

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,吴方堃(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,吴方堃,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)

北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析

孙杰^{1,2}, 王跃思^{1*}, 吴方堃¹

(1. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029; 2. 吉林化工学院化学与制药工程学院, 吉林 132022)

摘要:2008 年 10 ~ 2009 年 10 月, 利用前级浓缩-气相色谱/质谱法, 对北京市大气中 5 种苯系物 BTEX(苯、甲苯、乙苯、间、对二甲苯、邻二甲苯)的组成及浓度变化进行了采样分析研究. 结果表明, 北京市大气 BTEX 平均浓度为 13.9 ~ 44.0 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其中甲苯的含量最高, 苯次之, 邻二甲苯含量最低, 与国外城市和地区相比北京大气中 BTEX 浓度较低, 研究发现北京市 BTEX 主要来自机动车排放, 城市燃煤和工业溶剂挥发也是 BTEX 的重要来源. 一年的观测结果表明, BTEX 春、夏季节浓度较高, 秋季浓度较低, 季节性排放源的变化是 BTEX 季节变化的主要原因, 同时也不能忽视温度和大风等天气因素对 BTEX 浓度的影响. 受交通排放和边界层高度的影响, BTEX 类化合物的日变化形式为夜晚高于白天, 呈双峰形, 日最低浓度出现在 14:00 前后.

关键词:北京; BTEX; 预浓缩-GC-MS; 季节变化; 日变化

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)12-3531-06

Analysis on Status Pollution and Variation of BTEX in Beijing

SUN Jie^{1,2}, WANG Yue-si¹, WU Fang-kun¹

(1. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. College of Chemistry and Pharmaceutical Engineering, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: In order to study the pollution status and the seasonal and diurnal variations, ambient concentrations of BTEX were analyzed at Beijing from 2008-10 to 2009-10, by using the method of two-step-concentration-gas spectrometry/mass (CCD-GC/MS). The average concentration of BTEX in Beijing was 13.9-44.0 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. The dominant compound components were toluene, benzene, followed by ethyl benzene, *m/p*-xylene, *o*-xylene. Compared with foreign cities and regions, the level of BTEX at Beijing atmosphere was relatively lower. The study found that BTEX in Beijing mainly came from vehicle emissions, coal and solvent evaporation were also important sources of BTEX. No significantly obvious seasonal variation was observed, with the highest concentrations observed in spring and summer and the lowest concentrations generally found in autumn. Seasonal variations of emission sources were the main reason for seasonal changes of BTEX. However, the impact of weather factors on the BTEX can not be ignored, such as temperature and strong winds. Significant diurnal variations in BTEX were observed. The BTEX concentrations displayed a bimodal pattern, with peak between 08:00 and 10:00. and between 16:00 and 08:00. The minimum concentration generally appeared around 14:00.

Key words: Beijing; BTEX; CCD-GC-MS; seasonal variation; diurnal variation

苯系物是挥发性有机物中含量最高的一类化合物,也是二次有机气溶胶和臭氧的重要前体物,有报道北京大气二次有机气溶胶中有 70% 来自苯系物的转化,并且苯系物具有致癌作用^[1],对人类健康危害较大. 环境中的单环芳烃基本只有人为来源,主要来源于含大量单环芳烃的化石燃料和有机质的不完全燃烧. 城市环境中苯系物的主要来源,包括车辆尾气(流动源),住宅供暖,垃圾焚烧,石油炼制过程,焦炭和铝的生产(固定源). 因此,研究城市空气中苯系物的污染现状、来源及其对人体健康的影响已越来越引起人们的重视. 国外诸多城市已经开展了苯系物的污染研究^[2-7],国内上海、南京、杭州、长春和青岛等地也有零星报道^[8-12],而北京作为我国政治、文化和国际交流中心,空气中的苯系物研究较少.

