3
肉苁蓉苷 A	$Y=0.365\ 207X+199.763\ 5$	0.999\ 0	0.038\ 4~5.199\ 6
松果菊苷	$Y=0.160\ 684X+184.088\ 2$	0.999\ 8	0.179\ 5~4.881\ 6
异毛蕊花糖苷	$Y=0.924\ 414X+134.977\ 5$	0.999\ 9	0.938\ 6~3.372\ 6
益母草苷	$Y=0.002\ 598X+2.199\ 6$	0.999\ 4	0.002\ 8~0.057\ 1
栀子苷	$Y=7.893\ 72\times 10^{-4}X+0.728\ 3$	0.999\ 8	0.000\ 9~0.018\ 4

表 6 肉苁蓉中各苯乙醇苷含量比较 (mg/mL, $\bar{x}\pm s$, $n=3$)

Tab. 6 Comparison of various phenylethanol glycoside contents in *C. deserticola* (mg/mL, $\bar{x}\pm s$, $n=3$)

苯乙醇苷	S1	S2	S3	S4	S5	S6
2'-乙酰毛蕊花糖苷	27.11±0.20 ^b	21.09±0.13 ^c	35.22±0.20 ^a	7.77±0.14 ^e	11.39±0.03 ^d	0.24±0.01 ^f
管花苷 A	6.31±0.07 ^d	23.81±0.17 ^b	28.52±0.23 ^a	3.23±0.03 ^e	10.00±0.01 ^c	1.50±0.02 ^f
管花苷 B	15.04±0.12 ^a	3.46±0.01 ^e	5.76±0.01 ^b	5.24±0.11 ^b	1.50±0.01 ^d	—
红景天苷	5.03±0.02 ^d	6.02±0.05 ^c	7.24±0.03 ^b	6.90±0.08 ^b	8.07±0.02 ^a	3.43±0.02 ^c
毛蕊花糖苷	18.95±0.13 ^b	74.38±0.10 ^a	71.60±0.13 ^a	12.50±0.31 ^{bc}	80.58±0.30 ^a	4.37±0.03 ^c
肉苁蓉苷 A	133.95±0.38 ^c	210.37±0.56 ^b	48.05±0.38 ^c	76.68±0.10 ^d	392.47±0.48 ^a	47.64±0.24 ^c
松果菊苷	150.17±4.30 ^b	1 006.79±8.94 ^a	334.58±1.91 ^b	242.75±0.76 ^b	1 209.27±7.59 ^a	135.09±0.14 ^b
异毛蕊花糖苷	143.45±0.06 ^a	23.35±0.08 ^b	16.33±0.04 ^c	17.63±0.11 ^c	27.20±0.18 ^b	0.93±0.01 ^d
益母草苷	666.19±6.26 ^a	609.90±4.61 ^b	214.42±7.88 ^c	344.82±2.01 ^c	199.77±1.29 ^e	263.43±11.72 ^d
梔子苷	11.84±0.12 ^a	6.09±0.02 ^c	3.87±0.04 ^d	3.58±0.03 ^d	9.81±0.10 ^b	3.00±0.01 ^d
苯乙醇苷总量	1 178.04±7.54 ^a	1 985.26±9.07 ^b	765.59±6.67 ^c	721.10±2.47 ^e	1 950.06± 1.33 ^d	459.63±11.54 ^f

注：同行不同字母表示差异有统计学意义 ($P<0.05$)。—表示低于检出限或未检出。

3.3 代谢差异分析

3.3.1 代谢物筛选 将 2 种寄主药材进行衍生化和色谱分析, GC-MS 总离子流色谱图见图 2。再对样本代谢物强度进行 Boxplot 分析, 结果见图 3A,

可知数据波动程度小而集中, QC 一致性、组内重复性良好。GC-MS 原始数据预处理后, 使用鹿明生物自研发 LUG 数据库进行检索匹配, 共检测出 314 种代谢物, 分为 10 类, 见图 3B。

