

【综述】

气相色谱-离子迁移谱技术在中药质量评价中的应用研究进展

管佳宁^{1, 2}, 桂新景¹, 范雪花², 张迪², 王恪辉⁶, 呼海涛^{2*}, 刘瑞新^{1, 2, 3, 4, 5*}

1. 河南中医药大学第一附属医院 药学部, 河南 郑州 450003
2. 河南中医药大学 药学院, 河南 郑州 450046
3. 河南省中药临床应用、评价与转化工程研究中心, 河南 郑州 450003
4. 河南省中药临床药学中医药重点实验室, 河南 郑州 450003
5. 河南中医药大学呼吸疾病中医药防治省部共建协同创新中心, 河南 郑州 450046
6. 河南中医药大学第一附属医院龙子湖院区 办公室, 河南 郑州 450000

摘要: 气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)是一种可快速分离挥发性气体并灵敏检测挥发性有机成分(VOCs)的新兴技术,具有操作简单、适用范围广泛等优点。鉴于气味是中药的突出特点且在中药质量评价中占有重要地位,近年来该技术在中药领域的应用频率增长迅速。在介绍GC-IMS技术的原理、相关参数的基础上,对GC-IMS在中药质量评价领域的应用进行了梳理和归纳,包括中药挥发性成分的表征、对中药真伪、基原、产地的鉴别以及根据气味变化对中药采收、贮存时期、加工炮制品的判断等方面,并对该技术目前存在的问题和策略进行了讨论,以期GC-IMS技术在中药领域深入应用提供参考。

关键词: GC-IMS; 中药; 质量评价; 挥发性成分; 中药气味

中图分类号: R284 文献标志码: A 文章编号: 1674-6376(2024)08-1891-15

DOI: 10.7501/j.issn.1674-6376.2024.08.023

Research progress on application of GC-IMS technology in quality evaluation of Chinese materia medica

GUAN Jianing^{1, 2}, GUI Xinjing¹, FAN Xuehua², ZHANG Di², WANG Kehui⁶, HU Haitao², LIU Ruixin^{1, 2, 3, 4, 5}

1. The First Affiliated Hospital, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450003, China
2. College of Medicine, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China
3. Henan Province Engineering Research Center for Clinical Application, Evaluation and Transformation of Traditional Chinese Medicine, Zhengzhou 450003, China
4. Henan Key Laboratory for Clinical Pharmacy of Traditional Chinese Medicine, Zhengzhou 450003, China
5. Henan University of Chinese Medicine, Collaborative Innovation Center for Prevention and Treatment of Respiratory Diseases with Traditional Chinese Medicine, Zhengzhou 450046, China
6. The Office of Longzihu Branch Campus, the First Affiliated Hospital, Henan University of Chinese Medicine, Zhengzhou 450000, China

Abstract: Gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS) is a new technology for rapid separation of volatile gases and sensitive detection of volatile organic components (VOCs). It has the advantages of simple operation and wide application. Since odor is a prominent feature of Chinese materia medica (CMM) and plays an important role in the quality evaluation of CMM, the

收稿日期: 2024-04-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(81774452, 81001646); 河南省卫生健康中青年学科带头人专项(HNSWJW-2020014); 河南省中医药科学研究基地专项(2021JDZY036); 国家中医药管理局青年岐黄学者培养项目(国中医药人教函[2022]256号); 河南省中医药科学研究专项(2023ZY2034); 河南省自然科学基金项目杰出青年科学基金项目(242300421023)

第一作者: 管佳宁(2000—), 女, 硕士研究生, 研究方向为中药饮片临床应用现代化关键技术。E-mail: gjn8776@163.com

***共同通信作者:** 刘瑞新(1980—), 男, 主任药师, 博士后合作导师, 主要从事中药饮片临床应用现代化关键技术研究。E-mail: liuruixin7@163.com
呼海涛(1971—), 男, 教授, 主要从事中药质量评价研究。E-mail: 1030561666@qq.com

application frequency of this technology in the field of CMM has increased rapidly in recent years. Based on the introduction of the principle and related parameters of GC-IMS technology, the application of GC-IMS in the field of CMM quality evaluation was sorted out and summarized, including the characterization of volatile components of CMM, the identification of authenticity, origin and origin of CMM, and the judgment of harvesting, storage period and processed products of CMM according to odor changes. The existing problems and strategies of GC-IMS technology are discussed in order to provide reference for the further application of GC-IMS technology in the field of CCM.

Key words: GC-IMS; Chinese materia medica; assessment of quality; volatile constituent; smell of Chinese materia medica

随着科学技术的迅猛发展,现代的物质检测技术不仅可以通过物质的形态、微观构造、化学成分及蛋白质DNA分子方面进行分析检测,而且可以通过物质的挥发性气体来推断其内部质量情况^[1]。常见气体检测分析技术有电子鼻(e-nose)^[2]、气相色谱法(GC)^[3]、气相色谱-质谱联用法(GC-MS)^[4]、二维气相色谱法(GC×GC)^[5]、气相色谱-嗅觉质谱法(GC-O-MS)^[6]、气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)^[7]等,气体检测技术已在环境与医疗等领域发挥重要作用。

GC-IMS作为气体分离检测技术之一,具有检测时间短、测试成本低、敏度高、精准度高、痕量识别气体等优势。与GC-MS技术相比该技术无需真空要求,在常压下即可测试,降低了检测成本,该技术通过离子漂移时间的差异检测挥发性物质,可对低浓度挥发性物质痕量检测,弥补了GC-MS技术对小相对分子质量和低含量挥发性物质的灵敏度较低的不足。其次该技术对样品中的挥发性有机物进行2次分离,与直接使用传感器检测混合挥发性物质的电子鼻技术相比,更加充分分离鉴定挥发性成分,弥补了其检测模糊性的缺点,增加了检测精度。最后GC-IMS技术融合了气相色谱技术高效分离与离子迁移技术痕量检测的特点,能够全方位、多层次捕捉挥发性气体,并且在数据输出方面具有可视化的特点,可将检测到的挥发性有机成分(VOCs)以三维图谱形式展现^[8]。目前该技术广泛应用于食品^[9]、医药^[10]、环境^[11]、烟草^[12]、微生物^[13]、粮油^[14]等领域,在食品与医药领域的应用频率较高。

中药是中医药发展的基础,中药的质量影响其临床疗效,因此对中药进行质量监测及合理评价十分重要。由于中药具有特殊性和复杂性,其质量问题较为突出,常出现真假难分、产地难分、生长期不足、加工损失等问题^[15]。在传统中药鉴别实践中,常使用眼观、手摸、口尝、鼻闻的方法,气味是中药质量的重要判断指标之一,如砂仁“气芳香而浓烈,味辛凉、微苦”、安宫牛黄丸“气芳香浓郁,味微苦”,

因此通过气味对中药质量评价有理可依。传统实践中仅依靠人的经验评估药材质量,具有主观性和模糊性,GC-IMS技术可弥补经验判断的不足,将中药气味数字化,实现对中药气味的客观评估。

以GC-IMS、气相离子迁移谱为关键词,检索中国学术期刊全文数据库(CNKI)、万方数据库(Wanfang Data)、Web of Science 3个数据库在2004—2024年期间发表的中英文文献,排除重复和与中药不相关文献,最终筛选出116篇与GC-IMS在中药应用相关的文献,发现至少已有61种中药根据不同研究目的,通过GC-IMS技术对其挥发性成分检测进行质量评价。本文综述国内外文献,围绕GC-IMS在中药质量评价方面的应用,阐述GC-IMS的工作原理、使用流程及特点、数据分析处理方法,从而总结GC-IMS技术应用于中药质量评价时的研究思路,为推进该技术在中药领域的应用提供参考,为更好控制中药质量提供新的方法手段。

1 GC-IMS技术概述

离子迁移谱技术早在20世纪50年代开始探索,最初应用于化学武器、爆炸物与毒品检测等领域^[16],但随着离子迁移谱内部材料开发优化及气相色谱等的联用,该技术的分析潜力被科研人员挖掘并在各领域得到迅速推广。

1.1 GC-IMS工作原理

GC-IMS是一种将气相色谱和离子迁移谱结合,用于分离检测复杂混合气体的技术,简单来讲,此技术是将气相色谱用于样品预处理,间接提高了样品的分离度及仪器的灵敏度,气相色谱将混合物分离为单一化合物后,由离子迁移谱对化合物进行电离得到该化合物的单体、二聚体等,最终达到分离目的。

该设备主要由进样系统、气体分离系统、检测系统3个部分组成。由于样品进样方式不同,GC-IMS分为3种仪器,分别是:FlavourSpec®型风味测试仪,GC-IMS环境分析仪、BreathSpec®呼吸分析仪。FlavourSpec®型风味测试仪为顶空自动进样,将样品放入顶空瓶即可使用,无需富集浓缩样品,

不仅省时且能保留样品原始风味,主要应用于食品、药物质量检测领域;GC-IMS环境分析仪内置吸气泵,可将气体吸入仪器,可实现24 h在线监测,主要用于环境检测;BreathSpec®呼吸分析仪为外置呼气装置,由一根软管连接内部进样泵,可吸入气体进样,常用于检测人体呼出气体中的痕量挥发物。

