DOI：10.19789/j.1004-9398.2025.06.002
文献引用：李佳文，雷佳眉，李昕怡，等．基于文献计量学的常压电离质谱研究进展及其在毒品侦测中的应用可视化分析[J]．首都师范大学学报（自然科学版），2025，46（6）：9-16. LI J W，LEI J M，LI X Y，et al. Research progress of ambient ionization mass spectrometry based on bibliometrics and its application in drug detection[J]. Journal of Capital Normal University（Natural Science Edition），2025，46（6）：9-16.

基于文献计量学的常压电离质谱研究进展及其在毒品侦测中的应用可视化分析*

李佳文[1,2]，雷佳眉[1]，李昕怡[1]，李莹莹[1]，曹伯洋[1]，李婧瑄[1]，单雅冰[1**]，李冬梅[1**]，何洪源[2]

（1. 国家毒品实验室北京分中心，北京　100164；
2. 中国人民公安大学侦查学院，北京　100038）

摘要：常压电离质谱（AIMS）技术是近20年来质谱研究领域的新兴热点研究方向之一，其重大突破和进展使质谱分析迈向了原位实时、快速高效的新时代。本文以web of science核心数据库文献资料为数据源，利用文献计量学Cite Space和VOS Viewer软件对2000—2024年发表的AIMS相关1 180篇文献进行发文量、合作分析、期刊共引及关键词等方面的可视化分析。在此基础上针对其在毒品侦测中的应用，进行研究热点及关键词聚类分析，表明AIMS在毒品缴获物，尤其是新精神活性物质（NPS）的现场侦测、便携式与小型化、快速筛查分析等方面具有突出优势。

关键词：常压电离质谱；文献计量分析；可视化分析；毒品分析；新精神活性物质
中图分类号：O657.63　　**文献标志码**：A

Research progress of ambient ionization mass spectrometry based on bibliometrics and its application in drug detection*

LI Jiawen[1,2]，LEI Jiamei[1]，LI Xinyi[1]，LI Yingying[1]，CAO Boyang[1]，LI Jingxuan[1]，SHAN Yabing[1**]，LI Dongmei[1**]，HE Hongyuan[2]

（1. National Narcotics Laboratory Beijing Regional Center，Beijing　100164；
2. People's Public Security University of China，Beijing　100038）

Abstract：Ambient ionization mass spectrometry（AIMS）has emerged as a prominent research focus in the mass spectrometry field over the past two decades. Its major breakthroughs and advancements have ushered mass spectrometry analysis into a new era of in situ real-time，rapid，and high-efficiency analysis. Based on 1 180 publications from the web of science core collection（2000—2024），this study conducted a visualized bibliometric analysis using Cite Space and VOS Viewer to examine annual publication trends，collaborative research networks，journal co-citation patterns，and keyword distributions. Focusing on abused drug detection applications，the keyword clustering analysis highlights the exceptional advantages of AIMS in on-site identification of seized narcotics，particularly new psychoactive substances（NPS），development of portable and miniaturized devices，and rapid

收稿日期：2025-01-25
*北京市科技计划项目（Z241100009124009）；法庭毒物分析公安部重点实验室开放基金项目（2023FTDWFX06）
**通信作者：shanyabing2020@163.com；lidongmei_1207@163.com

screening analysis. The findings demonstrate AIMS' outstanding capabilities in field detection scenarios requiring instant response and high-throughput analysis.

Keywords: ambient ionization mass spectrometry; bibliometric analysis; visual analysis; abused drug detection; new psychoactive substances

CLC: O657.63 **DC**: A

0 引 言

常压电离质谱(ambient ionization mass spectrometry, AIMS)技术是近20年来质谱研究领域的新兴热点研究方向之一,又称环境电离质谱、敞开式电离质谱[1]。AIMS可在常压大气环境下实现目标分析物的直接进样和离子化,无需或仅需简单样品前处理[1],极大地简化质谱分析的操作流程,缩短分析时间,目前广泛应用于食品安全、药品质量控制、生物分析、材料分析、安全反恐及毒品分析等领域[2-6]。AIMS的重大突破和进展促使质谱分析迈向了原位实时、快速高效的新时代[1]。