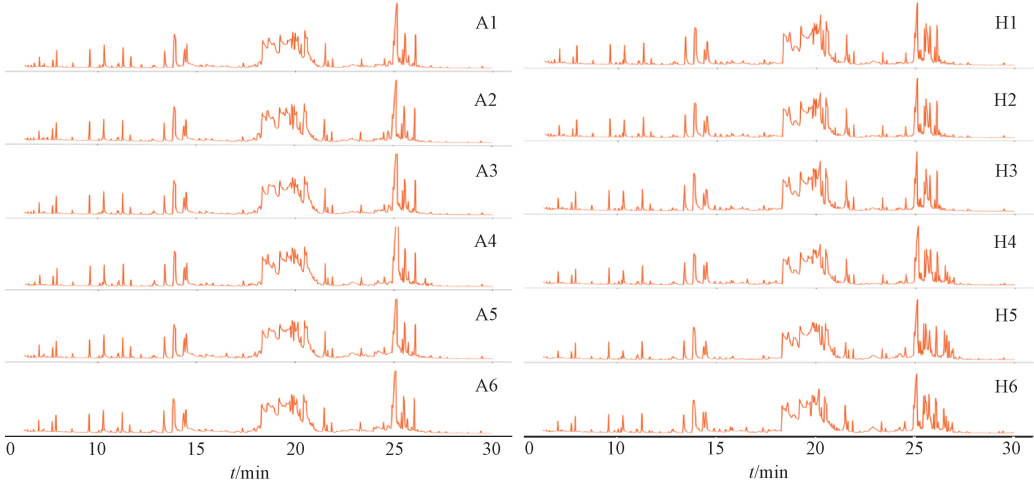


图 2 肉苁蓉 GC-MS 总离子流图
Fig. 2 GC-MS total ion current chromatogram of *C. deserticola*

3.3.2 PCA、OPLS-DA 分析 前 2 个主成分累积方差贡献率为 56.3%, 可充分体现药材基本特征, 以其建立坐标系进行投影, 结果见图 4A, 可知四翅滨藜寄主药材成分集中分布在第二、第三象限, 而梭梭寄主药材成分集中在第一、第四象限, 即两者可明显区分开。为了进一步区分不同寄主药材代谢物, 对相关数据进行 OPLS-DA 分析, 结果见图 4B, 可知 2 组样品在坐标轴上的区分效果良好, 表明 2 种寄主药材成分含量存在显著差异, 与 PCA 分析一致。

以 $VIP>1$ 、 $P<0.05$ 为条件, 筛选出 89 种差异代谢物, 具体见表 7。再采用统计推断分析进一步

验证模型, 结果见图 5, 可知经 200 次置换检验后 ($P<0.01$) R^2 、 Q^2 截距分别为 0.953、-0.187, 表明模型没有过拟合, 可较好地地区分 2 种寄主药材。

3.3.3 聚类分析 聚类热图见图 6A (横坐标为样本分组, 纵坐标为差异代谢物), 可知 2 种寄主药材分别聚集在一个大的集群中, 即两者所含成分有一定相似性, 但其含量有显著差异。在 89 种差异代谢物中, 有 47 种在四翅滨藜寄主中的表达量较高, 即上调, 火山图见图 6B。再进一步对差异代谢物的 $\log_2$ (FC) 值进行排序, 得到其上调、下调排名前十者, 棒棒糖图见图 6C。

