

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

肆秩芳华担使命 踔厉扬帆向未来
——庆祝厦门大学环境学科创立40周年



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2022年11月

第43卷 第11期
Vol.43 No.11

目次

厦门大学环境学科创立40周年专栏

新污染物共排放对生态环境监测和管理的挑战	王佩, 黄欣怡, 曹致纬, 吴朝阳, 吕永龙 (4801)
河口-近海环境新污染物的环境过程、效应与风险	王新红, 于晓璇, 王思权, 殷笑晗, 钱韦旭, 林晓萍, 吴越, 刘畅 (4810)
海水痕量营养盐和金属的分子光谱分析方法研究进展	袁东星, 黄勇明, 王婷 (4822)
环境水体中硫化物的分析方法: 从实验室分析到原位监测	李鹏, 林坤德, 袁东星 (4835)
环境水体中无机砷现场分析方法研究进展	薄光永, 陈钊英, 弓振斌, 马剑 (4845)
海洋痕量元素采样技术和分析方法的发展及展望: 厦门大学痕量元素平台建设进展	黄勇明, 周宽波, 陈耀瑾, 张楠, 杨俊波, 戴民汉, 曹知勉, 蔡毅华 (4858)

聚乙烯微塑料的微生物降解研究进展	骆苑蓉, 钱义谦, 齐雅楠 (4869)
水稻土中氮素对微生物固氮的扰动及效应机制	王锋, 张静, 周少余, 王鸿辉, 李建, 赵聪媛, 黄鹏, 陈铮 (4876)
中国海洋生态毒理学研究中的毒性测试生物	史天一, 洪海征, 王明华, 谭巧国, 史大林 (4888)
中国油气系统甲烷逸散排放估算	陈春赐, 吕永龙, 贺桂珍 (4905)
2015~2020年厦漳泉地区大气氨排放清单及分布特征	李香, 吴水平, 姜炳祺, 刘怡靖 (4914)
九龙江口微塑料与抗生素抗性基因污染分布特征	程宏, 陈荣 (4924)
厦门湾沙滩沉积物微塑料污染特征	姚蕊, 刘花台, 李永玉, 刘潇雅, 吴海波, 王新红 (4931)
九龙江口-厦门湾海域中溶解态痕量金属的时空分布特征与影响机制	戚柳倩, 岳新利, 钟灏文, 王棋, 王德利, 陈能汪 (4939)
福建省流域-近海溶解氧时空格局与低氧调控机制	杨艾琳, 杨芳, 李少斌, 余其彪, 陈能汪 (4950)
厦门西溪河口沉积物活性磷的分布特征及迁移转化机制	潘峰, 蔡宇, 郭占荣, 王新红 (4961)
改性生物炭固定床对模拟湖水体中 Mn^{2+} 的吸附	赵洁, 叶志隆, 王佳妮, 蔡冠竟 (4971)
基于表面增强拉曼光谱技术的饮用水中痕量恩诺沙星和环丙沙星快速检测	徐婧, 郑红, 卢江龙, 刘国坤 (4982)
紫外驱动高级氧化法降解水体中的磷酸三苯酯	徐子文, 印红玲, 熊远明, 宋娇娇, 譙杨 (4992)

研究报告

2019年秋季海南省4次臭氧污染过程特征及潜在源区分析	符传博, 陈红, 丹利, 徐文帅 (5000)
伊犁河谷夏季 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 中水溶性无机离子浓度特征和形成机制	陈巧, 谷超, 徐涛, 周春华, 张国涛, 赵雪艳, 吴丽萍, 李新琪, 杨文 (5009)
城区与郊区 $PM_{2.5}$ 污染及传输特征差异性	齐鹏, 周颖, 程水源, 白伟超 (5018)
南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估	冯悦政, 安俊琳, 张玉欣, 王俊秀 (5030)
我国陆域水体系统表层水中微塑料生态风险评估	孙晓楠, 陈浩, 贾其隆, 朱奔, 马长文, 叶建峰 (5040)
东江流域不同空间尺度景观格局对水质影响分析	陈优良, 邹文敏, 刘星根, 曾金凤, 李丹, 郑汉奕 (5053)
长江与黄河源丰水期地表水中汞的分布特征、赋存形态及来源解析	刘楠涛, 吴飞, 袁巍, 王训, 王定勇 (5064)
青藏高原湖泊水环境特征及水质评价	刘智琦, 潘保柱, 韩谔, 李刚, 王韬轶 (5073)
基于水化学与硫同位素的卡林型金矿区岩溶水文地球化学特征及控制因素	查学芳, 吴攀, 李学先, 陈世万, 黄家琰, 李清光, 陈思睿 (5084)
丹江口水库真核浮游植物群落分布特征及其与环境因子的关系	贺玉晓, 买思婕, 任玉芬, 李卫国, 赵同谦, 马寅男 (5096)
铜沸石对磷和重金属的吸附与底泥钝化性能	王哲, 朱俊, 李雯, 闫德馨, 董雯, 刘玉玲, 李家科 (5106)
基于宏基因组与宏转录组分析石化废水生物处理系统脱氮功能菌群	章旭, 周佳佳, 周珉, 罗西子, 严新杰, 刘勇弟, 厉巍 (5115)
寒冷地区 IFAS + 磁混凝污水厂菌群结构和抗生素抗性基因分析	杜文琰, 姚俊芹, 马辉英, 胡渊鑫, 张春雷, 陈银广 (5123)
中国旱作农田一氧化氮排放及减排: Meta 分析	田政云, 吴雄伟, 吴媛媛, 魏佳楠, 白鹤, 顾立新 (5131)
硝化抑制剂对我国蔬菜生产产量、氮肥利用率和氧化亚氮减排效应的影响: Meta 分析	刘发波, 马笑, 张芬, 梁涛, 黎亮武, 王军杰, 陈新平, 王孝忠 (5140)
不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响	邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 伍延正, 李金秋, 张广林 (5149)
不同水分条件下土地利用方式对我国热带地区土壤硝化过程及 NO 和 N_2O 排放的影响	唐瑞杰, 胡煜杰, 赵彩悦, 赵炎, 袁新生, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (5159)
基于文献计量分析的长江经济带农田土壤重金属污染特征	刘孝严, 樊亚男, 刘鹏, 吴秋梅, 胡文友, 田康, 黄标 (5169)
基于 EBK 插值预测和 GDM 模型的襄州区耕地土壤重金属时空分布及来源变化分析	高浩然, 周勇, 刘甲康, 程晓明, 郭嵩, 江衍, 谭恒鑫 (5180)
基于 GIS 对宁夏某铜银矿区周边土壤重金属来源解析	张扣扣, 贺婧, 钟艳霞, 魏琪琪, 陈锋 (5192)
老化作用对生物炭钝化白云鄂博矿区碱性土壤中 Cd^{2+} 的影响	王哲, 程俊丽, 卞园, 郑春丽, 王维大, 姜庆宏 (5205)
磁性氧化铁/桑树杆生物炭的制备及其对砷污染土壤溶解性有机碳和砷形态的影响	芦琳, 颜利玲, 梁美娜, 成官文, 朱宗强, 朱义年, 王敦球 (5214)
牡蛎壳粉和石灰改良酸性水稻土对磷有效性、形态和酶活性的影响	赵丽芳, 黄鹏武, 杨彩迪, 卢升高 (5224)
磷、锌和镉交互作用对小白菜生长和锌镉累积的影响	帅祖华, 刘汉燧, 崔浩, 魏世强 (5234)
重庆开州区农地土壤抗生素污染特征及潜在生态环境风险评估	方林发, 叶萃萃, 方标, 范晓霞, 高坤鹏, 李士洋, 陈新平, 肖然 (5244)
基于 InVEST 和 GeoSoS-FLUS 模型的黄河源区碳储量时空变化特征及其对未来不同情景模式的响应	侯建坤, 陈建军, 张凯琪, 周国清, 尤号田, 韩小文 (5253)
黄土丘陵区不同恢复植被类型的固碳特征	许小明, 张晓萍, 何亮, 郭晋伟, 薛帆, 邹亚东, 易海杰, 贺洁, 王浩嘉 (5263)
土壤多功能性对微生物多样性降低的响应	陈桂鲜, 吴传发, 葛体达, 陈剑平, 邓扬悟 (5274)
氮添加对不同坡度退化高寒草甸土壤真菌多样性的影响	苏晓雪, 李希来, 李成一, 孙华方 (5286)
碳减排背景下我国与世界主要能源消费国能源消费结构与模式对比	李辉, 庞博, 朱法华, 孙雪丽, 徐静馨, 王圣 (5294)
中国能源消费碳排放的空间化与时空动态	郝瑞军, 魏伟, 刘春芳, 颜斌斌, 杜海波 (5305)
京津冀及周边地区“2+26”城市结构性调整政策的 CO_2 协同减排效益评估	杨添祺, 王洪昌, 张辰, 朱金伟, 崔宇韬, 谭玉玲, 束轲 (5315)
我国塑料污染防治政策分析与建议	李欢, 朱龙, 沈茜, 贺亚楠, 邓义祥, 安立会 (5326)

南京北郊 BTESX 特征及健康风险评估

冯悦政¹, 安俊琳^{1*}, 张玉欣², 王俊秀³

(1. 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, 南京 210044; 2. 青海省人工影响天气办公室, 西宁 810000; 3. 呼和浩特市气象局, 呼和浩特 010020)

