

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第2期

Vol.38 No.2

**2017**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

北京大气颗粒物和重金属铅干沉降通量及季节变化 ..... 姚利, 刘进, 潘月鹏, 田世丽, 王振波, 韦霞, 张国忠, 周保华, 王跃思 (423)

海西城市群 PM<sub>2.5</sub> 中重金属元素的污染特征及健康风险评估 ..... 陈衍婷, 杜文娇, 陈进生, 徐玲玲 (429)

岷泗地区大气 PM<sub>2.5</sub> 中汞形态污染及其与碳组分的关系 ..... 程娜, 钱冠磊, 段炼, 赵梦飞, 修光利 (438)

泰山夏季 PM<sub>2.5</sub> 中二元羧酸类 SOA 的分子组成及来源 ..... 孟静静, 侯战方, 刘晓迪, 邢继钊 (445)

南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估 ..... 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒 (453)

长株潭城市群人为源 VOCs 排放清单及其对环境的影响 ..... 尤翔宇, 罗达通, 刘湛, 苏艳蓉 (461)

南京城市交通甲烷排放特征 ..... 张雪, 胡凝, 刘寿东, 王淑敏, 高韵秋, 赵佳玉, 张圳, 胡勇博, 李旭辉, 张国君 (469)

2003~2014年东北三省气溶胶光学厚度变化分析 ..... 张宸赫, 赵天良, 王富, 徐祥德, 苏航, 程兴宏, 谭成好 (476)

基于增强回归树的城市 PM<sub>2.5</sub> 日均值变化分析: 以常州为例 ..... 葛跃, 王明新, 孙向武, 齐今笛 (485)

重庆市燃煤电厂汞排放特征及排放量 ..... 张成, 张雅惠, 王永敏, 王定勇, 徐凤, 杨熹, 何秀清 (495)

几种可能来源对广东某地空气中二噁英的影响 ..... 付建平, 韩静磊, 于晓巍, 杨艳艳, 尹文华, 冯桂贤, 张素坤, 黄锦琼, 任明忠 (502)

养鸡场空气中抗性基因和条件致病菌污染特征 ..... 高敏, 仇天雷, 秦玉成, 王旭明 (510)

百年来滇池沉积物中不同形态氮分布及埋藏特征 ..... 吴亚林, 李帅东, 江俊武, 沈胤胤, 黄昌春, 黄涛, 杨浩, 余艳红, 罗玉 (517)

岩溶地下河补给的地表溪流溶解无机碳及其稳定同位素组成的时空变化 ..... 李丽, 蒲俊兵, 李建鸿, 张陶 (527)

三峡水库大宁河支流浮游植物演变过程及其驱动因素 ..... 张佳磊, 郑丙辉, 刘德富, 王丽婧, 谭纤茹 (535)

分层型水库夏季水质对极端厄尔尼诺事件的响应 ..... 邱晓鹏, 黄廷林, 曾明正, 史建超, 曹占辉 (547)

淹水-落干与季节性温度升高耦合过程对消落带沉积物氮矿化影响 ..... 林俊杰, 刘丹, 张帅, 于志国, 何立平, 余顺慧 (555)

湖泊水体中铁(III)-草酸络合物驱动有机磷光解释放磷酸根 ..... 蒋永参, 彭云霄, 刘广龙, 周易勇, 朱端卫 (563)

高效磷吸附剂 Mg/Al-LDO 的制备及除磷机制 ..... 王卫东, 郝瑞霞, 张晓娴, 万京京, 钟丽燕 (572)

改性沸石湿地脱氮除磷效能及机制 ..... 吴鹏, 陆爽君, 徐乐中, 梁奇奇, 沈耀良 (580)

几种水陆交错带植物对底质氮磷释放的抑制作用 ..... 姚程, 胡小贞, 卢少勇, 耿荣妹 (589)

模拟三峡库区消落带优势植物根系低分子量有机酸对土壤中铅的解吸动力学 ..... 何沅洁, 刘江, 江韬, 黄京晶, 成晴, 陈宏 (600)

TiO<sub>2</sub>/膨润土复合材料对 Hg<sup>2+</sup> 的吸附性能研究 ..... 唐兴萍, 周雄, 张金洋, 张成, 王定勇 (608)

氨氮及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对溴酸盐和消毒副产物控制的影响 ..... 王永京, 杜旭, 金萌, 冯思捷, 杨凯, 张明露, 于建伟 (616)

配水管网细菌活性影响因素 ..... 王晓丹, 赵新华 (622)

施氏矿物的化学合成及其对含 Cr(VI) 地下水吸附修复 ..... 朱立超, 刘元元, 李伟民, 牟海燕, 王婉玉, 石德智, 王涛 (629)

臭氧-混凝耦合工艺污水深度处理特性及其机制 ..... 侯瑞, 金鑫, 金鹏康, 王晓昌 (640)

单级和多级 A/O 工艺中氮的去除效果及 N<sub>2</sub>O 的产生特性 ..... 郭昌梓, 张凤燕, 刘富宇, 朱超, 裴立影 (647)

有机碳源作用下厌氧氨氧化系统的脱氮效能 ..... 管勇杰, 于德爽, 李津, 齐泮晴, 魏思佳 (654)

完全混合式曝气系统运行特性及微生物群落结构解析 ..... 王硕, 徐巧, 张光生, 李激 (665)

颗粒+絮体污泥 CANON 工艺的启动与 SRT 影响研究 ..... 孙延芳, 韩晓宇, 张树军, 李星, 曹相生 (672)

游离氨调控对污泥高含固厌氧消化反应器性能的影响 ..... 戴晓虎, 何进, 严寒, 李宁, 丁月玲, 董滨, 戴翎翎 (679)

利用卷枝毛霉成球特性高效收获微藻 ..... 顾琼, 金文标, 陈远清, 郭仕达, 万超凡 (688)

零价铁对污泥高温厌氧消化过程中四环素抗性基因及第一类整合子的消减影响 ..... 魏欣, 薛顺利, 杨帆, 李响, 刘振鸿, 薛罡, 高品 (697)

沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估 ..... 王静, 刘明丽, 张士超, 鲁垠涛, 姚宏 (703)

河南某市驾校地表灰尘多环芳烃组成、来源与健康风险 ..... 陈轶楠, 马建华, 段海静, 魏林恒 (711)

外源微生物对植物根系修复十溴联苯醚污染底泥的强化作用 ..... 杨雷峰, 尹华, 彭辉, 李跃鹏 (721)

微生物修复油污土壤过程中氮素的变化及菌群生态效应 ..... 叶茜琼, 吴蔓莉, 陈凯丽, 李炜, 袁婧 (728)

沼泽红假单胞菌 PSB06 对辣椒根际微生物群落结构的影响 ..... 罗路云, 金德才, 左晖, 张卓, 谭新球, 张德咏, 卢向阳, 刘勇 (735)

再生水补水对河道底泥细菌群落组成与功能的影响 ..... 邱琰茗, 王广煊, 黄兴如, 郭道宇 (743)

矿区不同植被复垦模式对土壤细菌群落结构的影响 ..... 贺龙, 李艳琴, 李彬春, 李君剑 (752)

稻田土壤固碳功能微生物群落结构和数量特征 ..... 刘琼, 魏晓梦, 吴小红, 袁红朝, 王久荣, 李裕元, 葛体达, 吴金水 (760)

不同温度制备的生物质炭对土壤有机碳及其组分的影响: 对土壤腐殖物质组成及性质的影响 ..... 赵世翔, 于小玲, 李忠徽, 杨艳, 张霞, 王旭东, 张阿凤 (769)

复合菌剂秸秆堆肥对土壤碳氮含量和酶活性的影响 ..... 聂文翰, 戚志萍, 冯海玮, 孙玉静, 支月娥, 张进忠, 张丹 (783)

秸秆/生物炭施用对关中地区小麦-玉米轮作系统净增温潜势影响的对比分析 ..... 成功, 陈静, 刘晶晶, 张阿凤, 王旭东, 冯浩, 赵英 (792)

1株氯苯高效降解菌的分离鉴定及降解特性 ..... 叶杰旭, 林彤晖, 骆煜昊, 陈东之, 陈建孟 (802)