表 7 差异代谢物筛选结果

Tab. 7 Results for differential metabolite screening

序号	名称	类型	序号	名称	类型	序号	名称	类型
1	<i>D</i> -5-磷酸核酮糖	糖类	31	<i>L</i> -(+)-酒石酸	有机酸类	61	<i>L</i> -阿拉伯糖醇	醇类
2	1-蔗糖三糖	糖类	32	十六碳二酸	有机酸类	62	1,12-十二烷二醇	醇类
3	α- <i>D</i> -乳糖	糖类	33	柠檬酸	有机酸类	63	核糖醇	醇类
4	1-磷酸甘露糖	糖类	34	3-羟甲基戊二酸	有机酸类	64	肌醇 1-磷酸	醇类
5	<i>D</i> -半乳糖-6-磷酸	糖类	35	果胶酸	有机酸类	65	鲨肝醇	醇类
6	β-乳糖	糖类	36	<i>L</i> -乳酸	有机酸类	66	利多卡因	其他类
7	<i>D</i> -核糖	糖类	37	3-磷酸甘油酸	有机酸类	67	葫芦巴碱	其他类
8	氨基葡萄糖酸	糖类	38	吡啶甲酸	有机酸类	68	尿素	其他类
9	景天庚酮糖	糖类	39	葡萄糖酸	有机酸类	69	胞嘧啶核苷	其他类
10	果聚糖	糖类	40	柠康酸	有机酸类	70	5-苄氧基-6-甲氧基吡啶	其他类
11	<i>N</i> -乙酰基- <i>D</i> -半乳糖胺	糖类	41	6-磷酸葡萄糖酸	有机酸类	71	β- <i>N</i> -乙酰葡萄糖胺	其他类
12	<i>D</i> -木酮糖	糖类	42	<i>L</i> -葡萄糖酸	有机酸类	72	去甲吗啡	其他类
13	<i>D</i> -6-磷酸甘露糖	糖类	43	花生四烯酸	有机酸类	73	6-氮杂胸腺嘧啶	其他类
14	6-磷酸海藻糖	糖类	44	十五烷酸	有机酸类	74	顺式吡啶	其他类
15	木糖	糖类	45	1-(Sn-甘油-3-磷酸)-1 <i>D</i> -肌醇	醇类	75	4-叔丁基苯酚	其他类
16	<i>L</i> -(−)-山梨糖	糖类	46	四氢皮质醇	醇类	76	磷酸脱氧胞苷	其他类
17	<i>DL</i> -焦谷氨酸	氨基酸类	47	乳糖醇	醇类	77	银杏内酯 B	其他类
18	脯氨酸	氨基酸类	48	白雀木醇	醇类	78	马来酰胺酸	其他类
19	<i>L</i> -脯氨酸	氨基酸类	49	甘油	醇类	79	熊果苷	其他类
20	<i>L</i> -酪氨酸	氨基酸类	50	3-癸醇	醇类	80	2-吡咯烷酮	其他类
21	<i>D</i> -丝氨酸	氨基酸类	51	戊唑醇	醇类	81	2-羟基腺嘌呤	其他类
22	<i>L</i> -苏氨酸	氨基酸类	52	山梨醇-6-磷酸	醇类	82	2,7-二羟基萘	其他类
23	<i>L</i> -天冬酰胺	氨基酸类	53	豆甾烷醇	醇类	83	酪胺	其他类
24	苯丙氨酸	氨基酸类	54	1,3,4-戊三醇	醇类	84	5-戊基-1 <i>H</i> -吡啶-2,3-二酮	其他类
25	醛基- <i>L</i> -十二酸	有机酸类	55	<i>L</i> -岩藻糖醇	醇类	85	赤藓醇-1,4-内酯	其他类
26	<i>L</i> -2-氨基-5-羟基戊酸	有机酸类	56	植物鞘氨醇	醇类	86	甲酰乙内脲	其他类
27	甲羟戊酸	有机酸类	57	半乳糖醇	醇类	87	<i>N</i> -乙酰羟色胺	其他类
28	赤藓酸	有机酸类	58	<i>D</i> -阿拉伯糖醇	醇类	88	烟酸	其他类
29	2,3,4-三羟基丁酸	有机酸类	59	1,2,4,5-环己烷四醇	醇类	89	丙二酰胺	其他类
30	莽草酸	有机酸类	60	<i>D</i> -苏力糖醇	醇类			

