

# 气相色谱-离子迁移谱法检测农产食品中挥发性有机化合物的研究进展

钱鑫<sup>1</sup>, 李占明<sup>1,2</sup>, 宋嘉慧<sup>1</sup>, 柴迎慧<sup>1</sup>, 俞玥<sup>1</sup>, 周冬仁<sup>2\*</sup>

(1. 江苏科技大学粮食学院, 镇江 212100; 2. 浙江省淡水水产研究所, 湖州 313001)

**摘要:** 气相色谱-离子迁移谱法(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)结合了气相色谱的高分离能力和离子迁移谱的高灵敏度, 可得到保留时间、漂移时间和信号强度的三维谱图, 使定性分析更加准确, 有效地解决了气相色谱低鉴别能力和离子迁移谱对混合物进行检测时存在的交叉灵敏度问题, 并且不需要复杂的样品前处理, 可以直接对样品的挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)进行分析, 极大简化了分析过程, 实现快速检测, 满足现场分析的需要。作为一项新兴的无损检测技术, GC-IMS 目前主要应用于食品质量鉴定、掺假溯源分析、食品特征风味分析、新产品开发等方面。本文介绍了 GC-IMS 的基本原理, 重点综述了 GC-IMS 在粮油、果蔬、水产品等农产食品中应用的研究现状, 以为农产食品的品质分析、风味研究、新食品开发等提供一定的理论指导。

**关键词:** 气相色谱-离子迁移谱法; 挥发性有机化合物; 农产食品; 溯源; 掺假

## Research progress on the determination of volatile organic compounds of agro-food by gas chromatography-ion mobility spectrometry

QIAN Xin<sup>1</sup>, LI Zhan-Ming<sup>1,2</sup>, SONG Jia-Hui<sup>1</sup>, CHAI Ying-Hui<sup>1</sup>, YU Yue<sup>1</sup>, ZHOU Dong-Ren<sup>2\*</sup>

(1. School of Grain Science and Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212100, China;  
2. Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, Huzhou 313001, China)

**ABSTRACT:** Gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) combines the high separation power of gas chromatography with the high sensitivity of ion mobility spectrometry to obtain the three-dimensional spectra of retention time, drift time and signal strength, which makes the qualitative analysis more accurate, it effectively solves the problems of low identification ability of gas chromatography and cross sensitivity of ion mobility spectrometry in the detection of mixtures, the volatile organic compounds (VOCs) of the samples can be directly analyzed without complex sample pretreatment, greatly simplifying the analysis process, achieving rapid detection, and meeting the needs of on situ analysis. As a new non-destructive testing technology, GC-IMS technology is mainly used in food quality identification, adulteration traceability analysis, food flavor analysis, new product development and other aspects. This paper introduced the basic principles of GC-IMS, and emphatically summarized its application on

**基金项目:** 农业农村部淡水渔业健康养殖重点实验室开放课题项目(ZJK202114)、福州市科技计划项目(2018-N-9)、福建省检验检疫技术研究重点实验室开放课题项目(FJKF2021-01)

**Fund:** Supported by the Open Fund of Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries (ZJK202114), the Fuzhou Science and Technology Projects (2018-N-9), and the Open Fund of Fujian Key Laboratory of Inspection and Quarantine Technology (FJKF2021-01)

\*通信作者: 周冬仁, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水产食品加工与安全。E-mail: 872559718@qq.com

\*Corresponding author: ZHOU Dong-Ren, Master, Senior Engineer, Zhejiang Institute of Freshwater Fisheries, No.999, South Hangchangqiao Road, Wuxing District, Huzhou 313001, China. E-mail: 872559718@qq.com

several kinds of food, such as grains and oils, fruits and vegetables, aquatic products and so on, aiming to provide some theoretical guidance for the agro-food quality analysis, flavor research and new food development of edible agro-food products.

**KEY WORDS:** gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile organic compounds; agro-food; traceability; adulteration

## 0 引言

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)对食品风味形成影响显著,亦能影响食品的整体评价结果。目前,食品中 VOCs 的分析检测技术主要有感官分析法、电子鼻检测法、气相色谱法、气相色谱-质谱法等<sup>[1-2]</sup>。其中,感官分析法需要专业人员,具有较强的主观性;包括电子鼻、气相色谱法以及各种联用技术在内的仪器分析属于客观分析,结果相对较为客观。气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)是 VOCs 分析的首选方法,然而对于食品、农产品等较为复杂的基质中的 VOCs 的检测,GC-MS 对组分相似或接近的物质的分离能力存在局限性。此外,质谱所需的真空条件限制了 GC-MS 对待测样品中的异构化合物的区分能力。