苯系物中的苯、甲苯、乙苯、间、对二甲苯和邻

二甲苯统称为 BTEX,是苯系物中含量较高,影响较大的代表部分. 本研究在 2008 年 10 月 ~ 2009 年 10 月,采用三步冷冻浓缩进样系统-GC-MSD 方法,对北京大气中的 BTEX 进行了连续观测,分析了北京大气中苯系物的污染现状、污染特征及其来源,以期对苯系物污染防治提供依据.

1 材料与方法

1.1 采样时间与地点

观测地点位于中国科学院大气物理研究所铁塔

收稿日期:2011-05-25;修订日期:2011-07-23

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q02-03);国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06A301);北京市科技计划公益应用项目(D09040903670902)

作者简介:孙杰(1976~),女,博士研究生,主要研究方向为大气化学与环境, E-mail: sj@dq.cern.ac.cn

* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

分部(39°9'N, 116°4'E, 海拔高度:49 m),其位于北京市北三环路以北四环路之间,距三环路约1 km,其东面200 m处为南北走向的京藏高速公路,北边100 m处为东西走向的北土城西路,采样点设在325 m采样塔的32 m采样平台.采样方法为人工操作无油压力/真空采样泵,通过0.6 cm泰氟龙采气管将气体样品抽入特制内表面硅烷化不锈钢采样钢瓶中,采样口装备有除粒子和O₃装置.采样时段为2008-10~2009-10,采样时间为13:30~14:00,此时大气边界层湍流发展旺盛,对流通透,混合层具有当天最高的高度,观测数据反映的是区域分布特征.日变化采样时段为2009年8月1日~2009年8月31日,采样时间为00:00、03:00、06:00、08:00、10:00、12:00、14:00、16:00、18:00、21:00.8月是一年气温最高的时期,大气结构相对稳定,空气质量较好,观测数据反应的是局地日变化特征.

1.2 分析仪器

样品分析仪器由Finnigan ultra trace GC/DSQ气相色谱/质谱仪(美国Thermo公司),三步预浓缩进样系统(美国Entech7100);无油压力/真空采样泵构成;采样钢瓶采用内表面硅烷化不锈钢采样钢瓶(美国Entech公司),标气采用含39种目标化合物的美国EPA认可的TO-14标准气体(Scotty公司).

1.3 分析方法

抽取500 mL样品,使用Entech 7100三步预浓缩进样系统进样.第一步样品首先进入冷阱1,冷冻温度为-165℃,解吸温度20℃.该冷阱浓缩过程可去除空气中的N₂、O₂和少量Ar.第二步由冷阱1解吸出的气体物质在-50℃下再次富集浓缩于冷阱2中,解吸温度180℃,去除微量水分和CO₂.第三步样品被冷冻在聚焦冷阱3中,冷冻温度为-160℃,聚焦冷冻完毕后,快速升温至50℃使冷冻在毛细柱头的VOCs迅速汽化,在氦载气的推动下,解吸进入GC的毛细柱分离并随后进入质谱检测器(MSD)检测.

色谱条件:60 m×0.25 mm(id)DB-5色谱柱;3级程序升温:-35℃保持5 min,8℃/min升至100℃停留1 min,15℃/min升至250℃;高纯氦气作为载气,经过滤脱氧进一步净化;恒压模式,柱前压137 kPa;传输线温度为200℃.

质谱条件:离子源温度为200℃;电离方式为电子轰击(EI),电离能为70 eV;电子倍增器电压1100 V(自调);全扫描方式,扫描质量范围20~

200 u^[13].具体定性、定量方法参见文献[14].该方法灵敏度、回收率、线性范围、检测限和精密度指标优良,完全能够用于对大气中的VOCs准确定性、定量检测.

2 结果与讨论

2.1 北京大气浓度特征

对北京2008年10月~2009年10月的连续观测结果表明,BTEX的平均浓度是13.9~44.0 μg·cm⁻³,苯的浓度为(8.9±3.9) μg·cm⁻³,甲苯的浓度为(12.4±5.3) μg·cm⁻³,乙苯的浓度为(4.0±1.7) μg·cm⁻³,间、对-二甲苯的浓度为(3.5±1.7) μg·cm⁻³,邻-二甲苯的浓度为(2.7±1.1) μg·cm⁻³.与欧盟制订的环境空气中苯浓度<5.0 μg·cm⁻³的标准相比,北京环境空气中苯的浓度超过欧盟标准的1.0~2.6倍.

