

川芎产地加工一体化饮片与传统饮片品质系统对比研究

张岳川¹, 黎 智², 李 巧², 张定堃^{1,2}, 郑 川^{3,4*}, 贺亚男^{1*}

1. 成都中医药大学药学院, 西南特色中药资源国家重点实验室, 四川 成都 611137

2. 成都中医药大学天府中医药创新港 四川省经典名方二次创新开发工程研究中心, 四川 成都 611930

3. 成都中医药大学天府中医药创新港, 四川省天然小分子药物工程技术研究中心, 四川 成都 611930

4. 成都中医药大学附属医院, 代谢与慢病中医药防治四川省重点实验室, 四川 成都 610072

摘要: **目的** 系统对比不同加工技术对川芎 *Chuanxiong Rhizoma* 饮片品质的影响, 为优化川芎饮片生产工艺、提升品质提供科学依据。 **方法** 以饮片外观、质构特征、饮片挥发性成分种类、挥发油含量及种类、关键成分含量等为指标, 对比低温烘干饮片、真空干燥饮片、微波真空干燥饮片与传统饮片的差异。 **结果** 4 种川芎饮片的外观颜色具有明显差异, 传统饮片和真空干燥饮片呈深褐色, 低温烘干饮片和微波真空干燥饮片颜色稍浅, 且微波真空干燥饮片表面具有明显的裂隙, 扫描电子显微镜结果也显示其相较于其他 3 种工艺, 具有明显的类似蜂窝状孔隙。川芎挥发油分析结果显示, 挥发油含量为真空干燥饮片>传统饮片>微波真空干燥饮片>低温烘干饮片。饮片中的挥发性成分分析显示, 传统饮片挥发性成分种类最多, 其后依次是真空干燥、低温烘干和微波真空干燥饮片, 但是低温烘干饮片中特有挥发性成分最多。关键指标成分含量测定结果显示, 绿原酸、阿魏酸的含量为微波真空干燥饮片>低温烘干饮片>真空干燥饮片>传统饮片; 洋川芎内酯 I、正丁基苯酞含量为传统饮片>真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片; 洋川芎内酯 A、藁本内酯含量为真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片>传统饮片; 欧当归内酯 A 含量为真空干燥饮片>微波真空干燥饮片>低温烘干饮片>传统饮片, 7 种成分的总含量为真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片>传统饮片。 **结论** 相较于川芎传统工艺, 3 种趁鲜切制加工一体化工艺成分保留率更高、操作简便、周期更短, 具有替代传统加工的潜力, 真空低温干燥和微波真空干燥川芎切实可行。

关键词: 川芎; 传统饮片; 产地加工与炮制一体化; 微波真空干燥; 质构特征; 挥发油; 绿原酸; 阿魏酸; 洋川芎内酯 I; 正丁基苯酞; 洋川芎内酯 A; 藁本内酯; 欧当归内酯 A

中图分类号: R283.6 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2025)23-8548-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2025.23.008

Comparative study on quality of *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces processed by traditional and integrated processing methods

ZHANG Yuechuan¹, LI Zhi², LI Qiao², ZHANG Dingkun^{1,2}, ZHENG Chuan^{3,4}, HE Yanan¹

1. State Key Laboratory of Southwestern Chinese Medicine Resources, School of Pharmacy, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611137, China

2. Sichuan Provincial Engineering Research Center of Innovative Re-development of Famous Classical Formulas, Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611930, China

3. Sichuan Provincial Engineering Technology Research Center of Natural Small Molecule Drug, Tianfu TCM Innovation Harbour, Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 611930, China

4. TCM Prevention and Treatment of Metabolic and Chronic Diseases Key Laboratory of Sichuan Province, Hospital of Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, Chengdu 610072, China

Abstract: Objective To systematically compare the effects of different processing technologies on the quality of *Chuanxiong*

收稿日期: 2025-07-17

基金项目: “四川省科技计划资助”项目 (2023NSFSC1994); 成都市技术创新研发项目 (2025-YF05-00595-SN)

作者简介: 张岳川, 男, 硕士研究生, 研究方向为中药理论及应用研究。E-mail: zhangyuechuan@stu.cdutcm.edu.cn

*通信作者: 郑 川, 男, 博士, 教授, 研究方向为中医芳香免疫学与中医药抗肿瘤基础研究。E-mail: zhengchuan@cdutcm.edu.cn

贺亚男, 女, 博士, 副教授, 研究方向为中药炮制与制剂。E-mail: heyanan@stu.cdutcm.edu.cn

(*Chuanxiong Rhizoma*) decoction pieces, so as to provide a scientific basis for optimizing the production process and improving the quality of *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces. **Methods** Taking the appearance, textural characteristics, types of volatile components, content and types of volatile oil, and the content of key components of the decoction pieces as indicators, compare the differences among low-temperature dried decoction pieces, vacuum-dried decoction pieces, microwave vacuum-dried decoction pieces, and traditional *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces. **Results** There were significant differences in the appearance color among the four types of *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces. *Chuanxiong Rhizoma* processed by the traditional method and vacuum-drying method showed a dark brown color, while those processed by low-temperature drying and microwave vacuum-drying methods had a slightly lighter color. Moreover, the *Chuanxiong Rhizoma* processed by microwave vacuum-drying had obvious cracks on its surface. Scanning electron microscopy results also revealed that it had distinct honeycomb-like pores compared with the other three processing methods. The analysis results of *Chuanxiong Rhizoma* volatile oil showed that the content of volatile oil followed the order: vacuum low-temperature dried decoction pieces > traditional decoction pieces > microwave vacuum-dried decoction pieces > low-temperature dried decoction pieces. Analysis of the volatile components in the decoction pieces revealed that the traditional processed *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces contained the highest variety of volatile components, followed by those processed via vacuum low-temperature drying, low-temperature drying, and microwave vacuum drying, respectively. However, the low-temperature dried decoction pieces contained a higher number of unique volatile compounds. The determination results of the content of key indicator components showed that the content of chlorogenic acid and ferulic acid followed the order: microwave vacuum-dried decoction pieces > low-temperature dried decoction pieces > vacuum-dried decoction pieces > traditional decoction pieces; the content of senkyunolide I and 3-*n*-butylphthalide followed the order: traditional decoction pieces > vacuum-dried *Chuanxiong Rhizoma* > low-temperature dried decoction pieces > microwave vacuum-dried decoction pieces; the content of senkyunolide A and ligustilide followed the order: vacuum-dried decoction pieces > low-temperature dried decoction pieces > microwave vacuum-dried decoction pieces > traditional decoction pieces; the content of levistolide A followed the order: vacuum-dried decoction pieces > microwave vacuum-dried decoction pieces > low-temperature dried decoction pieces > traditional decoction pieces. The total content of the seven components followed the order: vacuum low-temperature dried decoction pieces > low-temperature dried decoction pieces > microwave vacuum-dried decoction pieces > traditional decoction pieces. **Conclusion** Compared with the traditional *Chuanxiong Rhizoma* processing method, the three integrated methods of fresh-cutting and processing have higher component retention rates, simpler operations, and shorter processing cycles, showing the potential to replace the traditional processing method. Vacuum low-temperature drying and microwave vacuum drying of *Chuanxiong Rhizoma* are indeed feasible.

