基于差异代谢物筛选茶芎片的初加工方式Δ

何　宇[1*]，董燕婧[1]，秦　倩[1]，邬丹阳[1]，徐葱茏[2]，张寿文[1#]（1.江西中医药大学中药资源与民族药研究中心，南昌 330004；2.江西景德中药股份有限公司，江西 景德镇　333302）

中图分类号　R931.4；R917　　**文献标志码**　A　　**文章编号**　1001-0408（2025）11-1317-06
DOI　10.6039/j.issn.1001-0408.2025.11.05

摘　要　目的　基于差异代谢物筛选茶芎片的初加工方式，为茶芎的科学加工提供理论依据。**方法**　以趁鲜切制或传统加工的13组茶芎片为样品，采用超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱质谱联用技术对其进行代谢物的分析鉴定，通过多元统计分析筛选13组样品中的差异代谢物，分析水洗、浸润、干燥方式、干燥次数对样品中差异代谢物的相对表达量以及样品中羧酸及其衍生物含量（以此来反映总氨基酸含量）的影响。**结果**　主成分分析与偏最小二乘法-判别分析结果均显示，13组样品的组间差异显著。从13组样品中共筛选出688种差异代谢物，其中以羧酸及其衍生物类代谢物的占比最高。水洗处理后样品中磷脂酰胆碱的相对表达量显著上调，浸润处理后样品中色氨酸的相对表达量显著下调，50～60 ℃烘干处理后样品中补骨脂素的相对表达量显著上调，40 ℃烘干处理后样品中反式对甲氧基肉桂酸甲酯的相对表达量显著下调。水洗、浸润处理均可显著降低样品中总氨基酸含量，二次干燥可显著提升样品中总氨基酸含量，3种控温烘干方法可使样品中总氨基酸含量维持相对稳定。**结论**　茶芎片的最佳工艺流程为：新鲜茶芎在产地趁鲜切制，去泥后短时间内抢水洗，分别在切片前后进行2次40 ℃低温烘干。

关键词　茶芎；非靶向代谢组学；趁鲜加工；传统加工；差异代谢物；加工工艺

Screening of initial processing methods for *Ligusticum sinense* slice based on differential metabolites

HE Yu[1], DONG Yanjing[1], QIN Qian[1], WU Danyang[1], XU Conglong[2], ZHANG Shouwen[1]（1. Research Center for Chinese Medicinal Materials Resources and Ethnic Medicine, Jiangxi University of Chinese Medicine, Nanchang 330004, China; 2. Jiangxi Jingde Traditional Chinese Medicine Co., Ltd., Jiangxi Jingdezhen 333302, China）

ABSTRACT　OBJECTIVE To screen the primary processing methods of *Ligusticum sinense* slice based on differential metabolites, and provide theoretical basis for the scientific processing of *L. sinense*. **METHODS** Using 13 groups of *L. sinense* slice processed by fresh-cutting or traditional methods as samples, UHPLC-QE-MS was employed for metabolite identification. Multivariate statistical analysis was applied to screen differential metabolites among the 13 sample groups, analyzing the effects of washing, soaking, drying methods, and drying cycles on both the relative expressions of differential metabolites and the contents of carboxylic acids and their derivatives in the samples (to reflect the total amino acid content). **RESULTS** Principal component analysis and partial least squares-discriminant analysis both showed significant intergroup differences among the 13 sample groups. A total of 688 differential metabolites were screened from the 13 sample groups, with carboxylic acids and their derivatives showing the highest proportion. The relative expression levels of phosphatidylcholine significantly increased after washing treatment, while tryptophan expression significantly decreased after soaking treatment. Samples dried at 50-60 ℃ showed significantly increased expression of psoralen, whereas those dried at 40 ℃ showed significantly decreased expression of methyl-p-methoxycinnamate. Both washing and soaking treatments significantly reduced the total amino acid content in samples, while secondary drying significantly increased it. The three controlled-temperature drying methods maintained relatively stable total content of amino acids in samples. **CONCLUSIONS** The optimal processing protocol for *L. sinense* slice is as follows: fresh *L. sinense* slice should be freshly cut at the production site, undergo quick washing after soil removal, and be dried twice at 40 ℃ (before and after slicing).