摘要: 采用 AMA GC5000BTX 监测 2014 年 1 月~2016 年 12 月南京北郊大气中苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和苯乙烯(BTESX)的体积分数, 分析了 BTESX 体积分数的变化特征以及气象要素对其的影响, 并使用特征比值法(T/B)对 BTESX 的来源进行了定性分析, 最后利用 EPA 的人体暴露分析评价方法对 BTESX 健康风险进行评估。结果表明, 在观测期间, φ (BTESX)平均值为 $(7.28 \pm 6.63) \times 10^{-9}$, 其中 φ (苯)最高, 为 $(2.45 \pm 3.91) \times 10^{-9}$, 其他物种体积分数由大到小为: 甲苯 > 乙苯 > 间/对-二甲苯 > 邻-二甲苯 > 苯乙烯, 分别为: $(2.41 \pm 2.61) \times 10^{-9}$ 、 $(1.37 \pm 1.28) \times 10^{-9}$ 、 $(0.51 \pm 0.48) \times 10^{-9}$ 、 $(0.30 \pm 0.36) \times 10^{-9}$ 和 $(0.22 \pm 0.42) \times 10^{-9}$ 。由于存在稳定的芳烃源, BTESX 体积分数的月变化和季节变化均不如其他物种(NO_x 、 CO 、 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 等)明显。同时, BTESX 及其他污染物的“周末效应”不显著。BTESX 体积分数很大程度受到来自东北方向化工等企业以及交通主干道的污染物短距离输送的影响, 导致 BTESX 体积分数在东北方向上较大。BTESX 体积分数受到相对湿度和温度的共同影响, 其高值区主要位于 30%~70% 相对湿度范围内, 在该相对湿度范围内, 温度越高, BTESX 体积分数高值区域范围也越大。BTESX 在不同季节的 HI(危害指数)处于 EPA 认定的安全范围内, 而 R (苯致癌风险)值则高于 EPA 规定的安全阈值, 同时 HI 和 R 值在夏季较高, 因此需要高度重视。

关键词: BTESX; 时间变化; 南京北郊; 周末效应; 健康风险评估

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2022)11-5030-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202201051

Characteristics and Health Risk Assessment of BTESX in the Northern Suburbs of Nanjing

FENG Yue-zheng¹, AN Jun-lin^{1*}, ZHANG Yu-xin², WANG Jun-xiu³

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Weather Modification Office of Qinghai Province, Xining 810000, China; 3. Hohhot Meteorological Bureau, Hohhot 010020, China)

Abstract: AMA GC5000BTX was used to monitor the mixing ratio of benzene, toluene, ethylbenzene, *m,p*-xylene, *o*-xylene, and styrene (BTESX) in the atmosphere of the northern suburb of Nanjing from January 2014 to December 2016. The temporal variation characteristics of BTESX and the influence of meteorological elements on it were analyzed, and the characteristic ratio method (T/B) was used to qualitatively analyze the source of BTESX. Finally, the human exposure analysis and evaluation method of EPA was used to evaluate the health risk of BTESX. The results showed that during the observation period, the average mixing ratio of BTESX was $(7.28 \pm 6.63) \times 10^{-9}$, and the mixing ratio of benzene was the highest at $(2.45 \pm 3.91) \times 10^{-9}$. The mixing ratio of other species from large to small was toluene > ethylbenzene > *m,p*-xylene > *o*-xylene > styrene, which were $(2.41 \pm 2.61) \times 10^{-9}$, $(1.37 \pm 1.28) \times 10^{-9}$, $(0.51 \pm 0.48) \times 10^{-9}$, $(0.3 \pm 0.36) \times 10^{-9}$, and $(0.22 \pm 0.42) \times 10^{-9}$, respectively. Due to the existence of stable aromatic sources, the monthly and seasonal variation in BTESX mixing ratio was not as obvious as that of other species (NO_x , CO , SO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, etc.). The weekend effect of BTESX and other pollutants was not significant. The mixing ratio of BTESX was largely affected by the short distance transportation of chemical enterprises and traffic trunk roads in the northeast, resulting in a large mixing ratio of BTESX in the northeast. The mixing ratio of BTESX was jointly affected by relative humidity and temperature, and its high value area was mainly located in the range of 30%-70% relative humidity. In this range of relative humidity, the high value range of BTESX volume fraction increased with the elevation of temperature. The HI (hazard index) of BTESX in different seasons was within the safety range recognized by EPA, whereas the R (carcinogenic risk of benzene) value was higher than the safety threshold specified by EPA. At the same time, the HI and R values were higher in summer, to which great attention should be paid.

Key words: BTESX; time variation characteristics; northern suburb of Nanjing; weekend effect; health risk assessment

可挥发性有机物(volatile organic compounds, VOCs)作为一种十分重要的大气污染物,其由数百种物质组成;其来源也十分复杂,包括汽车尾气、燃料蒸发、工业加工、家用产品和溶剂使用^[1]。Shao等^[2]曾对南京北郊地区的VOC进行过来源解析,发现其来源分别为工业生产(22%)、液化石油气/天然气使用(9%)、植被排放(5%)、溶剂使用(18%、12%)和车辆排放(34%)。BTESX(苯、甲苯、乙苯和二甲苯)作为非甲烷VOC的主要物种,具有较高

的反应活性,能与大气中的 $\cdot\text{OH}$ 、 $\text{HO}_2\cdot$ 和 $\text{NO}_3\cdot$ 等自由基发生反应,进而生成臭氧(O_3)和二次有机气溶胶(SOA)^[3]。随着城市化进程加快,汽车保有量的增加,臭氧污染正成为我国京津冀^[4,5]、长三角^[6~8]

收稿日期: 2022-01-06; 修订日期: 2022-03-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(42075177); 国家重点研发计划项目(2017YFC0210003); 江苏省高校“青蓝工程”项目

作者简介: 冯悦政(1998~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气污染研究与风险评价, E-mail: 20201203002@nuist.edu.cn

* 通信作者, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

和珠三角^[9,10]等经济发达地区的主要污染特征。 O_3 作为光化学污染的主要物种, 不仅会直接影响到人体以及生态健康^[11~14], 作为一种温室气体, 还会影响全球大气变暖^[15]。BTEX 作为空气中的持久性环境污染物^[16], 长期接触将会对人们的健康造成明显危害, 包括对黏膜, 眼睛以及喉咙等具有刺激性^[17]。据世界卫生组织估计, 城市人口终生暴露在苯浓度为 $1.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的情况下, 会导致十万分之一患白血病的几率^[18], 而甲苯、二甲苯和乙苯存在致畸和致突变的危害^[19]。

南京北郊地区, 作为南京市重要工业区之一, 当地的重工企业, 例如石化企业的生产、储存和运输过程是大气中 VOC 的主要来源, 其中高活性 VOC 容易造成高浓度的臭氧污染^[20]。BTEX 作为 VOC 中的重要组分, 以及具有较高的 O_3 和 SOA 生成潜势, 其变化特征对 O_3 以及 SOA 的生成具有十分重要的影响, 并且对人体健康也存在较大危害。近十年来, 国内对于 BTEX 的研究在北京^[21,22]、天津^[23]、上海^[24] 和广州^[25] 等城市均有

报道。在南京北郊地区, 对 BTEX 的连续观测时间跨度往往不超过一年, 且关于气象要素对 BTEX 的影响的研究较少, 因此对 BTEX 变化特征描述仍不够全面。

在此背景下, 本文选取了 3 a (2014 ~ 2016 年) 的南京北郊大气中 BTESX (在 BTEX 的基础上加上苯乙烯) 的观测结果, 同时结合气象要素 (风速、风向、温度和相对湿度) 数据, 以此厘清南京北郊地区 BTESX 的主要变化特征, 以期为日后制定因地制宜的 BTESX 减排措施提供依据。

1 材料与方法

1.1 观测站点与观测资料

观测站点设置在位于南京江北工业地区的南京信息工程大学气象楼楼顶 (32.2°N , 118.7°E ; 海拔 62 m), 四周无高大建筑物遮挡。观测站点与南京高新技术产业开发区和南京化学工业园区相邻 (相距 5 ~ 15 km)。化工园区内重工产业聚集, 主要包括石化、精细化工、钢铁和电力等。(见图 1)。

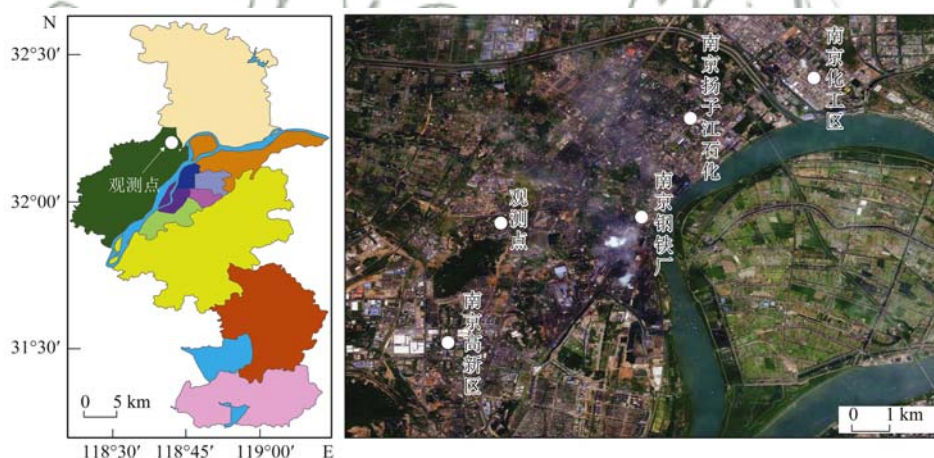


图 1 观测站点位置以及周围环境

Fig. 1 Observation site location and surrounding environment

1.2 气态污染物监测仪器及方法

BTESX 的监测使用的是德国 AMA 公司生产的 GC5000 自动在线气相色谱氢火焰离子化检测仪 (gas chromatography-flame ionization detector, GC-FID). GC5000 是一台集自动采样、富集和分析功能于一体的色谱仪, 包括 GC5000-VOC (双级富集) 和 GC5000-BTX (单级富集) 两套独立的分析色谱仪, 分别测量 $C_2 \sim C_6$ (2 ~ 6 个碳原子的 VOCs, 下同) 的低沸点 VOCs 物种和 $C_4 \sim C_{12}$ 的高沸点 VOCs 物种, 观测系统的采样时间分辨率为 1 h。为保证数据的有效性和可靠性, 观测期间每隔 3 周进行校准, 校准时采用美国环保署承认的 Linde Gas American LLC 混合标准气体 (校准时 $R > 0.995$)。其中详细的仪器参数以及校准方法可参见文献[26]。

O_3 、 NO_x 、 SO_2 和 CO 等的观测采用美国赛默飞世尔环境设备公司的大气环境监测分析仪 (包括 49i 紫外发光 O_3 分析仪、42i 化学发光 $NO-NO_2-NO_x$ 分析仪、43i 紫外发光 SO_2 分析仪和 48i 红外吸收 CO 分析仪)。仪器的采样时间分辨率为 5 min。仪器参数及标定方法见文献[27]。 $PM_{2.5}$ 观测采用美国热电公司生产的 FH62C14 型 β 射线在线大气颗粒物浓度观测仪, 采样时间分辨率均为 30 min。为了保证观测数据的有效性和可靠性, 观测期间对仪器进行定期校准与维护, 期间的异常值和仪器校准的时间段均被剔除, 低于仪器检测限的数据由检测限的一半代替。

本研究考虑的是 BTESX 的光化学反应, 因此对降水日的数据进行了剔除, 另外将仪器故障以及仪

器标定时间数据去除,剩余样本为 786 d. BTESX、NO_x、O₃、SO₂、CO 和 PM_{2.5} 的数据样本量分别为 19 076、23 319、23 872、24 034、23 579 和 20 995 个(时间分辨率为 1 h).