Key words: *Chuanxiong Rhizoma*; traditional decoction pieces; integration of producing area processing and concoction; microwave vacuum drying; texture characteristics; volatile oil; chlorogenic acid; ferulic acid; senkyunolide I; 3-*n*-butylphthalide; senkyunolide A; ligustilide; levistolide A

川芎 *Chuanxiong Rhizoma* 为著名的川产道地药材, 其味辛、性温, 具有活血行气、祛风止痛的功效, 广泛应用于心脑血管疾病及妇科疾病的治疗。《中国药典》2025 年版规定川芎药材加工为夏季当茎上的节盘显著突出, 并略带紫色时采挖, 除去泥沙, 晒后烘干, 再去须根, 饮片炮制方法为除去杂质, 分开大小, 洗净, 润透, 切厚片, 干燥^[1]。

课题组在产地调研时发现, 川芎药材加工主要由药农完成, 尤其是晒后烘干环节, 部分药农直接省去烘干步骤, 或直接采用烘床炕干, 加工过程随意不规范, 加之晒干过程中易受光照、温湿度波动等因素影响, 高温炕干可能破坏热敏性活性物质, 导致川芎质量不稳定, 批次间质量差异大。此外, 传统川芎加工从鲜药到饮片, 需经过 2 次热处理和 1 次水润处理, 不仅延长生产周期, 增加成本, 也

易造成污染和有效成分损失, 进而影响到临床用药的安全性和有效性^[2-3]。近年来, 随着中药现代化进程的推进, 中药材产地加工与饮片炮制一体化(加工一体化)因其缩短生产链、降低中间环节污染及成分流失的优势备受关注^[4]。已有学者对川芎加工一体化工艺进行研究, 发现川芎水分晾晒至含水量为 28%, 切 2 mm 厚片, 置干燥箱内 50 ℃烘干(约 6 h), 有效成分含量且药效与传统饮片相近^[5]。同时还有学者发现川芎趁鲜切制, 再晒干或烘干, 川芎片的外观性状和质量均较佳^[3]。

随着干燥技术不断发展, 真空低温干燥、微波真空干燥^[6]等新型技术已在中药材干燥领域广泛应用, 展现出独特的优势和良好的应用前景。相较于烘箱烘干, 真空低温干燥可有效保留药材中的热敏性成分, 缩短干燥周期, 使饮片保持较好的外观性

状^[7]。微波真空干燥则可使饮片快速、均匀干燥，相较于传统烘干，其干燥速率可提升 4 倍以上，且能保持药材原有的成分及色、香、味等特色^[8]。而这 2 项加工技术在川芎趁鲜切加工一体化中鲜有报道，其加工的川芎饮片与传统饮片有何差异也尚未有相关研究。为此，本研究以饮片性状特征、有效成分含量以及挥发性成分作为指标，系统对比低温干燥、真空低温干燥、微波真空干燥与传统炮制的差异，探究真空干燥、微波真空干燥在川芎趁鲜切制加工一体化的可行性。

1 仪器与材料

1.1 仪器

Rapid TA 型质构仪，上海腾拔仪器科技有限公司；BSA124S 型万分之一分析天平、BT125D 型十万分之一分析天平，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；WBZ-60 型微波真空干燥机，贵阳新奇微波工业有限责任公司；Ultimate 3000 型高效液相色谱仪，美国 Thermo Fisher Scientific 公司；Zorbax Extend C₁₈ 柱（250 mm×4.6 mm，5 μm），安捷伦科技有限公司；Axio Imagerm2 EVO10 型扫描电子显微镜（SEM），德国 Zeiss 公司；KQ500DE 型数控超声波清洗机，昆山市超声仪器有限公司；MH-1000 型调温型电热套，北京科伟永兴仪器有限公司；岛津三重四极杆型气相色谱质谱联用仪 GCMS-TQ8050 NX、SPME arrow 固相萃取头（DVB/CAR/PDMS），美国 Supelco 公司。

1.2 材料

川芎于 2024 年 5 月采集于四川省彭州市敖平镇，经成都中医药大学药学院张定堃教授鉴定，为伞形科藁本属植物川芎 *Ligusticum chuanxiong* Hort. 的干燥根茎。对照品藁本内酯（批号 CHB240107）、洋川芎内酯 I（批号 CHB231010）、绿原酸（批号 CHB231010）、洋川芎内酯 A（批号 CHB230522）、正丁基苯酞（批号 CHB240401）和欧当归内酯 A（批号 CHB240526），质量分数≥98.0%，均购于成都克洛玛生物科技有限公司；对照品阿魏酸，批号 110773-202316，质量分数≥98.0%，中国食品药品检定研究院；乙腈，批号 CH-A998-4，上海泰坦科技股份有限公司；色谱纯冰乙酸，批号 2020081901，成都市诺尔施科技有限责任公司。SPF 级 SD 雌性大鼠，体质量（220±20）g，购自斯贝福（北京）生物技术有限公司，许可证号 SCXK（京）2024-0001，动物实验开展场所为成都中医药大学药

院，屏障环境，使用许可证 SYXK（川）2025-0294，实验室温度 20~26℃，相对湿度 40%~70%，12 h 明暗光照，自由进食饮水。动物实验经成都中医药大学实验动物福利伦理委员会审查，符合实验动物福利伦理相关法律法规和标准要求，审查号为 2025136。

2 方法与结果

2.1 不同川芎饮片的制备

川芎药材于 5 月夏季当茎上的节盘显著突出，并略带紫色时采挖，共制备出 4 种川芎饮片。

2.1.1 传统饮片 取鲜川芎，除去杂质和非药用部位，置于阴凉通风处阴干，得川芎药材。将上述川芎药材快速淋洗，洗去泥沙等杂质，加水，闷润至透心，切片（厚度为 2~4 mm），干燥，筛去碎屑，即得。

2.1.2 低温烘干饮片 取鲜川芎，除去杂质和非药用部位，快速淋洗后，置于阴凉通风处，去除表面水分，切片（厚度为 2 mm），50℃鼓风干燥 48 h，筛去碎屑，即得。

2.1.3 真空干燥饮片 取鲜川芎，除去杂质和非药用部位，快速淋洗后，置于阴凉通风处，去除表面水分，切片（厚度为 2 mm），50℃真空干燥 12 h，筛去碎屑，即得。

2.1.4 微波真空干燥饮片 取鲜川芎，除去杂质和非药用部位，快速淋洗后，置于阴凉通风处，去除表面水分，切片（厚度为 2 mm），50℃微波真空干燥 2 h，筛去碎屑，即得。

结果可见，4 种干燥工艺处理后的川芎都呈现出不规则的形状，切面有波状环纹，散生棕色油点（图 1）。颜色方面，尽管 4 种川芎饮片都是褐色，但是传统饮片和真空干燥饮片呈深褐色，低温烘干

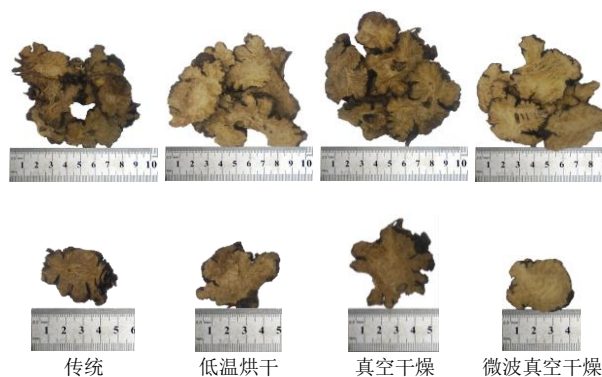


图 1 不同川芎饮片的外观性状

Fig. 1 Appearance traits of different *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces

饮片和微波真空干燥饮片颜色稍浅。表面纹理方面,传统饮片和低温烘干饮片表面裂隙较少,微波真空干燥饮片可明显观察到裂隙,这可能是由于水分快速蒸发造成。

2.2 不同川芎饮片的质地检测

在炮制过程中,川芎的特性发生了变化,为验证炮制工艺对川芎饮片质构的影响,进一步客观量化 4 种川芎饮片的质地,通过仪器探头以稳定速度对样品进行下压。下压时受到的阻力及阻力曲线以表示样品的感官评价参数,量化感官评价指标。以质构仪的探头下压至压缩饮片 50% 为标准进行力量 and 高度校正以确保准确度。将川芎饮片置于装置的支撑台上,用探头进行形变测试,以实验所测得曲线中触发点的力值代表硬度,探头压缩饮片回复的阻力曲线力值与时间的比值代表韧性,分别依次比较饮片的硬度、韧性,根据不同组别饮片的硬度和韧性进行统计分析。

硬度测定结果(表 1)表明,与传统饮片相比,低温烘干饮片和真空干燥饮片的硬度显著减少($P < 0.01$),微波真空干燥饮片硬度无显著性差异;与低温烘干饮片相比,真空干燥饮片无显著性差异,微波真空干燥饮片硬度显著增加($P < 0.01$);与真空干燥饮片相比,微波真空干燥饮片硬度显著增加($P < 0.01$)。韧性测定结果(表 1)表明,与传统饮片相比,低温烘干饮片韧性显著减少($P < 0.01$),真空干燥和微波真空干燥饮片无显著性差异;与低温烘干饮片相比,真空干燥和微波真空干燥饮片韧性显著增加($P < 0.01$);与真空干燥饮片相比,微波真空干燥饮片硬度无显著性差异。