KEYWORDS　*Ligusticum sinense*; untargeted metabolomics; fresh processing; traditional processing; differential metabolites; processing methods

Δ **基金项目** 中央本级重大增减支项目（No.2060302）；江西省中医药标委会2021年第一批标准化项目（No.2020A01）；江西中医药大学博士科研启动基金（No.2023BSZR025）

＊ **第一作者** 硕士研究生。研究方向：中药资源开发与利用。E-mail：heyu7397@163.com

通信作者 教授，博士生导师，博士。研究方向：中药资源开发与利用。E-mail：wtzsw@163.com

茶芎古称抚芎，为伞形科植物茶芎 *Ligusticum. sinense* Oliv. cv. Chaxiong 的干燥根茎，具有活血行气、祛风止痛的功效[1]。茶芎传统加工要求的浸润操作可能存在局限性，且加工过程中水洗、干燥次数、干燥方式等工艺也无定则，不能稳定地控制成品质量。趁鲜切制是指中药材不经浸润等二次处理，采收完直接在产地切制并干燥成饮片[2]。趁鲜切制不改变药材性质，却能减少加工工序和成本，提高饮片生产效率，该切制方式已被证实在细辛、人参等根及根茎类药材中有一定适用性[3—4]。由此可见，研究茶芎产地趁鲜切制工艺并与传统加工模式进行对比，证实其生产适用性，对茶芎的质量控制具有重要意义。

非靶向代谢组学通过在特定条件下定量筛选代谢物的种类与含量，能够大范围地捕捉、鉴定样品中的小分子物质，已被广泛运用于中药材品质评价等领域[5—6]。2008年版《江西省中药饮片炮制规范》只将总灰分、酸不溶性灰分、阿魏酸含量等作为茶芎质控指标，不能较好地反映茶芎饮片质量[7]。而非靶向代谢组学则可以更加全面、动态地反映茶芎在初加工过程中的生理变化。基于此，本研究拟通过超高效液相色谱-四极杆-静电场轨道阱质谱联用（UHPLC-QE-MS）技术，对采用传统及趁鲜切制工艺制备的茶芎片进行代谢组学分析，通过解析其代谢差异物筛选出最佳的工艺流程，为江西特色药材茶芎的科学加工提供理论依据。

1 材料

1.1 主要仪器

本研究所用主要仪器包括：Q-ExactivePlus 型质谱仪、SuperModulyo 型冷冻干燥机（美国 Thermo Fisher Scientific 公司），NexeraX2LC-30AD 型超高压液相色谱仪（日本 Shimadzu 公司），GZX-9076MBE 型电热鼓风干燥机（上海博迅实业有限公司），LT-DHC160 型高速冷冻离心机[立德泰勃（上海）科学仪器有限公司]，350-8519 型万分之一分析天平（长沙湘平科技发展有限公司），KQ-200KDB 型高功率数控超声清洗器（昆山市超声仪器有限公司）。

1.2 主要药品与试剂

新鲜茶芎植株于2023年7月6日采自江西省武宁县鲁溪镇北屏村（东经115°11′35.246″，北纬29°28′43.957″），本研究所用样品经江西中医药大学中药资源与民族药研究中心慕泽泾副研究员鉴定为真品。乙腈、甲醇、甲酸均为质谱纯，水为超纯水。

2 方法

2.1 不同方式加工样品制备

选取长势相近的健康茶芎植株，除去地上部分作为待处理样品。将待处理样品分为“趁鲜切制”和“传统加工”2类，去泥后，以水洗、浸润、干燥次数、干燥方式等处理差异细分为13组样品（C1～C13），每组6个重复。切片时茶芎厚片的厚度均为3～4 mm，均晾至表面无水汽（约3 h）[8]后再干燥。加工后饮片打粉过4号筛，备用。茶芎样品的加工方式详见表1。

表1 茶芎样品的加工方式

编号	具体处理程序	加工方式
C1	抢水洗干净，切厚片，晾至表面无水汽，晒干	趁鲜切制
C2	抢水洗干净，切厚片，晾至表面无水汽，40 ℃烘干	趁鲜切制
C3	抢水洗干净，切厚片，晾至表面无水汽，50 ℃烘干	趁鲜切制
C4	抢水洗干净，切厚片，晾至表面无水汽，60 ℃烘干	趁鲜切制
C5	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，晒干	趁鲜切制
C6	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，40 ℃烘干	趁鲜切制
C7	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，50 ℃烘干	趁鲜切制
C8	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，60 ℃烘干	趁鲜切制
C9	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，常温[（25±5）℃]真空干燥	趁鲜切制
C10	不清洗，晒至半干，切厚片，晾至表面无水汽，再晒干	趁鲜切制
C11	不清洗，晒至半干，浸润90 min后，切厚片，晾至表面无水汽，再晒干	传统加工
C12	不清洗，炕至半干，浸润90 min后，切厚片，晾至表面无水汽，再炕干	传统加工
C13	不清洗，切厚片，晾至表面无水汽，冷冻（−30 ℃）干燥	趁鲜切制

