

DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20240125002

# 气相离子迁移谱技术在谷物食品中的应用研究进展

胡航伟<sup>1</sup>, 程晶晶<sup>1</sup>, 谢亚敏<sup>1</sup>, 崔建涛<sup>1</sup>, 游新侠<sup>1\*</sup>, 袁惠萍<sup>1</sup>, 刘云国<sup>2\*</sup>

(1. 郑州科技学院食品科学与工程学院, 郑州 450064; 2. 临沂大学生命科学学院, 临沂 276000)

**摘要:** 作为一种新兴的检测分析技术, 气相离子迁移谱兼备气相色谱的高效分离能力和离子迁移谱的快速响应能力。因检测速度快、用时短、数据可视化等优势, 在食品领域中得以广泛应用, 特别是在食品等级分类、掺假检测、食品新鲜度评价、食品加工过程品质监测与贮藏期间变化方面。玉米、小麦、大米、大麦、高粱、糙米等谷物是我国重要的经济作物, 不仅提供机体所需的营养素和能量, 同时作为重要的传统美食加工原料, 在日常生活中需求量大。随着人们对于健康营养食品的消费意识增加, 围绕谷物及其制品的研究成为了关注的热点。基于此, 本文介绍了气相离子迁移谱的原理及特点, 并系统整理了该技术在谷物食品产地溯源、香气成分分析、原料精深加工等方面的研究情况, 旨在为谷物资源的开发利用和品质调控提供重要支撑。

**关键词:** 谷物食品; 气相离子迁移谱; 产地溯源; 香气物质; 品质

## Research progress in the application of gas chromatography-ion mobility spectrometry technology in cereal foods

HU Hang-Wei<sup>1</sup>, CHENG Jing-Jing<sup>1</sup>, XIE Ya-Min<sup>1</sup>, CUI Jian-Tao<sup>1</sup>, YOU Xin-Xia<sup>1\*</sup>,  
YUAN Hui-Ping<sup>1</sup>, LIU Yun-Guo<sup>2\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China; 2. College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276000, China)

**ABSTRACT:** As an emerging detection and analysis technology, gas chromatography-ion mobility spectrometry combines the high separation efficiency of gas chromatography and the fast response capability of ion mobility spectrometry. Due to the advantages of fast detection speed, short time and data visualisation, it has been widely used in the food field, especially in food grade classification, adulteration detection, food freshness evaluation, food processing quality monitoring and changes during storage. Corn, wheat, rice, barley, sorghum, brown rice and other cereals are important economic crops in China, which not only provide nutrients and energy needed by the body, but also are important raw materials for traditional food processing, and are in great demand in daily life. As people's awareness of healthy and nutritious food consumption increases, research around grains and their products has

**基金项目:** 山东省重点研发计划项目(2019YYSP026)

**Fund:** Supported by the Key Research and Development Program in Shandong Province (2019YYSP026)

**\*通信作者:** 游新侠, 硕士, 副教授, 主要研究方向为植物基发酵食品开发。E-mail: youxin\_8301@126.com

刘云国, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品精深加工及贮藏保鲜。E-mail: yguoliu@163.com

**\*Corresponding author:** YOU Xin-Xia, Master, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China. E-mail: youxin\_8301@126.com

LIU Yun-Guo, Ph.D, Professor, College of Life Sciences, Linyi University, Linyi 276000, China. E-mail:

yguoliu@163.com

become a hot spot of attention. Based on this, this paper introduced the principle and characteristics of gas chromatography-ion mobility spectrometry, and systematically compiled the research of this technology in the traceability of cereal food origin, analysis of aroma components, and deep processing of raw materials, aiming to provide important support for the development and utilisation of cereal resources and quality regulation.

**KEY WORDS:** cereal foods; gas chromatography-ion mobility spectrometry; origin traceability; aroma substances; quality

## 0 引言

谷物是世界各地主食消费的重要组成部分,包括玉米、大米、小米、小麦、大麦、高粱、燕麦、黑麦等,可作为机体获取碳水化合物、膳食纤维、矿物质等营养素的重要来源<sup>[1-2]</sup>。其中,谷物中的多酚物质种类繁多,特别是全谷物中,包括黄酮类、黄烷酮类、醌类、苯甲酸木酚素、烷萘间苯二酚等植物化学物质,这些化合物在调节人体的生理功能方面,具有一定的抗炎、抗氧化、免疫功能改善等有益健康的特性<sup>[3-5]</sup>。多酚类以结合酚、游离酚形式存在,其中,结合酚多以酯键或醚键形式附着在细胞壁上,基本上不溶于水。经发酵过程中微生物所分泌酶的水解特性,可以释放结合酚,增加其溶解度,进而影响其在肠道中的生物利用度<sup>[6-7]</sup>。而维生素 B<sub>12</sub>、维生素 D 和维生素 C 的含量在谷物中一般较低<sup>[8]</sup>。尽管食品加工不可避免地会破坏这些植物化学物质,并降低其有益的健康特性,但一些加工技术的创新能够将这些损失最大程度地减少。此外,通过产生新的生物活性成分和释放结合态的生物活性成分均有助于增强这些植物化学物质的生物活性<sup>[9]</sup>。