2.3 SEM 观察

取 4 种川芎饮片的自然断面,用 SEM 对样品的

微观形貌进行观测。在导电胶上黏附小块样品使其自然断面向上并固定在载物台上进行喷金处理。以 5.0 kV 的加速电压观察样品的微观结构,放大率分别为 100、500、1 000、2 000 倍捕捉图像。SEM 结果表明(图 2),川芎在不同加工方法处理后微观结构存在明显差异。在 100× 放大倍数下,传统工艺的川芎表面相对较为平整,纹理较为简单。而其他 3 种工艺的川芎表面呈现出更复杂的纹理和层次。在 500× 放大倍数下,传统饮片和低温干燥饮片表面可以看到一些较为规则的纤维排列及淀粉颗粒状结构,而真空干燥及微波真空干燥饮片表面,出现了更多的孔隙、纤维断裂或者颗粒聚集等。进一步在 1 000× 和 2 000× 放大倍数下观察,发现微波干燥的川芎具有更多细小而密集的孔隙。此外,传统工艺和低温干燥的川芎在不同放大倍数下,其表面的颗粒和纤维形态相对较为完整和规则。真空干燥及微波真空干燥饮片表面颗粒可能更加破碎,纤维也可能出现更多的断裂、扭曲或者重新排列的情况。以上研究结果说明,真空干燥与微波真空干燥饮片对比传统与低温干燥饮片,在微观结构上表现出更高的复杂性、更多的孔隙以及更显著的颗粒和纤维形态变化。

2.4 水分测定

取川芎饮片粉末(过四号筛) 20 g (约相当于含水 1~2 mL),按照《中国药典》2025 年版四部附录 0832 水分测定法第四法测定。水分测定结果显示为真空干燥饮片(10.99%) > 低温烘干饮片(9.69%) > 传统饮片(6.97%) > 微波真空干燥饮片(6.67%) ($P < 0.05$),其水分均小于 12.00%,满足《中国药典》2025 年版川芎项下中对药材与饮片的相关含量要求。

2.5 挥发油含量测定

取 4 种川芎饮片粉末(过四号筛) 500 g (相当于含挥发油 0.5~1.0 mL),按照《中国药典》2025 年版四部附录 2204 挥发油测定甲法对挥发油进行含量测定。挥发油含量结果显示为真空干燥饮片(0.33%) > 传统饮片(0.32%) > 微波真空干燥饮片(0.28%) > 低温烘干饮片(0.26%) ($P < 0.05$)。满足《中国药典》2025 年版川芎项下中对药材与饮片的相关含量要求。

2.6 HS-SPME-GC-MS 分析

精密称取 20 mg 川芎饮片粉末,置于 20 mL 惰性顶空瓶中。在 50 °C 平衡 5 min 后移至萃取装置中,

表 1 不同川芎饮片的硬度及韧性 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 1 Hardness and toughness of different processed slices of *Chuanxiong Rhizoma* ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

饮片	硬度/gf	韧性/(gf·s ⁻¹)
传统	19 311.33 ± 206.58	0.77 ± 0.06
低温烘干	16 936.93 ± 562.50**	0.63 ± 0.01**
真空干燥	16 780.57 ± 255.30**	0.77 ± 0.01##
微波真空干燥	19 361.63 ± 280.10###&	0.79 ± 0.01##

与传统饮片比较: ** $P < 0.01$; 与低温烘干饮片比较: ## $P < 0.01$;

与真空干燥饮片比较: && $P < 0.01$ 。

** $P < 0.01$ vs traditional decoction pieces; ## $P < 0.01$ vs low-temperature dried decoction pieces; && $P < 0.01$ vs vacuum-dried decoction pieces.

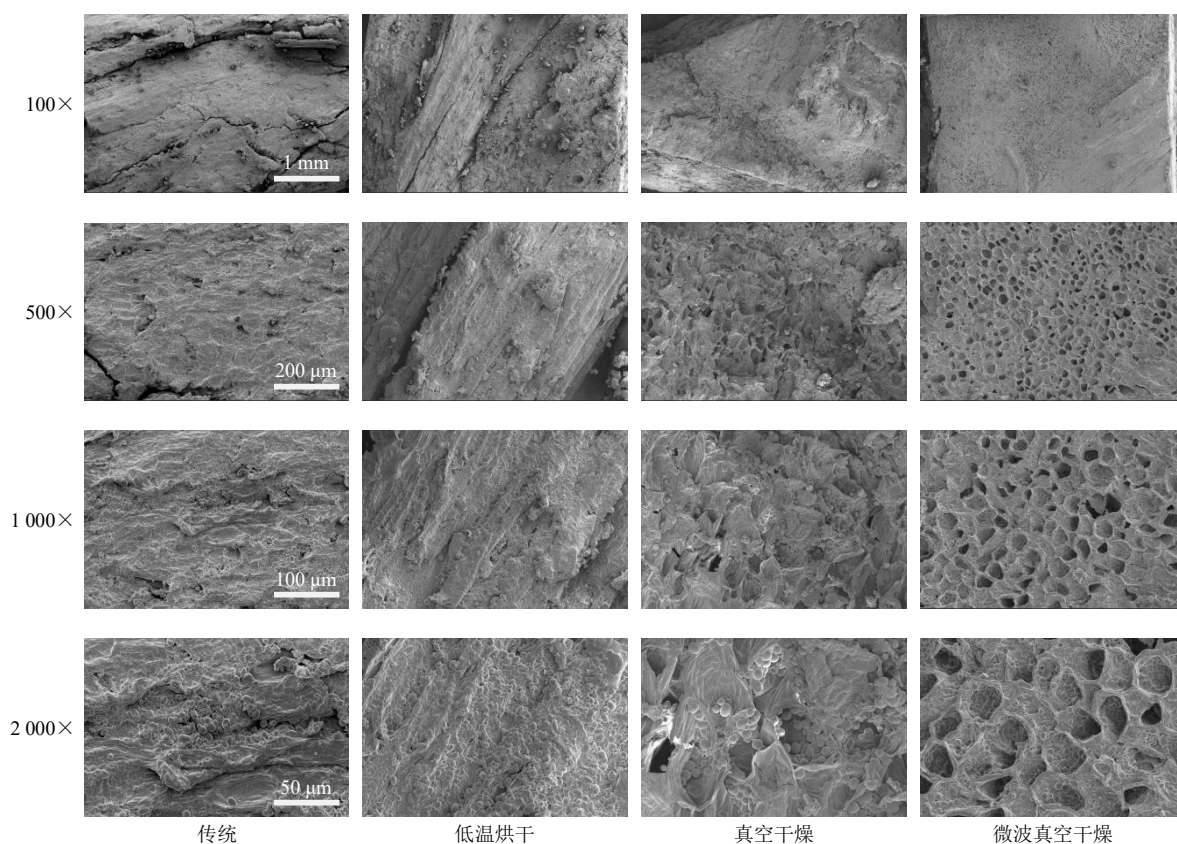


图 2 不同川芎饮片的 SEM 图片

Fig. 2 SEM images of different processed slices of *Chuanxiong Rhizoma*

SPME arrow 固相萃取头通过聚四氟乙烯顶空隔垫插入顶空瓶内,不接触样品,在 50 ℃下萃取吸附 15 min,自动进样器抽出萃取头后迅速插入 GC-MS/MS 进样口,于 250 ℃解吸 2 min。固相萃取头在进样前和进样后,于 250 ℃条件下各老化 3 min。

2.6.1 色谱条件 毛细管色谱柱为 SH-Polar Wax (60 m×0.25 mm, 0.25 μm),进样口温度 250 ℃,进样方式为分流进样,分流比 5:1,载气控制方式是恒线速度模式,线速度为 25.5 cm/s,载气为氦气,纯度为 99.999%,吹扫流量设定 3.0 mL/min,色谱柱温度采用程序升温,初始温度 40 ℃,保持 5 min,以 3 ℃/min 升温至 250 ℃,保持 15 min;色谱柱平衡时间 3.0 min。

2.6.2 质谱条件 离子化方式采用电子轰击电离(EI),离子化能量 70 eV,离子源温度 200 ℃,接口温度 250 ℃,碰撞气为氦气;质谱采集模式为全扫描模式(scan)扫描质量数范围为 m/z 35~500,检测器电压相对于调谐结果+0.1 kV,溶剂延迟时间 1 min。

