

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第32卷 第12期

Vol.32 No.12

2011

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目 次

序 郝郑平(3461)

我国工业 VOCs 减排控制与管理对策研究 王海林,张国宁,聂磊,王宇飞,郝郑平(3462)

我国 VOC 类有毒空气污染物优先控制对策探讨 陈颖,李丽娜,杨常青,郝郑平,孙汉坤,李瑶(3469)

工业固定源 VOCs 治理技术分析评估 栾志强,郝郑平,王喜芹(3476)

工业挥发性有机物排放控制的有效途径研究 江梅,张国宁,魏玉霞,邹兰,张明慧(3487)

台湾地区 VOCs 污染控制法规、政策和标准 栾志强,王喜芹,郑雅楠,刘平(3491)

国外固定源 VOCs 排放控制法规与标准研究 张国宁,郝郑平,江梅,王海林(3501)

挥发性有机物税收政策对我国经济的影响分析 刘昌新,王宇飞,王海林,郝郑平,王铮(3509)

民用生物质燃烧挥发性有机化合物排放特征 李兴华,王书肖,郝吉明(3515)

北京及周边地区大气羰基化合物的时空分布特征初探 王琴,邵敏,魏强,陈文泰,陆思华,赵越(3522)

北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析 孙杰,王跃思,吴方莛(3531)

上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析 崔虎雄,吴迺名,高松,段玉森,王东方,张懿华,伏晴艳(3537)

长沙大气中 VOCs 研究 刘全,王跃思,吴方莛,孙杰(3543)

佛山灰霾期挥发性有机物的污染特征 马永亮,谭吉华,贺克斌,程远,杨复沫,余永昌,谭赞华,王洁文(3549)

深圳市显著排放 VOCs 的园林植物调查与分析
..... 黄爱葵,李楠,Alex Guenther,Jim Greenberg,Brad Baker,Michael Graessli,白建辉(3555)

北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析 周裕敏,郝郑平,王海林(3560)

北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价 周裕敏,郝郑平,王海林(3566)

城市污水处理厂恶臭挥发性羰基化合物的排放特征 周咪,王伯光,赵德骏,张春林,古颖纲(3571)

城市污水处理厂挥发性卤代有机物的排放特征及影响因素研究 何洁,王伯光,刘舒乐,赵德骏,唐小东,邹宇(3577)

城市污水处理厂恶臭挥发性有机物的感官定量评价研究 刘舒乐,王伯光,何洁,唐小东,赵德骏,郭薇(3582)

植物释放挥发性有机物(BVOC)向二次有机气溶胶(SOA)转化机制研究 李莹莹,李想,陈建民(3588)

NO₃ 自由基与 3 种环醚的大气化学反应动力学研究 盖艳波,葛茂发,王炜罡(3593)

3-甲基-3-丁烯基-1-醇与硫酸/过氧化氢混合溶液的吸收反应研究 王天鹤,刘泽,葛茂发,王炜罡(3599)

水中挥发性有机物的分析方法综评 许秀艳,朱擎,谭丽,梁宵,张颖,滕恩江(3606)

新型动态针捕集阱技术分析大气中低浓度的 VOCs 李想,陈建民(3613)

大气中总挥发性有机硫化物检测方法的研究 王艳君,郑晓玲,何鹰,张栋,王保栋(3617)

全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物
..... 周庆华,仓怀文,鞠帮玉,李林,杜永斋,陈创,侯可勇,李京华,王卫国,李海洋(3623)

膜进样-单光子电离/化学电离-质谱仪在线检测水中 VOCs
..... 花磊,吴庆浩,侯可勇,崔华鹏,陈平,赵无垠,谢园园,李海洋(3628)

工业园区 TVOC 和恶臭的电子鼻检测技术研究 田秀英,蔡强,叶朝霞,郭威,卢岩文,张永明(3635)

电子鼻检测污染土壤中挥发性氯代烃的适用性研究 卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,蔡强,陈吕军,张永明(3641)

工业管道中丙烯酸酯类物质的监测与分析 吴彬,张红燕,陆林光(3647)

硅改性制备疏水性沸石分子筛蜂窝体 王喜芹,李凯,魏冰,栾志强(3653)

氧化锰八面体分子筛的合成及其对苯催化氧化性能 李东艳,刘海弟,陈运法(3657)

蜂窝状活性炭对 VOCs 的吸-脱附性能研究 韩忠娟,罗福坤,李泽清(3662)

混合气体直接吸附分离回收过程研究 王红玉,羌宁,胡瑕(3667)

生物滴滤降解氯苯废气的实验研究 周卿伟,朱润晔,胡俊,张丽丽,陈建孟(3673)

复合吸收技术净化复杂工业有机废气 陈定盛,岑超平,唐志雄,方平,陈志航(3680)

烘房 VOCs 废气治理技术路线探析 李泽清,罗福坤(3685)