1株异养反硝化硫细菌的分离鉴定及代谢特性 ..... 谭文勃, 马晓丹, 黄聪, 陈川, 王爱杰 (809)

连续施用污泥堆肥土壤剖面中重金属积累迁移特征及对小麦吸收重金属的影响 ..... 孙娜, 商和平, 茹淑华, 苏德纯 (815)

施氮对小麦(Ⅵ)吸收、转运和分配的影响 ..... 陈玉鹏, 彭琴, 梁东丽, 宋卫卫, 雷凌明, 喻大松 (825)

长期暴露下纳米二氧化钛对典型淡水藻体砷累积与生物转化的影响 ..... 李金丽, 王振红, 严雅萌, 黄兵, 罗专溪 (832)

不同热解温度制备的玉米芯生物炭对对硝基苯酚的吸附作用 ..... 马锋锋, 赵保卫 (837)

《环境科学》征稿简则(526) 《环境科学》征订启事(720) 信息(678, 696, 844)

# 南京北郊大气 BTEX 变化特征和健康风险评估

张玉欣, 安俊琳\*, 王健宇, 王俊秀, 师远哲, 刘静达, 梁静舒

(南京信息工程大学, 气象灾害教育部重点实验室, 气候与环境变化国际合作联合实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044)

**摘要:** 采用 2013 年 3 月 21 日 ~ 2014 年 2 月 28 日 GC5000 在线气相色谱仪对南京北郊大气中的 BTEX 进行观测, 利用 EPA 人体暴露分析评价方法对 BTEX 进行健康风险评估. 结果表明, 南京北郊大气中 BTEX 总量呈现春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季变化特征. BTEX 浓度 07:00 ~ 10:00 与 17:00 ~ 20:00 时期较高, 13:00 ~ 15:00 之间最低; 周末 BTEX 浓度高于工作日. BTEX 来源包括交通源、工业源排放与溶剂挥发. BTEX 四季 HQ 均表现为苯 > 二甲苯 > 乙苯 > 甲苯, 所有分析时段内 HQ 风险值都在安全范围. 南京北郊 R 值呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的分布规律, R 在所有分析时间都超安全阈值, 存在致癌风险.

**关键词:** 南京北郊; BTEX; 健康风险评估; 非致癌风险危害商值; 致癌风险

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)02-0453-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201607108

## Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing

ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin\*, WANG Jian-yu, WANG Jun-xiu, SHI Yuan-zhe, LIU Jing-da, LIANG Jing-shu

(Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC), Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract:** BTEX concentrations were determined by GC5000 online gas chromatography in the atmosphere of the north suburb of Nanjing in March 2013 to February 2014, using the EPA human exposure analysis evaluation method for benzene series compounds of volatile organic compounds (VOCs) in health risk assessment. The results showed that the total amount of BTEX showed the variation characteristics of spring > winter > autumn > summer. BTEX concentration was higher in the periods of 07:00-10:00 and 17:00-20:00, and the lowest was detected between 13:00-15:00; At the weekend, the concentration of BTEX was higher than on the working day. The sources of BTEX included traffic sources, industrial sources and solvent evaporation. The HQ of BTEX in all four seasons showed the order of benzene > xylene > ethylbenzene > toluene, and the HQ risk values were within the safety range in all analysis periods. The distribution of R value was winter > autumn > spring > summer, and R was higher than the safety threshold for all the analyses, indicating the existence of carcinogenic risk.

**Key words:** northern suburb of Nanjing; BTEX; health risk assessment; non carcinogenic risk hazard quotient; carcinogenic risk

BTEX 是苯 (benzene)、甲苯 (toluene)、乙苯 (ethylbenzene) 和二甲苯的 3 种同分异构体 (间, 对二甲苯 *m,p*-xylene, 邻二甲苯 *o*-xylene), 是与石油化工产品、产业相关的常见单环芳烃类物质<sup>[1]</sup>. 杨笑笑等<sup>[2]</sup>在南京夏季市区挥发性有机物 (VOCs) 对臭氧 (O<sub>3</sub>) 生成潜势 (OFP) 的研究中最大浓度是芳香烃, 甲苯、间, 对二甲苯尤为明显. BTEX 也是二次有机气溶胶 (SOA) 重要前体物质, 其中芳香烃生成贡献达到总量的 95.93%<sup>[3]</sup>.

VOCs 对人体也有潜在性的危害, 尤其是苯系物. 苯系物主要是刺激呼吸道, 损伤中枢神经系统<sup>[4]</sup>. 美国国家科学院于 1983 年发布了联邦政府的危险评价管理体系<sup>[5]</sup>, 并提出了健康风险评估四步法, 该方法已成为国际公认的健康风险评估方法.

目前国内外对苯系物对人体健康的风险评估已有较多研究<sup>[4-10]</sup>, 但还未形成完整评估方法. 徐慧等<sup>[6]</sup>对厦门市各功能区 BTEX 健康风险进行评价, 表明各功能区的浓度虽有差异, 但非致癌风险 (HQ) 均在安全阈值范围内, 苯的致癌风险 (R) 超出安全阈值, 存在致癌风险; 李雷等<sup>[7]</sup>对广州市城区中心 BTEX 的研究中, HQ 在  $3.95 \times 10^{-3} \sim 2.45 \times 10^{-1}$  之间, 1,3-丁二烯、苯的 R 值都超过安全阈值, 存在致癌风险.

收稿日期: 2016-07-18; 修订日期: 2016-09-07

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) (XDB05020206); 国家自然科学基金项目 (41305135, 91544229); 江苏省高校“青蓝工程”项目; 江苏省江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD)

作者简介: 张玉欣 (1993 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: nuistzyx@126.com

\* 通信作者, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

南京北郊在苯系物影响健康方面的研究较匮乏,南京北郊周边石化,化工,钢铁等行业集中区的工业活动、交通枢纽等人为活动必然影响周边大气环境,因此对南京北郊大气 BTEX 变化特征及其健康风险评估开展工作十分必要.

本文对 2013 年 3 月~2014 年 2 月南京北郊大气的 BTEX 浓度进行收集,研究该地区 BTEX 污染的浓度变化特征,并评估其对暴露人群的健康风险.

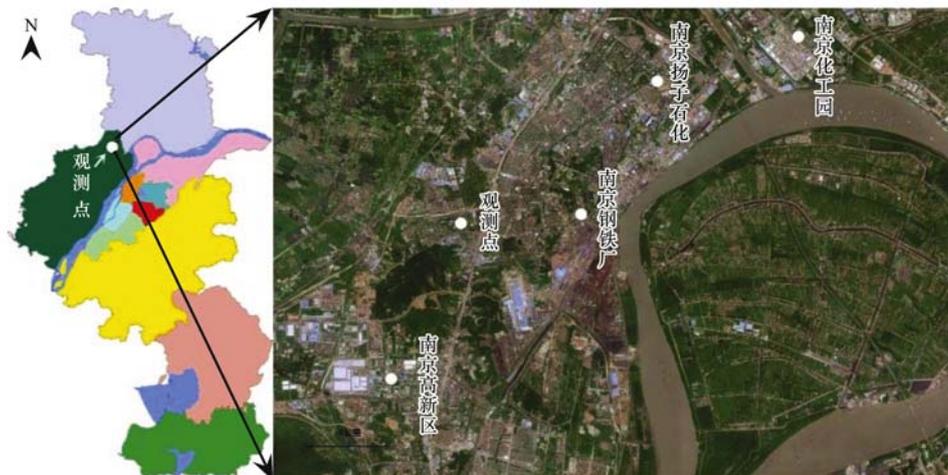


图 1 观测点的位置和附近环境

Fig. 1 Location of the observation site and its surroundings

## 1.2 仪器及分析方法

大气中的 BTEX 浓度由德国 AMA 公司生产提供的 GC5000 在线气相色谱仪分析系统观测完成,能够自动进行数据采集、样本富集处理和分析的色谱仪.该系统主要由 GC5000-VOC(单级富集)和 GC5000-BTX(两级富集)自动分析色谱仪组成,可测量  $C_2 \sim C_{12}$  范围内 56 种 VOCs 物种,观测系统的污染物浓度采样频率为 1 h. 仪器详细技术参数参见文献[11].

