

离子迁移谱及其在食品监测中的应用

陆娅婷, 胡 双, 陆 鹏, 施元旭, 王校常*

(浙江大学茶叶研究所, 杭州 310000)

摘 要: 离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)是近年来快速发展起来的一项检测技术。由于其操作简便、检测快速、灵敏度高、体积小等明显优势, 现已应用到危险品检测、医药、环保、食品安全、过程控制等诸多领域的研究中。本文简要地介绍了其结构和工作原理, 重点阐述其在国内外食品监测领域中的最新进展。目前在食品工业中的应用研究包括: 食品与农产品中农药、兽药等的残留检测, 食品生产加工储蓄保鲜等过程中的质量控制如控制啤酒发酵程度、储藏保鲜过程监测, 食品原产地及真实性的快速检验如橄榄油和葡萄酒等级鉴定、原产地鉴定等。在此基础上也与现行的常规检测技术(高效液相色谱、气相色谱)进行了比较。简要讨论了其在食品安全和质量检测中的可能应用前景, 认为 IMS 具有提高食品质量、优化生产过程、规范市场行为的巨大潜力。

关键词: 离子迁移谱; 食品; 残留检测; 挥发物检测

Ion mobility spectrometry and its application in food monitoring

LU Ya-Ting, HU Shuang, LU Peng, SHI Yuan-Xu, WANG Xiao-Chang *

(Tea Research Institute of Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

ABSTRACT: Ion mobility spectrometry (IMS) is a new powerful detection technology which is fast, simple, high sensitivity, and smart, and has been developed rapidly in recent years. It has been applied to many fields such as hazardous goods detecting, pharmaceuticals, environmental protection, and so on. The structure, working principle and its application were introduced briefly in this article. Its application in food monitoring was emphasized on, including the detection of toxic and harmful substances in food like pesticides, veterinary drugs and so on, as well as the detection of the volatile of foodstuffs. Its application in food industry includes food production process control (like controlling the fermentation of beer), storage process monitoring (choosing the best conditions for food preservation), classification, authenticity identification (distinguishing olive oil and wine from different origins and ranks). At last, it was discussed that the advantages and disadvantages of IMS by comparing with those commonly used detection technology (HPLC and GC). IMS should have a great potential in the fields of food safety and quality control such as improving food quality, optimizing the production process and standardizing the market behavior.

KEY WORDS: ion mobility spectrometry; food; residues detection; volatile detection

基金项目: 国家自然科学基金项目(40871109)、宁波市科技计划项目(2012C10014)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (21105125), and Science and Technology Program of Ningbo(2012C10014)

*通讯作者: 王校常, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为茶园土壤质量及安全生产、茶叶香气分析及应用。E-mail: xcwang@zju.edu.cn

*Corresponding author: WANG Xiao-Chang, PhD, Professor, Institute of Tea Science, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China. E-mail: xcwang@zju.edu.cn

1 引言

离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)最早出现在1970年,又称等离子体色谱、气体电泳^[1],它与已经发展成熟的飞行时间质谱有些类似,但只需在大气压条件下进行检测^[2],并且对可检测的有机化合物的分析灵敏度可以高达 $10^{-9}\sim 10^{-10}$ 量级^[3]。与其他一些现有常规检测技术相比,IMS还具有仪器简单、体积小、重量轻、功耗低和分析时间快等许多优点^[4]。它最早应用于化学战剂、毒品、爆炸物等危险品的探测^[5-7],可以检测机场手提袋和行李中的含氮爆炸物^[8-9],水溶液中的爆炸物,包括TNT、DNT、ADNT、NT、TNB等^[10],自制烈性炸药三过氧化三丙酮(triacetone triperoxide, TATP)^[11]及毒品固体颗粒^[12-14]。后来又成功应用于环境污染物检测^[15-16],药物非法添加及假冒伪劣药物检测,药品生产过程中的设备清洗确认^[17-18],疾病诊断^[19-20]、药物动力学研究等许多领域^[21-22]。近年来,随着IMS技术的发展和完善,其在检测方面的优点日益凸显,在食品安全检测和食品质量控制领域的应用也受到了广泛的关注^[23]。

