

离子迁移谱技术及其在食品检测中的应用

葛含光^{1,2*}, 张民¹, 崔颖², 关淳², 许泓², 王永芳²

(1. 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457;

2. 天津出入境检验检疫局动植物与食品检测中心, 天津 300461)

摘要: 离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)技术是一种基于气相中不同离子在电场中迁移速度差异的微量化学物质分析技术。由于其具有原理简单、设备轻便、灵敏度高、选择性强、检测过程快速高效等特点,近年来在危险品检测、食品检测、生物医药分析及环境监测等领域得到了广泛引用。本文对IMS技术的原理和仪器的基本构造进行了简要介绍,并对IMS技术的发展历程进行了梳理概括,着重阐述了国内外IMS技术在食品检测方面的应用进展,对IMS技术在食品贮藏过程监测、加工过程控制、有害物质检测以及风味物质分析等领域的最新研究成果进行了归纳总结。同时通过与常规检测手段的对比,对IMS技术在食品生产质量控制、原材料真伪鉴别和食品原产地鉴定等方面的应用前景作出了展望。

关键词: 离子迁移谱; 食品检测; 痕量检测; 风险筛查; 风味物质分析

Ion mobility spectrometry and its application in food test

GE Han-Guang^{1,2*}, ZHANG Min¹, CUI Ying², GUAN Chun², XU Hong², WANG Yong-Fang²

(1. College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China;

2. Animal, Plant and Foodstuffs Inspection Center, Tianjin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Tianjin 300461, China)

ABSTRACT: Ion mobility spectrometry (IMS) is a method for characterizing chemical substances on the basis of velocity of gas-phase ions in an electric field. After decades of development, IMS has been widely used in the detection of explosives, drugs and dangerous chemicals and becomes an important technique in global counter-terrorism for its high performance in speed, sensitivity and selectivity. In recent years, IMS gains significant progress in application in other fields such as food industry, bio-pharmaceuticals and environmental monitoring. This paper introduced the basic principles of IMS technique and the main components of IMS equipment. With a review of the technique history, this article focused on the application of IMS in food test, including the quality control in food industry, process monitoring during the storage of agricultural or livestock products and characteristic analysis of flavor food. The compatibility with other detecting approaches enabled IMS a broader development in risk control, fraud authentication and origin identification in food industry.

KEY WORDS: ion mobility spectrometry; food test; trace detection; risk screening; flavor compounds analysis

基金项目: 国家质检总局科技计划项目(2014IK222)

Fund: Supported by the Scientific and Technological Project of the General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China (2014IK222)

*通讯作者: 葛含光, 助理工程师, 主要研究方向为食品安全检测和风味物质分析。E-mail: gehg@tjciq.gov.cn

*Corresponding author: GE Han-Guang, Assistant Engineer, Animal, Plant and Foodstuffs Inspection Center, Tianjin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Tianjin 300461, China. E-mail: gehg@tjciq.gov.cn

1 引言

离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)技术是20世纪60年代末70年代初发展起来的一种化学物质分析技术,早期也称为等离子色谱^[1]。IMS是基于气相中不同离子在电场中迁移速度的差异来对化学离子物质进行表征的一种分析技术,早期主要应用于爆炸物、毒品和化学战剂的检测分析。IMS技术的工作原理和质谱(mass spectrometry, MS)技术有相似之处,但IMS技术的原理和方法更简单,易于制成体积小、可靠性高、成本低廉的便携式设备,适合现场和特殊环境快速检测分析,因此欧美很多国家主流的防化侦察^[2]、应急反恐^[3,4]和缉毒装备^[5]都是基于IMS原理制造的仪器。

近年来,随着IMS商业化仪器性能的不断改善,IMS技术在食品检测、药物分析、临床诊断、石油化工、环境监测等诸多领域的应用也取得了长足的发展。特别是其检测速度快、灵敏度高的特点,使IMS技术在食品中有害物质残留检测,风味物质分析,真伪鉴定,食品加工贮藏过程质量控制等方面的应用前景备受关注。

2 IMS原理

IMS技术的基本原理是根据离子在环境气压下通过电场(E)中的气体时迁移速率(V)的不同进行分离:样品气体(或蒸汽)在漂移管内被离子化,离子在电场作用下通过离子栅门进入漂移区,并继续在电场作用下经过漂移区最终到达检测器(法拉第接收盘)。气体分子离子化的过程分为正离子模式(图1)和负离子模式,无论哪种离子化形式,也无论采取何种离子化方法,离子迁移速率的测量都是IMS的核心内容。

离子的迁移速率 V_d 与电场强度 E 和离子的迁移率系数 K 成正比: $V_d=KE$ 。不同物质离子化后迁移速率不同,则通过漂移管反应区的时间也不同,因此可以根据离子漂移时间 T_d 对物质进行分离定性。在一定的电场条件下,离子迁移速率 V_d 取决于离子迁移率系数。离子迁移率系数 K 的影响因素较多,与离子的质量、电荷数、大小、形状相关。在弱电场中,离子迁移率系数与离子性质之间的关系可以用Mason-Schamp方程表示:

$$K = \frac{3Ze(2\pi)^{1/2}(1+\alpha)}{16N(\mu k T_{\text{eff}})^{1/2} \Omega_D(T_{\text{eff}})}$$

式中: Ze ——离子携带的全部电荷的电量;

α ——校正因子;