气体分离系统包括化合物分离和离子分离。气相色谱柱承担化合物分离工作,载气携带混合气体进入色谱柱,由于混合气体中各化合物在流动相与固定相中的分配系数不同,因此各化合物经过同一柱长离开色谱柱的时间存在差异,以保留时间作为记录^[17];离子迁移谱承担离子分离工作,包含电离区和漂移区(图1),氘代放射性电源放射作用下载气(N_2)带上正电荷放出一个电子,经过一系列电荷反应,载气中微量的水(H_2O)形成水合氢离子(H_3O^+)。当离子迁移谱处于正离子模式时,分离后的化合物会抢走 H_3O^+ 中的氢离子,形成带正电荷

的离子^[18];当离子迁移谱处于负离子模式时,分离后的化合物会捕获电子形成带负电荷的离子,因此待测挥发物中的化合物质子亲和力大于水时才可形成离子,如烷烃类质子亲和力小于水则无法被检测。化合物完成离子化后,进入有逆向漂移气体的漂移区,未被电离的化合物及杂质将从排气口排出,由于离子结构与质量差异,结构简单且质量小的离子迁移速率更快^[19],因此在迁移管中的漂移速率不同^[20]。

检测系统包括:首先是气相色谱内部检测器,将预分离后的化合物转化为电信号,得到带有保留时间的气相色谱图;其次是离子迁移谱的法拉第盘,通过栅栏的离子依次到达法拉第盘,法拉第盘根据离子电荷、离子截面获得离子信号,离子信号变成电流放大后进入信号分析系统,得到迁移时间为横坐标信号强度为纵坐标的离子迁移谱图^[21],将两类信息结合便生成GC-IMS的三维图。

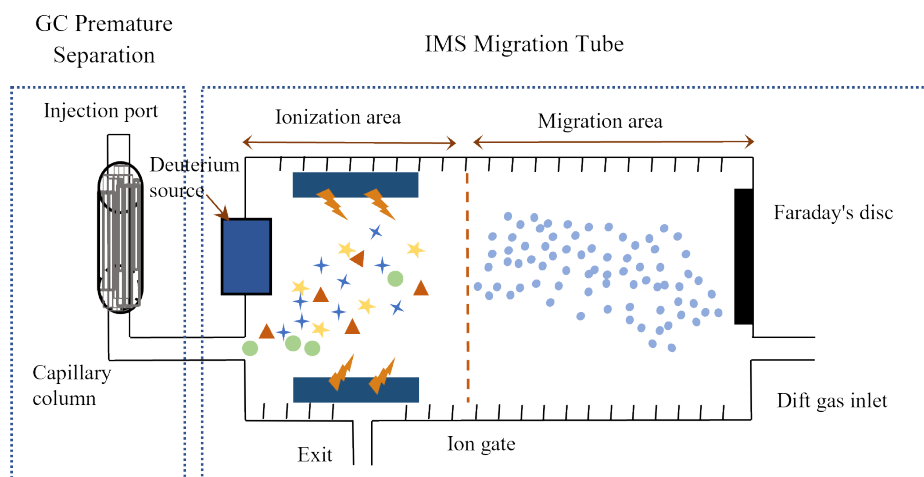


图1 GC-IMS原理示意图^[20]

Fig. 1 Schematic diagram of GC-IMS principle^[20]

1.2 GC-IMS参数优化

每味中药的挥发性有机物成分不同,GC-IMS的相关参数需根据所检测中药特点进行调整,才能达到覆盖所有挥发性成分且分离度高的效果。常见需优化的参数有样品孵育温度、气相色谱柱的极性、柱温、载气体积流量等。孵育温度过低挥发性成分不能完全挥出,而温度过高则会导致挥发性成分被降解,因此合适的孵育温度需结合实验目的展开探索;挥发性成分在气相色谱中的分离依赖于色谱柱,气相色谱柱分为非极性、弱极性、强极性色谱柱,化合物在不同极性色谱柱上停留的时间与信号强度不同,因此在样品挥发性成分未知的前提下,常以特征峰数量为依据对色谱柱进行筛选;色谱柱

的柱温和体积流量是分离过程的重要变量,有研究^[22]发现高柱温或高体积流量能够更快速分离挥发性气体、缩短保留时间,故可根据分离时间的要求调整该参数。

2 GC-IMS在中药质量评价中的应用

近年来,GC-IMS凭借快速、高效、灵敏的特点进入中药质量评价领域,该技术对高电负性或强质子亲和力的有机化合物具有高响应性,中药常含醛、酮、醚等有机化合物和芳香族化合物,因此GC-IMS在中药VOCs检测及质量评价中具有独特优势及潜力。中药成分体系繁杂,易受地域、气候等自然因素及采收时间、加工方式等人为因素影响,因此随时间、环境的改变中药内部成分常发生变化。

中药从种植到临床使用需经采收、加工、运输、贮存等环节,每个环节都有影响中药质量的隐患。本部分重点介绍 GC-IMS 技术在中药从源头到应用各环节质量评价中的应用。

2.1 中药 VOCs 表征

GC-IMS 技术能够科学可靠地揭示 VOCs 信息,可快速、准确地对中药 VOCs 进行全面表征。中药挥发性成分表征为中药气味评价提供数据支撑,同时是中药真伪、产地等各层面鉴别的基础。Wu 等^[23]综合使用 GC-IMS、GC-MS 技术对单味中药石菖蒲表征,分别鉴定 33、95 种 VOCs,并建立 GC-IMS 指纹图谱识别特征成分,为石菖蒲质量评价提供参考;李巍等^[24]同样使用上述 2 种技术对中成药清感秋饮中挥发性成分进行定性定量分析,分别鉴定出 41、85 种挥发性成分,其中 6 种成分同时被检测出,确定酮、烃、醇、酯、环类挥发性成分在整体挥发性成分中含量占比,推测出主要药效成分为紫苏属酮、异白苏烯酮、(Z)-乙酸菊酯、 β -石竹烯;此外 Yin 等^[25]使用上述 2 种技术对中成药开心散 VOCs 进行表征,分别鉴定出 68、117 种 VOCs,确定了 10 种质量标志物(Q-Marker),为开心散药效机制研究提供基础。

2.2 中药鉴别

中药来源广泛,形态、性状极其相似的中药颇多,对其进行鉴别时困难较大。中药鉴别分为不同中药和同一中药的鉴别。不同中药鉴别大多为中药真伪鉴别,部分中药伪品与真品形态相似,但药理作用不同且价格相对差异较大,存在以假乱真的问题;同一中药鉴别有中药基原、产地鉴别、规格等级鉴别等,同一药用的中药由于基原、产地或规格等级等不同,常存在成分种类、含量等差异,已有学者将 GC-IMS 技术应用于中药鉴别,本文部分汇总分析 GC-IMS 在中药真伪、基原、产地鉴别中的应用,为中药的鉴定提供参考。

2.2.1 中药真伪鉴别 中药的真伪鉴别是中药质量评价的重要部分,早在 2014 年就有学者在 GC-IMS 对中药真伪品的区分方向进行初步探索^[26]。中药在市场上易出现真伪难分、混合售卖的现象,根据 2022 年《国家药品抽检年报》^[27]显示,中药饮片及中药材质量检测的主要问题之一就是混伪品现象,尤其提到姜黄存在蓬莪术掺伪、山银花与金银花等同属或近源属混用问题。GC-IMS 技术在该领域进一步的广泛应用将有望缓解当前市场情势。

金银花 *Lonicerae Japonicae Flos* 与山银花

Lonicerae Flos 均收录于《中国药典》2020 年版,二者来源于同科属且形态相似,但药理作用强度不同^[28],需鉴别使用。汤杨黔南等^[29]收集金银花和山银花使用 GC-IMS 技术检测其气味,建立指纹图谱可显著观察金银花与山银花 VOCs 含量差异,定性分析出 47 种挥发性成分,结合多元统计学分析建立偏最小二乘法判别(PLS-DA)模型可将二者较好分离,模型 R^2 值达到 0.981,表明预测性能良好;Zhang 等^[30]将 GC-IMS 参数优化后对金银花与山银花进行气味检测,共鉴定出 70 种 VOCs,通过构建金银花与山银花的对比图谱,并结合主成分分析(PCA),结果表明金银花与山银花差异明显且分类良好。以上研究证明,GC-IMS 结合化学计量学分析方法可准确鉴别金银花真伪,对于金银花的气味成分定性分析,但仪器参数优化影响检测到的 VOCs 数量。中药白及与玉竹性状相似,因价格差异常见玉竹伪冒白及的现象,李海洋等^[31]采用 GC-IMS 技术检测白及和玉竹饮片的挥发性成分,共鉴定出 61 种 VOCs,根据指纹图谱对比含量差异筛选出特征 VOCs,结合正交偏最小二乘法判别分析(OPLS-DA)建立分类模型,预测正判率达 100%,可实现 2 种中药饮片的快速准确鉴别。此外该团队^[32]使用 GC-IMS 技术对白及与另一伪品黄花白及进行检测,通过指纹图谱可观察挥发性成分的含量差异,借助 OPLS-DA 方法建立模型正判率为 100%,为白及饮片真伪鉴别研究提供参考。此外本文对其他中药基于 GC-IMS 在真伪鉴别中的应用进行汇总,具体见表 1。

