

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20250214003

引用格式: 肖雨馨, 章晓薇, 何宗健, 等. 离子迁移谱应用于食品科学研究的文献计量分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(9): 206–215.

XIAO YX, ZHANG XW, HE ZJ, *et al.* Bibliometric analysis of the ion mobility spectrometry applied in food scientific studies [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(9): 206–215. (in Chinese with English abstract).

# 离子迁移谱应用于食品科学研究的文献计量分析

肖雨馨<sup>1</sup>, 章晓薇<sup>1</sup>, 何宗健<sup>1</sup>, 邵婉莹<sup>2</sup>, 陈可先<sup>1\*</sup>

(1. 浙江工商大学食品与生物工程学院, 杭州 310018; 2. 建德市食品药品检验检测中心, 建德 311600)

**摘要: 目的** 更直观地掌握离子迁移谱应用于在食品科学领域的学术脉络与演化趋势。**方法** 本研究以 Web of Science 核心数据库中近 15 年的文献为研究对象, 采用文献计量分析方法揭示了该领域研究的现状、热点与发展趋势。**结果** 研究表明, 离子迁移谱应用于食品科学研究的发文量呈现不断增长趋势, 除了涉及食品科学技术, 还涉及化学、营养、生物化学、农业、谱学、环境、药学等多学科交叉领域。我国的发文量遥遥领先, 机构拥有很大的国际话语权, 但作者的个人学术影响力还有待提高。目前主要热点为基于离子迁移谱开展的不同食品的品质与风味、代谢组学、挥发性(有机)化合物及富集、仪器参数与条件优化、统计方法、样品鉴别及分类和多种仪器组合分析等研究。关键词共现、聚类 and 突现分析进一步揭示了热点的演变过程和突现情况。**结论** 本研究可为食品科学和分析化学领域的专家学者把握离子迁移谱的国际应用现状和未来发展趋势提供理论依据。

**关键词:** 离子迁移谱; 食品科学; 文献计量分析; 研究热点

## Bibliometric analysis of the ion mobility spectrometry applied in food scientific studies

XIAO Yu-Xin<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-Wei<sup>1</sup>, HE Zong-Jian<sup>1</sup>, SHAO Wan-Ying<sup>2</sup>, CHEN Ke-Xian<sup>1\*</sup>

(1. School of Food Science and Biotechnology, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China;  
2. Jiande Municipal Food and Drug Inspection and Testing Center, Jiande 311600, China)

**ABSTRACT: Objective** To gain a more intuitive understanding of the academic context and evolutionary trends of the ion mobility spectrometry applied in the field of food science. **Methods** This study took the literature from the Web of Science core database over the past 15 years as the research object, and used bibliometric analysis methods to reveal the current status, hotspots and development trends of research in this field. **Results** Our study had shown that the number of publications on the application of ion mobility spectrometry in food science research is constantly increasing, which involves the interdisciplinary fields such as chemistry, nutrition, biochemistry, agriculture, spectroscopy, environment and pharmacy beyond food science and technology. The number of the China's publication was far ahead, and its institutions had great international discourse power, but the personal academic

收稿日期: 2025-02-14

基金项目: 国家级大学生创新创业训练计划项目(202410353011)

第一作者: 肖雨馨(2004—), 女, 主要研究方向食品风味分析。E-mail: xyxin070105@163.com

\*通信作者: 陈可先(1983—), 男, 讲师, 主要研究方向为食品风味分析。E-mail: kxchem@zjgsu.edu.cn

influence of Chinese authors still needs to be improved. At present, the main hotspots included the studies on different food qualities and flavors, metabolomics, volatile (organic) compounds and enrichment, optimization of instrument parameters and conditions, statistical methods, sample identification and classification, and multiple instrument combination analysis based on the application of ion mobility spectrometry. The co-occurrence, clustering and emergence analysis of the keywords further reveal the evolution process and mutation situation of research hotspots.

**Conclusion** This study can provide theoretical basis for experts and scholars in the fields of food science and analytical chemistry to grasp the international application status and future development trends of ion mobility spectrometry.

**KEY WORDS:** ion mobility spectrometry; food science; bibliometric analysis; research hotspot

## 0 引言

离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)是一种基于气态离子在常压和电场中迁移并用迁移率表征各种不同化学物质的快速分离技术<sup>[1-2]</sup>,其类型包括高场不对称波形离子迁移谱(high field asymmetric waveform ion mobility spectrometry, FAIMS)<sup>[3]</sup>、行波离子迁移谱(travelling wave ion mobility spectrometry, TWIMS)<sup>[4-5]</sup>、陷阱离子迁移谱(trapped ion mobility spectrometry, TIMS)<sup>[6]</sup>和差分离子淌度谱(differential ion mobility spectrometry, DMS)<sup>[7]</sup>等。IMS也可与其他仪器联用,比如离子迁移谱-质谱法(ion mobility spectrometry-mass spectrometry, IMS-MS)<sup>[8-9]</sup>、高效液相色谱-离子迁移谱-质谱法(high performance liquid chromatography-ion mobility-mass spectrometry, HPLC-IMS-MS)<sup>[10-11]</sup>和气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)<sup>[12-15]</sup>等不同类型的。在食品科学研究中最为常见的是用于挥发性化合物分析的GC-IMS<sup>[12-15]</sup>,如海能公司的FlavourSpec®和BreathSpec®。在GC-IMS测定挥发性组分时可直接顶空进样以避免对样品做富集与浓缩等复杂预处理,样品使用量少即可实现痕量组分分析,在较短时间内得到包含保留时间、迁移时间和信号强度等三维数据,不仅解决了IMS单独使用时对混合物与迁移率相近物质具有较低分辨率的难题,也有助于对气相色谱分离不佳或者难以分离化合物进行二次分离,让食品风味及其差异可视化<sup>[12-15]</sup>。因此,GC-IMS在灵敏度、选择性、便捷性等方面优于食品风味研究中常用的电子鼻(electronic nose, E-noses)、气相色谱-嗅味计(gas chromatography olfactometry, GC-O)或气相色谱-质谱仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)等分析工具,但也具有检测范围受基质干扰、仅适用于挥发性或半挥发性组分和可检测化合物数量有限等不足<sup>[12,14]</sup>。

