

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897-20140611001

夏芬美, 李红, 李金娟, 等. 北京市东北城区夏季环境空气中苯系物的污染特征与健康风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2014, 9(6): 1041-1052

Xia F M, Li H, Li J J, et al. Characteristics and health risk assessment of atmospheric benzene homologues in summer in the northeastern urban area of Beijing, China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(6): 1041-1052 (in Chinese)

# 北京市东北城区夏季环境空气中苯系物的污染特征与健康风险评价

夏芬美<sup>1,2</sup>, 李红<sup>2,\*</sup>, 李金娟<sup>1</sup>, 柴发合<sup>2</sup>, 李宏姣<sup>3</sup>, 张玉洁<sup>2</sup>, 王学中<sup>2</sup>, 张玮琦<sup>2</sup>, 毕方<sup>2</sup>

1. 贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025

2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012

3. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

收稿日期: 2014-06-11

录用日期: 2014-08-29

**摘要:** 于 2013 年 8 月 2 日至 31 日, 利用 Airmo VOC 在线分析仪开展了北京市东北城区环境空气中挥发性有机物(VOCs)的在线监测, 分析了其中 16 种苯系物的污染水平、变化特征、来源及其臭氧形成潜势(OFP), 并采用 US EPA 的健康风险评价模型对 BTEX(苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯)和苯乙烯的人体健康风险进行了评价。结果表明, 16 种苯系物在观测期间总平均质量浓度为  $10.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 其中 BTEX 的质量浓度均值为  $7.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 约占总苯系物质量浓度的 72%。苯系物的质量浓度呈现明显的一次污染物日变化特征, 即早晚较高, 中午较低。苯与甲苯的质量浓度比值(B/T)平均为 0.39, 说明除机动车尾气外, 涂料和溶剂的挥发释放对大气中苯系物也可能具有重要贡献。间-对二甲苯、1,2,4-三甲苯和甲苯的 OFP 值较高, 对北京市大气臭氧光化学形成具有显著贡献。BTEX 和苯乙烯对人体的非致癌风险危害商值在  $8.70\text{E-}05$  至  $3.76\text{E-}02$  之间, 危害指数为  $6.19\text{E-}02$ , 对暴露人群尚不存在明显的非致癌风险; 而苯的致癌风险值为  $8.80\text{E-}06$ , 超过了 US EPA 的建议值  $1.00\text{E-}06$ , 显示苯对研究区居民身体健康存在潜在的致癌风险。

**关键词:** 环境空气; 苯系物; 污染水平; 健康风险; 北京市

**文章编号:** 1673-5897(2014)6-1041-12 **中图分类号:** X171.5 **文献标识码:** A

## Characteristics and Health Risk Assessment of Atmospheric Benzene Homologues in Summer in the Northeastern Urban Area of Beijing, China

Xia Fenmei<sup>1,2</sup>, Li Hong<sup>2,\*</sup>, Li Jinjuan<sup>1</sup>, Chai Fahe<sup>2</sup>, Li Hongjiao<sup>3</sup>, Zhang Yujie<sup>2</sup>, Wang Xuezhong<sup>2</sup>, Zhang Weiqi<sup>2</sup>, Bi Fang<sup>2</sup>

1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China

2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

3. College of Geo-Exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Received 11 June 2014

accepted 29 August 2014

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05010200); 国家环境保护公益性行业科研专项(201409005)

**作者简介:** 夏芬美(1988-), 女, 硕士, 研究方向为大气环境化学, E-mail: littlesummer55@sina.cn

\* **通讯作者**(Corresponding author), E-mail: lihong@craes.org.cn

**Abstract:** Online monitoring of atmospheric volatile organic compounds in the northeastern urban area of Beijing was carried out continuously by Airmo VOC monitor from August 2nd to 31st, 2013. The levels, temporal variations, sources and the ozone formation potentials of the 16 species of benzene homologues were studied, and human health risk of BTEX and styrene was assessed by US EPA health risk assessment model. It showed that the average mass concentration of benzene homologues was  $10.36 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  during the observation, and of them, the average mass concentration of BTEX was  $7.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  accounting for 72%. Benzene homologues showed characteristics of primary pollutant, namely, higher concentrations in the morning and evening, and lower at noontime. The average mass concentration ratio of benzene to toluene (0.39) indicated that vehicular exhausting, paints and solvents volatilizing may be the important sources. The ozone formation potentials of m/p-xylene, 1,2,4-trimethylbenzene and toluene showed high values, indicating their significant contribution to the atmospheric ozone in Beijing. Health risk assessment showed that the non-cancer HQ (hazard quotient) of BTEX and styrene changed from  $8.70\text{E-}05$  to  $3.76\text{E-}02$  and HI (hazard index) was  $6.19\text{E-}02$ , which suggests no obvious adverse non-cancer health impact on the exposed population. On the other hand, benzene has potential cancer risk of  $8.80\text{E-}06$ , exceeding the value of  $1.00\text{E-}06$  recommended by US EPA, indicating a potential cancer risk to the exposed population.

**Keywords:** ambient air; benzene homologues; ambient level; health risk assessment; Beijing

大气挥发性有机化合物(VOCs)不仅对近地面臭氧、大气细粒子的形成和大气氧化性增强有着显著的贡献,而且会对人体健康产生不利的影响<sup>[1-3]</sup>。苯系物是环境空气中大气光化学反应活性较强的一类VOCs,对臭氧和二次有机气溶胶的生成贡献较大<sup>[4]</sup>;此外,长期接触环境空气中苯系物不仅会刺激人体皮肤和黏膜,而且对人体的呼吸系统、造血系统和神经系统等会有慢性或急性损害<sup>[5-7]</sup>。苯在1987年被国际癌症研究机构(IARC)确定为人类I类致癌物质,长期暴露在含苯浓度很高的环境空气中,会增加城市居民患癌症的风险,并可能由此诱发白血病和淋巴疾病<sup>[8]</sup>。目前,我国尚未将VOCs纳入常规监测项目,我国新发布的环境空气质量标准(GB3095—2012)未涉及到苯系物的限值,有关我国VOCs环境空气质量基准的研究尚处于起步阶段。

作为我国的首都,北京市现在面临着巨大的环境压力,近年来频繁出现了灰霾天气,近地面臭氧和大气细粒子污染已经受到人们的高度关注,针对近地面臭氧和大气细粒子重要前体物VOCs的污染控制也迫在眉睫<sup>[9]</sup>。研究表明,近年北京市环境空气中苯的质量浓度年均值高达 $(8.9 \pm 3.9) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (2008.10—2009.10)<sup>[10]</sup>、 $(7.1 \pm 3.3) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (2007.12—2010.11)<sup>[11]</sup>,超过了欧盟委员会制定的关于苯的质量浓度年均值的基准 $1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  (2010)的8倍和9倍,也超过了日本( $3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、印度( $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )、韩国( $5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ )等国家推荐的大气中苯的阈值(CAI-A-

sia, 2009)<sup>[11]</sup>。因此,非常有必要开展北京市大气中苯系物的污染特征及其对居民身体健康风险评价的研究。

目前,关于环境空气中VOCs污染特征的研究,大多采用离线短时采样分析技术,难以满足针对大气VOCs高时间分辨率研究的需要<sup>[12]</sup>。本研究利用在线监测技术,于2013年8月2日至31日对北京市环境空气中56种VOCs进行了连续30天的监测,在分析16种苯系物污染特征的基础上,采用US EPA的健康风险评价模型,研究苯等6种苯系物物种的人体健康风险,为北京市大气苯系物对人体健康影响研究积累基础数据,并为北京市大气VOCs的污染防控提供依据。