市场上中药掺伪劣品情况同样常见,与鉴别伪品相比,掺伪劣品的鉴别更具挑战性,因此如何定性定量识别中药中掺伪劣品的种类及比例,是中药质量评价中亟待解决的问题之一,将 GC-IMS 技术用于掺伪劣品的鉴别分析已有研究者进行初步探索。He 等^[33]将 GC-IMS 应用于麦冬变质比例的分析研究,使用 GC-IMS 对新鲜麦冬与掺入 10%、30%、50% 变质品的麦冬挥发性气味进行检测,筛选出 14 种特征 VOCs,并定性鉴别出 12 种化合物,结合 PCA 显示不同比例变质品之间能有效区分,该研究为 GC-IMS 技术在中药掺伪劣品挥发性气味检测分析方面研究做出突破,并得到了符合预期的结果,为 GC-IMS 技术在中药掺伪劣品鉴别应用奠定基础。

2.2.2 中药基原鉴别 基原鉴别是多基原中药质量评价的前提,多基原中药是指来自相近物种且有相似成分和临床药效的中药^[39],当中药不同基原间

表 1 GC-IMS在中药真伪鉴别中的应用

Table 1 Application of GC-IMS in identification of authenticity of Chinese materia medica

分析对象	色谱柱型号	化学计量学方法	定性化合物数量
北柴胡、藏柴胡 ^[34]	MXT-WAX(15 m×0.53 mm, 1.0 μm)、MXT-5(15 m×0.53 mm, 1.0 μm)	PCA	—
红参、西洋参、人参 ^[35]	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm, 1 μm)	PCA	14、13、22
川贝母、伊贝母、平贝母 ^[36]	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm, 1 μm)	PCA	26
卷丹百合、金百合、兰州百合 ^[26]	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	50
阿胶、其他动物源胶 ^[37]	MXT-5(15 m×0.53 mm)	PLS-DA、OPLS-DA	41
肉桂、丁香、小茴香、花椒、干姜 ^[38]	MXT-5(15 m×0.53 mm)	PCA、KNN	80

存在成分含量、疗效、价格等相对较大差异时,易引发市场混乱,影响中药可持续发展。《中国药典》2020年版仅记录 75 种^[40]多基原中药的鉴别方法,且多局限于速度相对较慢的显微鉴别以及速度虽快但准确度可能欠佳的性状鉴别,因此有必要建立快速鉴别中药基原的方法。已有研究将GC-IMS技术结合化学计量学方法应用于中药基原鉴别并取得良好的效果。黄精源于百合科黄精 *Polygonatum sibiricum* Red.、滇黄精 *P. kingianum* Coll.et Hemsl.、多花黄精 *P. cyrtoneura* Hua 的干燥根茎, Song 等^[41]使用 GC-IMS 技术对 3 种黄精进行检测,共鉴定出以醛类为主的 43 种化合物,由指纹图谱可观察 3 种黄精的化学成分含量存在显著差异,选取 13 个特征峰结合 PCA 分析,结果表明 3 种黄精可良好区分;曾珠亮等^[42]也使用 GC-IMS 对 3 种不同产地黄精进行检测,并结合 PCA 分析得出相同结果。除此之外,本文将其他中药基于 GC-IMS 技术在基原鉴别中的应用进行汇总,见表 2。

2.2.3 中药产地鉴别 优质的中药与地理环境有

着密不可分的关系,土壤、温度、水分等环境因素无一不影响其内部化学特征组成与药效成分的积累,几千年的临床检验已总结出我国公认优质中药的标准——道地药材。已有研究证明,借助 GC-IMS 检测分析中药气味,可成功鉴别出中药产地。

砂仁为姜科植物阳春砂 *Amomum villosum* Lour.、绿壳砂 *A. villosum* Lour. var. *xanthioides* T.L. Wu et Senjen、海南砂 *A. longiligulare* T.L.Wu 的干燥成熟种子,其中阳春砂以广东阳春为道地产区,李苏亚等^[47]收集道地阳春砂与非道地阳春砂,使用 GC-IMS 检测样品,共获取 13 个特征峰并建立指纹图谱,指纹图谱中道地阳春砂和非道地阳春砂不同挥发性成分浓度差异明显,结合 PCA 和 KNN 算法分析,结果表明 2 类样品可完全区分,为阳春砂产地鉴别提供方法参考。中药麦冬主产地为浙江和四川,浙麦冬相比川麦冬价格更高,且被普遍认为质量更好^[48], He 等^[49]使用 GC-IMS 对浙麦冬和川麦冬进行检测,由原始图谱可观察到浙麦冬中 VOCs 种类更丰富,含桉叶油类化合物多于川麦冬,定性识

表 2 GC-IMS在中药基原鉴别中的应用

Table 2 Application of GC-IMS in identification of source of Chinese materia medica

分析对象	色谱柱型号	化学计量学方法	联用方法	定性化合物数量
酸橙枳实、甜橙枳实 ^[43]	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm, 1 μm)	OPLS-DA	—	133
广陈皮、陈皮 ^[44]	SE-54(15 m×0.53 mm, 1 μm)	PCA、PLS-DA	HS-GC	13
毛橘红、光橘红 ^[21]	SE-54(15 m×0.53 mm, 1 μm)、MXT1701(15 m×0.53 mm, 1 μm)、MXT-WAX(30 m×0.53 mm, 1 μm)	PCA、聚类分析、OPLS-DA	—	7
陈皮、广陈皮 ^[45]	SE-54(15 m×0.53 mm, 1.0 μm)、OV-1701(30 m×0.53 mm, 0.5 μm)、WAX(15 m×0.53 mm, 1.0 μm)	PCA	—	21、12、14
广陈皮 ^[46]	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	—

别出46种化合物,结合PLS-DA分析结果表明,模型稳定可靠且预测性良好,可鉴别麦冬的浙江、四川产地。枸杞是一种药食同源中药,在世界各地均有种植,而产自宁夏回族自治区的枸杞被公认为最优质。Zhou等^[50]收集宁夏、新疆、甘肃、青海4个产地的枸杞,基于GC-IMS识别出以醇类为主的63种化合物,指纹图谱显示不同产地的枸杞中化合物含量存在差异,结合PCA分析、相似度分析、层次聚类分析方法可直观地对4个产地样品进行有效区分。此外李曼祎等^[51]也使用GC-IMS探索产地对枸杞挥发性成分的影响,检测来自宁夏、新疆、青海、内蒙古共24批的枸杞,定性识别出36种挥发性化合物,建立指纹图谱观察到其中16种化合物在各样品中浓度差异明显,结合PLS-DA建立模型,并筛选出5种区别枸杞产地的标志物质,结果表明该模型可有效鉴别枸杞的产地。西洋参原产于北美,王燕等^[52]收集5个产地的西洋参基于GC-IMS检测,共识别53种化合物,对比图谱显示5个产地的西洋参中化合物种类与含量均有显著差异,建立指纹图谱结合PLS-DA模型,可实现西洋参的产地鉴别。此外对其他中药基于GC-IMS技术在产地鉴别的应用中进行汇总,见表3。以上研究证明,GC-IMS技术在中药产地鉴别中具有可靠性。

2.3 不同采收期中药气味变化

中药采收期分为采收年限、采收季节、采收物候期,采收期对中药的产量、收获率以及中药内源性物质积累都有影响。《中国药典》2020年版有486种植物药规定了采收期标准^[61],但其时间范围较为

宽泛且存在地域差异。GC-IMS能够捕获不同采收期中药VOCs差异,可用于评价不同采收期中药的质量。Ma等^[62]利用GC-IMS对5个不同月份采收的前胡进行检测,共鉴定出80种以萜烯为主的化合物,结合PCA、最近邻算法对各采收期前胡的VOCs进行分析,结果表明随采收时间改变挥发性成分变化显著,挥发性成分累积量在12月达到峰值,为确定前胡最佳采收时间提供参考。广陈皮作为药食同源中药,是橘的栽培变种茶枝柑的果皮,Liu等^[63]利用GC-IMS对6个不同时期采摘的茶枝柑果皮进行检测,共鉴定出71种化合物,建立指纹图谱可观察到各时期VOCs含量变化,结合PLS-DA模型可有效区分不同采收期样品,结合变量重要性投影(VIP)值筛选出12种判别性化合物,为不同采收时间的广陈皮质量评价提供参考。闹羊花为植物羊躑躅*Rhododendron molle* G.Don的干燥花,《中国药典》2020年版规定“4~5月份花初开时采收”,但对于“初开”的认定不明确^[64],采收具有主观性,冯靖雯等^[65]利用GC-IMS对5个花期的闹羊花进行检测,共定性鉴定47种挥发性成分,初开期样品中 α -松油醇含量最高,挥发性成分随花开时间逐步减少,可为确定闹羊花的最佳采收期提供参考。

2.4 不同加工方法中药气味变化

加工是中药从采收到患者服用必不可少的环节,中药的加工以提高药效、降低药物毒性为目标,兼顾便于运输储存和患者服用的基本要求。GC-IMS可对中药加工提供动态监测,不仅可鉴别中药不同加工品,协助阐明加工方式影响中药质量的机