文献计量学通过系统分析现有文献,可深度挖掘研究热点及发展趋势,并通过可视化图表直观展示特定领域的学科全景及演化进程,在与自然科学领域交叉研究方面得到了越来越多的关注[7]。该分析方法能将数量繁多且内容各异的文献归纳分类,让研究者更好地把握研究趋势和方向。本文基于web of science(WOS)核心合集数据库对AIMS领域的文献资料进行文献计量分析,使用Cite Space软件从发文量、合作分析、期刊共引及关键词等方面绘制可视化图谱,展示该领域的研究热点、现状及未来趋势。针对法庭科学中毒品侦测领域,使用VOS Viewer软件进行关键词聚类分析,为AIMS在毒品现场原位、实时、快速高通量分析侦测中的研究提供有益参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

本文选择WOS核心合集数据库,以ambient ionization和mass spectrometry为关键词,检索时间为2000年1月1日—2024年12月30日,共检索到1 571篇相关文献,人工剔除与主题不符的文献、科普、会议论文或摘要以及编辑资料的文献和不相关的文献,得到1 180篇有效文献,用于后续分析。

1.2 分析方法

基于Java可视化分析6.4.R2版Cite Space软件,结合Microsoft Excel 2013和WOS中自带的统计功能分析文献计量,相关图形用Oringin9.1软件绘制。打开Cite Space后将时间分区设置为2000—2024年,时间切片设置为5 a,阈值设置为Top N=50,剪枝方式设置为pathfinder和pruning the merged network,节点类型依次选择作者、机构、国家、关键词、共引文献和共引期刊等节点类型。在分析过程中,主要使用了发文量分析、合作分析(包括国家、机构、作者)、期刊共引分析、关键词共现分析、突现分析和聚类分析方法。发文量和合作分析用于了解AIMS领域的发展态势,有助于确定有影响力的发文期刊及作者,明确不同国家、机构、作者之间的合作;期刊分析用于统计某一领域的知识源分布,了解该研究领域的重点核心期刊,为学者发表论文、查阅文献提供指导。关键词出现的频次与研究成果的数量具有正相关性[8],关键词聚类分析是分类所有关键词。当聚类模块值(Q)>0.3且平均轮廓值(S)>0.7,说明聚类结构显著且分析结果可靠;当S>0.5时说明聚类合理[9]。关键词突现,统计某时间段内一个关键词出现的频次增加,辅助判断未来发展趋势和研究热点,突现持续时间与研究价值亦成正相关[10]。本文针对AIMS在毒品分析中的研究进展,进行关键词聚类分析。

2 可视化分析

2.1 发文量分析

AIMS领域发文量随时间的变化趋势如图1所示。2000—2024年的年度发文量整体呈现上升趋势,该领域发文量大致可分为:2001—2009年,AIMS的起步研究阶段,每年的发文量<20篇;2010—2024年,发文量有了明显上升,2020年达到107篇。分析结果表明,近10年AIMS领域发文量稳步增长,说明该领域具有发展潜力和广泛的研究前景。

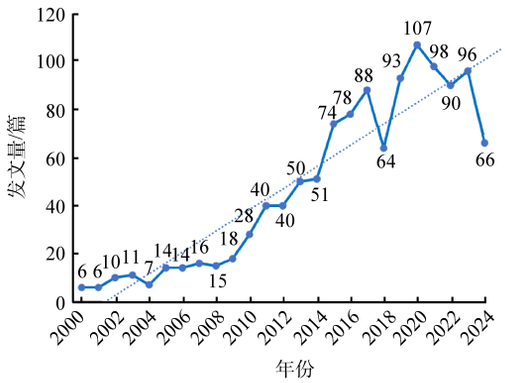
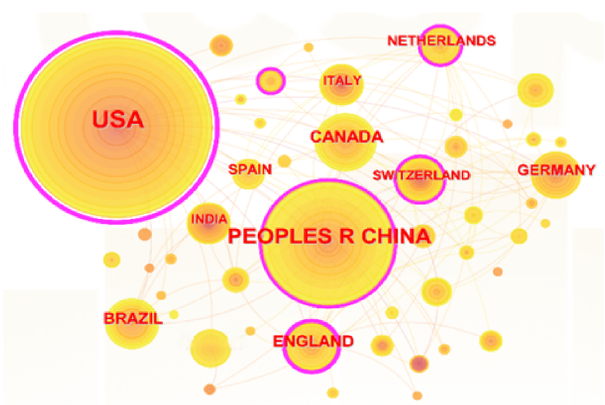