近年来,IMS,特别是GC-IMS在食品科学研究中的应用越来越多,主要应用场景包括以下几个方面:(1)食品真实性检测<sup>[16-18]</sup>,包括掺假,掺杂,造假,以次充好,以及过敏原或转基因等真实性标识;(2)食品品质<sup>[1,14,15,19]</sup>,如新鲜度、变质程度;(3)食品中异味、有害物质或非法添加物检测<sup>[20]</sup>;(4)

不同食品风味组成<sup>[12,21-25]</sup>及其形成过程<sup>[22,26-27]</sup>;(5)在食品加工与贮藏过程中的食品风味监控<sup>[2,22,28-31]</sup>;(6)食品中添加物分析<sup>[32]</sup>;(7)原产地保护与食品溯源<sup>[33]</sup>。尽管文献中已经有较多关于离子迁移谱在食品中应用的综述,但这些综述主要围绕IMS的原理、分析效果和大致的应用范围展开,或者仅是围绕某一个角度概括。实际上,IMS应用于食品科学研究涉及的领域非常广泛,现有的文献尚未从大数据分析的视角揭示现阶段与未来的热点领域和学术脉络,难以从整体了解离子迁移谱应用的侧重点以及国内外差距。基于以上原因,本研究对国际权威数据库中的相关研究开展了文献计量分析,以期为IMS与食品科学研究的深度融合和为食品分析领域或行业专家提供决策参考。

## 1 材料与方法

本研究所用文献数据均源自Web of Science核心库,检索时间范围为2010年1月1日—2024年12月31日,检索时间为2025年2月2日21点,文章检索的关键词为ion mobility spectrometry和food,文献类型仅为article和review,共获得1079篇文献。为了尽可能让文献集中在食品科学领域,排除了Physics Applied、Physics Atomic Molecular Chemical、Neurosciences、Polymer Science、Acoustics、Medicine Research Experimental等若干与食品不相关主题的文献,最后获得978篇文献用于后续研究,其中这些文献绝大多数基于GC-IMS。本研究采用Web of Science自带的分析工具,以及CiteSpace 6.3.R1版本软件(<https://citespace.podia.com/>)与VOSviewer 1.6.19.0版本软件(<https://www.vosviewer.com/>)对所得文献进行统计分析。除了文中有特别说明外,其余参数均采用默认值。由于受文献检索条件限制和软件参数设置等的综合影响,部分数据可能会存在一些出入。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量的逐年分布分析

根据Web of Science核心库中文献的统计分析结果(图1),IMS在食品科学领域的研究涉及食品科学技术外,还涉及化学分析、化学应用、营养与营养学、生物化学研

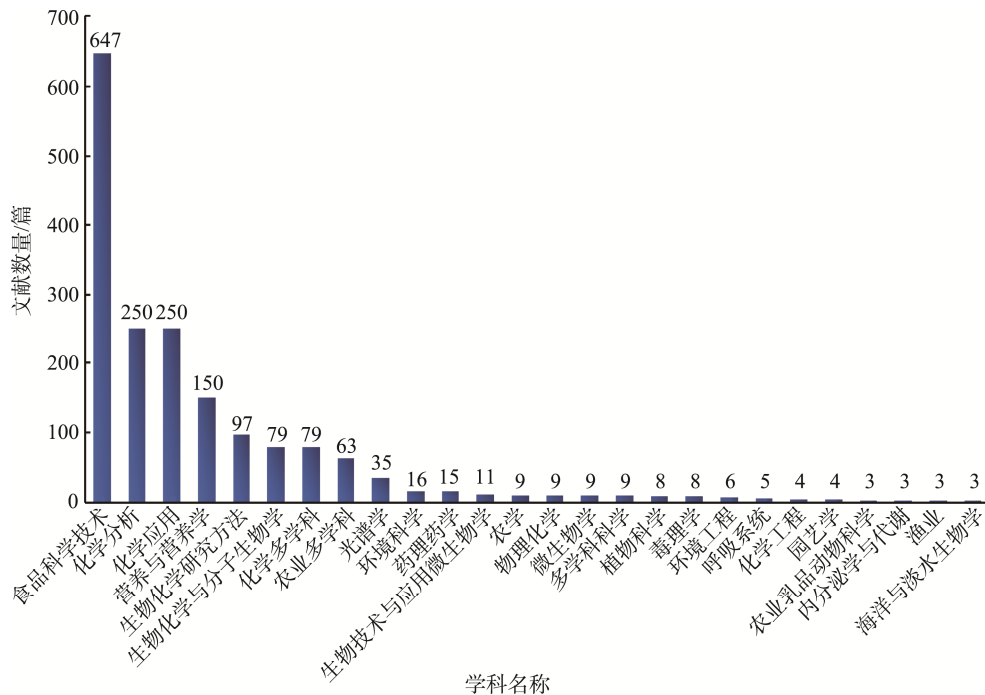


图1 Web of Science核心库中各学科发文量分布图

Fig.1 Distribution of the papers published in the fields of each subject in the core library of Web of Science

究方法、生物化学与分子生物学、化学多学科、农业多学科、光谱学、环境科学和药理学等领域。可见, IMS 的应用范围较广, 覆盖了食品科学、营养学、化学、农学、药理学和环境科学等众多学科。由图 2 可知, 这些研究的发文量整体上是增加的, 特别是近 4 年增加迅速。因此, IMS 在食品科学领域越来越受欢迎, 为解决许多食品领域难题提供了新的思路或视角。

## 2.2 作者的影响力与合作网络分析

离子迁移谱在食品科学领域发文量前 10 的作者见表 1, 人均发文量在 11 篇以上, 最高的 H 指数(个人学术影响力)达到 59。这些作者中, 4 位来自西班牙, 2 位来自德国, 2 位来自意大利, 2 位分别来自英格兰和中国。用 CiteSpace 分析了作者间的合作关系(K 值设为 5), 共产生 123 个节点