N ——迁移气体的分子数密度;

μ ——离子和迁移分子的约化质量;

k ——Boltzmann常数;

T_{eff} ——离子的有效温度;

Ω_D ——迁移气中离子的有效碰撞截面。

从Mason-Schamp方程可以看出,离子迁移率系数 K 主要取决于离子的结构和碰撞截面。为了便于比较,通常将 K 值换算成273 K和760 mmHg条件下的约化迁移率 K_0 :

$$K_0 = K(273/T)(P/760)$$

式中: T ——迁移温度;

P ——环境大气压。

约化迁移率把迁移率对环境因素进行了归一化,在平稳的弱电场中,迁移率变化只与气压和温度有关^[6]。这为IMS商业化仪器的可操控性提供了理论基础。

3 IMS技术的发展

3.1 电离源

在IMS分析中,产物离子的分离和检测是在气相离子中进行的,电离过程在样品进入漂移管的同时就已经开始。由于放射源具有构造简单、稳定性高的特点,目前大多数商品化IMS设备均以放射源作为电离源,其中以镍(^{63}Ni)电离源使用最为普遍。 ^{63}Ni 源长期工作性能良好,在气相色谱的电子捕获检测器中也被广泛应用。

除 ^{63}Ni 以外,其他放射源,如放射 α 射线的镅(^{241}Am)源和放射 β 射线的氚(^3H)源也在IMS漂移管中有所使用^[7]。 ^{241}Am 放出的 α 粒子能量很高,大于5.4 MeV,且在空气中的有效作用距离较短,电离源的有效电离体积很小^[8]。T源产生的有害辐射比 ^{63}Ni 源小,因此常被用于痕量物质的IMS检测分析^[9]。

近年来,伴随着其他分析技术的发展,非放射型电离源在IMS中的使用也愈发普遍,如电晕放电(corona discharge, CD)电离源、表面电离(surface ionization)源等。光致电离(photoionization)源是迄今使用最为广泛的非放射型电离源之一,其原理是光放电管中填充的气体在高电压作用下受激发释放出光子,气体分子与光子直接作用形成正离子。Baumbach等^[10]使用紫外(ultraviolet, UV)电离源的IMS对甲基叔丁基醚、苯、甲苯和间二甲苯等汽油成分进行分析,并与传统放射源IMS方法作了对比。使用多毛细管分离柱(multicapillary columns, MCCs)的UV-IMS检测灵敏度逊于 ^{63}Ni 源的传统型IMS。李虎等^[11]利用自行研制的真空紫外光电离源对11种挥发性有机物同分异构体进行分析,实现了同分异构体在IMS中的分离。栗大超等^[12]通过实验证实了脉冲电晕放电(pulse corona discharge)作为IMS电离源的可行性,极大简化了离子迁移谱仪结构,为商业设备的微型化提供了一种思路。周庆华等^[13]研制的全自动阵列离子迁移谱仪并联组合了 ^{63}Ni 和紫外光电离源,实现了正负离子的同时检测,配备以全自动采样进样系统,可以连续监测空气中的挥发性有机化合物。

20世纪80年代以来,电喷雾电离(electrospray ionization, ESI)、基质辅助激光解析电离(matrix-assisted laser desorption/