表3 GC-IMS在中药产地鉴别中的应用

Table 3 Application of GC-IMS in identification of origin of Chinese materia medica

分析对象	产地	色谱柱型号	化学计量学方法	联用技术	定性化合物数量
陈皮 ^[53]	四川、江西、安徽、杭州等10个产地	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA、PLS-DA、聚类分析	—	75
荆芥 ^[54]	河北、河南、江苏、浙江、安徽、山东	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm, 1 μ m)	OPLS-DA、聚类分析、RF	HS-SPME-GC-MS	40
瓜蒌皮 ^[55]	山东、河北	FS-SE-54(5 m×0.32 mm×0.25 μ m)	PCA、聚类分析	—	88
连翘 ^[56]	陕西、河南、山西、山东	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	—
闹羊花 ^[57]	湖北、湖南、山东、江西	FS-SE-54-CB-1(0.53 mm×15 m×1 μ m)	聚类分析、PCA、OPLS-DA	—	62
松茸 ^[58]	云南、四川、西藏自治区	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	25
艾草 ^[59]	蕲春、河南、四川	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	64
零陵香 ^[60]	湖南、广西	—	PCA	—	25

制,而且可结合加工特点与中药需求来调整设备参数、优化工艺、规范加工过程,便于制定最佳加工方案。中药的加工方法众多,不同品种规格的中药加工方法不同,常见炮制、干燥、切片、粉碎等^[66],目前已有学者将 GC-IMS 用于中药干燥、炮制加工环节,为中药最佳加工工艺的优选提供了参考。

2.4.1 不同干燥方法中药气味变化 目前使用 GC-IMS 技术探索中药干燥过程中 VOCs 变化的研究,多以鉴别加工品和优化干燥工艺为目的,考虑是因为含挥发性成分的中药易受干燥工艺影响,而损失有效成分降低药效。因此,对于富含挥发性成分的中药,精准调控干燥条件可帮助保留药效成分,使中药保持较高品质。姜是一味常见的中药和香料,Bai 等^[67]探讨空气对流干燥对生姜品质的影响,使

用 GC-IMS 技术对鲜姜和干姜进行检测,建立指纹图谱,结合 PCA 分析评价干燥前后差异,共识别出以醛类为主的 48 种挥发性化合物,其中 12 种化合物在干姜中消失,为确定姜的最佳干燥条件提供数据参考。三七叶作为中药三七 *Notoginseng Radix et Rhizoma* 的主要副产物,含有大量水分,干燥是三七叶常用的加工方法。李云嵌等^[68]使用 GC-IMS 和高效液相技术对鲜三七叶和经过干燥的干三七叶分别进行挥发性成分与活性成分检测,结果表明 3 种干燥方式不同程度减弱了三七叶的功能活性,但热泵干燥后的干三七叶中醛醇类挥发性化合物相对含量最高,GC-IMS 指纹图谱可显著观察到不同干燥组 VOCs 差异,为探索三七叶最佳干燥方式提供参考。此外,对其他中药基于 GC-IMS 技术在干燥中的应用进行汇总,见表 4。

表 4 GC-IMS 在中药不同干燥方法中应用
Table 4 Application of GC-IMS in different drying methods of Chinese materia medica

分析对象	干燥方式	色谱柱型号	化学计量学方法	联用技术	定性化合物数量
九制陈皮 ^[69]	烘干、晒干	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PLSR	—	46
金银花 ^[70]	晒干、阴干、低温烘干、蒸制杀青-烘干	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm×1 μm)	PCA	—	48
太子参 ^[71]	常温晾干、晒干、热风干燥、真空冷冻干燥	FS-SE-54(0.32 mm×30 m×0.25 μm)	PCA	—	53
柴达木枸杞 ^[72]	自然阴干、热风烘干、真空冷冻干燥、微波干燥	MXT-5(15 m×0.53 mm×1 μm)	PCA、KNN	—	52
砂仁果实 ^[73]	冷冻干燥、热风冲击干燥等 5 种干燥方式	FS-SE-54-CB(15 m×0.53 mm)	PCA、KNN	—	34
瓜蒌 ^[74]	常温晾干、晒干,热风干燥等 4 种干燥方式	SE-54(0.32 mm×30m×0.25 μm)	PCA	HPLC	62
西洋参 ^[75]	冻干、烘干	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	52

2.4.2 不同炮制方法中药气味变化 炮制是中药独有的传统加工方式,包括炒、烫、炙、煨、煨等方法,发挥着增强疗效、缓和药性、降低毒性等作用。多数中药需经过炮制后使用,中药炮制后药性与疗效常发生改变,即使同种中药使用不同的炮制方法加工后,成分与药效也不尽相同,因此炮制是对中药质量最具影响的一步。GC-IMS 技术可用于探索中药炮制前后 VOCs 差异、区分炮制品,为中药功效物质基础和炮制工艺提供参考。中药苍术有麸炒、土炒、蒸制等多种炮制方法,王奕博等^[76]基于 GC-IMS 对苍术及苍术炮制品进行检测,结果发现炮制品中醛类成分含量较低,与水制品相比,米泔水炮制品中萜类成分含量明显降低。醋炙是现代柴胡最常用的炮制方法,宋艺君等^[77]基于 GC-IMS 对生

品柴胡和醋炙品柴胡进行检测,根据指纹图谱对比观察到二者之间挥发性成分含量存在显著差异,其中有 39 种成分在炮制后含量上升,90 种成分在炮制后含量下降,共定性识别出 61 种以醛类、醇类为主的 VOCs。六神曲作为传统的中药曲剂,炮制方法多为炒制,时海燕等^[78]基于 GC-IMS 对六神曲生品、炒品、焦品进行检测分析,有 10、11、18 种物质含量分别在生品、炒品、焦品中表现出优势,共鉴别出 60 种 VOCs,结合差异分析分别筛选出 3 者的特征性成分。此外,对其他中药基于 GC-IMS 技术在不同炮制方法中的应用进行汇总,见表 5,以上研究证明了 GC-IMS 在中药炮制痕迹研究中的可行性。

2.5 不同贮存期中药气味变化

中药贮存不当易引发变色、变质、气味消散等

表 5 GC-IMS 在中药不同炮制方法中的应用

Table 5 Application of GC-IMS in different processing methods of Chinese materia medica

分析对象	炮制方法	色谱柱型号	化学计量学方法	联用技术	定性 VOCs 数量
款冬花 ^[79]	蜜炙	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53m×1 μm)	PCA、KNN	—	53
黄精 ^[80]	蒸制	MXT-WAX(0.53 mm×30 m×1 μm)	PCA、KNN	—	62
何首乌 ^[81]	蒸制	MXT-5(15 m×0.53 mm×1 μm)	PCA、KNN	HS-SPME-GC-MS	65
侧柏叶 ^[82]	炭炒	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	36
浙麦冬 ^[83]	药典炮制方法	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	41
当归 ^[84]	酒洗、酒浸、酒炙	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA、OPLS-DA、PLS-DA	—	55
甘草 ^[85]	蜜炙	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	76
苍术 ^[86]	麸炒	非极性色谱柱(20 m×3 mm×0.2 μm)	PCA、RFC	—	—
白芍 ^[87]	蜜炙	非极性色谱(20 m×3 mm×0.2 μm)	PCA、RFC	—	—
山楂 ^[88]	酒制	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	酸碱滴定	34

质量问题,贮存是中药临床应用前不可忽视的环节。根据中药性质及治疗疾病的需要,不同中药对贮存环境与时间要求不同,含糖类、油脂类的中药易吸湿受潮,易导致中药结块或走油等质量问题,故该类中药对贮存条件要求较高,且不宜久放;部分中药需要久存,尤其辛、苦味的中药,陈化能缓和其燥烈的药性,如陈皮则有“陈久者良”之说。梁天一等^[89]使用 GC-IMS 对贮存 1、3、7、12 年的陈皮进行气味分析,共定性识别出 24 种 VOCs,研究发现贮存 3 年和 7 年的陈皮中挥发性成分相似,贮存 1 年的陈皮中烯萜类成分含量最多,贮存 12 年的陈皮中松油醇和芳樟醇含量最多,随着贮存时间延长陈皮中挥发性成分含量存在起伏。蔡惠钿等^[90]使用 GC-IMS 对陈化 1~3 年的香黄进行检测,定性鉴别出 70 种有机化合物,筛选出 7 个在 3 年间持续显著变化的挥发性标志物,该方法对香黄品质评价与年份鉴

别具有指导意义。此外,对其他中药基于 GC-IMS 技术在贮存中的应用进行汇总,见表 6。综上所述,GC-IMS 技术可用中药贮存技术考察,为不同贮存期中药的质量评价及中药贮存时限提供参考。