气相色谱-离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)技术的出现,提供了一种具有快速响应能力的新气相分离和检测技术,将 GC 高效的分离能力和 IMS 技术的快速响应优势相结合。随着尺寸相对较小、分析速度更快的集束毛细管柱的出现,GC 的部分体积得到缩小,GC-IMS 的便携性增加,其应用得到迅速发展,在诸如环境检测、毒品分析、石油化学分析、工业在线监测以及医学诊断等领域得到广泛关注和应用<sup>[3-5]</sup>。GC-IMS 的最大优势在于解决了低含量 VOCs 难以准确检测的问题。在食品领域,GC-IMS 目前主要应用于食品质量分析、食品材料鉴定、食品特征风味分析等方面<sup>[6-7]</sup>。本文综述了近年来 GC-IMS 在食品领域的研究进展,简要阐述 GC-IMS 的工作原理,重点总结 GC-IMS 在粮油、果蔬、水产品等农产食品中应用的研究现状和前景,以期为农产食品中 VOCs 的分析检测及新型食品研究与开发提供一定的理论指导。

## 1 GC-IMS 原理

GC-IMS 是根据不同离子到达检测器的时间差异来实现检测的。检测时,样品会先在 GC 系统的色谱柱中进行预分离,混合物中的各组分被 GC 分离后依次送入 IMS 中<sup>[8-9]</sup>。经过预分离后,样品在 IMS 反应区进行的离子反应就变得比较简单,在一定的程度上避免样品基质的影响。GC-IMS 的另一个优点是在常压条件下进行检测,不再需要复杂的辅助供气系统。GC-IMS 分析过程的图谱是

包含 GC 保留时间、IMS 的漂移时间和信号强度的三维图谱,谱图包含峰高、峰面积和峰体积等信息。通过仪器自带的分析系统,可将特征峰强度转换为以伪彩色图显示的二维图谱,不同的颜色对应不同的峰强度,展示效果更加直观<sup>[9]</sup>。

## 2 GC-IMS 在食品分析中的应用研究

近年来,GC-IMS 在食品领域中的应用也有所发展。本节重点总结了近 5 年 GC-IMS 在不同食品的分析检测中的研究进展,旨在探讨 GC-IMS 作为一种新型检测技术在不同类别食品的分析测定中的应用潜力。

### 2.1 粮油类食品分析

#### 2.1.1 粮食霉变的检测

大米、小麦等大宗粮食产品在加工后失去谷壳的保护,在贮藏、运输过程中易受霉菌的感染发生霉变。但在霉变初期,由于其品质不会发生明显的变化,常规方法无法实现早期霉变的检测。导致谷物霉变的优势菌属中,不同类的霉菌中特征 VOCs 存在共性,少数 VOCs 则可能为某菌种所特有,可以通过此类 VOCs 的浓度变化来佐证谷物的霉变状态。谷航<sup>[10]</sup>基于不同霉变过程中所产生的 VOCs 成分和浓度的差异性,利用 GC-IMS 有效区分了样品大米不同时期的霉变程度<sup>[11]</sup>。在小麦霉变的检测上,针对小麦籽粒常见的真菌污染问题,GU 等<sup>[12]</sup>建立了一种顶空气相色谱-离子迁移光谱法结合化学计量学快速检测小麦籽粒真菌污染的方法,克服了传统真菌检测方法样品破坏性大且无法进行大规模无损检测和实时分析的缺点。有研究<sup>[13]</sup>将顶空-气相色谱-离子迁移谱(headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry, HS-GC-IMS)技术与荧光光谱法相结合,建立了基于独立信号和融合信号的花生黄曲霉菌落数预测模型,为粮食产品中黄曲霉毒素潜在危险的早期检测提供了可行性。综上,基于 VOCs 分析的 GC-IMS 有助于准确判断粮食早期霉变,保障食品安全。

#### 2.1.2 粮食的分类及分级

近来,GC-IMS 在粮食的分类及分级中的应用得到长足发展。一方面在于谷物的品种分类,赵卿宇等<sup>[14]</sup>利用 GC-IMS 结合化学计量学对 29 种青稞展开研究,发现不同品种的青稞所得到的三维图谱中对应香气组分的特征峰强度具有明显差异,由此建立了一种快速、高效地实现青稞分

