

气相色谱-离子迁移谱技术在中药研究中的应用进展

吴海韵, 杨甜, 张弛, 梁文仪, 苏娟

Advancements in the application of gas chromatography-ion migration spectrometry GC-IMS in traditional Chinese medicine research

WU Haiyun, YANG Tian, ZHANG Chi, LIANG Wenyi, SU Juan

在线阅读 View online: <http://yxsj.smmu.edu.cn/cn/article/doi/10.12206/j.issn.2097-2024.202409007>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

脑胶质瘤微流控芯片模型的构建及中药半枝莲药效评价应用研究

Construction of glioma microfluidic chip model and its application research on evaluation the medicinal efficacy of the Chinese medicine *Scutellaria barbata*

药学实践与服务. 2025, 43(2): 59-66 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202409034](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202409034)

一种中药组合物对ANIT诱导的小鼠胆汁淤积肝损伤的保护作用研究

The protective effect of a traditional chinese medicine composition on ANIT induced liver injury in mice with cholestasis

药学实践与服务. 2024, 42(12): 508-511, 519 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202305008](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202305008)

HPLC-MS/MS测定当归六黄汤中4种不同成分的含量

Determination of four different components in Danggui Liu Huang decoction by HPLC-MS/MS

药学实践与服务. 2024, 42(6): 248-252, 266 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202305007](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202305007)

帕博利珠单抗治疗所致免疫相关不良反应与中医体质的相关性研究

Correlation between immune related adverse reactions in patients treated with pembrolizumab and Traditional Chinese Medicine constitution

药学实践与服务. 2024, 42(5): 217-222 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202311029](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202311029)

消胀通便膏在晚期肝癌患者阿片类药物相关性便秘中的应用研究

Application of eliminating flatulence and laxative cream in advanced hepatocellular carcinoma patients with opioid-associated constipation

药学实践与服务. 2024, 42(12): 520-523 DOI: [10.12206/j.issn.2097-2024.202309009](https://doi.org/10.12206/j.issn.2097-2024.202309009)



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

· 综述 ·

气相色谱-离子迁移谱技术在中药研究中的应用进展

吴海韵^a, 杨甜^a, 张弛^b, 梁文仪^b, 苏娟^b (海军军医大学: a. 中药学本科 2022 级, b. 军事药学国家级实验教学示范中心, 上海 200433)

[摘要] 中药中含有萜类、脂肪族等多种挥发性成分(VOCs), 具有显著的药理活性, 常用气相色谱(GC)、气相色谱-质谱联用(GC-MS)进行分析, 虽分离能力强, 但样品需要预处理且分析时间长。近年来, 气相色谱(GC)与离子迁移谱技术(IMS)联用广受学术界关注, 该技术结合 GC 的高分离能力和 IMS 的快速反应能力, 具有样品无需预处理、分析时间短、检测限低、操作简单等优点, 在中药研究中应用日益广泛。本文介绍 GC-IMS 的工作原理, 总结了其在中药 VOCs 研究中的应用, 并对未来的发展方向进行展望。

[关键词] 气相色谱-离子迁移谱; 中药; 挥发性成分; 炮制; 质量分析

[文章编号] 2097-2024(2025)00-0001-06 **[DOI]** 10.12206/j.issn.2097-2024.202409007

Advancements in the application of gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS) in traditional Chinese medicine research

WU Haiyun^a, YANG Tian^a, ZHANG Chi^b, LIANG Wenyi^b, SU Juan^b (a. Class 2022 of Chinese Medicine, b. National Demonstration Center for Experimental Military Pharmacy Education, Naval Medical University, Shanghai 200433, China)

[Abstract] Traditional Chinese medicine contains a variety of volatile components(VOCs) such as terpenes and aliphatics, which have significant pharmacological activities, and are commonly analyzed by gas chromatography(GC) and gas chromatography-mass spectrometry(GC-MS). Although the separation ability is strong, the samples need to be pre-treated and the analysis time is long. In recent years, the combination of gas chromatography(GC) and ion migration spectrometry(IMS) has been widely used in the academic community. The combination of high separation ability of GC and rapid reaction ability of IMS has the advantages of no sample pretreatment, fast analysis time, low detection limit and simple operation. It is increasingly widely used in traditional Chinese medicine research. This review introduces the working principle of GC-IMS, summarizes its application in VOCs research of traditional Chinese medicine, and looks forward to the future development direction.