图1　2000—2024年发文量变化趋势

2.2　合作分析

2.2.1　发文国家分析

国家合作网络如图2所示,共有48个节点和120条连线,密度为0.106 5。节点代表截至分析日期已有至少48个国家开展AIMS相关研究,国家节点的形状大小与该国家的发文数量和影响力正相关。节点中介中心性越高,传播影响力越大;密度>0.050 0,说明各个国家间合作程度较高[9]。发文量排名前5位的国家分别是美国、中国、加拿大、巴西和英国,发文量分别为460、234、60、51和47篇,中介中心性分别为0.89、0.17、0.06、0.08和0.30,均为关键节点(节点的中介中心性均≥0.10[9])。美国在该领域的研究较早,研究规模明显领先于其他国家,发文量为460篇,约占总发文量的46.51%。中国在此领域的发文量和中介中心性均在前列,总体显示我国AIMS技术的研究水平和国际影响力在不断增强。



注:冷色到暖色颜色表示时间由远及近;节点大小反映出现频次;连线表示二者有合作。

图2　发文国家共现分析

2.2.2　发文机构分析

AIMS领域发文量排名前10位机构列于表1。普渡大学和中国科学院是最主要的发文机构,分别发文137和45篇,机构发文统计结果与前文国家发文量的统计结果基本一致。

表1　常压电离质谱领域发文量前10的机构

机构	国家或地区	发文量/篇	占比/%
普渡大学	美国	137	14.53
中国科学院	中国	45	4.77
德克萨斯大学	美国	43	4.56
印第安纳大学	美国	28	2.97
俄亥俄大学	美国	26	2.75
清华大学	中国	26	2.75
华东理工大学	中国	22	2.33
中山大学	中国	21	2.22
纽约州立大学	美国	20	2.12
高雄医科大学	中国台湾	18	1.91

机构合作共现如图3所示。机构合作图谱共有246个节点和302条连线,网络密度为0.010 0,说明机构间的合作比较紧密,但部分机构间仍需加强合作;发文量前10位的机构中,中心度较高的机构包括俄亥俄大学、中国科学院和德克萨斯大学,中介中心性分别为0.66、0.34和0.18,这些机构在研究合作中发挥了较高的中介作用,但发文量第一的普渡大学中介中心性仅为0.10,表明其机构间合作较少。

2.2.3　发文作者分析

发文作者的合作分析如表2所示,作者共引分析如图4所示。发文量较多的作者分别是Cooks R G和Ouyang Z(欧阳证),分别为112和56篇,2人均与其他学者有一定交流合作。作者合作分析图共有282个节点和335条连线,网络密度为0.008 5。作者节点的大小与该作者的发文量呈正相关,颜色越深代表距离截至分析日期越近,节点间的连线越粗表明作者间的合作越密切[10]。作者共引网络图共有298个节点和288条连线,网络密度为0.006 5(<0.050 0),说明该领域内作者之间的合作关系并不十分密切。

2019年美国德克萨斯大学化学系的Feider等[11]发表的“ambient ionization mass spectrometry: recent developments and applications”被引频次89次,是被引频次最高的文献,其中全面概述了从AIMS出现以来电离方法的发展,并且预测了不同电离方法发展趋势,对其他研究有较强的指导作用;排名第2和3位的文献分别为2011年Harris等[12]的“ambient sampling/ionization mass spectrometry: applications and current trends”和2010年Weston等[13]的“ambient ionization mass spectrometry: current under-

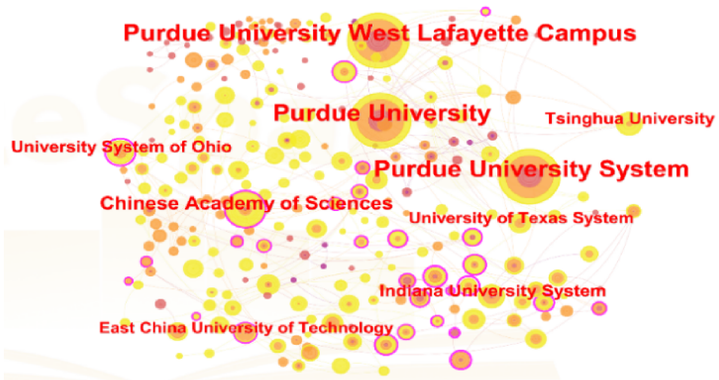


图3　机构合作共现

表2　发文作者合作分析

作者	发文量/篇	中心度	发表年份
COOKS R G	112	0.10	2006
OUYANG Z	56	0.08	2008
XU W	18	0.01	2010
MANICKE N	17	0.01	2016
PAWLISZYN J	16	0.04	2008