Co₃O₄ 纳米棒的制备及其对气相甲苯的催化氧化 闫清云,李新勇,肇启东,曲振平(3689)

Si 掺杂 TiO₂ 纳米管阵列制备、表征及其光催化氧化降解室内典型 VOCs 邹学军,李新勇,曲振平,王疆疆(3694)

基于现场试验的石油类污染物自然衰减能力研究 贾慧,武晓峰,胡黎明,刘培斌(3699)

膜分离法处理加油站油气研究 朱玲,陈家庆,张宝生,王建宏(3704)

机动车加油过程中气液两相流动特性的 CFD 数值模拟 陈家庆,张男,王金惠,朱玲,尚超(3710)

《环境科学》第 32 卷(2011 年)总目录 (3717)

《环境科学》征稿简则(3679) 《环境科学》征订启事(3684) 信息(3554, 3616, 3622, 3672)

全自动阵列离子迁移谱仪连续监测挥发性有机化合物

周庆华^{1,2}, 仓怀文¹, 鞠帮玉¹, 李林¹, 杜永斋^{1,2}, 陈创^{1,2}, 侯可勇¹, 李京华¹, 王卫国¹, 李海洋^{1*}

(1. 中国科学院大连化学物理研究所, 大连 116023; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:为了拓宽离子迁移谱仪的检测范围、提高化合物的识别准确度, 研制了一套阵列离子迁移谱仪, 该仪器基于⁶³Ni 源正离子模式、⁶³Ni 源负离子模式和真空紫外灯光电离模式的组合电离源, 可以连续监测空气中挥发性有机化合物. 仪器采用全自动的采样进样系统, 同时检测了二甲基亚砜的正离子和二氯甲烷的负离子, 实现了正负离子的同时检测. 通过对阵列离子迁移谱图的综合解析, 识别了⁶³Ni 源正离子模式下难以鉴别的丙烯腈、间二甲苯和丙酮. 连续 4 d 定量测定丙酮样品, 结果表明仪器对丙酮的线性检测范围为 2 个数量级, 线性相关系数 R 优于 0.995, 相对标准偏差控制在 4.0% ~ 18.3%. 采用动态跟踪法, 连续 24 h 在线监测了模拟泄漏的丙烯酸甲酯, 监测结果直接反映了其泄漏的时间和浓度.

关键词:阵列; 离子迁移谱仪; 连续监测; 挥发性有机化合物; 动态跟踪

中图分类号: X831 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3623-05

Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array

ZHOU Qing-hua^{1,2}, CANG Huai-wen¹, JU Bang-yu¹, LI Lin¹, DU Yong-zhai^{1,2}, CHEN Chuang^{1,2}, HOU Ke-yong¹, LI Jing-hua¹, WANG Wei-guo¹, LI Hai-yang¹

(1. Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian 116023, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: An ion mobility spectrometer array was designed, in order to broaden the detection range of ion mobility spectrometer and improve the accuracy of compound identification. This instrument was based on the combination of ionization sources of ⁶³Ni positive ion mode, ⁶³Ni negative ion mode and photoionization mode with vacuum UV lamp, and it can continuously monitor the volatile organic compounds in air. With the automatic system of sampling and injection of this instrument, the positive ion of dimethyl sulfoxide and negative ion of dichloromethane were detected simultaneously. By comprehensive analysis of spectra with ion mobility spectrometer array, acrylonitrile, *m*-xylene and acetone were identified, which were difficult to be distinguished under the ⁶³Ni positive ion mode. Acetone samples were determined quantitatively within four days continuously, and the results indicated that the linear range of acetone in this instrument was 2 orders of magnitude. The linear correlation coefficient R was higher than 0.995, and the relative standard deviations were controlled in the range of 4.0% - 18.3%. Methacrylate leaked in simulation was monitored on-line for 24 h continuously, using the method of dynamic tracking, and the result showed the leaking time and the concentration of methacrylate directly.

Key words: array; ion mobility spectrometer(IMS); continuous monitoring; volatile organic compounds(VOCs); dynamic tracking

挥发性有机化合物(volatile organic compounds, VOCs)是环境中普遍存在的有机污染物, 包括苯系物、有机氯化物、有机酮、醛、酯等, 它们含量甚微但成分复杂、种类繁多, 其中许多物质具有致癌性、致畸性和致突变性, 并能够引起各种呼吸道疾病、哮喘和过敏等, 对自然环境和人类生存都造成了严重的危害. 目前已有气相色谱、液相色谱、质谱、红外激光光谱、气相色谱-质谱联用等^[1~6]方法用于 VOCs 的监测, 但是这些方法中涉及的仪器成本较高且不易携带.

