

纹党不同器官广泛靶向代谢组学研究

刘旭霞¹, 刘晓玲¹, 马海棠¹, 王 欣¹, 陈正君¹, 罗文蓉^{2*}, 杨扶德^{1*}

(1. 甘肃中医药大学药学院, 甘肃 兰州 730000; 2. 甘肃省中医院药学部, 甘肃 兰州 730050)

摘要: **目的** 考察纹党根、茎、叶、花的广泛靶向代谢组学。**方法** 利用 LC-MS/MS 法鉴定不同器官中的次级代谢物, 进行多元统计分析和生物信息学分析, 筛选差异性化合物, 阐明代谢通路。**结果** 共检测到 256 种次级代谢物, 其中黄酮、生物碱、苯丙素、多酚占比较高, 各器官代谢物分布差异显著, 差异代谢物主要参与黄酮、生物碱、氨基酸、次级代谢物的生物合成。**结论** 本实验结果对纹党药用/食用资源部位的选择和开发利用提供了一定的理论依据, 同时为后期该药材次级代谢物生物合成的基因挖掘奠定了基础。

关键词: 纹党; 器官; 广泛靶向代谢组学; 次级代谢物; 代谢通路; LC-MS/MS; 多元统计分析; 生物信息学分析

中图分类号: R283

文献标志码: B

文章编号: 1001-1528(2025)06-2072-06

doi: 10.3969/j.issn.1001-1528.2025.06.047

纹党为桔梗科植物素花党参 *Codonopsis pilosula* Nannf. var. *modesta* (Nannf.) L. T. Shen 的干燥根, 性平, 味甘, 归脾、肺经, 具有健脾益肺、养血生津功效^[1-2]。该药材主要成分为黄酮、生物碱、多糖、多酚、木脂素、萜类、氨基酸、有机酸等^[3], 具有多种药理作用, 包括抗氧化^[4]、抗衰老^[5]、调节血糖血脂^[6]、抗肿瘤、调节免疫功能等^[7], 广泛应用于保健食品、药品领域。

广泛靶向代谢组学技术因其定性准确, 可针对性检测某一类化合物, 实现对特定化合物的半定量检测^[8-9], 被广泛应用于医药、食品、植物化学、微生物代谢等领域^[10-12]。目前, 对于党参广泛靶向代谢组学的研究主要集中在产区鉴别及不同产地样品差异分析^[13-14], 鲜有涉及不同器官, 现有的含量测定结果^[15]无法为其质量评价和合理利用提供依据, 并且尚无与纹党相关的报道。因此, 本实验采用广泛靶向代谢组学技术整体评价纹党根、茎、叶、花的次级代谢物差异, 筛选其关键差异代谢物, 同时结合生物信息学分析阐明其生物合成机制, 旨在为该药材药用/食用资源部位的选择和开发利用提供理论依据, 同时为后期对其次级代谢物生物合成的基因挖掘奠定基础。

1 材料

1.1 仪器 Exion LC AD 超高效液相色谱仪、QTrap 6500+ 质谱仪 (美国 AB SCIEX 公司); Heraeus Fresco17 离心机 (美国 Thermo 公司); D24 UV 纯水仪 (德国 Merck Millipore 公司); BSA124S-CW 电子天平 (北京赛多利斯仪器系统有限公司); JXFSTPRP-24 研磨仪 (上海净信科技有限公

司); YM-080S 超声仪 (深圳市方奥微电子有限公司)。

1.2 药材与试剂 纹党于 2023 年 8 月采集于甘肃省陇南市文县中寨镇哈西沟村 (坐标 33.153°N, 104.215°E, 海拔 2 152.3 m), 经甘肃中医药大学杨扶德教授鉴定为正品, 随机采集 3 年生者 20 株, 去掉泥沙后分为根、茎、叶、花 4 组, 各组设置 5 个重复, 液氮速冻后保存于超低温冰箱中。甲醇、乙腈 (质谱纯, 德国 CNW Technologies 公司); 甲酸 (质谱纯, 美国 Sigma 公司)。

