

# 基于 CiteSpace 知识图谱的质谱成像技术在中药研究领域应用的可视化分析

吴 翠<sup>1</sup>, 于彩媛<sup>1</sup>, 冯 利<sup>1</sup>, 王亚亚<sup>1</sup>, 乔 栋<sup>1</sup>, 赵一帆<sup>2,3\*</sup>

1. 国家开放大学 农林医药学院, 北京 100039

2. 中国中医科学院 中药研究所, 北京 100700

3. 中国中医科学院 青蒿素研究中心, 北京 100700

**摘要:** 目的 分析质谱成像技术 (mass spectrometry imaging, MSI) 在中药研究中的应用现状和热点, 运用知识图谱直观展示该领域的研究历程, 为其深入研究与应用提供参考。方法 检索中国知网 (CNKI)、万方数据知识服务平台 (Wangfang)、维普中文期刊服务平台 (VIP) 和 Web of Science (WOS) 数据库中相关中英文文献, 利用 NoteExpress 文献管理软件对文献进行筛选, 采用 CiteSpace 软件绘制发文量、发文机构、作者、关键词等的知识图谱。结果 共纳入 124 篇中文文献和 306 篇英文文献。2021 年后相关发文量明显升高。《中草药》和《中国中药杂志》是中文文献发文量最多的期刊, *Journal of Ethnopharmacology* 是英文文献发文量最多的期刊。孙博团队和蔡宗苇团队分别是中英文文献发文量最多的团队, 中国中医科学院和中国科学院分别是中英文文献发文量最多的研究机构。中文文献研究热点主要集中在代谢组学、化学成分、组织分布等领域; 英文文献研究热点则集中于成分鉴定、代谢物、生物合成等方面, 中英文文献主要研究重点相同, 均涉及中药化学成分的表征和空间分布、生物合成、代谢途径等。结论 现阶段 MSI 在中药研究中的应用已较为广泛, 主要围绕中药化学成分的表征和空间定位、中药质量评价、活性成分生物合成、体内代谢与分布和药物作用机制研究等方面开展。该领域未来的研究趋势应重点关注 MSI 相关数据库的完善、定量 MSI 技术的优化、MSI 与其他技术的融合应用、中药临床研究与应用推广、三维和活体 MSI 的开发与应用等几个方面。

**关键词:** 质谱成像; CiteSpace; 知识图谱; 空间分布; 成分表征; 生物合成

中图分类号: G350; R284 文献标志码: A 文章编号: 0253-2670(2026)18-7376-12

DOI: 10.7501/j.issn.0253-2670.2026.18.024

## Visualization analysis of application of mass spectrometry imaging technology in field of traditional Chinese medicine research based on CiteSpace knowledge graph

WU Cui<sup>1</sup>, YU Caiyuan<sup>1</sup>, FENG Li<sup>1</sup>, WANG Yaya<sup>1</sup>, QIAO Dong<sup>1</sup>, ZHAO Yifan<sup>2,3</sup>

1. College of Agroforestry and Medicine, The Open University of China, Beijing 100039, China

2. Institute of Chinese Materia Medica, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

3. Artemisinin Research Center, China Academy of Chinese Medical Sciences, Beijing 100700, China

**Abstract: Objective** To analyze the current application status and hotspots of mass spectrometry imaging (MSI) in traditional Chinese medicine (TCM) research, and use knowledge graphs to display the research process in this field, providing reference for in-depth research and application. **Methods** Relevant Chinese and English literature from China National Knowledge Infrastructure (CNKI), Wanfang Data Knowledge Service Platform (Wanfang), VIP Data Knowledge Service Platform (VIP) and Web of Science (WOS) databases were retrieved. Literature was screened by NoteExpress literature management software. The CiteSpace software was used to draw a knowledge graph of publishing volume, publishing institutions, authors, keywords, etc. **Results** A total of 124 Chinese literature and 306 English literature were included. The quantities of related publications significantly increased since the

收稿日期: 2026-01-03

基金项目: 国家开放大学青年科研项目 (Q23B0013); 中国中医科学院科技创新工程项目资助 (CI2023E005TS08); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助 (ZZ15-YQ-066)

作者简介: 吴 翠, 博士, 讲师, 主要从事中药质量评价和贮藏研究。E-mail: wuc@ouchn.edu.cn

\*通信作者: 赵一帆, 博士, 助理研究员, 主要从事青蒿素类药物体内外代谢研究和中药药效物质研究。E-mail: yfzhao@icmm.ac.cn

2021. The *Chinese Traditional and Herbal Drugs* and *Chinese Journal of Chinese Materia Medica* are the journals with the highest quantities of publications in Chinese. *Journal of Ethnopharmacology* is the journal with the highest quantities of publications in English. Sun Bo's team and Cai Zongwei's team were the teams with the highest quantities of publications in Chinese and English, respectively. The China Academy of Chinese Medical Sciences and Chinese Academy of Science were the research institutions with the highest quantities of publications in Chinese and English, respectively. Research in Chinese-language literature focused primarily on metabolomics, chemical composition, and tissue distribution, whereas English literature research emphasized component identification, metabolites, and biosynthesis. The main research focus of Chinese and English literature research is the same, both involving the characterization and spatial distribution of chemical components, biosynthesis, and metabolic pathways. **Conclusion** At present, MSI has been widely used in TCM research, primarily covering the characterization and spatial localization of chemical component, quality evaluation of TCM, biosynthesis of active components, *in vivo* metabolism and distribution, and elucidation of the TCM mechanism of action. Future research should focus on the following aspects: improvement of MSI-related databases, quantitative MSI technology optimization, the integration of MSI with other analytical technologies, clinical research and application promotion of TCM, the development and application of three-dimensional and *in vivo* MSI.

**Key words:** mass spectrometry imaging; CiteSpace; knowledge graph; spatial distribution; component characterization; biosynthesis

在漫长的临床实践中,中药以整体观念、辨证论治为核心,通过多成分、多靶点协同作用发挥疗效,这种独特的作用模式是其区别于现代化学药物的显著特征。中药化学成分复杂,成分之间相互影响、相互制约,共同构成了中药发挥整体疗效的物质基础。随着全球医药领域交流的日益频繁及中医药国际化进程的不断推进,以现代科学方法、技术指标和实验证据阐明中药复杂体系的药效物质基础和作用机制,建立科学、有效的质量评价体系,是中药获得国际认可和实现现代化的必由之路。为此,科研工作者们长期以来致力于运用各类分析手段对中药进行深入研究。传统的中药分析技术,如高效液相色谱法、气相色谱法、薄层色谱法以及紫外-可见分光光度法等,虽然具有较高的灵敏度和准确度,但会破坏组织形态,不能提供生物样品中代谢物的空间分布信息。然而,明确中药活性成分在药材和组织中的分布信息对于理解和推断其作用机制至关重要<sup>[1]</sup>。

质谱成像(mass spectrometry imaging, MSI)是一种新型分析成像技术,能够对组织表面化学成分进行逐点电离,通过质谱采集得到多个离子的质荷比、强度、位置等多维数据,再经软件可视化处理,获取多离子的原位分布特征,具有灵敏度高、覆盖范围广、无需标记等特征<sup>[2-3]</sup>。与传统分析技术相比,MSI能够在无标记、无损的情况下,对样品进行直接分析,并且能够同时检测多种成分。MSI技术的这一优势弥补了传统分析方法“不能检测化合物的空间分布特征”的缺点,其作为核心支撑技术与代谢组学融合形成了空间代谢组学,这拓展了