气相离子迁移谱(gas chromatography-ion mobility spectrometry, GC-IMS)是一种分离功能强大、对挥发性有机化合物检测灵敏的新型技术。它在使用过程中,展现出不需要样品富集,操作简单,检测用时短,对样品破坏性小,可以高效检测和识别复杂混合物中挥发性和半挥发性

有机化合物等显著优势,使其逐渐成为当代科研人员寻求快速和准确的气相分析过程中不可或缺的有力工具。尽管气相色谱-质谱技术在挥发性物质分析方面应用成熟,但通常需要真空条件,仪器价格昂贵,并伴随着消耗较高能量来电离质谱仪中的分析物,从而限制其大规模推广。相比而言,GC-IMS 实现了样品在常压下的分离检测,且响应速度快、灵敏度高、能耗较低,属于一种更为环保经济的技术,并在食用菌<sup>[10-12]</sup>、茶叶<sup>[13-15]</sup>、畜禽肉类<sup>[16-18]</sup>、乳制品<sup>[19-20]</sup>、蜂蜜<sup>[21-22]</sup>、植物油<sup>[23-24]</sup>等食品中广泛应用。本文系统地综述了 GC-IMS 技术在谷物食品香气成分分析、产地溯源、贮藏过程品质监测、原料精深加工方面的研究情况,旨在为谷物资源的开发利用和品质调控提供重要支撑。

## 1 GC-IMS 技术概述

GC-IMS 技术兼备气相色谱(gas chromatography, GC)和离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)的优点,可为痕量挥发性有机化合物的定性和定量分析提供有效技术支持,特别是对样品中异构体(如二聚体、三聚体)的检测。首先,待分析物在进入 IMS 系统之前经 GC 装置中毛细管柱而分离成单个组分,可以减少竞争性电离,从而允许挥发性和半挥发性化合物浓度的定量。此外,复杂的混合物首先被 GC 注入器蒸发,每个中性化合物在不同的时间被运输到 IMS 的电离区域,这便于对 GC 获得的化合物保留时间进行识别。混合物在 IMS 系统中分离过程,如图 1 所示<sup>[25]</sup>,

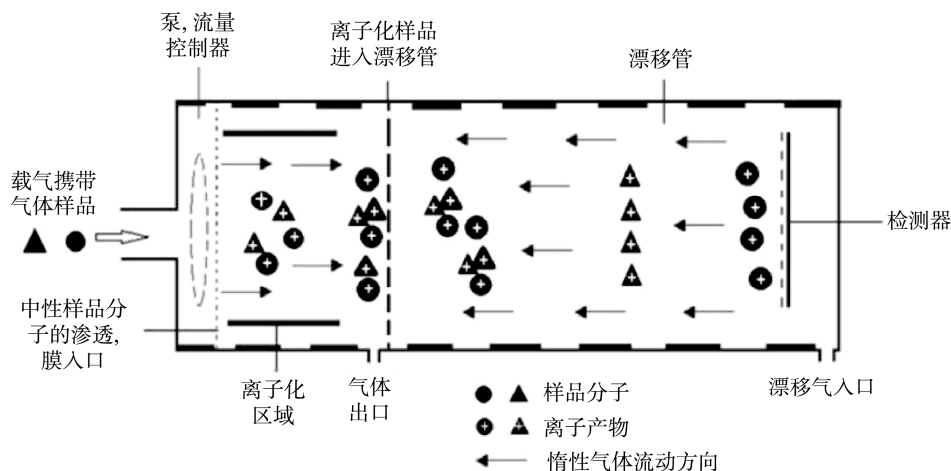


图 1 离子迁移谱的原理示意图

Fig.1 Principle schematic diagram of ion mobility spectrometry

根据质量、电荷、大小和形状, 通过漂移管分离离子化的混合物, 而漂移速度是每种待测物自身所特有的, 与电场强度和分析物迁移常数成正比。GC-IMS 可以与固相微萃取或顶空进样等技术相结合, 进而提高分析的灵敏度和选择性<sup>[26]</sup>。基于 GC-IMS 可从待测样品中获取大量的数据, 包括二阶数据矩阵, 其中被分析物的保留时间在一个坐标轴上, 而离子迁移率或漂移时间在另一个坐标轴上<sup>[27]</sup>。离子信号的强度反映了样品中被分析物的丰度。此外, 在进行化学计量学分析之前, 有不同的技术用于 GC-IMS 数据的预处理, 如基线校正、降噪、归一化、峰值检测和反应物离子峰校正等<sup>[28]</sup>。这些技术对于降噪和提高数据结果的准确性、重现性是非常重要的。