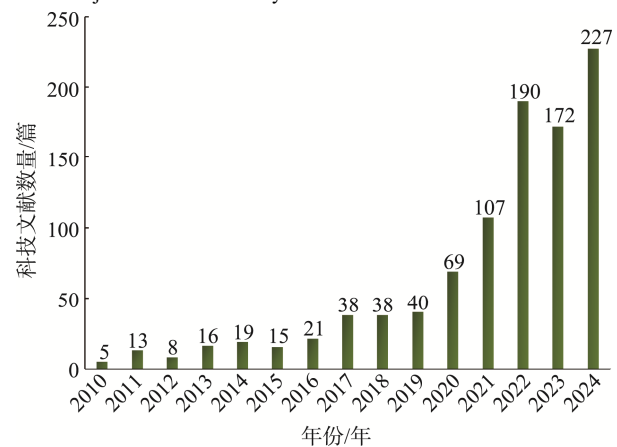


图2 发文量的逐年变化图

Fig.2 Annual change of the paper number

表 1 发文量前 10 的作者

Table 1 Top 10 authors who published the most research papers

序号	作者	发文量	H 指数	机构名称	国家
1	Arce L	24	32	Universidad de Cordoba(科尔多瓦大学)	西班牙
2	Nerin C	18	59	University of Zaragoza(萨拉戈萨大学)	西班牙
3	Dreolin N	15	12	University of Zaragoza(萨拉戈萨大学)	西班牙
4	Canellas E	15	25	University of Zaragoza(萨拉戈萨大学)	西班牙
5	Weller P	14	16	University of Mannheim(曼海姆大学)	德国
6	Goshawk J	12	13	Aberystwyth University(亚伯大学)	英格兰
7	Righetti L	12	17	University of Parma(帕尔马大学)	意大利
8	Rohn S	12	54	Technical University of Berlin(柏林工业大学)	德国
9	Lin SY	11	39	Dalian Polytechnic University(大连工业大学)	中国
10	Dall'asta C	11	48	University of Parma(帕尔马大学)	意大利

(代表作者数), 88 条连线(代表合作情况), 共线网络密度为 0.0117。采用 VOSviewer 软件制作了作者间的合作关系图(图 3), 合作阈值设为 4 次, 共有 178 位作者出现在图中, 不同颜色圈圈间的连线代表着不同作者间的合作网络。由图可知, 发文量较多的作者如 Arce L、Nerin C、Dreolin N、Weller P 和 Righetti L 等与多位作者均存在密切的合作关系。

### 2.3 机构的影响力与合作网络分析

表 2 为发文量排名前 21 位的机构, 其中我国的机构有 15 家, 西班牙 2 家, 英格兰、德国、荷兰和意大利各 1 家。这些机构发文量均在 11 篇以上, 最高达 66 篇。用 CiteSpace 分析了机构间的合作关系(K 值设为 20), 共产生 299 个节点(代表机构数), 481 条连线(代表合作情况), 共线网络密度为 0.0108。采用 VOSviewer 软件制作了机构间的合作关系网络(图 4), 合作阈值设为 5 次, 共包含 99 家机构。由图 4 可知, 农业农村部、中国农业科学院、大连工业大学、沃特世公司、中国海洋大学、科尔多瓦大学、江南大学等均与多家机构存在密切的合作关系。中介中心性(表 2)显示农业农村部、江南大学、中国农业

科学院、中国海洋大学等机构之间存在较多的合作关系。

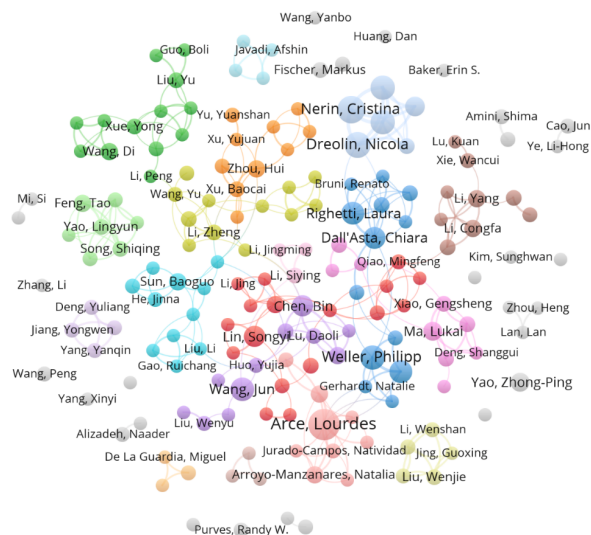


图3 作者合作关系图

Fig.3 Author's collaboration relationship plot

表 2 发文量前 21 位的机构  
Table 2 Top 21 institutions who published the most research papers

序号	机构名称	发文量	中介中心性	国家
1	Ministry of Agriculture & Rural Affairs(农业农村部)	66	0.2	中国
2	Chinese Academy of Agricultural Sciences(中国农业科学院)	51	0.14	中国
3	Dalian Polytechnic University(大连工业大学)	32	0.02	中国
4	Jiangnan University(江南大学)	26	0.17	中国
5	China Agricultural University(中国农业大学)	23	0.09	中国
6	Beijing Technology & Business University(北京工商大学)	22	0.07	中国
7	Ocean University of China(中国海洋大学)	22	0.15	中国
8	Universidad de Cordoba(科尔多瓦大学)	21	0.12	西班牙
9	Waters UK(沃特世公司)	21	0.05	英格兰
10	Nanjing Agricultural University(南京农业大学)	19	0.00	中国
11	Zhejiang University(浙江大学)	18	0.02	中国
12	Jiangsu University(江苏大学)	17	0.05	中国
13	Wageningen University & Research(瓦格宁根大学)	17	0.04	荷兰
14	University of Zaragoza(萨拉戈萨大学)	16	0.00	西班牙
15	Institute of Food Science & Technology(国际食品科学院)	16	0.01	中国
16	Chinese Academy of Sciences(中国科学院)	15	0.11	中国
17	University of Parma(帕尔马大学)	14	0.10	意大利
18	University of Hamburg(汉堡大学)	13	0.03	德国
19	Hainan University(海南大学)	11	0.02	中国
20	Anhui Agricultural University(安徽农业大学)	11	0.03	中国
21	Sichuan Tourism University(四川旅游学院)	11	0.02	中国