2.6 在中药研究领域中的其他应用

GC-IMS 技术在寄生类中药及生物发酵的中药分析中亦有应用。寄生类中药依靠寄主生长,寄主直接影响中药的产量和质量,GC-IMS 对不同寄主或不同培养条件的寄生类中药进行检测,有助于确定优良的寄主和适合的栽培条件。茯苓源于真菌茯苓 *Poria cocos*(Schw.)Wolf 的干燥菌核,是一味寄生类中药。Wang 等^[97]使用 GC-IMS 对 5 种不同基质培养的茯苓进行检测,共定性识别出以醛类为主的 70 种 VOCs,通过指纹图谱对比可观察到,在 5 种茯苓中除酸外,其他有机物含量均有显著差异,结合 PCA 和 OPLS-DA 分析可良好区分 5 种茯苓,并基

表 6 GC-IMS 在中药不同贮存期中的应用

Table 6 Application of GC-IMS in different storage periods of Chinese materia medica

分析对象	贮存时间	色谱柱型号	化学计量学 方法	联用技术	定性化合 物数量
香黄 ^[91]	1~5 年	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm× 1 μm)	PCA、OPLS- DA	E-nose、HS- SPME-GC-MS	39
香黄 ^[92]	0~12 个月	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm× 1 μm)	—	E-nose、GC-MS	38
苦杏仁 ^[93]	特定条件下放置 0、3、 4 d	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm)	PCA	—	27
川党参 ^[94]	3、6、40、80 d	MXT-WAX(30 m×0.53 mm×1 μm)	PCA	—	102
参苓白术散 ^[95]	0、1、3、8、17 周	FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm× 0.5 μm)	PCA	—	—
党参 ^[96]	3、6、60、100 d	MXT-WAX(30 m×0.53 m×1 μm)	PCA	—	50

于VIP值筛选出7种潜在标志物。肉苁蓉是一味寄生在植物根部的中药,彭旭阳等^[98]使用GC-IMS对寄生在梭梭和红柳植物根部的2种肉苁蓉进行检测,共定性识别27种有机物,通过指纹图谱可观察到,2种样品醛类成分含量差异明显,结合PCA和最近邻指纹图谱相似度分析,两种样品分离度良好。王志宏等^[99]使用GC-IMS技术对食用菌和微生物菌发酵的杜仲叶进行检测,共定性识别出68种挥发性成分,指纹图谱结合PCA分析可区分发酵前后的杜仲叶,该团队使用同样方法对发酵的杜仲皮进行分析,结果表明使用GC-IMS技术可将杜仲叶与杜仲叶发酵产物区分^[100],该研究对于杜仲资源的高值化利用具有推动作用。

3 结语与展望

综上所述,GC-IMS有分析速度快、准确性高等优点,可补人类感官描述的主观性、模糊性,该技术对中药气味成分的检测可以实现中药真伪、基源、产地的区分以及中药在采收、加工、贮存过程中的变化监控等。该技术对中药VOCs的痕量检测可高效确定中药特征,结合化学计量法可建立中药质量的定性定量模型,为中药快速鉴别和质量评价提供新的研究思路。

通过整理相关文献发现:①GC-IMS技术在中药炮制中应用频率最高,包括炮制前后对比分析、不同炮制品比较等方面,可较好的揭示炮制品挥发性成分的变化;GC-IMS技术在中药掺伪劣品鉴别中的应用较少,有待挖掘,中药伪劣品常与正品存在相同化合物,将伪劣品掺入正品中使分析情况更加复杂,增加了辨识难度。②在中药领域中,GC-IMS技术与其他技术联用可帮助分析挥发性成分,如GC-IMS与GC-MS技术结合使用,可完善对中药挥发性成分表征,不仅能检测到更多的挥发性成分,而且可互相辅证研究结果,构建更加全面可靠的分析方法。③中药挥发性成分数据处理常使用到化学计量学方法,其中PCA使用频率在90%以上,自2022年起KNN与聚类分析分别在中药炮制、产地鉴别研究中使用频率增多,常用于进一步证明PCA分析结果,而PLS-DA、OPLS-DA使用频率分别在11%和15%。

GC-IMS技术已在中药领域广泛应用,但该技术的软件部分仍存在以下问题需要关注:①数据库完整性。研究中常见有机物无法在数据库中匹配到,数据库收录VOCs数据不够完整,阻碍了中药特征性挥发成分的定性。若建立云端数据库实时收

录中药VOCs信息,补充数据库实现数据共享,将推进GC-IMS在中药领域的应用。②VOCs定性存在主观性问题。将划定的有机物进行数据库匹配时,常出现一个有机物对应多个名称的情况,此时需要研究者主观判断有机物名称。若在系统中完善自动匹配程序,无需主观意识即可自动输出化合物名称并提供准确率,将降低化合物定性错误率。③特征峰选取。建立指纹图谱需要人工观察选取感兴趣的特征,易存在误差影响数据的准确性。已有研究使用彩色差分可视化方法结合Otsu算法进行特征提取^[101],将图像中感兴趣的目标从背景中分离,实现自动化选择特征峰,若把该类数字图像处理技术融入仪器软件系统,将缩短数据处理时间,提升数据可信度。

随着数据处理技术的不断进步,数据分析软件将更加智能和精确的实现VOCs的定性及定量表征;中药挥发性成分数据库将不断扩充,有望实现中药中有机物的快速表征,为建立中药GC-IMS模型数据系统提供可能。在后续的研究中,GC-IMS技术在中药等级评价与掺伪检测中的运用等将是重点研究方向,未来也可将该技术与其他常规检测技术和智能感官技术结合应用,挖掘学科共通点,采用多源数据融合方法,提高模型预测准确率,使中药质量评价更智能、高效。GC-IMS技术未来通过不断地更新改进,在中药领域会有更加广阔的发展前景。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突

参考文献

- [1] 李海洋, 桂新景, 侯富国, 等. 中药材和中药饮片快速鉴定技术研究进展 [J]. 分析测试学报, 2023, 42(08): 1026-1038.
Li H Y, Gui X J, Hou F G, et al. Research progress on rapid identification technology of Chinese crude drugs and prepared slices of Chinese crude drugs [J]. J Instr Anal, 2023, 42(8): 1026-1038.
- [2] Gonzalez Viejo C, Tongson E, Fuentes S. Integrating a low-cost electronic nose and machine learning modelling to assess coffee aroma profile and intensity [J]. Sensors, 2021, 21(6): 2016.
- [3] Nahar L, Gavril G L, Sarker S D. Application of gas chromatography in the analysis of phytocannabinoids: An update (2020-2023) [J]. Phytochem Anal, 2023, 34(8): 903-924.
- [4] Park J, Kim K, Ryu D, et al. GC-MS/MS method for determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in