2.6.3 数据分析 通过质谱与标准信息库 NIST23 对川芎中挥发性物质进行定性分析,保留匹配度>

80%的化合物。采用岛津 TQ8050 再分析软件内置的 Smart 香气数据库中的 523 条复合标准曲线进行定量比较。以各样品中成分相对含量和峰面积高低为比较标准,考察传统、低温烘干、真空干燥、微波真空干燥等加工方式对川芎饮片所含挥发性成分的影响。

2.6.4 4 种川芎饮片中成分分析结果 4 种饮片的总离子流图(图 3-A)。通过 HS-SPME-GC-MS 从 4 种川芎饮片粉末中共鉴定出 38 种挥发性成分(表 2),传统饮片鉴定出 30 种,低温烘干饮片和真空干燥饮片鉴定出 25 种,微波真空干燥饮片鉴定出 21 种。38 种挥发性成分中包含了 12 种烯类(31.58%)、7 种醇类(18.42%)、5 种酚类(13.16%)、4 种醛类(10.53%)、3 种酮类(7.89%)、2 种酸类(5.26%)、2 种内酯类(5.26%)、1 种酯类(2.63%)、1 种呋喃(2.63%)以及 1 种聚合物(2.63%)。

对 4 种川芎粉末的各挥发性成分总含量和相对含量进行了分析,结果(表 2)显示,各挥发性有机物总含量为低温烘干饮片(58.76 μg/g)>真空干燥饮片(55.92 μg/g)>传统饮片(45.48 μg/g)>微波真空干燥饮片(22.86 μg/g)。各挥发性有机物相对

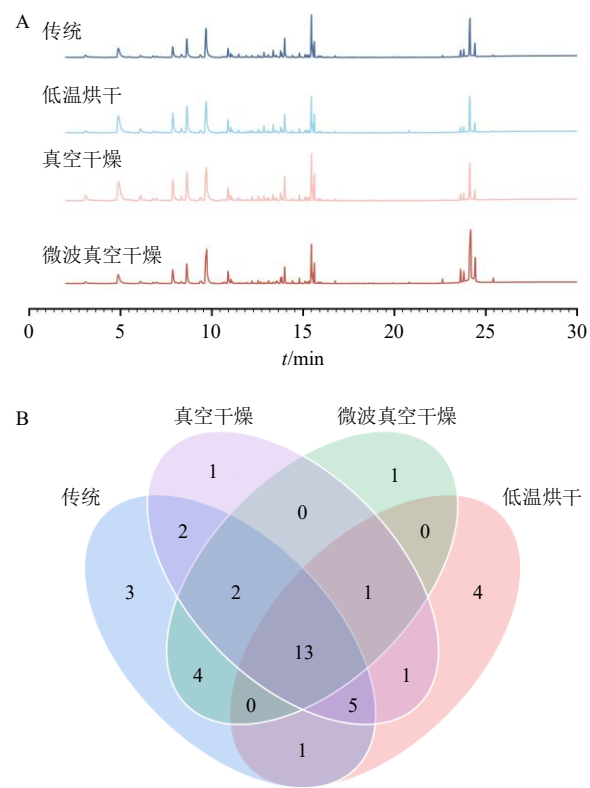


图 3 川芎饮片 HS-GC-MS 分析的总离子流图 (A) 和特有挥发性成分 (B)

Fig. 3 Total ion chromatogram (A) and unique volatile components (B) of HS-GC-MS analysis of Chuanxiong Rhizoma decoction pieces

表 2 川芎饮片挥发性成分种类和相对质量分数

川芎饮片样品	挥发性成分种类										挥发性成分相对含量/(μg·g ⁻¹)										总量
	烯	醇	酚	醛	酮	酸	内酯	酯	呋喃	聚合物	烯	醇	酚	醛	酮	酸	内酯	酯	呋喃	聚合物	
传统	8	5	5	2	3	2	3	0	1	1	20.85	0.69	0.84	0.06	0.24	18.79	3.96	0.00	0.02	0.04	45.48
低温烘干	11	3	5	1	0	1	3	1	0	0	34.84	0.69	1.40	0.03	0.00	17.61	4.11	0.09	0.00	0.00	58.76
真空干燥	9	5	4	2	0	2	3	0	0	0	31.85	0.97	0.89	0.07	0.00	18.36	3.80	0.00	0.00	0.00	55.92
微波真空干燥	7	6	4	1	1	0	1	0	0	1	20.95	0.67	0.46	0.07	0.07	0.00	0.56	0.00	0.00	0.08	22.86

种，真空干燥饮片精油鉴定出 45 种，微波真空干燥饮片精油鉴定出 29 种。113 种挥发性成分中包含了 48 种烯类 (42.48%)、16 种醇类 (14.16%)、9 种醛类 (7.96%)、5 种酮类 (4.42%)、15 种酸类 (13.27%)、5 种酚类 (4.42%)、6 种杂环类 (5.31%) 及 9 种烃类 (7.96%)。4 种精油含有 5 类相同成分，3 种精油含有 2 类相同成分，2 种精油含有 1 类相同成分。

对 4 种川芎精油的各挥发性成分总含量和相对含量进行了分析，结果 (表 3) 显示，各挥发性有机物总含量为低温烘干饮片精油 (11.51 μg/g) > 传统饮片精油 (9.12 μg/g) > 真空干燥饮片精油 (9.12

含量为低温烘干饮片 > 真空干燥饮片 > 传统饮片 > 微波真空干燥饮片，这表明低温烘干饮片保存了更多的挥发性成分。此外，传统饮片酮类、酸类和呋喃类成分的相对含量最高，低温烘干饮片烯类、酚类、酯类和内酯类成分的相对含量最高，真空干燥饮片醇类成分的相对含量最高，微波真空干燥饮片的醛类和聚合物类成分相对含量最高。

各饮片特有挥发性成分的种类数目也有所不同 (图 3-B)。图中重叠区的代表不同川芎饮片共有的化合物成分数量；而非重叠区的表示特有的化合物成分数量。4 种川芎饮片粉末中共鉴定出 13 种共有挥发性成分。传统饮片含有 3 种特有成分，包含了 2-正戊基呋喃、仲辛酮、顺-5-甲基-2-(1-甲基乙基)环己酮；低温烘干饮片含有 4 种特有成分，包含了双戊烯、醋酸辛酯、(Z)-β-罗勒烯、β-蒎烯；真空干燥饮片含有 1 种特有成分为 (E)-β-罗勒烯；微波真空干燥饮片含有 1 种特有成分为 (E)-2-十二烯-1-醇。

2.6.5 4 种川芎精油成分分析结果 精密移取精油样品 10 μL，加入 990 μL 醋酸乙酯溶解，取 50 μL 稀释液置于 20 mL 顶空瓶中，按照“2.6.1”“2.6.2”项下色谱和质谱条件进样测定。4 种精油的总离子流图见图 4-A。通过 HS-SPME-GC-MS 从 4 种川芎精油中共鉴定出 113 种挥发性成分 (表 3)，传统饮片精油鉴定出 41 种，低温烘干饮片精油鉴定出 37

μg/g) > 微波真空干燥饮片精油 (6.49 μg/g)。各挥发性有机物相对含量为低温烘干饮片精油 > 传统饮片精油 > 真空干燥饮片精油 > 微波真空干燥饮片精油，这表明低温烘干饮片精油保存了更多的挥发性成分。此外，传统饮片精油烯类成分的相对含量最高，低温烘干饮片精油醇类、烃类和杂环类成分的相对含量最高，真空干燥饮片精油酮类、酯类和酚类成分的相对含量最高，微波真空干燥饮片精油的醛类和酸类成分相对含量最高。