2.2 供试品溶液及质控样品溶液的制备

精密称取样品0.050 g，投入5 mm钨珠，加200 μL预冷的甲醇-水（4∶1，*V*/*V*）溶液并混匀，在研磨机中（频率65 Hz）研磨1 min；再加800 μL预冷的甲醇-水（4∶1，*V*/*V*）溶液并混匀，冰浴中超声（频率40 kHz，功率480 W）1 h，−20 ℃静置1 h，然后在4 ℃下以14 000×*g*离心20 min，回收上清液并浓缩至干燥。质谱测定时加入200 μL预冷的甲醇-水（1∶1，*V*/*V*）溶液复溶，4 ℃下以20 000×*g*离心15 min，取上清液得质量浓度为250 mg/mL的供试品溶液。每份供试品溶液移取50 μL并混匀，作为质控（quality control，QC）样品溶液。

2.3 色谱条件

采用ACQUITY UPLC®HSS T3（2.1 mm×100 mm，1.8 μm）色谱柱，以0.1%甲酸水溶液（A）-乙腈（B）为流动相进行梯度洗脱（0～2 min，100%A；2～6 min，100%A→52%A；6～10 min，52%A；10～12 min，100%B；12～12.1 min，100%B→100%A；12.1～15 min，100%A）；柱温为40 ℃；流速为0.3 mL/min；进样量为2 μL。

2.4 质谱条件

采用加热电喷雾电离（heated electrospray ionization，HESI）离子源，在正、负离子模式下检测，喷雾电压为正离子3.8 kV、负离子3.2 kV；毛细管温度为320 ℃；鞘气流速为30 arb，辅助气流速为5 arb；探针加热器温度

为350 ℃；S-Lens射频水平为50；检测范围为质荷比（*m/z*）70～1 050；MS分辨率为70 000（*m/z* 200），MS^2分辨率为17 500（*m/z* 200）；MS的最大注入时间为100 ms，MS^2的最大注入时间为50 ms。

2.5 样品测定

将13组样品按“2.2”项下方法制备供试品溶液，然后按“2.3”“2.4”项下色谱、质谱条件进样测定，每进样6个待测样品后注入1次空白样品溶液（75%乙腈水溶液）和QC样品溶液。