## 1 材料与方法(Materials and methods)

### 1.1 采样点

采样点设在北京市朝阳区的中国环境科学研究院大气光化学烟雾模拟实验室二楼楼顶,距地面高度约8 m,周边没有明显的局地污染源。采样点离北五环约2 km,毗邻几大居民社区,周边居住人口密度较大,适于开展城市环境空气中苯系物污染状况及健康风险评价研究,监测结果能够反映该区域大部分居民呼吸带的空气质量,具有一定的代表性。

### 1.2 仪器设备

采用法国CHROMATE-SUD公司生产的GC-866 Airmo VOC分析系统开展环境空气中VOCs的

自动连续监测,该系统由空气采样与前浓缩单元、挥发性有机化合物测量单元、氢气发生单元、零气发生单元、自动校准单元、系统控制单元与数据采集单元组成。

VOCs 测量单元包括 AirmoVOC C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> 和 Airmo-VOC C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> 两台分析仪,由两组采样和样品预浓缩吸附冷阱系统和两组分离色谱柱(0.2 mm 金属细毛管色谱柱)系统组成。一台用于低沸点的 C<sub>2</sub>-C<sub>6</sub> 监测,一台用于高沸点的 C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> 监测。检测器均为火焰离子化检测器(FID),可同时在线分析 56 个 VOCs 物种;时间分辨率为 30 min,定量限为  $0.1 \sim 100 \times 10^{-9}$ ,灵敏度可以满足环境空气中 VOCs 的实时在线监测。在观测期间,采用 GC-866 AirmoVOC C<sub>6</sub>-C<sub>12</sub> 分析系统共检测出 16 种苯系物。

### 1.3 质量保证与质量控制

仪器安装在一个相对比较稳定的室内环境里,采取安装空调、采样管外面包裹一层加热套和一层保温套等措施使仪器在 25℃ ~ 34℃ 条件下运行。为确保观测到的数据有效性和可靠性,仪器配有自动校准和自动线性化修正等内置质量控制系统。在监测期间仪器校准采取内部校准的原则,内部校准系统为 3 根装有一定浓度的正丁烷、正己烷、苯的渗透管。观测期间对在线 VOCs 分析仪于每 24 h 进行 2 次自动内校准序列,内部校准系统对仪器进行标定时,不对环境样品进行监测;另外通过仪器配套的软件可以查询保留时间、峰面积、浓度分析曲线,实现监测数据的可追溯性。

### 1.4 数据处理

根据内校准数据对苯系物质量浓度数据进行剔除,观测区间内校准数据在正常范围之内波动,没有需要舍弃的数据。每天 2 次内校准时间的数据系统软件自动扣除,除每天晚上 01:00 和 02:00 的监测数据只有 1 个外,其余每小时均有 2 个监测数据。

观测期间共获得 22 080 个有效数据,通过计算每个苯系物物种 1 小时内 2 个浓度值的平均值获得每个苯系物物种质量浓度 1 小时均值,根据苯系物质量浓度 1 小时均值,利用 Microsoft Excel 软件中的函数分别计算得到苯系物质量浓度日均值和月均值,在此基础上计算苯与甲苯质量浓度的比值(B/T)、臭氧生成潜势(OFP)等。通过中国气象局数据共享平台获得了研究区观测期间的平均气温、相对湿度等气象要素。

健康风险评价(health risk assessment, HRA)是以风险度为评价指标,把人体健康与环境污染关联

起来,定性或定量描述环境中污染物对人体健康产生不利影响的风险。环境污染物的健康风险评价通常分为致癌风险评价和非致癌风险评价。US EPA 在 1989 年提出了一种专门针对特定场所的吸入途径健康风险评价方法(EPA/540/1-89/002),并在 2009 年 1 月进行了修订(EPA-540-R-070-002)。新方法指出,当评价室外污染物暴露途径为吸入途径的健康风险时,应该使用环境空气中污染物的质量浓度日均值代替基于人体呼吸速率(IR)和体重(BW)计算得到的吸入摄入量( $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{day})^{-1}$ )作为暴露量( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[3]</sup>。

#### 1) 非致癌风险评价

非致癌风险评价用危害指数(hazard index, HI)表示,定义为由于吸入途径暴露造成的长期摄入量与参考剂量的比值,是以每日暴露的剂量来预测长期暴露在此剂量下不会产生任何危害的效应。

慢性和亚慢性暴露时的暴露浓度(exposure concentration):

$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (1)$$

非致癌风险危害商值(hazard quotient):

$$HQ = EC / (RfC \times 1\,000) \quad (2)$$

危害指数(hazard index)为多种污染物危害商值之和。

$$HI = \sum HQ_i \quad (3)$$

#### 2) 致癌风险评价

致癌风险由风险值(Risk)表示,由呼吸途径导致致癌风险的参考摄入量(或致癌强度系数)与终生平均暴露浓度的乘积表示<sup>[4]</sup>。

$$Risk = EC \times IUR \quad (4)$$

式(1)~(4)中 CA 为环境浓度,  $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ; ET 为暴露时间,  $24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$ ; EF 为暴露频率,  $365 \text{ d} \cdot \text{y}^{-1}$ ; ED 为人体终生暴露时间, 70 y; AT 为平均时间,  $70 \times 365 \times 24 \text{ h}$ ; RfC 为单位吸入致癌风险浓度,  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ; IUR 为参考浓度,  $\text{m}^3 \cdot \mu\text{g}^{-1}$ 。由于目前在 US EPA 综合风险信息数据库(IRIS)数据库(<http://www.epa.gov/iris>)中仅能查到苯系物中苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯的 RfC、IUR 值。因此,本研究仅针对这 6 种苯系物物种开展研究区居民(主要是成人)的健康风险评价。

## 2 结果讨论(Results and discussion)

### 2.1 苯系物的浓度水平与变化特征

#### 2.1.1 浓度水平

苯系物在观测区间总平均质量浓度(先分别计

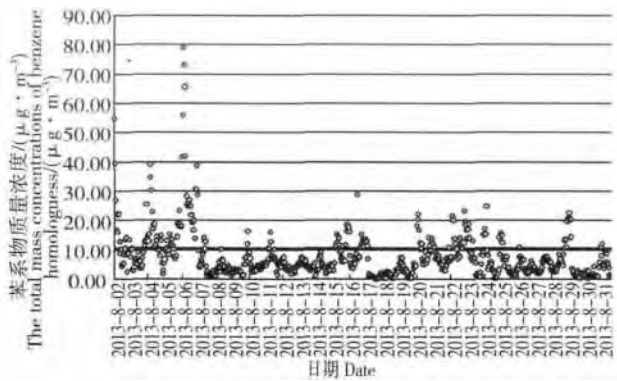


图1 研究区观测期间环境空气中  
苯系物质量浓度的逐时分布状况

Fig. 1 Time series of hourly total mass concentrations  
of benzene homologues in the ambient air of the study area

算各物种质量浓度的平均值,再求和) 为  $10.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,变化范围为  $0.19 \sim 79.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (见图1)。苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯、1,2,4-三甲基苯、1,2,3-三甲基苯质量浓度的1小时均值分别为  $1.13 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $2.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $1.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $0.43 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,除正丙苯、1,3,5-三甲基苯、对乙基甲苯外,其余6种物种质量浓度均值均低于  $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。甲苯的质量浓度均值最高,间-对二甲苯和苯次之,再次为乙苯和苯,对二乙基苯的质量浓度最低( $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) (见表1)。