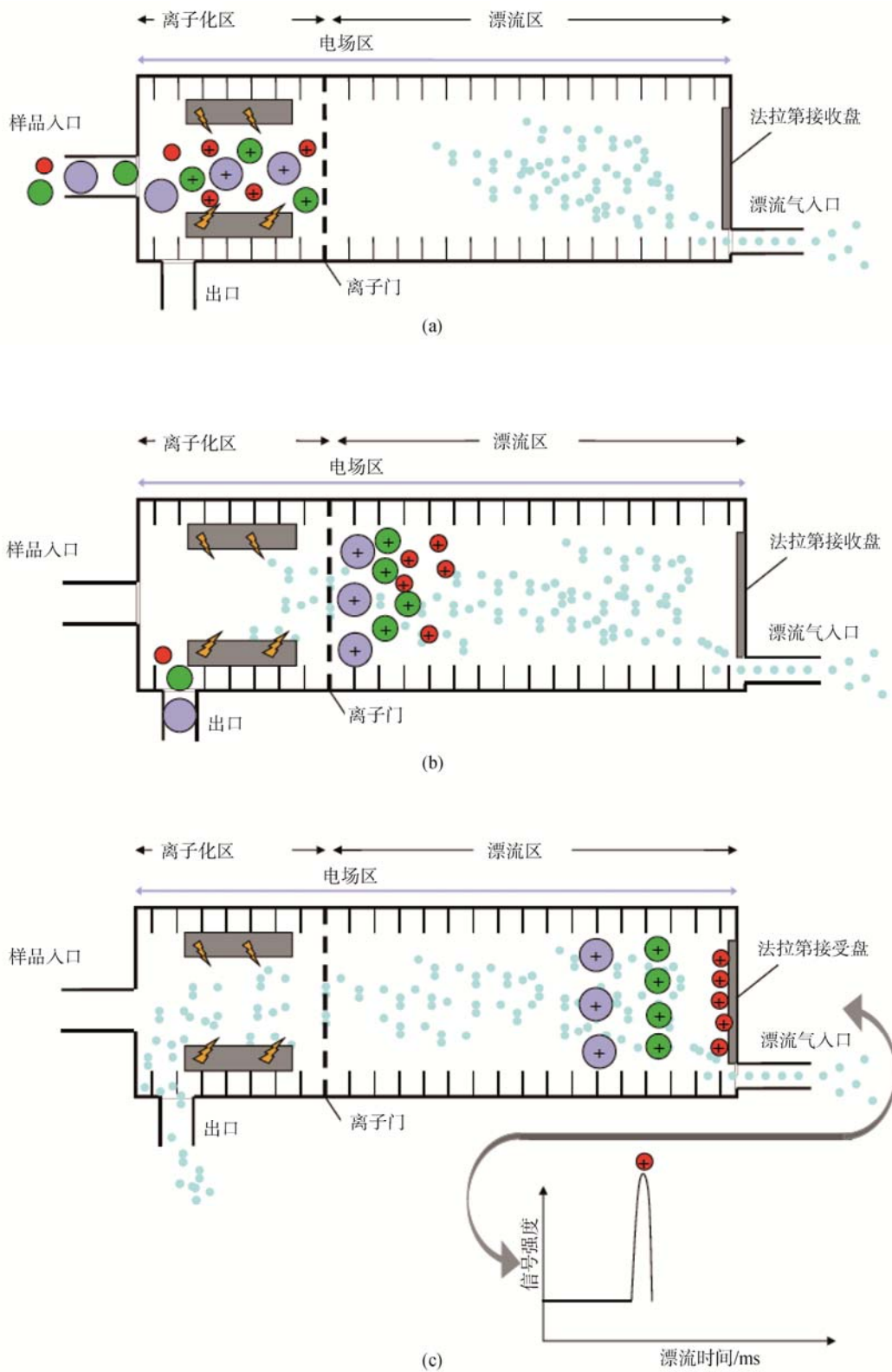


图 1 IMS 原理示意图(正离子模式)

Fig. 1 Schematic representation of drift tube for IMS (positive ion mode)

ionization, MALDI)等“软电离”技术的出现使质谱检测技术在生物大分子分析领域取得了突破。而随着IMS与质谱联用技术的探索,这些电离方法也很快被引入到IMS分析中。使用ESI源可以将液体样品直接引入漂移管,而且电离过程柔和,能够使整体分子信息得以保存。但由于液体样品的残余和吸附会造成输送系统中较大的记忆效应,因此使用ESI源进行多次采样,中间需要较长的冲洗时间。MALDI是将强激光脉冲直接照射在样品上,使固体样品在IMS漂移管内直接解吸、气化和电离。有报道利用MALDI生成低聚糖母体钠化离子和舒缓激肽的阳离子在IMS串联质谱(MS)或飞行时间质谱(TOFMS)的研究^[14,15],但由于MALDI只适用于某些特定类型的固体化合物,而且激光器构造复杂、价格昂贵,所以MALDI源至今并未被主流IMS设备生产商所采用。

3.2 漂移管

漂移管是IMS分析仪中最关键的部件,几乎全部的离子化学反应都在该反应区内完成。传统的线性电场漂移管是最基本的IMS漂移管。如图1所示,管内的反应区(离子化区)和漂移区(漂流区)被离子栅门隔开,离子栅门的作用是将反应区生成的离子分批注入漂移区。迁移率系数不同的离子在恒定电场作用下从离子栅门漂移到检测器(法拉第盘),产生不同的漂移时间。传统的线性电场漂移管由堆叠的陶瓷绝缘体和填充蓝宝石绝缘体的系列金属环组成,制造工艺精密复杂,价格昂贵。近些年,新型材料的出现使线性电场漂移管的制造工艺得以改进,如使用导电玻璃管取代陶瓷绝缘体和金属管制作漂移室的技术已经申请了专利^[16]。

传统的IMS是在大气压和100 V/cm~300 V/cm的低电场条件下,一种离子的迁移率系数 K_0 可以认为是常数。而当电场强度 E 增大到超过线性电场漂移管通常使用的值时,离子的迁移率系数就会变得与电场相关。基于这一原理的仪器和方法,有不同的名称,如微分迁移谱(differential mobility spectrometry, DMS)、场离子谱(field ion spectrometry, FIS)、不对称场离子迁移谱(field asymmetric ion mobility spectrometry, FAIMS)、射频离子迁移谱(radio-frequency ion mobility spectrometry, RFIMS)等。在这种漂移管中,离子从电离源被气流携带进入施加电场的反应区。电场方向通常与气流方向垂直,使气流中的离子在电极之间沿横跨气流方向振荡。漂移管通过向电极施加小幅直流电压(补偿电压)以避免离子与电极发生碰撞,并使之通过分析器到达检测器。在这一漂流过程中,通过对补偿电压进行连续扫描即可得到离子的微分迁移谱。和传统的IMS不同,DMS漂移管中没有离子栅门,其中的离子是持续不断进入分析器的。DMS或FAIMS的漂移管通常有平板型、圆柱型等结构^[17-19]。近年来采用微电子加工技术制造漂移管不断取得突破^[20],DMS漂移管体积不断缩小,这

使离子滞留时间变得很短,从而推动了IMS和毛细管色谱(capillary chromatography)联用技术的发展^[21,22]。

4 IMS在食品检测方面的应用

4.1 食品贮藏过程监测

IMS技术因其快速、高灵敏度和较好的选择性等特点,在食品生产质量控制和食品安全风险评估等领域的应用正在不断扩大。

通过对食品微生物代谢物的检测,来确定食品新鲜度,进而分析食品贮藏环境适宜程度,是IMS技术应用于食品贮藏加工过程的早期试验。Karpas等^[23]通过IMS检测畜肉、禽肉和鱼肉中挥发性生物胺,绘制了作为肉制品腐败程度指针物质的生物胺与贮藏温度和时间的关系图。