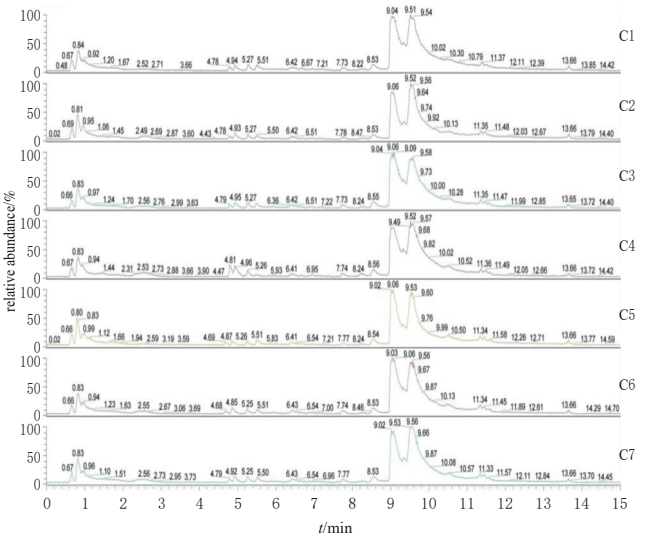
2.6 数据分析

采用MS-DIAL软件对原始数据进行峰对齐、峰面积提取和保留时间校正后，将数据导入Markerview 1.2.1软件进行去噪、峰提取、峰对齐、峰识别和归一化等数据预处理。通过二级谱图匹配（质量偏差＜0.01 Da）和精确质量数匹配（质量偏差＜10 ppm）初步鉴定代谢物结构，通过检索质谱数据库（https://massbank.eu/）、人类代谢组数据库（http://www.hmdb.ca）等公共数据库进一步确认代谢物准确信息。以SIMCA 13.0软件进行多元统计分析，包括偏最小二乘法-判别分析（partial least squares discriminant analysis，PLS-DA）和主成分分析（principal component analysis，PCA）。基于PLS-DA模型获得变量重要性投影（variable importance in projection，VIP）值，基于*t*检验分析各代谢物在13组样品中的差异并得到*P*值，然后以VIP＞1、*P*＜0.05为标准筛选差异代谢物。采用聚类分析识别相似的初加工模式，通过分析VIP值排前50名的差异代谢物的相对表达量来解析代谢谱的显著性差异特征。两组间比较时，基于组间差异变化倍数（fold change，FC）和相应代谢集的PLS-DA模型得到VIP值，筛选符合FC＜1/1.5或FC＞1.5/1，且VIP＞1、*P*＜0.05的两组间差异代谢物，分别从水洗（C1 vs. C5）、浸润（C11 vs. C10）、干燥方式（C5 vs. C6、C5 vs. C7、C5 vs. C8、C5 vs. C9、C5 vs. C13）、干燥次数（C5 vs. C10）角度进行两组样品间的单变量统计分析。由于羧酸及其衍生物含量决定了总氨基酸含量，而氨基酸可作为茶芎代谢组的主要活性物质[9]，因此，本研究以羧酸及其衍生物在两组间代谢集的上调差异代谢物中的比例变化反映样品中总氨基酸含量，分别考察水洗、浸润、干燥次数、干燥方式等处理对茶芎片综合质量的影响。

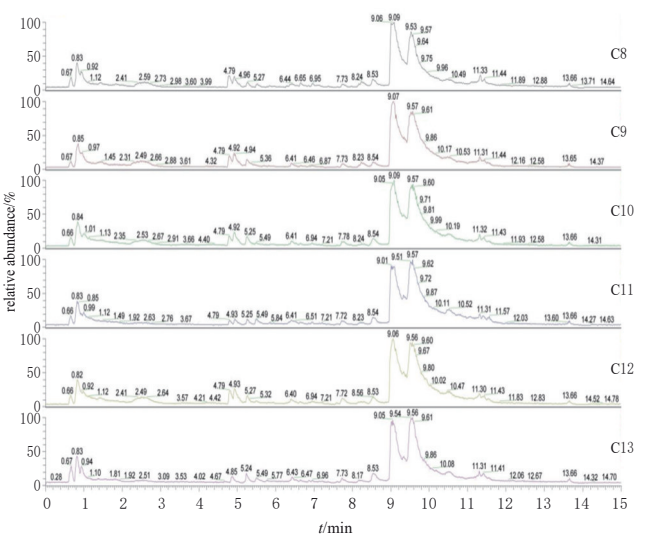
3 结果

3.1 代谢物检测结果

在正、负离子模式下与数据库匹配的代谢物分别有1 256、528个。由于在正离子模式下匹配到的代谢物完全覆盖了在负离子模式下得到的代谢物，且在多元统计分析中正离子模式下检测到的参数预测性和可信度较负离子模式下更高，故本研究在后续的统计分析中均采用正离子模式下获得的数据。各样品在正离子模式下的总离子流图见图1。



A.样品C1～C7



B.样品C8～C13

图1 各样品在正离子模式下的总离子流图

3.2 PCA结果

PCA结果（图2）显示，同组样品基本相互聚集，不同组样品呈现明显分离趋势。这说明同组样品的代谢成分均一性控制良好，不同组样品的代谢成分存在较大差异。QC样品成分相近，在PCA得分图中心处汇聚，表明测定过程中无明显误差，方法稳定性及样品代谢组数据稳定性均良好。

3.3 不同样品间差异性比较

PLS-DA得分图（图3）显示，因变量可解释率（R^2Y）、模型预测能力（Q^2）分别为0.987和0.95，均接近1，说明

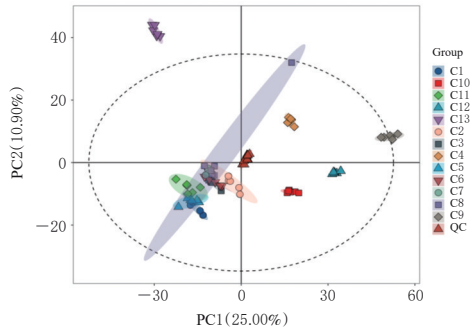


图2　不同初加工方式茶芎片的代谢物PCA得分图

模型稳定性和预测性良好。结果显示，13组样品间分离较明显。

为避免建模时过拟合，本研究通过置换检验对PLS-DA模型进行验证，结果（图4）显示，R^2始终大于Q^2且Q^2回归线截距为−0.56<0.5，左端任一R^2、Q^2值均小于右端原始值，说明模型未出现过拟合现象，保证了模型的有效性。