各精油特有挥发性成分的种类数目也有所不同 (图 4-B)。图中重叠区的代表不同川芎精油共有

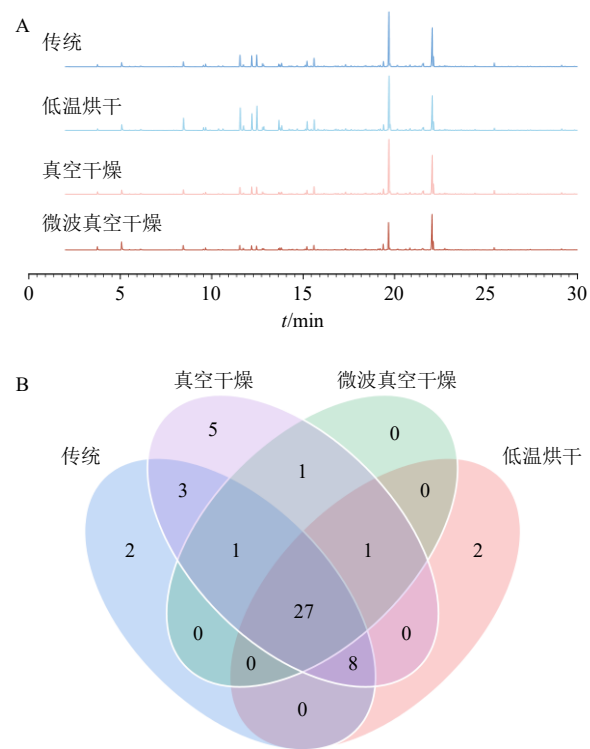


图 4 川芎精油 HS-GC-MS 分析的总离子流图 (A) 和特有挥发性成分 (B)

Fig. 4 Total ion chromatogram (A) and unique volatile components (B) of HS-GC-MS analysis of essential oil from *Chuanxiong Rhizoma*

表 3 川芎精油挥发性成分种类和相对质量分数

Table 3 Types and relative mass fractions of volatile components of essential oil from *Chuanxiong Rhizoma*

川芎精油样品	挥发性成分种类									挥发性成分相对含量/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)									总量
	烯	醇	醛	酮	酸	酯	酚	杂环	烃	烯	醇	醛	酮	酸	酯	酚	杂环	烃	
传统	14	9	6	1	1	4	3	2	1	6.87	0.25	1.04	0.00	0.12	0.08	0.20	0.02	0.53	9.12
低温烘干	14	8	3	1	1	4	3	2	1	5.04	4.52	0.75	0.00	0.06	0.07	0.22	0.03	0.83	11.51
真空干燥	14	11	6	1	1	6	3	2	1	2.72	4.37	1.16	0.01	0.13	0.08	0.28	0.01	0.35	9.12
微波真空干燥	14	6	1	1	1	2	2	1	1	2.42	1.88	1.46	0.01	0.20	0.05	0.27	0.01	0.20	6.49

照溶液。

2.7.4 色谱条件与系统适用性考察 采用 Ultimate 3000 型高效液相色谱仪；色谱柱为 Zorbax Extend C₁₈ (250 mm×4.6 mm, 5 μm) 柱；流动相为 0.5% 乙酸水溶液-乙腈，梯度洗脱：0~15 min, 10%乙腈；15~30 min, 10%~20%乙腈；30~35 min, 20%~30%乙腈；35~40 min, 30%~55%乙腈；40~45 min, 55%乙腈；45~55 min, 55%~95%乙腈；55~60 min, 95%乙腈；体积流量 1.0 mL/min；柱温 30 $^{\circ}\text{C}$ ；检测波长 285 nm；进样量 10 μL ；理论板数按阿魏酸峰计算不低于 4 000。

2.7.5 专属性考察 取混合对照品溶液、供试品溶

的化合物成分数量；而非重叠区的表示特有的化合物成分数量。由图可得，4 种川芎精油中共鉴定出 27 种共有挥发性成分。传统饮片精油含有 2 种特有成分，包含了芳樟醇、十二醛；低温烘干饮片精油含有 2 种特有成分，包含了 β -蒎烯、 α -石竹烯；真空干燥饮片精油含有 5 种特有成分，包含了 (*E*)-2-壬醛、*L*-薄荷醇、1-壬醇、乙酸苄酯、乙酸苯乙酯。

2.7 HPLC 测定不同川芎饮片中特征成分含量

2.7.1 供试品溶液的制备 取“2.1”项下各饮片适量，粉碎，过四号筛。取上述粉末约 0.5 g，精密称定，置于具塞锥形瓶中，精密加入 70%甲醇 40 mL，称定质量，加热回流 30 min，再次称定质量，用 70%甲醇补足减失的质量，摇匀，滤过，取续滤液，即得供试品溶液。

2.7.2 对照品溶液的制备 取绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酞、藁本内酯和欧当归内酯 A 对照品适量，精密称定，加 70%甲醇溶液，制成含绿原酸 0.075 mg/mL、阿魏酸 0.107 mg/mL、洋川芎内酯 I 0.182 mg/mL、洋川芎内酯 A 0.303 mg/mL、正丁基苯酞 0.257 mg/mL、藁本内酯 3.906 mg/mL 和欧当归内酯 A 0.092 mg/mL 的混合对照品溶液。

2.7.3 阴性对照溶液的制备 以 70%甲醇为阴性对

液和阴性对照溶液各适量，按照“2.7.4”项下色谱条件进样测定，记录色谱图，结果见图 5。空白溶液在混合对照品溶液中 7 种待测成分色谱峰出现的保留时间处未见信号峰出现，表明实验方法对 7 种待测成分的检测具有专属性。

2.7.6 线性关系考察 取混合对照品母液，再依次用 70%甲醇溶液按 2、5、10、20、50 倍稀释成不同质量浓度的标准溶液，以各对照品溶液质量浓度为横坐标 (*X*)，峰面积为纵坐标 (*Y*)，绘制标准曲线，进行线性回归，得回归方程：绿原酸 $Y=184.830X-0.0174$, $r=0.9999$, 线性范围 1.5~75.0 $\mu\text{g/mL}$ ；阿魏酸 $Y=298.600X-0.0332$, $r=0.9997$, 线性范围

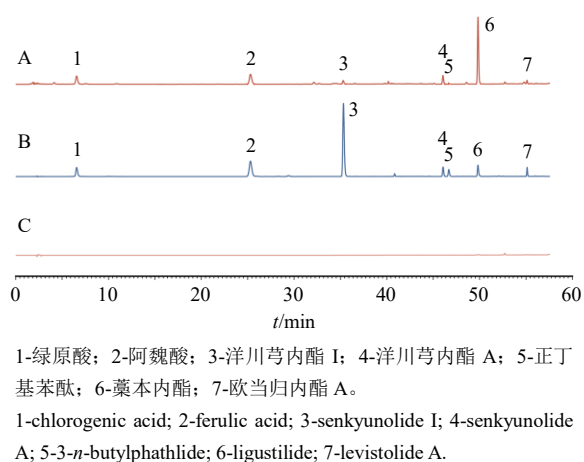


图 5 川芎供试品溶液 (A)、混合对照品溶液 (B) 和阴性对照溶液 (C) 的 HPLC 图

Fig. 5 HPLC of *Chuanxiong Rhizoma* test solution (A), mixed reference substances solution (B), negative control solution (C)

2.2~107.5 $\mu\text{g/mL}$; 洋川芎内酯 I $Y=650.150 X-0.1619$, $r=0.9999$, 线性范围 3.6~182.0 $\mu\text{g/mL}$; 洋川芎内酯 A $Y=34.129 X-0.0619$, $r=0.9999$, 线性范围 6.1~303.0 $\mu\text{g/mL}$; 正丁基苯酐 $Y=35.518 X-0.1182$, $r=0.9987$, 线性范围 5.1~257.0 $\mu\text{g/mL}$; 藁本内酯 $Y=14.010 X-0.8370$, $r=0.9999$, 线性范围 78.1~3906.2 $\mu\text{g/mL}$; 欧当归内酯 A $Y=69.068 X-0.0143$, $r=0.9999$, 线性范围 1.8~92.0 $\mu\text{g/mL}$ 。

2.7.7 精密度试验 取混合对照品溶液, 在“2.7.4”项色谱条件下, 连续进样测定 6 次, 记录各个色谱峰的峰面积。结果 7 种待测成分绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酐、藁本内酯、欧当归内酯 A 峰面积的 RSD 值分别为 2.31%、0.76%、0.19%、0.34%、0.26%、1.17%、3.67%, 均小于 5%, 表明该高效液相色谱仪精密度良好。

2.7.8 稳定性试验 取微波真空干燥饮片样品, 按照“2.7.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.7.4”项色谱条件下, 分别于室温下放置 0、2、4、8、12、24 h 时进样测定, 记录各个色谱峰的峰面积。结果 7 种待测成分绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酐、藁本内酯、欧当归内酯 A 在 24 h 内峰面积的 RSD 值分别为 1.30%、0.27%、0.87%、0.72%、1.41%、0.61%、1.02%, 均小于 3%, 表明供试品溶液在室温下放置 24 h 内稳定性良好。

