

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

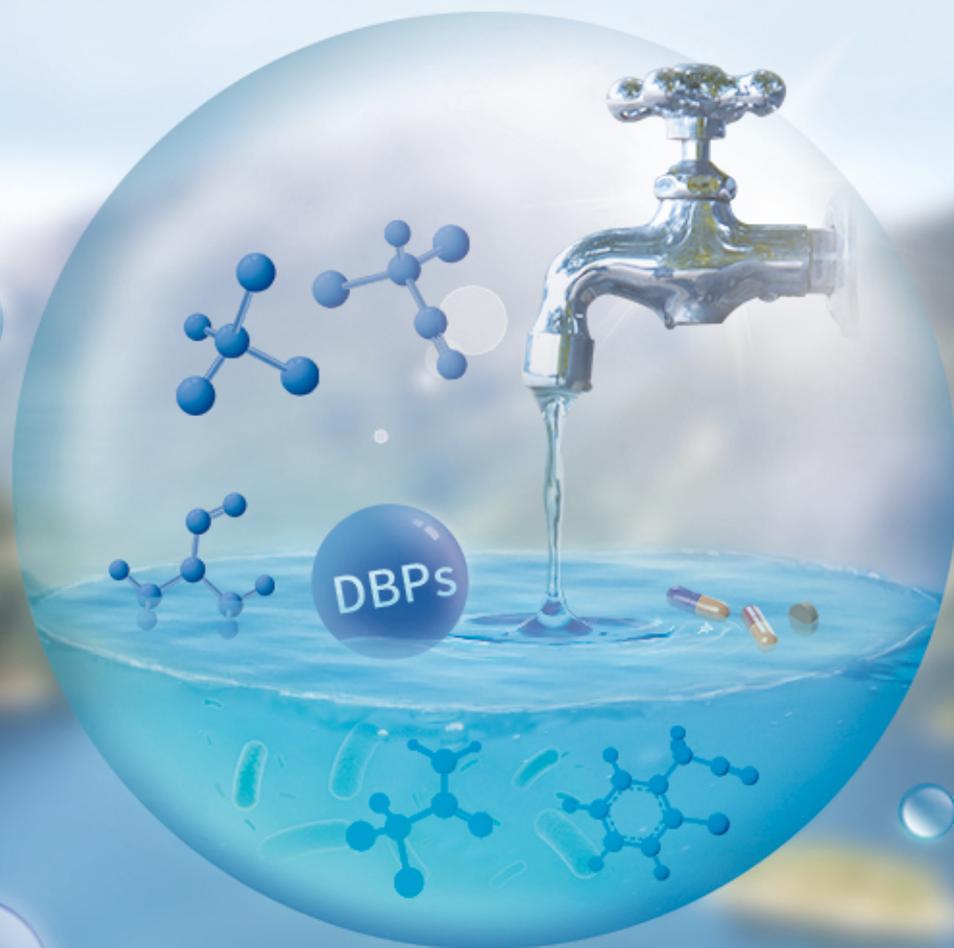
环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

饮用水中的消毒副产物及其控制策略

楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年11月

第42卷 第11期
Vol.42 No.11

目次

综述与专论

饮用水中的消毒副产物及其控制策略 楚文海, 肖融, 丁顺克, 张瑞华(5059)

生物炭吸附硫化氢机制与影响因素研究进展 徐期勇, 梁铭坤, 许文君, 黄丹丹(5086)

研究报告

1998~2016 中国八大经济区植被覆盖对 PM_{2.5} 浓度时空分布的影响 杨玉莲, 杨昆, 罗毅, 喻臻钰, 孟超, 李岑(5100)

COVID-19 疫情期间北京市两次重霾污染过程大气污染物演变特征及潜在源区分析
..... 赵德龙, 田平, 周崑, 肖伟, 盛久江, 王飞, 杜远谋, 黄梦宇, 何晖, 丁德平(5109)

汾渭平原临汾市 2019 年春节期间大气污染特征与来源解析
..... 刘威杰, 胡天鹏, 毛瑶, 许安, 苏业旺, 李星谕, 程铨, 石明明, 梁莉莉, 邢新丽, 张家泉, 祁士华(5122)

石家庄市大气污染物的季节性时空特征及潜在源区 聂赛赛, 王帅, 崔建升, 刘大喜, 陈静, 田亮, 贺博文, 沈梦宇(5131)

天津市冬季空气湿度对 PM_{2.5} 和能见度的影响 丁净, 唐颖潇, 郝天依, 姚青, 蔡子颖, 张裕芬, 韩素芹(5143)

承德市 PM_{2.5} 中碳质组分的季节分布特征及来源解析 贺博文, 聂赛赛, 王帅, 冯亚平, 姚波, 崔建升(5152)