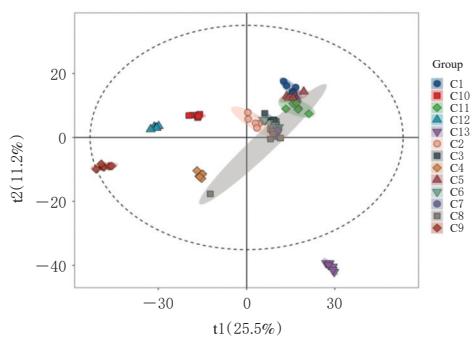


图3　不同初加工方式茶芎片的代谢物PLS-DA得分图

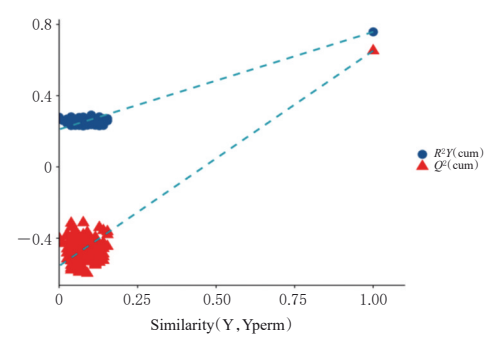


图4　不同初加工方式茶芎片的代谢物PLS-DA置换检验图

3.4　差异代谢物的筛选

结合总离子流图中各成分的出峰时间，*m/z*及一、二级离子碎片等信息，比对对照品、数据库和参考文献[10]，根据筛选标准，在13组茶芎片中共筛选得到688种差异代谢物。其中，羧酸及其衍生物类差异代谢物的占比最高（86/688，12.50%），该类成分也是茶芎提供营养、发挥疗效的关键成分[9]。VIP值排前20名的差异代谢物信息见表2。

表2　不同加工方式茶芎片中VIP值排前20名的差异代谢物信息

代谢物名称	保留时间/min	*m/z*	分子式	加和离子	VIP值	−lg*P*	化合物类别
苯并呋喃	7.743	119.05	C_8H_6O	$[M+H-H_2O]^+$	1.652	24.88	苯并呋喃类
磷脂酰胆碱(18:0/18:2)	11.154	786.60	$C_{44}H_{84}NO_8P$	$[M+H]^+$	1.599	37.55	甘油磷脂类
二甲基秦皮素	7.524	237.08	$C_{12}H_{12}O_5$	$[M+H]^+$	1.571	16.99	香豆素及其衍生物类
2,2′-联呋喃	7.743	135.04	$C_8H_6O_2$	$[M+Na]^+$	1.546	23.27	杂环芳香族化合物类
2-羟基腺苷	5.644	284.09	$C_{10}H_{13}N_5O_5$	$[M+H]^+$	1.544	25.33	嘌呤核苷类
3-甲氧基酪氨酸	4.794	212.09	$C_{10}H_{13}NO_4$	$[M+H]^+$	1.528	21.91	羧酸及其衍生物类
磷脂酰胆碱(16:0/20:5)	11.192	808.58	$C_{46}H_{82}NO_8P$	$[M+H]^+$	1.514	23.51	甘油磷脂类
佛手柑内酯	8.262	217.05	$C_{12}H_8O_4$	$[M+H]^+$	1.496	34.27	香豆素及其衍生物类
磷脂酰乙醇胺(18:0/18:1)	11.300	746.57	$C_{41}H_{80}NO_8P$	$[M+H]^+$	1.484	19.97	甘油磷脂类
松柏醛	6.876	179.07	$C_{10}H_{10}O_3$	$[M+H]^+$	1.482	34.86	酚类
甲氧沙林	7.971	217.05	$C_{12}H_8O_4$	$[M+H]^+$	1.474	47.99	香豆素及其衍生物类
γ-谷氨酰苯丙氨酸	5.481	295.13	$C_{14}H_{18}N_2O_5$	$[M+H]^+$	1.473	42.81	羧酸及其衍生物类
3,4′,5-联苯三醇	11.359	201.05	$C_{12}H_{10}O_3$	$[M-H]^-$	1.471	17.60	苯及其取代衍生物类
灰霉菌素	7.634	295.15	$C_{16}H_{22}O_5$	$[M+H]^+$	1.461	39.12	有机含氧化合物类
磷脂酰胆碱(16:0/18:1)	11.300	760.58	$C_{42}H_{82}NO_8P$	$[M+H]^+$	1.455	15.22	甘油磷脂类
反式对甲氧基肉桂酸甲酯	8.440	193.09	$C_1H_{12}O_3$	$[M+H]^+$	1.440	16.49	肉桂酸及其衍生物类
吲哚-3-甲醛	5.262	146.06	C_9H_7NO	$[M+H]^+$	1.432	15.83	吲哚及其衍生物类
磷脂酰胆碱(16:0/16:0)	11.018	734.57	$C_{40}H_{80}NO_8P$	$[M+H]^+$	1.431	17.66	甘油磷脂类
补骨脂素	7.854	187.04	$C_{11}H_6O_3$	$[M+H]^+$	1.429	30.53	香豆素及其衍生物类
色氨酸	5.262	205.10	$C_{11}H_{12}N_2O_2$	$[M+H]^+$	1.420	18.00	羧酸及其衍生物类