[Key words] GC-IMS; traditional Chinese medicine; volatile components; processing; quality analysis

中药挥发性成分(VOCs)是指中药中一类具有芳香气并易挥发的成分, 其化学组成复杂, 主要包括挥发油类以及其他分子量较小、易挥发的化合物, 例如萜类、脂肪族、芳香族化合物等。VOCs 具有发汗解表、芳香开窍、镇咳祛痰、理气、驱风、抑菌、镇痛、杀虫等多种功效。作为中药学研究的热点之一, 高效率、高标准的检测药材中 VOCs 十分关键。因此, 利用现代化方法来实现对中草药挥发性成分的细致分析, 意义巨大。

VOCs 常用气相色谱-质谱联用(GC-MS)方法进行分析, 虽分离能力强, 但样品需要预处理且分

析时间长。气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)法结合了 GC 突出的分离能力和 IMS 快速响应、高灵敏度的特点, 具有样品准备简便、高灵敏度、高分辨率等显著优势, 结合化学计量学分析中药材 VOCs 所呈现图谱, 可实现对药材 VOCs 无损、快速区分^[1]。

1 气相色谱-离子迁移谱联用技术原理

GC-IMS 技术的基本原理^[2]是通过将样品混合物引进气相色谱仪进行分离, 样品分子和载气分子在离子源放射性物质的作用下发生一系列反应形成产物离子, 这些产物离子在不同的电场驱动下通过离子门进入迁移区, 与逆向而来的中性迁移气体分子发生碰撞而损失能量。产物离子在电场中的迁移速率不同, 到达检测器上的时间不同, 从而使样品差异化分离(如图 1), 最后可得到一个包含有

[基金项目] 大学生创新能力培养项目(No. FH2023096)

[作者简介] 吴海韵, 中药学专业本科生, Email: 2803982890@qq.com

[通信作者] 苏娟, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 中药活性成分, Email: juansu_2008@126.com

离子迁移时间(X轴),气相色谱保留时间(Y轴),离子强度(Z轴)的三维谱图(如图2)。

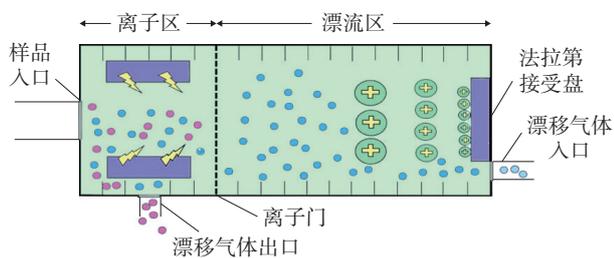


图1 气相色谱-离子迁移谱联用技术分离示意图

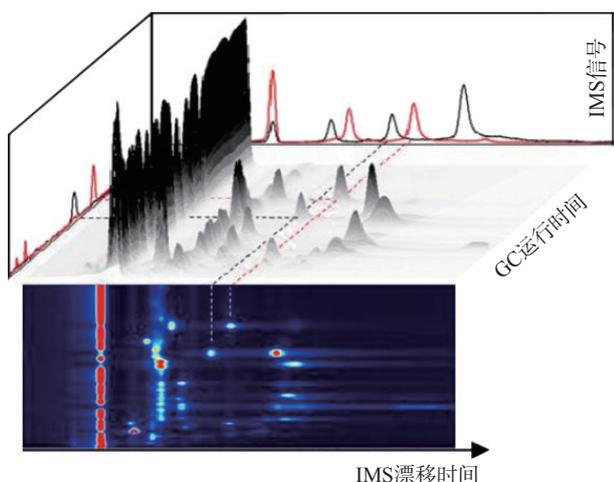


图2 气相色谱-离子迁移谱联用技术结果三维谱图^[3]