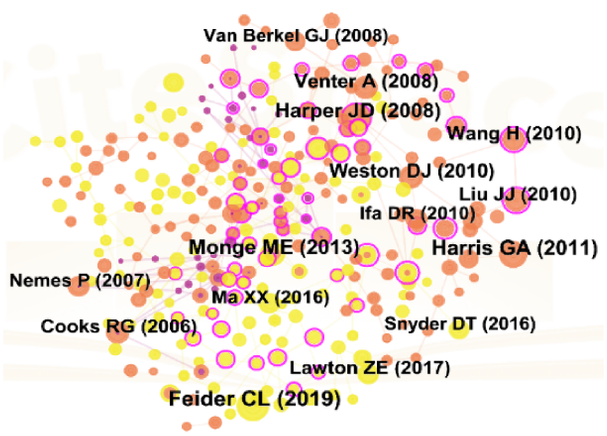


图4　发文作者共引分析

standing of mechanistic theory, analytical performance and application areas", 被引频次分别为68和66次。

2.3　期刊共引分析

本研究涉及的1 180篇文献发表在240种期刊, 总载文比为4.91篇, 期刊数目多, 主要期刊包括*Science*、*Analyst*、*Nature*、*Analytical Chemistry*、*Analytical and Bioanalytical Chemistry*、*International Journal of Mass Spectrometry*等期刊, 涵盖了药理学、神经科学、毒理学、分析化学和法庭科学等学科, 说明AIMS领域的部分研究成果品质高、创新性好。被引频次排名前3位的期刊分别为*Analytical Chemistry*、*the American Society for Mass Spectrometry*和*Analyst*, 期刊的被引共现分析列于表3。此外, 被引频次排名前10位的期刊中, *Analytical Chemistry*、*Journal of the American Society for Mass Spectrometry*、*International Journal of Mass Spectrometry*的中心度高, 分别为0.79、0.38、0.41, 表明其影响力突出, 已成为AIMS研究的重要参考。

2.4　关键词分析

2.4.1　共现分析

高频关键词共现如图5所示, 共有291个节点和360条连线, 网络密度为0.008 5。关键词节点大小与出现频率正相关, 节点间的连线越粗表示关键

表3　期刊被引共现分析

刊名	被引频次	中心度	发表年份
Analytical Chemistry	1 080	0.79	2000
Journal of the American Society for Mass Spectrometry	812	0.38	2000
Analyst	806	0.22	2000
Rapid Communications in Mass Spectrometry	743	0.13	2000
Science	665	0.08	2000
Journal of Mass Spectrometry	585	0.34	2000
International Journal of Mass Spectrometry	582	0.41	2005
Analytical and Bioanalytical Chemistry	578	0.02	2001
Analytica Chimica Acta	481	0.01	2004
Angewandte Chemie International Edition	443	0.02	2002

词间的联系越密切[14]。其中ambient ionization、mass spectrometry、identification、drugs、samples和desorption electrospray ionization等出现频次较高。说明AIMS与快速分析、鉴定等主题在领域内具有较高的影响力。

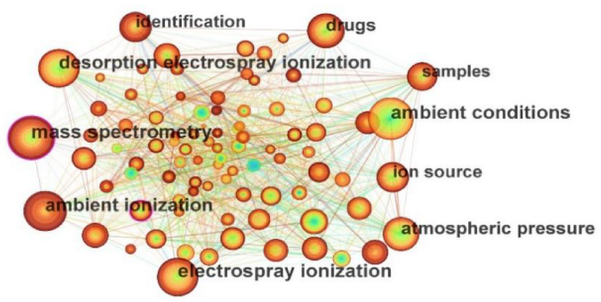


图5　高频关键词共现

2.4.2　聚类分析

运用Cite Space的clusting功能,选择对数似然比(log-likelihood ratio,LLR)算法对关键词聚类处理[15],相关结果如图6所示。共确定了8个聚类主题,包括mass spectrometry imaging、ion source、ambient ionization、samples、ambient ionization mass spectrometry、forensic science、gps和volatile particles,编号分别为#0~#7,对应平均轮廓值为0.62、0.77、0.76、0.67、0.76、0.59、0.99和1.00。平均每5 a为1个时间段,聚类#1是使用最早的关键词,聚类#6和#7的使用频率很小且出现较早,以下详细分析部分聚类。