2 IMS工作原理

IMS由进样口、离子源、离子门、迁移管和检测器几个部分组成。IMS工作原理见图1,样品通过进样口进入仪器,在载气(纯净的氮气或者净化过的空气)的带动下到达离子源处,被离子化而带上不同的电荷呈流状进入迁移管。由于迁移管带有低强度电场,

离子气体因此获得能量在迁移管中移动,并与反方向的漂移气体撞击失去一部分能量,最终以恒定迁移率 V_0 到达检测器。在一定的电场强度和相同的条件下, V_0 只与气体的大小、形状、质量、带电荷数有关,不同物质的迁移速率 V_0 不同,到达检测器的时间不同,从而被区分开^[25-26]。常用的离子源有放射性离子源(radioactive source)、电晕放电(corona discharge)离子源、光电离源(photoionization)、电喷雾离子源(electrospray ionization, ESI)、激光解析电离源(laser desorption ionization)、低温等离子体(low temperature plasma, LTP)电离源等^[27-28]。

IMS可采用多种进样方式,比如直接进样、热解析进样、与GC/LC联用等^[29]。顶空进样是直接进样的一种方式,传统的顶空进样使用注射式针头穿入膜密封的小瓶,瓶底用加热装置使气体转移到IMS的进样口^[30]。热解析进样可以与固相微萃取技术(solid phase microextraction, SPME)联用,用SPME收集样品再通过热解析装置使样品从吸附头上解析,随后进入IMS装置^[31]。GC/LC联用不仅可以初步净化样品,还可以将样品进行分离,提高IMS的分辨率^[32]。

3 IMS在农产品、食品监测中的应用

3.1 污染物、有毒物检测

食品污染物、有毒物指食品及其原料在生产、加工过程中,混入了对人体健康有害或有毒的物质,包括农药残留、兽药残留、有机污染物、食品添加剂、生物毒素和重要病原体等。农药残留是农产品的主要

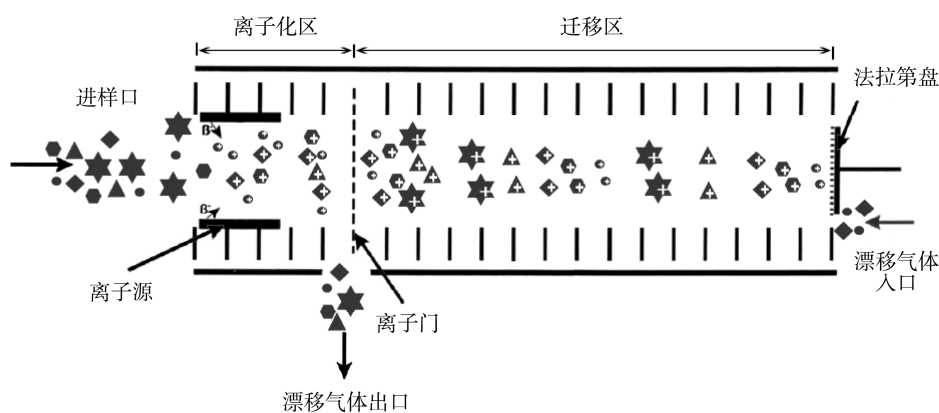


图1 IMS工作原理示意图^[24]

Fig.1 Schematic illustration of IMS^[24]

污染物,王建凤等^[33]采用便携式离子迁移谱仪对圣女果表面残留的敌敌畏和马拉硫磷建立了快速检测分析。在大气压条件下,以⁶³Ni作为电离源,干燥洁净的空气作为载气和迁移气,在负离子模式下进行运行,敌敌畏和马拉硫磷检测时间小于10 s,检测限分别为1 ng和5 ng,其相对标准偏差分别为8.4%和7.2%,达到农残检测标准,适合于农产品中敌敌畏和马拉硫磷残留的快速筛选分析。Jafari等^[34]用电喷雾离子迁移谱(ESI-IMS)对土豆及不同水质水样中的亚硝酸盐和硝酸盐进行实时监测,亚硝酸盐和硝酸盐的检测限分别达到3.8 μg/L和4.7 μg/L,且无需任何前处理。相比LC、GC和CE检测,不仅保证了可信度,而且检测时间更短,操作更简便。