MSI 功能边界,为中药复杂体系的研究提供了技术支持。关于 MSI 在中药(复方)成分鉴定及空间分布<sup>[4]</sup>、代谢途径分析<sup>[5]</sup>、药理活性评价<sup>[6]</sup>等已有文献报道,但目前针对这一研究领域的宏观性文献计量学研究尚未见文献报道。

CiteSpace 软件是一个支持在文献数据库中可视化探索的 Java 应用程序,是由可视化分析方法、文献计量学、数据挖掘算法相结合的一款可视化分析软件,由美国德雷塞尔大学陈超美博士及其团队研发,旨在通过视觉化手段揭示科学知识的结构、演变以及分布模式等,其已逐渐成为科研人员分析文献引文网络的重要工具,在学术研究领域应用广泛<sup>[7-8]</sup>。本研究采用 CiteSpace 软件对 MSI 在中药研究中的应用的中英文文献进行归纳,分析了发文量、发文机构、作者、关键词等要素,旨在全面展示该领域的研究现状,为 MSI 技术在中药研究领域应用的深入研究提供参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 数据来源与检索策略

使用中国知网(CNKI)、万方数据知识服务平台(Wanfang)、维普中文期刊服务平台(VIP)和 Web of Science(WOS)分别检索中英文文献。CNKI 的检索式为“主题=质谱成像”或“篇关摘=质谱成像”,精确检索,来源为所有期刊。Wanfang 的检索式为“主题=质谱成像”或“题名或关键词=质谱成像”或“摘要=质谱成像”。VIP 的检索式为“题名或关键词=质谱成像”或“摘要=质谱成像”。WOS 检索式为“topics=mass spectrometry imaging”,文献类型选择“article”,在 WOS categories 上限定

为 chemistry analytical、food science technology、plant sciences、medicine research experimental、chemistry applied、chemistry medicinal、agriculture multidisciplinary、horticulture、integrative complementary medicine。检索时段为建库至 2025 年 9 月。

## 1.2 文献筛选

纳入标准：(1) 主题与 MSI 及中药相关，包括综述、实验研究、临床研究；(2) 中文文献包含学术期刊论文和学位论文，英文文献限定为学术期刊论文，所有文献须已公开发表；(3) 纳入分析文献题录的作者、机构、关键词等研究所需信息齐全。排除标准：(1) 与主题无关的文献；(2) 会议论文、报纸、年鉴、专利、科技成果等文献；(3) 重复发表或已经撤回的文献；(4) 作者、关键词等内容缺失的文献。文献筛选流程图见图 1。

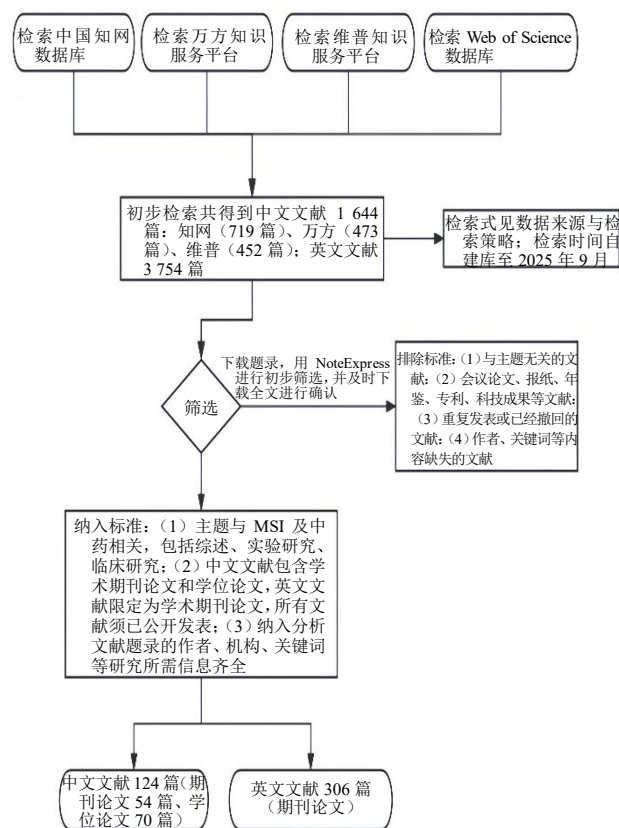


图 1 文献筛选流程

Fig. 1 Literature screening process

## 1.3 数据分析与处理

使用 Excel2016 软件绘制年发文量趋势图并统计来源期刊。利用 NoteExpress 软件筛选文献，将筛选后的中文文献题录以“Refworks”格式导出，运用 CiteSpace 6.4.R1 软件内置的“data processing

utilities”模块中的“CNKI format conversion”将 CNKI 数据格式转换为“download\_CNKI.txt”数据格式供进一步分析。将英文文献以“Plain text file”的格式导出题录信息，并命名为“download\_WOS.txt”。分别将上述 2 个 download.txt 文件导入 CiteSpace 软件对发文作者、机构、关键词等进行知识图谱分析。

根据中英文文献的起止时间设置 CiteSpace 软件的时区范围(time slicing)分别为 2015 年 2 月—2025 年 9 月和 2016 年 1 月—2025 年 9 月。时间切片(years per slice)均设置为 1 年，节点类型(node types)分别选择作者(author)、机构(institution)、关键词(keyword)。“Top N”阈值设为 50，其他为软件默认值。

## 2 结果

### 2.1 发文量分析

初检得到中文文献 CNKI 719 篇、Wanfang 473 篇和 VIP 452 篇，英文文献 3 754 篇(WOS)，经筛选最终分别纳入 124 篇和 306 篇。

所纳入文献的发文趋势见图 2。2015 年，MSI 技术在中药研究领域应用的相关中文文献首次发表。2015—2017 年，年发文量为 2 篇；2018 年以后，年发文量明显上升，从 4 篇(2018 年)逐渐升高到 25 篇(2024 年)。MSI 技术在中药中应用的相关英文文献首次发表于 2016 年且逐年升高，2021 年突破 30 篇，2025 年突破了 60 篇。在中药研究领域，MSI 技术的中文文献发表时间早于英文文献，但是英文文献年发文量明显高于中文文献。查阅文献发现大部分英文文献的发文作者和机构来源于中国，说明国内学者在发表学术论文时更多地考虑提高中药在国际上的影响力。

### 2.2 来源期刊

124 篇中文文献来源于 23 种期刊。发文量排名



图 2 MSI 技术在中药研究领域应用的年发文量

Fig. 2 Annual publication of application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

前 5 的中文期刊见表 1。《中草药》和《中国中药杂志》的年发文量并列第 1（7 篇），其次为《药物分析杂志》和《中国实验方剂学杂志》（4 篇），《药学报年》发文量为 3 篇。发文量前 5 的期刊的文献量占据了总文献量的 20.1%。这表明 MSI 在中药中的应用研究成果主要发表在该领域的权威期刊上，反映出学术界对 MSI 技术的接纳和认可。

306 篇英文文献来源于 99 种期刊。发文量 $\geq 7$  篇的英文期刊见表 2。《Journal of Ethnopharmacology》的年发文量最多，达 20 篇。其次为《Phytomedicine》，年发文量为 18 篇。此外，《Frontiers in Plant Science》、《Phytochemical Analysis》、《Food Chemistry》、《Analytical Chemistry》和《Microchemical Journal》的年发文量均 $\geq 10$  篇。《Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis》、《Journal of Agricultural and Food Chemistry》、《Analytical and Bioanalytical Chemistry》、《Journal of Chromatography B》、《Antioxidants》的年发文量稍少，