## 2 GC-IMS 技术在谷物食品中的应用

### 2.1 GC-IMS 在谷物食品香气物质分析中的应用

香气、滋味和外观是衡量食品质量的 3 个重要指标。其中, 挥发性有机化合物显著影响食品风味, 从而影响食品的整体评价。对食品中挥发性香气物质的分析可分为感官分析和仪器分析两部分。感官分析是指对食物中香气物质的感官感知, 评价结果通常是主观的, 不能在分子水平上进行探索。将主观意识的感官评价与客观的仪器分析相结合, 可以更好地解释食物风味化学成分与感官体验之间的关系, 从而深入理解某种香气的作用机制。因此, 逐渐发展了仪器分析技术来鉴定食品中的挥发性风味成分。鉴定食品中挥发性化合物常用的仪器分析技术, 包括气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)、气相色谱-嗅闻-质谱以及电子鼻等。其中, GC-MS 法是首选的挥发性化合物分析技术, 已被广泛应用<sup>[29]</sup>。然而, 由于食品基质的复杂性, GC-MS 技术在分析前通常需要进行烦琐的预处理, 且花费较长的检测时间, 这无法满足于许多分析物的快速检测要求。基于 GC-IMS 技术, 实现了样品中风味物质的可视化分析, 且无需处理。孙嘉卿等<sup>[30]</sup>探究不同处理方式下玉米挥发性风味物质的差异, 结果发现, 酯类化合物在鲜玉米中含量最高, 经过漂洗、速冻等处理后均出现明显降低。而辛醛、壬醛等醛类物质经过蒸煮处理后较鲜玉米而言, 含量却明显增加。相比于 GC-MS 技术, GC-IMS 检测到样品中化合物的种类更全面, 但两种技术测定的化合物组成存在较大的差异。因此, 将多种分析技术联合使用有助于全面解析样品中风味成分。许诺等<sup>[31]</sup>比较不同蒸煮时间下高粱米样品中香气成分的动态变化。结果发现, 在蒸煮 40~60 min 时, 高粱米香气物质中庚醛、丁酸丁酯的含量达到较高水平。GC-IMS 技术成功应用于谷物蒸煮过程挥发性风味物质的分析, 可为蒸煮时间的合理选择提供重要依据。李朋亮等<sup>[32]</sup>比较糙小米发芽前后风味物质的不同, 研究表明, 发芽后样品中绝大多数醛类物

质含量增加, 而酯类含量整体呈降低趋势。这些化合物的变化, 有助于糙小米风味品质的改善, 为其合理化加工与应用提供数据支撑。孙兴荣等<sup>[33]</sup>通过 GC-IMS 对不同颜色稻米蒸煮前后的挥发性风味物质进行分析。结果表明, 蒸煮后稻米的香气化合物的种类明显增加, 特别是醛类、醇类物质更丰富, 这可能归因于脂质氧化过程中物质的转换。与 GC-MS 技术相比, 基于 GC-IMS 所形成的化合物二维、三维谱图, 可实现不同样品之间香气成分的可视化对比, 从而能够更为清晰地比较样品之间的差异。

### 2.2 GC-IMS 在谷物食品产地溯源中的应用

谷物的质量和价格与其地理来源有关, 一些产区因生产具有高经济价值的优质谷物而闻名, 如五常大米、京山桥米、罗定稻米。食品标签在一定程度上揭示了其真实的商品价值, 也满足了消费者对食品来源的知情权。针对市面上同一原料不同等级层次的产品, 明确其真实性, 保持市场稳定, 实现其产地可追溯性具有重要意义。通过检测样品中挥发性物质的类型, 构建不同等级原料的风味化合物数据库, GC-IMS 技术应用于复杂多样的样品成分分析具有突出优势。目前, 围绕该技术对食品原料进行产地溯源的研究逐渐深入<sup>[34-35]</sup>。卞景阳等<sup>[36]</sup>选取黑龙江省不同地市的香稻米为实验原料, 采用 GC-IMS 技术成功筛选出区分不同产地样品的特征风味物质, 这为稻米的产地溯源提供了一种简便、快捷、可行的检测手段。王济世<sup>[37]</sup>对不同产地 4 种稻米(稻花香、龙粳、绥粳、垦稻)的风味物质进行解析, 通过 GC-IMS 技术共鉴定出化合物 32 种, 结合多元统计学方法, 不同产地样品得以很好区分。闫文芝等<sup>[38]</sup>以河套产春小麦、河南产冬小麦和河北产冬小麦为实验原料, 通过 GC-IMS 技术分析其香气成分的特性, 实现了不同时期和不同产地小麦差异的区分。综上所述, 基于 GC-IMS 方法的研究报道, 在谷物的产地区分方面得以很好应用, 可作为谷物食品产地溯源和品质特征描述的有效技术。