3.5　聚类分析及差异代谢物相对表达量分析结果

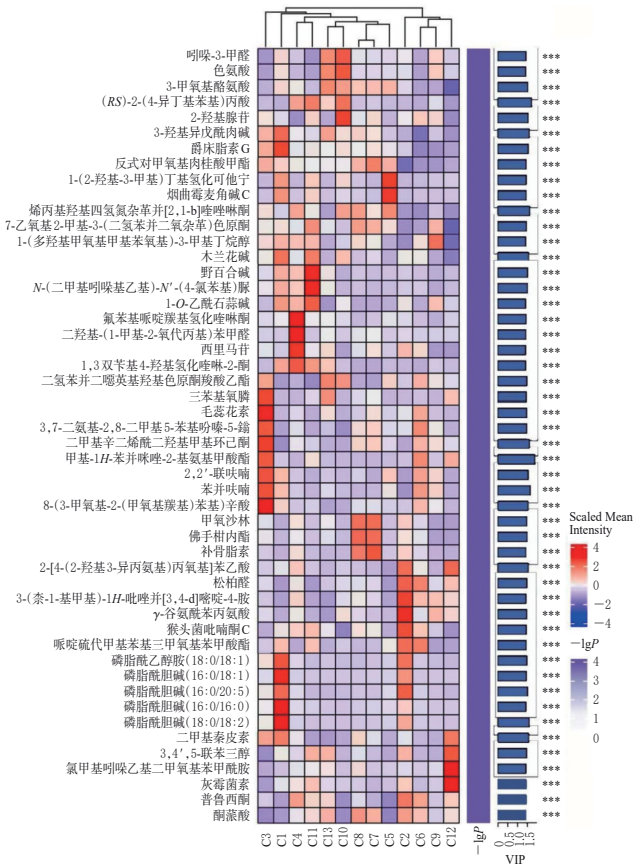
选取VIP值排前50名的差异代谢物绘制层次聚类热图（图5）。结果显示，13组样品被划分为2类：C2、C6、C9、C12聚为较为紧凑的一类，其余组样品聚为较为分散的另一类。该结果说明，C2、C6、C9、C12这4组样品具有高度同质的生物学特性。

13组样品间VIP值排前50名的差异代谢物的相对表达量差异显著。水洗组（C1）样品中磷脂酰胆碱的相对表达量显著高于不清洗组（C5），其中以磷脂酰胆碱（16:0/16:0）的相对表达量差异最显著。不浸润组（C10）样品中色氨酸、吲哚-3-甲醛的相对表达量显著高于浸润组（C11）样品。50～60 ℃烘干（C7、C8）组样品中补骨脂素的相对表达量显著高于晒干（C5）、真空干燥（C9）、冷冻干燥（C13）组样品，其中以补骨脂素的相对表达量差异最显著；40 ℃烘干（C2）组样品中反式对甲氧基肉桂酸甲酯的相对表达量显著低于50～60 ℃烘干（C3、C4）组样品，γ-谷氨酰苯丙氨酸的相对表达量则显著高于后者。传统炕干（C12）组样品中3-甲氧基酪氨酸的相对表达量显著低于趁鲜切制组样品，灰霉菌素的相对表达量显著高于趁鲜切制组样品。

3.6　不同处理对两组样品间总氨基酸含量影响的分析

3.6.1　水洗处理对茶芎片中总氨基酸含量的影响

与不清洗组样品（C5）比较，水洗组样品（C1）中下调的差异代谢物有148个，其中羧酸及其衍生物类代谢物占比最高（33/148，22.30%）；水洗组样品中上调的差



***：对应差异代谢物在13组样品中的相对含量差异均有统计学意义，$P<0.001$。

图5　不同初加工方式茶芎片中VIP值排前50名的差异代谢物的层次聚类热图

异代谢物有155个，其中羧酸及其衍生物类代谢物仅占7.10%（11/155），相较其在下调差异代谢物中的比例降低了15.20百分点，表明水洗后样品中总氨基酸含量下降。