离子迁移谱(ion mobility spectrometry, IMS)是 20 世纪 70 年代兴起的一种微量化学物质分析技术, 由于其在化学毒剂、毒品和爆炸物检测方面的优

异性能^[7~9], 已被广泛地应用于机场安检和战地勘察中. IMS 具有分析速度快、灵敏度高、操作成本低、便于携带等优点, 越来越受到国内外分析工作者的青睐, 已被用于苯系物、卤代烃和酯类等 VOCs 的检测^[10~14]. 然而, 传统的 IMS 仅有一种工作模式, 单次测定只能检测正离子或负离子, 且 IMS 的分辨率较低, 仅靠一种检测模式对种类繁多的 VOCs 进行检测往往难以准确鉴定.

本研究采用了 3 种不同工作模式的离子迁移

收稿日期: 2011-05-25; 修订日期: 2011-07-12

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2007AA061503)

作者简介: 周庆华(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为离子迁移谱的分析方法, E-mail: woshizhouqinghua@126.com

* 通讯联系人, E-mail: hli@dicp.ac.cn

管,以并联的方式组合成阵列 IMS,利用不同电离方式的组合来实现多种 VOCs 的同时检测,通过多种模式下的数据力图克服传统 IMS 因分辨率低而难以准确鉴定化合物的劣势.该仪器可以连续 24 h 运行,对空气中的 VOCs 进行连续监测.

1 材料与amp;方法

1.1 仪器原理与参数

IMS 的核心部件为离子迁移管,主要由电离区、离子门、迁移区、检测器等组成^[15].样品由载气携带进入电离区,在离子源的作用下被电离,生成产物离子;随后,产物离子通过周期性开启的离子门进入均匀电场的迁移区,在电场力的作用下,离子在迁移区内进行迁移,与逆流的中性漂气分子不断碰撞;不同离子由于迁移速度不同而被分离检测.离子的迁移速度 v ($\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$) 与电场强度 E ($\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$) 和迁移率 K [$\text{cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$] 成正比,离子迁移率 $K = L/Et$,式中, L (cm) 为离子迁移管的迁移区长度, t (s) 为离子的迁移时间; K 是温度和压力的函数,对其归一化后可得约化迁移率 K_0 , $K_0 = K \times (P/101) \times (273/T)$,式中, P (kPa) 是工作压力, T (K) 是绝对温度.给定温度和压力时,在低电场范围下,离子的迁移率为常数,其数值主要取决于离子的结构、质量、电荷数等因素^[16].

本研究自制的阵列 IMS 的参数设置如表 1 所示,示意图如图 1 所示.该仪器由 3 种不同工作模式的离子迁移管组成,分别为 ^{63}Ni 源正离子模式、 ^{63}Ni 源负离子模式、真空紫外 (VUV) 灯光电离模式,它们以并联的方式组合,其中采用的 VUV 灯为 10.6 eV Kr 灯 (型号 PKS106, 公司 Heraeus Noblelight GmbH).仪器的供气源为压缩空气,依次经过硅胶、分子筛、活性炭进行干燥净化,净化后的压缩空气被均匀地分为 3 路载气和 3 路漂气.在质量流量控制器的控制下,载气的流速均为 $400 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$,漂气的流速均为 $600 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$.

仪器采用的全自动采样进样系统如图 2 所示.采样过程中,电磁阀 1 和电磁阀 2 相连通,电磁阀 3 和电磁阀 4 相连通,采样泵自动采取样品并存储于储样环内,其中采样口设有膜过滤装置,用于过滤样品中的颗粒物;进样过程中,电磁阀按 1→3→4→2 的顺序连通,采样泵停止工作,载气流经储样环并将样品带入离子迁移管内进行分离检测.

仪器采用的软件为自主开发的 IMS 数据采集和智能分析系统,该系统可实现数据的采集和滤噪

处理、动态跟踪监测、谱图自动识别.系统采集数据后,以平均的方式得到相对稳定平滑的谱图,平均次数一般控制在 50 ~ 100;噪声较大时,系统可在不损失原有信号的基础上,通过小波滤噪或傅里叶滤噪获得较好的去噪效果.开启动态跟踪监测时,系统可对谱图的某点或某段的待测物谱峰进行动态跟踪监测,获得该化合物在一定时间段内的变化情况.系统建有多种化合物的谱图数据库,检测过程中系统自动将样品的谱图与数据库进行比较、识别.此外,通过软件的设置,仪器还可实现反吹自清洗、扣背景等功能.