### 2.3 GC-IMS 在谷物食品贮藏过程品质监测中的应用

谷物采收后因环境温度、湿度、卫生等条件的变化, 极易受到微生物的污染, 特别是伴随着真菌毒素等次生代谢产物的产生。其中, 黄曲霉毒素的积累将对人体和动物产生严重的毒理危害, 并给农民造成较大的经济损失<sup>[39]</sup>。因此, 及早开展危害物识别和处理霉菌毒素造成的原料污染, 一定程度上可减少或避免经济的不必要损失。LI 等<sup>[40]</sup>将 GC-IMS 技术用于检测和分析受黄曲霉菌污染的玉米粒在不同时期的特征挥发性有机化合物, 成功构建了化合物的特征指纹图谱和热图, 从而实现原料受污染过程直观变化的监测。谷航等<sup>[41]</sup>以市售散装大米为实验原料, 测定 3 种常见霉菌单独侵染后, 32 h 内样品挥发性化合物变化。

结果表明,根据检测样品中化合物含量动态变化,可将大米霉变时期划分为 4 个阶段,根据不同阶段大米的品质,为大米霉变早期监测提供重要数据支撑。秦瑶等<sup>[42]</sup>采用 GC-IMS 技术对不同程度霉变小麦样品进行风味成分测定并结合宽度学习模型进行样品分类,有助于提高小麦品质监测结果的可靠性。赵卿宇等<sup>[43]</sup>研究辽星大米储藏期间品质变化情况,并对其测定指标进行动力学方程拟合。结果发现,随着储藏时间延长,以醛类、酮类为主的不良风味物质明显增加,使得大米品质发生改变。王熠瑶等<sup>[44]</sup>比较不同包装方式下糙米储藏过程中挥发性有机化合物的变化,结果发现,随着储藏时间增加,以乙酸乙酯、乙酸丁酯等为代表的酯类明显减少,而以辛醛、庚醛等为代表的醛类逐渐增加。GC-IMS 技术的应用,可为谷物食品品质劣变的快速评估和早期预警提供技术指导和数据支撑,从而保障谷物食品安全、可食用性。

#### 2.4 GC-IMS 在谷物食品精深加工中的应用

随着市场发展需求的增加,以玉米、高粱、小麦等谷物为基础原料加工的制品种类得以明显提高,包括馒头、酒、食醋、饮料等(表 1)。因原料制作工艺的差异,赋予了产品不同的特性。值得注意的是,谷物经有益微生物发酵从古代就开始出现,从而提高了加工制品的可接受性和功能作用。多项研究表明,微生物发酵增加了谷物制品生物活性化合物的生物利用率,具有潜在的健康促进效果<sup>[55-56]</sup>。杨

晓璇等<sup>[45]</sup>通过 GC-IMS 技术对山东、山西、广东等地的食醋香气成分进行比较分析,并结合多元统计学手段,实现了山西产食醋与江苏产食醋样品之间的区分。李凤林等<sup>[46]</sup>比较进口、自产不同类型精酿啤酒的香气成分差异,GC-IMS 结合多元统计学手段实现了不同类型样品的有效区分,为啤酒品质的改善提供研究基础。张佳丽等<sup>[47]</sup>研究不同杂粮和添加量对馒头成品中香气组成的影响,结果发现,杂粮馒头中酯类、醛类和醇类化合物较为丰富。特别是,随着添加量的增加,馒头中挥发性有机化合物的种类和含量呈增加趋势。闫瑞宇等<sup>[48]</sup>通过 GC-IMS 技术比较荞麦酸乳与市售、自制酸乳之间风味差异,结果发现,3-甲基丁醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、2-戊基呋喃为荞麦酸乳中特有香气成分。陈虎等<sup>[49]</sup>对藜麦酒、高粱酒风味成分进行解析,并比较不同原料酿造谷物酒的差异。研究表明,藜麦酒中风味物质的种类高于高粱酒,以酯类、醇类最为丰富。占成等<sup>[50]</sup>比较不同香型酿造白酒香气成分的差异,结果发现,不同香型白酒特征风味物质有较大差异,其中,酱香型白酒以 3-羟基-2-丁酮、二丙基二硫、糠醛为代表,且与其他香型白酒样品能够明显区分。周容<sup>[51]</sup>以不同年份兼香型白酒为实验原料,通过 GC-IMS 技术探究其风味物质之间的差异,旨在揭示兼香型白酒风味物质形成机制,为白酒品质提升提供理论研究基础。由此可见,通过 GC-IMS 技术对谷物食品加工过程中品质变化情况进行分析,有利于谷物资源的合理开发和产品的品质保证。

表 1 GC-IMS 在谷物产品开发中的应用  
Table 1 Application of GC-IMS in cereal product development