最近几年来,国内外学者对城市环境空气中苯系物污染状况开展了一系列研究。与冬季比较,夏季降水较多,可以提高污染物的稀释混合深度及对

表1 研究区观测期间环境空气中16种苯系物质量浓度的1小时均值

Table 1 Hourly mass concentrations of 16 species of benzene homologues in the ambient air of the study area

| 污染物<br>Pollutant                     | 平均浓度<br>Mean concentration |                                 | 浓度范围<br>Concentration range |                                 | 检出限 MDL<br>$10^{-9}(\text{V/V})$ |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|                                      | $10^{-9}(\text{V/V})$      | $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ | $10^{-9}(\text{V/V})$       | $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ |                                  |
| 苯<br>Benzene                         | 0.323                      | 1.13                            | 0.01 ~ 2.10                 | 0.03 ~ 7.32                     | 0.017                            |
| 甲苯<br>Toluene                        | 0.710                      | 2.92                            | 0.01 ~ 4.22                 | 0.04 ~ 17.36                    | 0.016                            |
| 乙苯<br>Ethylbenzene                   | 0.242                      | 1.15                            | 0.01 ~ 2.54                 | 0.05 ~ 12.04                    | 0.014                            |
| 间-对二甲苯<br>m/p-Xylene                 | 0.324                      | 1.53                            | 0.01 ~ 4.80                 | 0.05 ~ 22.75                    | 0.014                            |
| 苯乙烯<br>Styrene                       | 0.019                      | 0.09                            | 0.01 ~ 0.52                 | 0.05 ~ 2.42                     | 0.014                            |
| 邻二甲苯<br>o-Xylene                     | 0.152                      | 0.72                            | 0.05 ~ 1.89                 | 0.05 ~ 8.96                     | 0.014                            |
| 异丙基苯<br>i-Propylbenzene              | 0.018                      | 0.10                            | 0.03 ~ 0.08                 | 0.03 ~ 0.43                     | —                                |
| 正丙苯<br>n-Propylbenzene               | 0.036                      | 0.19                            | 0.03 ~ 0.10                 | 0.03 ~ 0.54                     | —                                |
| 间乙基甲苯<br>m-Ethyltoluene              | 0.021                      | 0.11                            | 0.03 ~ 0.15                 | 0.03 ~ 0.80                     | 0.012                            |
| 对乙基甲苯<br>p-Ethyltoluene              | 0.071                      | 0.38                            | 0.03 ~ 0.60                 | 0.03 ~ 3.22                     | 0.012                            |
| 1,3,5-三甲基苯<br>1,3,5-Trimethylbenzene | 0.042                      | 0.22                            | 0.03 ~ 0.33                 | 0.03 ~ 1.74                     | 0.013                            |
| 邻乙基甲苯<br>o-Ethyltoluene              | 0.027                      | 0.15                            | 0.05 ~ 0.24                 | 0.05 ~ 1.29                     | 0.012                            |
| 1,2,4-三甲基苯<br>1,2,4-Trimethylbenzene | 0.191                      | 1.03                            | 0.05 ~ 0.59                 | 0.05 ~ 3.17                     | —                                |
| 1,2,3-三甲基苯<br>1,2,3-Trimethylbenzene | 0.081                      | 0.43                            | 0.05 ~ 0.49                 | 0.05 ~ 2.63                     | —                                |
| 间二乙基苯<br>m-Diethylbenzene            | 0.023                      | 0.14                            | 0.03 ~ 0.41                 | 0.03 ~ 2.46                     | —                                |
| 对二乙基苯<br>p-Diethylbenzene            | 0.012                      | 0.07                            | 0.03 ~ 0.06                 | 0.03 ~ 0.36                     | —                                |
| 苯系物<br>Benzene homologues            | 2.292                      | 10.36                           | 0.19 ~ 79.11                | 0.05 ~ 17.46                    | —                                |

注 “—”表示尚无相关信息。

Notd “—” no data.

污染物的冲刷作用,减少 VOCs 的积累;在温度很高,紫外线辐射较强的气象条件下 VOCs 化学消耗量很大。许多学者研究发现城市冬季 BTEX 浓度普遍高于夏季<sup>[15-17]</sup>。为了增强可比性,选取国内外其他城市环境空气中夏季 BTEX 的浓度水平与本研究进行比较(图2)。2006年,北京夏季环境空气中的 BTEX 质量浓度平均值( $28.50 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[18]</sup>高于位于郊区的武清( $16.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[19]</sup>,远远低于广州( $58.52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[20]</sup>和土耳其的科喀艾里( $96.82 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[21]</sup>;2009年,北京夏季环境空气中的 BTEX 污染水平( $19.08 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[22]</sup>比天津( $48.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[23]</sup>的一半还要低;2010年,北京市的 BTEX 污染水平( $10.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[24]</sup>比天津( $20.99 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[25]</sup>和深圳( $71.58 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[26]</sup>的污染更轻;2012年,北京市的 BTEX 污染水平( $10.94 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[27]</sup>比天津( $38.70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[28]</sup>的要低,高于伊朗的阿瓦士( $4.37 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )<sup>[29]</sup>;本研究得到的 BTEX 质量浓度1小时均值( $7.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )比2005年北京夏季 BTEX 污染水平<sup>[30]</sup>减少了77.49%,苯的浓度减少了79.18%,甲苯的浓度减少了73.78%。观测期间得到的甲苯质量浓度均值为 $2.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,低于WHO推荐的环境空气中甲苯的日均接触浓度限值( $8.23 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )。除北京<sup>[22, 24, 27]</sup>、武清<sup>[19]</sup>和南京<sup>[31]</sup>环境空气中甲苯的浓度低于该限值外,其他国内城市甲苯的浓度均超过该限值。

总体而言,与其他城市苯系物污染水平比较,研

究区夏季环境空气中的 BTEX 污染水平低于国内同时期的天津、深圳、广州,但是高于同时期的武清;北京市夏季大气中 BTEX 及其各物种的浓度呈现出逐年递减的趋势,这可能与近年来北京市政府加强了大气污染防治有关。

### 2.1.2 逐日变化特征

研究区观测期间16种苯系物与BTEX(苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯)质量浓度的逐日变化有7个变化周期(图3)。8月2日至6日,苯系物质量浓度明显高于平均值( $10.36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),其中在8月6日出现本次观测的最大值 $36.68 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;8月6日平均气温为 $29.4^\circ\text{C}$ ,最高气温为 $33.6^\circ\text{C}$ ,相对湿度较大(81%),静风,容易造成污染物的积累;苯系物高值的出现还有可能与源排放强度有关,如白天地面除草机的工作,附近居民刷油漆或者建筑装修材料的释放等。在8月7日至19日期间,除15、16日外,苯系物质量浓度在平均值附近波动,其他时间均明显低于平均值,在8月18日出现最小值。8月20日至27日期间,除20、22日外,苯系物质量浓度均低于平均值。从28日开始至31日监测结束,苯系物质量浓度出现了小幅度的下降。BTEX的逐日变化趋势与苯系物一致。