表 1 阵列 IMS 参数

Table 1 Parameters of the IMS array

参数	^{63}Ni 源正 离子模式	^{63}Ni 源负 离子模式	VUV 模式
迁移管长度/cm	13	13	13
迁移管内径/cm	15	15	15
迁移管温度/ $^{\circ}\text{C}$	100	90	90
迁移电场/ $\text{V}\cdot\text{cm}^{-1}$	450	380	370
离子门开启时间/ μs	200	200	200
漂气流速/ $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	600	600	600
载气流速/ $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$	400	400	400

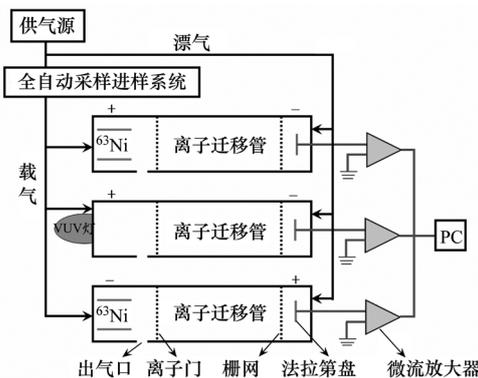


图 1 阵列 IMS 的示意

Fig. 1 Schematic representation of the IMS array

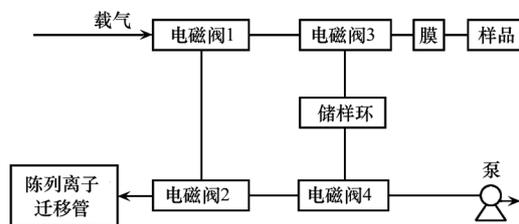


图 2 全自动采样进样系统的示意

Fig. 2 Schematic representation of the automatic system of sampling and injection

1.2 实验材料

丙酮、间二甲苯、丙烯腈、丙烯酸甲酯、二氯甲

烷、二甲基亚砜均为分析纯;采样袋(30 L,大连海得科技有限公司);质量流量控制器(型号 D07-7B,北京七星华创电子股份有限公司);流量显示仪(D08-1F,北京七星华创电子股份有限公司)。

1.3 实验方法

检测识别 5 种 VOCs:取 5 个干净的试剂瓶,分别加入 2 mL 丙烯腈、间二甲苯、丙酮、二氯甲烷、二甲基亚砜,并放于恒温器中维持在 25℃,仪器自动采取样品蒸气进行检测。

建立丙酮的标准曲线:采样袋内充入 30 L 的压缩空气,用微量注射器取 0.05 ~ 10.00 μL 的丙酮纯液体样品,分别注入采样袋,并用热风枪吹扫使丙酮完全气化,得到浓度为 1.3、2.6、5.2、13.1、26.2、52.3、130.8、261.5 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的丙酮样品。每个浓度的丙酮样品进行 6 次测定,以 VUV 模式下的信号强度作为定量依据,建立丙酮的标准曲线。为了评价日间重现性,在同一实验条件下,连续 4 d 测定了上述 8 个浓度的丙酮样品。

连续监测丙烯酸甲酯的泄漏:在距离仪器 2 m 处设置 2 个采样点,其中一个采样点释放 0.4 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 丙烯酸甲酯,模拟泄漏事故的发生,另一个采样点作为空白对比。仪器轮流切换采样点,连续

采取两处的空气进行检测,在线监测丙烯酸甲酯 24 h。

2 结果与讨论

2.1 同时检测正负离子

检测过程中,采样时间为 15 s,进样时间为 10 s,每次检测的时间间隔为 5 s。图 3 为二甲基亚砜、二氯甲烷以及两者混合物的阵列 IMS 图,其中蓝色实线为 ^{63}Ni 源负离子模式下的 IMS 图,黑色实线为 ^{63}Ni 源正离子模式下的 IMS 图,红色实线为 VUV 模式下的 IMS 图,蓝色虚线为 ^{63}Ni 源负离子模式下的反应离子峰位置,黑色虚线为 ^{63}Ni 源正离子模式下的反应离子峰位置(下文中化合物的阵列 IMS 图与此相同)。表 2 为二甲基亚砜、二氯甲烷的迁移时间和约化迁移率。

阵列 IMS 图中,二甲基亚砜仅在 ^{63}Ni 源正离子模式的 5.83 ms 处出现产物离子峰,二氯甲烷仅在 ^{63}Ni 源负离子模式的 4.60 ms 处出现产物离子峰,两者的混合物既出现与二甲基亚砜一致的正离子峰,又存在与二氯甲烷一致的负离子峰。结果表明,阵列 IMS 在无需更换高压电源的条件下,实现了正、负离子的同时检测。