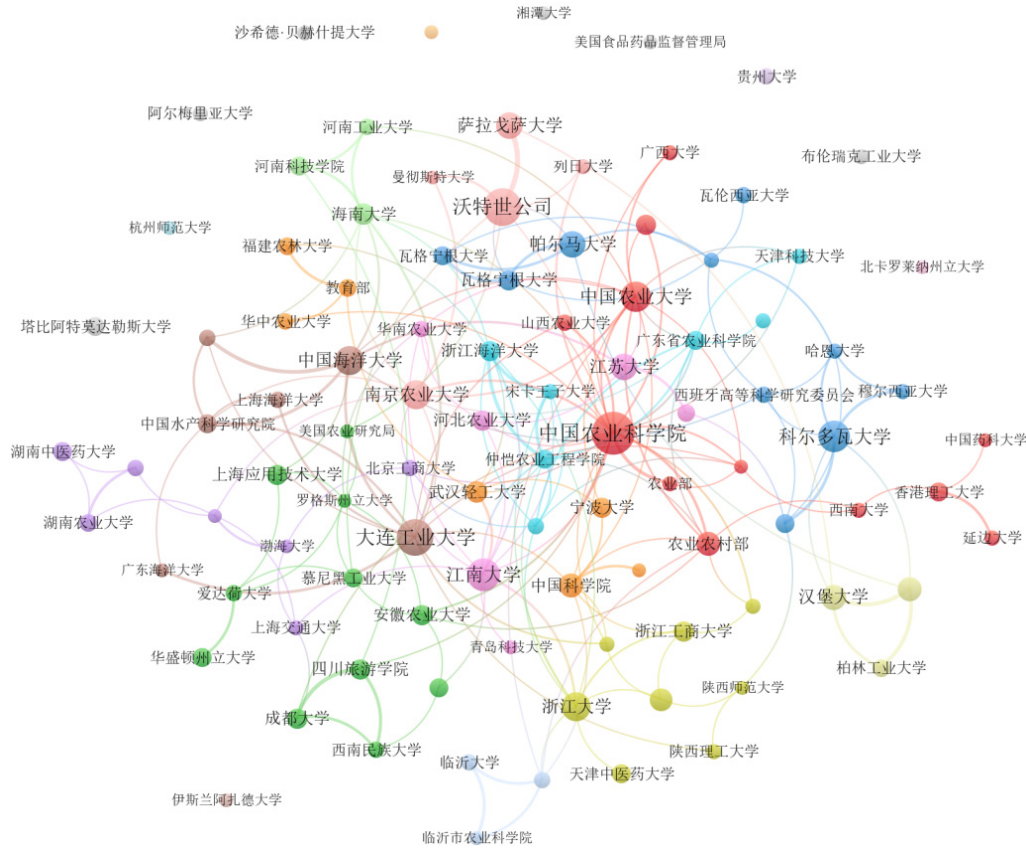


图4 机构合作关系图  
Fig.4 Institution collaboration relationship plot

2.4 国家的影响力与合作网络分析

主要国家的发文量见图 5 和表 3, 排名前 5 的国家依次为中国、西班牙、德国、美国和意大利。这些国家的年发文量增加较多, 其中, 我国的增幅最大。用 CiteSpace 软件分析了国家间的合作关系(K 值设为 5), 共产生 61 个节点(代表国家数), 177 条连线(代表合作情况), 共线网络密度为 0.0967, 说明国家间的合作强度高于作者间或机构间的合作强度。采用 VOSviewer 软件制作了国家间的合作关系网络(图 6), 合作阈值设为 1 次, 共包含 67 个国家。由图可知, 中国、德国、西班牙、美国、英格兰和意大利等国家与其他国家的合作较为密切, 这与表 3 中各国家的中介中心性数值相一致。

2.5 学术期刊的分布及其互引关系分析

图 7 为用 VOSviewer 软件产生的学术期刊间互引关系图, 互引次数阈值为 2, 一共有 88 个期刊出现在图中。此外, 也用 CiteSpace 分析了学术期刊间的互引关系(K 值设为 5), 共产生 194 个节点(代表期刊数), 1205 条连线(代表合作情况), 共线网络密度为 0.0644。由图 7 可知, 发文量较多的期刊主要为 Food Chemistry、LWT-Food Science and Technology、Journal of Agricultural and Food Chemistry、Food

Research International、Food Chemistry: X、Foods、Analytical Chemistry、Molecules 和 Analytical Chimina Acta。从这些期刊名称分析, IMS 在食品科学研究领域的文章主要涉及食品化学、光化学、食品质量与安全、食品分析方法、作物保护与采摘、分离、分子科学、呼吸研究、香精香料、营养、环境、代谢和分析化学等领域。

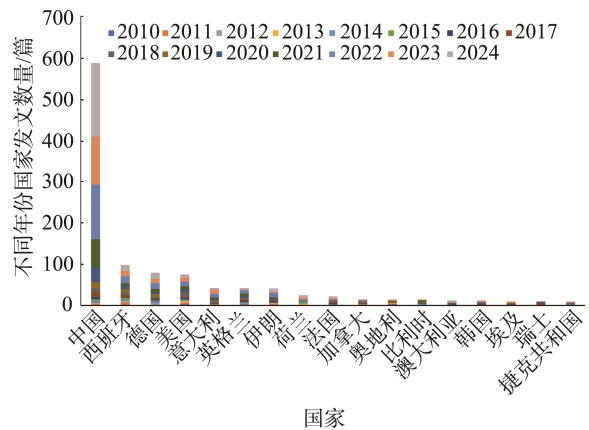


图5 不同国家发文量的逐年变化图  
Fig.5 Annual changes of the paper numbers of different countries

表 3 发文量前 10 的国家  
Table 3 Top 10 countries with the most research papers

序号	国家	发文量	中介中心性	初现年份	序号	国家	发文量	中介中心性	初现年份
1	中国	588	0.50	2013	6	意大利	41	0.34	2011
2	西班牙	99	0.40	2010	7	伊朗	38	0.06	2011
3	德国	80	0.25	2011	8	荷兰	23	0.08	2013
4	美国	75	0.16	2010	9	法国	21	0.13	2014
5	英格兰	42	0.12	2010	10	奥地利	14	0.23	2010