表1给出了不同城市地区的BTEX组分浓度对比.可以看出,在8座城市中,亚特兰大浓度最高,伦敦次之,芝加哥最低.北京大气中VOCs浓度相对于其它7座城市较低,这种差异与观测实验方法,观测时段和各个城市排放源变化有一定的关系,例如,卡拉奇的机动车燃料种类和高机动车排放量是造成高VOCs浓度的主要原因^[20],而北京近年来机动车尾气排放标准不断提高,2000年以来机动车排放的VOCs在VOCs排放总量中一直呈下降趋势,本研究观测时段正是北京奥运会后,北京市完成城市工业分布调整、加强车辆出行限制的时期,这对VOCs浓度的下降特别是BTEX浓度的下降具有重要作用.

表1列出苯、甲苯、乙苯、间、对二甲苯和邻二甲苯5种苯系物的·OH反应常数(K_{OH}),苯的光化学活性最低,间、对二甲苯的活性最高.图1中对比了9座城市的甲苯/苯,乙苯/苯,间、对二甲苯/苯和邻二甲苯/苯的比值.高比值反映大气中VOCs组分为新排放,而低比值反映出气团已发生一定程度的光化反应.可以看出,北京与芝加哥变化情况较一致,较低的比值可能表明了北京环境大气中废气排放量低耗散和光化学烟雾发生的可能.苯和甲苯的比值(B/T)也常常被用来确定VOCs的主要来源.B/T比值接近于0.5,反映出机动车排放是VOCs的主要污染源^[23,24],而当B/T比值远大于0.5时,大气中VOCs主要来自石油化工、化石燃料燃烧和涂料使用^[24].在本次观测中,B/T比值为0.7±0.2,说明了除机动车排放,苯类物质的另一个重要来源为城市燃煤和溶剂挥发.

表 1 观测期间 BTEX 组分平均浓度及不同城市间 BTEX 组分对比/ $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Table 1 Photochemical properties of averaged concentration of measured species at a site in Beijing in 2008-10 ~2009-10 and averaged concentration for the selected species in other cities / $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$

项目	苯	甲苯	乙苯	间、对二甲苯	邻二甲苯	BTEX
$K_{\text{OH}} \times 10^{12}$	1.2	5.9	7.1	19.0	13.7	
悉尼 ^[16]	9.9	40.0	6.7	20.2	7.8	84.7
汉堡 ^[17]	13.0	38.0	8.8	22.0	9.5	91.3
芝加哥 ^[18]	11.0	10.0	2.4	4.7	1.6	29.7
亚特兰大 ^[19]	33.6	66.1	14.5	39.4	14.5	168.1
卡拉奇 ^[20]	19.8	31.9	-	16.1	5.7	73.5
奥克兰 ^[21]	5.6	13.0	2.8	7.1	3.8	32.3
伦敦 ^[22]	31.0	56.0	4.2	13.0	5.9	110.1
北京	8.9 ± 3.9	12.4 ± 5.3	4.0 ± 1.7	3.5 ± 1.7	2.7 ± 1.1	31.7 ± 12.2