表 1 MSI 技术在中药研究领域应用相关中文文献的来源期刊

Table 1 Source journals of Chinese literature related to application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

| 序号 | 期刊名称      | 年发文量/篇 |
|----|-----------|--------|
| 1  | 中草药       | 7      |
| 2  | 中国中药杂志    | 7      |
| 3  | 药物分析杂志    | 4      |
| 4  | 中国实验方剂学杂志 | 4      |
| 5  | 药学报       | 3      |

表 2 MSI 技术在中药研究领域应用相关英文文献的来源期刊

Table 2 Source journals of English literature related to application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

| 序号 | 期刊名称                                              | 年发文量/篇 |
|----|---------------------------------------------------|--------|
| 1  | Journal of Ethnopharmacology                      | 20     |
| 2  | Phytomedicine                                     | 18     |
| 3  | Frontiers in Plant Science                        | 16     |
| 4  | Phytochemical Analysis                            | 12     |
| 5  | Food Chemistry                                    | 12     |
| 6  | Analytical Chemistry                              | 12     |
| 7  | Microchemical Journal                             | 10     |
| 8  | Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis | 9      |
| 9  | Journal of Agricultural and Food Chemistry        | 8      |
| 10 | Analytical and Bioanalytical Chemistry            | 7      |
| 11 | Journal of Chromatography B                       | 7      |
| 12 | Antioxidants                                      | 7      |

但均 $\geq 7$  篇。以上结果表明 MSI 在中药中应用的相关研究除了集中于中药、民族药，还涉及植物化学、食品化学与分析化学等交叉学科方向。此外，期刊多为分析化学与色谱类期刊，提示 MSI 分析方法的开发与质量控制是本领域研究的重要支撑手段。

## 2.3 发文作者分析

使用 CiteSpace 6.4 软件对中文文献作者合作网络进行可视化分析。在可视化网络中，节点越大说明作者出现次数越多，节点间连线表示共现关系，连线越粗代表共现关系越强。如图 3-A 所示，共获得 204 个节点，322 条连线，网络密度为 0.015 6。发文量 $\geq 3$  篇的作者见表 3，结果表明，MSI 在中药领域应用研究中，作者的发文量均较少。发文量最多的作者为孙博（5 篇），其次为马双成和秦善博（均为 3 篇），王丹、乔菲、梁艳、唐策、周严严、林俊芝、谢俊杰、曲缘章、连超杰、陈希、刘晓宁、朱广伟、柯晴瑾、董静、赵军宁、张冠华、张磊、谭鹏、范宇婷、郝露、戴胜云、张瑞萍均发表 2 篇文章，其他作者的发文量均为 1 篇。由图 3-A 可见，上述发文量 $>2$  篇的 3 位作者形成了 3 个研究团队。其中以孙博为核心的团队主要从事复方中药的质量控制、中药材中次生代谢产物的分布及代谢途径分析等研究<sup>[9-11]</sup>，以马双成为核心的团队主要研究方向为中药材中化学成分的鉴别及空间分布<sup>[12-15]</sup>。以秦善博等<sup>[16-17]</sup>为核心的团队主要开展川贝母抗肺纤维化的机制研究。发文量为 2 篇的作者，又形成了 7 个团队，以张瑞萍为核心的团队主要进行紫杉醇药物的代谢组学研究及整体动物体内药物成像分析的新方法研究<sup>[18-19]</sup>。以唐策为核心的团队，主要研究方向为中药材中化学成分或药效成分的分布研究<sup>[20-21]</sup>。范宇婷团队<sup>[22]</sup>主要研究人参治疗阿尔茨海默病大鼠的药效物质及作用机制。梁艳团队<sup>[23]</sup>主要研究大黄酸的代谢。柯晴瑾团队<sup>[24]</sup>主要研究异甜菊醇类化合物在模式动物的血脑屏障通透性。刘晓宁团队<sup>[25]</sup>主要进行桑叶中小分子的成分研究。张冠华团队<sup>[26]</sup>主要开展滇重楼根茎代谢物的空间分布特征研究。

使用 CiteSpace 6.4 软件对英文文献作者合作网络进行可视化分析，如图 3-B 所示，共获得 301 个节点，423 条连线，网络密度为 0.094 0。发文量 $\geq 3$  篇的作者有 5 位（表 3），分别是 Cai Zongwei（蔡宗苇）、Bai Gang（白钢）、Boughton Berin A、Huang Luqi（黄璐琦）、Liu Wei（刘伟）。由图 3-B 可知，

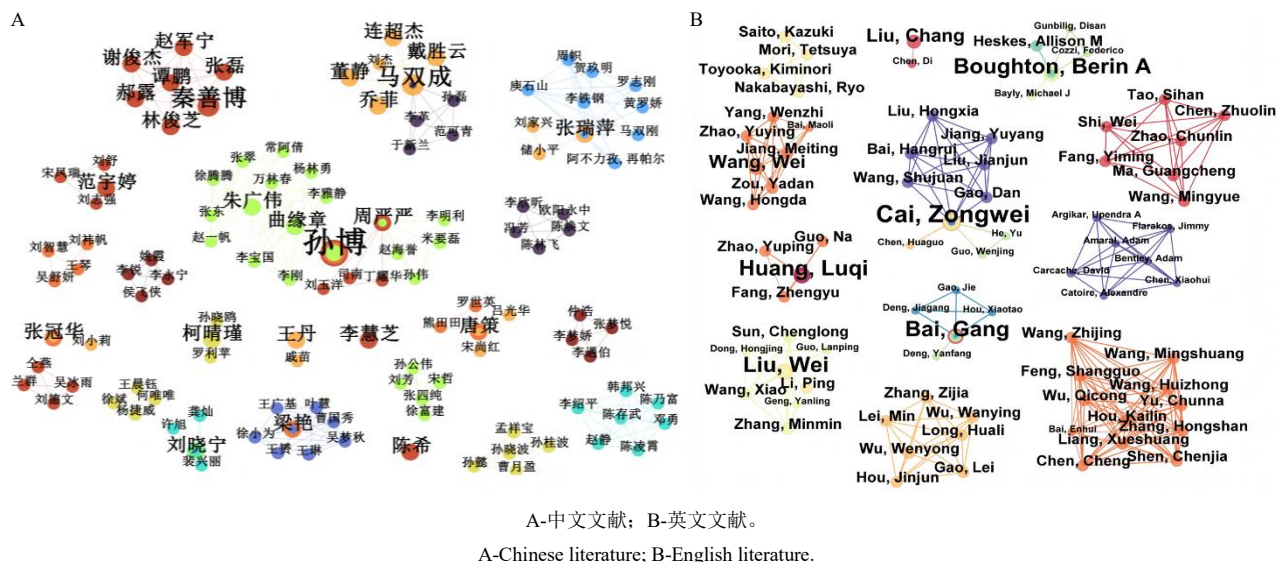


图 3 MSI 技术在中药研究领域应用发文作者的合作网络  
Fig. 3 Cooperation networks of authors of literature related to application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

表 3 MSI 技术在中药研究领域应用相关中英文文献发文量≥3 篇的作者

| 序号 | 中文文献 |       | 英文文献              |       |
|----|------|-------|-------------------|-------|
|    | 作者   | 发文量/篇 | 作者                | 发文量/篇 |
| 1  | 孙博   | 5     | Cai Zongwei (蔡宗苇) | 5     |
| 2  | 马双成  | 3     | Bai Gang (白钢)     | 4     |
| 3  | 秦善博  | 3     | Boughton Berin A  | 4     |
| 4  |      |       | Huang Luqi (黄璐琦)  | 4     |
| 5  |      |       | Liu Wei (刘伟)      | 4     |