中国生活源挥发性有机物排放清单 梁小明, 陈来国, 沈国锋, 卢清, 刘明, 陆海涛, 任璐, 孙西勃, 林奎, 梁明易, 叶代启, 陶澍(5162)

2011~2019 年中国工业源挥发性有机物排放特征
..... 刘锐源, 钟美芳, 赵晓雅, 卢诗文, 田俊泰, 李银松, 侯墨, 梁小明, 黄皓旻, 范丽雅, 叶代启(5169)

基于 LHS-MC 青岛市工业源 VOCs 排放清单及不确定性 徐琬莹, 付飞, 吕建华, 李瑞凡, 邵蕊, 和慧, 李淑芬, 左华(5180)

典型橡胶制品业 VOCs 排放特征及对周边环境的影响 王海林, 辛国兴, 朱立敏, 薛松, 聂磊, 郝润(5193)

沈阳市不同功能区挥发性有机物分布特征及臭氧生成潜势 库盈盈, 任万辉, 苏枫棋, 于兴娜(5201)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估
..... 韩婷婷, 李颖若, 蒲维维, 姚青, 刘敬乐, 吴进, 张楠楠, 李梓铭, 马志强(5210)

郑州市大气氨排放清单及驱动力分析 计尧, 王琛, 卢轩, 张欢, 尹沙沙(5220)

基于 GAMs 模型分析成都市气象因子交互作用对 O₃ 浓度变化的影响 张莹, 倪长健, 冯鑫媛, 王式功, 张小玲, 张家熙, 李运超(5228)

长江干流表层水体悬浮物的空间变化特征及遥感反演 李建鸿, 黄昌春, 查勇, 王川, 尚娜娜, 郝维月(5239)

河北省夏季降雨溶解性有机物光谱特征的空间分布、来源解析及氮素响应
..... 张紫薇, 周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 董宛佳, 甄瑞晗, 张馨童, 姚波, 崔建升(5250)

城镇与城郊污染河道中 DOM 成分分布与影响因素 朱奔, 陈浩, 丁国平, 孙晓楠, 刘辉, 叶建锋(5264)

北京城市河流水和沉积物中微塑料的组成与分布 胡嘉敏, 左剑恶, 李颀, 谢珍雯, 陈磊(5275)

太湖西岸地表水中中性有机污染物非靶向筛查与生态风险评估 卢昕妍, 王菲, 张丽敏, 任晓鸣, 于南洋, 韦斯(5284)

河水-地下水交互带沉积物中抗生素和代谢产物提取方法优化及其分布特征 李玉琼, 童蕾, 严涵, 尤悦, 卢钰茜, 刘慧(5294)

白洋淀清淤示范区沉积物中抗生素和多环芳烃的分布特征与风险评估 王同飞, 张伟军, 李立青, 张美一, 廖桂英, 王东升(5303)

雄安新区唐河污水库残留污染物对地下水水化学动态的作用机制 张志雄, 王仕琴, 张依章, 冯文钊(5312)

基于时间序列模型的饮用水源地重金属健康风险分析与预测
..... 姬超, 侯大伟, 谢丽, 孙华, 李发志, 周宇, 邓爱萍, 沈红军, 包广静, 王逸南(5322)

千河下游水体-沉积物重金属空间分布、风险及影响因素 高煜, 王国兰, 金梓函, 张军, 耿雅妮(5333)

巢湖流域丰水期可溶态重金属空间分布及污染评价 何苗, 刘桂建, 吴蕾, 齐翠翠(5346)

洪泽湖围栏养殖对表层沉积物重金属含量影响与生态风险评估 瞿鑫源, 张鸣, 谷孝鸿, 阚可聪, 毛志刚, 陈辉辉, 曾庆飞(5355)

成都市地表水天然水化学变化特征及影响因素 许秋瑾, 赖承钺, 丁瑶, 王照丽, 程中华, 于涛(5364)

雷州半岛地下水化学特征及控制因素分析 彭红霞, 侯清芹, 曾敏, 黄长生, 师环环, 皮鹏程, 潘羽杰(5375)

粤港澳大湾区陆源氮污染来源结构与空间分布 董斯齐, 黄翀(5384)

红壤丘陵区小流域典型土地利用的面源氮磷输出特征 房志达, 苏静君, 赵洪涛, 胡炼, 李叙勇(5394)

减氮条件下不同施肥模式对稻田氮素淋溶流失的影响 姜海斌, 张克强, 邹洪涛, 马璞骏, 渠清博, 谷艳茹, 沈仕洲(5405)