2.7.9 重复性试验 取微波真空干燥饮片样品 6 份, 按照“2.7.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.7.4”项色谱条件下, 记录各个色谱峰的峰面积。

结果计算得 7 种待测成分绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酐、藁本内酯、欧当归内酯 A 质量分数的 RSD 值分别为 0.85%、0.67%、0.56%、0.59%、1.78%、0.64%、0.93%, 均小于 3%, 表明该测定方法的重复性良好。

2.7.10 加样回收率试验 取已测定指标成分含量的微波真空干燥饮片样品 6 份, 每份精密称定 0.25 g, 精密加入 7 种待测成分对照品溶液, 并按照“2.7.1”项下方法制备供试品溶液, 在“2.7.4”项色谱条件下进样测定, 记录峰面积并计算加样回收率。结果 7 种待测成分绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酐、藁本内酯、欧当归内酯 A 的平均加样回收率分别为 103.89%、107.72%、107.74%、103.35%、104.58%、100.96%、102.54%, RSD 值分别为 2.37%、2.05%、2.40%、2.36%、1.47%、2.62%、2.33%, 均小于 3%, 可用于 7 种待测成分含量测定。

2.7.11 样品含量测定 分别取“2.1”项下饮片, 粉碎, 过四号筛。取上述粉末约 0.5 g, 精密称定, 按“2.7.1”项下方法制备供试品溶液, 再按照“2.7.4”项下色谱条件进样测定, 记录峰面积并按标准曲线法计算其中待测成分的含量。各样品平行测定 3 次。将 4 种不同川芎炮饮片的 HPLC 图谱数据导入“中药色谱指纹图谱相似度评价系统软件”(2012 版), 结果见图 6。图谱结果中有 14 个共有峰, 与对照品色谱对比后, 确认按顺序 2、4、5、9、10、12、14 分别为绿原酸、阿魏酸、洋川芎内酯 I、洋川芎内酯 A、正丁基苯酐、藁本内酯和欧当归内酯 A。

4 种不同川芎饮片色谱峰整体形态一致, 未见

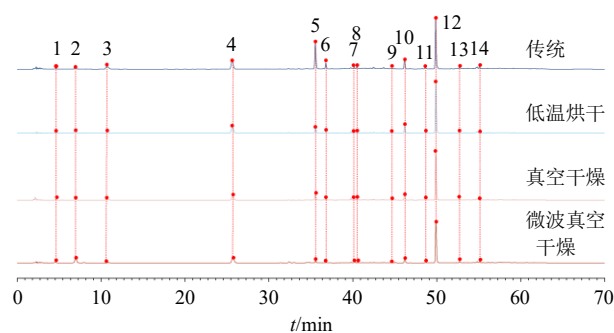


图 6 不同干燥方式川芎饮片的 HPLC 特征图谱
Fig. 6 HPLC fingerprint profiles of different *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces

其他峰出现,传统饮片的色谱峰在 10 min (峰 3) 和 36 min (峰 6) 后出现 2 个显著峰,表明 2 种成分含量较其他饮片多。

4 种川芎饮片成分含量测定结果如表 4 所示,所有川芎饮片的阿魏酸质量分数均大于 0.10%,满足《中国药典》2025 年版川芎项下中对药材与饮片的相关含量要求。7 种成分的总含量为真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片>传统饮

片。其中,绿原酸、阿魏酸的含量为微波真空干燥饮片>低温烘干饮片>真空干燥饮片>传统饮片;洋川芎内酯 I、正丁基苯酞含量为传统饮片>真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片;洋川芎内酯 A、藁本内酯含量为真空干燥饮片>低温烘干饮片>微波真空干燥饮片>传统饮片;欧当归内酯 A 含量为真空干燥饮片>微波真空干燥饮片>低温烘干饮片>传统饮片。

表 4 不同干燥方式川芎饮片的待测成分含量 ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

Table 4 Content of target components in different *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces ($\bar{x} \pm s, n = 3$)

样品	质量分数(mg·g ⁻¹)							
	绿原酸	阿魏酸	洋川芎内酯 I	洋川芎内酯 A	正丁基苯酞	藁本内酯	欧当归内酯 A	总量
传统饮片	0.46±0.00	1.96±0.01	1.67±0.00	10.72±0.06	0.74±0.00	131.79±0.60	1.28±0.00	148.64±0.57
低温烘干饮片	1.84±0.01**	3.04±0.01**	0.62±0.00**	15.04±0.03**	0.56±0.00**	239.93±1.23**	1.41±0.00**	262.44±1.21**
真空干燥饮片	0.58±0.00***	2.60±0.01***	0.87±0.00***	15.22±0.08***	0.65±0.00***	284.13±0.98***	1.72±0.00***	305.76±0.95***
微波真空干燥饮片	3.67±0.02***&&	3.24±0.03***&&	0.31±0.00***&&	12.56±0.10***&&	0.44±0.01***&&	226.43±1.21***&&	1.53±0.02***&	248.19±1.13***&&

与传统饮片比较: ** $P < 0.01$; 与低温烘干饮片比较: # $P < 0.05$ ## $P < 0.01$; 与真空干燥饮片比较: & $P < 0.05$ && $P < 0.01$ 。

** $P < 0.01$ vs traditional decoction pieces; # $P < 0.05$ ## $P < 0.01$ vs low-temperature dried decoction pieces; & $P < 0.05$ && $P < 0.01$ vs vacuum-dried decoction pieces.

2.8 不同川芎饮片对急性血瘀模型大鼠的影响

2.8.1 分组、造模与给药 SD 大鼠 42 只,雌性,(220±20)g,随机将 SD 大鼠分为空白组、模型组、阳性药组、传统饮片组、低温烘干饮片组、真空干燥饮片组及微波真空干燥饮片组,每组 6 只。空白组和模型组给予生理盐水,给药组大鼠给予相应复方丹参滴丸和各川芎饮片药液,给药体积均为 5 mL/kg,每天 1 次,连续给药 7 d。各组给药剂量的确定是按照临床应用剂量,按照大鼠与人的体表面积比例换算而来。阳性药复方丹参滴丸按 0.1 g/kg 给药,各川芎饮片组均按 7.29 g/(kg·d)给药。参照王朔等^[9]和蒲忠慧等^[10]的方法建立大鼠急性血瘀模型,第 7 次给药后 1 h 进行造模,除空白组大鼠,其余各组大鼠分别 sc 2 次盐酸肾上腺素,剂量为 0.8 mL/kg。第 1 次注射 2 h 后将大鼠置于 4 ℃冰水浴中冰浴,4 min 后取出并擦干。于第 1 次注射 4 h 后注射第 2 次肾上腺素。大鼠出现爪尾部暗紫、耳壳发白、畏寒等典型症状,表明造模成功。

2.8.2 血流检测 分别于给药第 3 天以及造模 12 h 后取各组大鼠,异氟烷麻醉后,背位固定,平展大鼠右侧耳背,在激光散斑血流成像系统下观察大鼠耳廓部位的血流情况,以 25 帧/s 的速度采集数据,每秒获取 1 幅血流图,时间间隔为 1 s,曝光时间为 20 ms,每只大鼠连续采样 60 s,结果见图 7。对各组大鼠散斑血流图进行分析,图中颜色表示瞬间血

流量,大小依次为红色>黄色>绿色>蓝色。

采用激光散斑成像仪记录复方丹参滴丸与川芎饮片给药 3 d 以及造模 12 h 后大鼠耳廓部位的血流情况,结果见表 5。激光散斑成像图中,血管颜色越红表明瞬时血流量越大,颜色越接近蓝色,其瞬时血流量越小。给药 3 d 后,相比于空白组和模型组,复方丹参滴丸组与川芎饮片组的大鼠耳廓部位的瞬时血流量较大。与空白组的平均血流灌注量相比,给予生理盐水的模型组大鼠耳廓外周血管血流量无显著差异。与模型组的平均血流灌注量相比,复方丹参滴丸组与饮片组的大鼠耳廓外周血管的血流量显著增加 ($P < 0.01$)。继续给药至 7 d 建立大鼠急性血瘀模型,造模后 12 h 大鼠耳廓部位的血流情况如表 5 所示。