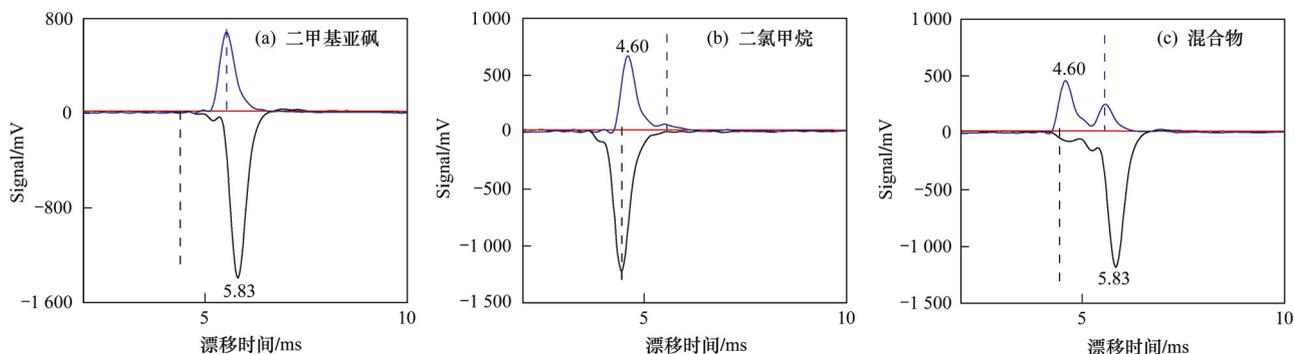


图 3 二甲基亚砜、二氯甲烷以及两者混合物的阵列 IMS 图

Fig. 3 Spectra of dimethyl sulfoxide, dichloromethane and their mixture with IMS array

表 2 二甲基亚砜和二氯甲烷的迁移时间和约化迁移率

Table 2 Drift time and reduced mobility of dimethyl sulfoxide and dichloromethane

化合物	迁移时间/ms			约化迁移率/ $\text{cm}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}$		
	$^{63}\text{Ni}(+)$ 模式	$^{63}\text{Ni}(-)$ 模式	VUV 模式	$^{63}\text{Ni}(+)$ 模式	$^{63}\text{Ni}(-)$ 模式	VUV 模式
二甲基亚砜	5.83	—	—	1.67	—	—
二氯甲烷	—	4.60	—	—	2.58	—

2.2 综合解析阵列 IMS 图

图 4 为丙烯腈、间二甲苯和丙酮的阵列 IMS 图,表 3 为它们的迁移时间和约化迁移率。 ^{63}Ni 源正离子模式下,间二甲苯迁移时间既接近于丙烯腈又

近于丙酮,仅靠此种模式对其进行准确识别比较困难。VUV 模式下,丙烯腈无离子峰,间二甲苯和丙酮存在离子峰,但两者的迁移时间差别较大。因此,综合 ^{63}Ni 源正离子模式和 VUV 模式的 IMS 图,即可实

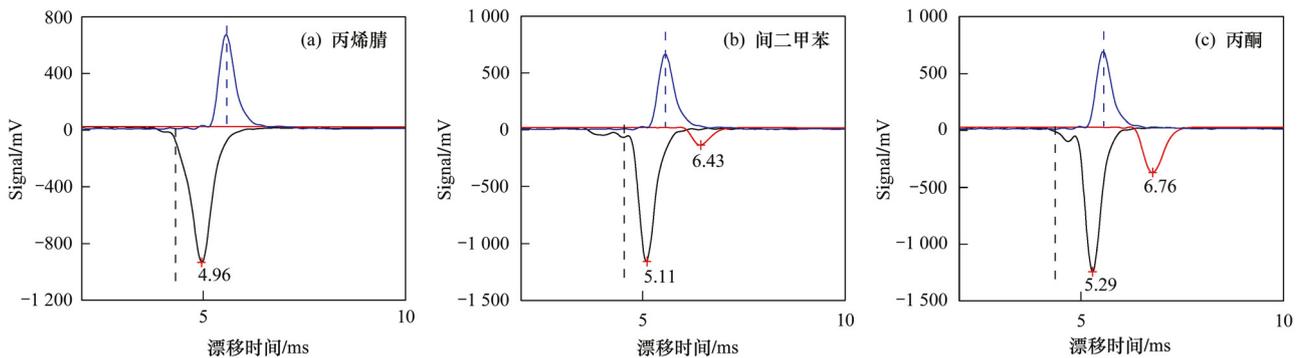


图4 丙烯腈、间二甲苯和丙酮的阵列 IMS 图

Fig. 4 Spectra of acrylonitrile, *m*-xylene and acetone with IMS array

表3 丙烯腈、间二甲苯和丙酮的迁移时间和约化迁移率

Table 3 Drift time and reduced mobility of acrylonitrile, *m*-xylene and acetone

化合物	迁移时间/ms			约化迁移率/ $\text{cm}^2 \cdot (\text{V} \cdot \text{s})^{-1}$		
	$^{63}\text{Ni} (+)$ 模式	$^{63}\text{Ni} (-)$ 模式	VUV 模式	$^{63}\text{Ni} (+)$ 模式	$^{63}\text{Ni} (-)$ 模式	VUV 模式
丙烯腈	4.96	—	—	1.97	—	—
间二甲苯	5.11	—	6.43	1.91	—	1.90
丙酮	5.29	—	6.76	1.84	—	1.80