样品	检测技术	化合物种类	研究结果	参考文献
食醋	GC-IMS	杂环类、醛类、醇类、酯类、硫化物	乙酸丁酯可能为好太太牌食醋特征性风味物质,2-正戊基呋喃可能为紫林牌食醋特征性风味成分	[45]
啤酒	GC-IMS	酯类、醇类、醛类、萜类、醚类	3-甲基-1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、乙醇、乙酸乙酯在样品中含量很高	[46]
杂粮馒头	GC-IMS	醛类、酯类、醇类、杂环类	燕麦和意大利杂粮馒头挥发性化合物的种类和浓度差异最大,小米和荞麦杂粮馒头差异最小	[47]
酸乳	GC-IMS	酮类、醛类、酯类、酸类、醇类、呋喃类	市售酸乳与荞麦酸乳风味物质更丰富,自制酸乳风味物质较为单一	[48]
藜麦酒、高粱酒	GC-MS、GC-IMS	酯类、醇类、醛类、酸类、萜烯类、杂环类	GC-MS 和 GC-IMS 检测到相同物质有仲丁醇、正丁醇、异丁醇、异戊醇、乙酸乙酯、辛酸乙酯、戊酸乙酯、乙酸异戊酯、糠醛和乙酸	[49]
不同香型白酒	GC-IMS	酯类、醇类、醛类、酮类、萜稀类、其他类	清香和小曲清香型白酒的特征风味物质有 2-乙基呋喃、甲酸乙酯,酱香型白酒是 3-羟基-2-丁酮、糠醛、二丙基二硫	[50]
兼香型白酒	GC-IMS、电子鼻	吡嗪类、酸类、酯类、含硫化合物、呋喃类、醛类	不同年份兼香型白酒中酯类、酸类、芳香族化合物和吡嗪类总含量随贮藏时间延长而增加,醇类总含量随贮藏时间延长而降低	[51]
酱香型白酒	GC-IMS	醇类、酯类、酮类、酸类、醛类	共鉴别出 53 种成分,通过 GC-IMS 技术和 PCA-CA 数据处理相结合的方法快速实现了 3 组不同贮藏年份白酒的区分	[52]
酱油	GC-IMS	醛类、酮类、酯类、醇类	散装酱油和品牌酱油的风味物质存在明显差异	[53]
石花白酒	GC-IMS	酯类、醛类、酮类、醇类、酸类、呋喃类	样品中生态三香型和浓香型白酒指纹图谱相似	[54]

注:主成分分析-聚类分析(principal component analysis-cluster analysis, PCA-CA)。

### 3 结束语

GC-IMS 技术因无需样品前处理、检测速度快、灵敏度高和稳定性好等优势, 而作为一种新兴技术在食品分析领域迅速发展。同时, 该技术将 GC 和 IMS 结合使用, 有助于提高分辨复杂基质的分离能力。此外, 该技术的检测结果包含大量数据, 分析过程中可适当运用化学计量学手段进行协同处理, 从而提高结论的可靠性、严谨性。谷物食品在日常生活中消费量巨大, 消费者也对于其营养品质和食用安全性提出更高的要求。将 GC-IMS 技术运用于谷物食品的新鲜度检测、品质评价、产品开发等方面具有重要的实践意义, 并取得了显著的成效。未来应扩展 GC-IMS 仪器的化合物数据库, 并联合其他分析检测技术, 为谷物食品附加值提高和产品质量控制提供有力技术保障。