类的方法。另一方面在于优劣粮食的区分,采用 HS-GC-IMS 和顶空固相微萃取-气相色谱-质谱法(headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)检测挥发性代谢产物含量,结果表明,与白米相比,黄米释放的挥发性代谢产物中含有更多的醛、醇、呋喃和更少的酯<sup>[15]</sup>。由此可见,基于 GC-IMS 的联合测定方法可以作为一种粮食品质鉴别的工具。

### 2.1.3 粮食风味研究

GC-IMS 的检测结果可通过三维图谱和指纹图谱展现,将风味变化可视化、具体化,更有助于开展更细致化的研究。国内外利用 GC-IMS 的研究主要应用于粮食作物或谷物制品的风味变化和控制、食用特性等方面<sup>[16-17]</sup>。但目前 GC-IMS 在手持、商用仪器的研制上还不太成熟,需要不断深入,实现现场检测。

### 2.1.4 油脂分析

不同品种的植物油 VOCs 组成和含量不同,CHEN 等<sup>[18]</sup>采用 GC-IMS 对 124 份不同精制等级菜籽油中的 VOCs 进行分析,通过观察气味指纹图谱,建立非线性模型,准确有效地区分菜籽油样品不同的精制等级。CHEN 等<sup>[19]</sup>对 3 种植物油(芝麻油、菜籽油、山茶油)进行了分类,实现了样品的顶空直接进样,根据 GC-IMS 数据集的数字图像实现了 3 种油脂的有效区分。GC-IMS 在植物油种类判别中得到广泛应用,尤其是结合化学计量学,GC-IMS 在植物油种类鉴别领域不断发展完善,可以实现对植物油种类的高效准确分析。

食用植物油掺假一直是食品安全领域的一个研究热点。与 GC 方法相比,GC-IMS 显示出更高的检测效率和适用性。CHEN 等<sup>[20]</sup>采用 GC-IMS 结合化学计量学方法对菜籽油中 147 个掺假样品进行检验,所建立的定向梯度-多向主成分分析-典型判别分析(histogram of oriented gradient-multiway principal component analysis-canonical discriminant analysis, HOG-MPCA-CDA)模型可用于鉴别掺入其他油种的菜籽油,并可对不同掺入程度的菜籽油进行精确分类。

GC-IMS 除了应用于植物油脂的掺假检验和分类外,也可用于包括鱼油在内的昂贵动物油脂的掺假鉴别。相比于在植物油脂上的应用,GC-IMS 应用在动物油脂上的研究较少,主要集中于鱼油的掺假检验和分类鉴别上<sup>[21]</sup>,相关研究有待扩展。

## 2.2 果蔬分析

### 2.2.1 果蔬加工中的质量检测

果蔬食品工业生产中的热处理、冷藏、冷冻、腌渍等处理,常常导致包括风味变化在内的果蔬理化性质不可逆转的变化。果蔬加工过程中 VOCs 的成分和浓度变化可采用 GC-IMS 进行监测。YANG 等<sup>[22]</sup>利用 HS-GC-IMS 鉴别出枣果中的 VOCs,并根据 VOCs 成分差异对枣果进行不同时期的分类,区分出新鲜水果和冷藏水果。同样以枣作为研究对

象,SUN 等<sup>[23]</sup>将红枣在高温高湿条件下进行黑化处理,结果表明,与未处理枣相比,处理后的黑枣果实的 VOCs 有很大的变化,该研究为黑枣营养产品的开发提供了基础数据。

### 2.2.2 产地溯源和贮藏时间的判定

同一种果蔬由于其产地不同,VOCs 含量和风味存在差别,基于此可对果蔬进行产地溯源和质量评价。于怀智等<sup>[24]</sup>将 GC-IMS 与主成分分析法相结合,利用气味指纹图谱差异实现了北京平谷、山西运城等 5 个产地水蜜桃的鉴别。蒙秋霞等<sup>[25]</sup>使用 GC-IMS 对不同产地的‘玉香’梨的香气物质进行检测,结果表明 3 个不同产地的‘玉露香’梨中含有的主要香气物质为乙酸丁酯和乙酸乙酯,其主成分含量差异较大。综上,GC-IMS 可利用果蔬 VOCs 差异快速区分其产地,为果蔬产品的产地溯源鉴别提供一定参考数据,有助于地理标志产品的保护及推广。