1.3 气象数据

选取了风向、风速、温度和相对湿度这 4 个气象要素,其中气象数据来源于 CAWS600 型自动气象站,时间分辨率为 1 h. 该仪器放置在南京信息工程大学校园内中国气象局气象探测实验基地. 风向、风速、温度和相对湿度样本量分别为 26 221、26 221、24 330 和 24 558 个(时间分辨率为 1 h).

1.4 健康风险评价

本研究中健康风险方法利用美国环保署(Environmental Protection Agency, EPA)于 2009 年提出的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价新方法(EPA-540-R-070-002). 计算公式如下:

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

$$HQ = EC / (RfC \times 1000) \quad (2)$$

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

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

式中,EC 为慢性和亚慢性暴露时的暴露浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),CA 为环境空气中 VOCs 在采样时间段的平均浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),ET 为暴露时间($24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$),EF 为暴露频率($365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$),ED 为人体终生暴露时间(70a),AT 为平均时间($70 \times 365 \times 24 \text{ h}$),RfC 为污染物参考量 [$\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d}^{-1})$],HQ 为非致癌风险危害商值,HI 为多种污染物危害商值之和即危害指数,上述健康风险评价方法的相关参数说明见文献[28]. 根据文献[29],苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯、邻-二甲苯和苯乙烯的 RfC 值分别为 0.03、5、

1、0.1、0.1 和 1. R 为苯致癌风险值(risk),IUR 为污染物单位吸入致癌风险($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)⁻¹,苯的 IUR 指导数值为 7.80×10^{-6} .

在进行健康风险评估前需将 BTESX 体积分数($\times 10^{-9}$)转化为质量浓度($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$),转化公式如下:

$$c_m = \frac{M}{22.4} c_v \frac{273.15}{273.15 + T} \frac{p}{1013.25} \quad (5)$$

式中, c_m 为污染气体质量浓度; M 为气体相对分子质量; c_v 为测定 VOCs 体积分数; T 为温度; p 为气压.

1.5 数据分析与统计方法

本研究运用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,包括显著性检验和相关性分析. 其中显著性检验包括独立样本 t 检验和 ANOVA 单因素方差分析及多重比较(Lsd 检验, $P < 0.05$ 显著差异),相关性分析采用 Pearson 相关系数进行分析($P < 0.05$ 时显著相关).

归一化,即将一系列数据变化到某个固定区间范围内,通常这个区间为[0, 1]. 其计算公式如下:

$$X = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

式中, X_i 为原始数据, $X_{\min}$ 和 $X_{\max}$ 分别对应的是原始数据的最小值和最大值.

2 结果与讨论

2.1 BTESX 以及其他污染物的年均值

如表 1 所示,BTESX 中, φ (苯)在 3 a(2014 ~ 2016 年)中最高[(2.45 ± 3.91) $\times 10^{-9}$],其他物种体积分数由大到小为:甲苯 > 乙苯 > 间/对-二甲苯 > 邻-二甲苯 > 苯乙烯,分别为(2.41 ± 2.61) $\times 10^{-9}$ 、(1.37 ± 1.28) $\times 10^{-9}$ 、(0.51 ± 0.48) $\times$

表 1 2014 ~ 2016 年 BTESX 及其他污染物均值¹⁾

Table 1 Mean values of BTESX and other pollutants from 2014 to 2016

类别	2014 年		2015 年		2016 年		2014 ~ 2016 年	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值	范围	均值
苯	0.02 ~ 64.07	3.00 ± 4.54a	0.02 ~ 45.90	2.55 ± 3.89b	0.02 ~ 37.03	1.63 ± 2.69c	0.02 ~ 64.07	2.45 ± 3.91
甲苯	0.01 ~ 40.98	2.66 ± 2.89a	0.01 ~ 33.33	2.22 ± 2.39b	0.01 ~ 42.17	2.25 ± 2.35b	0.01 ~ 42.17	2.41 ± 2.61
乙苯	0.01 ~ 13.88	1.64 ± 1.29a	0.01 ~ 26.07	1.50 ± 1.22b	0.01 ~ 21.73	0.90 ± 1.20c	0.01 ~ 26.07	1.37 ± 1.28
间/对-二甲苯	0.01 ~ 8.67	0.56 ± 0.50b	0.01 ~ 6.89	0.58 ± 0.48a	0.01 ~ 12.09	0.38 ± 0.42c	0.01 ~ 12.09	0.51 ± 0.48
苯乙烯	0.01 ~ 6.99	0.22 ± 0.33b	0.01 ~ 3.74	0.18 ± 0.26c	0.01 ~ 6.40	0.24 ± 0.59a	0.01 ~ 6.99	0.22 ± 0.42
邻-二甲苯	0.01 ~ 9.27	0.36 ± 0.36b	0.01 ~ 7.34	0.38 ± 0.41a	0.01 ~ 1.97	0.14 ± 0.24c	0.01 ~ 9.27	0.30 ± 0.36
BTEXS	0.16 ~ 92.53	8.47 ± 7.74a	0.07 ~ 53.29	7.44 ± 6.09b	0.07 ~ 50.27	5.56 ± 4.87c	0.07 ~ 92.53	7.28 ± 6.63
NO	0.25 ~ 171.20	8.44 ± 13.72a	0.25 ~ 170.11	8.71 ± 12.05a	0.25 ~ 194.94	8.78 ± 12.70a	0.25 ~ 194.94	8.64 ± 12.88
NO ₂	0.25 ~ 88.95	21.19 ± 12.93a	0.50 ~ 80.39	19.36 ± 10.80b	0.56 ~ 82.92	18.98 ± 11.37c	0.25 ~ 88.95	19.90 ± 11.83
NO _x	1.59 ~ 236.41	29.64 ± 22.65a	0.74 ~ 214.37	28.08 ± 19.82b	0.81 ~ 209.71	27.77 ± 21.05b	0.74 ~ 236.41	28.54 ± 21.28
O ₃	0.50 ~ 116.20	21.79 ± 19.69a	0.50 ~ 206.58	20.45 ± 20.65b	1.13 ~ 92.96	20.94 ± 16.20b	0.50 ~ 206.58	21.10 ± 18.97
SO ₂	0.25 ~ 64.05	7.65 ± 6.97a	0.25 ~ 64.02	5.52 ± 5.56b	1.36 ~ 46.26	5.66 ± 4.30b	0.25 ~ 64.05	6.33 ± 5.85
CO	0.20 ~ 17.31	0.88 ± 0.68a	0.13 ~ 9.05	0.89 ± 0.60a	0.06 ~ 5.79	0.81 ± 0.56b	0.02 ~ 17.31	0.86 ± 0.62
PM _{2.5}	0.50 ~ 353.50	57.11 ± 36.02b	1.00 ~ 361.00	65.28 ± 44.38a	1.00 ~ 332.00	53.37 ± 38.64c	0.50 ~ 361.00	58.92 ± 40.14

1) PM_{2.5} 的单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, CO 的单位为 $\times 10^{-6}$, 其余为 $\times 10^{-9}$; 相同小写字母表示同一物种不同年份间的差异性不显著($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异性达到显著水平($P < 0.05$)

10^{-9} 、 $(0.3 \pm 0.36) \times 10^{-9}$ 和 $(0.22 \pm 0.42) \times 10^{-9}$; $\varphi(\text{BTESX})$ 的体积分数为 $(7.28 \pm 6.63) \times 10^{-9}$. 2014~2016 年, BTESX 的体积分数呈下降趋势, 下降幅度约为 14%. 有研究表明, 甲苯与苯的比值 (T/B) 可以初步判断 BTEX 的来源^[30,31]. 南京北郊地区 2014~2016 年, T/B 由 0.89 上升至 1.38, 与交通来源的比值 (T/B 为 1.5~4.3)^[30] 愈加接近, 说明 BTESX 受到机动车的影响越来越大, 而受到化石燃料燃烧和燃煤排放 (T/B < 1)^[32] 影响减小. 参考南京市统计年鉴^[33,34], 工业废气排放由 2014 年的 8 172.39 亿 m^3 下降至 2016 年的 7 734.82 亿 m^3 , 下降幅度约为 5.35%; 而民用汽车拥有量则由 2013 年末的 140.41 万辆增长至 2016 年末的 221.68 万辆, 增长幅度为 57.1%, 表明南京地区 BTESX 受到交通排放的影响越来越大.

$\varphi(\text{O}_3)$ 的 3 a 平均值为 $(21.1 \pm 18.97) \times 10^{-9}$, 2014~2016 年, 其体积分数呈先下降后上升的趋势. 其他污染物分别为 $\varphi(\text{NO})$ (8.64 ± 12.88) $\times 10^{-9}$ 、 $\varphi(\text{NO}_2)$ (19.9 ± 11.83) $\times 10^{-9}$ 、 $\varphi(\text{CO})$ (0.86 ± 0.62) $\times 10^{-6}$ 、 $\varphi(\text{SO}_2)$ (6.33 ± 5.85) $\times 10^{-9}$ 和 $\rho(\text{PM}_{2.5})$ (58.92 ± 40.14) $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 其中大部分污染物都有不同程度的下降, 体现了近年来减排的效果.