- herbal medicines [J]. *Molecules*, 2023, 28(9): 3853.
- [5] Pang X B, Nan H J, Zhong J P, et al. Low-cost photoionization sensors as detectors in GC $\times$ GC systems designed for ambient VOC measurements [J]. *Sci Total Environ*, 2019, 664: 771-779.
- [6] Zhao Y J, Wei W L, Tang L, et al. Characterization of aroma and bacteria profiles of Sichuan industrial Paocai by HS-SPME-GC-O-MS and 16S rRNA amplicon sequencing [J]. *Food Res Int*, 2021, 149: 110667.
- [7] Chen X A, Chen H Q, Xiao J, et al. Variations of volatile flavour compounds in finger citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis*) pickling process revealed by E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS [J]. *Food Res Int*, 2020, 138(Pt A): 109717.
- [8] Gu S, Zhang J, Wang J, et al. Recent development of HS-GC-IMS technology in rapid and non-destructive detection of quality and contamination in agri-food products [J]. *Trac Trends Anal Chem*, 2021, 144: 116435.
- [9] Zhu H, Zhu D Z, Sun J M. Application of GC-IMS coupled with chemometric analysis for the classification and authentication of geographical indication agricultural products and food [J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1247695.
- [10] Yin J X, Wu M F, Lin R M, et al. Application and development trends of gas chromatography - ion mobility spectrometry for traditional Chinese medicine, clinical, food and environmental analysis [J]. *Microchem J*, 2021, 168: 106527.
- [11] Zeng S F, Zeng Y, Guo P, et al. Characterization of odors and volatile organic compounds changes to recycled high-density polyethylene through mechanical recycling [J]. *Polym Degrad Stab*, 2023, 208: 110263.
- [12] 施友志, 潘勇, 杜甫, 等. 基于SHS/GC-IMS、OAV值结合多元统计学的不同品种雪茄烟叶特征香气构成差异解析 [J]. *分析测试学报*, 2023, 42(6): 674-683.
- SHI Y Z, Pan Y, Du F, et al. Identification and discrimination of characteristic aroma components of different cigar leaves based on static headspace/gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with relative odor activity value and multivariate statistical analysis [J]. *J Instr Anal*, 2023, 42(6): 674-683.
- [13] Lu Y Y, Zeng L, Li M, et al. Use of GC-IMS for detection of volatile organic compounds to identify mixed bacterial culture medium [J]. *AMB Express*, 2022, 12(1): 31.
- [14] Geng D C, Chen X Y, Lu D L, et al. Discrimination of different edible vegetable oils based on GC-IMS and SIMCA [J]. *Cyta J Food*, 2023, 21(1): 49-56.
- [15] Liu Z M, Yang M Q, Zuo Y M, et al. Fraud detection of herbal medicines based on modern analytical technologies combine with chemometrics approach: A review [J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2022, 52(7): 1606-1623.
- [16] Armenta S, Alcala M, Blanco M. A review of recent, unconventional applications of ion mobility spectrometry (IMS) [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 703(2): 114-123.
- [17] Mametov R, Ratiu I A, Monedeiro F, et al. Evolution and evaluation of GC columns [J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2021, 51(2): 150-173.
- [18] Kanu A B, Jr Hill H H. Ion mobility spectrometry detection for gas chromatography [J]. *J Chromatogr A*, 2008, 1177(1): 12-27.
- [19] Moura P C, Vassilenko V. Contemporary ion mobility spectrometry applications and future trends towards environmental, health and food research: A review [J]. *Int J Mass Spectrom*, 2023, 486: 117012.
- [20] 冯韵鸾, 佟明慧, 李清, 等. GC-IMS在食品药品检测方面的研究进展 [J]. *沈阳药科大学学报*, 2023, 40(1): 115-123.
- Feng Y L, Tong M H, Li Q, et al. Research progress of GC-IMS in food and drug testing [J]. *J Shenyang Pharm Univ*, 2023, 40(1): 115-123.
- [21] 黄润平. 气相色谱-离子迁移谱联用技术在毛橘红与光橘红分析中的应用 [D]. 广州: 广州中医药大学, 2021.
- Huang R P. Application of analysis to *Citrus grandis* "Tomentosa" and *Citrus grandis* (L.) Osbeck by gas chromatography-ion mobility spectrometry [D]. Guangzhou: Guangzhou University of Chinese Medicine, 2021.
- [22] Denawaka C J, Fowles I A, Dean J R. Evaluation and application of static headspace-multicapillary column-gas chromatography-ion mobility spectrometry for complex sample analysis [J]. *J Chromatogr A*, 2014, 1338: 136-148.
- [23] Wu X L, Li W, Li C, et al. Discrimination and characterization of the volatile organic compounds of *Acori Tatarinowii Rhizoma* based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Arab J Chem*, 2022, 15(11): 104231.
- [24] 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.
- Li W, Wu X L, Ding H, et al. Comprehensive characterization of volatile organic compounds in Qinggan Qiuyin based on HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *J Tianjin Univ Tradit Chin Med*, 2023, 42(2): 218-223.
- [25] 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.
- [26] Yuan Z Y, Qu H Y, Xie M Z, et al. Direct authentication of three Chinese materia medica species of the *Lilii Bulbus* family in terms of volatile components by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Anal Methods, 2019, 11(4): 530-536.
- [27] 中国食品药品检定研究院. 国家药品抽检年报(2022) [EB/OL]. (2022-03-30) [2024-04-16]. <https://www.nifdc.org.cn/nifdc/bshff/gjchj/gjchjtzgg/20230330172056529775.html>. National institutes for Food and Drug Control. Annual report of national drug inspection (2022) [EB/OL]. (2022-03-30)[2024-04-16]. <https://www.nifdc.org.cn/nifdc/bshff/gjchj/gjchjtzgg/20230330172056529775.html>.
- [28] 李倩, 陈燕, 窦霞, 等. 金银花、山银花、川银花化学成分及药理作用研究进展 [J]. 中国民族民间医药, 2023, 32(15): 67-72.
- Li Q, Chen Y, Dou X, et al. Advances in studies on chemical constituents and pharmacological effects of *Lonicerae Japonicae Flos*, *Lonicerae Similis Flos* and *Lonicerae Flos* [J]. Chin J Ethnomed Ethnopharm, 2023, 32(15): 67-72.
- [29] 汤杨黔南, 李利, 林丽美, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱法评价金银花和山银花风味性物质的差异 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(14): 3798-3805.
- Tang Y Q N, Li L, Lin L M, et al. Differences of flavor compounds in *Lonicerae Japonicae Flos* and *Lonicerae Flos* based on headspace gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. China J Chin Mater Med, 2022, 47(14): 3798-3805.
- [30] Zhang M M, Sun C L, Li L L, et al. Visual volatile-compound fingerprint based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics analysis and exploration in the authentic identification of *Lonicerae Japonicae Flos* [J]. J Chromatogr Sci, 2023, 61(4): 303-311.
- [31] 李海洋, 王艳丽, 岳佑淞, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱技术的白及及伪品玉竹饮片的快速鉴别 [J]. 中草药, 2024, 10(2): 605-613.
- Li H Y, Wang Y L, Yue Y S, et al. Rapid identification of *Bletilla striata* and its counterfeit *Polygonatum odoratum* decoction pieces based on gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2024, 10(2): 605-613.
- [32] 李海洋, 王艳丽, 岳佑淞, 等. 基于GC-IMS的白及饮片与黄花白及饮片的挥发性有机物差异研究 [J]. 中国药
- 学杂志, 2023, 9(12): 1074-1083.
- Li H Y, Wang Y L, Yue Y S, et al. Study on the difference of volatile organic compounds between *Bletilla striata* decoction pieces and *Bletilla ochracea* decoction pieces based on GC-IMS [J]. Chin Pharm J, 2023, 9(12): 1074-1083.
- [33] He J, Ye L H, Fang C F, et al. Identification of changes in volatile organic compounds in *Ophiopogonis Radix* containing spoiled products in different proportions by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. J Food Biochem, 2022, 46(6): e13802.
- [34] 樊洪利, 刘亚雄, 乔莉, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱的北柴胡与藏柴胡鉴别 [J]. 广州中医药大学学报, 2022, 39(2): 417-421.
- Fan H L, Liu Y X, Qiao L, et al. Identification of *Bupleurum chinense* DC. and *Bupleurum marginatum* var. Wall. ex DC stenophyllum (Wolff) Shan et Li Based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. J Guangzhou Univ Tradit Chin Med, 2022, 39(2): 417-421.
- [35] 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(08): 1899-1907.
- Wang Z Z, Zhang H, Li J G, et al. Identification of *Ginseng Radix* et *Rhizoma Rubra*, *Panaxis Quinquefolii Radix* and *Ginseng Radix* et *Rhizoma* based on GC-IMS technology [J]. J Chin Med Mater, 2022, 45(8): 1899-1907.
- [36] 郭凤柳, 熊蕊, 刘晓慧, 等. 基于气相色谱离子迁移谱技术的川贝母差异性探索 [J]. 中国现代中药, 2021, 23(9): 1590-1594.
- Guo F L, Xiong R, Liu X H, et al. A preliminary exploration on difference of *Fritillaria cirrhosae Bulbus* by GC-IMS [J]. Mod Chin Med, 2021, 23(9): 1590-1594.
- [37] 耿越, 马宁. 一种基于GC-IMS技术区分阿胶与其他动物源胶的方法和应用: 中国, CN112798709A [P]. 2021-05-14.
- Geng Y, Ma N. A method and application of GC-IMS technology to distinguish donkey-hide gelatin from other animal-derived glue: China, CN112798709A [P]. 2021-05-14.
- [38] 周倩, 耿雪, 高奇, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱的温里药共有及差异性挥发性成分分析: 中国, CN115166068B [P]. 2023-08-25.
- Zhou Q, Geng X, Gao Q, et al. Analysis of common and differential volatile components of Wenli medicine based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry: China, CN115166068B [P]. 2023-08-25.
- [39] 王雨青, 刘金凤, 于佳禾, 等. 2020年版《中国药典》中收录的多基原中药材鉴别的研究现状、问题及对策 [J]. 华西药理学杂志, 2021, 7(2): 214-222.
- Wang Y Q, Liu J F, Yu J H, et al. Current progress,