常规气象数据来源为中国气象局综合观测培训实习基地,距离观测点 1.5 km.

## 1.3 健康风险评估方法

评估方法采用 US. EPA<sup>[12]</sup> 2009 年提出的健康风险评估法(EPA-540-R-070-002). 计算暴露在确定污染物浓度的大气环境下,该污染物浓度对暴露人体的危害指数. 体积分数转换为质量分数计算方法详见文献[12]. 人群暴露浓度  $I$  由式(1)求得,其各变量的意义和指导数值列于表 1 中.

$$I = (c \times ET \times EF \times AL) / AT \quad (1)$$

非致癌风险值由人群暴露浓度  $I$  与污染物参考量 RfD [单位:  $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ] 的商值求得, US.

## 1 材料与方法

### 1.1 观测站点

观测点位于中国江苏省南京市浦口区南京信息工程大学气象楼顶部 ( $32^{\circ}12'N, 118^{\circ}43'E$ , 海拔高度: 62 m). 东部和东北部有南京钢铁厂、南京扬子石化和化工园等企业园区,南部是高新开发区,并且观测点毗邻南京江北大道快速路、国道 2501 交通主干道路. 具体位置和环境如图 1.

表 1 公式(1)中的符号意义

Table 1 Meanings of the symbols in expression(1)

符号	意义	单位	指导数值
$c$	污染物环境浓度	$\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$	—
ET	暴露时间	$\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$	24
EF	暴露频率	$\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$	365
AL	平均寿命	a	70
AT	平均时间	h	$24 \times 365 \times 70$

EPA<sup>[12]</sup> 给出苯、甲苯、乙苯、间,对二甲苯、邻二甲苯的 RfD 值分别为 0.03、5、1、0.1、0.1. 非致癌风险用危害指数由 HQ 表示,由(2)进行计算. 非致癌风险总量 HI 由(3)得.

$$HQ = I / (\text{RfD} \times 1000) \quad (2)$$

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

苯除了对暴露人群具有非致癌风险外,还存在致癌风险影响,故而对苯污染物进行致癌风险评估. 致癌风险值由  $R$  表示,计算人体暴露于污染物浓度  $I$  与污染物单位吸入致癌风险 IUR [单位:  $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ ] 的乘积来得出  $R$ ,用式(4)计算,其苯的 IUR 值为  $7.80 \times 10^{-6}$ <sup>[12]</sup>.

$$R = I \times \text{IUR} \quad (4)$$

## 2 结果与讨论

### 2.1 BTEX 特征

本研究时段为 2013 年 3 月 21 日~2014 年 2 月 28 日,共 6 731 个样本. 苯的平均浓度为  $(2.50 \pm 3.26) \times 10^{-9}$ , 占总 BTEX 的 37.14%; 甲苯的平均浓度为  $(1.86 \pm 1.31) \times 10^{-9}$ , 占总 BTEX 的 27.76%; 乙苯的平均浓度为  $(1.53 \pm 1.46) \times 10^{-9}$ , 占总 BTEX 的 22.79%; 二甲苯的平均浓度为  $(1.01 \pm 1.05) \times 10^{-9}$ , 占总 BTEX 的 12.42%.

表 2 为南京北郊 BTEX 四季平均体积分数, 春季为 2013 年 3~5 月, 夏季为 2013 年 6~8 月, 秋季为 2013 年 9~11 月, 冬季为 2013 年 12 月~2014 年 2 月. 南京北郊大气中 BTEX 总量呈现春

季 > 冬季 > 秋季 > 夏季变化特征. 2013 年 8 月 16 日~8 月 24 日为第二届亚州青年运动会, 南京市政府出台一系列环境质量保障临时管理措施, 并取得成效, 同时夏季辐射较强, 光化学反应较强, 使得 BTEX 经过光化学反应转化, 夏季 BTEX 浓度较低.

四季中苯的平均浓度由高到低分别为: 冬季  $(2.76 \pm 4.68) \times 10^{-9}$ , 秋季  $(2.76 \pm 4.40) \times 10^{-9}$ , 春季  $(2.30 \pm 2.82) \times 10^{-9}$ , 夏季  $(2.17 \pm 2.82) \times 10^{-9}$ . 分别占季节总量的: 28.89%、36.86%、46.46%、38.82%. 甲苯在冬季、春季较高分别为:  $(2.28 \pm 3.33) \times 10^{-9}$ 、 $(2.26 \pm 1.86) \times 10^{-9}$ . 乙苯、二甲苯变化趋势基本一致, 为春季 > 秋季 > 冬季 > 夏季.

表 2 南京北郊 BTEX 四季平均体积分数  $\times 10^{-9}$

Table 2 Average volume fraction of BTEX in the four seasons in northern suburb of Nanjing  $\times 10^{-9}$

季节	样本数	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	BTEX
春季	756	2.25 ± 2.82	2.29 ± 1.86	2.31 ± 2.89	1.17 ± 1.29	6.81 ± 3.27
夏季	1 979	2.55 ± 3.24	1.54 ± 1.31	1.39 ± 1.46	0.80 ± 0.71	5.98 ± 5.05
秋季	1 917	3.18 ± 4.4	2.46 ± 1.98	2.13 ± 1.67	1.1 ± 1.24	8.87 ± 6.93
冬季	2 076	3.6 ± 4.54	3.41 ± 3.28	1.98 ± 1.90	1.07 ± 1.00	10.13 ± 9.07

图 2 为四季 BTEX 平均日变化特征, 总体来看, BTEX 浓度与人为活动相关, 在早上 07:00~10:00 与 17:00~20:00 两个交通高峰期浓度较高, 13:00~15:00 之间最低, 早晨交通高峰时期汽车尾气排放, 工业等人为活动加剧导致 BTEX 浓度较高, BTEX 活性较高<sup>[13~17]</sup> 太阳辐射及大气湍流使其进行光化学反应, 使其在 13:00~15:00 之间降到最低, 之后随着太阳辐射的减弱, 人为活动在交通晚高峰又一次加剧, 使 BTEX 浓度再次升高, 在夜间大气湍流运动减弱、边界层高度降低、无光化学反应<sup>[14]</sup> 使 BTEX 在大气中累积, 故在夜间 BTEX 浓度比白天高.

图 2(a) 为春季 BTEX 平均日变化特征. 浓度较高的情况出现在较早时段 03:00~10:00, BTEX 总浓度最高为  $9.92 \times 10^{-9}$ , 苯、甲苯、乙苯、二甲苯最高值分别为  $3.45 \times 10^{-9}$ 、 $3.11 \times 10^{-9}$ 、 $3.10 \times 10^{-9}$ 、 $1.54 \times 10^{-9}$ ; 13:00~15:00 时浓度较低, 苯和甲苯最低浓度分别为  $1.18 \times 10^{-9}$ 、 $1.44 \times 10^{-9}$ . 如图 2(b), 夏季不同于春季, BTEX 浓度较高的时段比春季出现较晚在 07:00 期间, BTEX 浓度最高值分别为  $3.23 \times 10^{-9}$ 、 $2.26 \times 10^{-9}$ 、 $2.05 \times 10^{-9}$ 、 $1.02 \times 10^{-9}$ . 13:00~15:00 时 BTEX 浓度最低. 如图 2(c)、2(d), 秋季和冬季最低值均在 15:00. 浓度最

高均出现在 18:00~22:00 之间.

图 3 为观测期间工作日与周末 BTEX 总量平均日变化特征. 周末 BTEX 浓度高于工作日. 工作日早高峰中最高值出现在 07:00, 而周末早高峰落后于工作日, 出现在 09:00; 工作日晚高峰出现在 18:00 后, 周末早于工作日, 出现在 17:00. 工作日 BTEX 在 07:00 浓度最高, 为  $9.91 \times 10^{-9}$ , 其后依次是 08:00、09:00, 分别为  $9.78 \times 10^{-9}$ 、 $9.49 \times 10^{-9}$ ; 13:00 最低为  $5.58 \times 10^{-9}$ . 周末在 09:00 时 BTEX 浓度最高, 为  $10.87 \times 10^{-9}$ , 其后依次是 08:00、07:00, 分别为  $10.56 \times 10^{-9}$ 、 $10.22 \times 10^{-9}$ ; 14:00 最低为  $6.50 \times 10^{-9}$ , 仅占总量的 3.22%.