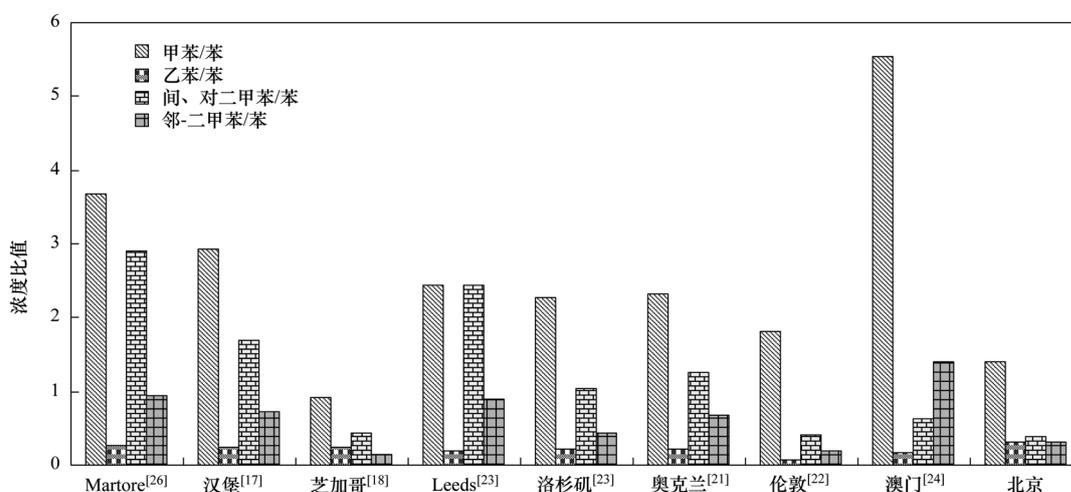


图 1 不同城市 4 种浓度比值比较

Fig. 1 Comparison of four species ratios investigated in this study with other cities

2.2 季节性变化

对 2008 年 10 月 ~2009 年 10 月采集样品月平均浓度分析结果表明,北京大气中 BTEX 的浓度 8 月份最高为 $44.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 11 月最低为 $13.9 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 总体上表现为春、夏季浓度较高, 秋季较低的特点(见图 2). 其变化趋势与温度变化有一定程度的相关, 这主要是受扩散条件、大气逆温层强度及湿度等的影响, 夏季气温高, 利于挥发, 湿度小, 污染物难以稀释扩散, 空气中 BTEX 类物质浓度累积. 秋季气温较低, 大气边界层较高, 大气湍流较强污染物易于稀释扩散, 空气中苯系物浓度下降.

但 BTEX 浓度的变化趋势与温度变化并不完全相同, 如北京气温在 12 月、1 月达最低值, 而 BTEX 低值出现在 11 月, 这可能与北京冬季供暖燃煤排放芳香烃有关, 据李家熙等^[27] 报道, 北京地区生活燃煤过程中存在一定数量的芳香烃释放, 且产生的芳香烃含量已大大超过环境标准. 11 月中下旬北京地

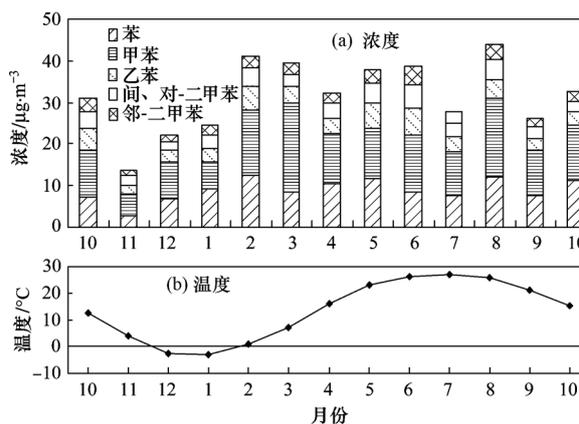


图 2 观测期间 BTEX 组分月平均浓度及温度变化

Fig. 2 Monthly averaged concentration of measured species and mean temperature at a site in central Beijing in 2008-10-2009-10