果蔬水分含量相对偏高,保鲜期较短,贮藏较为困难。果蔬贮藏中物质变化值得关注。LIU 等<sup>[26]</sup>将 GC-IMS 与主成分分析法相结合,实现了鳄梨贮藏时间的区分,并首次建立了鳄梨中 VOCs 的指纹图谱,该方法在预测果实成熟度方面具有很大的潜力。孟祥春等<sup>[27]</sup>利用 GC-IMS 测定常温贮藏果实 VOCs 组分含量及内外观品质指标差异,研究了黄金百香果采后贮藏过程中品质变化规律,结果表明贮藏时间对 VOCs 的影响最为显著。综上所述,GC-IMS 通过分析果蔬储存过程中 VOCs 组分含量的变化,证实储存时间对 VOCs 的影响显著性,为果蔬产品的质量分析提供了一些参考数据。

## 2.3 水产品

GC-IMS 在水产品风味研究上的应用主要是通过分析和监测 VOCs 变化,改善水产品的风味和改良水产品加工工艺<sup>[28]</sup>。蔡丹丹<sup>[29]</sup>采用 GC-IMS 对我国 18 种淡水养殖鱼肉及 3 种养殖河鲢的鱼汤进行分析,结果表明,水产质量可通过微生物腐败和 VOCs 的差异进行区别。除此之外,GC-IMS 还应用于检测水产品加工过程中风味变化,GC-IMS 相关水产食品 VOCs 检测可用于发酵、腌制、干制、储藏等食品加工领域(表 1)。GC-IMS 在水产品的质量检测和工艺改进方面已经得到广泛使用,除此之外通过 GC-IMS 可以实现对水产品的生长阶段和生长环境进行判别和区分,相关研究为水产品以后的产地区分以及产品新鲜度分析提供数据支持。

## 2.4 调味品

调味品本身或烹饪后会产生 VOCs 和特殊风味,探究调味品的风味特性,分析影响其风味特性的呈味物质,有助于调味品的开发。近年来,GC-IMS 在调味品物质的研究上得到了一定的应用,主要涉及调味品的成分分析、加工品质、风味研究等。

通过 GC-IMS 对调味品的加工处理方式进行优化,并

且通过对调味品的新鲜程度进行区分, 可以为市场中以次充好的掺伪检测提供数据和模型支持。除此之外, 结合主成分分析和线性判别分析方法, 可用于不同储藏期食品的鉴别<sup>[36]</sup>。GE 等<sup>[37]</sup>探析了辣椒热风干燥过程中 VOCs 的变化, 辣椒风味的质量在 60 °C 时的热风干燥效果总体上优于其他处理方式。CHEN 等<sup>[38]</sup>运用 HS-GC-IMS 研究发酵辣椒粉自然发酵和接种发酵过程中 VOCs 的变化, 结果表明随着发酵时间的延长, 大多数酯类、醛类和醇类化合物明显减少。以上研究表明, 风味化合物的变化可用于不同加工方法或者不同储藏期食品的鉴别。

GC-IMS 的应用为传统食品的风味研究及品质分析提供了良好的支撑。尹航等<sup>[39]</sup>基于电子鼻和 GC-IMS 分析了中国广西传统食物螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲的风味, 准确直观地分析了样品的差异特征。LIN 等<sup>[40]</sup>采用 GC-IMS 研究发酵酸汤中细菌群落对异味产生的贡献, 通过皮尔逊相关分析, 确定臭汤的气味产生与片球菌属、己酸杆菌属、梭状芽胞杆菌属、狭义梭状芽胞杆菌属等有关。江津津等<sup>[41]</sup>对粤式柱候酱的特征风味进行成分分析, 通过 GC-IMS 对传统食品和调味品的研究, 分

析影响风味的菌群为优化生产工艺和改良产品风味提供了一定的理论依据。

## 2.5 酒龄分析及产地鉴别

GC-IMS 在酒类物质的产地分析中具备良好的应用价值。LI 等<sup>[42]</sup>将 GC-IMS 应用于白兰地年份鉴定, 结合偏最小二乘回归法对 VOCs 与白兰地酒龄的相关性进行研究, 建立了一种白兰地酒龄鉴定模型, 可快速准确地识别白兰地酒龄。张敏敏等<sup>[43]</sup>采用 GC-IMS 结合化学计量学方法快速区分不同年份酿造白酒。类似于中国黄酒这种地域品牌和风味的酒类, 产地鉴别也受到重视。CHEN 等<sup>[44]</sup>的研究发现, 可根据风味物质的组成区分中国不同产地黄酒, 实验中采用加性颜色模型进行特征峰的选择, 主成分分析结果显示了样品间的内在差异, 所建立的分类模型在预测集的正确分类率为 95.35%。由此可见, GC-IMS 技术可通过识别香气成分的差异实现酒类鉴别及分析。