因此,环境空气中苯系物质量浓度的逐日变化情况主要与气象条件(温度、湿度、静风等)和污染源排放强度密切相关。

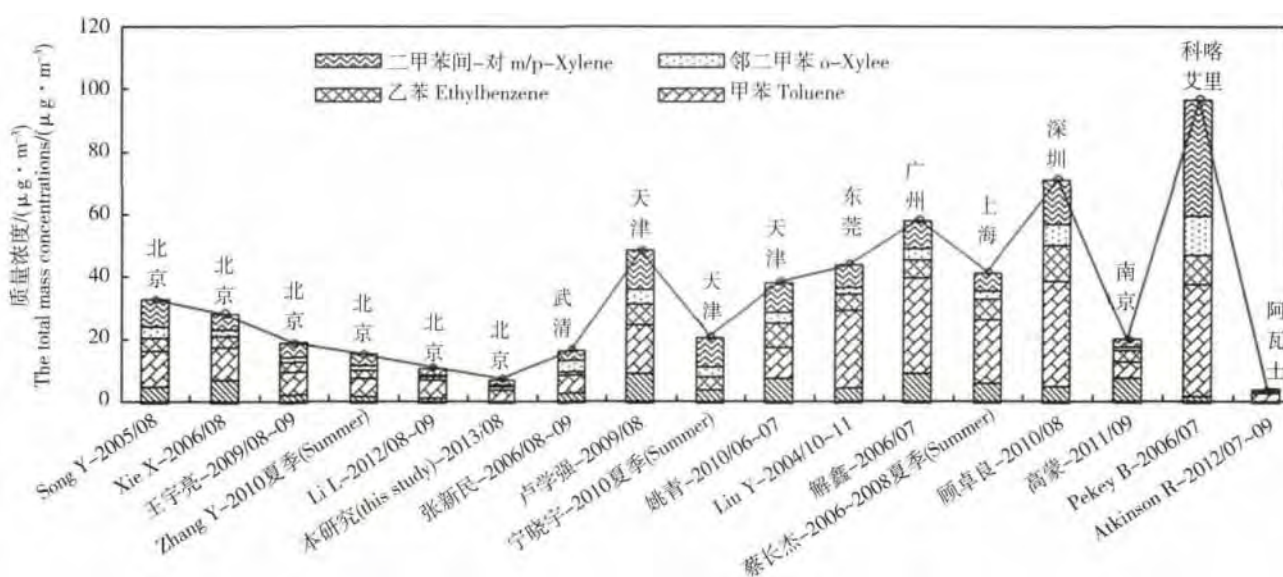


图2 北京与国内外其他城市大气中 BTEX 质量浓度的对比

Fig. 2 Comparison of the mass concentrations of BTEX in the ambient air between Beijing and other cities

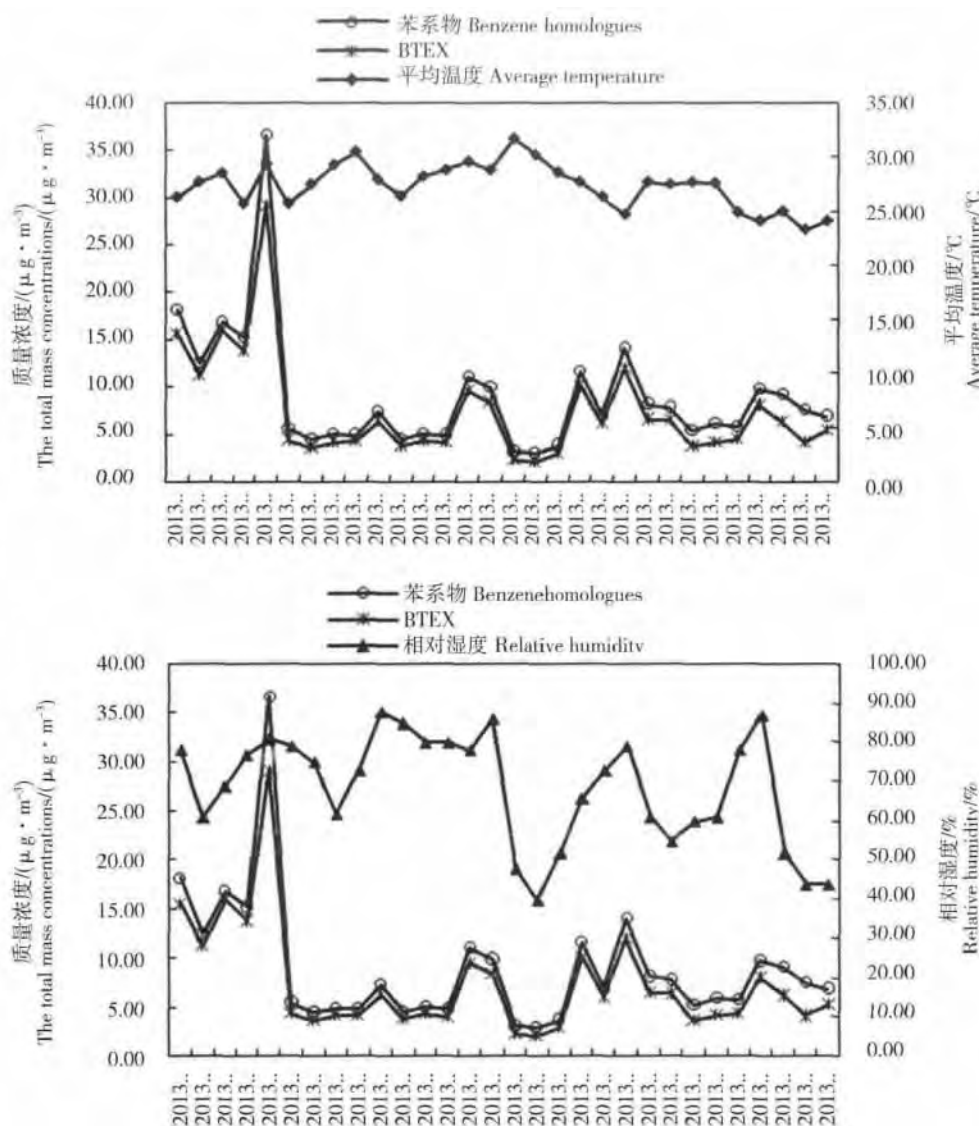


图3 研究区观测期间环境空气中苯系物、BTEX 质量浓度的逐日变化与气象因子变化情况

Fig. 3 Daily variation of the total mass concentrations of benzene homologues and BTEX in the ambient air, and meteorological data of the study area

### 2.1.3 日变化特征

图4显示了研究区观测期间环境空气中16种苯系物与BTEX的日变化情况。观测点环境空气中苯系物质量浓度日变化规律与交通早晚高峰值对应不太明显,说明这种日变化特征并不完全受交通排放影响,还与其他排放源有关,同时也与气象条件的变化密切相关。观测期间苯系物质量浓度1小时均值在中午15:00左右出现最低浓度值,可能是北京市夏季气温较高,此时段光强度较强,大气边界层高度升高,对流作用比较激烈,快速的光化学反应消耗和污染物扩散速度显著降低了空气中苯系物的浓度。夜间大气中苯系物呈现出缓慢积累升高趋势,

并出现2个明显的峰值,这是因为傍晚日落前后,地面开始降温,对流作用减弱,混合边界层降低,光化学反应减弱,下午机动车和其他污染源排放不易扩散而导致累积。本研究中苯系物的日变化特征与孙杰等<sup>[9]</sup>、姚青等<sup>[28]</sup>的研究结果相似。BTEX质量浓度1小时均值日变化情况呈双峰型,与苯系物的日变化趋势大体一致;甲苯和间-对二甲苯的日变化幅度较大,苯与邻二甲苯的日变化幅度较小。

苯系物的质量浓度1小时均值日变化情况呈现明显的一次污染物日变化特征,即早晚浓度相对较高,中午15:00左右出现低谷;其日变化情况与当时的气象条件、光化学反应强弱和污染源的排放强度密切相关。