杨辉等<sup>[18]</sup> 对南京北郊挥发性有机物 (VOCs) 来源解析中发现汽车尾气与溶剂挥发为芳香烃的主要来源. 汽车尾气与人类活动密切相关. 由图 3 BTEX 变化特征中可知, 南京北郊 BTEX 周末排放的浓度高于工作日. 早晚主要受到汽车尾气排放的影响, 且周末的汽车排放量高于工作日, 随光化学反应的进行在 14:00 时周末与工作日均达到最低值. BTEX 的变化明显受到汽车尾气排放的影响.

### 2.2 BTEX 来源分析

苯和甲苯是 VOCs 中重要的物质, 其在大气中的寿命分别为 9.4 d 与 1.9 d<sup>[19]</sup>, 同一来源排放出

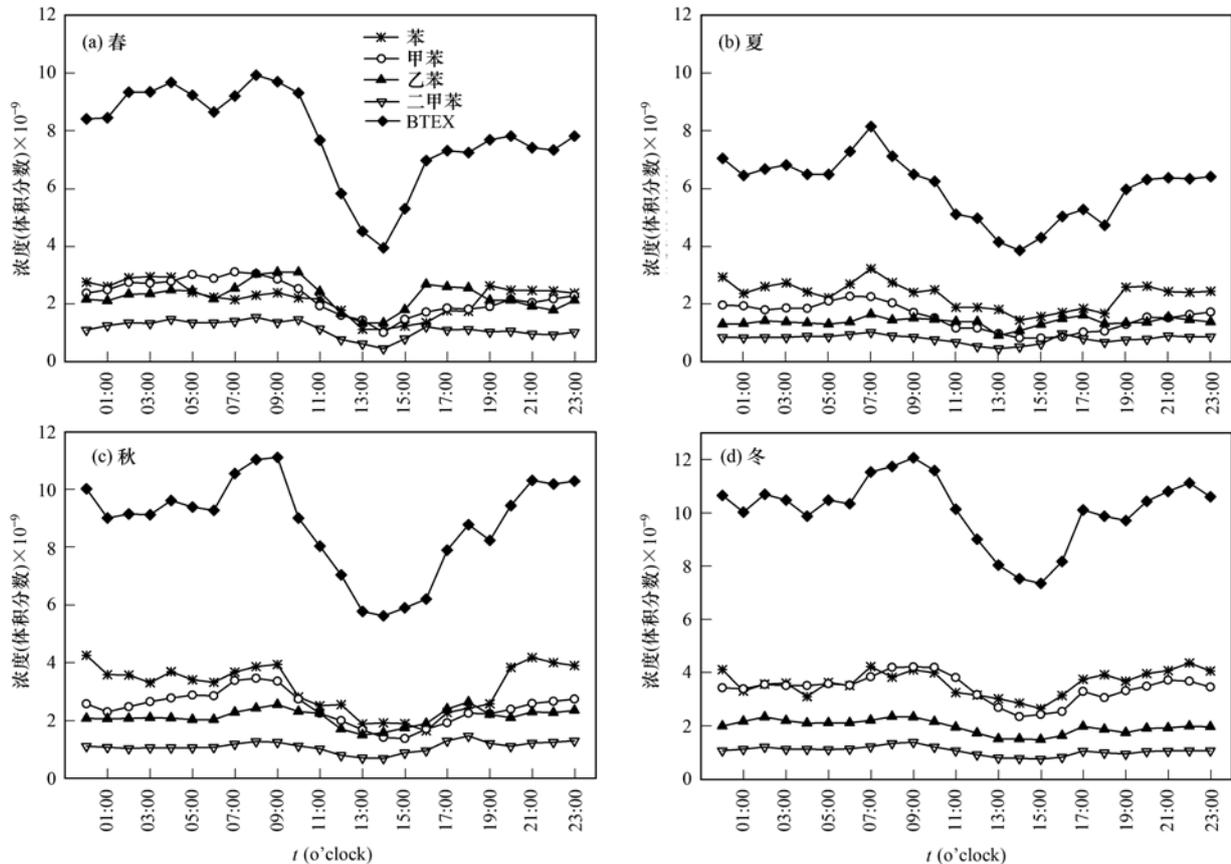


图2 南京北郊 BTEX 四季平均日变化特征

Fig. 2 Characteristics of seasonal mean diurnal variation of BTEX in northern suburb of Nanjing

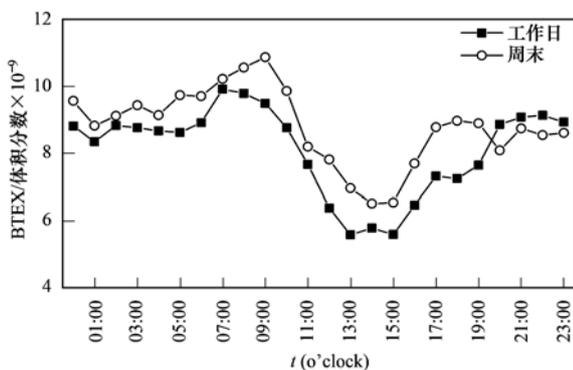


图3 南京北郊工作日与周末 BTEX 总量的平均日变化特征

Fig. 3 Average daily variation characteristics of total BTEX in working days and weekends in northern suburb of Nanjing

的物质,在大气中经过光化学反应,由其不同的活性,可以从比值和相关性分析中推断出来源与光化学反应剧烈程度. 比值法判断来源已被国内外研究广泛使用<sup>[20-22]</sup>.

图4为四季中BTEX的比值变化,由于间,对二甲苯、邻二甲苯为同分异构体,故将其合并为二甲苯. 如图4(a)~4(c),苯/二甲苯(B/X)、苯/甲苯(B/T)、甲苯/乙苯(T/E)的 $R^2$ 均较低,夏季与冬季

的B/T比值分别为1.08与0.72,介于交通来源B/T为0.6<sup>[20]</sup>与工业燃煤过程B/T为2.7<sup>[21]</sup>之间,说明夏季与冬季的苯和甲苯由这两个排放源排放;春季与秋季B/T值较低,存在异常源贡献. 对比图1观测站点周边环境BTEX受到包括交通源与工业源排放的较大影响,同时也存在异常源排放.

如图4(d)乙苯/二甲苯(E/X)相关性在四季均较高, $R^2$ 在0.82~0.93之间,说明两物质由同一来源排放,溶剂排放为二甲苯的主要来源<sup>[16]</sup>,所以乙苯与二甲苯为溶剂排放所贡献. E/X值从高到低为夏季>春季>冬季>秋季,林旭等<sup>[13]</sup>对南京北郊VOCs的研究中乙苯的OPF高于二甲苯的OPF. 其比值越高说明光化学反应越剧烈,夏季辐射在全年中最强,使得E/X值为四季中最高值.

为进一步分析排放来源与风速对BTEX的影响,图5给出的南京北郊四季BTEX到达监测点的风速玫瑰图. 总体来看BTEX主要由 $0\sim 2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 较小风速贡献,说明主要受到检测点周边环境的影响. 图4(a)春季与图4(d)冬季在风速大于 $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 位置有明显高值区,春季与冬季为全年光化学反应最