互花米草入侵对胶州湾湿地土壤碳赋存形态的影响 沙梦乔, 柴娜, 赵洪涛, 刘春井, 丁文超, 谢文霞(5414)

基于 16S rRNA 高通量测序的北运河水体及沉积物微生物群落组成对比分析 彭柯, 董志, 邸琰蓉, 郭道宇(5424)

硅改性花生壳生物炭对水中磷的吸附特性 赵敏, 张小平, 王梁嵘(5433)

高锰酸钾改性柞木生物炭对 Pb(II) 的吸附特性 莫贞林, 曾鸿鹤, 林华, Asfandiyar Shahab, 石清亮, 张华(5440)

混合金属氧化物/碳复合材料的制备及其对 Pb(II) 的吸附性能 卢予沈, 宗莉, 于惠, 牟斌, 王爱勤(5450)

负载型钛凝胶的制备及其吸附去除三价砷的性能 孙晔洋, 周畅, 甘永海, 吴兵党, 张淑娟(5460)

一体式短程硝化-厌氧氨氧化工艺启动过程的亚硝酸盐调控 左富民, 郑蕊, 隋倩雯, 钟慧, 陈彦霖, 魏源送(5472)

生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响 邓华, 高明, 龙翼, 赖佳鑫, 王莹燕, 王子芳(5481)

紫色土旱坡地不同坡位土壤有机碳组含量对施肥管理的响应 徐曼, 余添, 王富华, 王丹, 王莹燕, 杨文娜, 高明, 王子芳(5491)

南阳盆地东部山区土壤重金属分布特征及生态风险评估 赖书雅, 董秋瑶, 宋超, 杨振京(5500)

城郊农田土壤多环芳烃污染特征及风险评估 张秀秀, 卢晓丽, 魏宇宸, 朱昌达, 潘剑君(5510)

我国东部沿海地区蔬菜中重金属累积分布特征及居民膳食暴露评估 孙帅, 耿柠波, 郭崔崔, 张保琴, 卢宪波, 张海军, 陈吉平(5519)

典型矿区周边农业用地农产品安全风险及影响因素 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 姜蓉, 陈卫平(5526)

稻田土壤 Cd 污染与安全种植分区, 以重庆市某区为例 曹淑珍, 母悦, 崔敬鑫, 刘安迪, 程先, 符远航, 魏世强, 张进忠(5535)

镉污染大田条件下不同品种水稻镉积累的特征及影响因素 王宇豪, 杨力, 康愉晨, 陈小红, 耿杰, 李佳欣, 陈文清(5545)

纳米膜覆盖对畜禽粪便好氧堆肥进程及恶臭气体排放的影响 李永双, 孙波, 陈菊红, 彭霞薇, 白志辉, 庄绪亮(5554)

《环境科学》征订启事(5108) 《环境科学》征稿简则(5151) 信息(5249, 5263, 5283)

天津城区夏冬季典型污染过程中 BTEX 变化特征及其健康风险评估

韩婷婷¹, 李颖若¹, 蒲维维¹, 姚青², 刘敬乐³, 吴进¹, 张楠楠¹, 李梓铭¹, 马志强^{1*}

(1. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100089; 2. 天津市环境气象中心, 天津 300074; 3. 天津市气象探测中心, 天津 300074)

摘要: 利用 GC955 在线气相色谱仪分别于 2019 年 7 月和 2020 年 1 月在天津市开展苯系物(BTEX, 包括苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯)实时在线观测, 对典型污染过程中 BTEX 的浓度水平、组成及演化机制进行了研究, 并运用特征物种比值法对 BTEX 的来源进行了定性分析, 最后运用 US EPA 的人体暴露分析评价方法对 BTEX 健康风险进行评估. 结果表明, 臭氧和霾污染过程中 BTEX 体积分数平均值分别为 1.32×10^{-9} 和 4.83×10^{-9} , 其中苯的体积分数占比最大, 其次是甲苯、乙苯和二甲苯占比最小. 2020 年 1 月 BTEX 体积分数很大程度上受到西南方向短距离传输的影响, 而在 2019 年 7 月 BTEX 浓度受到本地排放的影响. BTEX 浓度水平在 2019 年 7 月受到温度和相对湿度的共同影响, 而在 2020 年 1 月当温度较低时 BTEX 浓度对相对湿度的变化更敏感. 天津市 BTEX 在霾污染过程中受生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤排放的影响较大, 而在臭氧污染过程中除了受到燃烧排放源影响, 交通源排在很大程度上也有影响. 臭氧污染和霾污染过程中 BTEX 的 HI 分别为 0.072 和 0.29, 均处于 EPA 认定的安全范围内. 苯的致癌风险在清洁天和污染过程中均高于 EPA 规定的安全阈值, 需引起高度重视.