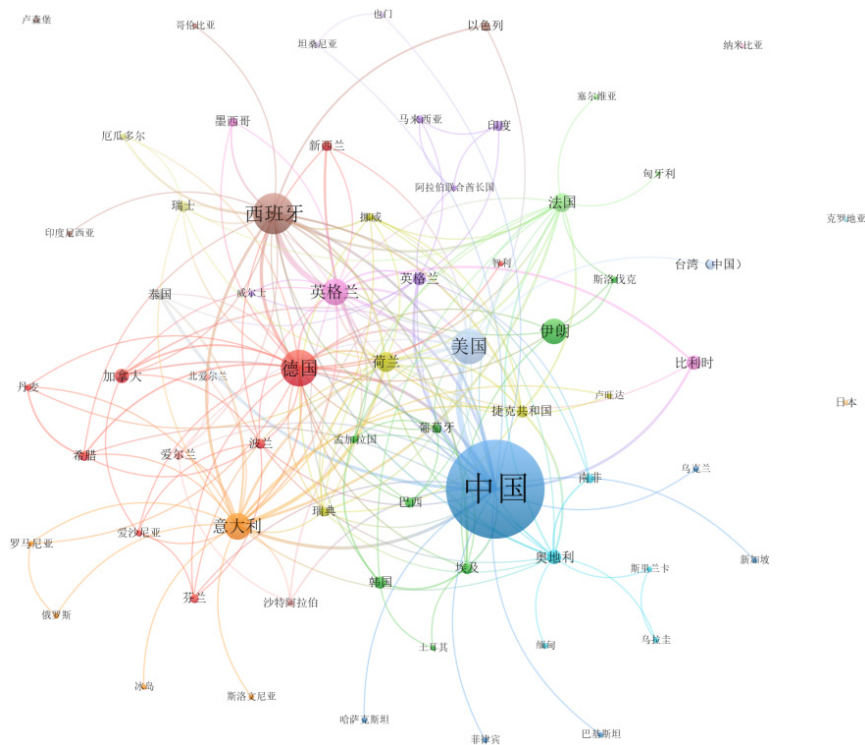


图6 不同国家合作关系图

Fig.6 Collaboration between different countries

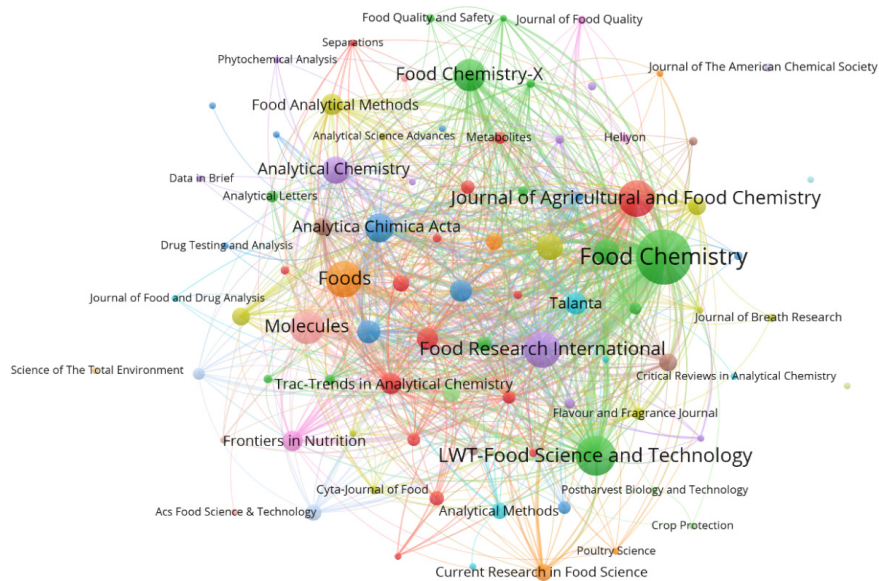


图7 主要学术期刊的互引关系图

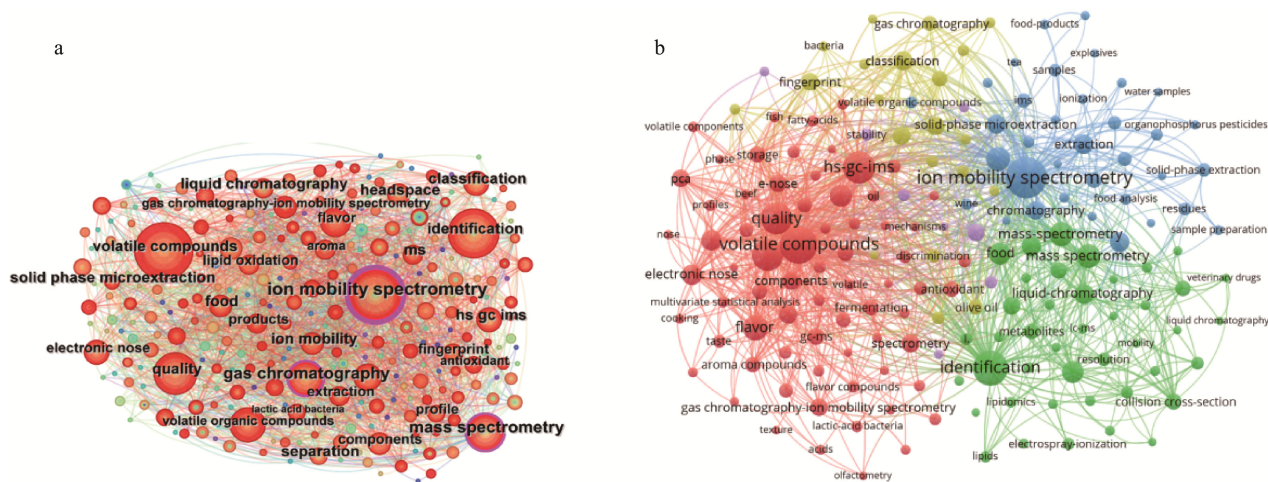
Fig.7 Mutual citation plot of the main academic journals

## 2.6 主要研究热点及其演化趋势分析

### 2.6.1 关键词的热点分析

IMS 在食品科学研究领域的热点关键词及其相互关系见图 8, 出现频次较高的关键词见表 4。基于 CiteSpace 软件的关系图(图 8a, K 值设为 13)由 290 个关键词、1709 条连线组成, 共线网络密度为 0.0408, 每个圈圈从内到外的颜色代表关键词的出现次数的逐年变化。基于 VOSviewer 软件的关系图(图 8b, 阈值设为 9 次)由 177 个关键词节点组成, 根据颜色的不同可以将关键词间的关系分为 4 类。圈圈大小代表关键词的出现频次, 与表 4 中主要关键词的中介中心性的大小相一致。由图 8 可知, 热点关键词主要为 IMS、挥发性(有机)化