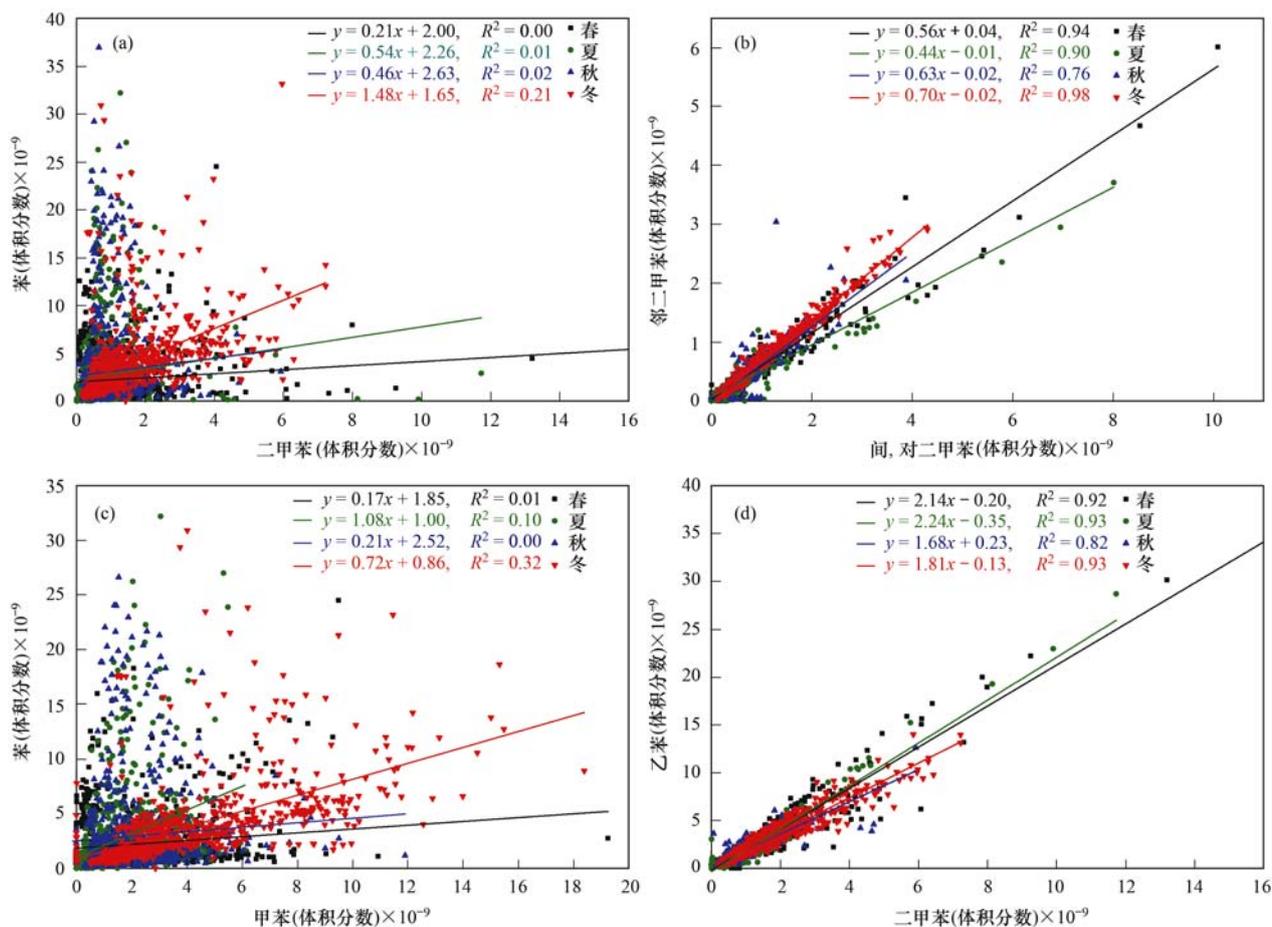


图4 南京北郊 BTEX 四季比值变化

Fig. 4 Seasonal variation characteristics of BTEX in northern suburb of Nanjing

小的两个季节,且由于大气较为静稳使得 BTEX 容易积累,导致在这两季南京北郊受到风速较大时远距离排放源的影响. 图4(c)夏季 BTEX 主要由监测点东北方向排放源影响,与其他两季比较 BTEX 浓度明显降低,排放高值区明显减少,如上文所述夏季光化学反应越剧烈,同时在 2013 年 8 月 16 日 ~ 8 月 24 日为第二届亚州青年运动会,在此前后南京市政府出台一系列环境质量保障临时管理措施,并取得成效, BTEX 排放来源明显减少.

总体来看南京北郊四季的气象条件与源排放特点决定了观测点 BTEX 的浓度, BTEX 主要受到较近距离的排放来源的贡献,同时排放点分布不规律,与图 4 中 BTEX 比值所得出的观测站点周边环境 BTEX 受到包括交通源与工业源排放的较大影响,同时也存在异常源排放的结论相对应.

An 等<sup>[11]</sup> 研究中南京市北郊 2011 年 5 月 ~ 2012 年 7 月 BTEX 的小时平均体积分数为  $7.8 \times 10^{-9}$ , 本研究中 BTEX 的小时平均体积分数为  $6.9 \times 10^{-9}$ , 同一站点 2011 年 5 月 ~ 2012 年 7 月 BTEX 的

浓度高于本研究中 BTEX 浓度的 1.13 倍, 本研究采样期间是南京为亚青会进行减排措施的关键阶段, 与未进行减排措施之前 BTEX 浓度有下降趋势, 说明在此前后南京市政府出台一系列环境质量保障措施取得成效.

图 6 为南京北郊 BTEX 浓度百分比与其他城市的比较, 从中可以看出本次研究中 BTEX 的占比与其他地方有所不同, 南京北郊四季占比最高为苯 46.46% ~ 36.84%, 其次为甲苯 22.90% ~ 32.07%. 对于受到交通排放影响的 Mexico<sup>[23]</sup>、广州<sup>[24]</sup>、高雄 1<sup>[25]</sup>、高雄 2<sup>[25]</sup>、高雄 3<sup>[25]</sup>、上海<sup>[26]</sup> 甲苯占比均最高. 而工厂排放为最主要的北京 1<sup>[27]</sup>、顾城<sup>[27]</sup>、曲周<sup>[27]</sup> 二甲苯占比最高. 南京北郊 BTEX 的结构与这两者均有不同, 如前文中 BTEX 相关性比较中可以看出 BTEX 的来源复杂, 受到包括交通源、工业源排放与溶剂挥发的影响, 使得苯、甲苯与乙苯相对其他地区浓度较高.

BTEX 的占比也受到观测时间与站点周边分布的影响. 南京北郊 BTEX 占比在四季略有浮动. 高

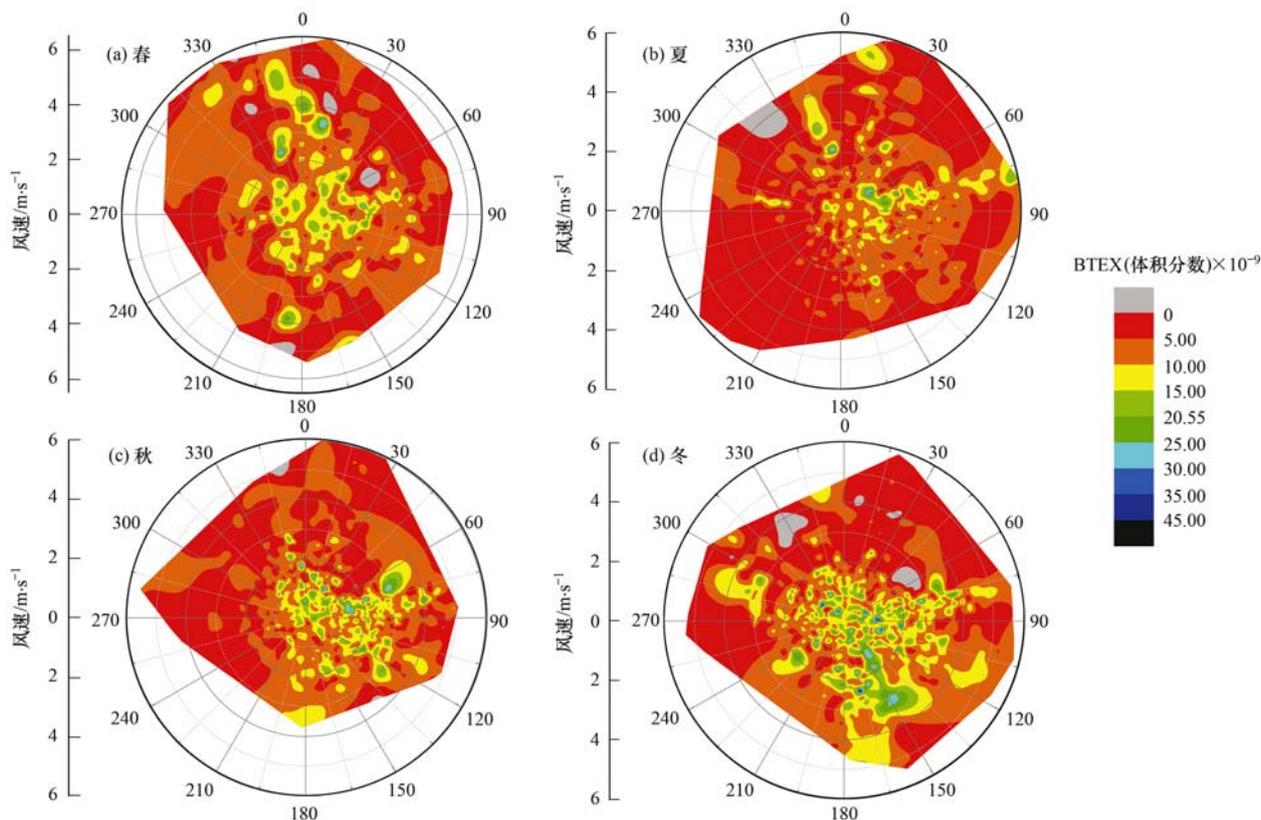


图 5 南京北郊 BTEX 到达监测点的风速玫瑰图

Fig. 5 Wind speed rose of BTEX concentration at the time of reaching the monitoring point in northern suburb of Nanjing