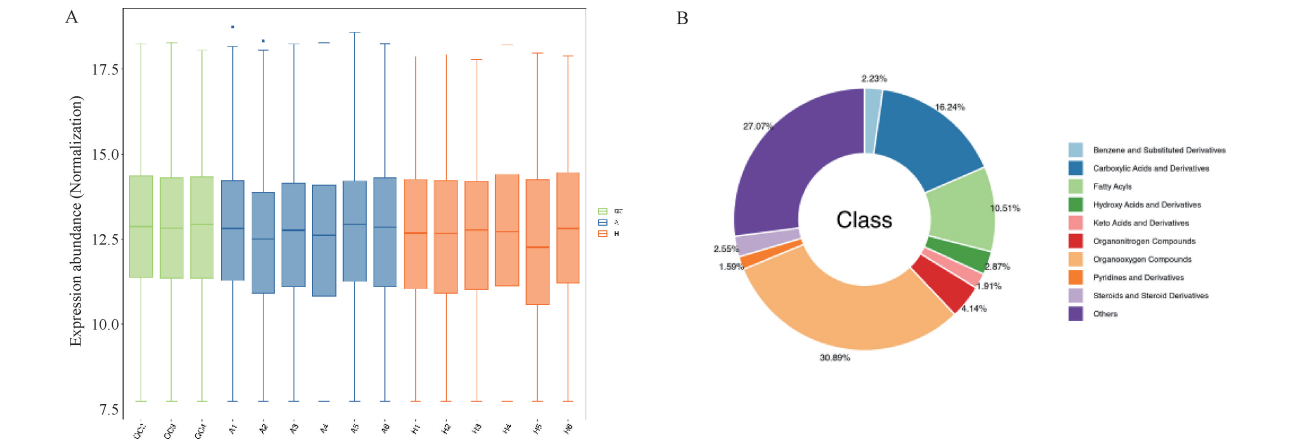


图 3 肉苁蓉代谢物分析图
Fig. 3 Metabolite analysis plots for *C. deserticola*

3.3.4 KEGG 通路分析 以差异代谢物相对含量为指标，结合 KEGG 数据库进行富集分析，在 KEGG pathway 选项下共发现 47 条代谢通路，取 $P<0.05$ 的前 20 条绘制影响因子图，见图 7。再采

用 Metabo Analyst 工具进行权重计算，识别出 12 条含有差异代谢物、匹配度较高的通路，见表 8，其中戊糖与葡萄糖醛酸的相互转化最显著，所含差异代谢物最多，包括 *D*-阿拉伯糖醇等共 16 种。