3.6.2　浸润处理对茶芎片中总氨基酸含量的影响

与不浸润组样品（C10）比较，浸润组样品（C11）中下调的差异代谢物有417个，其中羧酸及其衍生物类代谢物的占比最高（122/417，29.26%）；浸润组样品中上调的差异代谢物有294个，其中羧酸及其衍生物类代谢物的占比为9.18%（27/294），相较其在下调差异代谢物中的比例骤降了20.08百分点，表明浸润处理后样品中总氨基酸含量下降较多。

3.6.3　干燥次数对茶芎片中总氨基酸含量的影响

与一次干燥组样品（C5）比较，二次干燥组样品（C10）中下调的差异代谢物有278个，其中羧酸及其衍生物类代谢物的占比为11.51%（32/278）；二次干燥组样品中上调的差异代谢物有420个，其中羧酸及其衍生物类代谢物的占比最高（25.95%，109/420），相较其下调差异代谢物中的比例提升了14.44百分点，表明样品中总氨基酸含量随着干燥次数的增加而升高。

3.6.4　干燥方式对茶芎片中总氨基酸含量的影响

与晒干组（C5）比较，其他干燥方式组样品（C6～C9、C13）中羧酸及其衍生物类代谢物在差异代谢物中的上、下调比例依次为：40 ℃烘干组样品（C6）上调17.33%（61/352）、下调17.89%（34/190）；50 ℃烘干组样品（C7）上调17.65%（60/340）、下调17.07%（35/205）；60 ℃烘干组样品（C8）上调17.83%（51/286）、下调14.47%（23/159）；真空干燥组样品（C9）上调27.06%（141/521）、下调8.38%（29/346）；冷冻干燥组样品（C13）上调9.64%（35/363）、下调25.48%（92/361）。结果表明，3种烘干模式样品中总氨基酸含量均维持在较为稳定的水平，其中真空干燥可使样品中总氨基酸含量明显升高，冷冻干燥可使样品中总氨基酸含量明显降低。

4　讨论

本研究在进行聚类分析时发现，C2、C6、C9、C12组样品聚为相似度较高的一类。其中，C2、C6为40 ℃烘干组样品，加工时的温度略高于常温；C9为真空干燥组样品，其在室温下干燥；C12为传统炕干组样品，其加工温度在30～45 ℃。归纳上述4组样品共性，其干燥温度都控制在近似于常温的有限范围内。

通过分析差异代谢物的相对表达量在13组样品中的变化可知：（1）水洗处理（代表样品C1）可能因样品中磷脂酰胆碱类成分酶解反应的减少而使其相对表达量显著上调——该类成分具有疏水性[11]，水洗时其相应磷脂酶容易被冲掉；而磷脂酰胆碱有一定抗氧化作用，可以清除自由基以保护细胞[12]。这说明水洗增强了茶芎片的抗氧化潜力。（2）浸润处理（代表样品C10）可能因色氨酸合成相关酶的溶出而使样品中色氨酸的相对表达量显著下调，而色氨酸是茶芎有机酸的重要组分，属于人体必需氨基酸，可加快机体新陈代谢、增强免疫力[9]。这说明浸润处理减弱了茶芎片的保健功效。（3）50～60 ℃烘干处理（代表样品C7～C8）可能因高温烘干抑制了样品的氧化潮解进程，且补骨脂素的热稳定性较强[13]，故该类成分在50～60 ℃烘干处理样品中的相对表达量显著上调。据报道，补骨脂素能抑制恶性肿瘤细胞增殖[14]，这说明50～60 ℃烘干使茶芎片保留了一定的防癌生物活性。（4）40 ℃烘干处理（代表样品C2）使样品中反式对甲氧基肉桂酸甲酯的相对表达量显著下调。查阅PubChem数据库（https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/PubChem）发现，反式对甲氧基肉桂酸甲酯属于刺激性有害成分，易造成皮肤、呼吸道过敏。这说明40 ℃烘干

处理增进了茶芎片的炮制减毒效果，而相比之下，50～60 ℃高温烘干所得饮片安全性低于40 ℃烘干样品。(5)传统炕干茶芎片（代表样品C12）中灰霉菌素的相对表达量显著上调，而灰霉菌素对霉菌等多种真菌起生长抑制作用[15]。这说明传统炕干茶芎片更不易发霉，有利于在湿度较大环境下的长期保存。但是传统加工模式所得样品与趁鲜切制所得样品相比，其总氨基酸含量显著降低，其中以色氨酸尤为突出。