雄 2 和 3<sup>[25]</sup> 均在公路附近,并在交通高峰时收集;高雄 1<sup>[25]</sup> 在其他两观测点的 2 km 以外的郊区,存在其他来源贡献,使得 BTEX 浓度相对较高. 北京 1<sup>[27]</sup> BTEX 浓度高于北京 2<sup>[28]</sup>,北京 1 在 2010 年采样,工厂排放贡献了较高浓度的二甲苯、甲苯和苯;北京 2 处于 2008 年奥运会期间,工厂排放受限使 BTEX 浓度较低,交通贡献的甲苯占比较高.

### 2.3 BTEX 健康风险评估

如表 3,四季中苯的 HQ 最高,分别为  $2.20 \times 10^{-2}$ 、 $2.07 \times 10^{-2}$ 、 $2.64 \times 10^{-2}$ 、 $2.64 \times 10^{-2}$ , 分别占四季 HI 的 87.84%、91.08%、93.94%、93.24%; 其后依次是二甲苯、乙苯,甲苯. 所有分析时段内 HQ 风险值都在 EPA 认定安全范围 ( $HQ < 1$ ) 内. 南京北郊 R 值呈现冬季 > 秋季 >

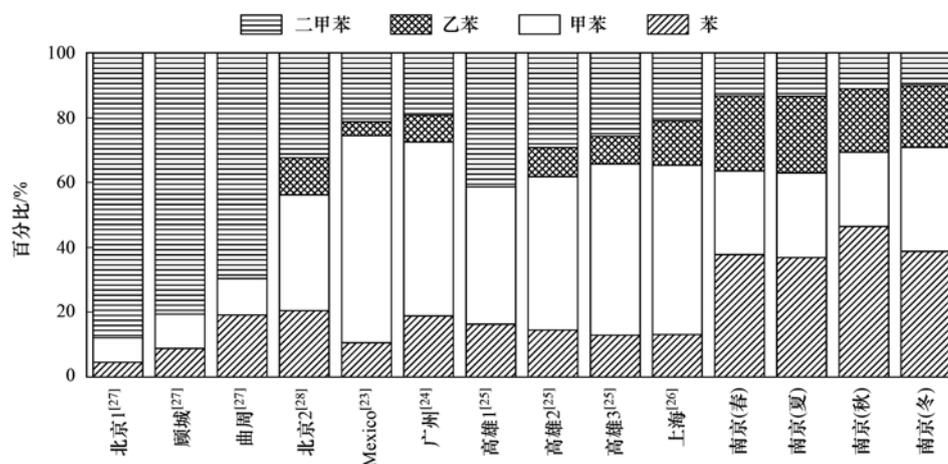


图 6 南京北郊 BTEX 浓度百分比与其他城市的比较

Fig. 6 Comparison of the concentration of BTEX in northern suburb of Nanjing with those in other cities

春季 > 夏季变化规律,  $R$  在所有时段都高于 EPA 规定的安全阈值 ( $1.00 \times 10^{-6}$ ), 均都存在致癌风险。

从 HI 来看, 在对比城市中南京北郊(冬)最高, 为  $4.86 \times 10^{-1}$ , 其后依次是南京北郊(秋)、河北, 分别为  $4.23 \times 10^{-1}$ 、 $3.46 \times 10^{-1}$ , 厦门(背景区)最

小, 为  $9.22 \times 10^{-2}$ 。其中, 南京北郊(冬)是厦门(背景区)的 5.28 倍。与对比城市相比南京北郊四季 BTEX 的 HQ 并没有在较高水平, 而总量相加后 HI 达到较高值, 主要由于观测站点所处位置为工业源与交通源都有明显贡献的地区, 造成 BTEX 总量较高, 从而引起 HI 较高。

表 3 南京北郊四季 BTEX 的 HQ、R 与其他城市对比

Table 3 HQ and R values of BTEX in four seasons in northern suburb of Nanjing compared with those in other cities

城市	R(苯)	HQ				HI	文献
		苯	甲苯	乙苯	二甲苯		
南京北郊(春)	4.41E-06	2.20E-02	1.10E-04	4.71E-04	2.46E-03	3.29E-01	本研究
南京北郊(夏)	3.11E-05	2.07E-02	7.50E-05	2.93E-04	1.66E-03	3.13E-01	本研究
南京北郊(秋)	3.08E-05	2.64E-02	6.62E-05	2.45E-04	1.39E-03	4.23E-01	本研究
南京北郊(冬)	1.47E-05	2.64E-02	1.11E-04	2.85E-04	1.52E-03	4.86E-01	本研究
厦门(背景区)	1.34E-05	5.25E-02	9.73E-03	2.37E-03	2.76E-02	9.22E-02	[24]
厦门(交通区)	1.23E-05	1.33E-01	2.73E-03	4.48E-03	6.25E-02	2.03E-01	[24]
厦门(工业区)	5.60E-06	1.32E-01	4.29E-03	7.98E-03	9.93E-02	2.44E-01	[24]
北京	5.60E-06	5.73E-02	1.08E-02	1.19E-02	2.62E-02	1.06E-01	[29]
河北	4.67E-06	3.82E-02	3.93E-03	9.33E-03	2.95E-01	3.46E-01	[30]
广州	4.67E-06	2.28E-01	3.95E-03	4.26E-03	5.48E-02	2.91E-01	[31]

### 3 结论

(1) 南京北郊大气中 BTEX 总量呈现春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季变化特征。BTEX 的浓度分别为  $(2.50 \pm 3.26) \times 10^{-9}$ 、 $(1.86 \pm 1.31) \times 10^{-9}$ 、 $(1.53 \pm 1.46) \times 10^{-9}$ 、 $(1.01 \pm 1.05) \times 10^{-9}$ 。07:00~10:00 与 17:00~20:00 浓度较高, 13:00~15:00 浓度最低, 周末 BTEX 的浓度高于工作日, 与人为活动密切相关。

(2) 春季、秋季与冬季的 BTEX 受到包括汽车尾气、工业源排放与溶剂挥发及风速大小影响, 并排放点分布不规律。在第二届亚州青年运动会前后, BTEX 排放来源明显减少, 南京市政府出台一系列环境质量保障临时管理措施取得成效。

(3) BTEX 的 HQ 表现为苯 > 二甲苯 > 乙苯 > 甲苯, 分析时段内 HQ 风险值都在 EPA 认定安全范围。R 值呈现冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季的分布规律, 分析时段内都高于 EPA 规定的安全阈值, 都存在致癌风险。

#### 参考文献:

[1] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. (第二版). 北京: 高等教育出版社, 2006. 75-721.

[2] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O<sub>3</sub> 生成势的相关性分析[J]. 环境科学, 2016, 37(2): 443-451.

Yang X X, Tang L L, Zhang Y J, et al. Correlation Analysis between characteristics of VOCs and ozone formation potential in summer in Nanjing urban district[J]. Environmental Science,

2016, 37(2): 443-451.