关键词: 苯系物(BTEX); 演化特征; 特征物种比值; 健康风险评估; 天津

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)11-5210-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202104047

Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area

HAN Ting-ting¹, LI Ying-ruo¹, PU Wei-wei¹, YAO Qing², LIU Jing-le³, WU Jin¹, ZHANG Nan-nan¹, LI Zi-ming¹, MA Zhi-qiang^{1*}

(1. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 2. Tianjin Environmental Meteorology Center, Tianjin 300074, China; 3. Tianjin Meteorological Observation Center, Tianjin 300074, China)

Abstract: Real-time BTEX (including benzene, toluene, ethylbenzene, *m*-, *p*-, and *o*-xylenes) were measured continuously in Tianjin urban site in July 2019 and January 2020 using a Syntech Spectras GC955 analyzer. The BTEX concentration levels, composition, and evolutionary mechanisms during typical pollution episodes were investigated. The potential sources of BTEX were analyzed qualitatively using the diagnostic ratios method. Finally, the BTEX health risk was evaluated by using the human exposure analysis and evaluation method according to US EPA. The averaged total mixing ratio of BTEX were 1.32×10^{-9} and 4.83×10^{-9} during ozone pollution and haze episodes, respectively. Benzene was the most abundant species, followed by toluene. The mixing ratio of BTEX was largely affected by short southwestern distance transportation in January, while local emissions in July. In addition, the BTEX mixing ratio depended on the influence of temperature and relative humidity (RH) in July, while the concentration was more sensitive to changes in RH when the temperature was low in January. Diagnostic ratios and source implications suggested that the BTEX was affected mainly by biomass/biofuel/coal burning during haze episodes. The traffic related emissions also had an impact except for the influence of biomass/biofuel/coal burning in July. The averaged hazard quotient (HQ) values were 0.072 and 0.29 during ozone pollution and haze episodes, respectively, which were in the upper safety range limit recommended by the US EPA. The carcinogenic risk posed by benzene in both cleaning and pollution processes was higher than the safety threshold set by the US EPA, which should be monitored carefully.

Key words: BTEX; evolutionary mechanisms; diagnostic ratios; health risk assessment; Tianjin

近十几年以来, 以近地面臭氧和二次细颗粒物增长为特征的大气复合污染问题越来越突出. 挥发性有机物(VOCs)作为大气中光化学反应过程的主要参与者, 能够通过一系列复杂的大气化学反应生成臭氧^[1~3]和二次有机气溶胶^[4~6], 进而对大气环境, 气候效应及生态系统产生直接或间接的影响. 除此之外, 部分挥发性有机物及其光化学产物对人体健康也有直接影响, 如苯、甲苯、甲醛和乙醛等, 通过呼吸道和皮肤进入人体, 导致各种急慢性健康问题^[7, 8]. BTEX 是苯、甲苯、乙苯和二甲苯的统称, 是 VOCs 的重要组成部分.

目前, 已有许多学者在天津开展了大量观测, 研究 BTEX 浓度变化特征及其对臭氧和二次有机气溶胶(SOA)生成的贡献^[9~12]. 姚青等^[13, 14]在天津城区 2012 年夏季的观测结果表明甲苯和间/对-二甲苯是 BTEX 中浓度最高的组分, 而秋冬季浓度最高

收稿日期: 2021-04-06; 修订日期: 2021-04-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201902); 上甸子国家大气本底站开放研究课题项目(SDZ2020616); 北京市自然科学基金项目(8204075); 国家自然科学基金项目(41905119)

作者简介: 韩婷婷(1988~), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为区域大气污染, E-mail: tingting1899@163.com

* 通信作者, E-mail: zqma@ium.cn

的组分为甲苯和苯,在夏季对臭氧生成贡献最大的组分为间/对-二甲苯,在秋冬季对 SOA 贡献最大的为甲苯. 以上研究多集中在 2013 年之前,在 2013 年大气污染防治行动计划实施之后,污染物浓度实现大幅减排,且 2017 年之后京津冀地区每年秋冬季实施了大气污染综合治理攻坚行动方案,污染源排放发生较大变化. 因此,亟需对近期天津市 BTEX 的污染水平及变化特征开展观测研究. 本研究分别对 2019 年 7 月臭氧污染和 2020 年 1 月霾污染两个过程中 BTEX 变化特征,与气象要素的耦合机制及来源进行分析.