GC-IMS 除了在发酵过程、酒的鉴别检测方面有应用外, 在诸如酒的种类区分、风味物质检测、新的酒类产品开发等方面具有巨大的应用价值(表 2)。

表 1 GC-IMS 在水产品工艺改进中的应用  
Table 1 Application of GC-IMS in aquatic product process improvement

食品工艺	研究对象	研究结果	参考文献
发酵	黄山臭鳃鱼	湿腌发酵比干腌发酵产生更多的挥发性物质, 且臭鳃鱼感官品质最好	[30]
	臭鳃鱼	随着发酵时间的延长, 鱼肉色泽、质构和挥发性物质均呈规律性变化	[31]
腌制	禾花鱼、罗非鱼、金丝鱼	采用电子鼻和 GC-IMS 进行分析, 表明料酒腌制对鱼肉脱腥具有积极作用	[32]
干制	凡纳滨对虾	干制过程对即食虾干质构和风味的形成起重要作用的结论	[33]
	三文鱼	基于电子鼻、电子舌与 GC-IMS 等技术相结合的方法建立了三文鱼新鲜度和品质货架期的预测模型	[34]
储藏	海参肽粉	水分吸附和贮藏过程中的微生物对 SCPPs 香气成分会产生影响, 且水分吸附对 SCPPs 香气成分的影响大于微生物	[35]

表 2 GC-IMS 在酒类中的部分应用  
Table 2 Partial application of GC-IMS in wine

应用方向	研究对象	研究结果	参考文献
种类区分	菠萝、苹果、蔓越莓果啤	以香气特征离子峰作为表征 3 种果啤产品风味差异信息的特征变量, 有效区分不同果啤产品的主要香气	[45]
	白酒	快速直观区分白酒香型	[46]
风味物质检测	杨梅酒 糯米杨梅酒	分析杨梅酒和糯米杨梅酒的风味特征发现两种样品成分差别明显, 糯米杨梅酒的挥发性物质更丰富	[47]
	毛铺苦荞酒	毛铺苦荞酒基酒和成品酒关键香气的对比下得出苦荞提取物起到“基香”的作用	[48]
	韩国真露烧酒	建立一种蒸馏酒中 VOCs 分析的 GC-IMS 检测方法	[49]
新型酒的开发	杨梅酒	单宁酸、阿魏酸、芥子酸均对杨梅发酵酒贮藏期间具有护色作用	[50]
	桑葚酒	研发了一种桑葚酿造酒和多粮混合发酵蒸馏酒混合而成的兼具色、味和营养价值的保健酒	[51]

### 3 总 结

GC-IMS 具有响应快速、灵敏度高和检测周期短等优势, GC-IMS 的出现解决了低含量 VOCs 难以准确检测的问题, 现已广泛应用于包括粮油、果蔬、水产品等在内的农产品的研究中, 涵盖食品成分分析、产地溯源、掺假检测、分类及分级、新型产品开发等方面。

GC-IMS 技作为新兴检测技术, 在食品分析检测领域上的应用相较于传统检测技术有较大的发展空间。虽然 GC-IMS 克服了气相色谱和离子迁移色谱的缺点, 但由于在食用农产品中应用并不广泛, 缺少一定的理论和数据支持, 因此在今后的科研工作要选择结合合适的化学计量法来实现对食品种类、产地溯源、食品掺伪等准确、快速的分析, 构建模型, 建立并丰富数据库内容, 不断开展基于 VOCs 检测的农产品品质的分析研究, 扩展 GC-IMS 在食品行业的应用领域, 优化产品的加工工艺, 简化食品掺假的检测过程, 以此推动食品行业的进步。