- problems and strategies of the identification of multi-source Chinese medicinal materials in Chinese pharmacopoeia (2020 edition) [J]. West China J Pharm Sci, 2021, 7(2): 214-222.
- [40] 孙雪倩, 杨彬, 李遇伯. 多基原中药质量评价研究进展 [J]. 中草药, 2024, 55(12): 4214-4224.
Sun X Q, Yang B, Li Y B. Research progress on quality evaluation of multi-source traditional Chinese medicine [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2024, 55(12): 4214-4224.
- [41] Song Y J, Guo T, Liu S J, et al. Identification of *Polygonati Rhizoma* in three species and from different producing areas of each species using HS-GC-IMS [J]. LWT, 2022, 172: 114142.
- [42] 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.
Zeng Z L, Liu R Y, Li Q. The difference study of inorganic elements and VOCs in 3 kinds of *Polygonatum* spp. based on ICP-MS and HS-GC-IMS [J]. Sci Technol Food Ind, 2023, 44(15): 302-311.
- [43] 何佳, 罗镭, 陈浩, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法的酸橙枳实与甜橙枳实挥发性化学成分表征及鉴别研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(22): 7227-7235.
He J, Luo L, Chen H, et al. Characterization and identification of volatile components in *Citrus aurantium* L. and *Citrus sinensis* Osbeck. based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(22): 7227-7235.
- [44] 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, 8(9): 1554-1560.
Liu Z J, Lin T, Hou H C, et al. Comparative investigation of *Citrus reticulata* 'Chachi' and other *Citrus reticulata* Blanco varieties by HS-GC-IMS and HS-GC [J]. Chin J Pharm Anal, 2022, 8(9): 1554-1560.
- [45] 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.
- [46] 江英桥, 林彤, 任重远, 等. 广陈皮的鉴别分类方法及装置: 中国, CN109142590B [P]. 2021-06-22.
Jiang Y Q, Lin T, Ren Z Y, et al. Identification and classification method and device of Tangerine peel: China, CN201811287168.X [P]. 2021-06-22.
- [47] 李苏亚, 刘亚雄, 罗卓雅. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱结合化学计量学快速鉴别道地阳春砂 [J]. 广东药科大学学报, 2023, 39(5): 46-52.
Li S Y, Liu Y X, Luo Z Y. Rapid identification of authentic *Amomum villosum* based on headspace-gas chromatography-ionmobility spectrometry combined with chemometrics [J]. J Guangdong Pharm Univ, 2023, 39(5): 46-52.
- [48] 吕悦, 杜伟锋, 吴杭莎, 等. 浙麦冬与川麦冬的比较研究进展 [J]. 中华中医药杂志, 2023, 38(1): 289-294.
Lü Y, Du W F, Wu H S, et al. Research progress on difference of Zhe Maidong and Chuan Maidong [J]. China J Tradit Chin Med Pharm, 2023, 38(1): 289-294.
- [49] He J, Ye L H, Li J H, et al. Identification of *Ophiopogonis Radix* from different producing areas by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis [J]. J Food Biochem, 2022, 46(6): e13850.
- [50] Zhou Y X, Wang D D, Duan H, et al. Detection and analysis of volatile flavor compounds in different varieties and origins of goji berries using HS-GC-IMS [J]. LWT, 2023, 187: 115322.
- [51] 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.
Li M Y, Shen T C, Liu C F, et al. Research on the quality of wolfberry from different production areas [J]. Food Ferment Ind, 2021, 47(24): 56-63.
- [52] 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.
Wang Y, Fan J L, Zhang M M, et al. Analysis on volatile components in American ginseng of different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. J Instrum Anal, 2023, 42(8): 976-983.
- [53] 庞钊靖, 万国超, 刘振平, 等. GC-IMS 结合化学计量学分析对新会陈皮的鉴别 [J]. 食品科学, 2023:1-12.
Pang J K, Wan G C, Liu Z P, et al. Study on the identification of Xinhui tangerine peel by GC-IMS combined with chemometric analysis [J]. J Food Sci, 2023:1-12.
- [54] 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.
- [55] 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.
Zhang M M, Dong S S, Cui L, et al. Distinction of *Trichosanthis Pericarpium* from different producing areas by GC-IMS combined with chemometrics [J]. Chin Tradit Pat Med, 2022, 44(7): 2208-2213.
- [56] 李军山, 高晗, 张浩. 气相离子迁移谱结合化学计量学快速鉴别不同产地连翘 [J]. 中国民族民间医药, 2021, 7

- (12): 47-50, 88.
- Li J S, Gao H, Zhang H. Identification of forsythiae fructus from different origins by GC-IMS with chemometrics methods [J]. Chin J Ethnomed Ethnopharmacy, 2021, 7(12): 47-50, 88.
- [57] 冯靖雯. 闹羊花质量标准提升研究 [D]. 成都: 成都中医药大学中药学, 2021.
- Feng J W. Study on the improvement of the quality standard of *Rhododendri Mollis Flos* [D]. Chengdu: Chengdu University of Traditional Chinese Medicine, 2021.
- [58] 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.
- [59] 张继军, 王胜利, 伍友元, 等. 一种艾草产地鉴别分类方法及系统: 中国, CN109633058A [P]. 2019-04-16.
- Zhang J J, Wang S L, Wu Y Y, et al. A method and system for identification and classification of Wormwood origin: China, CN109633058A [P]. 2019-04-16.
- [60] 蔡萍, 秦优, 万丹, 等. 快速鉴定不同产地不同贮藏时间药材成分的方法: 中国, CN109613107A [P]. 2019-04-12.
- Cai P, Qin Y, Wan D, et al. Methods for rapid identification of medicinal ingredients from different regions and different storage times: China, CN109613107 A [P]. 2019-04-12.
- [61] 蒋洁梅, 郭巧生, 金江群, 等. 2020年版《中国药典》植物药材采收期标准情况分析和建议 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(3): 846-852.
- Jiang J M, Guo Q S, Jin J Q, et al. Analysis and suggestions on harvest period standards of plant medicinal materials in 2020 edition of Chinese Pharmacopoeia [J]. China J Chin Mater Med, 2022, 47 (3): 846-852.
- [62] Ma L K, Luo Y Y, Chen B L, et al. Determination of characteristic volatile component fingerprint of *Peucedanum praeruptorum* Dunn at different harvest periods based on HS-GC-IMS [J]. J AOAC Int, 2023, 106 (2): 445-456.
- [63] Liu H C, Wen J, Xu Y J, et al. Evaluation of dynamic changes and formation regularity in volatile flavor compounds in *Citrus reticulata* 'Chachi' peel at different collection periods using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. LWT, 2022, 171: 114126.
- [64] 郭小红, 冯靖雯, 王耀登, 等. 闹羊花的本草考证及炮制历史沿革分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27(22): 172-180.
- Guo X H, Feng J W, Wang Y D, et al. Herbal textual research and processing historical evolution of *Rhododendri Mollis Flos* [J]. Chin J Exp Tradit Med Form, 2021, 27(22): 172-180.
- [65] 冯靖雯, 郭小红, 张砚, 等. 不同花期闹羊花中挥发性成分的 GC-IMS 分析 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2021, 27 (10): 85-92.
- Feng J W, Guo X H, Zhang Y, et al. GC-IMS analysis of volatile components in *Rhododendri Mollis Flos* at different flowering stages [J]. Chin J Exp Tradit Med Form, 2021, 27(10): 85-92.
- [66] 胡兆东, 苗艳艳, 苗明三. 中药鲜药的加工炮制技术分析 [J]. 中华中医药杂志, 2022, 37(7): 3999-4003.
- Hu Z D, Miao Y Y, Miao M S. Analysis on the processing technology of fresh Chinese medicine [J]. China J Tradit Chin Med Pharm, 2022, 37(7): 3999-4003.
- [67] Bai R X, Sun J R, Qiao X G, et al. Hot air convective drying of ginger slices: Drying behaviour, quality characteristics, optimisation of parameters, and volatile fingerprints analysis [J]. Foods, 2023, 12(6): 1283.
- [68] 李云崧, 何霞红, 吴光顺, 等. 干燥方式对三七叶主要活性成分、体外抗氧化、 α -葡萄糖苷酶抑制活性、挥发性成分和代谢物的影响 [J]. 食品科学, 2023, 44(21): 98-113.
- Li Y Q, He X H, Wu G S, et al. Effect of drying method on the major active components, *in vitro* antioxidant activity, α -glucosidase inhibitory activity, volatile components, and metabolites of *Panax notoginseng* leaves [J]. Food Sci, 2023, 44(21): 98-113.
- [69] 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.
- Chen S P, Liu H C, Yang W Y, et al. Effect of different drying methods on the volatile flavor of nine-process dried tangerine peel [J]. Guangdong Agric Sci, 2022, 49 (1): 142-150.
- [70] 王燕, 卢恒, 张敏敏, 等. 基于气相-离子迁移谱的不同干燥方式下金银花挥发性成分分析 [J]. 中草药, 2022, 53(12): 3801-3810.
- Wang Y, Lu H, Zhang M M, et al. Analysis of volatile compounds in *Lonicerae Japonicae Flos* with different drying methods based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2022, 53(12): 3801-3810.
- [71] 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, 8(20): 100-107.
- Wang Y C, Zhang M M, Ma W Y, et al. Effect of different drying methods on volatile components in *Pseudostellariae Radix* based on GC-IMS [J]. Chin J Exp Tradit Med Form, 2022, 8(20): 100-107.
- [72] 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.