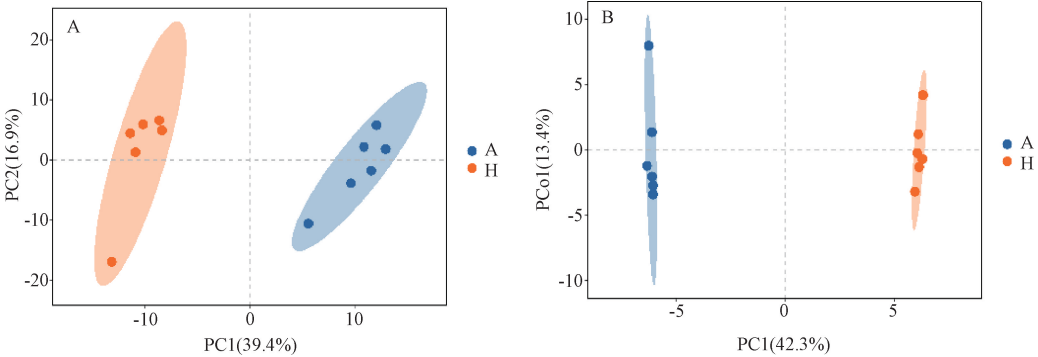


图 4 肉苁蓉 PCA (A)、OPLS-DA (B) 图

Fig. 4 PCA (A) and OPLS-DA (B) plots for *C. deserticola*

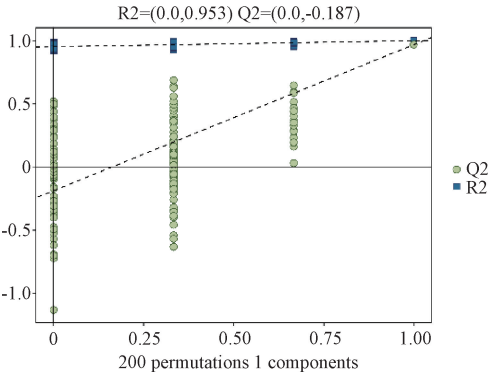


图 5 肉苁蓉置换检验图

Fig. 5 Substitution test plot for *C. deserticola*

表 8 肉苁蓉差异代谢物参与的代谢通路

Tab. 8 Metabolic pathways involved in differential metabolites of *C. deserticola*

KEGG 编号	代谢通路	Hits	Raw P
ath00040	戊糖与葡萄糖醛酸的相互转化	16	4.31×10^{-5}
ath00030	戊糖磷酸途径	5	4.96×10^{-5}
ath00970	氨基酰-tRNA 生物合成	4	2.63×10^{-3}
ath00051	果糖和甘露糖代谢	4	3.24×10^{-3}
ath00470	D-氨基酸代谢	4	7.31×10^{-3}
ath00052	半乳糖代谢	3	1.48×10^{-2}
ath02010	ABC 转运体	4	2.03×10^{-2}
ath00290	缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸生物合成	2	2.75×10^{-2}
ath00740	核黄素代谢	2	2.97×10^{-2}
ath00240	嘧啶代谢	3	3.52×10^{-2}
ath00330	精氨酸、脯氨酸代谢	3	4.26×10^{-2}
ath00010	糖酵解/糖元生成	2	4.77×10^{-2}

注：Hits 为目标代谢通路差异代谢物数量，Raw P 表示超几何分布的 P 值。

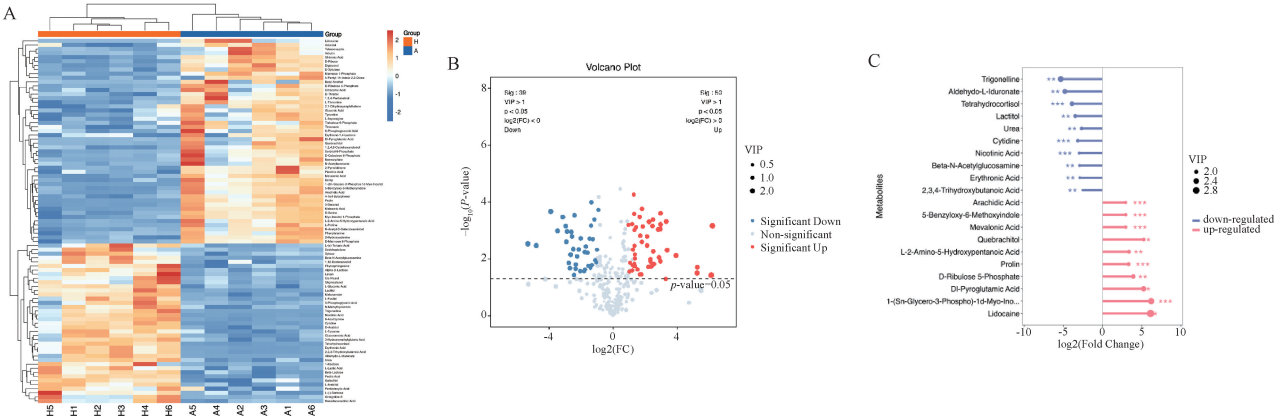


图 6 肉苁蓉差异代谢物聚类分析图

Fig. 6 Cluster analysis plots for differential metabolites of *C. deserticola*

4 讨论

环境是形成高品质肉苁蓉的关键因素之一，并且该药材分布广泛，不同产地其成分差异明显^[17-19]。目前，仅依据 2020 年版《中国药典》指标来评价成分复杂的药材质量存在局限性^[20]。本实验在传统的 HPLC 法基础上，结合 UPLC-QQQ-MS/MS 高分辨质谱的鉴别能力，对 2 种寄主肉苁蓉进行营养物质、化学成分的定性定量分析，确定不同产地、寄主药材所含成分的组成及含量，对其质量进行更系统科学的评价。