2 方法

2.1 代谢物提取 将药材不同器官进行冷冻干燥后研磨 (60 Hz, 60 s) 至粉末状, 称取 50 mg, 溶于 700 μ L 70% 甲醇中, 涡旋 30 s, 在 40 Hz 下匀浆 4 min, 冰水浴超声提取 5 min, 重复 3 次, 在 4 $^{\circ}$ C 下冷藏过夜, 12 000 r/min 离心 15 min, 取上清液, 0.22 μ m 微孔滤膜过滤, 滤液稀释 20 倍, 涡旋 30 s, 每个样品各取 15 μ L, 混合, 作为质量控制 (QC) 样品, -80 $^{\circ}$ C 保存。

2.2 色谱条件 Waters ACQUITY 上调 LC HSS T3 C₁₈ 色谱柱 (2.1 mm $\times$ 100 mm, 1.8 μ m); 流动相 0.1% 甲酸 (A) - 乙腈 (B), 梯度洗脱 (0~0.5 min, 2% B; 0.5~10 min, 2%~50% B; 10~11 min, 50%~95% B; 11~13 min, 95% B; 13~13.1 min, 95%~2% B; 13.1~15 min, 2% B); 体积流量 0.4 mL/min; 柱温 40 $^{\circ}$ C; 进样量 2 μ L; 自动进样器温度 4 $^{\circ}$ C。

2.3 质谱条件 SCIEX 6500 QTRAP+三重四极杆质谱仪, 配置 Ion Drive Turbo V ESI 离子源; 正负离子扫描; 多反应

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 科技部国家重点研发计划项目 (2018YFC1706305); 甘肃省科技计划项目 (21JR1RA271); 2021 年度甘肃高等学校产业支撑计划项目 (2021CYZC-40); 甘肃省重点研发计划项目 (23YFFA0069); 兰州市科技局校企合作项目 (2023-RC-9)

作者简介: 刘旭霞 (1994—), 女, 博士生, 研究方向为中药鉴定与品质评价。Tel: 18893796823, E-mail: gszylxx6823@163.com

* 通信作者: 罗文蓉 (1972—), 女, 主任中药师, 从事中药品质及其制剂研究。Tel: 13893303264, E-mail: gszylwr@163.com

杨扶德 (1972—), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 从事中药鉴定、品质评价研究。Tel: 18152064502, E-mail: gszzyfd@163.com

监测 (MRM) 模式; 离子源气体 I、II 60 psi (1 psi = 6.895 kPa); 气帘气 35 psi; 喷雾电压 5 500 V/-4 500 V; 去簇电压(DP) $\pm$ 100 V; 离子源温度 400 $^{\circ}$ C; 扫描范围 m/z 50~1 200, 分辨率 60 000。

2.4 数据处理 采用 SCIEX 分析工作站软件 (1.6.3 版) 进行 MRM 数据采集和处理, MSconvter 软件将质谱原始数据 (.wiff) 文件转换为 TXT 格式, 内部 R 语言程序和数据库进行峰检测和标注。对代谢物数据进行主成分分析 (PCA) 和正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA), 解析药材不同器官的代谢物差异特征。采用变量投影重要性值 (VIP)、差异倍数 (FC)、 P 值 (P -value), 筛选差异代谢物。通过 KEGG 等数据库对差异代谢物进行富集分析和代谢通路分析, 阐明关键次级代谢产物的生物学合成路径。