发文量≥3 篇的 5 位作者互相之间无合作，形成了 5 个独立的团队。以 Cai Zongwei 为核心的团队开展了 MSI 对中药化学成分分布与定位研究，如人参属中药<sup>[27-28]</sup>、马兜铃属<sup>[29]</sup>等；以 Bai Gang 为核心的团队主要研究方向为中药活性成分筛选<sup>[30]</sup>、中药及复方治疗心血管疾病的治疗方案<sup>[31]</sup>；以 Boughton Berin A 为核心的团队主要研究桉树<sup>[32]</sup>、牡荆<sup>[33]</sup>等药用植物成分的定位、活性成分的生物合成等；Huang Luqi 团队主要开展综合形态学观察、代谢组学和转录组学研究生长年份对白术质量的影响<sup>[34]</sup>、人参中人参皂苷的原位分布<sup>[35]</sup>、空间代谢组学结合生物活性分析评估两种葛根的药理特性等研究<sup>[36]</sup>；Liu Wei 团队主要进行三七<sup>[37]</sup>、丹参<sup>[38]</sup>等中药的空间代谢组学研究。

从中英文文献作者的发文量看，该领域尚未形

成高产、稳定的核心作者群，多数研究者参与度较低。从合作网络看，研究团队力量较为分散，尚缺乏广泛的协作。

## 2.4 发文机构分析

对中文文献的发文机构进行可视化分析，机构合作网络见图 4-A。图谱中包含 207 个节点，447 条连线，网络密度 0.021 0。有些机构的合作仅限于同一地区，如成都中医药大学、中国食品药品检定研究院。有些机构突破了地理位置因素的影响，形成了比较紧密的合作关系，如中国中医科学院与山东中医药大学的合作网络、北京中医药大学和哈尔滨商业大学的合作网络、山东中医药大学与天津中医药大学的合作网络。此外还形成了科研机构与企业、医院之间的合作网络。发文量排名前 10 的机构见表 4。中国中医科学院位列第 1，表明其在相关研究中的核心引领地位。其中 5 机构为中医药大学，这反映出中医药院校在相关研究中的主导作用。

对英文文献的发文机构进行可视化分析，机构合作网络见图 4-B。图谱中包含 225 个节点，304 条连线，网络密度为 0.012 1。由图 4-B 可知，研究机构主要为国内中医药高校和科研院所，如 Chinese Academy of Scienc、China Academy of Chinese Medical Sciences、China Pharmaceutical University 等合作紧密，国外机构间的合作则较少。由表 4 可知，发文量最多机构是 Chinese Academy of Science，其次是 China Academy of Chinese Medical Sciences。此



图 4 MSI 技术在中药研究领域应用发文机构的合作网络

Fig. 4 Cooperation networks of institutions of literature related to application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

表 4 MSI 技术在中药研究领域应用相关中英文文献发文量排名前 10 的机构

Table 4 Top 10 institutions in terms of publication in Chinese and English literature on application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

| 序号 | 中文文献        |       | 英文文献                                                                                                                                                                           |       |
|----|-------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
|    | 机构名称        | 发文量/篇 | 机构名称                                                                                                                                                                           | 发文量/篇 |
| 1  | 中国中医科学院     | 19    | Chinese Academy of Science                                                                                                                                                     | 19    |
| 2  | 成都中医药大学     | 13    | China Academy of Chinese Medical Sciences                                                                                                                                      | 14    |
| 3  | 山东中医药大学     | 9     | China Pharmaceutical University                                                                                                                                                | 9     |
| 4  | 天津中医药大学     | 6     | Tianjin University of Traditional Chinese Medicine                                                                                                                             | 8     |
| 5  | 中国医学科学院     | 6     | Chinese Academy of Medical Sciences-Peking Union Medical College                                                                                                               | 8     |
| 6  | 上海中医药大学     | 5     | Chengdu University of Traditional Chinese Medicine                                                                                                                             | 8     |
| 7  | 北京中医药大学     | 4     | Shanghai University of Traditional Chinese Medicine                                                                                                                            | 8     |
| 8  | 中国食品药品检定研究院 | 4     | Justus Liebig University Giessen                                                                                                                                               | 7     |
| 9  | 哈尔滨商业大学     | 3     | Nanjing University of Chinese Medicine                                                                                                                                         | 6     |
| 10 | 广西大学        | 3     | Guangzhou University of Chinese Medicine, Henan University of Traditional Chinese Medicine, University of Copenhagen, Capital Medical University, Hong Kong Baptist University | 5     |

外, Tianjin University of Traditional Chinese Medicine、Chinese Academy of Medical Sciences-Peking Union Medical College、Chengdu University of Traditional Chinese Medicine、Shanghai University of Traditional Chinese Medicine、Justus Liebig University Giessen、Nanjing University of Chinese Medicine 的发文量均超过 5 篇。

## 2.5 关键词分析

**2.5.1 关键词共现分析** 对中文文献关键词进行共现分析, 可视化图谱见图 5-A。图谱中共有 184 个节点, 344 条连线, 网络密度为 0.0204。质谱成像是检索文献时的主题词, 因此不对该关键词进行

讨论。从出现频次来看(表 5), 最常出现的关键词是代谢组学(13 次), 其次是人参皂苷(5 次)、化学成分(5 次)和组织分布(5 次)。此外, 人参和皂苷均出现了 4 次, 代谢产物、代谢物均出现了 3 次。这说明 MSI 技术在中药研究中主要被用于代谢组学、化学成分分析或代谢物在组织中的分布研究, 进一步用于对中药或复方的质量控制, 分析药效物质基础。

对英文文献关键词进行共现分析, 可视化图谱见图 5-B。结果显示, 图谱中共有 295 个节点, 1079 条连线, 网络密度为 0.0249。Mass spectrometry imaging 是检索文献的主题词, 因此不对该关键词

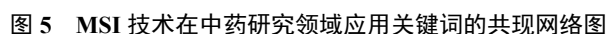


表5 MSI技术在中药研究领域应用相关中英文文献频次排名前10的关键词

| 序号 | 中文文献 |    |      | 英文文献            |    |      |
|----|------|----|------|-----------------|----|------|
|    | 关键词  | 频次 | 中心度  | 关键词             | 频次 | 中心度  |
| 1  | 代谢组学 | 13 | 0.09 | identification  | 35 | 0.32 |
| 2  | 人参皂苷 | 5  | 0.07 | metabolites     | 29 | 0.16 |
| 3  | 化学成分 | 5  | 0.11 | biosynthesis    | 17 | 0.13 |
| 4  | 组织分布 | 5  | 0.17 | plants          | 14 | 0.10 |
| 5  | 人参   | 4  | 0.02 | constituents    | 13 | 0.05 |
| 6  | 皂苷   | 4  | 0.00 | localization    | 13 | 0.08 |
| 7  | 代谢产物 | 3  | 0.02 | <i>in vitro</i> | 10 | 0.06 |
| 8  | 代谢物  | 3  | 0.19 | activation      | 10 | 0.09 |
| 9  | 代谢组  | 3  | 0.00 | leaves          | 10 | 0.04 |
| 10 | 基质   | 3  | 0.00 | metabolomics    | 8  | 0.04 |