现对间二甲苯与丙烯腈以及丙酮的准确识别。

2.3 建立丙酮的标准曲线

不同浓度的丙酮样品由载气携带进入阵列 IMS 进行检测,检测过程中记录 VUV 模式下的丙酮离子峰面积,每隔 1 s 记录一次,以峰面积的累加作为定量依据,建立丙酮的标准曲线。

在 VUV 模式下,丙酮标准曲线的线性范围为 2 个数量级,线性相关系数优于 0.995。对于同一浓度的丙酮样品,连续 4 d 测定值的相对标准偏差控制在 4.0% ~ 18.3%,表明仪器对其测定具有良好的日间重现性。

2.4 连续在线监测丙烯酸甲酯的泄漏

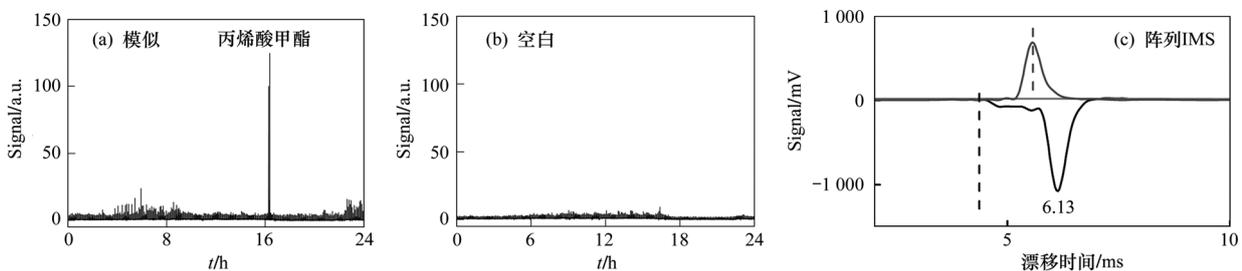


图5 丙烯酸甲酯的 24 h 连续监测结果

Fig. 5 Results of continuous monitoring methacrylate within 24 h

3 结论

本研究利用阵列 IMS 检测了二甲基亚砜、二氯

图 5 为阵列 IMS 对丙烯酸甲酯的 24 h 在线监测结果,其中图 5 (a) 为模拟泄漏事故采样点的监测结果,图 5 (b) 为空白对比采样点的监测结果,图 5 (c) 为丙烯酸甲酯的阵列 IMS 图。在 ^{63}Ni 源正离子模式下,丙烯酸甲酯于 6.13 ms 处出现产物离子峰,据此软件对其动态跟踪监测的范围设置为 6.00 ~ 6.30 ms,仪器完成一次检测所需时间 < 30 s。

当丙烯酸甲酯出现泄漏时,仪器能够快速响应并给出监测结果。结果图表明,丙烯酸甲酯泄漏的时间为 16:16:12 和 16:21:29,浓度分别为 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

甲烷、丙烯腈、间二甲苯、丙酮这 5 种 VOCs,单次测定即获得 ^{63}Ni 源正离子、 ^{63}Ni 源负离子、VUV 灯光电离这 3 种模式下的图谱信息,不仅实现了正负离子

的同时检测,拓宽了对 VOCs 的检测范围,也为单独工作模式下难以鉴定的化合物提供了一种有效的识别方法.同时,利用阵列 IMS 完成了对丙烯酸甲酯的 24 h 连续监测,为后续研究 VOCs 的连续监测奠定了一定的基础.

参考文献:

- [1] Geiss O, Tirendi S, Barrero-Moreno J, *et al.* Investigation of volatile organic compounds and phthalates present in the cabin air of used private cars [J]. *Environment International*, 2009, **35** (8):1188-1195.
- [2] 王伯光,刘灿,吕万明,等. 广州大气挥发性醛酮类化合物的污染特征及来源研究 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (3):631-636.
- [3] Oancea A, Hanoune B, Focsa C, *et al.* Cross determination of the vapor liquid equilibrium of formaldehyde aqueous solutions by quadrupole mass spectrometry and infrared diode laser spectroscopy [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43** (2):435-440.
- [4] Nadezhdinskii A, Berezin A, Bugoslavsky Y, *et al.* Application of near-IR diode lasers for measurement of ethanol vapor [J]. *Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1999, **55** (10):2049-2055.
- [5] Limbeck A, Puxbaum H. A GC-MS method for the determination of polar organic compounds in atmospheric samples [J]. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 1999, **73** (4):329-343.
- [6] 毛婷,徐晓斌,王瑛. 全二维气相色谱法测定北京交通干道大气中芳香烃 [J]. *环境科学*, 2009, **30** (10):2845-2851.
- [7] Tuovinen K, Paakkanen H, Hanninen O. Determination of soman and VX degradation products by an aspiration ion mobility spectrometry [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2001, **440** (2):151-159.
- [8] Khayamian T, Tabrizchi M, Jafari M T. Quantitative analysis of morphine and noscapine using corona discharge ion mobility spectrometry with ammonia reagent gas [J]. *Talanta*, 2006, **69** (4):795-799.
- [9] Khayamian T, Tabrizchi M, Jafari M T. Analysis of 2,4,6-trinitrotoluene, pentaerythritol tetranitrate and cyclo-1,3,5-trimethylene-2,4,6-trinitramine using negative corona discharge ion mobility spectrometry [J]. *Talanta*, 2003, **59** (2):327-333.
- [10] Borsdorf H, Rämmler A. Continuous on-line determination of methyl tert-butyl ether in water samples using ion mobility spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2005, **1072** (1):45-54.
- [11] 李庄,林丙涛,孔德义,等. 痕量挥发性有机物的高场不对称波形离子迁移谱研究 [J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, **31** (1):12-15.
- [12] Du Y Z, Zhang W, Whitten W, *et al.* Membrane-extraction ion mobility spectrometry for in situ detection of chlorinated hydrocarbons in water [J]. *Analytical Chemistry*, 2010, **82** (10):4089-4096.
- [13] 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, **30** (4):30-33.
- [14] Tiebe C, Miessner H, Koch B, *et al.* Detection of microbial volatile organic compounds (MVOCs) by ion-mobility spectrometry [J]. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 2009, **395** (7):2313-2323.
- [15] 石迎国,邵士勇,李安林,等. 迁移管的电场强度对真空紫外电离-离子迁移谱仪性能的影响 [J]. *分析化学仪器装置与实验技术*, 2006, **34** (9):1353-1356.
- [16] 李芳,邵士勇,姚琰,等. 紫外离子迁移谱在线监测芳香族化合物 [J]. *分析化学研究简报*, 2008, **36** (3):361-363.