单变量统计分析发现，冷冻干燥所得样品与其他干燥模式所得样品相比，其总氨基酸含量显著降低，推测原因如下：一是冷冻干燥过程中，冰晶升华时产生的大量微观孔隙会破坏细胞结构，可能导致部分胞内代谢物随升华而析出[16]；二是冷冻可能会抑制部分关键酶活性，使结合型成分（如苷类）无法通过酶促反应转化为更多游离型成分（如苷元）[17]。真空干燥虽可使茶芎片中总氨基酸含量达到最高，但其高昂的处理成本不利于大规模推广，仅适用于实验室加工。茶芎初加工时，水洗处理是必要步骤，浸润处理则属于非必要步骤，但二者均可使茶芎片中总氨基酸含量显著下降，故应缩短水洗时间且尽量避免浸润；二次干燥样品中总氨基酸含量明显高于一次干燥样品，故应尽可能选择二次干燥处理。

综上，本研究筛选出的茶芎片加工条件为不浸润、少水洗、二次干燥、40 ℃烘干，对应的最佳工艺流程如下：新鲜茶芎应在产地趁鲜切制，去泥后短时间内抢水洗，分别在切片前后进行2次40 ℃低温烘干。

参考文献

[1] 江西省食品药品监督管理局. 江西省中药材标准：2014年版[M]. 上海：上海科学技术出版社，2014：220.

[2] 洪智慧，杜伟锋，李小宁，等. 中药材产地趁鲜加工的可行性及相关建议[J]. 中华中医药杂志，2021，36(1)：80-85.

[3] 何建暄，王浩，于子奇，等. 细辛趁鲜切制工艺优化[J/OL]. 天然产物研究与开发，2025：1-18[2025-01-16]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=TRCW20250116002.

[4] 徐梦丹，张雪晶，刘小康，等. 基于趁鲜切制与传统切制工艺的人参饮片质量评价分析[J]. 中草药，2023，54(8)：2437-2445.

[5] 董慧，赵晓燕，李晓贝，等. 贵州红托竹荪和冬荪的品质评价[J]. 食品科学，2024，45(20)：198-205.

[6] 吴红伟，李东辉，宋沁洁，等. 黄芪趁鲜切制饮片与传统饮片化学成分及体外抗氧化活性比较研究[J]. 中草药，2022，53(22)：7039-7047.

[7] 江西省食品药品监督管理局. 江西省中药饮片炮制规范：2008年版[M]. 上海：上海科学技术出版社，2009：107.

[8] 喻文，王梅，张德林，等. 基于多指标评价趁鲜加工川芎的质量[J]. 中成药，2021，43(8)：2109-2114.

[9] 郑鹏，黄敏，张金莲，等. 基于UPLC-Q-TOF-MS/MS技术的江西特产中药茶芎化学成分研究[J]. 天然产物研究与开发，2024，36(1)：52-62.

[10] 黄敏，张金莲，谢亚婷，等. 基于HPLC的茶芎指纹图谱和多成分含量测定方法研究[J]. 中药材，2023，46(11)：2778-2781.

[11] JASH A，HATAMI T，RIZVI S S H. Phosphatidylcholine solubility in supercritical carbon dioxide：experimental data，thermodynamic modeling，and application in bioactive-encapsulated liposome synthesis[J]. J Supercrit Fluids，2020，158：104720.

[12] 尹明雨，张彩霞，松冈亮辅，等. 卵磷脂的生物活性及其应用研究进展[J]. 包装工程，2020，41(13)：31-39.

[13] 樊海燕，廖堃，胡炜，等. 补骨脂素的热解动力学研究[J]. 中国中药杂志，2012，37(2)：207-211.

[14] 刘改廷，勾文峰，许飞飞，等. 补骨脂抗肿瘤作用机制研究进展[J]. 中草药，2024，55(10)：3529-3538.

[15] POULTON G A，WILLIAMS M E，MCMULLAN E E. Phacidin，a novel γ-pyrone fungal growth inhibitor from *Potebniamyces balsamicola* var boycei[J]. Tetrahedron Lett，1974，15(30)：2611-2614.

[16] 胡安阳，吕建秋，杜冰. 不同干燥方式对柚子皮粉加工特性及功能成分含量的影响[J]. 食品工业科技，2021，42(5)：170-176.

[17] 陈茹，陈成，杨兴鑫，等. 中药“发汗”炮制法的现代研究进展[J]. 中草药，2018，49(2)：489-493.

（收稿日期：2025-02-07　修回日期：2025-05-04）

（编辑：林　静）