[3] Chang C C, Wang J L, Lung S C C, et al. Seasonal characteristics of biogenic and anthropogenic isoprene in tropical-subtropical urban environments[J]. Atmospheric Environment, 2014, 99: 298-308.

[4] Stupfel M. Recent advances in investigations of toxicity of automotive exhaust[J]. Environmental Health Perspectives, 1976, 17: 253-285.

[5] National Research Council. Risk assessment in the federal government: managing the process[M]. Washington, DC: National Academy Press, 1983.

[6] 徐慧, 邓君俊, 邢振雨, 等. 厦门不同功能区 VOCs 的污染特征及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2701-2709.

Xu H, Deng J J, Xing Z Y, et al. Pollution characteristics and health risk assessment of VOCs in different functional zones of Xiamen[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2015, 35(9): 2701-2709.

[7] 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估[J]. 环境科学, 2013, 34(12): 4558-4564.

Li L, Li L, 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.

[8] 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.

[9] 张平, 陈坤洋, 朱利中, 等. 公共场所 BTEX 的污染特征、源解析及健康风险[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 779-784.

Zhang P, Chen K Y, Zhu L Z, et al. Pollution survey and health risk of BTEX in indoor air of public places[J]. Acta Scientiae

- Circumstantiae, 2007, **27**(5): 779-784.
- [10] Hoque R R, Khillare P S, 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.
- [11] An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in an industrial area of Nanjing, Yangtze River Delta, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **97**: 206-214.
- [12] US EPA. Office of Solid Waste Emergency Response, Waste and Cleanup Risk Assessment. Risk Assessment Guidance for Superfund (RAGS), Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment)[R]. 2009.
- [13] 林旭, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊 VOCs 对臭氧和二次有机气溶胶潜在贡献的研究[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(4): 976-986.
- Lin X, Zhu B, An J L, *et al.* Potential contribution of secondary organic aerosols and ozone of VOCs in the northern suburb of Nanjing[J]. *China Environmental Science*, 2015, **35**(4): 976-986.
- [14] 邵平, 安俊琳, 杨辉, 等. 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征[J]. *环境科学*, 2014, **35**(11): 4031-4043.
- Shao P, An J L, Yang H, *et al.* Variation characteristics of surface ozone and its precursors during summertime in Nanjing northern suburb[J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(11): 4031-4043.
- [15] 傅瑜, 王体健, 黄晓娴, 等. 南京地区典型霾天气个例特征的比较分析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1620-1628.
- Fu Y, Wang T J, Huang X X, *et al.* Comparative analysis on four typical haze cases in Nanjing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1620-1628.
- [16] Wang X M, Sheng G Y, Fu J M, *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.
- [17] Shao P, An J L, Xin J Y, *et al.* Source apportionment of VOCs and the contribution to photochemical ozone formation during summer in the typical industrial area in the Yangtze River Delta, China[J]. *Atmospheric Research*, 2016, **176-177**: 64-74.
- [18] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- Yang H, Zhu B, Gao J H, *et al.* Source apportionment of VOCs in the northern suburb of Nanjing in Summer[J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [19] Atkinson R. Atmospheric chemistry of VOCs and NO<sub>x</sub> [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(12-14): 2063-2101.
- [20] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [21] Karl T G, Christian T J, Yokelson R J, *et al.* The tropical forest and fire emissions experiment: method evaluation of volatile organic compound emissions measured by PTR-MS, FTIR, and GC from tropical biomass burning [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2007, **7**(22): 5883-5897.
- [22] Zalel A, Yuval, Broday D M. Revealing source signatures in ambient BTEX concentrations [J]. *Environmental Pollution*, 2008, **156**(2): 553-562.
- [23] Apel E C, Emmons L K, Karl T, *et al.* Chemical evolution of volatile organic compounds in the outflow of the Mexico City Metropolitan area [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(5): 2353-2375.
- [24] 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.* 2009. 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.
- [25] Chang C C, Wang J L, Liu S C, *et al.* Assessment of vehicular and non-vehicular contributions to hydrocarbons using exclusive vehicular indicators [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(33): 6349-6361.
- [26] Cai C J, Geng F H, Tie X X, *et al.* Characteristics and source apportionment of VOCs measured in Shanghai, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(38): 5005-5014.
- [27] 周裕敏, 郝郑平, 王海林. 北京地区城乡结合部大气挥发性有机物污染及来源分析 [J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3560-3565.
- Zhou Y M, He Z P, Wan H L. Pollution and source of atmospheric volatile organic compounds in urban-rural juncture belt area in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3560-3565.
- [28] Duan J C, Tan J H, Yang L, *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.
- [29] Li L, Li H, Zhang X M, *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.
- [30] Wang T, Bo P, Tan B, *et al.* Benzene homologues in environmental matrixes from a pesticide chemical region in China: Occurrence, health risk and management [J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2014, **104**(5): 357-364.
- [31] Liu K K, Zhang C L, Cheng Y, *et al.* Serious BTEX pollution in rural area of the North China Plain during winter season [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2015, **30**: 186-190.