CONTENTS

Preface	HAO Zheng-ping(3461)
Study on Control and Management for Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) in China	
.....	WANG Hai-lin, ZHANG Guo-ning, NEI Lei, <i>et al.</i> (3462)
Countermeasures for Priority Control of Toxic VOC Pollution	CHEN Ying, LI Li-na, YANG Chang-qing, <i>et al.</i> (3469)
Evaluation of Treatment Technology of Volatile Organic Compounds for Fixed Industrial Resources	LUAN Zhi-qiang, HAO Zheng-ping, WANG Xi-qin(3476)
Emission Control Way of Volatile Organic Compounds in Industry	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, WEI Yu-xia, <i>et al.</i> (3487)
Regulations and Policies for Control of Volatile Organic Compounds and the Emission Standards in Taiwan	
.....	LUAN Zhi-qiang, WANG Xi-qin, ZHENG Ya-nan, <i>et al.</i> (3491)
Study on Foreign Regulations and Standards of Stationary Sources VOCs Emission Control	ZHANG Guo-ning, HAO Zheng-ping, JIANG Mei, <i>et al.</i> (3501)
VOCs Tax Policy on China's Economy Development	LIU Chang-xin, WANG Yu-fei, WANG Hai-lin, <i>et al.</i> (3509)
Characteristics of Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Biofuel Combustion in China	LI Xing-hua, WANG Shu-xiao, HAO Ji-ming(3515)
Spatial and Temporal Variations of Ambient Carbonyl Compounds in Beijing and Its Surrounding Areas	
.....	WANG Qin, SHAO Min, WEI Qiang, <i>et al.</i> (3522)
Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing	SUN Jie, WANG Yue-si, WU Fang-kun(3531)
Characteristics of Ambient VOCs and Their Role in O ₃ Formation; A Typical Air Pollution Episode in Shanghai Urban Area	
.....	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, GAO Song, <i>et al.</i> (3537)
Observation and Study on Atmospheric VOCs in Changsha City	LIU Quan, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (3543)
Characteristics of Volatile Organic Compounds During Haze Episode in Foshan City	
.....	MA Yong-liang, TAN Ji-hua, HE Ke-bin, <i>et al.</i> (3549)
Investigation on Emission Properties of Biogenic VOCs of Landscape Plants in Shenzhen	
.....	HUANG Ai-kui, LI Nan, Alex Guenther, <i>et al.</i> (3555)
Pollution and Source of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area in Beijing	
.....	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3560)
Health Risk Assessment of Atmospheric Volatile Organic Compounds in Urban-rural Juncture Belt Area	ZHOU Yu-min, HAO Zheng-ping, WANG Hai-lin(3566)
Source Emission Characteristics of Malodorous Volatile Organic Carbonyls from a Municipal Sewage Treatment Plant	
.....	ZHOU Mi, WANG Bo-guang, ZHAO De-jun, <i>et al.</i> (3571)
Source Emission Characteristics and Impact Factors of Volatile Halogenated Organic Compounds from Wastewater Treatment Plant	
.....	HE Jie, WANG Bo-guang, LIU Shu-le, <i>et al.</i> (3577)
Quantification Assessment of the Relationship Between Chemical and Olfactory Concentrations for Malodorous Volatile Organic Compounds	
.....	LIU Shu-le, WANG Bo-guang, HE Jie, <i>et al.</i> (3582)
Study on Transformation Mechanism of SOA from Biogenic VOC Under UV-B Condition	LI Ying-ying, LI Xiang, CHEN Jian-min(3588)
Kinetic Studies on the Gas-phase Reactions of NO ₃ Radicals with Three Cyclic Ethers	GAI Yan-bo, GE Mao-fa, WANG Wei-gang(3593)
Uptake of 3-methyl-3-buten-1-ol into Aqueous Mixed Solution of Sulfuric Acid and Hydrogen Peroxide	WANG Tian-he, LIU Ze, GE Mao-fa, <i>et al.</i> (3599)
An Overview on Analytical Method of Volatile Organic Compounds in Water	XU Xiu-yan, ZHU Qing, TAN Li, <i>et al.</i> (3606)
Determination of Low Concentration VOCs in Air by a Newly Designed Needle Trap Device	LI Xiang, CHEN Jian-min (3613)
Research on Determination of Total Volatile Organic Sulfur Compounds in the Atmosphere	
.....	WANG Yan-jun, ZHENG Xiao-ling, HE Ying, <i>et al.</i> (3617)
Automatic Continuous Monitoring of Volatile Organic Compounds Using Ion Mobility Spectrometer Array	
.....	ZHOU Qing-hua, CANG Huai-wen, JU Bang-yu, <i>et al.</i> (3623)
Development of a Membrane Inlet-Single Photon Ionization/Chemical Ionization-Mass Spectrometer for Online Analysis of VOCs in Water	
.....	HUA Lei, WU Qing-hao, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (3628)
Detection of TVOC and Odor in Industrial Park Using Electronic Nose	TIAN Xiu-ying, CAI Qiang, YE Zhao-xia, <i>et al.</i> (3635)
Applicability of an Electronic Nose for Detection of Volatile Chlorinated Hydrocarbons in Soil	
.....	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (3641)
Test and Analysis of Acrylic Acid Ester in Industry Pipelines	WU Bin, ZHANG Hong-yan, LU Lin-guang(3647)
Preparation of Honeycombed Monolithic Zeolite and Hydrophobic Modification with SiCl ₄	WANG Xi-qin, LI Kai, WEI Bing, <i>et al.</i> (3653)
Synthesis of Manganese Oxide Octahedral Molecular Sieve and Their Application in Catalytic Oxidation of Benzene	LI Dong-yan, LIU Hai-di, CHEN Yun-fa(3657)
Adsorption-Desorption Performance of Honeycomb-Shaped Activated Carbon	HAN Zhong-juan, LUO Fu-kun, LI Ze-qing(3662)
Process of Adsorption and Separating Recovery Solvents from Vapor Mixture Directly	WANG Hong-yu, QIANG Ning, HU Xia(3667)
BTF Performance Treating a Chlorobenzene-Contaminated Gas Stream	ZHOU Qing-wei, ZHU Run-ye, HU Jun, <i>et al.</i> (3673)
Purification of Complicated Industrial Organic Waste Gas by Complex Absorption	CHEN Ding-sheng, CEN Chao-ping, TANG Zhi-xiong, <i>et al.</i> (3680)
Analysis of the Treatment Technology Pathway of VOCs Released from Oven	LI Ze-qing, LUO Fu-kun(3685)
Fabrication of Co ₃ O ₄ Nanorods and Its Catalytic Oxidation of Gaseous Toluene	YAN Qing-yun, LI Xin-yong, ZHAO Qi-dong, <i>et al.</i> (3689)
Preparation, Characterization of Si Doped TiO ₂ Nanotubes and Its Application in Photocatalytic Oxidation of VOCs	
.....	ZOU Xue-jun, LI Xin-yong, QU Zhen-ping, <i>et al.</i> (3694)
Research of the Natural Attenuation Capacity of Oil Pollutants Based on <i>in-situ</i> Experiment	JIA Hui, WU Xiao-feng, HU Li-ming, <i>et al.</i> (3699)
Experimental Research of Oil Vapor Pollution Control for Gas Station with Membrane Separation Technology	
.....	ZHU Ling, CHEN Jia-qing, ZHANG Bao-sheng, <i>et al.</i> (3704)
CFD Numerical Simulation onto the Gas-Liquid Two-Phase Flow Behavior During Vehicle Refueling Process	
.....	CHEN Jia-qing, ZHANG Nan, WANG Jin-hui, <i>et al.</i> (3710)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2011年12月15日 32卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Founded in 1976)

Vol. 32 No. 12 Dec. 15, 2011

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行