肉类的兽药残留问题与人类的健康密切相关,特别是鸡养殖过程中的抗生素使用问题尤为严重,呋喃唑酮(FUR)、氯霉素(CAP)、恩诺沙星(ENR)是其中较常用的药物。电晕放电离子源IMS检测的实验预处理方法是称取(1±0.0001)g鸡肉样品于试管中,根据所测物质不同加入5 mL不同比例的乙腈水溶液,恩诺沙星需乙腈:水体积比3:2,呋喃唑酮和氯霉素则是1:1,再用磷酸溶液调节pH值到3.0,4000 r/min转速下离心5 min,取上清液浓缩到原体积的1/3,用C₁₈吸附柱萃取其中的药物。实验结果表明三种药物的检测限都低于20 μg/kg,且浓度的标准曲线具有良好的线性特征,可以用来检测其他样品^[35]。

3.2 生产过程控制

对食物中特征香气成分的检测可以用来控制食物的生产过程。啤酒的酿造时间大约是5~6 d,在啤酒酿造初期,其中的丁二酮(diacetyl)和2,3-戊二酮(2,3-pentanedione)含量较高,具有臭黄油味,随着酿造的进行,其浓度逐渐降低。当达到某一阈值时酿造才算完成,过低过高都影响品质。因此合适的酿造时间是关键,丁二酮和2,3-戊二酮的快速检测对保证啤酒品质具有特别重要的意义。Vautz等^[36]尝试直接利用IMS对啤酒酿造过程中的这两种物质进行实时监测。将样品加热到60℃,顶空收集其挥发性物质后进行IMS分析,用GC-MS辅助确定两种物质浓度与IMS峰值的对应关系,建立起相应的关系曲线,认为这一技术完全适合用做实时监测啤酒的发酵过程。对合适实验参数的探究有可能将IMS应用到更多的领域,比如红酒的酿造、面包的发酵和烘焙、饮料的香

气变化及各种食品的生产过程。

3.3 食品储藏保鲜过程监测

食品在存放过程中会发生一系列的物理化学变化,不适宜的存放条件可能使食物被微生物、外来化学物质污染或者发生自身化学反应,影响食物的风味甚至危害人体健康。例如真菌在食物的生产过程中(比如啤酒酿造、奶酪生产)起着积极作用,但是在食物的存放过程中也会对食物产生消极影响,特别是在温暖潮湿的环境下会快速繁殖产生生物毒素。因此其早期的快速实时检测发现就尤为重要。有报道利用GC-UV-IMS联用法来检测芝士表面菌群生长前后的挥发性成分来判断是否被污染。在真菌生长前IMS检测到保留时间0.8、4.0、8.3 min处有明显信号峰,真菌生长后则4.0、8.3 min处的信号峰消失,0.8 min处的信号峰强度显著降低,而在1.0、13.5、20.5 min处出现新的真菌代谢产物信号峰,推测是由于真菌生长导致芝士原本挥发性成分的稀释。结果表明IMS可用于控制有益菌的生长,检测有害菌的代谢产物^[37]。肉类在存放过程中同样会被细菌降解形成一些具有致癌作用的生物胺。如三甲胺(TMA)就是其中一种指示性生物胺,它不仅可以用来检测肉制品有没有被微生物污染,还能判断污染的程度。Bota等^[38]曾用IMS直接检测鸡肉汁中的三甲胺,方法检测限为(0.6±0.2) ng,结果显示,存放天数不同、损坏程度不同的肉汁能被仪器快速区分出来。红酒瓶子的软木塞或者清洗后二次使用的橡木桶可能使红酒中混入三氯苯甲醚(TCA),特别是2,4,6-三氯苯甲醚(2,4,6-TCA),会使红酒出现潮湿纸板箱、蘑菇或者泥土的气味,俗称“木塞污染”,全球每年因此造成的经济损失高达1~10亿美元。常用的2,4,6-TCA检测方法是先用SPME顶空收集样品,再用GC-ECD或者GC-MS检测,检测限通常在1~100 ng/L。而近来Márquez-Sillero等^[39]用单离子液体微萃取技术来收集样品,再通过毛细管柱对样品进行初步的纯化,只需2 mL的红酒样品,且不用前处理或稀释,可以达到0.01 ng/L的检测限,方法更高效快速。