挥发性盐基氮(TVB-N)指动物性食品由于酶和细菌的作用,在腐败过程中蛋白质分解而产生的氨以及胺类等碱性含氮物质。食品中TVB-N的含量越高,表明氨基酸,特别是蛋氨酸和酪氨酸,被破坏的越多。因此,TVB-N常被作为检验动物源性食品腐败程度的重要指标。目前通用的TVB-N检测方法是指示剂滴定法,需要的试剂超过5种,取样量不少于10 g,步骤繁琐,单一样品检测耗时不少于1 h。而利用一台配备了顶空进样方式的UV-IMS对固体样品进行TVB-N检测,样品量仅需0.05 g,检测时长不超过10 min,而且检测灵敏度高,检测限可达0.2 mg/kg,重复性良好^[24]。

4.2 食品加工过程控制

利用IMS对微生物代谢物检测作为菌种鉴定和菌群生长调控的辅助手段,已经广泛用于啤酒酿造和奶酪生产等食品工业领域。在啤酒酿造过程中,麦汁发酵会产生一种具有浓烈“黄油味”的副产物丁二酮。在发酵过程中,丁二酮会被酵母吸收并酶解为2,3-丁二醇。丁二酮可以为啤酒提供特殊的润滑口感,在啤酒中的味觉阈值大约为100 $\mu\text{g/L}$,但过多的丁二酮也会破坏啤酒的风味,因此啤酒中丁二酮的浓度是确定发酵反应终止的关键参数。另外,除了正常的麦汁发酵过程外,微生物污染和非酶氧化作用同样可以产生丁二酮。所以在啤酒酿造工业中,将丁二酮和2,3-戊二酮的浓度比作为判断麦汁是否发生微生物污染的重要控制指标。Vautz等^[25]应用气相色谱(gas chromatography, GC)串联UV-IMS实现了对啤酒发酵过程的实时监测,并绘制出麦汁中丁二酮和2,3-戊二酮浓度的动态变化曲线。

葡萄酒酿造工业中的“木塞味”问题是困扰了从业者长达百年的难题。所谓的“木塞味”源自软木塞中的氯酚在霉菌作用下产生的2,4,6-三氯苯甲醚(TCA)。目前,软木塞的TCA污染仍无根治的方法,每年全球大约有2%~5%的葡萄酒会受到TCA污染^[26]。现行常用的TCA检测方法主

要是固相微萃取(solid-phase microextraction, SPME)或顶空进样配合 GC 或 GC-MS 检测, 检测限在 1~100 ng/L^[27]。而利用离子化液体微萃取技术, 配合毛细管色谱柱分离, 并使用 UV-IMS 检测, 仅需 2 mL 试样, TCA 检测限可达 0.01 ng/L^[28]。

4.3 食品中有害物质检测

近 20 年来, 伴随着质谱技术的发展, IMS 技术也被愈发广泛地应用于食品中农药和兽药残留的检测。和质谱技术相比, IMS 技术具有快速高效、样品无需复杂前处理直接进样、在大气压环境下检测、无真空度要求等优势。Jafari 等^[29]利用 CD-IMS 对经固相萃取净化的禽肉样品中的喹啉酮、氯霉素和恩诺沙星 3 种兽药进行定量检测, 检测限可低至 20 µg/kg。王建凤等^[30]采用传统 ⁶³Ni 电离源的便携式 IMS 检测圣女果表面的有机磷农药残留, 单一样品检测时间小于 10 s, 敌敌畏和马拉硫磷的检测限分别为 1 ng 和 5 ng, 在实验条件下, 对模拟添加样品的检测结果能够满足国标对敌敌畏和马拉硫磷的最高残留检测限量要求。我国的 IMS 商业仪器生产企业已经研制出用于快速检测动物活体中“瘦肉精”成分的 IMS 仪器, 该仪器通过测定约化离子迁移率, 可以对动物毛发、尿液和饲料中的盐酸克伦特罗、莱克多巴胺、沙丁胺醇、特布他林等 β-受体激动剂进行定性分析^[31]。

2008 年我国发生了乳制品“三聚氰胺”事件, 2011 年我国台湾地区和内地先后爆出了食品和白酒中检出“塑化剂”事件。一系列的食品安全事件不但使舆论对食品工业生产状况倍加关注, 也对食品中违法添加物和有害污染物的检测技术提出了更高的要求。彭丽英等^[32]利用自主研制的 ⁶³Ni 电离源 IMS 对白酒中 5 种典型的邻苯二甲酸酯进行分析检测, 检出限为 0.02~0.44 mg/L, 单个样品分析周期小于 95 s。窦怀志等^[33]利用微木智能系统的 FAIMS 检测芯片, 采用顶空进样装置采样分析白酒中的 DEHP(邻苯二甲酸二(2-乙基)己酯)和 DINP(邻苯二甲酸二异壬酯), 并和 GC-MS 方法进行了比较。在 1.0~15.0 mg/kg 的添加范围内, FAIMS 检测结果与 GC-MS 方法相当, 但线性关系较低, 检测灵敏度低于质谱法。类似的技术路线还尝试用于乳制品中三聚氰胺的检测^[34]。以当前检测能力而言, 相比于灵敏度较高但前处理过程复杂, 更适于实验室环境的质谱检测方法, IMS 技术作为一种现场快速检测方法, 更适于在食品生产加工和市场监管过程中作为污染物筛查的工具进行推广。但随着 IMS 技术理论的不断革新以及仪器分析能力的持续进步, 尤其是与色谱、质谱等其他检测技术联用的深入拓展, IMS 设备在有害物质痕量检测方面的前景仍然值得期待。