3 结果

3.1 QC 样品分析 总离子流图见图 1, 可知其重叠率很高, QC 样品保留时间和峰强度几乎无变化。再进行相关性分析, 发现 QC 样品相关性 ≥ 0.98 , 表明实验数据质量高,

该方法重复性好, 稳定可靠。

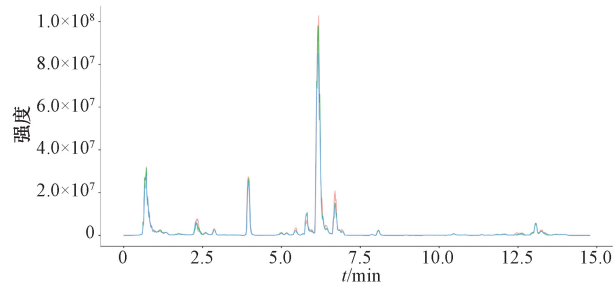


图 1 QC 样品总离子流图

3.2 代谢物鉴定 共检测到 256 种次级代谢产物, 其中黄酮、生物碱、酚类和苯丙素总占比为 54.91%, 见图 2A, 其相对含量热图见图 2B。由此可知, 黄酮、羧酸类化合物在花、叶、茎中的相对含量较高, 而根中含有较高相对含量的羧酸、氨基酸、核苷酸、生物碱、酚类、维生素类化合物; 不同器官中次级代谢物分布差异显著, 并且非药用部位茎、叶、花中也含有大量该类物质。

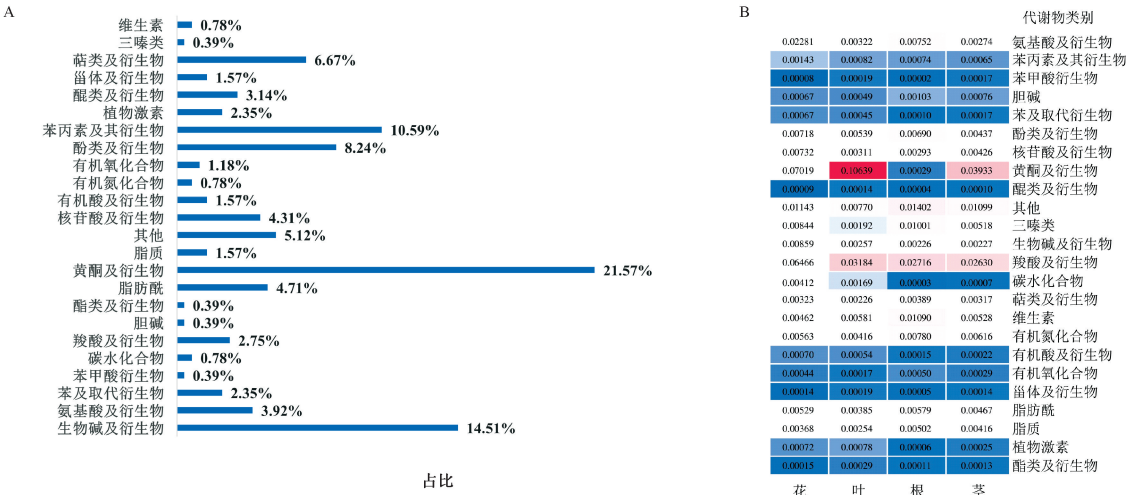


图 2 纹党不同器官中代谢物分布图

3.3 代谢组学差异

3.3.1 多元统计分析 PCA 显示, 主成分 1 贡献率为 47.9%, 主成分 2 贡献率为 15.0%。由图 3 可知, 各批药材根据器官不同可分为 4 组, 在主成分 1 上发现花与其他器官之间有明显的分离, 表明两者代谢物存在显著差异; 在主成分 2 上发现根与其他器官之间有明显分离, 表明药用部位根、非药用部位地上部分代谢物存在显著差异。

为筛选差异代谢物, 再进行两两比较的 OPLS-DA 分析, 其中 R^2X 、 R^2Y 分别代表模型对 X 、 Y 变量的累积解释度, Q^2 代表模型预测能力, 结果见表 1, 可知各组 Q^2 均大于 0.900, 表明模型稳定可靠。再进行 200 次置换检验, 发现 R^2Y 、 Q^2 均显著低于原始模型 ($P < 0.05$), 可根据 VIP 值进行筛选, 为后续通路分析奠定基础。

3.3.2 差异代谢物筛选 以 $VIP \geq 1$, $P \leq 0.05$, $\log^2 FC \geq 2$ 或 ≤ 0.5 为标准, 分别在叶 vs 根、花 vs 叶、花 vs 根、叶 vs 茎、花 vs 茎、茎 vs 根之间筛选出 104、96、90、80、73、