顶空-气相色谱-离子迁移谱(HS-GC-IMS)是应用于检测药材中VOCs最为广泛的方式之一^[3]。其原理是首先将样品中的VOCs通过热孵育和振荡使之从药材中逸出,随后抽取顶空气体进行分析,避免复杂基质干扰,再使之进入气相色谱(GC)、离子迁移谱(IMS)中,得到相应谱图。HS-GC-IMS无需样品预处理,在分析复杂样品或需要快速检测场景方面更具优势。

自从1972年第一张经过GC分离的IMS谱图出现^[2],早期主要用于军事领域(如化学战剂检测)和毒品筛查的先进技术逐渐面向市场,应用于研究(如图3),引进国内后广泛使用于中药研究。现阶段,

通过GC-IMS捕捉到中药材中的微量VOCs,将其应用于区分中药的不同种类和产地、监控中药炮制过程以及中药复方组分分析等^[4],为中药材的产地及真伪鉴别提供可靠的依据,同时也为质量控制和药效研究等方面提供数据支持。

2 在中药鉴定中的应用

2.1 同属不同种的中药鉴别

同属不同种之间的中药材亲缘关系比较接近,在VOCs种类差异上不显著,利用GC-IMS技术善于捕捉挥发性化合物种类微小差异的特点,可对样品进行品种鉴别。

陈皮中主要含有三萜类、挥发油类等几百种成分,有平喘止咳、调节血管等药理作用^[5-6],刘主洁等^[7]和Lv等^[8]采用HS-GC-IMS对陈皮和广陈皮样品中VOCs进行研究,分析二者的特征信号,以邻氨基苯甲酸二甲酯为广陈皮最明显的特征标记物,柠檬烯、癸醛等也可作为广陈皮的特征信号,利用这些特征信号可对陈皮和广陈皮进行区分。山莓是覆盆子的混淆品之一,为保证用药安全有效,有必要对两者进行区分^[9],严爱娟等^[10]采用GC-IMS技术检测山莓和覆盆子VOCs,明确鉴定出覆盆子特征成分较山莓多,其中癸醛、1-辛烯-3-醇等在覆盆子样品中的含量更高,苯甲醛、2-丁酮等在山莓样品中的含量更高,以此来实现山莓和覆盆子的区分。彭旭阳等^[11]采用GC-IMS分析新疆和田地区“梭梭”和“红柳”肉苁蓉这两种不同寄主肉苁蓉挥发性物质之间的不同,找到了二者主要差异物质为苯甲醛、庚醛等。

2.2 中药不同产地鉴别

道地药材是指生长在特定的自然生态环境中,经过一系列技术培育和加工而成,且被公认为比其他地方生产的同种药材的质量和疗效好的药材^[12]。但随着产地的迁移、品种的引入,在外观性状上对道地药材和其他产地的中药进行简单鉴别已经不能满足需求。