**2.5.2 关键词聚类分析** 对中文文献进行关键词聚类分析, 选取聚类规模较大的前 7 类绘制图谱见图 6-A。聚类结果显示, 模块聚类值 ( $Q$ ) = 0.752 1

### 2.5.3 关键词突现分析

关键词在某一时间段内

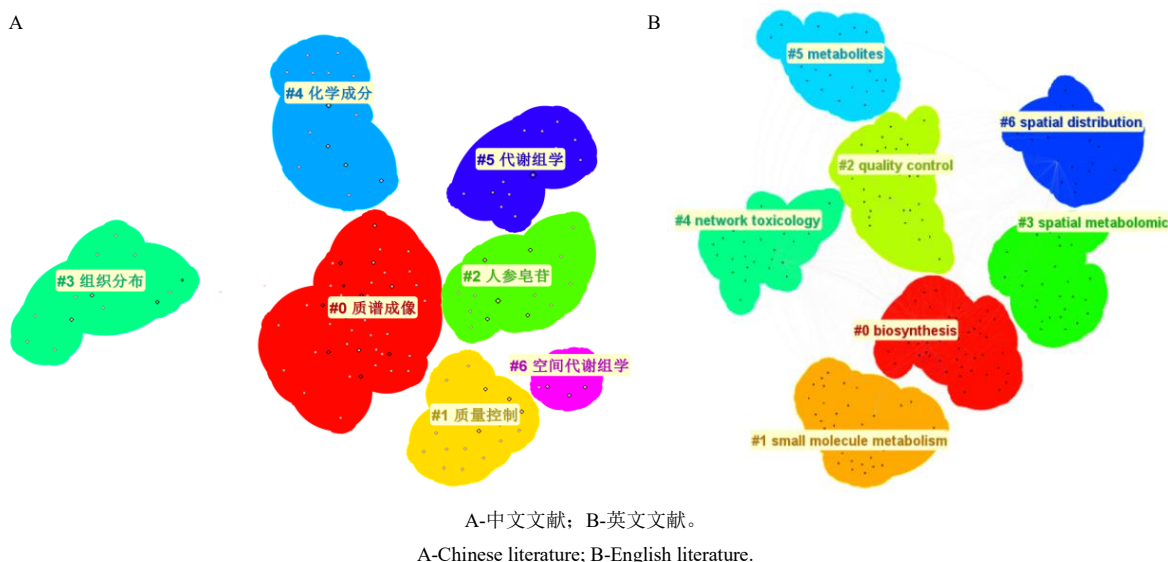


图 6 MSI 技术在中药研究领域应用关键词的聚类网络

Fig. 6 Keywords clustering networks of application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

的使用频次突然增加的现象称为关键词突现，这可发现一定时间内科学界特别关注的关键词。关键词突现在分析研究前沿、预测研究趋势和挖掘研究热点方面具有重要价值。对中文文献关键词进行突现分析，得到 MSI 技术在中药研究领域的 14 个突现词（图 7-A）。强度与关键词的影响力呈正相关，强度值越大，关键词影响力越大。从时间轴看，MSI 技术 2015 年开始应用于中药研究领域，2019 年用于中药质量标准的研究，2021 年始主要应用于化学成分、代谢物的组织分布以及代谢组学研究。

对英文文献进行关键词突现分析，结果见图 7-B。2016 年以来 MSI 技术在中药研究领域应用大致经历了 2 个阶段。2016—2021 年，主要涉及“chemical composition（化学组成）”“bioactive constituents（生物活性成分）”“localization（定位）”等方面的研究，说明此阶段 MSI 技术在中药物质基础的研究中应用较多。2022 年及以后，主要涉及“apoptosis（凋亡）”“anticancer（抗癌）”“pathway（通路）”等方面的研究，说明此阶段 MSI 技术在中药研究领域应用逐渐从物质基础研究转向中药作

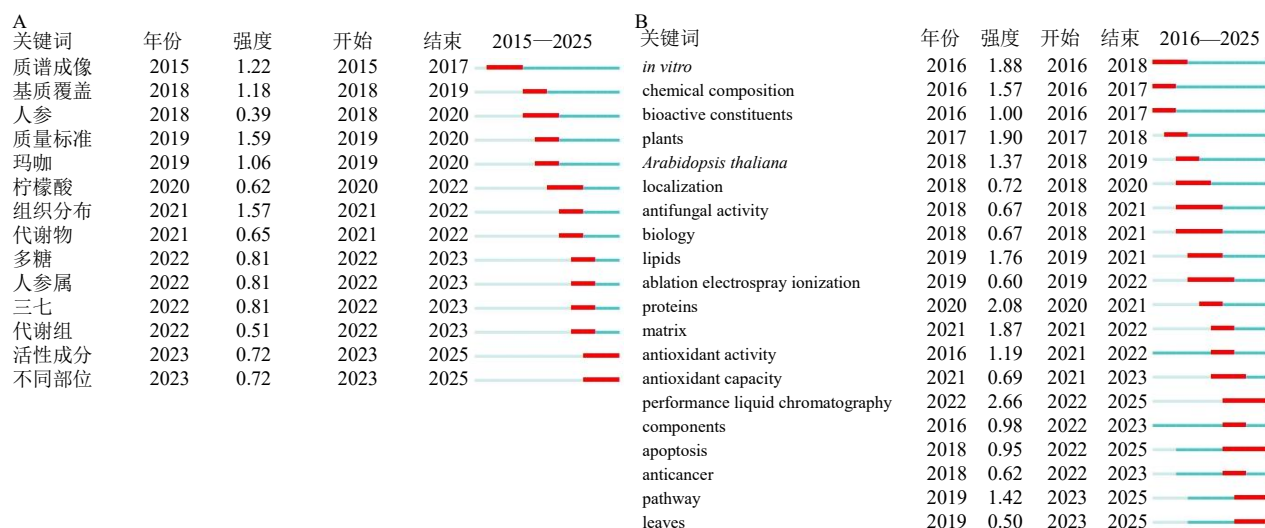


图 7 MSI 技术在中药研究领域应用相关中文 (A) 与英文 (B) 文献中关键词的突现图谱

Fig. 7 Emergence maps of keywords in Chinese (A) and English (B) literature related to application of MSI technology in field of traditional Chinese medicine research

用机制的深入探讨。

### 3 讨论

#### 3.1 文献特征

通过查阅和观察 MSI 技术在中药中应用相关文献的发文趋势,中英文文献的发文量都呈增长趋势,说明学者对此研究领域保持一定的研究热情。英文文献发文量较中文文献发文量高,但高产作者和机构均来自中国,说明国内学者在该研究领域受到国际学术界的重视和认可。国内研究团队的合作较多,但具有地域性,缺乏国际合作。因此,打破地域限制、拓宽国际交流合作是研究者在未来应该重视的方面。

#### 3.2 研究热点前沿

**3.2.1 中药活性成分的快速表征与空间定位** 由于中药化学成分复杂,传统分析方法需要根据化合物的理化性质选择合适的分析方法和手段,而 MSI 技术兼有质谱检测器的通用性,可同时检测中药多种类型的化学成分,检测范围涵盖小分子代谢物到蛋白质大分子,能直接揭示中药活性成分在植物样品中的原位分布特征。鉴于 MSI 技术仅要求简单的样品制备过程(基质喷涂、冰冻切片等),其被成功应用于中药活性成分的快速表征。如刘晓宁等<sup>[25]</sup>利用 MSI 技术对桑叶表面和叶脉切片中的小分子成分进行了快速表征。此外,MSI 技术被广泛应用于人参<sup>[35]</sup>、三七<sup>[39]</sup>、桔梗<sup>[40]</sup>、川乌<sup>[13]</sup>、巴戟天<sup>[14]</sup>、黄芩<sup>[41]</sup>等中药活性成分的空间定位研究。