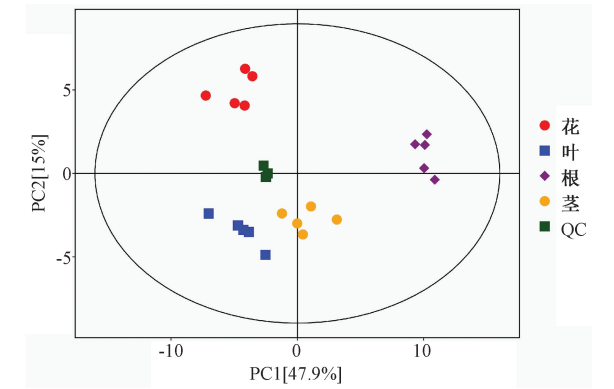


图 3 纹党不同器官主成分分析图

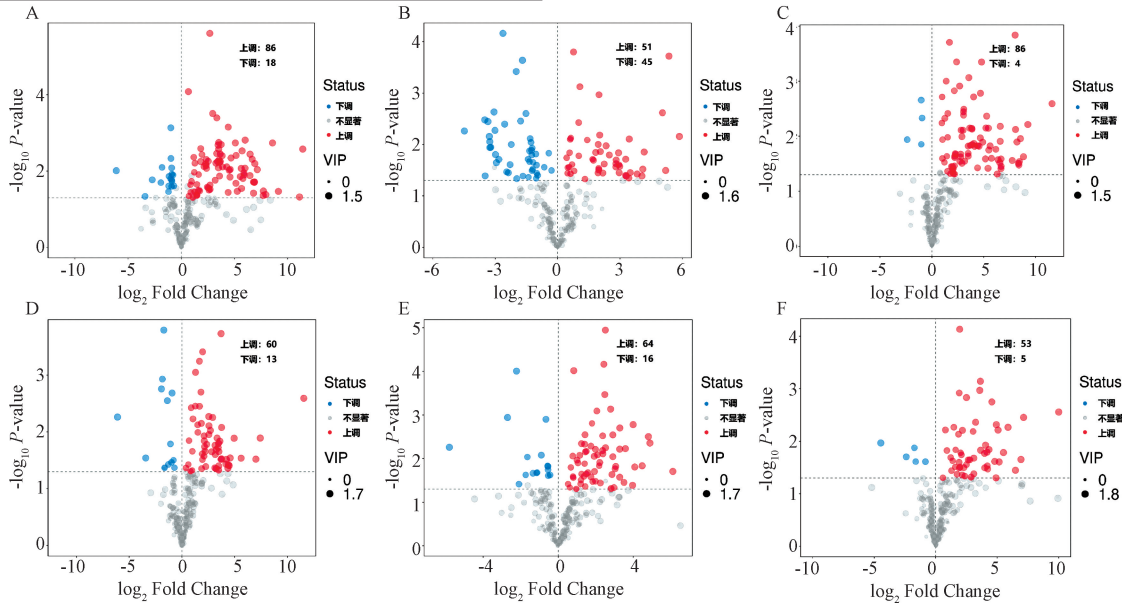
58 种差异代谢物, 见图 4。由此可知, 分别有 86、51、86、64、60、53 种差异代谢物上调, 18、45、4、16、13、5 种差异代谢物下调, 即叶 vs 根、花 vs 叶、花 vs 根的较多。

叶 vs 根、花 vs 叶、花 vs 根中排名前二十的差异代谢物

表 1 纹党不同器官 OPLS-DA 模型信息

对比组	模型主成分个数	R^2X (cum)	R^2Y (cum)	Q^2 (cum)
花 <i>vs</i> 根	1+1+0	0.530	0.998	0.940
叶 <i>vs</i> 根	1+1+0	0.567	0.999	0.955
茎 <i>vs</i> 根	1+1+0	0.434	0.998	0.900
叶 <i>vs</i> 茎	1+1+0	0.536	0.995	0.924
花 <i>vs</i> 茎	1+1+0	0.520	0.996	0.921
花 <i>vs</i> 叶	1+1+0	0.564	0.997	0.953