区陆续进入冬季供暖期, 大量燃煤释放的 BTEX 成为冬季北京大气 BTEX 的主要来源, 11 月的北京,

一是气温较低,天气状况有利于污染物的扩散,二是新的排放源还没有全部释放,这2个原因造成了北京大气 BTEX 在 11 月的低值。

BTEX 浓度的变化趋势与温度变化并不完全相同,除受季节性排放源的影响外,采样时的天气条件也是不容忽视的重要因素。苯系物为挥发性有机化合物,随温度的升高挥发性增强,但当采样时风速较大,区域传输速度较快,采样浓度更具有区域特点;当采样时湿度较大采样浓度也会明显下降。如 7 月 21、22、23 这 3 d 北京空气湿度都超过 51%,大气中 BTEX 的浓度分别是 19.2、20.1 和 20.8 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比 7 月份的平均浓度低 18.1%,7 月 28 和 31 日平均风速超过 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,这 2 d BTEX 的平均浓度仅为 16.2 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,远低于月平均水平,大风对污染物的清除作用十分显著。

2.3 日变化

图 3 为 2009 年 8 月 1~30 日对北京大气小时采样分析统计结果,图 3 显示北京大气 BTEX 类化合物的日变化形式为夜晚高于白天,呈双峰形。上午

08:00~10:00 出现第一个峰值,然后浓度开始下降,14:00 前后为最低,下午浓度又开始上升 18:00~21:00 出现第二个峰值。如苯的浓度从到 08:00 到下午 14:00 下降了 14.3%,然后从 14:00~18:00 又上升 8.3%。

白天在太阳的照射下地面开始升温,由于热对流的作用引起低层空气的上下混合,当这种混合上升到一定高度,就会破坏逆温层,大气化学消耗显著加强,故有机污染物浓度开始减小,中午以后达到谷底。傍晚日落前后,地面开始降温,对流作用减弱,混合层高度降低,风速变小,大气化学反应停止地面污染物浓度开始增加,夜间大气边界层相对稳定,当有污染源排放时,污染物不易扩散而累积。

BTEX 日变化形式明显,均在上午 08:00 和晚上 18:00 左右出现峰值。上午 08:00 峰值的出现可能是由于日出后热对流的混合作用使得夜间积累在较高层的污染物质部分下沉,再加上地面人类活动(主要是采暖燃烧和交通排放)的排放,使得污染物浓度在日出 2~3 h 左右,也就是上午 08:00 点左右