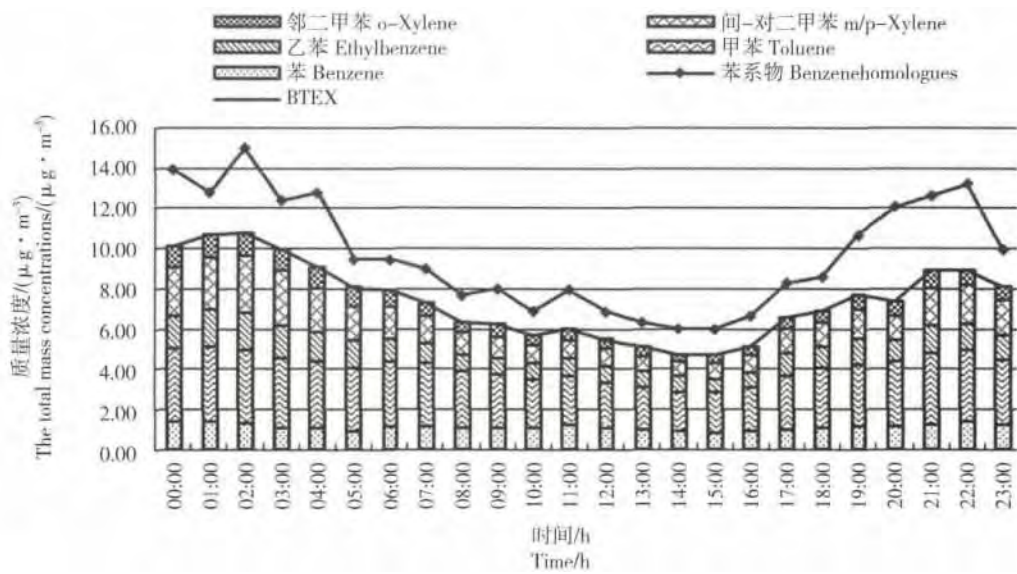


图 4 研究区观测期间环境空气中苯系物与 BTEX 质量浓度日变化

Fig. 4 Diurnal variation of the total mass concentrations of benzene homologues and BTEX in the ambient air of the study area

2.2 苯系物的组成特征与来源识别

2.2.1 苯系物的组成特征

从 16 种苯系物质量浓度组成特征来看, 甲苯、间-对二甲苯、苯、乙苯、1,2,4-三甲基苯、邻二甲苯为浓度比较高的 6 种苯系物, 所占苯系物总浓度的比例分别为 28.17%、14.81%、11.08%、10.89%、9.92%、6.94% (图 5)。含量最小的 6 种苯系物物种为邻乙基甲苯 ( $0.15 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、间二乙基苯 ( $0.14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、间乙基甲苯 ( $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、异丙基苯 ( $0.10 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )、苯乙烯 ( $0.09 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) 和对二乙基苯 ( $0.07 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 约占 16 种苯系物总浓度的 6.28%。

BTEX 的质量浓度的 1 小时均值之和为  $7.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 占苯系物总浓度的 72%, 是苯系物中含量最为丰富的污染组分。

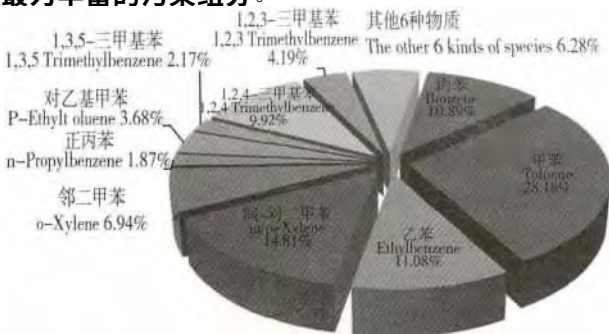


图 5 研究区观测期间环境空气中苯系物质量浓度物种组成图

Fig. 5 Relative composition of the benzene homologues in the ambient air of the study area

2.2.2 苯系物之间的比值及来源识别

苯与甲苯的比值 (B/T) 通常用来识别 VOCs 的来源。Atkinson 等<sup>[32]</sup>、邵敏等<sup>[33]</sup>的研究表明, 当 B/T 在 0.5 左右, 并且与异戊烷有很好的相关性时, 通常是机动车排放的特征; 较高的 B/T 说明其来源可能受到煤和生物质等燃烧的影响<sup>[34]</sup>; B/T 偏小则说明除交通源外还有涂料的使用、溶剂的挥发等导致额外的甲苯排放。Barletta 等<sup>[35]</sup>研究发现我国大部分城市道路旁大气中 B/T 为 ( $0.6 \pm 0.2$ ), 表明机动车尾气排放是 VOCs 的主要来源; Liu 等<sup>[36]</sup>也报道了北京市路旁大气中的 B/T 为 0.61。本研究 B/T 为 0.39, 比天津 (0.77)<sup>[38]</sup>的要低很多, 但是比东莞 (0.18) 和深圳 (0.16)<sup>[37-39]</sup>的高很多。由此推断出机动车尾气排放是研究区环境空气中苯系物的主要来源, 同时也存在甲苯的额外排放。夏季, 溶剂和涂料在使用过程中容易挥发到大气中, 对苯系物的影响较大。王宇亮等 (0.33)<sup>[32]</sup>、宁晓宇等 (0.27)<sup>[33]</sup>、解鑫等 (0.30)<sup>[34]</sup>、蔡长杰等 (0.32)<sup>[35]</sup>等的研究结果与本研究结果一致。

另外, 也可以通过对 BTEX 不同组分之间的相关性分析来阐明苯系物的可能来源。研究区观测期间环境空气中 BTEX 各物种之间的相关性较好 (表 2), 特别是甲苯、苯和二甲苯之间的相关系数都在 0.80 以上, 邻二甲苯与间-对二甲苯的相关性最高为 0.93。苯与二甲苯的相关性 (0.74~0.75) 相对较小, 这可能与二者的光化学活性有关。苯的光化学活性最低, 二甲苯较高, 即二者的光化学活性差异较大导致

它们的环境空气中降解速率不同。苯与乙苯的相关性最低为 0.71,说明其同源性相对较差。

苯系物的特征比值和相关性分析表明除机动车尾气外,涂料和溶剂的挥发释放对大气中苯系物也可能具有重要贡献。北京市政府应采取有效的措施,在夏季加强对机动车尾气排放、涂料、溶剂的挥发和建筑装修材料的释放等苯系物重要排放源的控制。

表2 研究区观测期间 BTEX 各物种之间的相关性

Table 2 Correlation coefficients between BTEX in the study area

| 污染物<br>Pollutant     | 苯<br>Benzene | 甲苯<br>Toluene | 乙苯<br>Ethylbenzene | 间-对二甲苯<br>m/p-Xylene | 邻二甲苯<br>o-Xylene |
|----------------------|--------------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|
| 苯<br>Benzene         | 1            |               |                    |                      |                  |
| 甲苯<br>Toluene        | 0.85         | 1             |                    |                      |                  |
| 乙苯<br>Ethylbenzene   | 0.71         | 0.78          | 1                  |                      |                  |
| 间-对二甲苯<br>m/p-Xylene | 0.75         | 0.85          | 0.89               | 1                    |                  |
| 邻二甲苯<br>o-Xylene     | 0.74         | 0.8           | 0.87               | 0.93                 | 1                |

### 2.3 臭氧生成潜势

目前关于大气中 VOCs 反应活性的研究方法主要采用等效丙烯浓度、 $\cdot\text{OH}$  消耗速率和 VOCs 的增量反应活性(maximum incremental reactivity, MIR)来表征<sup>[4]</sup>。等效丙烯浓度和 $\cdot\text{OH}$  消耗速率仅考虑到 VOCs 与 $\cdot\text{OH}$  自由基的反应速率(动力学活性);MIR 则表征单位质量浓度的 VOCs 改变引起的臭氧生成或损耗的变化,该方法考虑了等效丙烯浓度和 $\cdot\text{OH}$  消耗速率所忽略的机理活性差异。本文采用 MIR 分析方法研究苯系物的臭氧生成潜势(OFP),估算苯系物各组分对臭氧生成的贡献,MIR 参数来自文献<sup>[4]</sup>。图6显示了观测期间环境空气中苯系物的臭氧生成潜势,从图中可以看出,间-对二甲苯的 OFP 最高,为  $11.35 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ;1,2,4-三甲苯和甲苯次之,苯乙烯的臭氧生成潜势最小。本研究结果与曹函玉等<sup>[4]</sup>、Duan 等<sup>[21]</sup>和 Hoque 等<sup>[3]</sup>等研究结果一致。