见表 2，可知花 *vs* 根上调的差异代谢物较多，主要为黄酮，而下调的主要为生物碱；叶 *vs* 根上调的差异代谢物主要为黄酮，而下调的主要为多酚和氨基酸；花 *vs* 叶中显著差异的代谢物主要为黄酮、核苷酸、氨基酸和生物碱。表明纹党不同器官具有不同的差异代谢物积累和分布模式，并且它们之间相互协作，在体内富集药用成分，积累次级代谢物，最终形成高品质药材。



注：A~F 分别为叶 *vs* 根、花 *vs* 叶、花 *vs* 根、花 *vs* 茎、叶 *vs* 茎、茎 *vs* 根。

图 4 纹党不同器官对比组差异代谢物

表 2 叶 *vs* 根、花 *vs* 叶、花 *vs* 根差异代谢物（排名前 20）

对比组	名称	化学式	分类	VIP	P	$\text{Log}_2(\text{FC})$	变化类型
叶 <i>vs</i> 根	1- <i>O</i> -咖啡酰葡萄糖	$\text{C}_{15}\text{H}_{18}\text{O}_9$	碳水化合物	1.44	0.02	6.87	上调
	新西兰牡荆苷 2	$\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_{15}$	黄酮	1.46	0.01	6.91	上调
	野漆树苷	$\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_{14}$	黄酮	1.44	0.01	7.14	上调
	芹黄素	$\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_5$	黄酮	1.44	0.04	7.70	上调
	木犀草素	$\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_6$	黄酮	1.45	0.03	7.71	上调
	野黄芩素	$\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_6$	黄酮	1.45	0.04	7.94	上调
	木犀草苷	$\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_{11}$	黄酮	1.46	0	8.57	上调
	山柰酚-3- <i>O</i> -槐糖苷	$\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_{16}$	黄酮	1.44	0.03	9.12	上调
	新北美圣草苷	$\text{C}_{27}\text{H}_{32}\text{O}_{15}$	黄酮	1.47	0.05	11.11	上调
	芍药素葡萄糖苷	$\text{C}_{22}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	黄酮	1.47	0	11.41	上调
	<i>L</i> -鸟氨酸	$\text{C}_5\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_2$	氨基酸	1.38	0.01	-6.11	下调
	假尿苷 5'磷酸	$\text{C}_9\text{H}_{13}\text{N}_2\text{O}_6\text{P}$	氨基酸	1.24	0.05	-3.41	下调
	<i>L</i> -蛋氨酸	$\text{C}_5\text{H}_{11}\text{NO}_2\text{S}$	氨基酸	1.25	0.02	-2.73	下调
	<i>L</i> -组氨酸	$\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_2$	氨基酸	1.09	0.02	-1.92	下调
	无梗五加苷 B	$\text{C}_{28}\text{H}_{36}\text{O}_{13}$	木脂素	1.12	0.01	-1.81	下调
	根皮酸	$\text{C}_9\text{H}_{10}\text{O}_3$	多酚	1.04	0.03	-1.20	下调
	棕榈酸	$\text{C}_{16}\text{H}_{32}\text{O}_2$	脂质	1.12	0.02	-1.18	下调
	7-(4-羟基苯基)-1-苯基-4-庚烯-3-酮	$\text{C}_{19}\text{H}_{20}\text{O}_2$	多酚	1.12	0.01	-1.15	下调
	香兰素	$\text{C}_8\text{H}_8\text{O}_3$	多酚	1.02	0.02	-1.02	下调
花 <i>vs</i> 根	紫铆因	$\text{C}_{15}\text{H}_{12}\text{O}_5$	查尔酮	1.31	0	-0.98	下调
	木犀草苷	$\text{C}_{21}\text{H}_{20}\text{O}_{11}$	黄酮	1.53	0	8.02	上调
	芍药素葡萄糖苷	$\text{C}_{22}\text{H}_{22}\text{O}_{11}$	黄酮	1.53	0.01	8.06	上调
	1- <i>O</i> -咖啡酰葡萄糖	$\text{C}_{15}\text{H}_{18}\text{O}_9$	碳水化合物	1.53	0.01	8.19	上调
	水合氧化前胡素	$\text{C}_{16}\text{H}_{14}\text{O}_5$	香豆素	1.53	0.03	8.34	上调
	芹黄素	$\text{C}_{15}\text{H}_{10}\text{O}_5$	黄酮	1.52	0.03	8.38	上调
	芦丁	$\text{C}_{27}\text{H}_{30}\text{O}_{16}$	黄酮	1.53	0.03	8.42	上调