- Gao Y D, Hu N, Wang H L. Effect of different drying methods on volatile components in *Lycium barbarum* fruits from Qaidam based on GC-IMS [J]. Nat Prod Res Dev, 2022, 34(12): 1989-1998, 2033.
- [73] Ai Z P, Mowafy S, Liu Y H. Comparative analyses of five drying techniques on drying attributes, physicochemical aspects, and flavor components of *Amomum villosum* fruits [J]. LWT, 2022, 154: 112879.
- [74] 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.
- Jiao H R, Zhang M M, Zhao H Q, et al. Effect of different hot air drying methods on chemical constituents of *Trichosanthis Fructus* [J]. Chin J Exp Tradit Med Form, 2021, 27(23): 137-144.
- [75] 李丽丽, 张敏敏, 李蒙, 等. 不同干燥方法下西洋参的挥发性成分研究 [J]. 山东科学, 2020, 33(3): 62-67.
- Li L L, Zhang M M, Li M, et al. Study of the volatile components in *Panax quinquefolius* L. with different drying methods [J]. Shandong Sci, 2020, 33(3): 62-67.
- [76] 王奕博, 张浩, 任培芳, 等. GC-IMS 比较米泔水制苍术炮制过程中挥发性有机物的变化 [J]. 中国现代中药, 2023, 9(12): 2576-2582.
- Wang Y B, Zhang H, Ren P F, et al. Changes in volatile organic components in the processing of *Atractylodis Rhizoma* with rice-washed water based on GC-IMS [J]. Mod Chin Med, 2023, 9(12): 2576-2582.
- [77] 宋艺君, 郭涛, 李诗博, 等. 基于 HS-GC-IMS 比较柴胡醋炙前后挥发性成分的差异 [J]. 药物分析杂志, 2023, 43(9): 1586-1596.
- Song Y J, Guo T, Li S B, et al. Comparison of the difference of volatile components of raw and vinegar stir-baked *Bupleuri Radix* based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Chin J Pharm Anal, 2023, 43(9): 1586-1596.
- [78] 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, 9(10): 3120-3131.
- Shi H Y, Xu N, Zhao X, et al. Analysis of volatile matter changes of *Massa Medicata Fermentata* before and after processing based on HS-GC-IMS technology [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2023, 9(10): 3120-3131.
- [79] 杨冰月, 罗瑶, 姬海月, 等. 基于 HS-GC-IMS 技术分析款冬花蜜炙前后挥发性有机物的差异性 [J]. 中草药, 2022, 53(6): 1854-1861.
- Yang B Y, Luo Y, Ji H Y, et al. Analysis of volatile organic compounds of raw and honey baked *Farfarae Flos* based on headspace-gas-chromatography ion-mobility spectrometry [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2022, 53(6): 1854-1861.
- [80] 宋艺君, 郭涛, 高阳丽, 等. GC-IMS 法比较黄精不同炮制品特征气味物质差异 [J]. 中国药理学杂志, 2022, 57(16): 1329-1336.
- Song Y J, Guo T, Gao Y L, et al. Using GC-IMS to compare the difference of specific odor substance of *Polygonati Rhizomai* different processed products [J]. Chin Pharm J, 2022, 57(16): 1329-1336.
- [81] Xing Y C, Yu Z Y, Hu X H, et al. Characterization of volatile organic compounds in *Polygonum multiflorum* and two of its processed products based on multivariate statistical analysis for processing technology monitoring [J]. J Chromatogr A, 2022, 1680: 463431.
- [82] 石典花, 戴衍朋, 卢琪, 等. 基于 GC-IMS 气味检测辨识侧柏叶炒炭程度研究 [J]. 中草药, 2021, 52(21): 6510-6517.
- Shi D H, Dai Y P, Lu Q, et al. Primary study on identification of carbonizing degree of *Platycladi Cacumen* based on odor detection by GC-IMS [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2021, 52(21): 6510-6517.
- [83] 何佳, 叶丽华, 李静慧, 等. 采用顶空-气相色谱-离子迁移谱分析加工前后浙麦冬中的挥发性有机物 [J]. 分析仪器, 2021(1): 103-108.
- He J, Ye L H, Li J H, et al. Analysis of VOCs in *Zhemaidong* before and after processing by headspace-gas chromatography-ion migration spectrum [J]. Anal Instrum, 2021(1): 103-108.
- [84] 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.
- Lin X M, Yue L D, Zhang Z L, et al. Using GC-IMS to compare difference of specific odor components of *Angelicae Sinensis Radix* by different yellow wine processing methods [J]. Chin Tradit Herb Drugs, 2020, 51(17): 4464-4472.
- [85] 周倩, 戴衍朋, 郭威, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱的生、炙甘草饮片挥发性有机物指纹图谱分析 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(16): 3857-3862.
- Zhou Q, Dai Y P, Guo W, et al. Analysis of volatile organic compounds (VOCs) fingerprint of raw and honey-fried licorice based on headspace-gas-chromatography ion-mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. China J Chin Mater Med, 2020, 45(16): 3857-3862.
- [86] Li Q L, Li R Q, Cao G, et al. Direct differentiation of herbal medicine for volatile components by a multicapillary column with ion mobility spectrometry method [J]. J Sep Sci, 2015, 38(18): 3205-3208.
- [87] Cao G, Shou Q Y, Li Q L, et al. Static headspace-multicapillary column with gas chromatography coupled to ion mobility spectrometry as a simple approach for the

- discrimination of crude and processed traditional Chinese medicines [J]. J Sep Sci, 2014, 37(21): 3090-3093.
- [88] 戴衍朋, 石典花, 周倩, 等. 一种鉴别硫磺熏蒸山楂的方法: 中国, CN113466363B [P]. 2023.02.03.
- Dai Y P, Shi D H, Zhou Q, et al. A method for identifying sulfur-fumigated hawthorn: China, CN113466363B [P]. 2023-02-03.
- [89] 梁天一, 杨娟, 董浩, 等. 基于GC-IMS技术鉴别不同年份新会陈皮中的挥发性风味物质 [J]. 中国调味品, 2020, 45(4): 168-173.
- Liang T Y, Yang J, Dong H, et al. Identification of volatile flavor substances in Xinhui tangerine peel in different years based on GC-IMS technology [J]. China Condiment, 2020, 45(4): 168-173.
- [90] 蔡惠钿, 林良静, 陈曦, 等. 不同陈化时间老香黄的差异物质识别及变化研究 [J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(15): 5070-5078.
- Cai H D, Lin L J, Chen X, et al. Study on identification and change of different substances in Laoxianghuang at different aging time [J]. J Food Saf Qual, 2022, 13(15): 5070-5078.
- [91] 阳丹, 陈小爱, 杨玉洁, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS、HS-SPME-GC-MS技术联用分析不同发酵年份老香黄挥发性成分差异 [J]. 现代食品科技, 2022, 38(11): 313-323.
- Yang D, Chen X A, Yang Y J, et al. Using E-nose, HS-GC-IMS, and HS-SPME-GC-MS to differentiate the volatile components of Lao Xianghuang fermented for different years [J]. Mod Food Sci Technol, 2022, 38(11): 313-323.
- [92] 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]. Sci Technol Food Ind, 2021, 42(12): 70-80.
- Chen X A, Cai H D, Liu J Y, et al. Analysis of volatile components in Laoxianghuang during fermentation by electronic nose, GC-MS and GC-IMS [J]. 食品工业科技, 2021, 42(12): 70-80.
- [93] 林史珍, 杜方敏, 林良静, 等. GC-IMS技术监测加速破坏条件下苦杏仁挥发性物质变化研究 [J]. 广州中医药大学学报, 2019, 5(8): 1247-1251.
- Lin S Z, Du F M, Lin L J, et al. Monitoring variation of volatile components in *Semen Armeniacae Amarum* under accelerated damage conditions by GC-IMS technology [J]. J Guangzhou Univ Tradit Chin Med, 2019, 5(8): 1247-1251.
- [94] 胡芳弟, 余华侨, 文龙霞, 等. 一种川党参采后保鲜方法: 中国, CN115777697B [P]. 2024-02-06.
- Hu F D, Yu H Q, Wen L X, et al. A fresh preservation method of Sichuan Codonopsis after harvest: China, CN115777697B [P]. 2024-02-06.
- [95] 史亚军, 王媚, 李婧琳, 等. 一种参苓白术散的制备: 中国, CN109381654B [P]. 2021-08-20.
- Shi Y J, Wang M, Li J L, et al. Preparation of Shenlingbaizhu powder: China, CN109381654B [P]. 2021-08-20.
- [96] 胡芳弟, 余华侨, 郭艺娜, 等. 一种鲜纹党参的采后保鲜贮藏方法: 中国, CN202211506402.X [P]. 2023-03-14.
- Hu F D, Yu H Q, Wen L X, et al. A method for postharvest preservation and storage of fresh grain *Codonopsis ginseng*: China, CN202211506402.X [P]. 2023-03-14.
- [97] Wang Y N, Zhou F, Wang H, et al. Discrimination of pharmacodynamic components and volatile compounds of *Poria cocos* cultivated with five different materials based on GC-IMS analysis [J]. Food Qual Saf, 2023, 8: fyad058.
- [98] 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.
- Peng X Y, Chen J R, Cui H Y, et al. Volatile substances of different hosts of *Cistanche deserticola* in Xinjiang based on GC-IMS [J]. Sci Technol Food Ind, 2024, 45(9): 272-279.
- [99] 王志宏, 彭密军, 杨秋玲, 等. 一种高效快速分析杜仲叶及其发酵产物特征挥发性成分的方法: 中国, CN110887921B [P]. 2022-04-01.
- Wang Z H, Peng M J, Yang Q L, et al. An efficient and rapid method for the analysis of characteristic volatile components of *Eucommia ulmoides* leaves and their fermentation products was developed: China, CN110887921B [P]. 2022-04-01.
- [100] 王志宏, 彭密军, 杨秋玲, 等. 一种基于气相离子迁移谱快速分析杜仲皮及其发酵产物中挥发性成分的方法: 中国, CN111141842B [P]. 2022-04-05.
- Wang Z H, Peng M J, Yang Q L, et al. A rapid method for the analysis of volatile components in *Eucommia* bark and its fermentation products based on gas phase ion mobility spectrometry was developed: China, CN111141842B [P]. 2022-04-05.
- [101] 陈通. 基于GC: IMS技术的植物油品质分析方法研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2020.
- Chen T. Study on quality analysis method of vegetable oil based on GC-IMS technology [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.