## CONTENTS

Atmospheric Dry Deposition Fluxes and Seasonal Variations of Particulate Matter and Lead in Urban Beijing .....	YAO Li, LIU Jin, PAN Yue-peng, <i>et al.</i> ( 423 )
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> and Their Human Health Risks Among the Coastal City Group Along Western Taiwan Straits Region, China .....	CHEN Yan-ting, DU Wen-jiao, CHEN Jin-sheng, <i>et al.</i> ( 429 )
Correlation of Speciated Mercury with Carbonaceous Components in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in Shengsi Region .....	CHENG Na, QIAN Guan-lei, DUAN Lian, <i>et al.</i> ( 438 )
Compositions and Sources of Summertime Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM <sub>2.5</sub> from Mt. Taishan .....	MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, LIU Xiao-di, <i>et al.</i> ( 445 )
Variation Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Atmosphere of Northern Suburb of Nanjing .....	ZHANG Yu-xin, AN Jun-lin, WANG Jian-yu, <i>et al.</i> ( 453 )
Inventory and Environmental Impact of VOCs Emission from Anthropogenic Source in Chang-Zhu-Tan Region .....	YOU Xiang-yu, LUO Da-tong, LIU Zhan, <i>et al.</i> ( 461 )
Characteristics of Methane Emission from Urban Traffic in Nanjing .....	ZHANG Xue, HU Ning, LIU Shou-dong, <i>et al.</i> ( 469 )
Variations in Aerosol Optical Depth over Three Northeastern Provinces of China, in 2003-2014 .....	ZHANG Chen-he, ZHAO Tian-liang, WANG Fu, <i>et al.</i> ( 476 )
Variation Analysis of Daily PM <sub>2.5</sub> Concentrations Based on Boosted Regression Tree: A Case Study in Changzhou .....	GE Yue, WANG Ming-xin, SUN Xiang-wu, <i>et al.</i> ( 485 )
Characteristics of Mercury Emissions from Coal-fired Power Plants in Chongqing .....	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> ( 495 )
Possible Sources of PCDD/Fs in Atmosphere of a Certain District in Guangdong .....	FU Jian-ping, HAN Jing-lei, YU Xiao-wei, <i>et al.</i> ( 502 )
Sources and Pollution Characteristics of Antibiotic Resistance Genes and Conditional Pathogenic Bacteria in Concentrated Poultry Feeding Operations .....	GAO Min, QIU Tian-lei, QIN Yu-cheng, <i>et al.</i> ( 510 )
Distribution and Burial Characteristics of Nitrogen Forms in Sediment of Dianchi Lake During Last Century .....	WU Ya-lin, LI Shuai-dong, JIANG Jun-wu, <i>et al.</i> ( 517 )
Temporal and Spatial Variations of Dissolved Inorganic Carbon and Its Stable Isotopic Composition in the Surface Stream of Karst Groundwater Recharge .....	LI Li, PU Jun-bing, LI Jian-hong, <i>et al.</i> ( 527 )
Succession Pattern of Phytoplankton of Daning River in the Three Gorges Reservoir and Its Driving Factors .....	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU De-fu, <i>et al.</i> ( 535 )
Response of the Water Quality of a Stratified Reservoir to an Extreme El Niño Event During Summer .....	QIU Xiao-peng, HUANG Ting-lin, ZENG Ming-zheng, <i>et al.</i> ( 547 )
Effect of Coupling Process of Wetting-Drying Cycles and Seasonal Temperature Increasing on Sediment Nitrogen Minerization in the Water Level Fluctuating Zone .....	LIN Jun-jie, LIU Dan, ZHANG Shuai, <i>et al.</i> ( 555 )
Photo-induced Phosphate Release from Organic Phosphorus Decomposition Driven by Fe(III)-oxalate Complex in Lake Water .....	JIANG Yong-can, PENG Yun-xiao, LIU Guang-long, <i>et al.</i> ( 563 )
Preparation and Phosphorus Removal Mechanism of Highly Efficient Phosphorus Adsorbent Mg/Al-LDO .....	WANG Wei-dong, HAO Rui-xia, ZHANG Xiao-xian, <i>et al.</i> ( 572 )
Efficiency and Mechanism of Nitrogen and Phosphorus Removal in Modified Zeolite Wetland .....	WU Peng, LU Shuang-jun, XU Le-zhong, <i>et al.</i> ( 580 )
Repression of Nitrogen and Phosphorus Release from Lakeshore Sediment by Five Littoral-zone Plants .....	YAO Cheng, HU Xiao-zhen, LU Shao-yong, <i>et al.</i> ( 589 )
Simulated Desorption Kinetics of Lead by the Dominant Plant Roots Released Low Molecular Weight Organic Acids from the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir .....	HE Yuan-jie, LIU Jiang, JIANG Tao, <i>et al.</i> ( 600 )
Experimental Research of Hg <sup>2+</sup> Removal by TiO <sub>2</sub> /Bentonite Composite .....	TANG Xing-ping, ZHOU Xiong, ZHANG Jin-yang, <i>et al.</i> ( 608 )
Impact of Ammonia and H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> on Bromate and Disinfection By-products Control .....	WANG Yong-jing, DU Xu, JIN Meng, <i>et al.</i> ( 616 )
Influencing Factors of Bacterial Activity in Water Distribution Networks .....	WANG Xiao-dan, ZHAO Xin-hua, <i>et al.</i> ( 622 )
Adsorptive Remediation of Cr(VI) Contaminated Groundwater with Chemically Synthesized Schwertmannite .....	ZHU Li-chao, LIU Yuan-yuan, LI Wei-min, <i>et al.</i> ( 629 )
Characteristics and Mechanism of Hybrid Ozonation-Coagulation Process in Wastewater Reclamation .....	HOU Rui, JIN Xin, JIN Peng-kang, <i>et al.</i> ( 640 )
Nitrogen Removal Effect and Conversion Characteristics of Nitrous Oxide in Single-stage and Multi-stage A/O Processes .....	GUO Chang-zi, ZHANG Feng-yan, LIU Fu-yu, <i>et al.</i> ( 647 )
Nitrogen Removal Performance of ANAMMOX with Different Organic Carbon Sources .....	GUAN Yong-jie, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> ( 654 )
Operational Performance and Microbial Community Structure in a Completely Mixed Aeration System .....	WANG Shuo, XU Qiao, ZHANG Guang-sheng, <i>et al.</i> ( 665 )
Start-up of Combined Floc-granule CANON Process and the Effects of SRT on Reactor Performance .....	SUN Yan-fang, HAN Xiao-yu, ZHANG Shun-jun, <i>et al.</i> ( 672 )
Effects of Free Ammonia Regulation on the Performance of High Solid Anaerobic Digesters with Dewatered Sludge .....	DAI Xiao-hu, HE Jin, YAN Han, <i>et al.</i> ( 679 )
Highly Efficient Bioflocculation of Microalgae Using <i>Mucor circinelloides</i> .....	GU Qiong, JIN Wen-biao, CHEN Yuan-qing, <i>et al.</i> ( 688 )
Effect of Zero Valent Iron on the Decline of Tetracycline Resistance Genes and Class 1 Integrons During Thermophilic Anaerobic Digestion of Sludge .....	WEI Xin, XUE Shun-li, YANG Fan, <i>et al.</i> ( 697 )
Concentration, Sources and Ecological Risks of PAHs of Different Land Use Types in Shenfu New City .....	WANG Jing, LIU Ming-li, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> ( 703 )
Compositions, Sources and Health Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Surface Dusts from Driving-schools in a City of Henan Province, China .....	CHEN Yi-nan, MA Jian-hua, DUAN Hai-jing, <i>et al.</i> ( 711 )
Remediation of Decabromodiphenyl Ether Contaminated Sediment Through Plant Roots Enhanced by Exogenous Microbes .....	YANG Lei-feng, YIN Hua, PENG Hui, <i>et al.</i> ( 721 )
Impacts of Bioremediation on Microbial Communities and Different Forms of Nitrogen in Petroleum Contaminated Soil .....	YE Xi-qiong, WU Man-li, CHEN Kai-li, <i>et al.</i> ( 728 )
Effects of <i>Rhodospseudomonas palustris</i> PSB06 on Pepper Rhizosphere Microbial Community Structure .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, ZUO Hui, <i>et al.</i> ( 735 )
Effect of Reclaimed Water on Bacterial Community Composition and Function in Urban River Sediment .....	DI Yan-ming, WANG Guang-xuan, HUANG Xing-ru, <i>et al.</i> ( 743 )
Effects of Different Vegetation Types and Reclamation Years on Soil Bacterial Community Structure in Reclaimed Mine Areas .....	HE Long, LI Yan-qin, LI Bin-chun, <i>et al.</i> ( 752 )
Characteristic of Abundances and Diversity of Carbon Dioxide Fixation Microbes in Paddy Soils .....	LIU Qiong, WEI Xiao-meng, WU Xiao-hong, <i>et al.</i> ( 760 )
Effects of Biochar Pyrolyzed at Varying Temperatures on Soil Organic Carbon and Its Components: Influence on the Composition and Properties of Humic Substances .....	ZHAO Shi-xiang, YU Xiao-ling, LI Zhong-hui, <i>et al.</i> ( 769 )
Straw Composts with Composite Inoculants and Their Effects on Soil Carbon and Nitrogen Contents and Enzyme Activity .....	NIE Wen-han, QI Zhi-ping, FENG Hai-wei, <i>et al.</i> ( 783 )
Comparative Analysis on Effect of Wheat Straw and Its Biochar Amendment on Net Global Warming Potential Under Wheat-Maize Rotation Ecosystem in the Guanzhong Plain .....	CHENG Gong, CHEN Jing, LIU Jing-jing, <i>et al.</i> ( 792 )
Isolation and Identification of a Chlorobenzene-degrading Bacterium and Its Degradation Characteristics .....	YE Jie-xu, LIN Tong-hui, LUO Yu-hao, <i>et al.</i> ( 802 )
Isolation, Identification and Metabolic Characteristics of a Heterotrophic Denitrifying Sulfur Bacterial Strain .....	TAN Wen-bo, MA Xiao-dan, HUANG Cong, <i>et al.</i> ( 809 )
Effects of Continuous Application of Sewage Sludge Compost on Heavy Metals Accumulation and Mobility Characteristics in Soil Profile and on Heavy Metals Uptake of Wheat .....	SUN Na, SHANG He-ping, RU Shu-hua, <i>et al.</i> ( 815 )
Effects of Nitrogen Application on Selenium Uptake, Translocation and Distribution in Winter Wheat .....	CHEN Yu-peng, PENG Qin, LIANG Dong-li, <i>et al.</i> ( 825 )
Accumulation and Biotransformation in Typical Freshwater Algae Species Influenced by Titanium Dioxide Nanoparticles Under Long-term Exposure .....	LI Jin-li, WANG Zhen-hong, YAN Ya-meng, <i>et al.</i> ( 832 )
Sorption of <i>p</i> -Nitrophenol by Biochars of Corn cob Prepared at Different Pyrolysis Temperatures .....	MA Feng-feng, ZHAO Bao-wei ( 837 )

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2017年2月15日 第38卷 第2期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 38 No. 2 Feb. 15, 2017

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	北京宝昌彩色印刷有限公司	Printed	by	Beijing Baochang Color Printing Co., Ltd.
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易集团有限公司 (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: 140.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行

ISSN 0250-3301



9 770250 330172