再筛选相关通路中的代谢物信息，发现 11 种差异代谢物参与黄酮、黄酮醇类化合物生物合成，11 种差异代谢物参与生物碱类化合物的生物合成，9 种差异代谢物参与氨基酸的合成过程，8 种差异代谢物参与其他各种植物次生

代谢物的生物合成，具体见表 3。另外，上述代谢物大部分在花、叶中上调，表明两者含有大量该类物质，具有很大的潜在开发利用价值。

表 3 显著富集的通路代谢物信息

通路	代谢物	分子式	KEGG ID	Log ₂ (FC)		
				花 <i>vs</i> 根	叶 <i>vs</i> 根	花 <i>vs</i> 叶
黄酮类生物合成相关通路(ath00941、ath00944)	芹黄素	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	C01477	8.38	7.70	—
	毛地黄黄酮	C ₁₅ H ₁₀ O ₆	C01514	8.53	7.71	—
	芦丁	C ₂₇ H ₃₀ O ₁₆	C05625	8.42	—	3.28
	天竺葵色素	C ₁₅ H ₁₀ O ₅	C05904	6.37	5.66	—
	圣草酚	C ₁₅ H ₁₂ O ₆	C05631	6.65	5.26	—
	紫铆因	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	C08578	-1.03	-0.98	—
	黄颜木素	C ₁₅ H ₁₂ O ₆	C01378	2.68	2.7	—
	阿魏酸	C ₁₀ H ₁₀ O ₄	C01494	5.61	3.66	2.04
	<i>L</i> -苯丙氨酸	C ₉ H ₁₁ NO ₂	C00079	2.88	—	3.28
	芥子醇	C ₁₁ H ₁₄ O ₄	C02325	2.53	—	2.02
	短叶松素	C ₁₅ H ₁₂ O ₅	C09826	—	2.43	-1.22
生物碱生物合成相关通路(ath00380、ath00230、ath00960)	鸟苷 3',5'-环一磷酸	C ₁₀ H ₁₂ N ₅ O ₇ P	C00942	6.16	—	2.96
	吡啶	C ₈ H ₇ N	C00463	-2.37	—	—
	犬尿喹啉酸	C ₁₀ H ₇ NO ₃	C01717	5.48	6.45	—
	羟基色胺	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ O	C17203	3.50	—	2.24
	五羟色胺	C ₁₀ H ₁₂ N ₂ O	C00780	3.05	—	2.03
	甲酰邻氨基苯甲酸	C ₈ H ₇ NO ₃	C05653	2.04	1.43	—
	黄苷	C ₁₀ H ₁₂ N ₄ O ₆	C01762	4.67	1.73	2.93
	5-尿嘧啶核苷酸	C ₉ H ₁₃ N ₂ O ₉ P	C00105	5.44	—	5.86
	胸苷	C ₁₀ H ₁₄ N ₂ O ₅	C00214	3.87	—	4.16
	乙酰托品醇	C ₁₀ H ₁₇ NO ₂	C12452	2.70	—	2.81
	烟酰胺	C ₆ H ₆ N ₂ O	C00153	2.76	1.25	—
氨基酸生物合成相关通路(ath00400、ath00360、ath01230)	原儿茶酸	C ₇ H ₆ O ₄	C00230	4.12	2.14	1.98
	<i>L</i> -苯丙氨酸	C ₉ H ₁₁ NO ₂	C00079	1.88	—	3.28
	<i>D</i> -(<i>-</i>)-奎宁酸	C ₇ H ₁₂ O ₆	C00296	2.38	5.63	-3.25
	莽草酸	C ₇ H ₁₀ O ₅	C00493	2.81	—	1.83
	邻氨基苯甲酸	C ₇ H ₇ NO ₂	C00108	2.16	3.41	-1.25
	2-苯乙胺	C ₈ H ₁₁ N	C05332	2.07	—	2.99
	5-氨基戊酸	C ₅ H ₁₁ NO ₂	C00431	1.44	—	2.49
	<i>L</i> -组氨酸	C ₆ H ₉ N ₃ O ₂	C00135	—	-1.92	1.99
	<i>L</i> -蛋氨酸	C ₅ H ₁₁ NO ₂ S	C00073	—	-2.73	3.83
各种植物次生代谢物生物合成通路(ath00999)	<i>L</i> -苯丙氨酸	C ₉ H ₁₁ NO ₂	C00079	1.88	—	3.28
	莽草酸	C ₇ H ₁₀ O ₅	C00493	2.81	—	1.83
	二氢香豆素	C ₉ H ₈ O ₂	C02274	2.25	3.59	-1.35
	2-吡啶酮	C ₈ H ₇ NO	C12312	1.20	1.48	—
	滨蒿内酯	C ₁₁ H ₁₀ O ₄	C09311	2.08	3.49	-1.42
	皂皮酸	C ₃₀ H ₄₆ O ₅	C08972	0.99	2.68	-1.69
	鬼臼毒素	C ₂₂ H ₂₂ O ₈	C10874	1.51	1.60	—
	泽泻萜	C ₃₀ H ₅₂ O ₂	C19829	—	1.21	-1.17