根据 MIR 方法评估得出,研究区观测期间环境空气中,间-对二甲苯、1,2,4-三甲苯、甲苯和乙苯臭氧生成潜势量较高,是苯系物中的关键活性组分,对北京市大气臭氧光化学形成具有显著贡献。

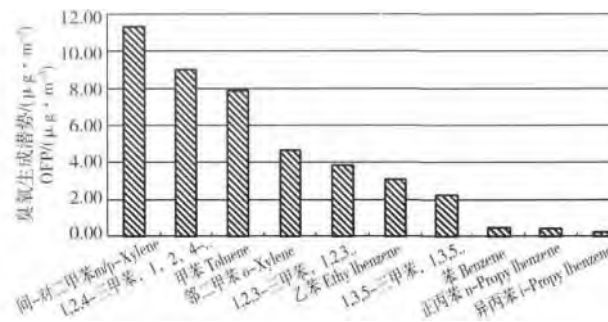


图6 研究区观测期间环境空气中臭氧生成潜势较高的前10种苯系物

Fig. 6 10 kinds of benzene homologues for ozone formation potentials (OFP) in the ambient air of the study area

### 2.4 健康风险评价

研究区观测期间所检测的16种苯系物物种中,有6种属于US EPA公布的有毒有害空气污染物(<http://epa.gov/ttn/atw/188polls.html>),即苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯,其中苯是国际致癌机构公认的I类致癌物质,因此有必要对其开展人体健康风险评价研究,以评价其对居住区人群的非致癌风险和致癌风险。根据US EPA综合风险信息数据库(IRIS)数据库中推荐的剂量-效应关系数据(表3),以环境空气中检测到的苯、甲苯、乙苯、间-对二甲苯、邻二甲苯、苯乙烯1小时均值日均值为研究对象,评价研究区周边居民由于吸入环境空气中这6种苯系物而导致的非致癌和致癌风险。需要注意的是,致癌物苯也会产生非致癌风险,需要评价其非致癌风险;乙苯和苯乙烯对人体可能存在致癌风险,但是目前没有相关的致癌风险评价参数。因此,本次致癌风险评价不包括乙苯和苯乙烯;对于其他4种苯系物,因其不是致癌物质,只评价其非致癌风险。在本次研究中,北京夏季可能由于气象扩散条件较好,紫外辐射较强,光化学反应中苯系物的消耗量较大,大气中苯系物的浓度明显低于冬季,而污染物人体健康风险是基于人体终生暴露量进行评估,因此,本研究所获苯系物的健康风险评估结果可能仅代表苯系物健康风险的一种下限。

基于上述健康风险评价模型,计算环境空气中6种苯系物的日平均暴露浓度(EC)、非致癌风险危害商值(HQ)、危害指数(HI)和终生致癌风险值(Risk),结果如表4所示。从表4可以看出,6种苯系物的EC范围为  $0.09 \sim 2.92 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,HQ范围为  $8.70\text{E}-05 \sim 3.76\text{E}-02$ ,HI为  $6.19\text{E}-02$ 。苯和间-对二甲苯的非致癌风险危害商值比其他4种苯系物物种更高,是环境空气中非致癌危害较大的苯系物物种。苯的Risk为  $8.80\text{E}-06$ 。目前中国还没有颁布相关的健康风险



评价标准,参照 US EPA 标准,对于非致癌风险,当 HI ≥1 时,居民长期暴露在此环境条件下可能表现出不良反应。由表 3 可以看出,研究区环境空气中苯系物的 HI 小于 1,说明苯系物对研究区人群尚不存在非致癌风险;苯的终生致癌风险值较高,超过了 US EPA 建议值(1E-06)的 8.8 倍,说明苯对研究区居民身体健康存在潜在的致癌风险。北京市政府有关部门需针对苯等污染物采取一定的污染减排和控制措施,减少城市居民的患癌症的风险和其他身体伤害。

目前,我国尚未颁布完善的空气污染物健康风险评价与管理指南,没有开展常规化环境与健康综合监测,基于城市环境空气中苯系物的吸入途径导致的健康风险评价研究相对较少。为深入了解国内大部分城市大气中苯系物的健康风险状况,对我国学者近年来关于城市环境空气苯系物的健康风险评价研究结果进行了筛选和总结(表 4)。由表 4 可以看出,针对大气中苯系物的健康风险评价研究的案例数与所涉及的城市数量较少,主要集中在比较发

表 3 研究区观测期间环境空气中 6 种苯系物的日平均暴露浓度和健康风险评价  
Table 3 Daily exposure concentrations and health risk assessment of 6 species of benzene homologues in the ambient air of the study area

| 污染物<br>Pollutant                    | EC/( $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | Rfc/( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) | IUR/( $\text{m}^3\cdot\mu\text{g}^{-1}$ ) | HQ       | Risk     |
|-------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|----------|----------|
| 苯 Benzene                           | 1.13                                   | 0.03                                  | 7.80E-06                                  | 3.76E-02 | 8.80E-06 |
| 甲苯 Toluene                          | 2.92                                   | 5                                     | —                                         | 5.84E-04 | —        |
| 乙苯 Ethylbenzene                     | 1.15                                   | 1                                     | —                                         | 1.15E-03 | —        |
| 间-对二甲苯 m/p-Xylene                   | 1.53                                   | 0.1                                   | —                                         | 1.53E-02 | —        |
| 邻二甲苯 o-Xylene                       | 0.72                                   | 0.1                                   | —                                         | 7.19E-03 | —        |
| 苯乙烯 Styrene                         | 0.09                                   | 1                                     | —                                         | 8.70E-05 | —        |
| 危害指数 $\text{HI} = \sum \text{HQ}_i$ |                                        |                                       |                                           | 6.19E-02 |          |

注 “—”表示文章文献中无相关数据; EC 为暴露浓度, Rfc 为单位吸入致癌风险浓度, IUR 为参考浓度, HQ 为非致癌风险危害商值, Risk 为致癌风险值。  
Note “—” no data in the literature; EC, exposure concentration; Rfc, inhalation reference concentration; IUR, inhalation unit risk; HQ, hazard quotient; HI, hazard index.