食物中的多不饱和脂肪酸(PUFAs),比如二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA),对人类健康有益。但其化学性质很不稳定,容易受氧气、温度、光照和一些离子(Cu、Fe等)的影响发生氧化反应而出现不良气味且影响食物口感。Márquez-Sillero等^[40]

用顶空自动进样、毛细管柱、离子迁移谱联用的方法,对四种口味的牛奶和一种亚麻籽油中的脂肪酸氧化状况进行实时检测。毛细管柱连接在自动进样器和离子迁移谱中间,起到初步分离挥发性物质的作用。结果显示,装置能快速有效地检测到己醛、丁酮、丙酮、二甲基硫醚等主要的脂肪酸降解产物,检测限在 0.3~3.0 $\mu\text{g/L}$ 之间。进一步分析检测不同温度、氧气和光照条件下各样品存放 36 d 内的变化,发现光对牛奶中脂质的氧化作用影响最大,而温度则对亚麻油中脂质的影响最大。这些结果表明,用 IMS 能快速实时监测食物在不同条件下的变化,有助于选择最佳食物储藏条件,延长食物的保鲜时间,避免变质的食物流入市场,在未来有巨大的市场应用潜力。

3.4 食品真伪鉴别

食品的原料来源不同、等级不同、生产方式不同其价格差异较大,商贩为了牟取私利以次充好的现象非常普遍。在现代,越来越多的人要求食物纯天然无污染,关心食物的原产地。肉类的挥发性成分可以用来鉴定其养殖方式,Alonso 等^[41]选取了 65 份分别以天然牧场自然放养、橡树园放养或用高油脂的商业方式喂养得到的伊比利亚猪肉为材料,150 $^{\circ}\text{C}$ 条件下加热,顶空收集挥发性成分,通过 IMS 检测,95.5% 的样品能够准确地地区分产地来源。

气味、口感、化学成分可以反映食品的风味特征,以此可对食品做出区分。Vautz 等^[37]顶空收集了两种白葡萄酒、三种红葡萄酒的挥发性物质,用 GC-UV-IMS 法尝试 IMS 在风味鉴别领域的应用可行性。结果显示,虽然不知道各个峰具体代表何种物质,但是可以明显地观察到不同种类葡萄酒之间的差异。因此推测若选取大量样本建立 IMS 图谱库,应该可以应用到不同级别葡萄酒的鉴定上。Garrido-Delgado 等^[42]以特级初榨橄榄油、普通橄榄油和橄榄渣油为材料,探究了利用 UV-IMS 和 GC-IMS 对橄榄油分级的可行性。UV-IMS 的迁移温度为 60~120 $^{\circ}\text{C}$ 时,普通橄榄油和橄榄渣油的图谱非常相似,当温度到达 150 $^{\circ}\text{C}$ 时三者图谱能够被完全区分开。GC-IMS 由于有 GC 柱的初步分离作用,系统温度只要 60 $^{\circ}\text{C}$ 就可区分出三种油的图谱。而且两种离子迁移谱都能够区分三种不同等级的橄榄油,在用样品进行分类验证时,UV-IMS 的分类率为 86.1%,GC-IMS 的分类率可达 100%。结果说明,选择合适的离子源和预分离方