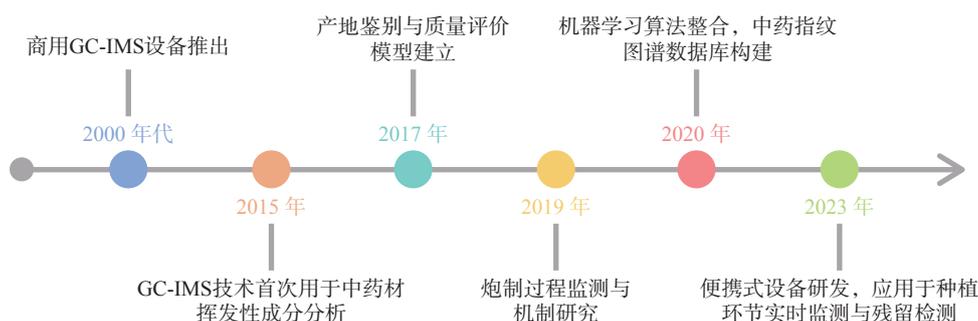


图3 GC-IMS在中药领域发展时间脉络图

王振洲等^[13]采用 GC-IMS 对来自不同产区的人参 VOCs 进行检测,发现 2,5-二甲基吡嗪和 2,6-二甲基吡嗪等 VOCs 在吉林集安四年生人参中含量较高,而吉林敦化四年生人参中含量相对较低,由此鉴别四年生吉林集安和敦化的人参。西洋参同属于五加科人参属,成功引种进入我国后,辽宁、吉林和山东是其主产区^[14],王燕等^[15]使用 GC-IMS 技术对美国、加拿大、山东等五个不同产地的西洋参进行研究,共鉴定出 53 种 VOCs,其中美国西洋参中 2-庚酮等成分的含量较高,而加拿大产 α -蒎烯等成分的含量显著高于其它产区,中国产芳樟醇等成分的含量较高,其中吉林产地的含量是辽宁、山东产地的 2.60 和 3.60 倍,通过这些显著差异可对西洋参进行产地溯源和鉴别。

李曼祎等^[16]使用 GC-IMS 技术对新疆、宁夏、内蒙古、青海四个主要产区的枸杞进行化学成分测定,分析出了四个地区含量差异较大的 16 种物质,发现内蒙古枸杞区别于另外三个产地特有的物质为正丁醇,同时筛选出了叶醇等五种标记性物质对枸杞产地进行区分。Li^[17]等分别采用 HS-SPME-GC-MS 和 HS-GC-IMS 检测河北、河南、江苏、浙江、安徽以及山东 6 个不同地区的五味子,结果显示安徽的五味子萜类物质含量较高,同时该研究也证明了 HS-GC-IMS 对样品的分类效果优于 HS-SPME-GC-MS。山东为瓜蒌的道地产区^[18],河北也是瓜蒌的重要产区,不同产地的瓜蒌可能在品质及所含成分上有所差别,从而对药效也会产生一定的影响^[19-20]。张敏敏等^[19]采用 GC-IMS 在瓜蒌皮样品中共鉴定出醛类和醇类等 88 种 VOCs,分析发现山东瓜蒌皮中 2-庚酮、正壬醛等物质的含量低于河北瓜蒌皮,但 1-己醇、糠醇等含量更高的结论,通过这些差异基本实现了两地区瓜蒌皮的区分。Li 等^[21]采用 HS-GC-IMS 联合 PCA 建立松茸特征图谱,对分别来自云南和四川的松茸样品以及它们的菌盖和菌柄进行研究,发现虽然指纹图谱相似度较高,但各自也有其特征性挥发物:苯乙醛和糠醇等仅在云南产松茸的菌柄中被发现,戊烷仅在四川产松茸的菌柄中被发现,戊醛仅在云南产松茸的菌盖中检出,甲基吡嗪仅在四川产松茸的菌盖中检出,通过特征性挥发物的不同,可对分别产自云南和四川的松茸进行区分。

2.3 中药复方中主成分的鉴别

中药复方成分众多且复杂,确保其质量符合标准、疗效可靠、使用安全是关键,采用 HPLC 特征图谱进行分析是目前公认的良好方法之一^[22]。GC-

IMS 检测灵敏度高、分离效果好,是对 HPLC 表征中药复方质量分析的有益补充。

Yuan 等^[23]设置了对照组、慢性不可预测轻度应激(CUMS)组和 CUMS+百合鸡子黄汤组,采用 HS-GC-IMS 等方法对百合鸡子黄汤治疗 CUMS 大鼠粪便中挥发性化合物含量进行研究,鉴定出了 11 个生物标志物,找出了对照组大鼠粪便样品中甲硫醚含量较高,而 CUMS 组则较低,同时百合子鸡汤组抑郁表现出保护性干预作用;Yin 等^[24]采用 HS-GC-IMS 对开心散中的挥发性化合物进行分析,鉴别出 β -细辛酮等十种 VOCs 可作为开心散的质量标记物,进一步为开心散质量控制及药效机制等的相关研究奠定基础;李巍等^[25]利用 HS-GC-IMS 对清感秋饮中的 VOCs 进行定性定量分析,共鉴定出 120 种 VOCs,其中,紫苏属酮、 β -石竹烯等可能为其主要药效成分。