表 4 研究区与国内其他城市大气中苯系物的健康风险评价结果对比  
Table 4 Comparison of the results of health risk assessment of benzene homologues between this study and other related studies in China

| 城市<br>City      | 苯<br>Benzene |          | 甲苯<br>Toluene | 乙苯<br>Ethylbenzene | 间-对二甲苯<br>m/p-Xylene | 邻二甲苯<br>o-Xylene | 苯乙烯<br>Styrene | 危害指数<br>HI | 文献<br>Reference |
|-----------------|--------------|----------|---------------|--------------------|----------------------|------------------|----------------|------------|-----------------|
|                 | Risk         | HQ       | HQ            | HQ                 | HQ                   | HQ               | HQ             |            |                 |
| 北京<br>Beijing   | 8.80E-06     | 3.76E-02 | 5.84E-04      | 1.15E-03           | 1.53E-02             | 7.19E-03         | 8.70E-05       | 6.19E-02   | 本研究             |
| 北京<br>Beijing   | 1.34E-05     | 5.73E-02 | 1.08E-03      | 1.19E-03           | 2.09E-02             | 5.32E-03         | 1.60E-04       | 8.60E-02   | [24]            |
| 北京<br>Beijing   | 4.19E-05     | 1.57E-01 | 2.39E-02      | 3.29E-03           | 8.06E-03             | 3.53E-03         | —              | 1.96E-01   | [27]            |
| 北京<br>Beijing   | 2.21E-05     | 1.58E-01 | —             | 1.69E-02           | 7.76E-03*            | —                | 1.06E-02       | 1.93E-01   | [44]            |
| 广州<br>Guangzhou | 5.34E-05     | 2.28E-01 | 3.95E-03      | 4.26E-03           | 3.06E-03             | 2.42E-03         | —              | 2.42E-01   | [13]            |
| 天津<br>Tianjin   | 2.18E-05     | —        | —             | —                  | —                    | —                | —              | —          | [45]            |
| 杭州<br>Hangzhou  | 1.22E-05     | 1.22E-01 | 2.05E-02      | 2.30E-03           | 5.25E-02             | —                | 6.00E-04       | 1.98E-01   | [46]            |
| 杭州<br>Hangzhou  | 2.32E-06     | —        | —             | —                  | —                    | —                | —              | —          | [47]            |
| 重庆<br>Chongqing | 1.94E-05     | 1.70E-01 | 1.60E-02      | 3.64E-03           | 7.02E-03*            | —                | —              | 1.97E-01   | [48]            |

注 “—”表示文献中无相关数据 “\*”表示二甲苯非致癌风险危害商值(HI)。  
Note “—” no data in the literature; “\*” the non-cancer risk value of HI of xylene.

达的城市。环境空气中苯系物的非致癌危害商值在  $8.70 \times 10^{-5} \sim 2.28 \times 10^{-1}$  范围内,多种污染物的危害指数范围为  $6.19 \times 10^{-2} \sim 2.42 \times 10^{-1}$ ,均小于 1,说明这些城市大气中这 6 种苯系物的非致癌风险值尚处于安全范围之内,不会对研究区居民产生非致癌损害;但是苯的非致癌风险危害商值较其他物种的危害商值大。这些城市环境空气中苯的致癌风险在  $2.32 \times 10^{-6} \sim 5.34 \times 10^{-5}$  之间,均大于  $1 \times 10^{-6}$ ,其中广州<sup>[27]</sup>的苯致癌风险值最大,超过了 US EPA 的建议值的 53 倍。

比对近年来关于我国城市环境空气中苯系物的健康风险评价研究结果,发现城市环境空气中苯对人体健康存在潜在的致癌风险。为了改善城市环境空气,减少居民罹患癌症等疾病的风险,我国有必要加快建立和完善环境空气中 VOCs 健康基准的进程,考虑在环境空气质量标准中增加苯这一指标。

致谢:感谢上海祥得环保科技有限公司的吕俊义工程师、范晶金工程师和邓景昊工程师在技术上的支持,感谢王小明工程师提供相关技术文件,感谢中国气象局数据共享平台提供的气象数据;感谢中国环境科学研究院段菁春博士在论文写作中给予的帮助。

通讯作者简介:李红(1969—),女,博士,研究员,主要从事大气环境化学研究。

#### 参考文献:

- [1] Laaksonen A, Kulmala M, O'Dowd C D, et al. The role of VOC oxidation products in continental new particle formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, 8(10): 2657–2665
- [2] International Agency for Research on Cancer. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans [D]. [2014-05-20]. <http://monographs.iarc.fr/ENG/Monographs/vol97/index.php>
- [3] 张俊刚,王跃思,王珊,等. 京津地区大气中非甲烷烃(NMHCs)质量浓度水平和反应活性研究 [J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 158–162  
Zhang J G, Wang Y S, Wang S, et al. Ambient mass concentration and reactivity of non-methane hydrocarbons (NMHCs) in Beijing and Tianjin cities [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2008, 21(5): 158–162 (in Chinese)
- [4] 吕子峰,郝吉明,段菁春,等. 北京市夏季二次有机气溶胶生成潜势的估算 [J]. *环境科学*, 2009, 30(4): 969–975  
Lv Z F, Hao J M, Duan J C, et al. Estimate of the formation potential of secondary organic aerosol in Beijing summertime [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 969–975 (in Chinese)
- [5] Fishbein L. An overview of environmental and toxicological aspects of aromatic hydrocarbons. I. Benzene [J]. *Science of the Total Environment*, 1984, 40(1): 189–218
- [6] Khan H A. Short review: Benzene's toxicity: A consolidated short review of human and animal studies [J]. *Human & Experimental Toxicology*, 2007, 26(9): 677–685
- [7] Smith M T, Zhang L, McHale C M, et al. Benzene, the exposure and future investigations of leukemia etiology [J]. *Chemico-Biological Interactions*, 2011, 192(1): 155–159
- [8] Guo S, Tan J, Duan J, et al. Characteristics of atmospheric non-methane hydrocarbons during haze episode in Beijing, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(12): 7235–7246
- [9] 孙杰,王跃思,吴方堃. 北京市 BTEX 的污染现状及变化规律分析 [J]. *环境科学*, 2011, 32(12): 3531–3536  
Sun J, Wang Y S, Wu F K. Analysis on status pollution and variation of BTEX in Beijing [J]. *Environmental Science*, 2011, 32(12): 3531–3536 (in Chinese)
- [10] 曹函玉,潘月鹏,王辉,等. 2008~2010 年北京城区大气 BTEX 的浓度水平及其 O<sub>3</sub> 生成潜势 [J]. *环境科学*, 2013, 34(6): 2065–2070  
Cao H Y, Pan Y P, Wang H, et al. Concentrations and ozone formation potentials of BTEX during 2008–2010 in urban Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(6): 2065–2070 (in Chinese)
- [11] CAI-Asia (Clean Air Initiative for Asian Cities Centre). Ambient Air Quality Standards in Asia. Survey Report [D]. [2014-05-20]. [http://cleanairinitiative.org/portal/system/files/AQ\\_Standards\\_Report\\_Draft\\_2\\_Dec\\_FI-NAL.pdf](http://cleanairinitiative.org/portal/system/files/AQ_Standards_Report_Draft_2_Dec_FI-NAL.pdf)
- [12] 陆思华,邵敏,王鸣. 城市大气挥发性有机物(VOCs)测量技术 [M]. 北京:中国环境科学出版社,2012: 66–80
- [13] 李雷,李红,王学中,等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价 [J]. *环境科学*, 2013, 34(12): 4558–4564  
Li L, Li H, Wang X Z, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, 34(12): 4558–4564 (in Chinese)
- [14] US EPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment) [R]. Washington D C: Office of Superfund Remediation