苯系物能够对呼吸道产生刺激作用,并且对中枢神经系统造成直接的损害,危害人体健康. 健康风险评估是一种将环境污染与人体健康联系起来,以风险度为评价指标,定量描述污染物对人体健康危害风险的方法^[15]. 目前国际公认的健康风险评估方法为美国国家科学院提出的健康风险评估四步法. 张玉欣等^[16]在南京北郊的研究结果表明,不同季节各 BTEX 组分非致癌风险均在安全范围内,苯存在致癌风险,Zhang 等^[17]和 Li 等^[18]在北京的观测也得到同样的结果.

天津是环渤海地区的经济中心,是我国北方最大的港口城市,石油化工和装备制造业发达,同时随着城市化进程的加速,车辆保有量逐年增加,面临着臭氧和颗粒物复合污染问题. 作为臭氧和二次有机气溶胶的前体物,厘清 BTEX 污染特征对于制定因地制宜的 VOCs 减排措施,进而实现臭氧污染防控具有重要的意义. 在此背景下,本研究利用 GC955 在线气相色谱仪在天津市开展连续观测,厘清了夏冬季典型污染过程中 BTEX 浓度水平、组成、来源及演化特征,并揭示其与气象要素的耦合机制,最后对 BTEX 健康风险进行评估.

1 材料与方法

1.1 观测时间和观测地点

本研究在中国气象局天津大气边界层观测站(39°06'N, 117°10'E, 海拔高度 3.3 m)院内一座一层平房的房顶(离地高度约 3 m)开展 BTEX 实时在线观测. 该站点位于天津市南部城区,北面约 100 m 为快速路黑牛城道,东临友谊路-友谊南路,有大型商业区. 除此之外,周围大多为低层住宅区,因此,该站点大气污染物浓度主要受到交通源和周围居民生活影响. 观测时间分别选取为 2019 年 7 月和 2020 年 1 月这两个月.

1.2 样品采集与监测

本研究采用 SyntechSpectras 气相色谱(GC955)

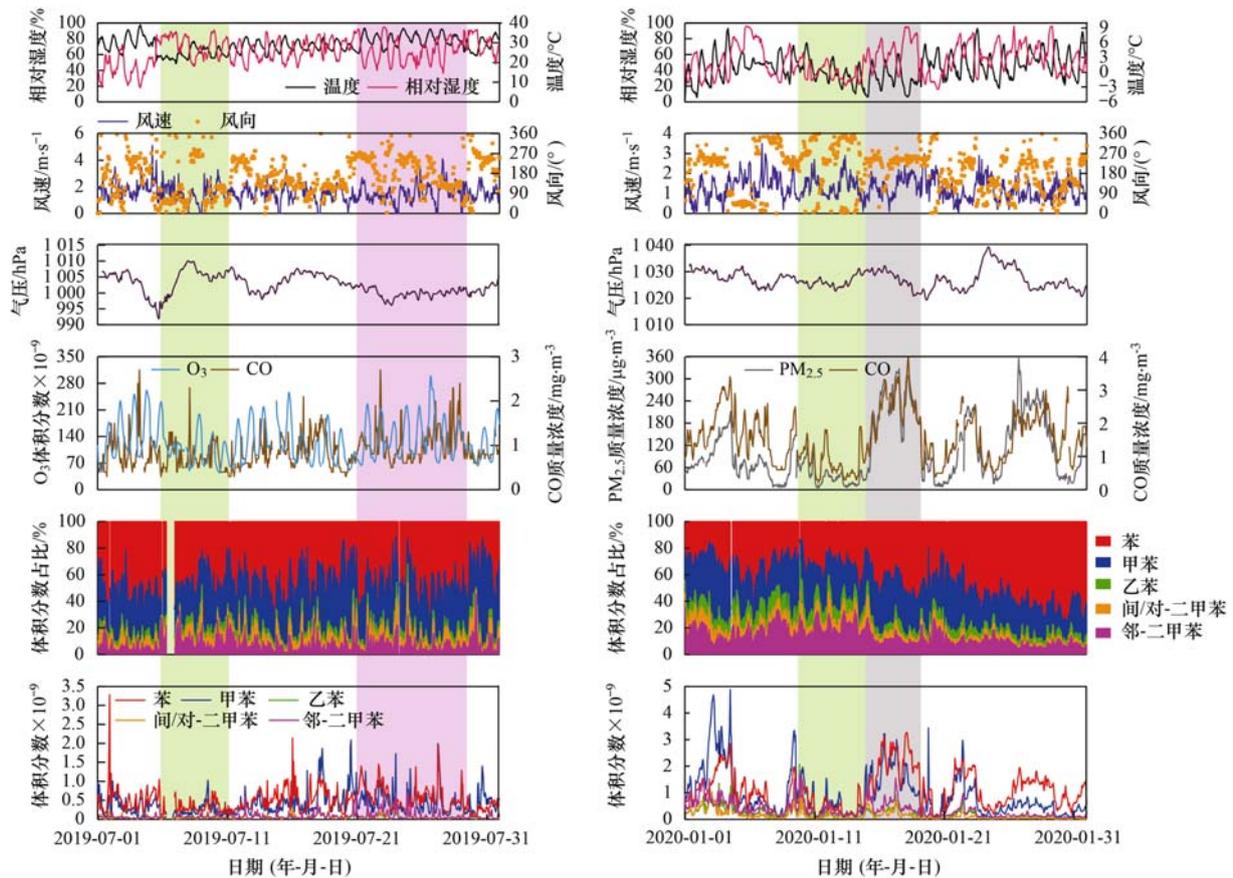
600 系列对包括苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯在内的 5 种 BTEX 组分进行实时在线观测. 该系统内置预浓缩系统,碳氢化合物被预先浓缩在 Tenax GR 富集管上,通过短时间加热即可实现热脱附,同时用载气吹扫,经过十通阀进入 EPA624 分离柱,有效避免了烃类物质干扰,达到最佳分离效果. 随后进入光离子化检测器(PID)进行检测,确保了所测组分的高灵敏度和高选择性. 采样过程中环境空气需经过干燥后方可进入分析系统,采样流量设定为 $0.5 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, 时间分辨率为 0.5 h. 为了保证观测数据的准确性和可靠性,需定期对气相色谱仪进行校正,标气采用的是美国环保署的 PAMS 标气.