3 在中药加工炮制中的应用

中药的加工炮制是提高临床疗效的重要手段,也是保证临床用药安全的重要措施^[26]。应用不同的炮制方法可能会引起中药中的化学成分发生含量加减、成分转化与破坏等变化,采用 GC-IMS 技术对中药加工炮制过程中的 VOCs 进行动态监控,对于炮制工艺的规范、制定更优炮制方案等具有指导意义。

干燥是中药材和饮片加工制备过程中的重要且关键的环节之一,而中药中的 VOCs 易受干燥工艺的影响,对于富含 VOCs 的中药,准确控制干燥工艺有利于减少有效成分的损失。陈树鹏等^[27]采用 GC-IMS 等技术确定烘干样品的整体香气属性优于晒干样品,这可能是由于烘干工艺对环境温度的调整使得烘干过程更有利于果香、柑橘香以及甜香香气保留。其中苯乙酸乙酯、乙酸乙酯等 12 种物质为晒干主要成分,2-甲基-1-丁醇、(E)-2-己烯-1-醇等为烘干主要成分;Wang 等^[24]在 8S-GC-IMS 技术的辅助下,了解了柑橘皮干燥以及不同条件下挥发性成分情况,研究柑橘皮各成分在不同干燥温度下的缺失,其中,70 °C 下干燥会导致 2,2-苯基-1-苦基胍基和铁还原抗氧化能力显著降低。Yu 等^[29]通过 GC-MS 比较总离子色谱图中的峰面积与苯乙酸乙酯的峰面积,将 VOCs 的含量进行半定量再通过 GC-IMS 呈现图谱对结果进行比较,确定 VOCs 的身份,从而证实晒干有利于两个品种的网纹柑橘中萜醇类化合物的保存,热风干燥有利于脂肪族醛和倍半萜的保存,而冷冻干燥是保存酯类和酚类物

质的最佳方法; Zhou 等^[30]对肉苁蓉进行酒制增效后粉碎、超微粉碎、醇提、水提等处理,采用 HS-GC-IMS 方法检测其 VOCs 并建立指纹图谱,发现增效处理的肉苁蓉 VOCs 的种类和含量有所减少,分析原因可能为各种化学物质之间在处理过程中

会发生化学变化,而新鲜肉苁蓉则保存了更多种类的 VOCs,超微粉碎处理和水提处理后的肉苁蓉挥发性化合物主要以醛类为主。除此之外,将其它中药基于 GC-IMS 技术在不同炮制方法中的应用汇总于表 1。

表 1 GC-IMS 技术在炮制研究方面的应用

作者	药材及炮制方法	采用方式	实例
高以丹等 ^[31]	柴达木枸杞 冷冻干燥、自然阴干、热风烘干	GC-IMS	从枸杞样品中鉴定出反-2-壬烯醛、2,4-庚二烯醛等52种VOCs,表明冷冻干燥法比自然阴干、热风烘干以及微波干燥更好,能够有效保留枸杞中的VOCs,使枸杞保持较高的品质。
时海燕等 ^[32]	六神曲 生品、炒品、焦品	HS-GC-IMS	从六神曲生品、炒品和焦品中鉴别出60种化合物通过比较种类和差异,得出炒神曲比焦神曲健胃消食的效果更好。
林秀敏等 ^[33]	当归 酒洗、酒炙、酒浸	GC-IMS	2-十一烯醛、丙酮等为酒洗与酒浸当归的主要差异性物质,2-十一烯醛、丙酮等为酒洗与酒炙当归的主要差异性物质,2-十一烯醛、辛酸乙酯等为酒浸与酒炙当归的主要差异性物质。
武旭等 ^[34]	胆南星 发酵炮制	GC-IMS	发酵炮制有助于胆南星矫味矫臭
王雨晨等 ^[35]	太子参 常温晾干、晒干、热风干燥、 真空冷冻干燥	GC-IMS	40℃热风干燥可以有效保留太子参样品中的VOCs,与晒干、晾干样品无差异,但真空冷冻干燥对太子参挥发性成分的影响较大,会造成挥发性成分以及风味的损失
焦焕然等 ^[36]	侧柏叶 常温晾干、晒干、热风干燥、 变温干燥	GC-IMS	40℃和60℃热风干燥能够较好地保留瓜蒌样品中的核苷类和黄酮类成分