合物、鉴定、质谱、品质、气相色谱、离子迁移、液相色谱、E-noses、风味(化合物)、食品、分离、顶空-GC-IMS、固相(微)萃取、肉类、组分、芳香(化合物)、萃取、分类、脂质氧化、指纹图谱、抗氧化、轮廓、乳酸菌、多元统计分析、水样、残留物、样品准备、稳定性、酒类、鉴别、主成分分析、脂肪酸、电喷雾电离、发酵、橄榄油、代谢物、茶类、离子化、碰撞截面、脂质组学、味觉、鱼类、分辨率和爆炸物。由此可推测, 目前 IMS 在食品科学研究中的应用主要围绕 IMS、食品品质与风味、代谢组学、挥发性化合物及富集、仪器参数与条件优化、统计方法、样品鉴别及分类和多种仪器组合分析等方面开展。



注: 分别为用CiteSpace (a)和VOSviewer (b)软件制作的图。

图8 关键词的共现谱

Fig.8 Co-occurrence graph of keywords mapped

表 4 出现频次前 20 的关键词

Table 4 Top 20 frequency occurrence keywords

序号	关键词	频次	中介中心性	初现年份	序号	关键词	频次	中介中心性	初现年份
1	ion mobility spectrometry	209	0.34	2010	11	flavor	48	0.01	2020
2	volatile compounds	162	0.05	2015	12	food	47	0.07	2013
3	identification	132	0.08	2014	13	separation	42	0.05	2011
4	mass spectrometry	127	0.12	2011	14	hs gc ims	42	0.04	2019
5	quality	105	0.06	2017	15	solid phase microextraction	39	0.05	2012
6	gas chromatography	89	0.13	2011	16	ms	38	0.07	2018
7	volatile organic compounds	63	0.02	2011	17	meat	38	0.03	2020
8	ion mobility	54	0.08	2014	18	components	37	0.04	2012
9	liquid chromatography	52	0.09	2013	19	aroma	37	0.02	2015
10	electronic nose	51	0.04	2012	20	extraction	35	0.05	2013

2.6.2 关键词的聚类分析

采用 CiteSpace 软件对上述热点关键词进行了聚类分析(K 值设置为 13), 其中平均轮廓值(S 值)为 0.7066>0.7, 模块化值(Q 值)为 0.3883>0.3, 因此上述聚类结果是可靠的。上述热点关键词可以聚类为#0 挥发性化合物、#1 IMS、#2 离子迁移、#3 碰撞截面、#4 南极虾和#5 交换等 6 类主题(图 9), 主题之间没有明显的交叉。图 9b(时间线图)给出了各聚类主题关键词变化的时间线, 其中圈越大, 表示该关键词热度越高, 连线越多越粗, 表示关键词联系越多越紧密。由图 9 可知, #1 和#2 是基础性主题, #5 主题相关的疾病研究较少, 也较早, 而其他主题则是新兴主题, 存在时间(间断性)较长(如#3 和#4)或处于持续热点状态(如#0)。由图 9a(聚类谱)可知, IMS 在食品科学研究领域的应用经历了从挥发性化合物、仪器检测、不同食品研

究甚至到疾病、香烟研究的变化过程。

2.6.3 关键词的突现分析

采用 CiteSpace 软件对上述热点关键词进行了突现分析(K 值设为 13), 产生突现强度排名前 25 的关键词, 其突现强度在 3.07 至 10.08 之间(图 10)。其中, 突现强度在 5 以上的 5 个关键词, 分别为 IMS、质谱、液相色谱、生物胺和橄榄油。早期突现关键词为 IMS 和超高效液相色谱。突现持续时间在 7 年以上的关键词为 IMS、超高效液相色谱、质谱、分离、液相色谱和串联质谱。近 3 年突现的关键词为栽培、轮廓、鱼、菌和风味化合物。根据这些 top 关键词可知, IMS 在食品科学研究领域的应用还突现在电泳、固相萃取、组分、顶空、碰撞截面和食品产品等关键词上。这也进一步说明该领域除了围绕食品、组分分离、检测仪器与方法外, 还涉及了种植、风味、微生物和有害物质分析等。

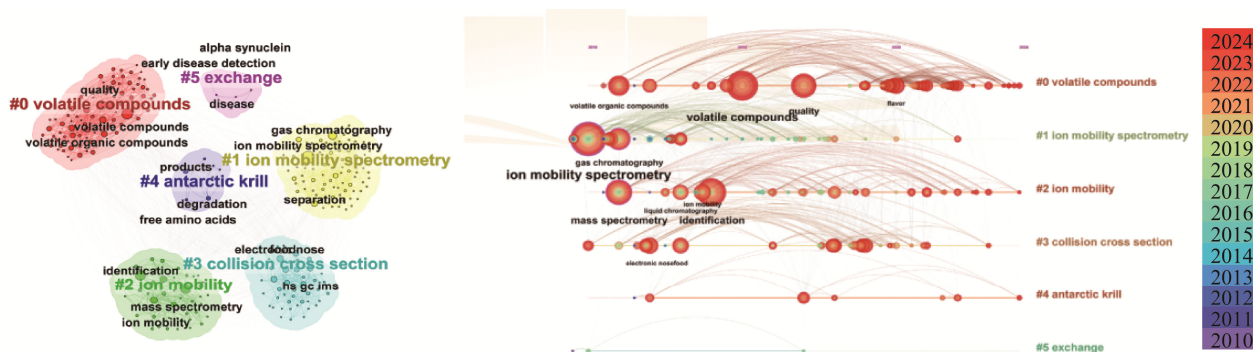


图9 关键词的聚类谱(a)及其时间线图(b)

Fig.9 Clustering graph (a) and timeline map (b) of keywords

Top 25 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2010–2024
ion mobility spectrometry	2010	10.08	2010	2016	-----
performance liquid chromatography	2010	4.32	2010	2017	-----
mass spectrometry	2011	8.24	2011	2018	-----
separation	2011	4.12	2011	2018	-----
food products	2012	4.08	2012	2017	-----
liquid chromatography	2013	7.7	2013	2019	-----
biogenic amines	2013	6.53	2013	2017	-----
tandem mass spectrometry	2013	4.93	2013	2019	-----
extraction	2013	3.44	2013	2016	-----
capillary electrophoresis	2016	3.18	2016	2017	-----
olive oil	2011	5.28	2017	2019	-----
solid phase extraction	2017	3.66	2017	2018	-----
tool	2018	3.64	2018	2021	-----
mobility mass spectrometry	2018	3.57	2018	2019	-----
collision cross section	2018	2.97	2018	2020	-----
hs gc ims	2019	3.60	2019	2020	-----
headspace	2019	3.24	2019	2020	-----
gc ims	2019	2.68	2019	2021	-----
constituents	2020	3.52	2020	2021	-----
flavor compounds	2020	3.06	2020	2022	-----
ims	2020	3.02	2020	2021	-----
bacteria	2021	2.82	2021	2022	-----
fish	2021	2.82	2021	2022	-----
cultivars	2022	3.07	2022	2024	-----
profiles	2022	3.07	2022	2024	-----