温度(T)、相对湿度(RH)、风速(WS)和风向(WD)等气象数据采用观测站点内天津市城区国家气象观测站的自动气象站数据,时间分辨率为 1h. BTEX 体积分数数据经过数据质量控制后处理成小时值供数据分析使用.

2 结果与讨论

2.1 BTEX 各组分时间序列及变化特征

图 1 所示为 2019 年 7 月和 2020 年 1 月观测期间天津城区各 BTEX 组分体积分数, O_3 、 CO 和 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度以及各气象要素(包括温度、相对湿度、风速、风向和气压)的时间序列. 2020 年 1 月观测期间 BTEX 的体积分数小时平均值为 2.74×10^{-9} ($11.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)(表 1),是 2019 年 7 月 BTEX 体积分数(1.11×10^{-9} , 换算后为 $3.84 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的 2.47 倍,表明 BTEX 在冬季的体积分数值远大于夏季. 与此同时,本研究中夏冬季 BTEX 体积分数值远小于姚青等^[13,14]在 2012 年夏季($38.72 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)和秋冬季($40.02 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)的观测结果. 除此之外,在 2020 年 1 月各 BTEX 组分的体积分数小时平均值也均大于 2019 年 7 月,约为 2019 年 7 月的 2~4 倍. 从图 1 可知, BTEX 时间序列变化趋势与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 CO 相一致,尤其是苯和甲苯,这一结果表明 2020 年 1 月较高的 BTEX 体积分数值一方面是由于采暖期间燃煤、燃气等导致 BTEX 的排放量大幅增加,同时较低的气温使得光化学反应减弱, BTEX 无法被消耗;另一方面是冬季气象条件相对其他季节比较静稳,不利于污染物扩散,使得 BTEX 浓度在本地不断积累. 从各组分体积分数占比情况来看(图 2),无论是在 2020 年 1 月还是 2019 年 7 月,苯是体积分数占比最大的 BTEX 组分,占到了总 BTEX 的 40%~45%,其次是甲苯,占到了 34%~37%. C8 芳香烃组分(乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯之和)在 2019



绿色阴影表示清洁天,粉红色阴影表示臭氧污染过程,灰色阴影表示霾污染过程

图1 2019年7月及2020年1月天津城区各BTEX组分体积分数、 O_3 、CO和 $PM_{2.5}$ 质量浓度以及各气象要素时间序列

Fig. 1 Time series of mixing ratios of BTEX species, mass concentrations of O_3 , CO and $PM_{2.5}$, and meteorological parameters in July 2019 and January 2020

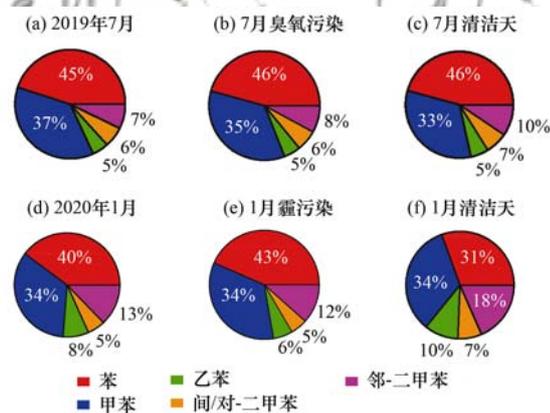


图2 天津城区观测期间各BTEX组分体积分数占比

Fig. 2 BTEX proportions at the Tianjin urban site over the entire observation period