4 与电子鼻联用

国内外也有许多采用 GC-IMS 与电子鼻联用对中药挥发性成分进行研究。电子鼻是一种通过模拟人嗅觉系统对检测物质进行品质评价的感官仪器,其原理是通过传感器阵列对气味分子进行检测和响应,将产生的信号经过预处理后送入模式识别系统,通过指纹图谱对挥发性成分或是气体进行定量或定性分析^[37]。两种技术的联用为实验的结果研究提供了更高的准确度。

Feng 等^[38]采用 GC-IMS、GC-MS 对不同地理标志的八种花椒的 VOCs 进行测定,证明了两种方法均可用于对不同花椒的分类,但相较之下 GC-IMS 操作时间更短,且有能够检测到含量很低物质,结果表明红花椒比青花椒能够释放出更多的萜烯、酯类和更少的醇类,同时该研究还与电子鼻联用表征花椒中的香气物质, W1W、W2W 和 W5S 传感器对花椒样品 VOCs 的响应更强,说明花椒产品中可能含有更高丰度的萜烯、有机硫化物和氮氧化物。陈小爱等^[39]利用 GC-MS、GC-IMS 和电子鼻技术联用,分析老香黄在发酵期间的 VOCs 变化,GC-MS 共鉴别出包括醇类等八个种类的 46 种 VOCs,GC-IMS 则检测出包括杂环类等九个类别的 38 种 VOCs,同时电子鼻 PCA 有效区分了不同发酵时间的样品,发现发酵 6 个月后老香黄挥发性组分开始发生较大的变化,其中柠檬烯等 14 种是

发酵期间含量较高且相对稳定的成分,发酵过程中产生的庚醛、糠醛等是构成老香黄特有气味的特征性成分。王世丽等^[40]通过电子鼻辨识南北柴胡气味特征物质与 GC-IMS 检测其挥发性成分,发现南北柴胡中短链烷烃、醛类等物质差异较大,癸醛、异戊烯醛等可作为南柴胡的特征物质,2-甲基丙酸、3-甲基丁醇可作为北柴胡的特征物质,此外乙酸、乙酸甲酯等成分在北柴胡中显著高于南柴胡。

5 总结和展望

GC-IMS 在中药研究中的应用前景非常广阔,不仅可以对同属不同种、不同产地来源、不同采收期以及不同贮存时间的中药 VOCs 进行分析鉴别,还可以帮助分析炮制前后中药 VOCs 含量变化以及在复方中寻找质量标志物,为药物质量控制与药效研究提供帮助。另外,随着技术的不断进步和中药现代化需求的增加,GC-IMS 可以与特征图谱相结合,构建特征指纹图谱;也可以与电子鼻等其他分析手段融合,发挥出新的效果,让其所能提供的信息更加全面。但该项技术作为新兴科技仍需解决许多问题,比如应探索融合数据库的体系架构^[41]。目前,GC-IMS 通常使用的数据库为 NIST 出版的标准质谱图,对于中药 VOCs 的专业数据库搭建还不全面,部分 VOCs 需要自行判断建立文档保存入库,对实验进程造成不便。由于中药挥发性成分复杂,GC-IMS 可能因峰重叠导致部分成分无

法准确定性,例如分析复方丹参片时,GC-IMS仅能明确鉴定其中60%的化合物,需GC-MS辅助验证。而且GC-IMS对象单一,无法检测多糖、生物碱等非挥发性成分,难以全面评价中药质量。