营养物质、化学成分是肉苁蓉发挥药效的主要化合物^[21-22]。本实验发现，2 种寄主肉苁蓉都含有丰富的氨基酸与脂肪酸，尤其后者中亚油酸、油酸含量接近于核桃油中的^[23]；内蒙古产者中营养物

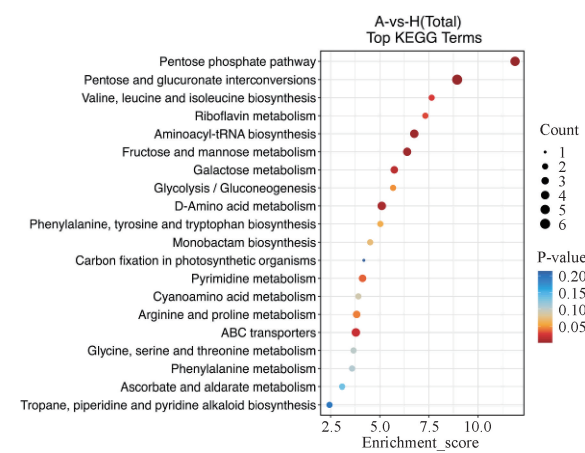


图 7 肉苁蓉差异代谢物 KEGG 富集通路影响因子

Fig.7 Influencing factors for KEGG enrichment pathways of differential metabolites of *C. deserticola*

质、化学成分总含量最高，甘肃产者次之；2 种寄主药材中都含有丰富的营养物质、化学成分，四翅滨藜-肉苁蓉中各成分总积累量显著高于梭梭-肉苁蓉中，表明前者具有更高的药用价值和更好的药食同源潜力。

研究表明，寄主植物为了更好地缓解和消除胁迫，会产生更多缓解逆境胁迫的调节物质^[24]。本实验发现，四翅滨藜-肉苁蓉中大部分糖类、氨基酸、有机酸积累量均高于梭梭-肉苁蓉中，在逆境下具有更强的调节能力及适应性；2 种寄主肉苁蓉积累量较高的多种代谢物参与戊糖与葡萄糖醛酸的转化途径，对植物体生长发育及成分累积有着重要作用^[25-26]。但本实验对肉苁蓉品质差异形成的分子机制尚未阐述，将作为今后研究的主要方向。

5 结论

四翅滨藜-肉苁蓉中大部分糖类、氨基酸、无机元素、脂肪酸、苯乙醇苷总积累量均高于梭梭-肉苁蓉中。本实验通过 GC-MS 代谢组学技术对 2 种寄主培育所得肉苁蓉的成分进行分析，发现两者存在 89 种差异代谢物，其中 47 种在四翅滨藜-肉苁蓉中积累量高于梭梭-肉苁蓉中，再通过 KEGG 富集通路分析发现差异代谢物匹配度较高的通路有 12 条，其中戊糖与葡萄糖醛酸的相互转化最显著，并且所含差异代谢物最多。

参考文献:

[1] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典: 2020 年版一部[S]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020: 140-141.

[2] 屠鹏飞, 姜 勇. 中药肉苁蓉的本草再考证[J]. 中国中药

杂志, 2022, 47(20): 5670-5679.

[3] Wang H C, Yan J J, Wang K, *et al.* The gut-liver axis perspective: exploring the protective potential of polysaccharides from *Cistanche deserticola* against alcoholic liver disease[J]. *Int J biol macromol*, 2023, 256(Pt 1): 128394.

[4] Guo Y L, Cui Q L, Ren S M, *et al.* The hepatoprotective efficacy and biological mechanisms of three phenylethanoid glycosides from *Cistanches herba* and their metabolites based on intestinal bacteria and network pharmacology[J]. *J Nat Med*, 2021, 75(4): 784-797.