聚类#0是将AIMS与成像技术相结合,直观显示分子的空间分布信息[16]。Guo等[17]提出质谱成像是一种新颖的分子成像技术,可从样品表面收集分子信息,如化合物的空间分布和相对含量,并且利用空间分辨率来实现可视化;在医学领域,Seubnooch等[18]利用质谱成像技术表征分布于整个肝脏分区的肝脏脂质特征,通过使用解吸电喷雾电离质谱的空间代谢成像技术,以高重现性和准确性研究整个肝脏分区中的脂质分布;在法医毒理学领域,Philipsen等[19]利用高分辨质谱成像技术绘制了头发的毒品分布,并且将质谱成像与优化的样品制备方案相结合,还能提高鉴定单股头发中几种元素和分子种类的精密度和准确性;Green等[20]将显微镜模式与二次离子质谱仪相结合,通过将光束与位置灵敏的空间探测器耦合,实现了正负二次离子的质谱成像,确保质谱图像能够在几秒内记录在2.5 mm^2的平面上。虽然高分辨质谱成像技术仍然存在污染问题和基质效应,但为化合物高分辨空间信息研究提供了独特的机会。

聚类#1~#4主要是对AIMS原理、类别、发展趋势等的研究。近10年来,AIMS已成为重要的科研工具,广泛应用于医药、食品、环境、公共安全、临床诊断等重要领域。常压电离技术作为AIMS分析的关键,无需任何样品预处理可直接检测原始实际样品,大大提高了分析效率。目前,已开发了近100种不同的常压电离技术,用于研究复杂的固体、气体、液体甚至黏性样品。Javanshad等[21]区分了常压电离方法和联用技术,基于主要样品制备方法的分类对环境电离方法研究进行了综述;Ifa等[22]批判性地评估了AIMS技术在分析有毒工业化合物、化学战剂、非法药物和制剂、爆炸物、食品、墨水、指纹和皮肤等法医学方面的应用,表明大多数环境电离方法能达到的检测限低,且很容易提供化学特性的定性信息,在某些情况下,还可以获得定量数据。

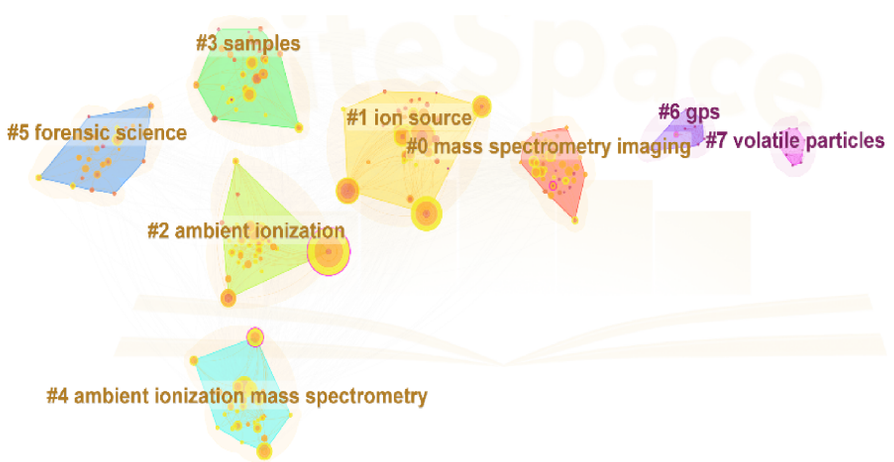


图6　关键词聚类网络

聚类#5是AIMS应用的研究,复杂样品能在质谱的真空装置之外直接电离是其最突出的优点,这样可以减少甚至取消提取和浓缩步骤,简化分析流程,同时避免因复杂的前处理过程造成样品中待测物损失,大量节省时间并减少物资消耗,还可以与便携式可移动质谱检测器结合,非常适合现场分析。因此,AIMS在毒品的快速筛查以及现场分析方面有很大的优势。Boronat等[23]综述了当前常压电离技术在法医和临床毒理学领域分析新精神活性物质(new psychoactive substance,NPS)的适用性,结果表明AIMS对NPS分析的适用性能在许多概念验证研究中得到证明,并且显示出良好的灵敏度、选择性、准确性和精密度水平,适合快速筛选和半定量分析;李雅文等[24]采用纸毛细管喷雾常压电离源结合小型化质谱,建立了卡西酮类质谱分析数据库,为卡西酮类毒品现场快速侦检提供技术支撑;Ma和Ouyang[25]采用了纸喷雾和萃取喷雾2种环境电离方法,实现了使用微型质谱仪快速识别和分析表面、血液和尿液中的合成大麻素,简化了操作流程。