**3.2.2 中药质量评价** 中药材具有多来源、多产地等复杂特征,以及品种真伪、质量优劣等问题,轻则影响疗效,重则危害人民生命健康。当前中药质量控制的思路是控制中药中一种或者几种有效成分或特征性成分的量,以此作为该中药材或中成药的质量标准,以确保这些成分在样品检验时的质量可控性和稳定性。然而,随着研究的不断深入,单一指标的控制方法暴露出许多问题。指纹图谱和特征图谱的出现,标志着中药从“单成分控制”向“整体质量控制”的转变,这在技术上主要依赖色谱分析,但存在样品前处理复杂、周期长、色谱峰易重叠难解析等问题。鉴于 MSI 具有高灵敏度、高准确度、高空间分辨率等特性,无需或仅需简单样品前处理,就能够同时获取成千上万离子的质荷比、强度、原位分布特征等信息,MSI 较色谱分析技术更加适合开展中药真伪鉴别、中药质量整体评价等研究。Bai 等<sup>[27]</sup>基于 MSI 技术和多元统计分析方法,

不仅快速区分了西洋参、三七、人参这 3 种植物,还建立了人参生长年限的快速鉴别方法。李梦娇等<sup>[42]</sup>利用 MSI 技术对高温处理前后西洋参中关键皂苷成分的变化进行检测,发现高温处理前后西洋参皂苷成分差异明显,研究结果为西洋参高温处理过程对关键人参皂苷的影响提供了定性、定量证据,为西洋参科学加工和利用提供了科学依据。曲缘章等<sup>[8]</sup>、孙博等<sup>[9]</sup>基于 MSI 技术开发出芍药甘草汤、半夏泻心汤等中药经典名方的快速质量评价方法,极大地提高了实验效率。

**3.2.3 中药炮制原理** 中药炮制是我国的一项传统制药技术,指药物在应用或制成各种剂型前,根据医疗、调制、制剂的需要,而进行必要的加工处理的过程。炮制的目的主要有增效、减毒、改变药性、引药归经、便于贮藏和服用等。近年来,科研人员尝试使用色谱技术、液质联用技术、电子鼻、红外光谱技术等多种分析方法不断深入研究中药炮制过程和原理,而 MSI 技术为炮制过程带来了独特视角。女贞子在临床应用前常需炮制以增益其功效。Li 等<sup>[43]</sup>利用基质辅助激光解吸/电离(matrix-assisted laser desorption/ionization, MALDI)-MSI 直观地展示出不同炮制时间的酒蒸女贞子中化学成分变化趋势,红景天苷、洋橄榄内酯酸、10-羟基木犀榄苷二甲酯、8-去甲基-7-酮木脂宁的含量呈上升趋势,而新女贞苷、麦角甾苷、木犀草素和女贞醛 A 的含量则呈下降趋势,这有助于加深对中药炮制机理的理解<sup>[43]</sup>。

**3.2.4 中药活性成分的生物合成研究** MSI 具有灵敏度高、选择性强、通量大等特征,能够实现多个代谢物的同时定位,辅助揭示中药活性成分生物合成的路径。青蒿素联合疗法是世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的治疗疟疾的一线用药策略,拯救了全球数百万人的生命。然而,青蒿素依赖从青蒿中提取获得,这导致青蒿素含量低(低于 0.80%)、提取成本高、产量不稳定,难以满足市场需求。文献报道青蒿素的生物合成是在腺毛细胞(glandular trichomes, GTs)进行的,而 Rika Judd 等<sup>[44]</sup>利用 MSI 还原了青蒿素在非腺毛细胞中的原位分布,进一步揭示出青蒿素在非腺毛细胞中的生物合成路径,补充了青蒿素生物合成的认知空白、加速创新代谢工程方法,为未来实现青蒿素的高产量和稳定生产提供了科学依据。刘玉洋等<sup>[11]</sup>利用 MSI 技术发现中华大蟾蜍在变态、发育、生长过

程中, 肝脏是蟾蜍体内合成蟾蜍甾烯类成分的重要器官, 为蟾蜍甾烯类成分的生物合成以及资源可持续利用提供了有力的理论支撑。此外, MSI 技术还成功应用于丹参<sup>[45-46]</sup>、连翘<sup>[47]</sup>、红豆杉<sup>[48-49]</sup>、黄芩<sup>[50]</sup>等中药活性成分的生物合成研究。

**3.2.5 中药代谢和作用机制研究** 基于 MSI 技术, 不仅能够测定中药活性成分在生物组织中的原位分布特征, 还能实现中药活性成分在生物体内的动态代谢过程, 有助于进一步解析中药作用机制。程怡等<sup>[51]</sup>利用质谱分析方法对天元芷通方的入脑成分进行鉴定, 共鉴定出 27 个成分, 利用 MSI 技术揭示多个成分在小鼠大脑中的原位分布特征, 为进一步揭示中药作用机制奠定了基础。Zhu 等<sup>[52]</sup>使用消渴丸对高糖斑马鱼模型进行干预, 在斑马鱼体内检测到 49 种与消渴丸相关的化合物 (包括 13 种原型成分和 36 种代谢产物), 使用 MSI 技术明确了已知化合物在高糖斑马鱼模型中分布特征。Zhang 等<sup>[53]</sup>利用空间代谢组学研究紫杉醇在小鼠体内的代谢和分布, 发现对小鼠及其皮下移植肿瘤组织注射紫杉醇或其脂质体后, 药物分布在小鼠多个器官内, 但是肾脏几乎无分布, 提示紫杉醇主要通过胆汁排泄到粪便。而注射紫杉醇前体药物后, 其代谢后产生的紫杉醇则主要分布在肿瘤组织部位, 为评估该类药物的肿瘤靶向效率提供了直观有效的途径。

空间代谢组学是代谢组学与分子影像技术相结合的新兴学科, 旨在研究生物样品中代谢物在脏器/组织微区的精确分布, 应用于代谢异质性解析、发病机制和作用机制等研究。范宇婷等<sup>[22]</sup>应用空间代谢组学方法研究了人参治疗阿尔兹海默症大鼠的药效物质为人参皂苷 Rg<sub>5</sub>、Rg<sub>6</sub>, 西洋参皂苷 R<sub>1</sub>, 人参皂苷 Rb<sub>1</sub> 等成分, 这些物质可能通过调节与神经炎症、神经元损伤、能量缺失以及脂肪酸异常代谢密切相关的代谢途径中的上游靶点发挥作用, 实现对关键代谢物水平的精确调控, 从而缓解阿尔茨海默病。

### 3.3 MSI 技术在中药中应用研究的局限性

MSI 技术在中药研究中有一定的局限性, 主要体现在以下几个方面: (1) 中药化学成分鉴定难题: 一方面, 完善中药成分数据库是鉴定未知化合物的基础, 而数据库的建立和化合物的鉴定耗时较长、鉴定难度大。另一方面, MSI 缺乏色谱分离过程, 无法进行中药同分异构体的分离与鉴定。虽然离子

淌度技术能够区分同分异构体, 但相关技术和数据库仍需不断完善。(2) 中药活性成分的 MSI 定量研究 (quantitative mass spectrometry imaging, QMSI) 也是重要的研究方向, 尚未见报道。(3) 中药化学成分种类繁多、生物利用度偏低、生物基质效应等问题, 导致 MSI 检测灵敏度低于液质联用技术, 严重影响了 MSI 在中药代谢和作用机制研究中的应用。(4) 基于 MSI 的空间代谢组学报道较多, 但与其他实验技术的融合应用有所欠缺。(5) 目前文献的报道均集中于基础研究, 如化学成分的鉴定和分布、药效物质的作用机制、药效成分的代谢过程等, 未见其在临床研究中应用的文献报道。(6) 当前研究聚焦于活性成分或代谢物在二维平面的分布特征, 就像一个“快照”, 虽然有价值, 但无法讲述药物作用的完整动态过程。