2.2 BTESX 和其他污染物的月变化

如图 2 所示, 在 2014 年, $\varphi(\text{BTESX})$ 月均值在 1 月 (12.17×10^{-9}) 和 9 月 (12.69×10^{-9}) 较高; 在 2015 年, $\varphi(\text{BTESX})$ 月均值在 1 月 (8.41×10^{-9})、6 月 (8.81×10^{-9}) 和 8 月 (8.64×10^{-9}) 较高; 在 2016 年, $\varphi(\text{BTESX})$ 最低值出现在 9 月 (2.66×10^{-9}). 可以发现, 在 3a (2014~2016 年) 内, 除了 2016 年 9 月, BTESX 体积分数月均值整体变化趋势较为一致, 说明南京北郊地区存在稳定的芳烃源^[35,36].

在 2014 年, T/B 的月均值在 2 月 (0.71)、6 月 (0.60) 和 9 月 (0.63) 较低, 在 11 月 (1.38) 较高; 在 2015 年, T/B 的月均值在 8 月 (0.49) 和 10 月 (0.29) 较低, 12 月 (1.61) 出现峰值; 2016 年, T/B 的月均值在 2 月 (0.82) 和 10 月 (0.78) 较低, 在 12 月 (4.35) 的值较高. 此外, 虽然 T/B 在月尺度上存在一定差异, 但其均值在大部分月份都在 1 左右. 由于受到燃烧和机动车排放的影响^[37,38], 秋冬季节 T/B 会明显上升.

$\varphi(\text{O}_3)$ 在 3 a 的变化趋势类似, 其最大值一般出现在 4 月; 其他污染物 (NO、NO₂、CO、SO₂ 和 PM_{2.5}) 则由于大多受到燃烧或机动车排放的影响^[39], 其最大值往往出现在秋冬季节.

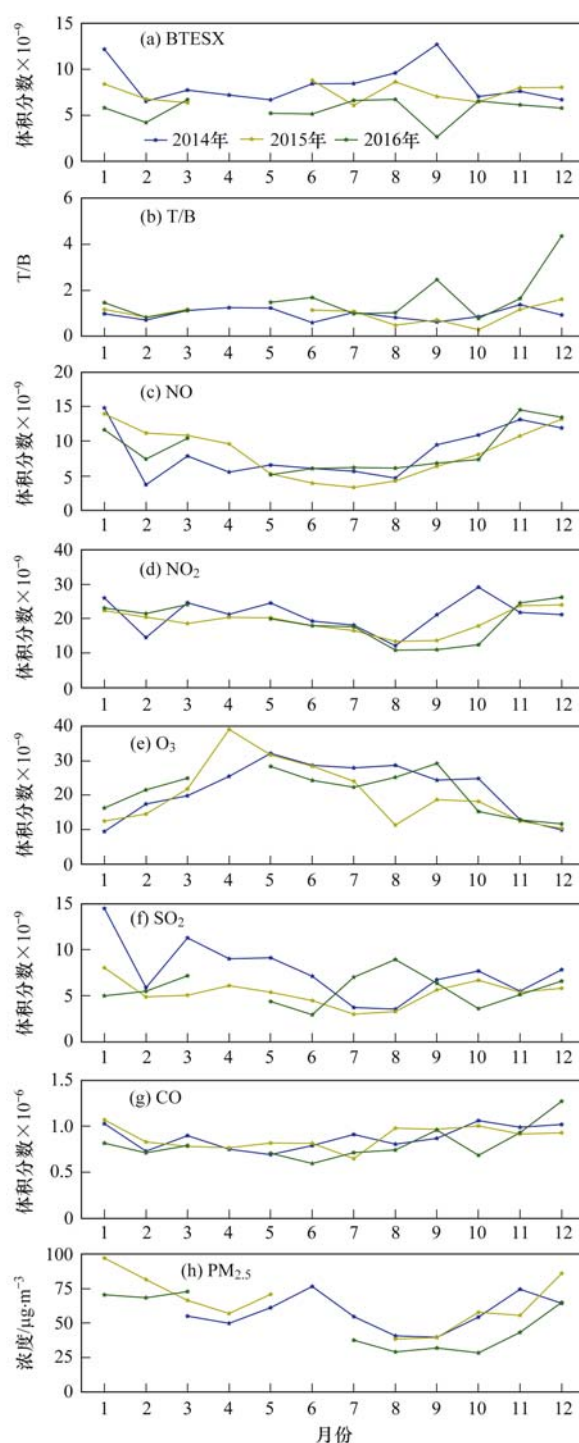
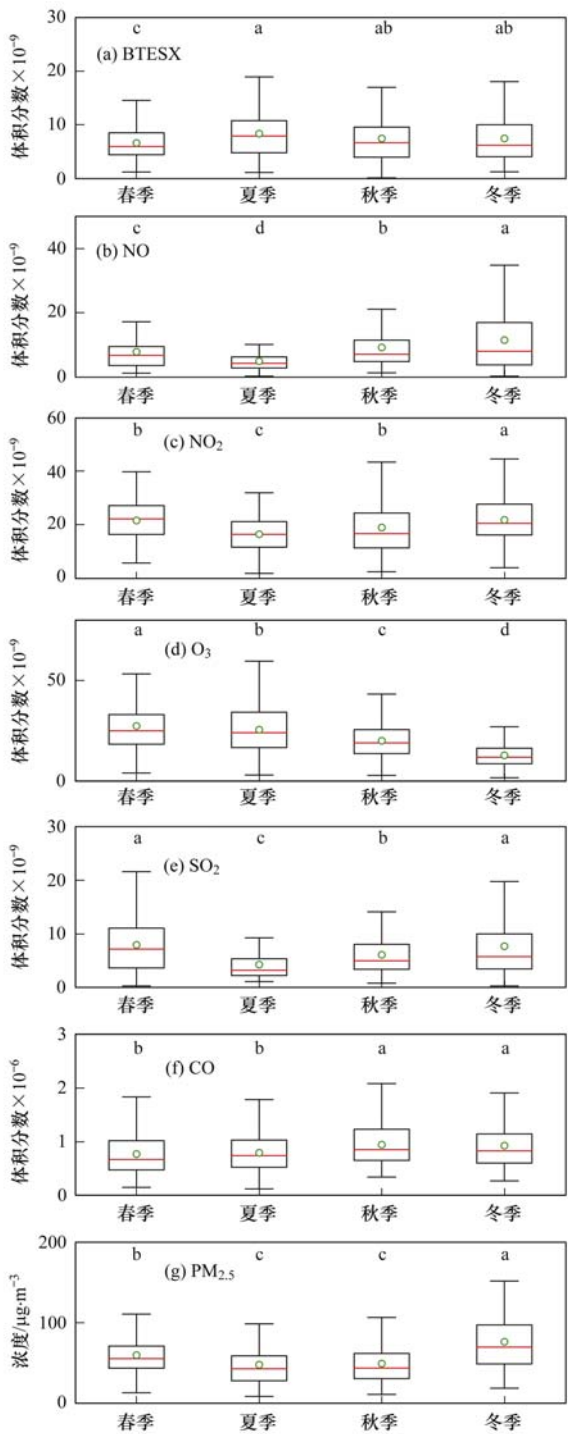


图 2 2014~2016 年 BTESX 以及其他污染物月变化

Fig. 2 Monthly changes in BTESX and other pollutants from 2014 to 2016

如图 3 所示, BTESX 体积分数存在一定的季节波动, 表现为: 夏季 > 冬季 > 秋季 > 春季, 其体积分数分别为 7.59×10^{-9} 、 7.17×10^{-9} 、 7.15×10^{-9} 和 6.69×10^{-9} , 同时可以发现 BTESX 体积分数春季的均值与夏秋冬均存在显著差异; $\varphi(\text{O}_3)$ 则表现为春季 > 夏季 > 秋季 > 冬季, 其体积分数分别为 27.99×10^{-9} 、 24.44×10^{-9} 、 18.80×10^{-9} 和 13.77×10^{-9} . 其他污染物的体积分数 (或浓度) 基本是秋



相同小写字母表示同一物种不同季节间的差异性不显著 ($P > 0.05$), 不同小写字母表示差异性达到显著水平 ($P < 0.05$), 绿点表示均值

图3 BTESX 以及其他污染物季节变化

Fig. 3 Seasonal changes in BTESX and other pollutants

冬季节较高, 而春夏季低。

BTESX 与其他物种及气象要素之间的相关性如表 2 所示. 可以发现, BTESX 与其他污染物 (NO 、 NO_2 、 SO_2 、 O_3 、 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$) 及气象要素 (风速、温度和相对湿度) 相关性不显著 ($P > 0.05$), 体现了 BTESX 来源与其他污染物不同. NO 、 NO_2 和 SO_2 之

间显著正相关 ($P < 0.05$), 表明它们来源类似; 由于 NO 对 O_3 的滴定作用^[40,41], 因此两者之间呈负相关. 同时可以发现, 温度和相对湿度等气象要素对于上述大多数污染物 (NO 、 NO_2 、 SO_2 和 CO 等) 呈负相关关系, 体现高温高湿对污染物的清除作用^[42,43]; 而温度与 O_3 呈显著正相关, 体现了温度对于光化学反应的促进作用^[44,45].

2.3 BTESX 及其他污染物的周变化

如表 3 所示, $\varphi(\text{BTESX})$ 最大值 (7.85×10^{-9}) 出现在星期六, $\varphi(\text{O}_3)$ 最大值 (21.70×10^{-9}) 出现在星期一, 其他污染物的体积分数 (或浓度) 最大值在星期一到星期五均有分布. “周末效应”早在 70 年代就由 Cleveland 等^[46] 提出, 即周末挥发性有机化合物和氮氧化物排放量较低, 但周末的臭氧浓度往往较工作日更高, 因此研究 BTESX 和其他污染物的工作日与周末差异对日后减排措施的制定具有一定参考价值. 如图 4 所示, 对 BTESX 和其他污染物的数据进行归一化处理, 并进行显著性检验. 结果发现, BTESX 和其他污染物工作日和周末差异均不显著 ($P > 0.05$). 这种“周末效应”不显著现象在美国南加州地区^[47] 和我国的天津市^[48] 的研究中也曾出现, 该现象基本出现在位于远离城市的郊区或乡下地区的监测站点, 因为“周末效应”的产生往往是由于人为活动的影响^[49,50], 城郊等地区受到人为活动影响较小.