4.4 食品风味物质分析

早期 IMS 主要用于检验普通爆炸物、毒品和化学战

剂, 因为 IMS 仪器对高电负性(EN)或高质子亲和力(PA)的化合物具有很高的响应灵敏度。爆炸物分子中由于含有硝基所以具有很强的电负性^[35]; 一些毒品分子中含有氨基而具有极强的质子亲和力; 而大部分的化学战剂分子是一些具有很强质子亲和力的有机磷衍生物或高电负性的含卤素化合物。很多食品中的挥发性风味物质也具有相似的电化学结构, 这就为采用 IMS 技术分析食品风味物质提供了坚实的理论基础。

食品风味物质的种类繁多, 成分复杂, 其中有很多具有高电负性或强质子亲和力官能团结构的物质, 如氨基、巯基、卤素基团以及含不饱和键结构的醛、酮、醚等有机化合物和芳香族化合物。在 Garrido-Delgado 等^[36]的研究中, 使用气-液分离器配合 UV-IMS 分析 4 种白葡萄酒中的醛、酯、醇等十余种挥发性有机化合物, 利用统计分析软件对实验数据进行主成分分析(PCA), 并对样本进行分类, 再使用 GC-FID 手段检测相同的试验样本对化合物进行定性验证, 结果显示所有的白葡萄酒样品均分类正确。

由于分析对象都是气体分子, 而且对测试环境(如真空度)没有特殊要求, IMS 和 GC 联用相比于其他检测手段更为便捷。将 IMS 作为 GC 的检测器, 兼顾了 GC 的高分离能力和 IMS 的高选择性和高灵敏度, 有利于实现复杂混合物的实时在线监测。程沙沙^[37]等采用毛细管气相色谱仪串联 ⁶³Ni 电离源 IMS 检测 4 种卤代烃化合物, 检出限达到 0.2~2.0 ng。IMS 和 GC 联用的二维分析能力可以为复杂混合物的准确性分析提供更为丰富和准确的信息(图 2 和图 3)。通过后期数据统计分析, 还能够实现同一基质中不同化合物的选择性检测分析。

在 Garrido-Delgado 等^[38]的另一项研究中, 以 3 种不同等级的橄榄油为对象, 使用 UV-IMS 和 GC-IMS 分别对样本进行检测, 根据特征风味物质的含量对样本进行分类。结果显示, UV-IMS 的分类验证准确率为 86.1%, 而 GC-IMS 为 100%。在这一试验中, UV-IMS 分析 3 种橄榄油的理想分离温度为 150 °C, 而 GC 良好的分离能力使得 GC-IMS 在 60 °C 即可实现 3 种橄榄油样本的良好分离。为了弥补 GC 分析柱分离时间较长的缺陷, 该研究应用了高容量的多毛细管分离柱(MCCs, 图 4)。MCCs 的使用大大提高了 GC-IMS 的分析速度, 可以在数分钟内实现挥发性有机化合物的分离^[39-41]。

检测速度和温度对于食品中挥发性风味物质分析的准确性至关重要。因为很多呈味物质在食品中的含量极低, 而且化学性质不稳定, 过长的分离时间和高于常温的检测温度都容易导致目标化合物结构发生变化进而无法检出。GC 等传统方法通常需要对样品进行加热而且时间较长, GC-MS 方法虽然灵敏度和精确度较高, 但由于需要真空环境, 因此容易造成一些性质不稳定的目标化合物难以检出。相比之下, IMS 在检测速度、灵敏度和选择性方面兼容