式可以有效提高 IMS 的分辨率,增强鉴别食品真伪的能力。

4 展 望

食品安全是一项关系到全人类健康的公共卫生问题,加强食品质量安全监测手段是解决途径之一^[43]。随着生活水平的提高,人们对于食品质量与安全的要求也逐渐提高,但目前食品检测大多需要复杂的前处理过程,设备要求高,检测时间长,无法满足大量样品快速检测的需求。离子迁移谱(IMS)与其他检测技术相比(见表 1),其最大优势在于对实验条件要求低,样品无需复杂的前处理,检测时间短,且它对于食品痕量污染物的灵敏度足够满足常规监测需要,因此可作为食品安全监测的有力工具。它对食品挥发性成分具有良好的选择性,并且随着 IMS 微型化的发展,有望将其镶嵌到生产设备当中,实现对食品生产加工过程的实时监测,辅助控制产品质量。IMS 还能区分不同产品的风味特征,用于不同来源、不同等级产品的鉴别,有利于规范市场。综上所述,IMS 可应用于食品原材料选择、生产过程控制、储藏条件控制、真伪鉴别、安全检测等各个领域,具有广阔的应用前景。

表 1 IMS 与实验室常用检测设备比较
Table 1 Comparison between IMS and other commonly used laboratory equipments

	HPLC ^[44-48]	GC ^[49-50]	IMS ^[3,51]
特 点	1、检测限低,一般达 0.1 $\mu\text{g/L}$	1、检测限低,可达 0.01 $\mu\text{g/L}$	1、检测限约为 1 $\mu\text{g/L}$
	2、分辨率高	2、真空条件	2、样品前处理简单
	3、试剂纯度要求高		或无需前处理
	4、样品前处理复杂		3、分辨率较低

参考文献

- [1] Herbert H, Hill Jr, William F, *et al.* Ion mobility spectrometry[J]. Anal Chem, 1990, 62(23): 1201-1209.
- [2] Eiceman GA, Karpas Z, Hill Jr, *et al.* Ion mobility spectrometry[M]. CRC Press, 2013.
- [3] Armenta S, Alcalá M, Blanco M. A review of recent, unconventional applications of ion mobility spectrometry (IMS)[J]. Anal Chim Acta, 2011, 703(2): 114-123.
- [4] Baumbach JRI, Eiceman GA. Ion Mobility Spectrometry: Arriv-