[5] Antonella D, Marco M, de Lara F, *et al.* *In vitro* characterization of iridoid and phenylethanoid glycosides from *Cistanche phelypaea* for nutraceutical and pharmacological applications[J]. *Phytother Res*, 2022, 36(11): 4155-4166.

[6] Zhou S Q, Feng D, Zhou Y X, *et al.* Analysis of the active ingredients and health applications of *Cistanche*[J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1101182.

[7] 宋占丽, 刘 彤, 李宽亮, 等. 生根粉对梭梭苗木根系生长及成活的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, 18(4): 610-616.

[8] Wang F M, Zhuo B Y, Wang S, *et al.* *Atriplex canescens*: a new host for *Cistanche deserticola*[J]. *Heliyon*, 2021, 7(6): e07368.

[9] Ma D K, He Z B, Bai X L, *et al.* *Atriplex canescens*, a valuable plant in soil rehabilitation and forage production. A review[J]. *Sci Total Environ*, 2022, 804: 150287.

[10] Yang Q Y, Wang X S, Zhang Y L, *et al.* Simultaneous determination of phenylethanoid glycosides and antioxidant activity of *Syringa pubescens* Turcz. from different geographical origin in China[J]. *J Chromatogr Sci*, 2023, 61(8): 766-772.

[11] 管彦辉, 梁正维, 施 扬, 等. 滇黄精炮制前后化学成分变化研究[J]. 中草药, 2024, 55(11): 3647-3658.

[12] 刘海民, 赵 岩, 于鑫森, 等. 我国不同产地荒漠肉苁蓉品质分析及其综合评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(8): 341-350.

[13] 孔祥河, 任广喜, 徐裕彬, 等. 基于天竺黄中 15 种蛋白质氨基酸含量分析的营养价值评价[J]. 中国中药杂志, 2024, 49(7): 1809-1817.

[14] 徐勤科, 魏学冰, 李 莉, 等. ICP-MS 测定不同产地肉苁蓉中多种微量元素的含量[J]. 中国药学杂志, 2024, 59(2): 179-185.

[15] Li F, Lu Y L, He Z L, *et al.* Analysis of carcass traits, meat quality, amino acid and fatty acid profiles between different duck lines[J]. *Poultry Sci*, 2024, 103(7): 103791.

[16] Zhao X S, Wei J H, Yang M H, *et al.* Simultaneous analysis of iridoid glycosides and anthraquinones in *Morinda officinalis* using UPLC-QqQ-MS/MS and UPLC-Q/TOF-MS^E [J]. *Molecules*, 2018, 23(5): 1070.

[17] 刘昌孝, 陈士林, 肖小河, 等. 中药质量标志物 (Q-Marker): 中药产品质量控制的新概念[J]. 中草药, 2016, 47(9): 1443-1457.

[18] 张 菁, 朱田田, 晋 玲, 等. 肉苁蓉高品质形成的研究进

展[J]. 中国实验方剂学杂志, 2023, 29(18): 259-266.

[19] 冯 洁, 郭晔红, 朱文娟, 等. 不同寄主、产地和采收期对肉苁蓉有效成分含量的影响[J]. 中国野生植物资源, 2021, 40(5): 18-23.

[20] 刘 颖, 冯金朝, 周珊珊. 内蒙古巴彦淖尔盟地区肉苁蓉生化成分分析[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(8): 171-173.

[21] Li Z Q, Hong T N, Shen G H, *et al.* Amino acid profiles and nutritional evaluation of fresh sweet-waxy corn from three different regions of China[J]. *Nutrients*, 2022, 14(19): 3887.

[22] Andrew J S. 世界食物供应中亚油酸含量高对人体健康的影响[J]. 粮油食品科技, 2022, 30(3): 23-32; 16-17.

[23] 朱振宝, 张 芳, 段屹帆, 等. 我国不同产地红仁核桃及其油脂营养物质的比较分析[J]. 中国油脂, 2024, 49(1): 29-34; 49.