年7月和2020年1月的体积分数占比分别为18%和26%。C8芳香烃组分是光化学反应活性较强的BTEX组分,夏季高温强辐射的气象条件非常有利于该类组分发生光化学反应生成二次污染物。因此C8芳香烃组分的浓度占比在夏季低于冬季。

为了更好地揭示夏季臭氧污染过程和冬季高湿重霾污染过程中各BTEX组分变化特征的差异,同

时为了阐明典型污染过程与清洁天BTEX的演化机制,本研究分别在2019年7月和2020年1月的观测中选取两个清洁天过程,一个臭氧污染过程和一个霾污染过程进行论述。从表1中可知,在2020年1月霾污染过程中BTEX的体积分数为清洁天的1.65~4.2倍,尤其是苯和甲苯达到4.20倍和3.02倍。同样地,在2020年1月霾污染过程中 $PM_{2.5}$ 和CO的质量浓度是清洁天的6.25和3.01倍,相对湿度则是清洁天的1.76倍,这可能与冬季采暖期间燃煤和燃气排放以及高湿静稳的气象条件有关。在2019年7月各BTEX组分在臭氧污染过程中的体积分数值约为清洁天的1.5~1.92倍,这一研究结果表明,冬季霾污染过程较清洁天各BTEX组分体积分数的增长率远大于夏季,尤其是苯和甲苯。如图2所示,苯和甲苯的体积分数占比从霾期间的77%降低到清洁天的65%,而C8芳香烃组分从23%增长到35%。而在夏季臭氧污染过程中苯和甲苯的体积分数占比与清洁天相当。这一研究结果表明高湿重霾期间静稳的气象条件不利于苯和甲苯这类在大气中寿命相对较长的组分扩散,导致苯和甲苯在本地积累。

表 1 2019 年 7 月和 2020 年 1 月观测期间天津城区各 BTEX 组分体积分数、各污染物质量浓度及各气象要素平均值¹⁾

Table 1 Summary of average mixing ratios of BTEX species, mass concentrations of pollutants, and meteorological parameters measured at Tianjin urban site in July 2019 and January 2020

项目	2019 年 7 月				2020 年 1 月				月均值比 (1月/7月)
	月均值	清洁天	臭氧污染	臭氧污染/清洁天	月均值	清洁天	霾污染	霾污染/清洁天	
苯 $\times 10^{-9}$	0.5	0.33	0.6	1.82	1.09	0.5	2.1	4.20	2.18
甲苯 $\times 10^{-9}$	0.41	0.24	0.46	1.92	0.93	0.55	1.66	3.02	2.27
乙苯 $\times 10^{-9}$	0.05	0.04	0.06	1.50	0.21	0.17	0.28	1.65	4.20
间/对-二甲苯 $\times 10^{-9}$	0.07	0.05	0.08	1.60	0.15	0.12	0.24	2.00	2.14
邻-二甲苯 $\times 10^{-9}$	0.08	0.07	0.11	1.57	0.35	0.3	0.56	1.87	4.38
BTEX $\times 10^{-9}$	1.11	0.74	1.32	1.78	2.74	1.63	4.83	2.96	2.47
$O_3/\mu g \cdot m^{-3}$	126.1	105.2	140.0	1.33	/	/	/	/	/
$CO/mg \cdot m^{-3}$	0.87	0.74	1.05	1.42	1.56	0.83	2.50	3.01	1.79
$PM_{2.5}/\mu g \cdot m^{-3}$	/	/	/	/	103.8	35.6	222.6	6.25	/
温度/ $^{\circ}C$	28.9	24.5	31.8	1.30	0.95	-0.02	-1.4	/	0.03
相对湿度/%	63.5	71.9	63.2	0.88	52.3	36.6	64.4	1.76	0.82
风速/ $m \cdot s^{-1}$	1.6	1.5	1.5	1.00	1.3	1.4	1.4	1.00	0.81
气压/hPa	1002.5	1005	999.8	0.99	1027.2	1026.2	1027.9	1.00	1.02

1) 1月/7月表示 2020 年 1 月均值与 2019 年 7 月均值的比值

2.2 日变化特征

图 3 所示为观测期间不同组分 BTEX 体积分数, CO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度及各气象要素的日变化情况. 从中可知, 2020 年 1 月所有组分的体积分数均大于 2019 年 7 月. 2020 年 1 月所有的 BTEX 组