- ing On Site and Moving Beyond a Low Prole[J]. *Appl Spectrosc*, 1999, 53(9): 338–355.
- [5] Eiceman G, Nazarov EG, Stone JA. Chemical standards in ion mobility spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2003, 493(2): 185–194.
- [6] Makinen MA, Anttalainen OA, Sillanpaa ME. Ion mobility spectrometry and its applications in detection of chemical warfare agents[J]. *Anal Chem*, 2010, 82(23): 9594–9600.
- [7] Harris GA, Kwasnik M, Fernández FM. Direct analysis in real time coupled to multiplexed drift tube ion mobility spectrometry for detecting toxic chemicals[J]. *Anal Chem*, 2011, 83: 1908–1915.
- [8] Ewing RG, Atkinson DA, Eiceman GA, *et al.* A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosives and explosive related compounds [J]. *Talanta*, 2001, 54(3): 515–529.
- [9] Tabrizchi M., ILbeigi V. Detection of explosives by positive corona discharge ion mobility spectrometry [J]. *J Hazard Mater*. 2010,176: 692–696.
- [10] Asbury GR, Klasmeier J, Hill HH. Analysis of explosives using electrospray ionization/ion mobility spectrometry (ESI/IMS) [J]. *Talanta*, 2000, 50(6): 1291–1298.
- [11] Buttigieg GA, Knight AK, Denson S, *et al.* Characterization of the explosive triacetone triperoxide and detection by ion mobility spectrometry [J]. *Forensic Sci Int*, 2003, 135(1): 53–59.
- [12] Phares DJ, Holt JK, Smedley GT, *et al.* Method for characterization of adhesion properties of trace explosives in fingerprints and fingerprint simulations [J]. *J Forensic Sci*, 2000, 45(4): 774–784.
- [13] Verkouteren JR, Staymates JL. Reliability of ion mobility spectrometry for qualitative analysis of complex, multicomponent illicit drug samples [J]. *Forensic Sci Int*, 2011, 206(1–3): 190–196.
- [14] Miki A, Keller T, Regenscheit P, *et al.* Application of ion mobility spectrometry to the rapid screening of methamphetamine incorporated in hair[J]. *J Chromatogr B: Biom Sci Appl*, 1997, 692(2): 319–328.
- [15] Schmidt H, Baumbach J, Klockow D. Detection of perfluorocarbons using ion mobility spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2003, 484(1): 63–74.
- [16] Márquez-Sillero I, Aguilera-Herrador E, Cárdenas S, *et al.* Ion-mobility spectrometry for environmental analysis[J]. *Trac-Trend Anal Chem*, 2011, 30(5): 677–690.
- [17] Connie MG, John CR, John FK, *et al.* Detection of undeclared erectile dysfunction drugs and analogues in dietary supplements by ion mobility spectrometry [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2009, 49(3): 601–606.
- [18] Armenta S, Alcalá M, Blanco M, *et al.* Ion mobility spectrometry for the simultaneous determination of diacetyl midecamycin and detergents in cleaning validation [J]. *J Pharm Biomed Anal*, 2013, 83: 265–272.
- [19] Westhoff M, Litterst P, Maddula S, *et al.* Differentiation of chronic obstructive pulmonary disease (COPD) including lung cancer from healthy control group by breath analysis using ion mobility spectrometry[J]. *Int J Ion Mobil Spec*, 2010,13: 131–139.
- [20] Rudnicka J, Mochalski P, Agapiou A, *et al.* Application of ion mobility spectrometry for the detection of human urine [J]. *Anal Bioanal Chem*, 2010, 398: 2031–2038.
- [21] Ruzsanyi V. Ion mobility spectrometry for pharmacokinetic studies-exemplary application [J]. *J Breath Res*, 2013, 7(4): 046008.
- [22] Vautz W, Baumbach JI. Exemplar Application of Multi-Capillary Column Ion Mobility Spectrometry for Biological and Medical Purpose [J]. *Int J Ion Mobil Spec*, 2008, 11(1–4): 35–41.
- [23] Vautz W, Zimmermann D, Hartmann M, *et al.* Ion mobility spectrometry for food quality and safety [J]. *Food Addit Contam*, 2006, 23(11): 1064–1073.
- [24] Sielemann S, Baumbach J, Schmidt H, *et al.* Detection of alcohols using UV-ion mobility spectrometers [J]. *Anal Chim Acta*, 2001, 431: 293–301.
- [25] Borsdorf H, Eiceman GA. Ion Mobility Spectrometry: Principles and Applications [J]. *Appl Spectrosc Rev*, 2006, 41(4): 323–375.
- [26] Sysoev A, Adamov A, Vildanova J, *et al.* Development of an ion mobility spectrometer for use in an atmospheric pressure ionization ion mobility spectrometer/mass spectrometer instrument for fast screening analysis [J]. *Rapid Commun Mass Spectrom*, 2004, 18(24): 3131–3139.
- [27] Bell AJ, Ross SK. Reverse Flow Continuous Corona Discharge Ionisation [J]. *Int J Ion Mobil Spec*, 2002, 5: 95–99.
- [28] Guharay SK, Dwivedi P, Hill Jr HH. Ion Mobility Spectrometry: Ion Source Development and Applications in Physical and Biological Sciences [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2008, 36(4): 1458–1470.
- [29] Borsdorf H, Mayer T, Zarejousheghani M, *et al.* Recent Developments in Ion Mobility Spectrometry [J]. *Appl Spect Rev*, 2011, 46(6): 472–521.
- [30] Borsdorf H, Nazarov EG, Eiceman GA. Atmospheric pressure ionization and gas phase ion mobility studies of isomeric dihalogenated benzenes using different ionization techniques [J]. *Int J Mass Spectrom*, 2004, 232(2): 117–126.
- [31] Lokhnauth JK, Snow NH. Solid phase micro-extraction coupled with ion mobility spectrometry for the analysis of ephedrine in urine [J]. *J Sep Sci*, 2005, 28(7): 612–618.
- [32] Eiceman GA, Yuan-Feng W, Garcia-Gonzalez L, *et al.* Enhanced selectivity in ion mobility spectrometry analysis of complex