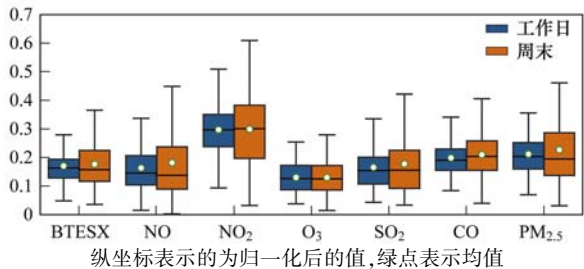


图4 BTESX 以及其他污染物工作日与周末对比

Fig. 4 Comparison between weekdays and weekends for BTESX and other pollutants

2.4 气象要素对 BTESX 的影响

图 5 为 BTESX 体积分数受风速、风向变化的风玫瑰图. 从中可知, 在 4 个季节内, BTESX 体积分数的高值基本都来自观测站点的东北方向且风速小于 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的区域内, 但是夏季的 BTESX 高值区域对应的风速较其他季节更大, 这与夏季溶剂挥发强以及气团输送较为活跃有关. 观测点的东北方向建有石化工业、钢铁厂和化工厂等大型企业, 还毗邻一条南北走向的主干道 (宁六公路). 因此, BTESX 很大程度上受到东北方向短距离输送的影响.

图 6 为 BTESX 体积分数随温度和相对湿度变

表 2 BTESX 与其他污染物和气象要素相关性¹⁾

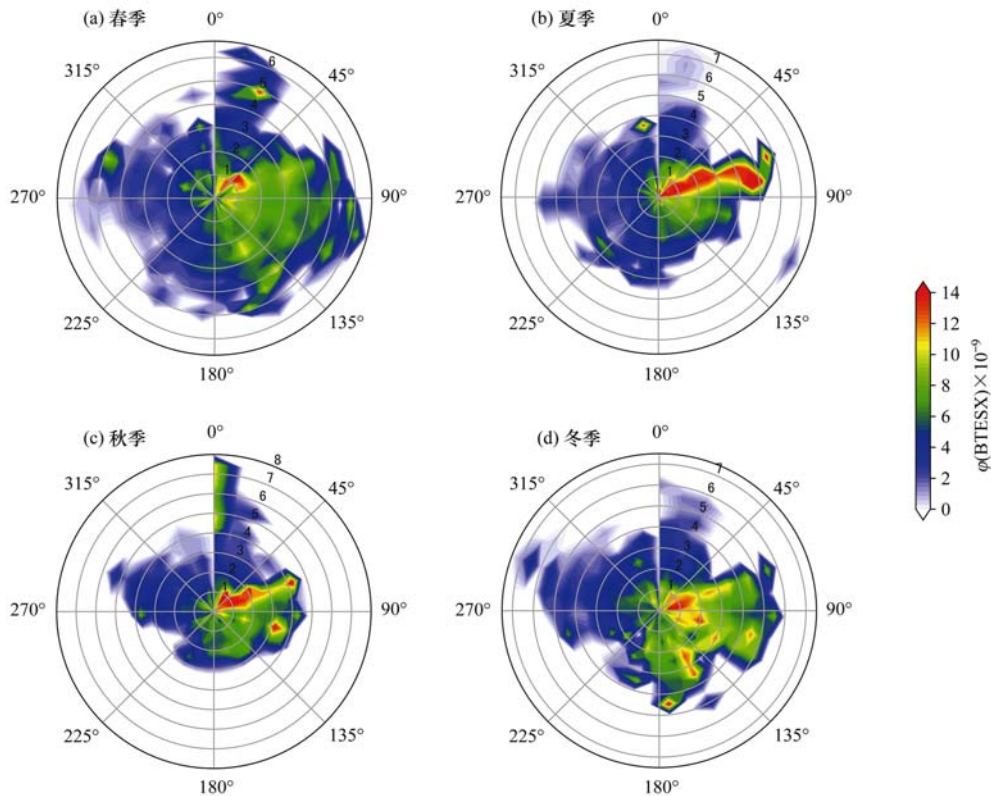
Table 2 Correlation between BTESX and other pollutants and meteorological elements											
	BTESX	NO	NO ₂	NO _x	O ₃	SO ₂	CO	PM _{2.5}	风速	温度	相对湿度
BTESX	1										
NO	0.122	1									
NO ₂	0.146	0.669 **	1								
NO _x	0.148	0.886 **	0.937 **	1							
O ₃	-0.109	-0.606 **	-0.232	-0.429 *	1						
SO ₂	0.321	0.353 *	0.437 **	-0.438 **	-0.117	1					
CO	0.188	0.620 **	0.393 *	0.536 **	-0.497 **	0.307	1				
PM _{2.5}	0.211	0.621 **	0.414 *	0.551 **	-0.542 **	0.147	0.519 **	1			
风速	-0.100	-0.098	-0.213	-0.179	-0.074	0.023	0.171	0.177	1		
温度	0.070	-0.711 **	-0.553 **	-0.679 **	0.650 **	-0.241	-0.376 *	-0.625 **	-0.208	1	
相对湿度	0.026	-0.301	-0.486 **	-0.446 *	-0.004	-0.620 **	-0.172	-0.354	-0.365 *	0.471 **	1

1) * 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关

表 3 BTESX 以及其他污染物周变化¹⁾

Table 3 Weekly variation in BTESX and other pollutants							
类别	星期一	星期二	星期三	星期四	星期五	星期六	星期日
BTESX	6.83	7.22	7.28	7.58	7.48	7.85	7.36
NO	7.92	7.84	7.86	9.56	8.96	9.71	8.85
NO ₂	18.84	19.04	19.22	21.00	21.32	20.54	19.37
O ₃	21.70	21.38	20.70	20.62	20.98	20.22	21.56
SO ₂	6.20	6.23	5.78	6.30	6.57	6.64	6.65
CO	0.83	0.84	0.80	0.86	0.90	0.90	0.89
PM _{2.5}	59.69	53.70	54.22	58.00	62.47	61.35	59.58

1) PM_{2.5} 的单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, CO 的单位为 $\times 10^{-6}$, 其余为 $\times 10^{-9}$



圆环上的数值表示风速,单位 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

图 5 不同季节 BTESX 体积分数风玫瑰图

Fig. 5 Wind rose of BTESX in different seasons

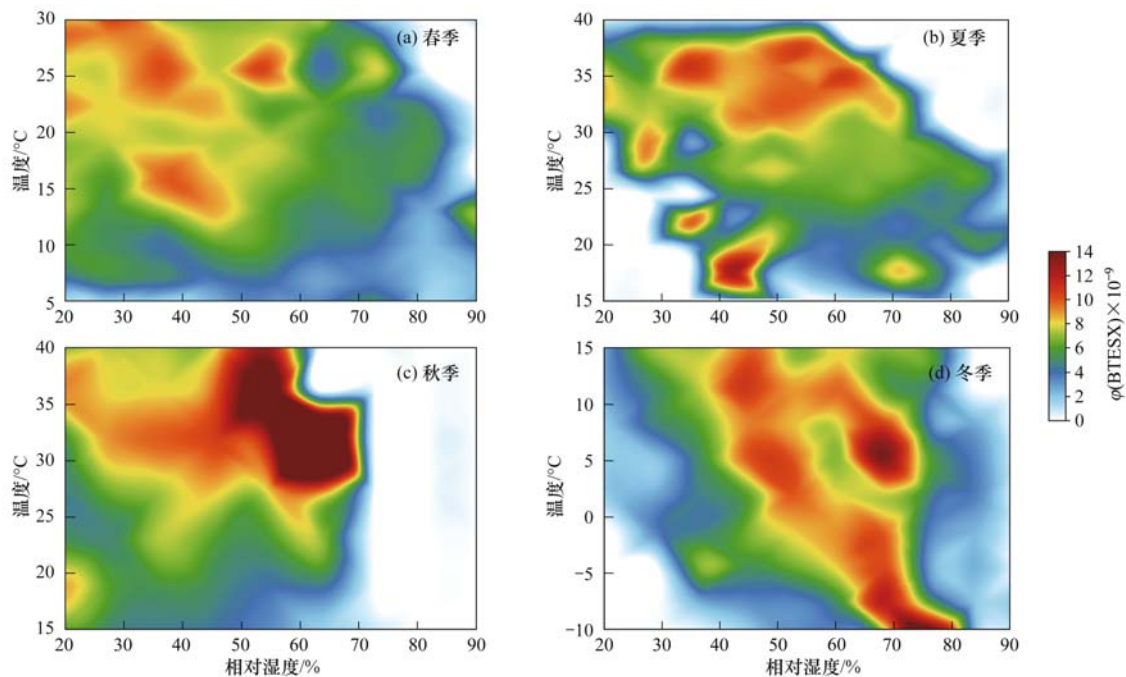


图6 不同季节 BTESX 体积分数随温度和相对湿度变化

Fig. 6 BTESX changes with temperature and relative humidity in different seasons

化的情况. 从中可知, 春季, 当温度为 15°C 左右时, BTESX 高值位于相对湿度 $30\% \sim 50\%$ 区间内, 当温度较高时 ($25 \sim 30^{\circ}\text{C}$), BTESX 高值在相对湿度 $30\% \sim 50\%$ 和 $50\% \sim 60\%$ 区间内均有分布; 夏季, 在温度较低时 ($15 \sim 20^{\circ}\text{C}$), 高值区出现在相对湿度 $40\% \sim 50\%$ 区间内, 在温度较高时 ($30 \sim 40^{\circ}\text{C}$), 高值区的范围出现在 $30\% \sim 70\%$ 相对湿度区间内; 秋季, BTESX 高值区范围较大, 且主要集中在温度 $25 \sim 40^{\circ}\text{C}$, 相对湿度 $40\% \sim 70\%$ 区间内; 冬季, 0°C 以下时, BTESX 高值区出现在 $60\% \sim 80\%$ 相对湿度区间内, 当温度在 0°C 以上时, BTESX 高值区除了出现在上述相对湿度范围内, 还出现在 $40\% \sim 55\%$ 相对湿度范围内. BTESX 除了在冬季, 其高值区基本都出现温度大于 15°C 时, 原因是温度较高进一步导致了溶剂挥发, 而冬季温度较低时仍然会存在 BTESX 高值区, 则是由于其他源 (例如燃烧和交通等) 贡献较大造成.