综上, 未来研究方向包括 MSI 相关数据库的完善、QMSI 和 MSI 离子化效率的提升、MSI 与其他技术的融合应用、MSI 在中药临床研究与应用的推广、三维 MSI 技术的开发与应用、特异性衍生化试剂开发、低干扰和高普适性基质开发、活体 MSI 的探索等。

## 4 结论与展望

本研究首次利用 CiteSpace 软件对 MSI 技术在中药中应用的相关中英文文献进行了整体分析, 以可视化知识图谱的形式展示了相关研究的发文期刊、核心作者、研究团队、合作机构、关键词共现和聚类概况, 探讨了 MSI 技术在中药研究中的应用的现状和发展趋势。结果表明, MSI 技术在中药应用的研究热点是中药化学成分表征与空间定位、中药质量评价、中药炮制原理、中药活性成分生物合成研究、中药代谢和作用机制研究。本研究存在一定的局限性: (1) 仅纳入 3 个中文数据库 (CNKI、Wanfang 和 VIP), 一定程度上限制了分析的广度。(2) 仅设定了时间切片分数为 1, 而设置不同的时间切片分数会得到不同的结果, 这导致了一定的局限性。(3) 通过人工剔除与主题不相关的文献, 人工的主观性可能会对分析结果的客观性产生一定影响。未来 MSI 在中药研究领域的热点仍将持续, 人工智能技术的发展、中药化学成分数据库的完善、多技术整合等, 有望扩大 MSI 技术在中药研究领域应用的范围和场景。综上, 本研究通过可视化分析总结了 MSI 技术在中药研究领域应用的研究热点, 以期对中药深入研究提供参考。相信随着 MSI

技术在中药研究中的推广应用, 中药研究将迈向新的高度。

**利益冲突** 所有作者均声明不存在利益冲突

#### 参考文献

- [1] 申夺, 闵建新, 陈杰, 等. 质谱成像技术在中药分析领域中的研究与应用 [J]. 中国科学: 化学, 2025, 55(3): 661-677.
- [2] Yang S H, Zhan L P, Liu C Z, *et al.* Mass spectrometry imaging of small molecule in situ in *Lepidium meyenii* (Maca) using gold nanoparticles matrix [J]. *Microchem J*, 2019, 150: 104190.
- [3] Gadea A, Fanuel M, Le Lamer A C, *et al.* Mass spectrometry imaging of specialized metabolites for predicting lichen fitness and snail foraging [J]. *Plants*, 2020, 9(1): 70.
- [4] Sevindik E, Aydin A, Yildirim E M. Chemical compositions and antiproliferative effect of *Citrus sinensis* and *Citrus aurantium* flowers in the west Anatolian ecological conditions [J]. *J Essent Oil Bear Plants*, 2018, 21(4): 1011-1020.
- [5] Liu Q L, Huang Y, Linghu C, *et al.* Metabolic profiling, in-situ spatial distribution, and biosynthetic pathway of functional metabolites in *Dendrobium nobile* stem revealed by combining UPLC-QTOF-MS with MALDI-TOF-MSI [J]. *Front Plant Sci*, 2023, 13: 1125872.
- [6] Fan Y T, Wang A M, Liu Z Q, *et al.* Integrated spatial metabolomics and network pharmacology to explore the pharmacodynamic substances and mechanism of *Radix ginseng-Schisandra chinensis* herb couple on Alzheimer's disease [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2024, 416(19): 4275-4288.
- [7] Chen C M. CiteSpace II: Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *J Am Soc Inf Sci*, 2006, 57(3): 359-377.
- [8] 施江南, 温乐乐, 江丽洁, 等. 基于文献计量学的覆盆子研究热点与趋势分析 [J]. 中草药, 2025, 56(2): 598-616.
- [9] 曲缘章, 孙博, 朱广伟, 等. DESI-MSI 技术在经典名方芍药甘草汤质量控制中应用研究 [J]. 中草药, 2020, 51(13): 3433-3443.
- [10] 孙博, 赵一帆, 朱广伟, 等. DESI-MSI 在半夏泻心汤质量控制中的应用 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2020, 26(7): 117-128.
- [11] 米要磊, 孙伟, 李明利, 等. MALDI-MSI 在药用植物次生代谢产物组织分布中的应用: 以玛咖为例 [J]. 中国中药杂志, 2020, 45(3): 596-601.
- [12] 聂黎行, 黄烈岩, 钱秀玉, 等. 基于 AP-MALDI-IT-TOF/MS 和 DESI-Q-TOF/MS 的板蓝根全质谱成像及品质相关指标成分群的研究 [J]. 中国药理学杂志, 2023, 58(9): 823-830.
- [13] 戴胜云, 蒋双慧, 董静, 等. 基质辅助激光解吸电离成像质谱法可视化分析制川乌炮制过程生物碱空间分布的研究 [J]. 中国药理学杂志, 2022, 57(10): 834-839.
- [14] 乔菲, 戴胜云, 连超杰, 等. 基质辅助激光解吸质谱成像可视化分析巴戟天炮制品中化学成分的空间分布 [J]. 药物分析杂志, 2022, 42(8): 1312-1318.
- [15] 于新兰, 范可青, 孙磊, 等. 四极杆飞行时间串联质谱辅助薄层色谱鉴别重楼中多种重楼皂苷 [J]. 药物分析杂志, 2015, 35(8): 1495-1499.
- [16] 秦善博, 谭鹏, 郝露, 等. 基于空间代谢组学探究川贝母抗肺纤维化的作用机制 [J]. 中国实验方剂学杂志, 2024, 30(13): 150-159.
- [17] 秦善博, 谭鹏, 郝露, 等. 基于空间代谢组学探究川贝母抗肺纤维化的作用机制 (II) [J]. 中草药, 2024, 55(2): 479-488.
- [18] 储小平, 臧清策, 刘家兴, 等. 基于食管癌体外培养多细胞肿瘤球的紫杉醇药物质谱成像代谢组学研究 [J]. 药学报, 2022, 57(3): 793-801.
- [19] 罗志刚, 贺玖明, 李铁钢, 等. 基于高分辨质谱技术的整体动物体内药物成像分析新方法研究 [J]. 质谱学报, 2017, 38(4): 417-424.
- [20] 熊田田, 罗世英, 裴照卿, 等. 基于质谱成像可视化表征甘草饮片主要化学成分组织分布 [J]. 亚太传统医药, 2023, 19(5): 54-58.
- [21] 陈文静, 郑钰宁, 赵琳, 等. DESI-MSI 和 UPLC 分析芍药根不同组织药效成分的分布 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(16): 4333-4340.
- [22] 范宇婷, 刘志强, 邢俊鹏, 等. 基于空间代谢组学方法研究人参治疗阿尔兹海默症大鼠的药效物质及作用机制 [J]. 质谱学报, 2024, 45(6): 723-738.
- [23] 叶慧, 王赟, 王琳, 等. 基于 MALDI-MS 技术的新基质大黄酸在代谢组学研究中的应用 [J]. 中国药科大学学报, 2016, 47(6): 727-733.
- [24] 柯晴瑾, 罗利苹, 孙晓鸥. 基于 DESI-MSI 技术和斑马鱼模式动物研究异甜菊醇类化合物的血脑屏障通透性 [J]. 暨南大学学报: 自然科学与医学版, 2021, 42(6): 653-659.
- [25] 刘晓宁, 裴兴丽, 龚灿, 等. 基于离子液体的基质辅助激光解吸电离质谱成像分析桑叶表面和叶脉切片中的小分子成分 [J]. 分析化学, 2018, 46(12): 1923-1930.
- [26] 张冠华, 刘小莉, 马春霞, 等. 基于 MALDI-MSI 技术对滇重楼根茎代谢物的空间分布特征研究 [J]. 中国中药杂志, 2022, 47(5): 1222-1229.
- [27] Bai H R, Wang S J, Liu J J, *et al.* Localization of ginsenosides in *Panax ginseng* with different age by matrix-assisted laser-desorption/ionization time-of-flight mass spectrometry imaging [J]. *J Chromatogr B*, 2016, 1026: 263-271.
- [28] Wang S J, Bai H R, Cai Z W, *et al.* MALDI imaging for the localization of saponins in root tissues and rapid differentiation of three *Panax* herbs [J]. *Electrophoresis*, 2016, 37(13): 1956-1966.
- [29] He Y, Guo W J, Luo K L, *et al.* Poly-L-lysine-based tissue embedding compatible with matrix-assisted laser desorption ionization-mass spectrometry imaging analysis of dry and fragile *Aristolochia* plants [J]. *J Chromatogr A*, 2019, 1608: 460389.