注：ath00941 为黄酮生物合成，ath00944 为黄酮、黄酮醇生物合成，ath00380 为色氨酸代谢，ath00230 为嘌呤代谢，ath00960 为托烷、吡啶、吡啶类生物碱生物合成，ath00400 为苯丙氨酸、酪氨酸、色氨酸生物合成，ath00360 为苯丙氨酸代谢，ath01230 为氨基酸生物合成，ath00999 为各种植物次生代谢物生物合成。

4 讨论与结论

本实验采用广泛靶向代谢组学技术，对纹党根、茎、叶、花中代谢物的分布及积累规律进行了研究，共检测到 256 种次级代谢物，以黄酮、生物碱、苯丙素、多酚为主，不同器官代谢物分布差异显著。目前，纹党药用部位为根，其地上部分作为废弃物被丢弃，造成资源巨大浪费，本实

2076

验结果表明该部位也含有大量次级代谢物，与 Zeng 等^[16]报道一致，并且其药理活性显著^[17-18]，具有潜在的开发应用价值，如保健品、袋泡茶、农副产品、美容产品^[19-21]等，从而增加产业链，防止资源浪费，促进多元化绿色发展，提高经济价值。

KEGG 富集分析显示，次级代谢物参与了纹党中黄酮、

生物碱、氨基酸及各种植物次生代谢物的生物合成，同时筛选出通路中的差异代谢物，可为阐明该药材体内次级代谢物的生物合成及品质形成的机制探讨提供参考。然而，调控上述次级代谢物生物合成的相关酶、蛋白、基因等信息尚未被挖掘，后期需进行基因组学、蛋白质组学、转录组学的研究，探讨其分子机理^[22-23]。同时，通过代谢物的绝对定量及基因蛋白的过表达构建基因-蛋白-代谢物调控网络，阐明代谢物生物合成的分子机制，从而为高品质纹党参的育种提供理论依据。

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，2020：293.

[2] 张开弦，姚秋阳，任 艳，等. 党参道地品种起源、变迁、现状研究进展[J]. 中成药，2024，46(1)：211-216.

[3] 苏圆锦，奚佳玉，史 奇，等. 药食同源中药党参的研究进展[J]. 中草药，2023，54(8)：2607-2617.