由表 5 可知,建立急性血瘀模型后,模型组大鼠耳廓部位的瞬时血流量显著降低。与空白组的平均血流灌注量相比,模型组的大鼠耳廓外周血管的血流量显著降低 ($P < 0.01$)。与模型组的平均血流灌注量相比,复方丹参滴丸组与饮片组的大鼠耳廓外周血管的血流量显著增加 ($P < 0.01$)。与复方丹参滴丸组的平均血流灌注量相比,微波真空干燥饮片组的大鼠耳廓外周血管的血流量无显著差异。与传统饮片组的平均血流灌注量相比,真空干燥饮片组的大鼠耳廓外周血管的血流量无显著差异。与低温烘干饮片组的平均血流灌注量相比,真空干燥饮

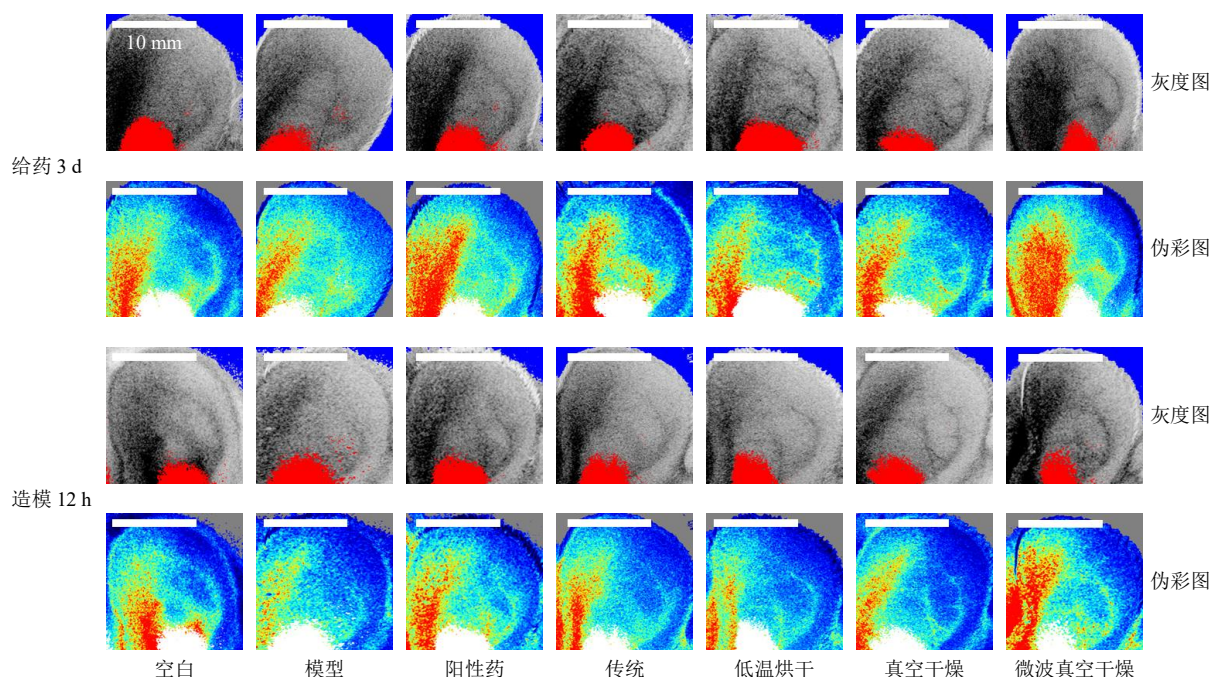


图 7 各组大鼠耳廓激光散斑成像图

Fig. 7 Laser speckle imaging maps of the auricles of rats in each group

表 5 各组大鼠耳廓平均血流灌注量 ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

Table 5 Average blood flow perfusion in the auricles of rats in each group ($\bar{x} \pm s, n = 6$)

组别	剂量/ (g·kg ⁻¹)	血流强度/PU	
		给药 3 d	造模 12 h
空白	—	242.22 ± 16.85	248.53 ± 15.51
模型	—	246.29 ± 8.81	203.98 ± 9.51**
阳性药	0.1	278.13 ± 11.64**	309.94 ± 10.64***
传统饮片	7.29	266.34 ± 16.53**	264.02 ± 10.94***
低温烘干饮片	7.29	271.24 ± 18.11**	280.22 ± 13.34***
真空干燥饮片	7.29	267.58 ± 22.93**	278.22 ± 7.28***
微波真空干燥饮片	7.29	281.85 ± 9.30**	303.57 ± 8.97***

与空白组比较: ** $P < 0.01$; 与模型组比较: *** $P < 0.01$ 。

** $P < 0.01$ vs blank group; *** $P < 0.01$ vs model group.

片组的大鼠耳廓外周血管的血流量无显著差异。

2.9 综合加权评分 (grade point average)

以饮片硬度、韧性、挥发油含量、阿魏酸、检测成分总含量及活血药效作用为指标进行考察, 其中硬度、韧性、挥发油、阿魏酸、检测成分总含量和活血药效作用的权重系数分别为 0.6 和 0.4, 硬度、韧性、挥发油含量、阿魏酸、各检测成分总含量的权重系数分别为 0.1、0.1、0.1、0.2 和 0.1。按硬度、韧性、挥发油含量、阿魏酸、检测成分总含量评分 = $(w_1/w_{1max}) \times 0.1$ 计算对应评分, w_1 是饮片检测中对应指标的结果, w_{1max} 是指 4 种饮片中指标

结果最高值; 按阿魏酸含量评分 = $(w_2/w_{2max}) \times 0.2$ 计算阿魏酸评分, w_2 是饮片阿魏酸含量, w_{2max} 是指 4 种饮片中阿魏酸含量最高值; 按活血药效作用评分 = $(w_3/w_{3max}) \times 0.4$ 计算饮片药效评分, w_3 是饮片检测的平均血流灌注量, w_{3max} 是指 4 种饮片中平均血流灌注量最高值; 按 GPA = (硬度评分 + 韧性评分 + 挥发油含量评分 + 阿魏酸评分 + 各检测成分总含量评分 + 活血药效作用评分) $\times 100$ 计算 GPA。

由表 6 综合评分结果可知, 传统饮片的综合评分为 81.27, 低温烘干饮片的综合评分为 88.84, 真空干燥饮片的综合评分为 91.21, 微波真空干燥饮片的综合评分为 96.60。由综合评分结果分析可知, 川芎一体化工艺饮片平均得分为 92, 传统饮片平均得分为 81。由此可知, 川芎一体化工艺饮片与传统饮片质量相近。从挥发油含量和所检测的成分总含量来看, 真空干燥饮片保留最多, 从硬度、韧性、阿魏酸含量和药效来看, 微波真空干燥饮片表现最优。另外, 相较于传统饮片炮制过程, 一体化饮片大大的节省时间, 效率更高。以上结果表明一体化工艺切实可行, 工艺简便, 节约时间, 可操作性强。

2.10 统计学分析

实验数据采用 IBM SPSS Statistics 27 软件系统进行统计分析, 结果用 $\bar{x} \pm s$ 表示, 满足正态分布, 方差齐时, 组间比较采用单因素方差分析 (analysis

表 6 不同川芎饮片的综合评分结果

Table 6 Comprehensive score results of different *Chuanxiong Rhizoma* decoction pieces