2.4.3 关键词突现分析

运用Cite Space从关键词共现网络的291个关键词中获得了231个突现词,突现强度排名前25位的关键词相关统计结果列于表4。2004年,Cooks研究小组在美国普渡大学开始了对AIMS技术的探讨[26];2006年,作为起始年份的突现词,包括ambient conditions、surfaces、explosives、pharmaceutical samples和solids,其中ambient conditions、surfaces突现强度分别为22.45、9.96,突现时间为2006—2014年共持续了9 a,突现强度高、时间长,是该时间段中研究的代表性关键词;2008年开始,atmospheric pressure突现强度为12.66,突现时间为2008—2013年持续了6 a,突现强度是近年来较高的,持续时间较长;2016年开始,ambient ionization、paper spray ionization、quantitation、whole blood、solid phase microextraction、quantitation、miniature和therapeutic drugs等突现,更多国外学者开始研究AIMS的应用,如快速筛查现场缴获的毒品以及鉴定毛发、血液等生物样本中的NPS;2020年至今,不断开发新电离方法成为AIMS领域研究趋势,尤其是将常压电离技术和小型质谱结合成为了未来研究前沿。

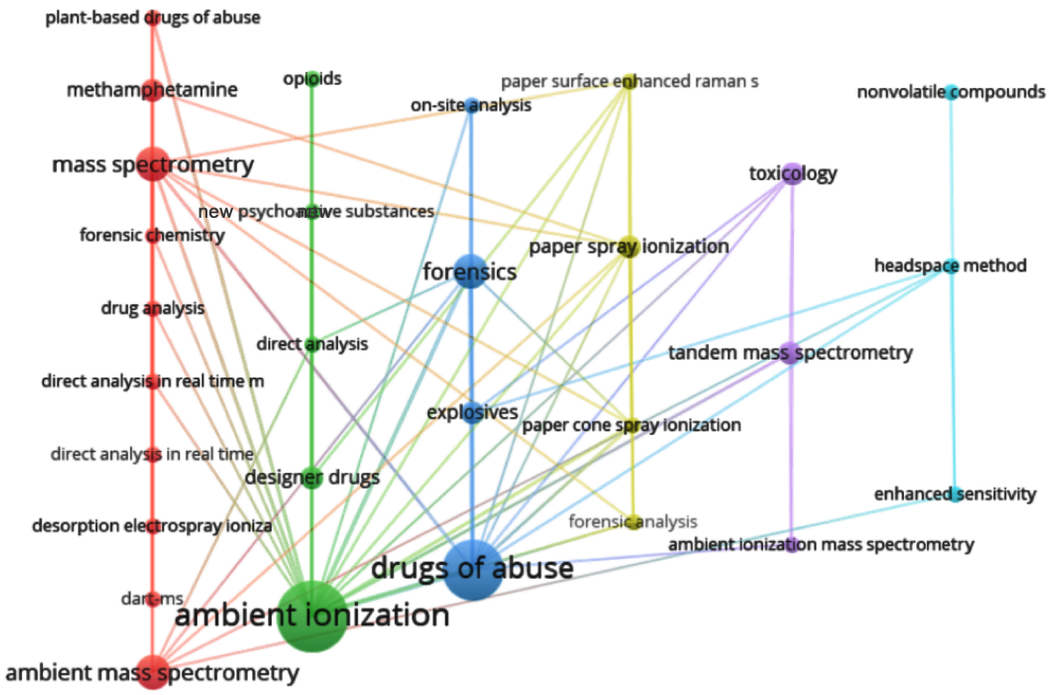
3 AIMS在毒品分析中的文献计量分析

以ambient ionization、mass spectrometry和drug of abuse为主题词,时间为2000年1月1日—2024年12月30日,去重后整理得到92篇文献。因Cite Space获取的关键词数量较少,本部分使用文献计量分析软件VOS Viewer进行关键词聚类分析。

对WOS中获取的457个关键词中出现频率≥3次的关键词聚类分析,相关结果如图7所示。共形成了6个聚类,分别编号为I、II、III、IV、V和VI,图中颜色对应为红色、绿色、蓝色、黄色、紫色和青色。聚类I,主要围绕现场缴获毒品的实时质谱分析;聚类II,主要围绕常压电离方法在检测NPS方面的应用;聚类III,主要围绕AIMS在快速筛查毒品和爆炸物领域的作用;聚类IV,主要围绕纸喷雾电离方法在毒品分析中的最新进展;聚类V,集中于AIMS法