2.5 与其他研究比较

如表4所示, 南京北郊地区 2014 ~ 2016 年的 $\phi(\text{BTESX})$ 平均值为 7.26×10^{-9} , 高于北京城区 (4.67×10^{-9}), 但是低于南京市区 (7.70×10^{-9})、重庆 (28.56×10^{-9})、上海 (15.45×10^{-9}) 和广州 (8.59×10^{-9}) 的均值. 南京北郊地区 BTESX 中体积分数最大的物种是苯 (2.45×10^{-9}) 和甲苯 (2.41×10^{-9}), 而上述地区除上海之外, BTESX 中体积分数最大则是甲苯或者二甲苯. 南京北郊地区 BTESX 的

季节变化, 与其他地区也存在一定差异: 南京北郊地区 $\phi(\text{BTESX})$ 最大值出现在夏季 (7.59×10^{-9}), 其他地区 (例如北京) 的最大值则出现在秋季 (7.35×10^{-9}); 同样在夏季, 南京北郊地区 $\phi(\text{BTESX})$ (7.59×10^{-9}) 低于南京市区 (7.7×10^{-9}) 和广州地区 (8.74×10^{-9}), 而在冬季, 南京北郊地区 $\phi(\text{BTESX})$ (7.17×10^{-9}) 明显低于上海 (15.45×10^{-9}), 但是高于北京地区 (5.30×10^{-9}). 最后, 由 T/B 可以发现, 南京北郊地区的值接近于 1, 而其他地区 T/B 值由大到小分别为: 4.45 (上海) > 4.03 (广州) > 2.92 (重庆) > 2.60 (南京市区) > 1.36 (北京) > 1.15 (合肥). 证明了不同地区 BTESX 的来源存在较大差异, 应该因地制宜制定合理的 BTESX 减排方案.

2.6 健康风险评估

如图7所示, 不同季节的非致癌风险危害商值 (HQ) 和终生致癌风险值 (R) 值中, 苯的 HQ 最高, 其次是二甲苯, 乙苯, 苯乙烯. BTESX 的危害指数 (HI) 在不同季节的均值分别 0.27 、 0.38 、 0.35 和 0.31 , 均在 EPA 认定的安全范围内 ($\text{HI} < 1$), 而不同季节 R 的均值分别为 1.72×10^{-6} 、 2.61×10^{-6} 、 2.36×10^{-6} 和 2.04×10^{-6} , 均高于 EPA 规定的安全阈值 (1.00×10^{-6}), 存在致癌的风险, 同时可以发现 HQ 和 R 均存在夏季较高的情况, 因此在夏季的时候应当更加注重对 BTESX 等污染物的预防.

表 4 与其他城市 BTESX 比较¹⁾ × 10⁻⁹
Table 4 Comparing with other cities BTESX × 10⁻⁹

城市	采样时间	苯	甲苯	乙苯	二甲苯	苯乙烯	T/B	BTESX	文献
南京	2014 ~ 2016 年(春季)	1.92	2.38	1.48	0.72	0.19	1.23	6.69	本研究
南京	2014 ~ 2016 年(夏季)	2.76	2.46	1.41	0.83	0.13	0.89	7.59	
南京	2014 ~ 2016 年(秋季)	2.53	2.24	1.27	0.82	0.29	0.88	7.15	
南京	2014 ~ 2016 年(冬季)	2.18	2.61	1.32	0.80	0.26	1.20	7.17	
南京	2014 ~ 2016 年(全年)	2.45	2.41	1.37	0.81	0.22	0.98	7.26	
南京	夏季(2013 年 8 月)	1.24	3.23	1.21	1.88	0.14	2.60	7.70	[51]
合肥	2016 年 9 月 ~ 2017 年 1 月	2.31	2.66	0.8	3.22	—	1.15	—	[52]
北京	春季	0.02	1.71	0.40	1.01	0.02	—	3.16	[53]
北京	夏季	0.56	0.79	0.39	0.82	0.29	1.41	2.85	
北京	秋季	1.77	2.28	0.79	2.43	0.08	1.29	7.35	
北京	冬季	1.95	1.08	0.60	1.57	0.10	0.55	5.30	
北京	全年	1.08	1.47	0.54	1.46	0.12	1.36	4.67	
上海	2013 年 11 月 ~ 2014 年 1 月	1.94	8.64	2.55	1.71	0.61	4.45	15.45	[24]
广州	春季	—	4.84	1.27	2.42	0.15	—	—	[54]
广州	夏季	1.06	4.17	1.51	1.51	0.49	3.93	8.74	
广州	秋季	0.93	3.84	1.48	1.64	0.54	4.13	8.43	
广州	冬季	—	2.43	0.63	0.85	0.22	—	—	
重庆	2009 ~ 2010 年冬夏季	4.23	12.35	3.00	6.62	2.36	2.92	28.56	[55]

1) “—”表示文献中没有该数据

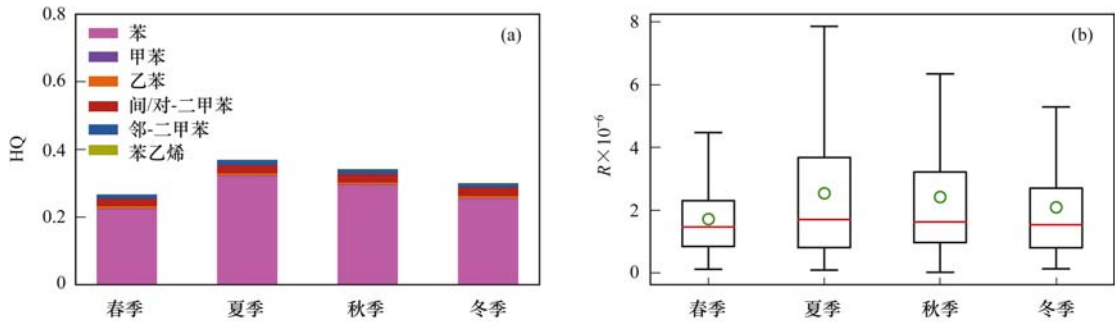


图 7 不同季节 BTESX 各组分的 HQ 和 R
Fig. 7 HQ and R of BTESX in different seasons

3 结论

(1) 2014 ~ 2016 年, φ (BTESX) 为 $(7.28 \pm 6.63) \times 10^{-9}$, 其中 φ (苯) 最高 [$(2.45 \pm 3.91) \times 10^{-9}$], 其他物种体积分数由大到小为: 甲苯 > 乙苯 > 间/对-二甲苯 > 邻-二甲苯 > 苯乙烯, 分别为: $(2.41 \pm 2.61) \times 10^{-9}$ 、 $(1.37 \pm 1.28) \times 10^{-9}$ 、 $(0.51 \pm 0.48) \times 10^{-9}$ 、 $(0.3 \pm 0.36) \times 10^{-9}$ 和 $(0.22 \pm 0.42) \times 10^{-9}$. 由于受到汽车尾气、燃烧源和气象要素的共同影响, 在 3 a (2014 ~ 2016 年) 内, φ (BTESX) 在 1 月较高, 同时其体积分数存在一定的季节波动, 表现为夏季 > 冬季 > 秋季 > 春季. 根据相关性矩阵, BTESX 与其他污染物以及气象要素之间相关性不显著, 证明 BTESX 与其他污染物的来源不同. 同时, BTESX 和其他污染物“周末效应”均不显著, 即工作日与周末体积分数 (或浓度) 差异较小.

(2) 根据污染物的风玫瑰图, BTESX 四季主要来源于东北方向的石化工业、钢铁厂和化工厂等大

型企业, 同时受到主干道车辆排放的影响, 而且夏季 BTESX 的高值区域及其对应的风速较其他季节更大, 说明夏季气团活跃对 BTESX 的挥发和输送具有一定影响. BTESX 高值主要处于相对湿度 20% ~ 70% 范围内, 并且在该范围内温度越高, 对应的 BTESX 的高值区也越大, 说明高温对于 BTESX 的产生具有促进作用.

(3) 与其他研究相比, 南京北郊地区的 BTESX 的主要物种为苯和甲苯, 而其他地区的则以甲苯或二甲苯为主要物种. 由 T/B 的值可以发现, 南京北郊地区的值接近于 1. 其他地区除合肥和北京以外, 基本都远大于 1.

(4) 不同季节的 HQ 和 R 值中, 苯的 HQ 最高, 其次是二甲苯, 乙苯, 苯乙烯; BTESX 的 HI 值均在 EPA 认定的安全范围内 ($HI < 1$); R 值在四季中均高于 EPA 规定的安全阈值 (1.00×10^{-6}), 存在致癌的风险. 同时可以发现 HQ 和 R 均存在夏季较高的情况, 因此在夏季应当更加注重 BTESX 的危害.