### 参考文献

- [1] GUPTA R, GAUR S. LC-MS investigated as a tool to study the metabolomic characteristics of cereal fermentation [J]. *Appl Food Res*, 2024, 4: 100365.
- [2] PATRA M, BASHIR O, AMIN T. A comprehensive review on functional beverages from cereal grains-characterization of nutraceutical potential, processing technologies and product types [J]. *Heliyon*, 2023, 9: e16804.
- [3] ADEBO O, OYEYINKA S, ADEBIYI J, *et al.* Application of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS)-based metabolomics for the study of fermented cereal and legume foods: A review [J]. *Int J Food Sci Tech*, 2021, 56(4): 1514–1534.
- [4] NIGNPENSE B, FRANCIS N, BLANCHARD C, *et al.* Bioaccessibility and bioactivity of cereal polyphenols: A review [J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1595.
- [5] VAN HP. Phenolic compounds of cereals and their antioxidant capacity [J]. *Crit Rev Food Sci*, 2016, 56(1): 25–35.
- [6] KADIRI O. A review on the status of the phenolic compounds and antioxidant capacity of the flour: Effects of cereal processing [J]. *Int J Food Prop*, 2017, 20(1): S798–S809.
- [7] SAHARAN P, SADH P, DUHAN J. Comparative assessment of effect of fermentation on phenolics, flavanoids and free radical scavenging activity of commonly used cereals [J]. *Biocatal Agric Biotechnol*, 2017, 12: 236–240.
- [8] GARG M, SHARMA A, VATS S, *et al.* Vitamins in cereals: A critical review of content, health effects, processing losses, bioaccessibility, fortification, and biofortification strategies for their improvement [J]. *Front Nutr*, 2021, 8: 586815.
- [9] PAUCAR-MENACHO L, CASTILLO-MARTÍNEZ W, SIMPALO-LOPEZ W, *et al.* Performance of thermoplastic extrusion, germination, fermentation, and hydrolysis techniques on phenolic compounds in cereals and pseudocereals [J]. *Foods*, 2022, 11: 1957.
- [10] 张杨, 集贤, 谷旭东, 等. 气相色谱-离子迁移谱技术(GC-IMS)在食用菌领域的应用前景分析[J]. *中国食用菌*, 2023, 42(6): 1–5, 10.
- [11] ZHANG Y, JI X, GU XD, *et al.* Prospective application of gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) in the field of edible fungi [J]. *Edible Fungi Chin*, 2023, 42(6): 1–5, 10.
- [12] LV Y, BAI X, ZHAO H, *et al.* Flavor characteristics of large yellow croaker soup served with different dried edible fungi [J]. *Food Chem X*, 2024, 21: 101059.
- [13] HOU H, LIU C, LU X, *et al.* Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis: Influence of drying techniques [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2021, 146: 111402.
- [14] 祁兴普, 刘纯友, 倡再勇, 等. 基于风味指纹谱的庐山云雾茶品质等级研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(14): 152–157.
- [15] QI XP, LIU CY, SI ZY, *et al.* Study on quality grading of Lushan cloud-fog tea based on flavor fingerprints [J]. *Food Res Dev*, 2021, 42(14): 152–157.
- [16] LIU N, SHEN S, HUANG L, *et al.* Revelation of volatile contributions in green teas with different aroma types by GC-MS and GC-IMS [J]. *Food Res Int*, 2023, 169: 112845.
- [17] GUO X, SCHWAB W, HO C, *et al.* Characterization of the aroma profiles of oolong tea made from three tea cultivars by both GC-MS and GC-IMS [J]. *Food Chem*, 2022, 376: 131933.
- [18] 巨晓军, 单艳菊, 刘一帆, 等. 基于气相-离子迁移谱技术分析不同生长速度肉鸡肌肉中挥发性有机物的差异[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(3): 170–175.
- [19] JU XJ, SHAN YJ, LIU YF, *et al.* The analysis of volatile organic compounds in broiler muscles with different growth rates based on GC-IMS technology [J]. *Food Ferment Ind*, 2021, 47(3): 170–175.
- [20] LI C, ZOU Y, LIAO G, *et al.* Identification of characteristic flavor compounds and small molecule metabolites during the ripening process of Nuodeng ham by GC-IMS, GC-MS combined with metabolomics [J]. *Food Chem*, 2024, 440: 138188.
- [21] SUN X, YU Y, SALEH A, *et al.* Characterization of aroma profiles of Chinese four most famous traditional red-cooked chickens using GC-MS, GC-IMS, and E-nose [J]. *Food Res Int*, 2023, 173: 113335.
- [22] 申梦娜, 乔海军, 张卫兵, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱的市售酸奶挥发性风味物质差异分析[J]. *食品与发酵工业*, 2022, 48(19): 242–249.
- [23] SHEN MN, QIAO HJ, ZHANG WB, *et al.* Differential analysis of volatile flavor compounds in commercial yogurts by GC-IMS [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(19): 242–249.
- [24] 韩亚平, 苟永桢, 李芬, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法不同地区驴乳粉挥发性风味物质指纹图谱分析[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(23): 155–162.
- [25] HAN YP, GOU YZ, LI F, *et al.* Fingerprint analysis of volatile flavor compounds in donkey milk powder from different regions based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(23): 155–162.
- [26] 龙门, 李旺旺, 方志澳, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法快速鉴别油菜蜜混合洋槐蜜[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(21): 201–209.
- [27] LONG M, LI WW, FANG ZAO, *et al.* Identification of rape honey mixed