总的来说,GC-IMS技术为中药研究提供了一种新的科学工具,有利于推动中药科学研究深入,也为中药产业的发展走向国际化和标准化提供支持。

【参考文献】

- [1] 金文刚,刘俊霞,孙海燕,等.基于GC-IMS结合化学计量学鉴别大鲵油掺伪不同比例花生油挥发性有机物特征[J].*食品科学*,2023,44(10):368-376.
- [2] 杨俊超,曹树亚,杨柳.气相色谱与离子迁移谱仪联用的研究[J].*现代仪器与医疗*,2014,20(3):20-24.
- [3] 曾珠亮,刘人源,李权.基于ICP-MS和HS-GC-IMS分析3种黄精中的无机元素及VOCs差异[J].*食品工业科技*,2023,44(15):302-311.
- [4] QIAO Y N, BI J F, CHEN Q Q, et al. Volatile profile characterization of winter jujube from different regions via HS-SPME-GC/MS and GC-IMS[J].*J Food Qual*, 2021, 2021: 9958414.
- [5] 关徐涛,杨鹤年,张津铖,等.陈皮的化学成分和药理作用研究进展[J].*中华中医药学刊*,2024,42(06):41-49.
- [6] 李俊健,林锦铭,高杰贤,等.陈皮挥发油提取、成分分析及应用的研究进展[J].*中国调味品*,2021,46(8):169-173.
- [7] 刘主洁,林彤,侯惠婵,等.气相离子迁移谱与气相色谱区分广陈皮和陈皮的比较研究[J].*药物分析杂志*,2022,42(9):1554-1560.
- [8] LV W S, LIN T, REN Z Y, et al. Rapid discrimination of *Citrus reticulata* 'Chachi' by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry fingerprints combined with principal component analysis[J].*Food Res Int*, 2020, 131: 108985.
- [9] 蔡文山.覆盆子及其混淆品山莓的鉴别[J].*海峡药学*,2007,19(2):66-67.
- [10] 严爱娟,张文婷,周玉波,等.基于气相色谱-离子迁移谱的覆盆子与山莓的鉴别研究[J].*中药材*,2022,45(3):574-578.
- [11] 彭旭阳,陈君然,崔瀚元,等.基于GC-IMS分析新疆不同寄主肉苁蓉挥发性物质[J].*食品工业科技*,2024,45(9):272-279.
- [12] 高璐璐,林锦锋,徐万帮.道地药材与广陈皮道地性研究进展[J].*中国中医药现代远程教育*,2023,21(19):198-200.
- [13] 王振洲,张浩,李军鸽,等.基于GC-IMS技术鉴别红参、西洋参、人参[J].*中药材*,2022,45(8):1899-1907.
- [14] 张春华,陈春桃,陈亮,等.西洋参中稀土元素的测定及其在产地溯源中的应用[J].*中国测试*,2022,48(3):72-77,89.
- [15] 王燕,范佳丽,张敏敏,等.基于气相色谱-离子迁移谱的不同产地西洋参挥发性成分分析[J].*分析测试学报*,2023,42(8):976-983.
- [16] 李曼祎,沈天辰,刘春风,等.不同产地枸杞品质差异研究[J].*食品与发酵工业*,2021,47(24):56-63.
- [17] LI C, WAN H Y, WU X L, et al. Discrimination and characterization of the volatile organic compounds in *Schizonepetae spica* from six regions of China using HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J].*Molecules*, 2022, 27(14): 4393.
- [18] 段崇英.山东道地药材仁瓜萎的质量考察[D].济南:山东中医药大学,2003.
- [19] 张敏敏,东莎莎,崔莉,等.GC-IMS结合化学计量学区分不同产地瓜蒌皮[J].*中成药*,2022,44(7):2208-2213.
- [20] 王爱平,孙年喜,王继朋,等.瓜蒌种质资源及其栽培技术研究进展[J].*微量元素与健康研究*,2024,41(4):45-48.
- [21] LI M Q, YANG R W, ZHANG H, et al. Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of *Tricholoma matsutake* Singer[J].*Food Chem*, 2019, 290: 32-39.
- [22] 连益纯,林静,李知瑾,等.HPLC特征图谱技术在中药制剂质量控制中的应用进展[J].*海峡药学*,2024,36(2):1-5.
- [23] YUAN Z Y, LI J, ZHOU X J, et al. HS-GC-IMS-Based metabolomics study of Baihe Jizhuang Tang in a rat model of chronic unpredictable mild stress[J].*J Chromatogr B Analyt Technol Biomed Life Sci*, 2020, 1148: 122143.
- [24] YIN J X, LIN R M, WU M F, et al. Strategy for the multi-component characterization and quality evaluation of volatile organic components in Kaixin San by correlating the analysis by headspace gas chromatography/ion mobility spectrometry and headspace gas chromatography/mass spectrometry[J].*Rapid Commun Mass Spectrom*, 2021, 35(21): e9174.
- [25] 李巍,吴新龙,丁辉,等.基于HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS技术对清感秋饮中挥发性成分的全面表征[J].*天津中医药大学学报*,2023,42(2):218-223.
- [26] 宋选芬,肖璐璐,刘小利,等.中药材产地加工与饮片炮制一体化研究[J].*内蒙古中医药*,2025,44(1):161-163.
- [27] 陈树鹏,刘昊澄,杨婉媛,等.干燥方式对九制陈皮挥发性风味物质的影响[J].*广东农业科学*,2022,49(1):142-150.
- [28] WANG J, WANG H, XIAO H W, et al. Effects of drying temperature on the drying characteristics and volatile profiles of *Citrus reticulata* Blanco peels under two stages of maturity[J].*Dry Technol*, 2022, 40(12): 2456-2469.
- [29] YU X Y, CHEN X C, LI Y T, et al. Effect of drying methods on volatile compounds of *Citrus reticulata* ponkan and Chachi peels as characterized by GC-MS and GC-IMS[J].*Foods*, 2022, 11(17): 2662.
- [30] ZHOU S Q, FENG D, ZHOU Y X, et al. HS-GC-IMS detection of volatile organic compounds in *Cistanche* powders under different treatment methods[J].*Lwt*, 2022, 165: 113730.
- [31] 高以丹,胡娜,王洪伦.基于GC-IMS比较不同干燥方式对柴达木枸杞中挥发性物质的影响[J].*天然产物研究与开发*,2022,34(12):1989-1998,2033.
- [32] 时海燕,徐男,赵霞,等.基于HS-GC-IMS技术分析六神曲炮制前后(炒、焦)挥发性物质的变化[J].*中草药*,2023,54(10):3120-3131.
- [33] 林秀敏,岳丽丹,张振凌,等.GC-IMS法比较不同方法炮制酒当归特异气味成分差异[J].*中草药*,2020,51(17):4464-4472.
- [34] 武旭,钟恋,王晶,等.基于气相色谱-离子迁移谱法结合分光测色仪技术分析不同胆汁及其所制胆南星的差异性[J].*中华中医药杂志*,2023,38(12):5700-5708.