表4 突现强度排名前25位的关键词统计

关键词	出现年份	突现		关键词	出现年份	突现	
		强度	时间段			强度	时间段
tandem mass spectrometry	2003	4.62	2003—2007	nanoparticles	2015	4.75	2015—2018
assisted laser desorption/ionization	2005	4.93	2005—2014	whole blood	2012	5.44	2016—2021
ambient conditions	2005	22.45	2006—2013	paper spray ionization	2016	5.03	2016—2022
surfaces	2006	9.96	2006—2012	therapeutic drugs	2013	4.82	2016—2019
explosives	2006	8.26	2006—2012	temperature plasma probe	2016	4.55	2016—2021
pharmaceutical samples	2006	7.58	2006—2010	miniature	2017	6.03	2017—2022
solids	2006	5.51	2006—2011	quantitation	2017	5.72	2017—2021
desi	2007	7.84	2007—2010	paper spray	2012	4.85	2018—2022
mechanisms	2007	7.76	2007—2011	solid phase microextraction	2010	4.84	2018—2024
thin layer chromatography	2007	7.25	2007—2011	ambient ionization	2008	19.73	2019—2024
atmospheric pressure	2006	12.66	2008—2013	ionization	2000	6.23	2019—2024
lipids	2012	5.30	2012—2015	portable mass spectrometer	2021	5.68	2021—2024
open air	2014	7.72	2014—2016				



注:红色、绿色、蓝色、黄色、紫色和青色分别代表不同聚类。

图7 常压电离质谱在毒品分析中的关键词聚类分析

串联其他方法分析毒物毒品方面的研究;聚类VI,主要围绕如何提高AIMS技术的检测灵敏度。AIMS技术在毒品分析研究领域快速发展,现场分析、实时快速检测和纸喷雾电离已经成为AIMS分析毒品领域的研究热点与内容。Shi等[27]利用AIMS技术快速筛查头发中甲基苯丙胺,可准确筛选含有相关药物的毛发,阳性识别率达到100%;Brito等[28]利用分子印迹聚合物辅助纸喷雾电离质谱法测定尿液中甲基苯丙胺,检出限和定量限分别为0.8和2.8 μg/L,精密度和准确度均<10%,回收率接近100%,基质效应<10%,证明了选择性分析甲基苯丙胺的可能。

从时间轴分析,AIMS在毒品分析领域中向NPS现场侦检、便携式与小型化、大量样品的快速筛查分析等方向发展,纸喷雾电离源、介质阻挡放电离子源、低温等离子探针离子源、辉光放电电离源等成为近年来研究热点。此外,研究人员通过改进前处理技术来提高AIMS检测灵敏度、重现性和定量分析能力。

4 结 论

AIMS的未来发展将围绕技术创新与多领域融合展开。在技术层面,通过微型化、智能化设计推动便携式、小型化设备的现场即时快速检测能力,结合纳米材料和人工智能提升灵敏度与自动化水平。在应用层面,从禁毒领域的NPS快速筛查,到代谢成像和环境污染物原位监测,其场景不断向公共安全、医学诊断及食品安全等现实需求延伸。在跨学科层面,材料科学、生物组学与物联网的协同创新将加速技术突破。未来AIMS需攻克基质干扰抑制、标准化数据库构建及成本控制等挑战,其"高灵敏-实时-场景适配"的特性将推动其从实验室工具转型为现场分析侦测平台,为痕量物质现场侦测提供有力技术支撑。

参 考 文 献

[1] 劳哲.常压电离质谱技术的应用与研究进展[J].临床研究,2022,30(6):193-198.

[2] 王文斌,丁洋,葛洪东,等.常用食品质量安全检测新技术及应用分析[J].中国食品工业,2023(8):58-60.

[3] GAZELI O, ELIA A E, ARGIRUSIS N, et al. Low-cost heat assisted ambient ionization source for mass spectrometry in food and pharmaceutical screening[J]. Analyst, 2024, 149(17): 4487-4495.

[4] LIMA S D G, LIMA M N, BALBINO S N, et al. Anthocyanin profiles in the tropical fruits eugenia jambolana and inga edulis: a comparative study using paper spray ionization (PSI-MS), tissue spray ionization (TSI-MS), and direct infusion (DI-MS)[J]. Chemistry & Biodiversity, 2024, 21(10): e202400318.

[5] JAIME M, RAFAEL L, SOLEDAD C. Nylon 6-

cellulose composite hosted in a hypodermic needle: biofluid extraction and analysis by ambient mass spectrometry in a single device [J]. Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis, 2023, 13(11): 1346-1352.