参考文献:

- [1] Guo H, Cheng H R, Ling Z H, *et al.* Which emission sources are responsible for the volatile organic compounds in the atmosphere of Pearl River Delta? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, **188**(1-3): 116-124.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 余益军, 孟晓艳, 王振, 等. 京津冀地区城市臭氧污染趋势及原因探讨[J]. *环境科学*, 2020, **41**(1): 106-114.
Yu Y J, Meng X Y, Wang Z, *et al.* Driving factors of the significant increase in surface ozone in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China, during 2013-2018[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(1): 106-114.
- [5] 王玫, 郑有飞, 柳艳菊, 等. 京津冀臭氧变化特征及与气象要素的关系[J]. *中国环境科学*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
Wang M, Zheng Y F, Liu Y J, *et al.* Characteristics of ozone and its relationship with meteorological factors in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *China Environmental Science*, 2019, **39**(7): 2689-2698.
- [6] 谢放尖, 陆晓波, 杨峰, 等. 2017 年春夏期间南京地区臭氧污染输送影响及潜在源区[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 88-96.
Xie F J, Lu X B, Yang F, *et al.* Transport influence and potential sources of ozone pollution for Nanjing during spring and summer in 2017[J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 88-96.
- [7] 余钟奇, 马井会, 毛卓成, 等. 2017 年上海臭氧污染气象条件分析及臭氧污染天气分型研究[J]. *气象与环境学报*, 2019, **35**(6): 46-54.
Yu Z Q, Ma J H, Mao Z C, *et al.* Study on the meteorological conditions and synoptic classifications of O₃ pollution in Shanghai in 2017[J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 2019, **35**(6): 46-54.
- [8] Shu L, Wang T J, Han H, *et al.* Summertime ozone pollution in the Yangtze River Delta of eastern China during 2013-2017: synoptic impacts and source apportionment[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **257**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113631.
- [9] 赵伟, 高博, 卢清, 等. 2006~2019 年珠三角地区臭氧污染趋势[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 97-105.
Zhao W, Gao B, Lu Q, *et al.* Ozone pollution trend in the Pearl River Delta region during 2006-2019 [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 97-105.
- [10] Yang L F, Luo H H, Yuan Z B, *et al.* Quantitative impacts of meteorology and precursor emission changes on the long-term trend of ambient ozone over the Pearl River Delta, China, and implications for ozone control strategy [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2019, **19**(20): 12901-12916.
- [11] Karlsson P E, Klingberg J, Engardt M, *et al.* Past, present and future concentrations of ground-level ozone and potential impacts on ecosystems and human health in northern Europe[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **576**: 22-35.
- [12] Hrinavri I, Livorova H, Ostatnicki J. Ground-level ozone and its potential impacts on human health in the Czech Republic[J]. *WIT Transactions on Biomedicine and Health*, 2001, **5**, doi:10.2495/EHR010061.
- [13] Ashworth K, Wild O, Eller A S D, *et al.* Impact of biofuel poplar cultivation on ground-level ozone and premature human mortality depends on cultivar selection and planting location[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(14): 8566-8575.
- [14] Fu W, He X Y, Xu S, *et al.* Changes in nutrients and decay rate of *Ginkgo biloba* leaf litter exposed to elevated O₃ concentration in urban area[J]. *PeerJ*, 2018, **6**, doi: 10.7717/peerj.4453.
- [15] 张莹. 中国臭氧总量 30a 时空变化以及近地面臭氧浓度气象要素影响研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [16] Bolden A L, Kwiatkowski C F, Colborn T. New look at BTEX: are ambient levels a problem? [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, **49**(9): 5261-5276.
- [17] Davidson C J, Hannigan J H, Bowen S E. Effects of inhaled combined benzene, toluene, ethylbenzene, and xylenes (BTEX): toward an environmental exposure model [J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2021, **81**, doi: 10.1016/j.etap.2020.103518.
- [18] Buczyńska A J, Krata A, Stranger M, *et al.* Atmospheric BTEX-concentrations in an area with intensive street traffic [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(2): 311-318.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Zhang Y J, Mu Y J, Liu J F, *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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] Zhang Y C, Li R, Fu H B, *et al.* Observation and analysis of atmospheric volatile organic compounds in a typical petrochemical area in Yangtze River Delta, China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2018, **71**: 233-248.
- [25] Zhang Y L, Wang X M, Barletta B, *et al.* Source attributions of hazardous aromatic hydrocarbons in urban, suburban and rural areas in the Pearl River Delta (PRD) region [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, **250-251**: 403-411.
- [26] 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.
- [27] 王俊秀, 安俊琳, 邵平, 等. 南京北郊大气臭氧周末效应特征分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(6): 2256-2263.

- Wang J X, An J L, Shao P, *et al.* Characteristic study on the "weekend effect" of atmospheric O₃ in northern suburb of Nanjing[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(6): 2256-2263.
- [28] 管贤贤, 齐安安, 雷春妮, 等. 兰州市大气苯系物的化学活性特征与健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2020, **40**(2): 459-468.
- Guan X X, Qi A A, Lei C N, *et al.* Chemical activity characteristics and health risk assessment of atmospheric benzene homologues in Lanzhou [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, **40**(2): 459-468.
- [29] US EPA. Risk assessment guidance for superfund volume I: human health evaluation manual (Part F, Supplemental guidance for inhalation risk assessment) [R]. Washington: US EPA, 2009.
- [30] Miri M, Shendi M R A, Ghaffari H R, *et al.* Investigation of outdoor BTEX: concentration, variations, sources, spatial distribution, and risk assessment [J]. *Chemosphere*, 2016, **163**: 601-609.
- [31] Cruz L P S, Santos D F, dos Santos I F, *et al.* Exploratory analysis of the atmospheric levels of BTEX, criteria air pollutants and meteorological parameters in a tropical urban area in northeastern Brazil[J]. *Microchemical Journal*, 2020, **152**, doi: 10.1016/j.microc.2019.104265.
- [32] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [33] 南京市统计局. 南京统计年鉴 2015[M]. 北京: 中国统计出版社, 2015.
- [34] 南京市统计局. 南京统计年鉴 2017[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [35] Wang M, Qin W, Chen W T, *et al.* Seasonal variability of VOCs in Nanjing, Yangtze River delta: implications for emission sources and photochemistry [J]. *Atmospheric Environment*, 2020, **223**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.117254.
- [36] 曹梦瑶, 林煜棋, 章炎麟. 南京工业区秋季大气挥发性有机物污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2565-2576.
- Cao M Y, Lin Y C, Zhang Y L. Characteristics and source apportionment of atmospheric VOCs in the Nanjing industrial area in autumn[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2565-2576.
- [37] Liu J F, Mu Y J, Zhang Y J, *et al.* Atmospheric levels of BTEX compounds during the 2008 Olympic Games in the urban area of Beijing[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, **408**(1): 109-116.
- [38] Yurdakul S, Civan M, Kuntasal Ö, *et al.* Temporal variations of VOC concentrations in Bursa atmosphere [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, **9**(2): 189-206.
- [39] 王涛, 何浩奇, 夏忠欢, 等. 2015 年南京市 SO₂、NO₂、CO 和 O₃ 的污染特征分析[J]. *环境工程学报*, 2017, **11**(7): 4155-4161.
- Wang T, He H Q, Xia Z H, *et al.* Pollution characteristics of SO₂, NO₂, CO and O₃ in Nanjing in 2015[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, **11**(7): 4155-4161.
- [40] Chou C C K, Liu S C, Lin C Y, *et al.* The trend of surface ozone in Taipei, Taiwan, and its causes: implications for ozone control strategies [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(21): 3898-3908.
- [41] Reche C, Moreno T, Amato F, *et al.* Spatio-temporal patterns of high summer ozone events in the Madrid Basin, Central Spain [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **185**: 207-220.
- [42] Huang Y K, Luvsan M E, Gombojav E, *et al.* Land use patterns and SO₂ and NO₂ pollution in Ulaanbaatar, Mongolia [J]. *Environmental Research*, 2013, **124**: 1-6.
- [43] Marković D M, Marković D A, Jovanović A, *et al.* Determination of O₃, NO₂, SO₂, CO and PM₁₀ measured in Belgrade urban area [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, **145**(1-3): 349-359.
- [44] Olszyna K J, Luria M, Meagher J F. The correlation of temperature and rural ozone levels in southeastern U. S. A. [J]. *Atmospheric Environment*, 1997, **31**(18): 3011-3022.
- [45] Coates J, Mar K A, Ojha N, *et al.* The influence of temperature on ozone production under varying NO_x conditions-a modelling study[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11601-11615.
- [46] Cleveland W S, Graedel T E, Kleiner B, *et al.* Sunday and workday variations in photochemical air pollutants in New Jersey and New York[J]. *Science*, 1974, **186**(4168): 1037-1038.
- [47] Qin Y, Tonnesen G S, Wang Z. Weekend/weekday differences of ozone, NO_x, CO, VOCs, PM₁₀ and the light scatter during ozone season in southern California [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(19): 3069-3087.
- [48] Han S Q, Bian H, Feng Y C, *et al.* Analysis of the relationship between O₃, NO and NO₂ in Tianjin, China[J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2011, **11**(2): 128-139.
- [49] 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.
- [50] Alghamdi M A, Khoder M, Harrison R M, *et al.* Temporal variations of O₃ and NO_x in the urban background atmosphere of the coastal city Jeddah, Saudi Arabia [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **94**: 205-214.
- [51] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析[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.
- [52] Hu R Y, Liu G J, Zhang H, *et al.* Levels, characteristics and health risk assessment of VOCs in different functional zones of Hefei[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **160**: 301-307.
- [53] 杨婷, 李丹丹, 单玄龙, 等. 北京市典型城区环境空气中苯系物的污染特征、来源分析与健康风险评价[J]. *生态毒理学学报*, 2017, **12**(5): 79-97.
- Yang T, Li D D, Shan X L, *et al.* Pollution characterization, source apportionment and health risk assessment of benzene homologues in the ambient air of a typical urban area in Beijing, China[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2017, **12**(5): 79-97.
- [54] 邹宇, 邓雪娇, 李菲. 广州市大气中苯系物健康风险评价[J]. *环境与健康杂志*, 2014, **31**(12): 1079-1081.
- Zou Y, Deng X J, Li F. Health risk assessment of atmospheric benzene compounds in Guangzhou[J]. *Journal of Environment and Health*, 2014, **31**(12): 1079-1081.
- [55] 吴莉萍, 周志恩, 翟崇治, 等. 重庆市代表性城区冬季和夏季苯系物来源解析[J]. *中国环境监测*, 2014, **30**(5): 26-30.
- Wu L P, Zhou Z E, Zhai C Z, *et al.* Source apportionment of BTEX in a representative district of Chongqing in summer and winter[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2014, **30**(5): 26-30.