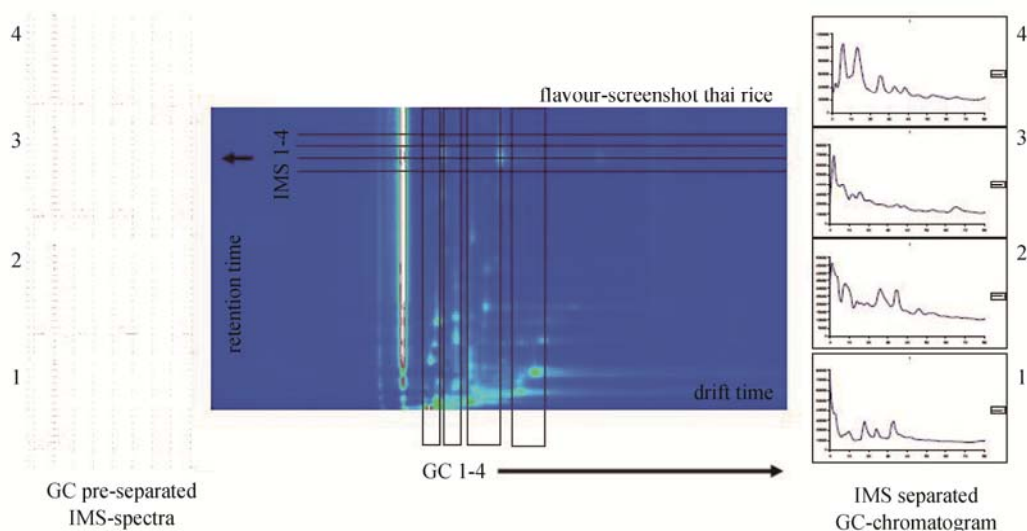


图2 GC-IMS 联用检测泰国大米中风味物质的二维图谱

Fig. 2 2D flavour screenshot of Thai rice based on GC-IMS analysis

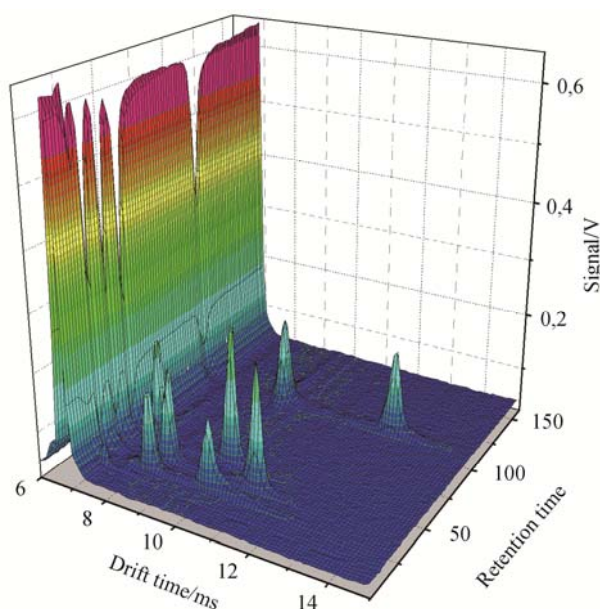


图3 基于 GC-IMS 分析生成的三维图谱

Fig. 3 3D spectrum based on GC-IMS analysis

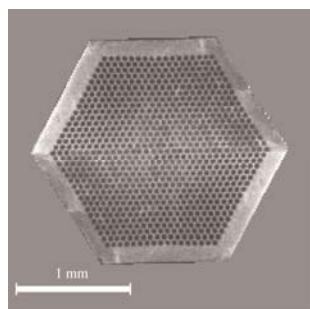


图4 多毛细管分离柱 (MCCs) 截面图

Fig. 4 Cross Section View of MCCs

程度较好, 因此逐渐成为食品真伪鉴别、原产地验证、原料分析等领域的一门利器。

5 结语

目前大多数食品检测技术都需要复杂的前处理过程, 耗时较长, 使得食品检测机构难以应对日趋繁重的检测任务。食品安全和质量控制并非一家之责, 从生产到物流、销售每个环节都需要进行必要的监控。但当前很多食品检测手段对仪器设备和检测环境的要求较高, 难以在生产流通环节推广, 极大地影响了食品质量控制水平。和传统检测技术相比, IMS 技术具有检测周期短, 灵敏度高, 对环境和样品要求低等优势, 而且设备体积小, 便于携带, 能够和多种传统检测手段结合, 适于进行现场快速检测和大批量样品的风险筛查。IMS 对挥发性有机化合物的高灵敏度和高选择性, 使其在食品加工过程控制、贮藏条件控制、真伪鉴定和产地鉴别等方面拥有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] Eiceman GA, Karpas Z. Ion mobility spectrometry [M]. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- [2] 王学峰, 叶伟, 彭凤武. 离子迁移谱技术在化学战剂侦检中的应用[J]. 化学分析计量, 2007, 16(4): 76-79.
Wang XF, YE W, Peng FW. Ion mobility spectrometry and its application in the detection of chemical warfare agents [J]. Chem Anal Met, 2007, 16(4): 76-79.
- [3] 袁曦, 郑健, 施亮, 等. 用于现场痕量检测的 IMS 爆炸物探测仪研究[J]. 核技术, 2006, 29(7): 544-547.
Yuan X, Zheng J, Shi L, *et al.* The study of field IMS analyzer applied to explosive detection [J]. Nucl Sci Tech, 2006, 29(7): 544-547.
- [4] 疏天民, 袁曦, 成云飞, 等. 离子迁移谱技术及其化学校准物概述[J]. 化学试剂, 2011, 33(2): 129-132.