[6] SIMONE M, MARIUS A, TONI J, et al. Selectivity of explosives analysis with ambient ionization single quadrupole mass spectrometry: implications for trace detection[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2024, 35(1): 50-61.

[7] HE X R, LI C G, ZHU X S, et al. High-performance liquid chromatography coupled with tandem mass spectrometry technology in the analysis of Chinese medicine formulas: a bibliometric analysis (1997—2015)[J]. Journal of Separation Science, 2017, 40(1): 81-92.

[8] 萧涵,周宇飞,陈毅欣,等.基于Cite Space的乌龙茶香气研究知识图谱分析[J].食品与发酵工业,2023,49(5):344-351.

[9] 高川宇,李春越,李艺凡,等.基于Cite Space的磷转化微生物研究文献计量和可视化分析[J].微生物学通报,2023,50(11):5235-5248.

[10] 高雅,郭昌胜,徐建.基于文献计量学的环境健康效益评估研究热点及趋势分析[J].环境科学研究,2023,36(9):1813-1823.

[11] FEIDER C L, KRIEGER A, DEHOOG R J, et al. Ambient ionization mass spectrometry: recent developments and applications [J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(7): 4266-4290.

[12] HARRIS G A, GALHENA A S, FERNÁNDEZ F M. Ambient sampling/ionization mass spectrometry: applications and current trends [J]. Analytical Chemistry, 2011, 83(12): 4508-4538.

[13] WESTON D J. Ambient ionization mass spectrometry: current understanding of mechanistic theory, analytical performance and application areas[J]. Analyst, 2010, 135(4): 661-668.

[14] 付维莲,郭太勇,李双菊,等.基于Cite Space的蓝藻厌氧处理研究文献计量和可视化分析[J].云南化工,2024,51(11):135-142.

[15] 李静,赵婧娴,廉鑫,等.基于Cite Space的磷形态研究进展及前沿分析[J].环境生态学,2021(6):85-90+94.

[16] 周莉英,王鑫,向平.质谱成像技术及其在法医毒理学中的应用[J].法医学杂志,2021,37(3):402.

[17] GUO X, NIE H, JIANG L, et al. Recent advances of ambient ionization mass spectrometry imaging in clinical research [J]. Journal of Separation Science, 2020, 43(15): 3146-3163.

[18] SEUBNOOCH P, MONTANI M, TSOUKA S, et al. Characterisation of hepatic lipid signature distributed across the liver zonation using mass spectrometry imaging[J]. JHEP Reports, 2023, 5(6): 100725.

[19] PHILIPSEN M H, HAXEN E R, MANAPRASERTSAK A, et al. Mapping the chemistry of hair strands by mass spectrometry imaging: a review[J]. Molecules, 2021, 26(24): 7522.

[20] GREEN F M, CASTELLANI M E, JIA Y, et al. Development of high throughput microscope mode secondary ion mass spectrometry imaging[J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2023, 34(7): 1272-1282.

[21] JAVANSHAD R, VENTER A R. Ambient ionization mass spectrometry: real-time, proximal sample processing and ionization[J]. Analytical Methods, 2017, 9(34): 4896-4907.

[22] IFA D R, JACKSON A U, PAGLIA G, et al. Forensic applications of ambient ionization mass spectrometry [J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009, 394: 1995-2008.

[23] BORONAT ENA M M, COWAN D A, ABBATE V. Ambient ionization mass spectrometry applied to new psychoactive substance analysis[J]. Mass Spectrometry Reviews, 2023, 42(1): 3-34.

[24] 李雅文,连茹,王跨陡,等.常压电离便携式质谱研究卡西酮类毒品的裂解规律和分析策略[J].质谱学报,2021,42(4):427-438.

[25] MA Q, OUYANG Z. Ambient ionization and miniature mass spectrometry system for chemical and biological analysis[J]. Trends in Analytical Chemistry, 2016, 85: 10-19.

[26] TAKATS Z, WISEMAN J M, GOLOGAN B, et al. Mass spectrometry sampling under ambient conditions with desorption electrospray ionization [J]. Science, 2004, 306(5695): 471-473.

[27] SHI S Y, WEN L H, HU S D, et al. Rapid screening of methamphetamine in hair by ambient ionization mass spectrometry (AIMS)[J]. Analytical Letters, 2023, 56(16): 2541-2553.

[28] BRITO T P, AGUIAR D V A, PEREIRA I, et al. Determining methamphetamine in urine by molecularly imprinted polymer assisted paper spray ionization mass spectrometry [J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2021, 32(2): 269-276.

(责任编辑:王 媛)