#### 参考文献

- [1] WANG SQ, CHEN HT, SUN BG. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chem*, 2020, 315: 126158.
- [2] ARROYO-MANZANARES N, GARCÍA-NICOLÁS M, CASTELL A, *et al.* Untargeted headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry analysis for detection of adulterated honey [J]. *Talanta*, 2019, 205: 120123.
- [3] KARPAS Z, WANG YF, EICEMAN GA. Qualitative and quantitative response characteristics of a capillary gas chromatograph/ion mobility spectrometer to halogenated compounds [J]. *Anal Chim Acta*, 1993, 282:19–31.
- [4] RUZSANYI V, MOCHALSKI P, SCHMID A, *et al.* Ion mobility spectrometry for detection of skin volatiles [J]. *J Chromatogr B*, 2012, 911: 84–92.
- [5] XIA AN, MENG XS, TANG XJ, *et al.* Probiotic and related properties of a novel lactic acid bacteria strain isolated from fermented rose jam [J]. *LWT*, 2021, 136: 110327.
- [6] CONTRERAS MM, APARICIO L, ARCE L. Usefulness of GC-IMS for rapid quantitative analysis without sample treatment: Focus on ethanol, one of the potential classification markers of olive oils [J]. *LWT*, 2020, 120:108897.
- [7] TIAN X, LI ZJ, CHAO YZ, *et al.* Evaluation by electronic tongue and headspace-GC-IMS analyses of the flavor compounds in dry-cured pork with different salt content [J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109456.
- [8] 陈通. 基于 GC-IMS 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 oils based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [9] 陈明杰. 基于 GC-IMS 的干燥与烘烤工艺对猪肉脯风味影响的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2020.  
CHEN MJ. Study on the flavor influence of d ried pork slice in drying and baking based on GC-IMS technique [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2020.
- [10] 谷航. GC-IMS 联用技术在大米霉变早期监测中的应用研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2019.  
GU H. Application research of GC-IMS continuous technology in early monitoring of rice mildew [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [11] 谷航, 陈通, 陈明杰, 等. 气相-离子迁移谱联用技术评定大米霉变程度的应用研究[J]. *中国粮油学报*, 2019, 34: 118–124.  
GU H, CHEN T, CHEN MJ, *et al.* Application of gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS) to evaluate the degree of mildew in rice [J]. *J Cere Oils Ass*, 2019, 34: 118–124.
- [12] GU S, WANG Z, CHEN W, *et al.* Targeted versus nontargeted green strategies based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics for rapid detection of fungal contamination on wheat kernels [J]. *J Agric Food Chem*, 2020, 68: 12719–12728.
- [13] GU S, CHEN W, WANG ZH, *et al.* Rapid determination of potential aflatoxigenic fungi contamination on peanut kernels during storage by data fusion of HS-GC-IMS and fluorescence spectroscopy [J]. *Postharvest Biol Technol*, 2021, 171: 111361.
- [14] 赵卿宇, 沈群. GC-IMS 结合化学计量学方法在青稞分类中的应用[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35: 165–169.  
ZHAO QY, SHEN Q. Application of GC-IMS technology combined with chemometrics method in classification of hulless barley [J]. *J Cere Oils Ass*, 2020, 35: 165–169.
- [15] ZHANG X, DAI Z, FAN X, *et al.* A study on volatile metabolites screening by HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS for discrimination and characterization of white and yellowed rice [J]. *Cere Chem*, 2020, 97: 496–504.
- [16] 王远辉, 张兰兰, 李博宇, 等. 气相色谱-离子迁移谱分析酵母馒头挥发性物质[C]. 中国食品科学技术学会第十七届年会, 2020.  
WANG YH, ZHANG LL, LI BY, *et al.* Gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS) analysis of volatile components in Jiaozai steamed bread [C]. The 17<sup>th</sup> Annual Meeting of Chinese Society of Food Science and Technology, 2020.
- [17] 王熠瑶, 张彦彦, 孙俊, 等. 基于 GC-IMS 分析糙米储藏过程中风味物质变[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46: 250–255.  
WANG YY, ZHANG CY, SUN J, *et al.* Analysis of flavor changes of brown rice during storage based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Ferment Ind*, 2020, 46: 250–255.
- [18] CHEN T, QI XP, CHEN MJ, *et al.* Gas chromatography-ion mobility spectrometry detection of odor fingerprint as markers of rapeseed oil refined grade [J]. *J Anal Methods Chem*, 2019, 2019,
- [19] CHEN T, QI XP, LU DL, *et al.* Gas chromatography-ion mobility spectrometric classification of vegetable oils based on digital image processing [J]. *J Food Meas Charact*, 2019, 13: 1973–1979.
- [20] CHEN T, CHEN XY, LU DL, *et al.* Detection of adulteration in canola oil by using GC-IMS and chemometric analysis [J]. *Inter J Anal Chem*, 2018. DOI: 10.1155/2018/3160265
- [21] PUTRI A, ALIAÑO-GONZÁLEZ M, FERREIRO M, *et al.* Development of a methodology based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry for the rapid detection and determination of patin fish oil