- tion and Technology Innovation Environmental Protection Agency, 2009
- [15] Brocco D, Fratarcangeli R, Lepore L, et al. Determination of aromatic hydrocarbons in urban air of Rome [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, 31(4): 557–566
- [16] Na K, Kim Y P. Seasonal characteristics of ambient volatile organic compounds in Seoul, Korea [J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(15): 2603–2614
- [17] Ho K F, Lee S C, Guo H, et al. Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, 322(1): 155–166
- [18] Xie X, Shao M, Liu Y, et al. Estimate of initial isoprene contribution to ozone formation potential in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, 42(24): 6000–6010
- [19] 张新民, 柴发合, 岳婷婷, 等. 天津武清大气挥发性有机物光化学污染特征及来源 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(10): 1085–1091
- Zhang X M, Chai F H, Yue T T, et al. Photochemical characteristics and sources of volatile organic compounds in Wuqing, Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(10): 1085–1091 (in Chinese)
- [20] 解鑫, 邵敏, 刘莹, 等. 大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例 [J]. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 54–62
- Xie X, Shao M, Liu Y, et al. The diurnal variation of ambient VOCs and their role in ozone formation: Case study in summer in Guangzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(1): 54–62 (in Chinese)
- [21] Pekey B, Yilmaz H. The use of passive sampling to monitor spatial trends of volatile organic compounds (VOCs) at an industrial city of Turkey [J]. *Microchemical Journal*, 2011, 97(2): 213–219
- [22] 王宇亮, 张玉洁, 刘俊锋, 等. 2009年北京市苯系物污染水平和变化特征 [J]. *环境化学*, 2011, 30(2): 412–417
- Wang Y L, Zhang Y J, Liu J F, et al. Benzene series pollution levels and variation characteristics of Beijing in 2009 [J]. *Environmental Chemistry*, 2011, 30(2): 412–417 (in Chinese)
- [23] 卢学强, 韩萌, 冉靓, 等. 天津中心城区夏季非甲烷有机化合物组成特征及其臭氧产生潜力分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, 31(2): 373–380
- Lu X Q, Han M, Ran L, et al. Characteristics of nonmethane organic compounds and their ozone formation potentials in downtown Tianjin in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(2): 373–380 (in Chinese)
- [24] Zhang Y, Mu Y, Liu J, et al. Levels, sources and health risks of carbonyls and BTEX in the ambient air of Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(1): 124–130
- [25] 宁晓宇, 王亘, 刘博. 天津市西南部苯系物浓度季节及空间变化特征 [J]. *环境科学研究*, 2012, 25(6): 639–644
- Ning X Y, Wang G, Liu B. Seasonal and spatial variation of BTEX in Southwest of Tianjin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(6): 639–644 (in Chinese)
- [26] 顾卓良, 邢海宾, 郑美玲. 在线分析宁波市北仑区VOCs组成、趋势及来源 [J]. *环境监测管理与技术*, 2012, 24(5): 34–39
- Gu Z L, Xing H B, Zheng M L. Composition, tendency and sources of VOCs in ambient air by on-line monitoring at Ningbo Beilun [J]. *The Administration and Technique of Environmental Monitoring*, 2012, 24(5): 34–39 (in Chinese)
- [27] Li L, Li H, Zhang X, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of benzene homologues in ambient air in the northeastern urban area of Beijing, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26(1): 214–223
- [28] 姚青, 韩素芹, 蔡子颖, 等. 2012年夏季天津城区BTEX污染特征与臭氧潜势分析 [J]. *中国环境科学*. 2013, 33(5): 793–798
- Yao Q, Han S Q, Cai Z Y, et al. The diurnal variation and ozone production potential of BTEX in Tianjin in the summer of 2012 [J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(5): 793–798 (in Chinese)
- [29] Rad H D, Babaei A A, Goudarzi G, et al. Levels and sources of BTEX in ambient air of Ahvaz metropolitan city [J]. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 2014, DOI: 10.1007/s11869-014-0254-y
- [30] Song Y, Dai W, Shao M, et al. Comparison of receptor models for source apportionment of volatile organic compounds in Beijing, China [J]. *Environmental Pollution*, 2008, 156(1): 174–183
- [31] 高蒙, 安俊琳, 杭一纤, 等. 2012年夏季天津城区BTEX污染特征与臭氧潜势分析 [J]. *气象与环境学报*, 2014, 30(1): 43–50
- Gao M, An J L, Hang Y X, et al. Comparison of PMF and PCA/APCS for VOCs source apportionment in north suburb of Nanjing [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2014, 30(1): 43–50 (in Chinese)
- [32] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, 103(12): 4605–4638
- [33] 邵敏, 付琳琳, 刘莹, 等. 北京市大气挥发性有机物

- 的关键活性组分及其来源 [J]. 中国科学( D 辑: 地球化学), 2006, 35( A01): 123 – 130
- Shao M, Fu L L, Liu Y, et al. The key active component of atmospheric volatile organic compounds and their sources in Beijing [J]. Science in China ( Series D: Earth Science), 2006, 35( A01): 123 – 130( in Chinese)
- [34] Moreira dos Santos C Y, de Almeida Azevedo D, de Aquino Neto F R. Atmospheric distribution of organic compounds from urban areas near a coal-fired power station [J]. Atmospheric Environment, 2004, 38( 9): 1247 – 1257
- [35] Barletta B, Meinardi S, Sherwood Rowland F, et al. Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. Atmospheric Environment, 2005, 39( 32): 5979 – 5990
- [36] Liu Y, Shao M, Zhang J, et al. Distributions and source apportionment of ambient volatile organic compounds in Beijing city, China [J]. Journal of Environmental Science and Health, 2005, 40( 10): 1843 – 1860
- [37] Liu Y, Shao M, Lu S H, et al. Volatile organic compounds ( VOC) measurements in the Pearl River Delta ( PRD) region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2008, 8( 6): 1531 – 1545
- [38] 朱少峰, 黄晓峰, 何凌燕, 等. 深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性 [J]. 中国环境科学, 2012, 32( 12): 2140 – 2148
- Zhu S F, Huang X F, He L Y, et al. Variation characteristics and chemical reactivity of ambient VOCs in Shenzhen [J]. China Environmental Science, 2012, 32( 12): 2140 – 2148( in Chinese)
- [39] 蔡长杰, 耿福海, 俞琼, 等. 上海中心城区夏季挥发性有机物( VOCs) 的源解析 [J]. 环境科学学报, 2010, 30( 5): 926 – 934
- Cai C J, Geng F H, Yu Q, et al. Source apportionment of VOCs at city centre of Shanghai in summer [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30( 5): 926 – 934( in Chinese)
- [40] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学 [M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 252 – 256
- [41] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Air & Waste, 1994, 44( 7): 881 – 899
- [42] Duan J C, Tan J, Liu Y, et al. Concentration, sources and ozone formation potential of volatile organic compounds ( VOCs) during ozone episode in Beijing [J]. Atmospheric Research, 2008, 88( 1): 25 – 35
- [43] Hoque R R, Khillare P, Agarwal T, et al. Spatial and temporal variation of BTEX in the urban atmosphere of Delhi, India [J]. Science of the Total Environment, 2008, 392( 1): 30 – 40
- [44] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京城乡结合地空气中挥发性有机物健康风险评价 [J]. 环境科学, 2011, 32( 12): 3566 – 3577
- Zhou Y M, Hao Z P, Wang H L. Health risk assessment of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area [J]. Environmental Science, 2011, 32( 12): 3566 – 3570( in Chinese)
- [45] Zhou J, You Y, Bai Z, et al. Health risk assessment of personal inhalation exposure to volatile organic compounds in Tianjin, China [J]. Science of the Total Environment, 2011, 409( 3): 452 – 459
- [46] 张平. 杭州市空气中苯系物的污染特征、来源及健康风险 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007: 48 – 50
- Zhang P. Aromatic hydrocarbons in the air in Hangzhou, China: Characteristics, sources and risks [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007: 48 – 50( in Chinese)
- [47] 童宏胜, 姚超英. 不同动力公交流动微环境苯系物( BTEX) 的浓度水平及健康风险 [J]. 环境化学, 2011, 30( 2): 565 – 566
- Tong H S, Tao C Y. The content level and health risks of BTEX in different micro power bus flow environment [J]. Environmental Chemistry, 2011, 30( 2): 565 – 566( in Chinese)
- [48] 吴莉萍, 周志恩, 史小春, 等. 城市典型加油加气站苯系物污染状况及健康风险评估 [C] // 中国环境科学学会环境标准与基准专业委员会. 2013 中国环境科学学会学术年会论文集( 第四卷), 昆明, 2013: 2580 – 2585