- with locust honey based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(21): 201–209.
- [22] 刘振平, 龙道崎, 甘芳瑗, 等. 基于 GC-IMS 技术的油菜花蜂蜜产地溯源模型鉴别[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(8): 379–388.  
LIU ZP, LONG DQ, GAN FY, *et al.* Identification model for rape flower honey geographical origin based on GC-IMS technology [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2023, 23(8): 379–388.
- [23] XI B, ZHANG J, XU X, *et al.* Characterization and metabolism pathway of volatile compounds in walnut oil obtained from various ripening stages via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chem*, 2024, 435: 137547.
- [24] GARRIDO-DELGADO R, DOBAO-PRIETO M, ARCE L, *et al.* Determination of volatile compounds by GC-IMS to assign the quality of virgin olive oil [J]. *Food Chem*, 2015, 187: 572–579.
- [25] WANG S, CHEN H, SUN B. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chem*, 2020, 315: 126158.
- [26] YIN J, WU M, LIN R, *et al.* Application and development trends of gas chromatography-ion mobility spectrometry for traditional Chinese medicine, clinical, food and environmental analysis [J]. *Microchem J*, 2021, 168: 106527.
- [27] PARASTAR H, WELLER P. Towards greener volatilities: Is GC-IMS the new Swiss army knife of gas phase analysis? [J]. *TrAC-Trend Anal Chem*, 2024, 170: 117438.
- [28] CHRISTMANN J, ROHN S, WELLER P. GC-IMS-tools-A new Python package for chemometric analysis of GC-IMS data [J]. *Food Chem*, 2022, 394: 133476.
- [29] SONG H, LIU J. GC-O-MS technique and its applications in food flavor analysis [J]. *Food Res Int*, 2018, 114: 187–198.
- [30] 孙嘉卿, 冯涛, 张灿, 等. 结合 GC-MS 和 GC-IMS 分析不同处理方式下玉米的挥发性风味物质[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(1): 1–9.  
SUN JQ, FENG T, ZHANG C, *et al.* Analysis of volatile flavor compounds in corn under different treatments by GC-MS and GC-IMS [J]. *Sci Technol Cere Oils Food*, 2021, 29(1): 1–9.
- [31] 许诺, 李辉, 杨宏伟. 基于 GC-IMS 技术的高粱米风味分析[J]. *粮油食品科技*, 2021, 29(6): 212–218.  
XU N, LI H, YANG HW. Research on the flavor of sorghum rice based on gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) [J]. *Sci Technol Cere Oils Food*, 2021, 29(6): 212–218.
- [32] 李朋亮, 刘莹莹, 张爱霞, 等. 发芽糙小米挥发性成分的变化规律分析[J]. *食品科技*, 2022, 47(1): 177–183.  
LI PL, LIU YY, ZHANG AIX, *et al.* Variation patterns of the volatiles of the foxtail millet (*Setaria italica*) during germination [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(1): 177–183.
- [33] 孙兴荣, 卞景阳, 刘琳帅, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱技术分析蒸煮前后不同颜色稻米的挥发性化合物[J]. *食品科学*, 2023, 44(10): 332–340.  
SUN XR, BIAN JY, LIU LS, *et al.* Characterization of volatile compounds in different colored rices before and after cooking by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Sci*, 2023, 44(10): 332–340.
- [34] XU Y, YAO L, WANG Y, *et al.* Comparative analysis of the aromatic profiles of *Citri sarcodactylis fructus* from various geographical regions using GC-IMS, GC-MS, and sensory evaluation [J]. *Food Biosci*, 2024, 1: 103752.
- [35] SONG Y, GUO T, LIU S, *et al.* Identification of *Polygonati rhizoma* in three species and from different producing areas of each species using HS-GC-IMS [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2022, 172: 114142.
- [36] 卞景阳, 孙兴荣, 刘琳帅, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱的不同品种香稻米挥发性有机物指纹图谱分析[J]. *中国粮油学报*, 2023, 38(6): 133–140.  
BIAN JY, SUN XR, LIU LS, *et al.* Analysis of volatile organic compounds fingerprint in different varieties of fragrant rice based on gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2023, 38(6): 133–140.
- [37] 王济世. 我国东北稻米产品溯源技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.  
WANG JS. The traceability technologies on products of rice in northeast China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2018.
- [38] 闫文芝, 杨蕾, 刘静. 内蒙古河套地区小麦粉风味物质 GC-IMS 分析[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(24): 151–157.  
YAN WZ, YANG L, LIU J. Wheat flour in Hetao region of Inner Mongolia: Analysis of flavor substances by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2022, 38(24): 151–157.
- [39] AMIRAHMADI M, SHOEIBI S, RASTEGAR H, *et al.* Simultaneous analysis of mycotoxins in corn flour using LC/MS-MS combined with a modified QuEChERS procedure [J]. *Toxin Rev*, 2018, 37(3): 187–195.