图10 前25 top关键词的突现谱

Fig.10 Jump map of top 25 keywords

### 2.6.4 高影响力学术论文分析

Web of Science 核心库中引用量排名前十的论文见表 5, 单篇被引次数在 160 以上, 最高达 489。这些高影响力论文的主题涉及松茸、腌鱼干和乌龙茶香气等食品中的挥发性成分分析、人体挥发物、差向异构聚糖和糖肽、代谢组学化合物鉴定工具和方法, 也包含

了多篇应用研究综述, 涵盖了 GC-IMS 在食品风味分析中的最新进展、IMS 的近期非常规应用和食品风味化合物分析中的微萃取技术。期刊涉及食品化学、代谢物、分析化学、化学和呼吸研究等领域。这些研究工作可以粗略分为两类: 检测方法学研究与总结; 某类样品的分析检测研究。

表 5 引用量前 10 的文献  
Table 5 Top cited 10 scientific research papers

序号	标题	作者	来源出版物	总被引频次
1	Software tools and approaches for compound identification of LC-MS/MS data in metabolomics	Blazenovic I, Kind T, Ji J, <i>et al.</i>	Metabolites, 2018, 8(2): 31	489
2	Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS)	Wang SQ, Chen HT, Sun BG.	Food Chemistry, 2020, 315: 126158	406
3	Development of a flavor fingerprint by HS-GC-IMS with PCA for volatile compounds of <i>Tricholoma matsutake</i> Singer	Li MQ, Yang RW, Zhang, H, <i>et al.</i>	Food Chemistry, 2019, 390: 32–39	276
4	Ambient ionization mass spectrometry: A tutorial	Huang MZ, Cheng SC, Cho YT, <i>et al.</i>	Analytica Chimica Acta, 2011, 702(1): 1–15	272
5	A review of recent, unconventional applications of ion mobility spectrometry (IMS)	Armenta S, Alcalá M, Blanco M.	Analytica Chimica Acta, 2011, 703(2): 114–123	212
6	Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS	Zhang Q, Ding YC, Gu SQ, <i>et al.</i>	Food Research International, 2020, 137: 109339	176
7	Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS	Guo XY, Schwab W, Ho CT, <i>et al.</i>	Food Chemistry, 2022, 376: 131933	174
8	Microextraction techniques in the analysis of food flavor compounds: A review	Jelen HH, Majcher M, Dziadas M.	Analytica Chimica Acta, 2012, 738: 13–26	162
9	Discrimination of epimeric glycans and glycopeptides using IM-MS and its potential for carbohydrate sequencing	Both P, Green AP, Gray CJ, <i>et al.</i>	Nature Chemistry, 2014, 6(1): 65–74	161
10	A literature survey of all volatiles from healthy human breath and bodily fluids: The human volatilome	Drabinska N, Flynn C, Ratcliffe N, <i>et al.</i>	Journal of Breath Research, 2021, 15(3): 034001	160

## 3 结 论

本研究以 IMS 和食品为关键词对 Web of Science 核心库中近 15 年文献的现状、热点和演变趋势进行了文献计量分析。研究表明, IMS 应用于食品科学的研究始终以挥发性化合物的分析为主线, 热点领域主要涉及鱼(如腌鱼干)、肉类、菌类(如松茸、乳酸菌)、茶类(如乌龙茶)、油类(如橄榄油)、水、酒类、人体挥发物(如呼出气体)、营养组分(如脂肪酸)、碳水化合物(如聚糖)、香精香料、芳香(化合物)类风味组分、有害物质(如生物胺)和代谢物等样品特征及其差异的可视化, 紧紧围绕挥发性组分(主要为风味化合物)及富集(如固相微萃取)、食品品质与风味、仪器参数与条件优化(如分辨率、碰撞截面、离子化)、统计方法、样品鉴别及分类、代谢组学和多种仪器组合分析(如与 E-noses、液相色谱或质谱组合)等方面开展, 应用范围涵盖了食品科学、营养学、化学、农学、药和环境科学等交叉学科领域。因此, IMS 在多学科交叉领域均具有大的应用优势, 不仅揭示了各类样品的风味组分(挥发性化合物)的轮廓(指纹图谱), 也为各

类样品的风味特征、等级划分、产地归属、品质保障和差异分析提供了技术支持。此外, 本研究还揭示了不同国家及其机构、作者的影响力及其合作网络, 不同期刊的发文量及其互引关系等数据, 这为加强 IMS 研究领域的专家学者的研究与合作提供了理论参考。

根据本研究的文献计量分析结果和文献初步筛查, 未来还可以从以下几个方面开展 IMS 应用于食品科学的研究: (1)多维色谱串联 IMS 仪的设计、开发与应用; (2)基于食品样品差异化性质的 IMS 方法库的构建; (3)代谢组学库的建立及其鉴定工具和方法的开发; (4)挥发性化合物结构与其迁移的构效关系研究; (5)不同产地食品差异化特征指纹库构建及其可追溯标准体系的建立; (6)在线实时样品品质与风味分析检测技术的开发; (7)挥发性化合物离子迁移库的扩展。

### 参考文献

- [1] GOU M, BI JF, CHEN QQ, *et al.* Advances and perspectives in fruits and vegetables flavor based on molecular sensory science [J]. Food Reviews International, 2021, 39(6): 3066–3079.