CONTENTS

Challenges Regarding the Co-emission of Emerging Pollutants to Eco-environmental Monitoring and Management	WANG Pei, HUANG Xin-yi, CAO Zhi-wei, <i>et al.</i> (4801)
Environmental Process, Effects and Risks of Emerging Contaminants in the Estuary-Coastal Environment	WANG Xin-hong, YU Xiao-xuan, WANG Si-quan, <i>et al.</i> (4810)
Research Progress of Analytical Methods with Molecular Spectroscopy for Determination of Trace Nutrients and Metals in Seawaters	YUAN Dong-xing, HUANG Yong-ming, WANG Ting (4822)
Research Progress on the Determination of Sulfide in Natural Waters: From Laboratory Analysis to In-Situ Monitoring	LI Peng, LIN Kun-de, YUAN Dong-xing (4835)
Advances in On-site Analytical Methods for Inorganic Arsenic in Environmental Water	BO Guang-yong, CHEN Zhao-ying, GONG Zhen-bin, <i>et al.</i> (4845)
Advances and Prospect of Sampling Techniques and Analytical Methods for Trace Elements in the Ocean; Progress of Trace Element Platform Construction in Xiamen University	 HUANG Yong-ming, ZHOU Kuan-bo, CHEN Yao-jin, <i>et al.</i> (4858)
Biodegradation of Polyethylene Microplastic: A Review	 LUO Yuan-rong, QIAN Yi-qian, QI Ya-nan (4869)
Mechanism and Environmental Effect on Nitrogen Addition to Microbial Process of Arsenic Immobilization in Flooding Paddy Soils	WANG Feng, ZHANG Jing, ZHOU Shao-yu, <i>et al.</i> (4876)
Toxicity Testing Organisms for Marine Ecotoxicological Research in China	SHI Tian-yi, HONG Hai-zheng, WANG Ming-hua, <i>et al.</i> (4888)
Estimating Methane Fugitive Emissions from Oil and Natural Gas Systems in China	CHEN Chun-ci, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen (4905)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Its Tempo-spatial Changes in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou Region from 2015 to 2020	LI Xiang, WU Shui-ping, JIANG Bing-qi, <i>et al.</i> (4914)
Distribution of Microplastic and Antibiotic Resistance Gene Pollution in Jiulong River Estuary	CHENG Hong, CHEN Rong (4924)
Pollution Characteristics of Microplastics in Sediments of Xiamen Bay Beach	YAO Rui, LIU Hua-tai, LI Yong-yu, <i>et al.</i> (4931)
Spatial and Temporal Distribution and Influencing Factors of Dissolved Trace Metals in Jiulong River Estuary and Xiamen Bay	QI Liu-qian, YUE Xin-li, ZHONG Hao-wen, <i>et al.</i> (4939)
Spatiotemporal Characteristics of Dissolved Oxygen and Control Mechanism of Hypoxia (Low Oxygen) in the Watershed-Coastal System in Fujian Province	 YANG Ai-lin, YANG Fang, LI Shao-bin, <i>et al.</i> (4950)
Distribution, Migration, and Transformation Mechanism of Labile Phosphorus in Sediments of Xixi River Estuary, Xiamen	PAN Feng, CAI Yu, GUO Zhan-rong, <i>et al.</i> (4961)
Adsorption of Mn ²⁺ by Modified Biochar Fixed Bed in Simulated Lakes and Reservoir Waters	ZHAO Jie, YE Zhi-long, WANG Jia-ni, <i>et al.</i> (4971)
Rapid Detection of Trace Enrofloxacin and Ciprofloxacin in Drinking Water by SERS	XU Jing, ZHENG Hong, LU Jiang-long, <i>et al.</i> (4982)
Degradation of Triphenyl Phosphate in Water by UV-driven Advanced Oxidation Processes	XU Zi-wen, YIN Hong-ling, XIONG Yuan-ming, <i>et al.</i> (4992)
Characteristics and Potential Sources of Four Ozone Pollution Processes in Hainan Province in Autumn of 2019	FU Chuan-bo, CHEN Hong, DAN Li, <i>et al.</i> (5000)
Characterization and Formation Mechanism of Water-soluble Inorganic Ions in PM _{2.5} and PM ₁₀ in Summer in the Urban Agglomeration of the Ili River Valley	 CHEN Qiao, GU Chao, XU Tao, <i>et al.</i> (5009)
Difference in PM _{2.5} Pollution and Transport Characteristics Between Urban and Suburban Areas	QI Peng, ZHOU Ying, CHENG Shui-yuan, <i>et al.</i> (5018)
Characteristics and Health Risk Assessment of BTEX in the Northern Suburbs of Nanjing	FENG Yue-zheng, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (5030)
Ecological Risk Assessment of Microplastics Occurring in Surface Water of Terrestrial Water Systems across China	SUN Xiao-nan, CHEN Hao, JIA Qi-long, <i>et al.</i> (5040)
Scale Effects of Landscape Pattern on Water Quality in Dongjiang River Source Watershed	CHEN You-liang, ZOU Wen-min, LIU Xing-gen, <i>et al.</i> (5053)
Mercury Speciation, Distribution, and Potential Sources in Surface Waters of the Yangtze and Yellow River Source Basins of Tibetan Plateau During Wet Season	 LIU Nan-tao, WU Fei, YUAN Wei, <i>et al.</i> (5064)
Water Environmental Characteristics and Water Quality Assessment of Lakes in Tibetan Plateau	LIU Zhi-qi, PAN Bao-zhu, HAN Xu, <i>et al.</i> (5073)
Karst Hydrogeochemical Characteristics and Controlling Factors of Carlin-type Gold Mining Area Based on Hydrochemistry and Sulfur Isotope	 ZHA Xue-fang, WU Pan, LI Xue-xian, <i>et al.</i> (5084)
Characteristics of Eukaryotic Phytoplankton Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors in Danjiangkou Reservoir	HE Yu-xiao, MAI Si-jie, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (5096)
Adsorption of Phosphate and Heavy Metals by Lanthanum Modified Zeolite and Its Performance in Sediment Inactivation	WANG Zhe, ZHU Jun, LI Wen, <i>et al.</i> (5106)
Metagenomic and Metatranscriptomic Analysis of Nitrogen Removal Functional Microbial Community of Petrochemical Wastewater Biological Treatment Systems	 ZHANG Xu, ZHOU Jia-jia, ZHOU Min, <i>et al.</i> (5115)
Bacterial Community Structure and Antibiotic Resistance Gene Changes in IFAS + Magnetic Coagulation Process Wastewater Treatment Plant in Cold Regions	 DU Wen-yan, YAO Jun-qin, MA Hui-ying, <i>et al.</i> (5123)
Nitric Oxide Emissions from Chinese Upland Cropping Systems and Mitigation Strategies: A Meta-analysis	 TIAN Zheng-yun, WU Xiong-wei, WU Yuan-yuan, <i>et al.</i> (5131)
Impact of Nitrification Inhibitors on Vegetable Production Yield, Nitrogen Fertilizer Use Efficiency and Nitrous Oxide Emission Reduction in China: Meta Analysis	 LIU Fa-bo, MA Xiao, ZHANG Fen, <i>et al.</i> (5140)
Effect of Different Fertilization Treatments on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Rice-Vegetable Rotation in a Tropical Region, China	 SHAO Xiao-hui, TANG Shui-rong, MENG Lei, <i>et al.</i> (5149)
Effects of Land-use Conversion on Soil Nitrification and NO & N ₂ O Emissions in Tropical China Under Different Moisture Conditions	TANG Rui-jie, HU Yu-jie, ZHAO Cai-yue, <i>et al.</i> (5159)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Farmland Soil of the Yangtze River Economic Belt Based on Bibliometric Analysis	LIU Xiao-yan, FAN Ya-nan, LIU Peng, <i>et al.</i> (5169)
Spatial and Temporal Distribution and Source Variation of Heavy Metals in Cultivated Land Soil of Xiangzhou District Based on EBK Interpolation Prediction and GDM Model	 GAO Hao-ran, ZHOU Yong, LIU Jia-kang, <i>et al.</i> (5180)
Identification of Soil Heavy Metal Sources Around a Copper-silver Mining Area in Ningxia Based on GIS	ZHANG Kou-kou, HE Jing, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (5192)
Effect of Aging on Stabilization of Cd ²⁺ Through Biochar Use in Alkaline Soil of Bayan Obo Mining Area	WANG Zhe, CHENG Jun-li, BIAN Yuan, <i>et al.</i> (5205)
Preparation of Magnetic Iron Oxide/Mulberry Stem Biochar and Its Effects on Dissolved Organic Carbon and Arsenic Speciation in Arsenic-Contaminated Soils	 LU Lin, YAN Li-ling, LIANG Mei-na, <i>et al.</i> (5214)
Effects of Oyster Shell Powder and Lime on Availability and Forms of Phosphorus and Enzyme Activity in Acidic Paddy Soil	ZHAO Li-fang, HUANG Peng-wu, YANG Cai-di, <i>et al.</i> (5224)
Effects of Interaction of Zinc and Cadmium on Growth and Cadmium Accumulation of <i>Brassica campestris</i> L.	SHUAI Zu-ping, LIU Han-yi, CUI Hao, <i>et al.</i> (5234)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Antibiotics in Vegetable Field in Kaizhou, Chongqing	FANG Lin-fa, YE Ping-ping, FANG Biao, <i>et al.</i> (5244)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Carbon Storage in the Source Region of the Yellow River Based on InVEST and GeoSoS-FLUS Models and Its Response to Different Future Scenarios	 HOU Jian-kun, CHEN Jian-jun, ZHANG Kai-qi, <i>et al.</i> (5253)
Carbon Sequestration Characteristics of Different Restored Vegetation Types in Loess Hilly Region	XU Xiao-ming, ZHANG Xiao-ping, HE Liang, <i>et al.</i> (5263)
Response of Soil Multifunctionality to Reduced Microbial Diversity	CHEN Gui-xian, WU Chuan-fa, GE Ti-da, <i>et al.</i> (5274)
Effect of Nitrogen Addition on Soil Fungal Diversity in a Degraded Alpine Meadow at Different Slopes	SU Xiao-xue, LI Xi-lai, LI Cheng-yi, <i>et al.</i> (5286)
Comparative Energy Consumption Structure and Mode between China and Major Energy-Consuming Countries Under the Background of Carbon Emission Reduction	 LI Hui, PANG Bo, ZHU Fa-hua, <i>et al.</i> (5294)
Spatialization and Spatio-temporal Dynamics of Energy Consumption Carbon Emissions in China	HAO Rui-jun, WEI Wei, LIU Chun-fang, <i>et al.</i> (5305)
Carbon Dioxide Mitigation Co-effect Analysis of Structural Adjustment Measures in the "2 + 26" Cities in the Jing-Jin-Ji Region and Its Surroundings	 YANG Tian-qi, WANG Hong-chang, ZHANG Chen, <i>et al.</i> (5315)
Policy Analysis in Plastic Pollution Governance and Recommendations in China	LI Huan, ZHU Long, SHEN Qian, <i>et al.</i> (5326)