饮片	硬度/ (gf·mm ⁻²)	韧性/ (gf·mm ⁻¹)	挥发油/ %	质量分数/(mg·g ⁻¹)							药效/ 综合	
				阿魏酸	绿原酸	洋川芎内酯 I	洋川芎内酯 A	正丁基苯酞	藁本内酯	欧当归内酯 A	分	评分
传统	19 311.33	0.77	0.32	1.96	0.46	1.67	10.72	0.74	131.79	1.28	0.35	81.27
低温烘干	16 936.93	0.63	0.26	3.04	1.84	0.62	15.04	0.56	239.93	1.41	0.37	88.84
真空干燥	16 780.57	0.77	0.33	2.60	0.58	0.87	15.22	0.65	284.13	1.72	0.37	91.21
微波真空干燥	19 361.63	0.79	0.28	3.24	3.67	0.31	12.56	0.44	226.43	1.53	0.40	96.60

of variance); 方差不齐时, 使用 Dunnett's T3 检验。

3 讨论

川芎作为临床常用中药, 其药材饮片质量直接影响临床疗效^[11]。川芎的加工工艺是影响药材饮片质量的关键因素, 而水分干燥是川芎加工工艺中的重要环节。实验证明, 与传统饮片相比, 低温烘干、真空干燥以及微波真空干燥饮片中的绿原酸^[12]、阿魏酸^[13]、洋川芎内酯 A、藁本内酯、欧当归内酯 A 等指标成分的保留率更高, 其原因可能与这 3 种工艺减少了水处理环节有关。传统饮片经过浸润, 在此环节中易造成绿原酸、阿魏酸等水溶性成分的损失^[14-15]。故传统饮片绿原酸和阿魏酸含量较 3 种趁鲜切制加工一体化工艺低。研究发现, 一些具有不饱和结构的苯酞类化合物, 在光照、温度等影响下容易异构化变成其他苯酞类化合物^[16], 如藁本内酯和洋川芎内酯 A 受温度和光照的影响, 则会变成丁基苯酞与丁烯基苯酞^[17-18]。传统饮片经过晒干处理, 且干燥时间较其他工艺时间长, 故转化后其洋川芎内酯 A、藁本内酯和欧当归内酯 A 含量较 3 种趁鲜切制加工一体化工艺低, 而转化的洋川芎内酯 I 和正丁基苯酞含量高于 3 种趁鲜切制加工一体化工艺饮片。此外, 4 种川芎饮片与复方丹参滴丸在改善急性血瘀大鼠的血液灌注量和外周微循环方面的药效相当, 表明两者均具有良好的活血药效。这为一体化饮片的应用提供了数据支撑, 也为一体化饮片及其制剂的临床应用提供了理论依据。

川芎挥发油是川芎的主要活性成分之一, 具有镇静、镇痛^[19]、抗炎^[20]、抗氧化、抗肿瘤等作用, 同时还是一种常见中药挥发油促渗剂^[21-22], 极具药用价值。川芎挥发油主要的化学成分集中在苯酞类、烯萜类、醇类化合物, 其中藁本内酯的含量在 35%~53%^[23]。川芎挥发油可以通过调节细胞内外多条相关通路和多靶点作用来发挥抗氧化、抗炎、神经保护、血管稳态等作用^[24]。临床研究发现川芎挥发油在治疗膝关节滑膜炎、缺血性脑血管病、偏

头痛上也有很好疗效^[25-26]。本研究发现川芎经微波真空干燥处理后, 挥发油的种类和相对含量明显下降, 其原因可能是微波是川芎内部水分快速气化蒸发, 形成了疏松多孔结构, 使挥发油更容易从组织内部逸出。同时, 川芎中的极性分子在微波场的作用下会快速旋转、相互摩擦, 改变能量状态, 从而加速挥发或分解, 导致挥发性成分种类和含量降低。尽管微波真空干燥的川芎挥发油种类和挥发性成分相对含量低于传统饮片以及其他 2 种趁鲜切制加工一体化饮片, 但是相同加工量下, 微波真空干燥速率更快, 周期较传统加工缩短 24 倍, 较低温烘干饮片缩短 12 倍, 较真空干燥缩短 4 倍, 且外观颜色和质地也更接近于传统饮片。

综上所述, 真空低温干燥、微波真空低温干燥技术可用于川芎趁鲜切制加工一体化, 且真空干燥饮片中的关键指标成分及挥发油含量更高, 而微波真空干燥饮片的外观、颜色、质地更接近于传统饮片, 并且微波真空干燥饮片的活血药效保存良好, 加工效率更高, 工艺简便, 节约时间, 切实可行。但是本研究仅从外观性状、关键指标成分含量及活血药效的角度探讨了真空低温干燥和微波真空干燥用于川芎趁鲜切制加工一体化的可行性, 后续应对炮制工艺及饮片的具体药效和安全性进行深入研究。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 中国药典 [S]. 一部. 2025: 42.
- [2] 吴情梅, 刘晓芬, 连艳, 等. 川芎产地加工与饮片炮制一体化工艺研究 [J]. 中草药, 2019, 50(16): 3808-3814.
- [3] 李丽, 张村, 肖永庆, 等. 川芎饮片产地加工可行性探索 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2010, 16(3): 24-26.
- [4] 杨俊杰, 李平, 郝敏, 等. 中药材产地加工与炮制一体化的现代研究进展 [J]. 中草药, 2018, 49(20): 4726-4730.
- [5] 吴情梅, 刘晓芬, 连艳, 等. 产地加工炮制一体化对川芎饮片化学成分的影响研究 [J]. 中国药房, 2020,

- 31(6): 686-691.
- [6] 姚志勇, 万金庆, 庞文燕, 等. 微波低温真空干燥技术的应用研究进展 [J]. 广东农业科学, 2013, 40(13): 106-109.
- [7] 蔡柱山. 中药材初加工中有效化学成分保留技术研究 [J]. 现代盐化工, 2025, 52(2): 77-79.
- [8] 胡轶娟, 浦锦宝, 徐攀, 等. 前胡切片微波真空干燥特性分析及模拟 [J]. 中国现代应用药学, 2024, 41(10): 1343-1349.
- [9] 王朔, 仇坤, 周利梅, 等. 三七总皂苷不同口服制剂对急性血瘀模型大鼠的药效学比较研究 [J]. 上海中医药大学学报, 2024, 38(4): 62-70.
- [10] 蒲忠慧, 李涛, 魏永孝, 等. 生化汤对急性血瘀模型大鼠活血化瘀作用的研究 [J]. 食品与发酵科技, 2025, 61(1): 102-107.
- [11] 杨俊杰, 李林, 季德, 等. 中药材产地加工与炮制一体化的历史沿革与现代研究探讨 [J]. 中草药, 2016, 47(15): 2751-2757.
- [12] 严永旺, 肖兰, 周旭, 等. 绿原酸的药理作用及药用研发对策 [J]. 中国药房, 2017, 28(19): 2729-2732.
- [13] 王立霞, 王枫, 陈欣, 等. 阿魏酸钠的心脑血管药理作用研究进展 [J]. 中草药, 2019, 50(3): 772-777.
- [14] 李静静, 杨会鸽, 范菲, 等. 川芎血清药物化学成分研究 [J]. 化学与粘合, 2017, 39(4): 307-309.
- [15] 张丽娟, 刘继勇, 姚翀, 等. 洋川芎内酯类化合物药理作用研究进展 [J]. 中国药学杂志, 2015, 50(13): 1081-1084.
- [16] 朱林, 彭国平, 李存玉, 等. 川芎挥发油中内酯类成分的稳定性考察 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2013, 19(20): 14-17.
- [17] 金玉青, 吕光华, 魏伯平, 等. 川芎药材贮藏期间化学成分的变化 [J]. 中药材, 2013, 36(1): 38-41.
- [18] 兰志琼, 郑立, 艾青青, 等. 不同贮藏条件下川芎饮片质量变化研究 [J]. 时珍国医国药, 2016, 27(2): 459-461.
- [19] Ran X, Ma L, Peng C, *et al.* *Ligusticum chuanxiong* Hort.: A review of chemistry and pharmacology [J]. *Pharm Biol*, 2011, 49(11): 1180-1189.
- [20] Kong Q H, Niu Y S, Feng H, *et al.* *Ligusticum chuanxiong* Hort.: A review of its phytochemistry, pharmacology, and toxicology free [J]. *J Pharm Pharmacol*, 2024, 76(11): 1404-1430.
- [21] 夏珊, 李生茂, 张馨予, 等. 不同方法提取川芎挥发油化学成分及抗氧化活性的比较 [J]. 川北医学院学报, 2021, 36(9): 1243-1248.
- [22] 吴海霞. 川芎挥发油协同替莫唑胺抑制脑胶质瘤的作用及机制研究 [D]. 南昌: 江西中医药大学, 2019.
- [23] 王虎, 李文兵, 胡昌江, 等. 不同产地川芎主要有效成分含量比较 [J]. 中国药业, 2015, 24(21): 37-39.
- [24] 管咏梅, 蒋成, 臧振中, 等. 川芎挥发油化学成分、药理作用及临床应用研究进展 [J]. 中成药, 2024, 46(3): 873-880.
- [25] 崔占举. 川芎油软胶囊治疗偏头痛(血瘀证)的临床观察 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2009.
- [26] 孙晨. 川芎治疗急性心肌缺血的有效部位和机制研究 [D]. 成都: 成都中医药大学, 2018.

[责任编辑 郑礼胜]