- adulterated with palm oil [J]. Arab J Chem, 2020, 13: 7524–7532.
- [22] YANG LZ, LIU J, WANG XY, *et al.* Characterization of volatile component changes in jujube fruits during cold storage by using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Molecules, 2019, 24: 3904.
- [23] SUN X, GU D, FU Q, *et al.* Content variations in compositions and volatile component in jujube fruits during the blacking process [J]. Food Sci Nutr, 2019, 7: 1387–1395.
- [24] 于怀智, 姜滨, 孙传虎, 等. 顶空气相离子迁移谱技术对不同产地水蜜桃的气味指纹分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46: 231–235.
- YU HZ, JIANG B, SUN CH, *et al.* Analysis of nectarine odor fingerprints based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46: 231–235.
- [25] 蒙秋霞, 张丽珍, 李阳, 等. 不同产地'玉露香'梨品质及香气物质分析[J]. 中国果树, 2020, 3: 28–33, 143.
- MENG QX, ZHANG LZ, LI Y, *et al.* Analysis of fruit quality and aroma components of 'Yuluxiang' pear from different habitats [J]. China Fruits, 2020, 3: 28–33, 143.
- [26] LIU Y, BU M, GONG X, *et al.* Characterization of the volatile organic compounds produced from avocado during ripening by gas chromatography ion mobility spectrometry [J]. J Sci Food Agric, 2021, 101: 666–672.
- [27] 孟祥春, 黄泽鹏, 凡超, 等. 黄金百香果采收后贮藏过程品质分析及挥发性风味物质特征鉴定[J]. 保鲜与加工, 2020, 20: 175–183.
- MENG XC, HUANG ZP, FAN C, *et al.* Quality analysis and characteristic identification of volatile flavor substance of golden passion fruit during postharvest storage [J]. Storage Process, 2020, 20: 175–183.
- [28] CHEN K, YANG Q, HONG H, *et al.* Physicochemical and functional properties of Maillard reaction products derived from cod (*Gadus morhua* L.) skin collagen peptides and xylose [J]. Food Chem, 2020, 333: 127489.
- [29] 蔡丹丹. 我国主要淡水养殖鱼肉的风味指纹图谱初探[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- CAI DD. The preliminary research on flavor fingerprint of main freshwater cultured fish in China [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.
- [30] JIA SL, LI Y, ZHUANG S, *et al.* Biochemical changes induced by dominant bacteria in chill-stored silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) and GC-IMS identification of volatile organic compounds [J]. Food Microbiol, 2019, 84: 103248.
- [31] 周迎芹, 杨明柳, 殷俊峰, 等. 臭鳊鱼低温发酵过程中品质及挥发性物质的变化[J]. 中国食品学报, 2020, 20: 179–186.
- ZHOU YQ, YANG ML, YIN JF, *et al.* Changes of quality and volatile compounds in stinky mandarin fish during low-temperature fermentation [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2020, 20: 179–186.
- [32] 庞一扬, 余远江, 袁桃静, 等. 腌鱼腌制过程中挥发性成分的变化分析[J]. 现代食品科技, 2020, 36: 281–289.
- PANG YY, YU YJ, YUAN TJ, *et al.* Analysis of volatile compounds changes of cured fish during the curing process [J]. Mod Food Sci Technol, 2020, 36: 281–289.
- [33] 胡梦月, 王善宇, 薛勇, 等. 即食虾干加工过程风味变化[J]. 中国渔业质量与标准, 2020, 10: 10–16.
- HU MY, WANG SY, XUE Y, *et al.* Changes in flavor characteristics of dried shrimps during processing [J]. Chin Fish Qual Stand, 2020, 10: 10–16.
- [34] 贾志鑫. 三文鱼新鲜度和品质货架期预测模型研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020.
- JIA ZX. Study on shelf life prediction model of freshness and quality of salmon [D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2020.
- [35] LI XR, WANG K, YANG RW, *et al.* Mechanism of aroma compounds changes from sea cucumber peptide powders (SCPPs) under different storage conditions [J]. Food Res Int, 2020, 128: 108757.
- [36] LI X, CUI WJ, WANG W, *et al.* Analysis of the volatile compounds associated with pickling of ginger using headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Flav Frag J, 2019, 34, 485–492.
- [37] GE S, CHEN YY, DING SH, *et al.* Changes in volatile flavor compounds of peppers during hot air drying process based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-GC-IMS) [J]. J Sci Food Agric, 2020, 100: 3087–3098.
- [38] CHEN YY, XU HS, DING SH, *et al.* Changes in volatile compounds of fermented minced pepper during natural and inoculated fermentation process based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Food Sci Nutr, 2020, 8: 3362–3379.
- [39] 尹航, 周文红, 白云霞, 等. 基于电子鼻、气相-离子迁移谱(GC-IMS)法分析广西螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲风味[J]. 食品工业科技, 2020, 42(9): 1–12.
- YI H, ZHOU WH, BAI YX, *et al.* Analysis of the flavor of Guangxi Luosi-noodle and Luosi-hot-pot by electronic nose and gas chromatography-ion migration spectrometry (GC-IMS) [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 42(9): 1–12.
- [40] LIN L, WU J, CHEN X, *et al.* The role of the bacterial community in producing a peculiar smell in Chinese fermented sour soup [J]. Microorganisms, 2020, 8: 1270.
- [41] 江津津, 贾强, 陈烽华, 等. 粤式柱候酱的特征风味成分分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35: 304–310, 316.
- JIANG JJ, JIA Q, CHEN FH, *et al.* Analysis of the characteristic flavor components of cantonese Zhu-housauce [J]. Mod Food Sci Technol, 2019, 35: 304–310, 316.
- [42] LI SY, YANG HF, TIAN HH, *et al.* Correlation analysis of the age of brandy and volatiles in brandy by gas chromatography-mass spectrometry and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Microchem J, 2020, 157: 104948.
- [43] 张敏敏, 路岩翔, 赵志国, 等. 气相-离子迁移谱结合化学计量学方法快速区分不同年份酿造白酒[J]. 食品工业科技, 2020, 42(14): 226–232.
- ZHANG MM, LU YX, ZHAO ZG, *et al.* Rapid discrimination of different years of brewing liquor by gas chromatography-ion mobility spectroscopy combined with chemometrics method [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 42(14): 226–232.
- [44] CHEN T, QI XP, CHEN MJ, *et al.* Discrimination of Chinese yellow wine from different origins based on flavor fingerprint [J]. Acta Chromatogr, 2020, 32, 139–144.
- [45] 龚霄, 周伟, 李积华, 等. 基于静态顶空气相离子迁移谱技术的果啤种类判别[J]. 食品工业科技, 2020, 42(7): 296–301.
- GONG X, ZHOU W, LI JH, *et al.* Identification of fruit beers based on static headspace-gas chromatography-ion mobility spectroscopy (SH-GC-IMS) [J]. Sci Technol Food Ind, 2020, 42(7): 296–301.
- [46] 朱玲, 蔡尽忠, 刘奔. 气相-离子迁移谱法对三种不同香型白酒的风味