- [40] LI H, KANG X, WANG S, *et al.* Early detection and monitoring for *Aspergillus flavus* contamination in maize kernels [J]. *Food Control*, 2021, 121: 107636.
- [41] 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(9): 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 Chin Cere Oils Ass*, 2019, 34(9): 118–124.
- [42] 秦瑶, 廉飞宇, 潘泉, 等. 霉变小麦气相色谱-离子迁移谱的宽度学习检测模型[J]. *控制理论与应用*, 2023, 40(9): 1585–1594.  
QIN Y, LIAN FY, PAN Q, *et al.* A broad learning detection model on gas chromatography-ion migration spectrum of mildew wheat [J]. *Control Theory Appl*, 2023, 40(9): 1585–1594.
- [43] 赵卿宇, 郭辉, 陈博睿, 等. 大米储藏过程品质变化及其动力学[J]. *食品科学*, 2020, 41(21): 204–212.  
ZHAO QY, GUO H, CHEN BR, *et al.* Kinetics of quality change of rice during storage [J]. *Food Sci*, 2020, 41(21): 204–212.
- [44] 王熠瑶, 张燕彦, 孙俊, 等. 基于 GC-IMS 技术分析糙米储藏过程中风味物质变化[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 250–255.  
WANG YY, ZHANG ZY, 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(6): 250–255.
- [45] 杨晓璇, 李阳, 马宁, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱法分析食醋中挥发性风味物质[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(4): 213–221.
- YANG XX, LI Y, MA N, *et al.* Analysis of volatile flavor substances in vinegar based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(4): 213–221.
- [46] 李凤林, 向思敏, 李静, 等. 基于顶空-气相色谱-离子迁移谱法分析不同类型精酿啤酒的挥发性香气成分[J]. *食品安全质量检测学报*, 2023, 14(7): 305–314.
- LI FL, XIANG SM, LI J, *et al.* Analysis of volatile aroma components in different types of craft beer based on headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(7): 305–314.
- [47] 张佳丽, 张爱霞, 李朋亮, 等. 基于 GC-IMS 分析不同杂粮馒头挥发性成分的差异[J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(9): 270–279.
- ZHANG JL, ZHANG AIX, LI PL, *et al.* Analysis of volatile components in steamed bread of different coarse cereals on GC-IMS [J]. *J Chin Cere Oils Ass*, 2022, 37(9): 270–279.
- [48] 闫瑞宇, 张锦锦, 陈孟涵, 等. 基于 GC-IMS 技术分析荞麦益生菌发酵乳的风味物质[J]. *食品科技*, 2022, 47(4): 303–309.
- YAN RY, ZHANG JJ, CHEN MH, *et al.* Analysis of flavor compounds in buckwheat probiotic fermented milk based on GC-IMS [J]. *Food Sci Technol*, 2022, 47(4): 303–309.
- [49] 陈虎, 锁然, 刘亚琼, 等. GC-MS 和 GC-IMS 分析藜麦酒的特征挥发性风味成分[J]. *中国食品学报*, 2023, 23(12): 268–280.
- CHEN H, SUO R, LIU YQ, *et al.* Analysis of the characteristic volatile flavor components of quinoa wine by GC-MS and GC-IMS [J]. *J Chin Inst Food Sci Technol*, 2023, 23(12): 268–280.
- [50] 占成, 尹怀宁, 徐洋辉, 等. 基于 GC-IMS 技术分析不同香型白酒挥发性成分差异[J]. *中国酿造*, 2023, 42(3): 241–245.
- ZHAN C, YIN HN, XU YH, *et al.* Differences in volatile components of Baijiu with different flavor types analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *China Brew*, 2023, 42(3): 241–245.
- [51] 周容. 不同年份兼香型白酒的检测及香味成分的研究[D]. 武汉: 湖北工业大学, 2021.
- ZHOU R. Detection of Nong-jiang flavor liquors of different years and study of their aroma compounds [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2021.
- [52] 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*, 2021, 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*, 2021, 42(14): 226–232.
- [53] 杨晓璇, 李阳, 马宁, 等. 酱油中挥发性风味物质的气相色谱-离子迁移谱分析[J]. *中国酿造*, 2021, 40(3): 149–154.
- YANG XX, LI Y, MA N, *et al.* Determination of volatile flavor substances in soy sauce based on gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *China Brew*, 2021, 40(3): 149–154.
- [54] 李欢欢, 余丽娜, 雷婷, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱分析石花白酒风味特征[J]. *中国酿造*, 2023, 42(2): 240–244.
- LI HH, YU LN, LEI T, *et al.* Flavor characteristic of Shihua Baijiu by gas chromatography-ion migration spectrometry [J]. *China Brew*, 2023, 42(2): 240–244.
- [55] VERNI M, RIZZELLO C, CODA R. Fermentation biotechnology applied to cereal industry by-products: Nutritional and functional insights [J]. *Front Nutr*, 2019, 6: 42.
- [56] TSAFRAKIDOU P, MICHAELIDOU A, BILIADERIS C. Fermented cereal-based products: Nutritional aspects, possible impact on gut microbiota and health implications [J]. *Foods*, 2020, 9(6): 734.

(责任编辑: 于梦娇 郑 丽)

## 作者简介

胡航伟, 硕士, 主要研究方向为食品风味化学、农产品精深加工。  
E-mail: 2392133865@qq.com

游新侠, 硕士, 副教授, 主要研究方向为植物基发酵食品开发。  
E-mail: youxin\_8301@126.com

刘云国, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品精深加工及贮藏保鲜。  
E-mail: yguoliu@163.com