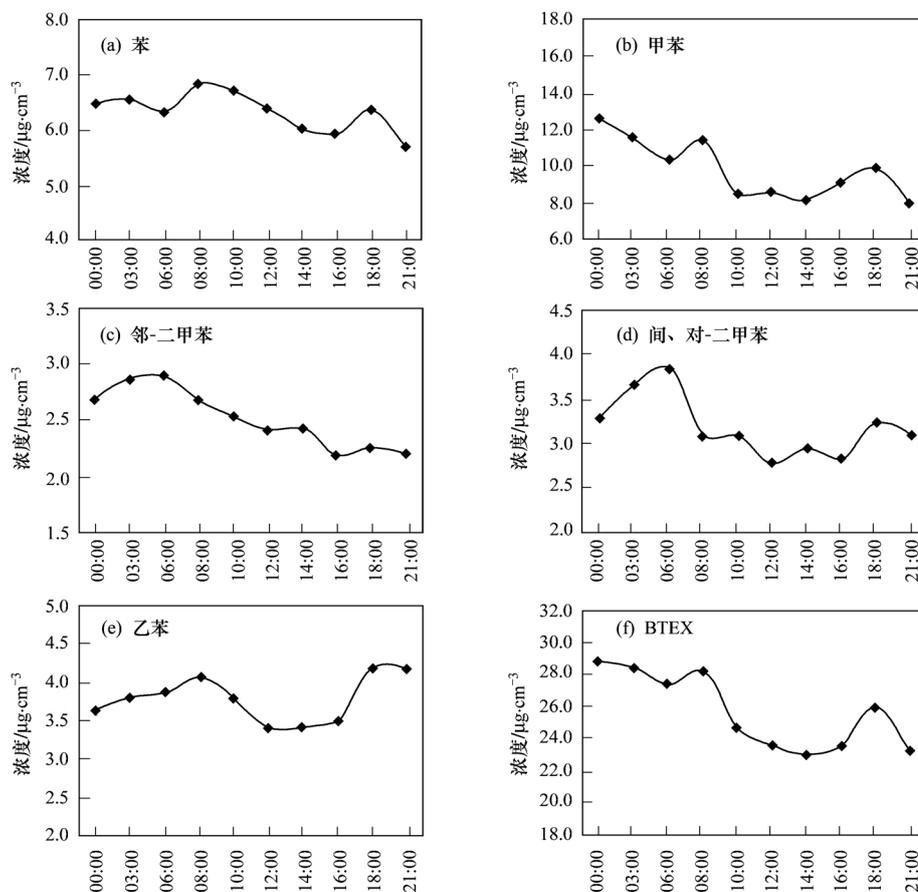


图 3 北京 2009 年 8 月 BTEX 的日变化

Fig. 3 Diurnal variation of BTEX concentration in Beijing in 2009-08

达到最高值。下午 18:00 峰值则是由于日落后地面气温继续下降,逐渐形成了一个由地面向上发展的逆温层,它就像一个“罩子”覆盖着近地面,阻碍着污染物向上层稀释扩散,同时 05:00 左右北京交通开始第二个高峰,从而使得近地层大气中的污染物浓度逐渐增加,并达到第二个浓度高峰。

观测的 5 种苯系物中都出现了 14:00 前后的低浓度,这可能与苯系物与·OH 的光化学反应和大气边界层高度有关,14:00 时受太阳辐射和温度的影响大气中·OH 的浓度和大气边界层的高度都达到一天中的最大值,快速的光化学反应和扩散速度降低了大气中 BTEX 的浓度。

3 结论

(1)对北京 2008 年 10 月~2009 年 10 月的连续观测结果表明,BTEX 的平均浓度是 $13.9 \sim 44.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,甲苯的浓度最高,苯次之,与国外城市和地区相比北京大气中 VOCs 浓度较低。北京大气较低的 BTEX/苯值表明了北京环境大气有废气排放量低耗散和光化学烟雾发生的可能,观测到 B/T 比值为 0.7 ± 0.2 ,说明了除机动车排放,城市燃煤和溶剂挥发也是北京大气中苯类物质的另一个重要来源。

(2)BTEX 的季节变化研究表明,北京大气中 BTEX 在 8 月份浓度最高为 $44.0 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,11 月份最低为 $13.9 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$,总体上表现为春、夏季节浓度较高,秋季较低的特点。冬季供暖期造成北京大气 11 月份 BTEX 的浓度低值,以燃煤为主的季节性排放源的变化是 BTEX 季变化的主要原因,同时也不能忽视温度和大风等天气因素对 BTEX 浓度的影响。

(3)BTEX 类化合物的日变化形式为夜晚高于白天,呈双峰形,峰值分别出现在上午 08:00~10:00 和 18:00~21:00,下午 14:00 为日最低浓度。交通排放和边界层高度的改变是形成日变化形式的主要原因,·OH 的浓度和较高的大气边界层高度造成了 14:00 前后浓度低值。

致谢:感谢李宝江和刘鲁宁同学在采样和分析过程中的大力支持。

参考文献:

- [1] Guerra G, Lemma A, Lerda D, *et al.* Benzene emissions from motor vehicle traffic in the urban area of Milan: hypothesis of health impact assessment[J]. *Atmospheric Environment*, 1995, **29**(23): 3559-3569.
- [2] Skov H, Hansen A B, Lorenzen G, *et al.* Benzene exposure and the effect of traffic pollution in Copenhagen, Denmark [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(14): 2453-2471.
- [3] Kourtidis K, Ziomas L, Zerefos C, *et al.* Benzene and toluene levels measured with a commercial DOAS system in Thessaloniki, Greece [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(9): 1471-1480.
- [4] Keymeulen R, Görgényi M, Héberger K, *et al.* Benzene, toluene, ethyl benzene and xylenes in ambient air and *Pinus sylvestris* L. needles: a comparative study between Belgium, Hungary and Latvia [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(36): 6327-6335.
- [5] Kim K H, Kim M Y. The distributions of BTEX compounds in the ambient atmosphere of the Nan—Ji—Do abandoned land fill site in Seoul [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(14): 2433-2446.
- [6] Pilar S, Graydon W F. Benzene and toluene distribution in Toronto atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 1973, **7**(7): 628-634.
- [7] Ioffe B V, Isidorov V A, Zenkevich I G. Certain regularities in the composition of volatile organic pollutants in the urban atmosphere [J]. *Environmental Science & Technology*, 1979, **13**(7): 864-868.
- [8] 张爱东,郭明明,修光利,等.上海市交通干道空气中苯系物冬季污染特征初探[J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(2): 52-55.
- [9] 苗欣,孙成,王禹,等.南京市交通干道大气环境中挥发性有机物的研究[J]. *环境保护科学*, 2003, **29**(5): 6-9.
- [10] 罗晓璐,沈学优.杭州市城市空气中苯系物的污染现状及来源解析[J]. *浙江大学学报(理学版)*, 2003, **30**(5): 570-573.
- [11] 刘春明,杜尧国,徐自力,等.长春市空气中苯系物的分布规律[J]. *吉林大学自然科学学报*, 2000, **3**: 91-94.
- [12] 谭培功,蒋海威,于彦彬,等.青岛市区大气环境中苯系物的污染状况及变化规律的研究[J]. *中国环境监测*, 2006, **16**: 78-80.
- [13] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [14] 王跃思,孙扬,徐新,等.大气中痕量挥发性有机物的分析方法研究[J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 18-23.
- [15] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 1994, **44**: 881-899.
- [16] Nelson P F, Quigley S M. Nonmethane hydrocarbons in the atmosphere of Sydney, Australia [J]. *Environmental Science & Technology*, 1982, **16**(10): 650-655.
- [17] Rappe C, Kjeller L O, Bruckmann P, *et al.* Identification and quantification of PCDDs [polychlorinated dibenzo-p-dioxins] and PCDFs [polychlorinated dibenzofurans] in urban air [J]. *Chemosphere*, 1988, **17**(1): 3-20.
- [18] Aronian P F, Scheff P A, Wadden R A. Wintertime source-reconciliation of ambient organics [J]. *Atmospheric Environment*, 1989, **23**(5): 911-920.
- [19] National Research Council (NRC). Committee on tropospheric ozone formation and measurement. Rethinking the ozone problem

- in urban and regional air pollution [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1991.
- [20] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Mixing ratios of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Karachi, Pakistan [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (2): 3429-3443.
- [21] Kirchstetter T W, Singer B C, Harley R A, *et al.* Impact of oxygenated gasoline use on California light-duty vehicle emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(2): 661-670.
- [22] Derwent R G, Davies T J, Delaney M, *et al.* Analysis and interpretation of the continuous hourly monitoring data for C2-C8 hydrocarbons at 12 United Kingdom sites during 1996 [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(2): 297-312.
- [23] Suzanne Hassoun S, Pilling M J, Bartle K D. A catalogue of urban hydrocarbons for the city of Leeds; atmospheric monitoring of volatile organic compounds by thermal desorption-gas chromatography[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 1999, **1**(5):453-458.
- [24] Wang X, Sheng G, Fu J, *et al.* Urban roadside aromatic hydrocarbons in three cities of the Pearl River Delta, People's Republic of China [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36** (33):5141-5148.
- [25] Sax S N, Bennett D H, Chillrud S N, *et al.* Differences in source emission rates of volatile organic compounds in inner-city residences of New York City and Los Angeles [J]. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 2004, **14** (S1):S95-S109.
- [26] Parra M A, Gonzalez L, Elustondo D, *et al.* Spatial and temporal trends of volatile organic compounds (VOC) in a rural area of northern Spain [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **370**(1): 157-167.
- [27] 李家熙,王军芝,饶竹,等. 燃煤过程中氯氟烃的产生及释放 [J]. *岩矿测试*, 2004, **23** (1):1-5.

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