- Shu TM, Yuan Xi, Cheng YF, *et al.* Technique of ion mobility spectrometry and summary of its chemical calibrants [J]. *Chem Reag*, 2011, 33(2): 129–132.
- [5] 吕勇杰, 朱学梅, 郑健, 等. 应用离子迁移谱仪技术快速检测毒品的研究[J]. *核技术*, 2007, 30(10): 818–822.
- Lü YJ, Zhu XM, Zheng J, *et al.* Application of ion mobility spectrometry for rapid drug detection [J]. *Nucl Sci Tech*, 2011, 33(2): 129–132.
- [6] 朱弘. 离子迁移谱探测仪技术的研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2006, 3: 65–67.
- Zhu H. The study on technology of ion mobility spectrometry explorer [J]. *Auto Instrum*, 2006, 3: 65–67.
- [7] Yun CM, Otani Y, Emi H. Development of unipolar ion generator-separation of ions in axial direction of flow [J]. *Aerosol Sci Technol*, 1997, 26: 389–397.
- [8] Paakanen H. About the applications of IMCELLTM MGD-1 detector [J]. *Int J Ion Mobility Spectrom*, 2001, 4: 136–139.
- [9] Leonhardt JW. New detectors in environmental monitoring using tritium sources [J]. *Rad Nucl Chem*, 1996, 206(2): 333–339.
- [10] Baumbach JI, Sielemann S, Xie Z, *et al.* Detection of the gasoline components methyl tert-butyl ether, benzene, toluene, and *m*-xylene using ion mobility spectrometers with a radioactive and UV ionization source [J]. *Anal Chem*, 2003, 75: 1483–1490.
- [11] 李虎, 牛文琪, 王鸿梅, 等. 挥发性有机物同分异构体光电离-离子迁移谱检测研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(1): 29–32.
- Li H, Niu WQ, Wang HM, *et al.* Photoionization ion mobility spectrometry (UV-IMS) for the isomeric volatile organic compounds [J]. *Spect Spect Anal*, 2012, 32(1): 29–32.
- [12] 栗大超, 李国卿, 檀景辉, 等. 采用脉冲电晕放电离子源的离子迁移谱仪[J]. *光学 精密工程*, 2013, 21(12): 3095–3101.
- Li DC, Li GQ, Tan JH, *et al.* Ion mobility spectrometer using pulse corona discharge ion source [J]. *Optic Precis Eng*, 2013, 21(12): 3095–3101.
- [13] 周庆华, 仓怀文, 鞠帮玉, 等. 全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物[J]. *环境科学*, 2011, 32(12): 3623–3627.
- Zhou QH, Cang HW, Ju BY, *et al.* Automatic continuous monitoring of volatile organic compounds using ion mobility spectrometer array [J]. *Environ Sci*, 2011, 32(12): 3623–3627.
- [14] Lee S, Wyttenbach T, Bowers MT. Gas-phase structures of sodiated oligosaccharides by ion mobility ion chromatography methods [J] *Int J Mass Spectrom*, 1997, 167: 605–614.
- [15] Koomen JM, Ruotolo BT, Gillig KJ, *et al.* Oligonucleotide analysis with MALDI-ion-mobility-TOFMS [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2002, 373: 612–617.
- [16] Laprade B [P]. Patent Number: US 7081618 B2, 2006.
- [17] 陶羽宇, 李灵锋, 李鑫, 等. 用高场非对称波形离子迁移谱技术快速检测二乙醇胺[J]. *高等学校化学学报*, 2013, 34(11): 2499–2504.
- Tao YY, Li LF, Li X, *et al.* Rapid determination of diethanolamine by field asymmetric ion mobility spectrometry (FAIMS) technique [J]. *Chem J Chin U*, 2013, 34(11): 2499–2504.
- [18] 唐飞, 王晓浩, 张亮. 用于高场非对称波形离子迁移谱系统的阵列式微法拉第筒离子检测器[J]. *光学 精密工程*, 2010, 18(12): 2597–2602.
- Tang F, Wang XH, Zhang L. Array micro faraday cup ion current detector for FAIMS [J]. *Optic Precis Eng*, 2010, 18(12): 2597–2602.
- [19] 韩丰磊, 赵琨, 王卫国, 等. 圆柱型高场非对称波形离子迁移谱的数值模拟和实验研究[J]. *现代科学仪器*, 2012, 2(4): 19–23.
- Han FL, Zhao K, Wang WG, *et al.* Simulation and design of cylindrical high-field asymmetric waveform ion mobility spectrometry [J]. *Mod Sci Instrum*, 2012, 2(4): 19–23.
- [20] Miller RA, Eiceman GA, Nazarov EG, *et al.* A novel micro-machined high field asymmetric waveform ion mobility spectrometer [J]. *Sens Actuat B*, 2000, 67: 300–306.
- [21] Eiceman GA, Tarassov A, Funk P, *et al.* GC-PFAIMS as smart smoke alarm. Identification of combustion sources by patterns of retention time and compensation voltage [J]. *Int J Ion Mob Spectrom*, 2002, 5: 71–75.
- [22] Eiceman GA, Nazarov EG, Miller RA, *et al.* Micro-machined planar field asymmetric ion mobility spectrometer as a gas chromatographic detector [J]. *Analyst*, 2002, 127(4): 466–471.
- [23] Karpas Z, Tilman B, Gdalevsky B, *et al.* Determination of volatile biogenic amines in muscle food products by ion mobility spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2002, 463(2): 155–163.
- [24] Menéndez M, Garrido-Delgado R, Arce L, *et al.* Direct determination of volatile analytes from solid samples by UV-ion mobility spectrometry [J]. *J Chromatogr A*, 2008, 1215: 8–14.
- [25] Vautz W, Baumbach JI, Jung J. Beer fermentation control using ion mobility spectrometry-results of a pilot study [J]. *J Inst Brew*, 2006, 112(2): 157–164.
- [26] 钟其顶, 刘明, 熊正河, 等. 红葡萄酒中 2,4,6-三氯苯甲醚(TCA)感官阈值的研究[J]. *中外葡萄与葡萄酒*, 2010, 9: 13–16.
- Zhong QD, Liu M, Xiong ZH, *et al.* Estimating sensory threshold values of 2,4,6-trichloroanisole in red wine [J]. *Sino-Overseas Grapevine Wine*, 2010, 9: 13–16.
- [27] 张素娟, 梁宝爱, 孙丽萍, 等. 超声波辅助-顶空固相微萃取-气相色谱法测定葡萄酒中痕量 2,4,6-三氯苯甲醚[J]. *食品工程*, 2012, 1: 44–48.
- Zhang SJ, Liang BA, Sun LP, *et al.* Determination of trace 2,4,6-trichloroanisole (TCA) in wine by gas chromatography with ultrasonic oscillation assisted headspace solid phase micro-extraction (HS-SPME) [J]. *Food Eng*, 2012, 1: 44–48.
- [28] Máquez-Sillero I, Cádenas S, Valcárcel M. Direct determination of 2,4,6-trichloroanisole in wines by single-drop ionic liquid microextraction coupled with multicapillary column separation and ion mobility spectrometry detection [J]. *J Chromatogr A*, 2011, 1218 (42): 7574–7580.
- [29] Jafari M, Khayamian T, Shaer V, *et al.* Determination of veterinary drug residues in chicken meat using corona discharge ion mobility spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2007, 581(1): 147–153.
- [30] 王建凤, 张仲夏, 杜振霞, 等. 离子迁移谱法检测圣女果中的敌敌畏和马拉硫磷[J]. *分析实验室*, 2011, 30(4): 30–33.
- Wang JF, Zhang ZX, Du ZX, *et al.* Detection of malathion and dichlorovos in cherry tomatoes using a hand-held ion mobility spectrometer [J]. *Chin J Anal Lab*, 2011, 30(4): 30–33.
- [31] 颜毅坚, 邱静, 侯艳冰, 等. 动物活体检测“瘦肉精”的离子迁移谱快速方法[J]. *现代科学仪器*, 2013, 4(8): 261–264.
- Yan YJ, Qiu J, Hou YB, *et al.* Ion mobility spectrometer for rapid test of β -agonist in vivo of animal [J]. *Mod Sci Instrum*, 2013, 4(8): 261–264.
- [32] 彭丽英, 王卫国, 王新, 等. 离子迁移谱快速筛查白酒中痕量邻苯二甲酸酯的研究[J]. *分析化学*, 2014, 42(2): 278–282.
- Peng LY, Wang WG, Wang X, *et al.* Rapid screening of trace phthalate