[24] 武文雅, 吴可心, 张 迈, 等. 基于 GC-MS 的 3 种龙胆属植物的代谢差异分析[J]. 西北林学院学报, 2023, 38(6): 203-210.

[25] TeSlaa T, Ralser M, Fan J, *et al.* The pentose phosphate pathway in health and disease[J]. *Nat Metab*, 2023, 5(8): 1275-1289.

[26] Sharkey T D. Pentose phosphate pathway reactions in photosynthesizing cells[J]. *Cells*, 2021, 10(6): 1547.

基于环烯醚萜、无机元素含量分析不同产地栀子品质

陈 培¹, 孙孝亚^{1,2}, 侯亚迪¹, 张尚格¹, 朱 晔¹, 练从龙^{1,2}, 陈随清^{1,2*}
(1. 河南中医药大学药学院, 河南 郑州 450046; 2. 豫药全产业链研发河南省协同创新中心, 河南 郑州 450046)

摘要: **目的** 分析不同产地栀子品质。**方法** ICP-MS 法测定 Mg、P、K、Ca、B、Na、Al、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Zn、Sr、Ba、Cu、Cd、As、Hg、Pb 的含量, HPLC 法测定栀子苷、京尼平龙胆双糖苷、京尼平苷酸的含量。再进行主成分分析、正交偏最小二乘法判别分析、Fisher 判别分析、相关性分析, 计算重金属元素每日最大可耐受量(EDI), 内梅罗综合污染指数进行健康风险评估与安全性评价。**结果** 河南产药材中大量元素(Mg、P、K、Ca)含量最高, 微量元素(B、Ti、V、Cr、Fe、Co、Ni、Zn、Sr、Ba)含量较高, 重金属、有害元素含量符合标准。湖南产药材中京尼平龙胆双糖苷含量最高, 江西产药材中京尼平苷酸、栀子苷含量最高。Ti、Mg、Ca 为特征元素; 不同产地药材分为 2 类, K、Ca、Mg、Fe 为差异性元素; Fe、Ti 为区分河南与其他产地药材的指标元素; Mg、K、Ca、Ti、Ni、Zn、Sr、Cu 含量与环烯醚萜含量呈负相关, Cd 含量与后者呈正相关。不同产地药材中重金属、有害元素无健康风险; 河南产药材污染水平为安全级, 并且低于其他产地; 湖南、江西部分产地药材中 Cd 的 $P_i > 1$ 。**结论** 栀子中环烯醚萜、无机元素含量有一定关联, 并且个别产地药材有 Cd 污染情况, 需引起关注。

关键词: 栀子; 品质; 产地; 环烯醚萜; 无机元素; 健康风险; 安全性

中图分类号: R284.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1528(2025)08-2506-08

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2025.08.004

Quality analysis of *Gardeniae Fructus* from different producing areas based on contents of iridoids and inorganic elements

CHEN Pei¹, SUN Xiao-ya^{1,2}, HOU Ya-di¹, ZHANG Shang-ge¹, ZHU Ye¹, LIAN Cong-long^{1,2}, CHEN Sui-qing^{1,2*}
(1. College of Pharmacy, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China; 2. Collaborative Innovation Center for Research and Development of Whole Industry Chain of Yu-Yao, Zhengzhou 450046, China)

KEY WORDS: *Gardeniae Fructus*; quality; producing areas; iridoids; inorganic elements; health risk; safety

收稿日期: 2025-01-02
基金项目: 2024 年中央和省级财政林业项目储备库入库项目(豫财环资[2024]47号); 河南省重大科技专项(221100310400); 河南省创新生态支持专项(财科[2024]8号)
作者简介: 陈 培(2000—), 男, 硕士生, 从事中药鉴定及其资源评价研究。E-mail: chenp1113@163.com
* 通信作者: 陈随清(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事中药品种整理及其质量标准研究。E-mail: suiqingchen@163.com