- [2] 王芳, 陈潘, 席斌, 等. 离子迁移谱技术在食品检测中的应用研究进展[J]. 食品研究与开发, 2021, 42(8): 179–185.  
WANG F, CHEN P, XI B, *et al.* Research progress on the application of ion mobility spectrometry techniques in food test [J]. Food Research and Development, 2021, 42(8): 179–185.
- [3] SCHWEPPE DK, PRASAD S, BELFORD MW, *et al.* Characterization and optimization of multiplexed quantitative analyses using high-field asymmetric-waveform ion mobility mass spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2019, 91(6): 4010–4016.
- [4] GUO X, ZHAO ZJ, DAI JX, *et al.* Development of a travelling wave-based ion mobility spectrometer [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2021, 49(9): 1461–1469.
- [5] SHVARTSBERG AA, SMITH RD. Fundamentals of traveling wave ion mobility spectrometry [J]. Analytical Chemistry, 2008, 80(24): 9689–9699.
- [6] ZHANG GW, YANG J, YANG QM, *et al.* Development of trapped ion mobility spectrometry and its applications [J]. Chinese Journal of Analytical Chemistry, 2023, 51(11): 1703–1713.
- [7] FABIANOWSKI W, MAZIEJUK M, SZYPOSZYNSKA M, *et al.* Detection and identification of VOCs using differential ion mobility spectrometry (DMS) [J]. Molecules, 2022, 27(1): 234.
- [8] FOUQUE KJD, FERNANDEZ-LIMA F. Recent advances in biological separations using trapped ion mobility spectrometry-mass spectrometry [J]. TRAC-Trends in Analytical Chemistry, 2019, 116: 308–315.
- [9] BASURI P, SAFFERTHAL M, KOVACEVIC B, *et al.* Characterization of anticancer drug promoters using electrospray ionization and ion mobility spectrometry-mass spectrometry [J]. Journal of the American Society for Mass Spectrometry, 2024, 35(12): 2869–2876.
- [10] AVULA B, BAE JY, WANG YH, *et al.* Chemical profiling and characterization of phenolic acids, flavonoids, terpene glycosides from *Vangueria agrestis* using ultra-high-performance liquid chromatography/ion mobility quadrupole time-of-flight mass spectrometry and metabolomics approach [J]. Biomedical Chromatography, 2020, 34(9): e4840.
- [11] WU CF, ZHANG F, GUO YL. Identification and distinction of acrolein-deoxyguanosine adduct isomers by high-performance liquid chromatography/ion mobility spectrometry/quadrupole time-of-flight mass spectrometry combined with in-source collision-induced dissociation [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2020, 34(9): e8677.
- [12] GUO XY, WAN XC, HO CT. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in tea (*Camellia sinensis*): A comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2025, 24(2): e70119.
- [13] LOUW S. Recent trends in the chromatographic analysis of volatile flavor and fragrance compounds: Annual review 2020 [J]. Analytical Science Advances, 2021, 2(3-4): 157–170.
- [14] LV BB, MO WF, JIAN CW, *et al.* Recent progress in food quality control through flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2024, 18(9): 8002–8015.
- [15] WANG SQ, CHEN HT, SUN BG. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Food Chemistry, 2020, 315: 126158.
- [16] DENG ZW, WANG T, ZHENG, Y, *et al.* Deep learning in food authenticity: Recent advances and future trends [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104344.
- [17] 张碧莹, 隋雨萌, 张鑫, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术在食品真实性鉴别中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2025, 46(1): 227–236.  
ZHANG BY, SUI YM, ZHANG X, *et al.* Research progress in the application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in food authentication [J]. Food Science, 2025, 46(1): 227–236.
- [18] ZACOMETTI C, SAMMARCO G, MASSARO A, *et al.* Authenticity assessment of ground black pepper by combining headspace gas-chromatography ion mobility spectrometry and machine learning [J]. Food Research International, 2024, 179: 114023.
- [19] HE S, ZHANG B, DONG X, *et al.* Differentiation of goat meat freshness using gas chromatography with ion mobility spectrometry [J]. Molecules, 2023, 28(9): 3874.
- [20] 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 in Analytical Chemistry, 2021, 144: 116435.
- [21] MA C, NIE HL, LIU LX, *et al.* Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technique and its recent applications in grain research [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2024, 104(15): 9093–9101.
- [22] LI SY, DU DD, WANG J, *et al.* Application progress of intelligent flavor sensing system in the production process of fermented foods based on the flavor properties [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(12): 3764–3793.
- [23] 胡航伟, 程晶晶, 谢亚敏, 等. 气相离子迁移谱技术在谷物食品中的应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(5): 253–259.  
HU HW, CHENG JJ, XIE YM, *et al.* Research progress in the application of gas chromatography-ion mobility spectrometry technology in cereal foods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(5): 253–259.
- [24] 钱鑫, 李占明, 宋嘉慧, 等. 气相色谱-离子迁移谱法检测农产品中挥发性有机化合物的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(18): 7184–7190.  
QIAN X, LI ZM, SONG JH, *et al.* Research progress on the determination of volatile organic compounds of agro-food by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(18): 7184–7190.
- [25] JIA SL, JIA ZF, AN J, *et al.* Rapid and visual flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) in meat products: Research progress and future trends [J]. Journal of Food Biochemistry, 2024, 2024: 6711621.
- [26] SUN XX, YU YM, WANG ZY, *et al.* Insights into flavor formation of braised chicken Based on E-nose, GC-MS GC-IMS, and UPLC-Q-exactive-MSMS [J]. Food Chemistry, 2024, 448: 138972.
- [27] LI C, ZOU YL, LIAO GZ, *et al.* Identification of characteristic flavor compounds and small molecule metabolites during the ripening process of Nuodeng ham by GC-IMS, GC-MS [J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138188.
- [28] ZHANG J, JIN L, ZHOU JJ, *et al.* Ultrasound effect on flavor profile of beef jerky produced with partial potassium salt substitute based on GC-IMS technology [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2024, 111: 107139.
- [29] GUO S, ZHAO XY, MA Y, *et al.* Fingerprints and changes analysis of volatile compounds in fresh-cut yam during yellowing process by using HS-GC-IMS [J]. Food Chemistry, 2022, 369: 130939.
- [30] ZHANG JW, PAN LQ, TU K. Aroma in freshly squeezed strawberry juice during cold storage detected by E-nose, HS-SPME-GC-MS and GC-IMS [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2023, 17(4): 3309–3322.
- [31] CUI F, LIU M, LI X, *et al.* Gas chromatography ion mobility spectroscopy: A rapid and effective tool for monitoring oil oxidation [J]. Food Research International, 2024, 176: 113842.
- [32] CHI XL, GUO HX, ZHANG YD, *et al.* E-nose, E-tongue combined with GC-IMS to analyze the influence of key additives during processing on the flavor of infant formula [J]. Foods, 2022, 11(22): 3708.
- [33] LI JY, NIE ZJ, HU JW, *et al.* Geographical traceability of flavor compounds in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*): Implications for quality differentiation, authenticity assessment, and mechanism research [J]. Food Chemistry, 2024, 451: 139429.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)