- 分析[J]. 广东化工, 2020, 47: 53-55.
- ZHUL, CAI JZ, LIU B. Flavor analysis of three different flavor types of liquors using gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Guangdong Chem Ind*, 2020, 47: 53-55.
- [47] 鲜灵芝, 刘金阳, 鲁金花, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱分析杨梅酒和糯米杨梅酒的风味特征[J]. *食品与机械*, 2020, 37(2): 14-18.
- XIAN LZ, LIU JY, LU JH, *et al.* The flavor characteristics of bayberry wine and glutinous rice bayberry wine were analyzed based on gas chromatography-ion migration spectrum [J]. *Food Mach*, 2020, 37(2): 14-18.
- [48] 王娟, 杨强, 易翔, 等. 毛铺苦荞酒基酒和成品酒关键香气的对比分析研究[D]. 中国食品科学技术学会第16届年会, 2019.
- WANG J, YANG Q, YI X, *et al.* Identification of the key aroma compounds in Maopu Buckwheat Baijiu and investigation of the aroma effects of the addition of Buckwheat extract [D]. The 16<sup>th</sup> Annual Meeting of Chinese Society of Food Science and Technology, 2019.
- [49] 葛含光, 温华蔚, 宋旭, 等. 离子迁移谱法检测蒸馏酒中4种风味成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7: 834-838.
- GE HG, WEN HW, SONG X, *et al.* Determination of 4 flavor components in distilled liquor by ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7: 834-838.
- [50] 曹玉玺, 吴祖芳, 翁佩芳. 酚酸类物质对杨梅发酵酒贮藏期间色泽和挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 42(11): 78-85.
- CAO YX, WU ZF, WENG PF. Effect of phenolic acids on color and volatile flavor compounds of bayberry fermented wine during storage [J]. *Food Sci*, 2020, 42(11): 78-85.
- [51] 周晓龙, 张金修, 刘新利. 多粮和桑葚固液分离发酵保健酒的开发研究[J]. *酿酒科技*, 2020, 6: 73-80.
- ZHOU XL, ZHANG JX, LIU XL. Development of healthcare liqueur by separated fermentation of mulberry and multi-grains [J]. *Liquor-Mak Sci Technol*, 2020, 6: 73-80.

(责任编辑: 郑丽于梦娇)

## 作者简介

钱鑫, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: 2466461576@qq.com

周冬仁, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为水产食品加工与安全。

E-mail: 872559718@qq.com