- mixtures by alternate reagent gas chemistry[J]. *Anal Chim Acta*, 1995, 306(1): 21–33.
- [33] 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]. *分析试验室*, 2011, (04): 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, (04): 30–33.
- [34] Jafari M, Torki F, Saraji M. Simultaneous determination of nitrite and nitrate in potato and water samples using negative electrospray ionization ion mobility spectrometry [J]. *Anal Sci*, 2012, 28(4): 391–395.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Vautz W, Baumbach J. Analysis of Bio-Processes using Ion Mobility Spectrometry [J]. *Eng Life Sci*, 2008, 8(1): 19–25.
- [38] Bota GM, Harrington PB. Direct detection of trimethylamine in meat food products using ion mobility spectrometry [J]. *Talanta*, 2006, 68(3): 629–635.
- [39] Márquez-Sillero I, Cárdenas 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 Chromatog A*, 2011, 1218(42): 7574–7580.
- [40] Márquez-Sillero I, Cárdenas S, Sielemann S, *et al.* On-line headspace-multicapillary column-ion mobility spectrometry hyphenation as a tool for the determination of off flavours in foods [J]. *J Chromatog A*, 2014, 1333(14): 99–105.
- [41] Alonso R, Rodríguez-Estévez V, Domínguez-Vidal A, *et al.* Ion mobility spectrometry of volatile compounds from Iberian pig fat for fast feeding regime authentication [J]. *Talanta*, 2008, 76(3): 591–596.
- [42] 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.
- [43] 张慧丽, 杨松, 蒋坤, 等. 我国食品安全体系主要问题研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(2): 596–603.
- Zhang HL, Yang S, Jiang K, *et al.* Current situation and prospects of food safety systems in China [J]. *J Food Safe Qual*, 2013, 4(2): 596–603.
- [44] 高洁, 苗虹. 兽药残留检测技术研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2013, 4(1): 11–18.
- Gao J, Miao H. Recent development of analytical methods for veterinary drug residues [J]. *Food Safe Qual*, 2013, 4(1): 11–18.
- [45] Yao S, Meyer A, Henze G. Comparison of amperometric and UV-spectrophotometric monitoring in the HPLC analysis of pesticides[J]. *Fresen J Anal Chem*, 1991, 339(4): 207–211.
- [46] Aulakh J, Malik A, Kaur V, *et al.* A Review on solid phase micro extraction-high performance liquid chromatography (SPME-HPLC) analysis of pesticides [J]. *Crit Rev Anal Chem*, 2005, 35(1): 71–85.
- [47] Kumar A, Sudha V, Swaminathan S, *et al.* Comparison of HPLC & spectrophotometric methods for estimation of antiretroviral drug content in pharmaceutical products [J]. *Indian J Med Res*, 2010, 132 (4): 390–394.
- [48] Karpas Z, Tilman B, Gdalevsky R, *et al.* Determination of volatile biogenic amines in muscle food products by ion mobility spectrometry [J]. *Anal Chim Acta*, 2002, 463(2): 155–163.
- [49] Wittke K, Hajimiragha H, Dunemann L, *et al.* Determination of dichloroanilines in human urine by GC-MS, GC-MS-MS, and GC-ECD as markers of low-level pesticide exposure[J]. *J Chromato B: Biome Sci Appl*, 2001, 755(1–2): 215–228.
- [50] Bicchi C, Cordero C, Iori C, *et al.* SBSE-GC-ECD/FPD in the analysis of pesticide residues in *Passiflora alata* Dryander herbal teas[J]. *J Agric Food Chem*, 2003, 51(1): 27–33.
- [51] Baumbach J. Process analysis using ion mobility spectrometry[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2006, 384: 1059–1070.

(责任编辑: 赵静)

作者简介



陆娅婷, 博士生在读, 主要研究方向为茶叶香气分析及应用。

E-mail: 11316067@zju.edu.cn



王校常, 博士, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为茶园土壤质量及安全生产, 茶叶香气分析及应用。

E-mail: xcwang@zju.edu.cn