- [35] 王雨晨, 张敏敏, 马文雅, 等. 基于 GC-IMS 比较不同干燥方式对太子参挥发性成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2022, 28(20): 100-107.
- [36] 焦焕然, 张敏敏, 赵恒强, 等. 不同热风干燥方式对瓜蒌化学成分的影响 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(23): 137-144.
- [37] 周英, 杜杰. 电子鼻工作原理及在肉品检测中的应用 [J]. 肉类工业, 2016(4): 42-45.
- [38] FENG X Y, WANG H W, WANG Z R, et al. Discrimination and characterization of the volatile organic compounds in eight kinds of Huajiao with geographical indication of China using electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chem, 2022, 375: 131671.
- [39] 陈小爱, 蔡惠钿, 刘静宜, 等. 基于电子鼻、GC-MS 和 GC-IMS 技术分析老香黄发酵期间的挥发性成分变化 [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 70-80.
- [40] 王世丽, 朱娟娟, 吕畅, 等. 基于电子鼻和气相离子迁移谱技术分析南北柴胡气味物质差异 [J]. 中华中医药学刊, 2025, 43(1): 134-141,277-281.
- [41] 韦恒. IMS 技术的特点及其面临的主要问题研究 [J]. 信息通信, 2019, 32(6): 163-164.
- [收稿日期] 2024-09-02 [修回日期] 2025-03-03
[本文编辑] 陈盛新