- [30] Gao J, Lv S T, Li C Z, *et al.* Bioactivity-based antioxidative components screening and evaluation in grape seed proanthocyanidin extract [J]. *J Food Sci Technol*, 2017, 54(9): 2645-2652.
- [31] Lei W, Ni J N, Xia X T, *et al.* Searching for synergistic calcium antagonists and novel therapeutic regimens for coronary heart disease therapy from a traditional Chinese medicine, Suxiao Jiuxin Pill [J]. *J Chromatogr B*, 2018, 1092: 220-227.
- [32] Dos Santos B M, Zibrandtsen J F S, Gunbilig D, *et al.* Quantification and localization of formylated phloroglucinol compounds (FPCs) in *Eucalyptus* species [J]. *Front Plant Sci*, 2019, 10: 186.
- [33] Heskes A M, Sundram T C M, Boughton B A, *et al.* Biosynthesis of bioactive diterpenoids in the medicinal plant *Vitex agnus-castus* [J]. *Plant J*, 2018, 93(5): 943-958.
- [34] Cui X X, Wang Y H, Yu G L, *et al.* Integrated morphological observation, metabolomics, and transcriptomics to investigate the effect of growth years on the quality of *Atractylodes macrocephala* Koidz [J]. *BMC Plant Biol*, 2025, 25(1): 912.
- [35] Wang R B, Zhang L Y, Li X, *et al.* Single-cell sequencing and mass spectrometry imaging reveal the multicellular compartmentalization map of plant triterpenes: A ginsenoside in *Panax ginseng* example [J]. *Plant Biotechnol J*, 2025, 23(10): 4461-4476.
- [36] Guo N, Fang Z Y, Zang Q C, *et al.* Spatially resolved metabolomics combined with bioactivity analyses to evaluate the pharmacological properties of two *Radix Puerariae* species [J]. *J Ethnopharmacol*, 2023, 313: 116546.
- [37] Sun C L, Ma S S, Li L L, *et al.* Visualizing the distributions and spatiotemporal changes of metabolites in *Panax notoginseng* by MALDI mass spectrometry imaging [J]. *J Ginseng Res*, 2021, 45(6): 726-733.
- [38] Sun C L, Liu W, Ma S S, *et al.* Development of a high-coverage matrix-assisted laser desorption/ionization mass spectrometry imaging method for visualizing the spatial dynamics of functional metabolites in *Salvia miltiorrhiza* Bge. [J]. *J Chromatogr A*, 2020, 1614: 460704.
- [39] 刘芳, 赵瀚森, 孙公伟, 等. 基质辅助激光解析质谱成像可视化分析三七皂苷空间分布 [J]. *分析化学*, 2020, 48(7): 881-888.
- [40] 徐丽丽, 崔亚鹏, 刘娟, 等. 基质辅助激光解析质谱成像可视化分析桔梗皂苷空间分布 [J]. *中草药*, 2025, 56(7): 2268-2273.
- [41] 肖雪, 关孝康, 徐周毅, 等. 基于质谱成像分析黄芩切片主要代谢产物空间分布 [J]. *湖北医药学院学报*, 2024, 43(4): 385-389.
- [42] 李梦娇, 毕成浩, 张梦悦, 等. 基于代谢组学和质谱成像技术研究高温处理前后西洋参中关键皂苷成分的变化 [J]. *中草药*, 2025, 56(6): 1916-1925.
- [43] Li M R, Wang X Y, Han L F, *et al.* Integration of multicomponent characterization, untargeted metabolomics and mass spectrometry imaging to unveil the holistic chemical transformations and key markers associated with wine steaming of *Ligustri Lucidi Fructus* [J]. *J Chromatogr A*, 2020, 1624: 461228.
- [44] Judd R, Bagley M C, Li M Z, *et al.* Artemisinin biosynthesis in non-glandular trichome cells of *Artemisia annua* [J]. *Mol Plant*, 2019, 12(5): 704-714.
- [45] Xia J, Lou G G, Zhang L, *et al.* Unveiling the spatial distribution and molecular mechanisms of terpenoid biosynthesis in *Salvia miltiorrhiza* and *S. grandifolia* using multi-omics and DESI-MSI [J]. *Hortic Res*, 2023, 10(7): uhad109.
- [46] Tong Q, Zhang C, Tu Y, *et al.* Biosynthesis-based spatial metabolome of *Salvia miltiorrhiza* Bunge by combining metabolomics approaches with mass spectrometry-imaging [J]. *Talanta*, 2022, 238: 123045.
- [47] Tocci N, Gaid M, Kaftan F, *et al.* Exodermis and endodermis are the sites of xanthone biosynthesis in *Hypericum perforatum* roots [J]. *New Phytol*, 2018, 217(3): 1099-1112.
- [48] Yu C N, Hou K L, Zhang H S, *et al.* Integrated mass spectrometry imaging and single-cell transcriptome atlas strategies provide novel insights into taxoid biosynthesis and transport in *Taxus mairei* stems [J]. *Plant J*, 2023, 115(5): 1243-1260.
- [49] Zhan X R, Qiu T, Zhang H S, *et al.* Mass spectrometry imaging and single-cell transcriptional profiling reveal the tissue-specific regulation of bioactive ingredient biosynthesis in *Taxus* leaves [J]. *Plant Commun*, 2023, 4(5): 100630.
- [50] Sun C L, Zhang M M, Dong H J, *et al.* A spatially-resolved approach to visualize the distribution and biosynthesis of flavones in *Scutellaria baicalensis* Georgi [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2020, 179: 113014.
- [51] 程怡, 兰群, 吴冰雨, 等. 基于 UPLC-Q-TOF-MS 和 DESI-MSI 分析天元芷通方入脑成分及其脑内分布 [J]. *中国实验方剂学杂志*, 2024, 30(12): 166-172.
- [52] Zhu C Y, Jiang X J, Tian J J, *et al.* Integrated approach toward absorption, distribution, metabolism, and excretion of Xiaoke pills in zebrafish based on UPLC-HRMS and DESI-MS techniques [J]. *J Chromatogr B*, 2022, 1200: 123276.
- [53] Zhang J, Du Q Q, Song X W, *et al.* Evaluation of the tumor-targeting efficiency and intratumor heterogeneity of anticancer drugs using quantitative mass spectrometry imaging [J]. *Theranostics*, 2020, 10(6): 2621-2630.

[责任编辑 潘明佳]