- estersin-wine using ion mobility spectrometry [J]. *Chin J Anal Chem*, 2014, 42(2): 278–282.
- [33] 窦怀智, 江涛, 张晓冬, 等. 新型离子迁移谱技术应用于白酒中塑化剂的检测[J]. *分析仪器*, 2014, 1: 88–92.
Dou HZ, Jiang T, Zhang XD, *et al.* Determination of phthalate esters in wine by novel ion mobility spectrometry [J]. *Anal Instrum*, 2014, 1: 88–92.
- [34] 窦怀智, 江涛, 张晓冬, 等. 新型离子迁移谱技术应用于乳品中三聚氰胺的检测[J]. *化学通报*, 2014, 77(2): 178–181.
Dou HZ, Jiang T, Zhang XD, *et al.* Study on the application of novel ion mobility spectrometry to detect melamine in dairy [J]. *Chem*, 2014, 77(2): 178–181.
- [35] 王卫国, 梁茜茜, 程沙沙, 等. 离子迁移谱检测痕量爆炸物新技术和应用[J]. *科学通报*, 2014, 59(12): 1079–1086.
Wang WG, Liang XX, Cheng SS, *et al.* Development of ion mobility spectrometry and its application for detection trace explosives [J]. *Chin Sci Bull*, 2014, 59(12): 1079–1086.
- [36] Garrido-Delgado R, Arce L, Guamán AV, *et al.* Direct coupling of a gas-liquid separator to an ion mobility spectrometer for the classification of different white wines using chemometrics tools [J]. *Talanta*, 2011, 84: 471–479.
- [37] 程沙沙, 陈创, 王卫国, 等. 一种基于离子迁移谱的气相色谱检测器及其应用[J]. *色谱*, 2011, 29(9): 901–907.
Cheng SS, Chen C, Wang WG, *et al.* A novel gas chromatography detector based on ion mobility spectrometry technology and its application [J]. *Chin J Chromatogr*, 2011, 29(9): 901–907.
- [38] Garrido-Delgado R, Mercader-Trejo F, Sielemann S, *et al.* Direct classification of olive oils by using two types of ion mobility spectrometers [J]. *Anal Chim Acta*, 2011, 696(1–2): 108–115.
- [39] Ruzsanyi V, Sielemann S, Baumbach J. Determination of microbial volatile organic compounds (MVOC) using IMS with different ionization sources [J]. *Int J Ion Mob Spectrom*, 2002, 5: 138–142.
- [40] Sielemann S, Baumbach J, Schmidt H, *et al.* Quantitative analysis of benzene, toluene, and *m*-xylene with the use of a UV-ion mobility spectrometer [J]. *Field Anal Chem Technol*, 2000, 4: 157–169.
- [41] Xie Z, Sielemann S, Schmidt H, *et al.* Determination of acetone, 2-butanone, diethyl ketone and BTX using HSCC-UV-IMS [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2002, 372: 606–610.

(责任编辑: 杨翠娜)

作者简介



葛含光, 硕士研究生, 助理研究员, 主要研究方向为食品安全检测和风味物质分析。

E-mail: gehg@tjciq.gov.cn