[4] 帖晓燕，张云鹤，张文广，等. 纹党米炒前后体外抗氧化活性及干预脾虚泄泻大鼠的药效对比研究[J]. 中草药，2021，52(22)：6871-6880.

[5] 叶文斌，杨 文，陈耀年，等. 纹党和红芪加工废弃物中活性多糖对衰老小鼠学习记忆能力和抗疲劳作用的影响[J]. 甘肃农业大学学报，2021，56(2)：18-24.

[6] 叶文斌，宫峥嵘，何玉鹏，等. 纹党和红芪加工废弃物中的活性多糖对 2 型糖尿病小鼠血糖血脂的影响[J]. 甘肃农业大学学报，2020，55(2)：32-39.

[7] 张 培. 纹党果胶多糖 CPP1c 结构解析、抗肿瘤活性及免疫活性研究[D]. 兰州：兰州大学，2016.

[8] 徐 杨，何芷绮，刘晓凤，等. 代谢组学在中药复方制剂领域的研究进展及面临的挑战[J]. 中草药，2024，55(4)：1354-1364.

[9] 周德来，王 苗，冯金梁，等. 基于广泛靶向代谢组学研究甘草不同年限差异代谢物[J]. 药物分析杂志，2024，44(1)：144-157.

[10] Li J X, Hu W F, Murtaza A, *et al.* Widely targeted metabolomics analysis reveals the potential metabolic network of high-pressure carbon dioxide regulating fresh-cut Chinese water chestnut yellowing[J]. *Food Biosci*, 2024, 59: 103889.

[11] Wang H Z, Zhao M Y, Wu Z Z, *et al.* Nutrient composition and functional constituents of daylily from different producing areas based on widely targeted metabolomics[J]. *Food Chem: X*, 2024, 21: 101239.

[12] Hua J J, Ouyang W, Zhu X Z, *et al.* Objective quantification technique and widely targeted metabolomic reveal the effect of drying temperature on sensory attributes and related non-volatile metabolites of black tea[J]. *Food Chem*, 2024, 439: 138154.

[13] 李玲玉，王德富，李振方，等. 基于广泛靶向代谢组学的不同产地党参次生代谢产物比较分析[J]. 药学报，2023，58(11)：3421-3427.

[14] Zhang K X, Zhang D L, Yang Q F, *et al.* Integrated widely targeted metabolomics and network pharmacology revealed quality disparities between Guizhou and conventional producing areas of *Codonopsis Radix*[J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1271817.

[15] 吉姣姣，戴俊利，李建宽，等. 党参不同组织化学成分分布及转录组学分析[J]. 中国实验方剂学杂志，2023，29(18)：117-125.

[16] Zeng X, Li J X, Lyu X K, *et al.* Untargeted metabolomics reveals multiple phytometabolites in the agricultural waste materials and medicinal materials of *Codonopsis pilosula*[J]. *Front Plant Sci*, 2022, 12: 814011.

[17] 杨豆豆，陈 垣，郭凤霞，等. 党参地上部分研究和应用的进展[J]. 中草药，2021，52(13)：4055-4063.

[18] 唐文文，陈 垣. 党参地上茎叶总黄酮提取工艺及其抗氧化活性[J]. 江苏农业科学，2021，49(17)：171-177.

[19] 杨豆豆. 党参叶化学成分和生理活性功能与资源化利用研究[D]. 兰州：甘肃农业大学，2021.

[20] 武志勇，张 悦，阿得力江·吾斯曼，等. 党参茎叶黄芪粉对鸡免疫增强作用的研究[J]. 畜牧与兽医，2019，51(11)：128-131.

[21] 周 静. 党参低聚糖抗衰老作用研究及其润肤霜的研发[D]. 兰州：兰州大学，2021.

[22] 陈嘉婧，赵淑娟. 丹参次生代谢调控研究进展[J/OL]. 中成药，1-6. (2024-06-24) [2025-04-04]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1368.R.20240623>.

[23] 朱三明，郑敏敏，田 恬，等. 植物次生代谢途径与调控研究进展[J]. 植物生理学报，2023，59(12)：2188-2216.