分均表现出相似且明显的日变化特征, 即呈现明显的早高峰, 且 BTEX 在夜间和上午时段的体积分数变化不大. 在早上 08:00~10:00 时间段内呈现峰值浓度, 而在 16:00 前后体积分数达到最低值. 在早上由于受到交通排放源和工业排放源影响, BTEX 浓

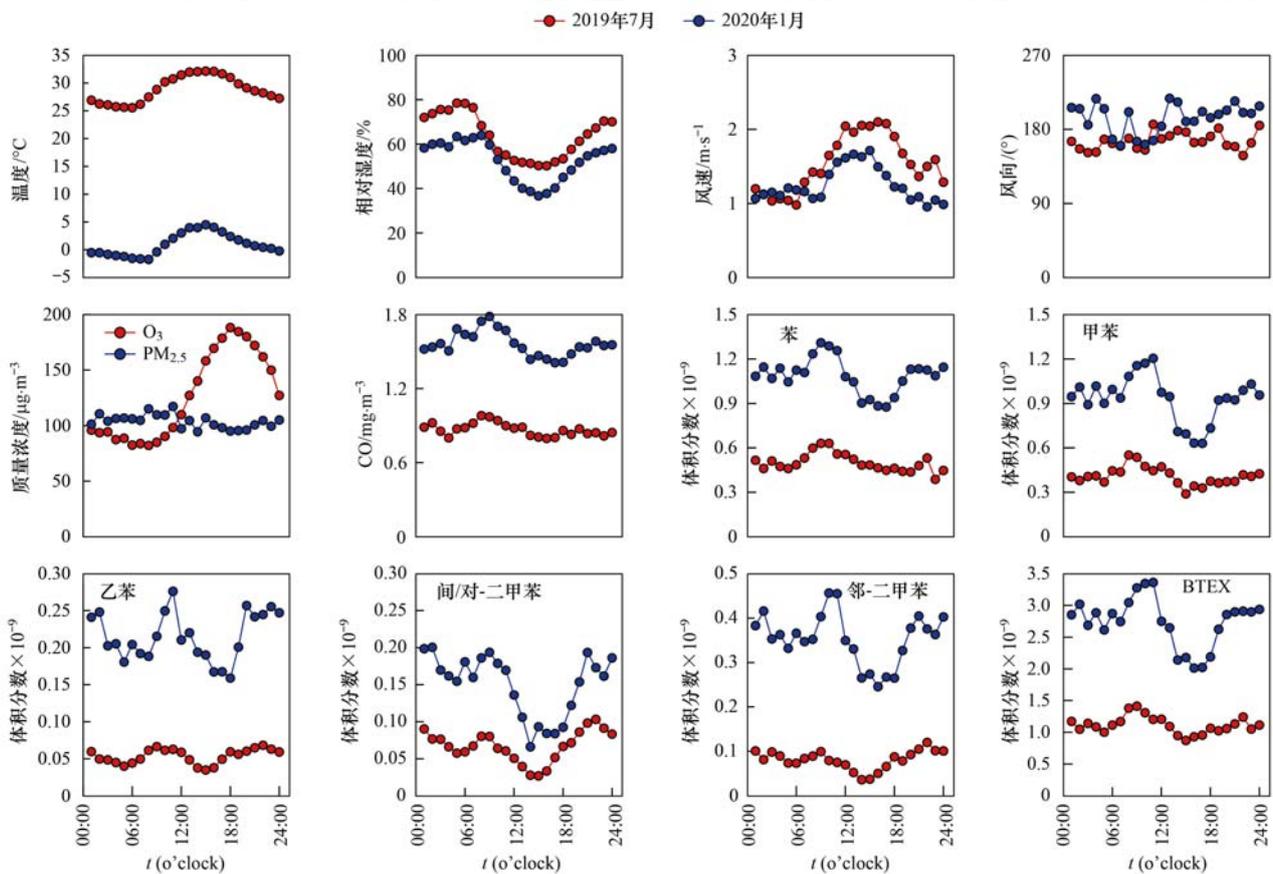
图 3 观测期间各气象要素日变化、 CO 、 O_3 、 $PM_{2.5}$ 质量浓度和各 BTEX 组分体积分数日变化

Fig. 3 Average diurnal cycles of meteorological parameters, mass concentrations of CO , O_3 , $PM_{2.5}$, and mixing ratios of BTEX species during the observation period

度值呈显著上升趋势,中午随着太阳辐射强度增加,BTEX 作为臭氧的前体物与 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{NO}_3\cdot$ 发生光化学反应而被消耗,BTEX 体积分数下降到最低值;傍晚随着太阳辐射减弱,气温逐渐下降,大气光化学反应强度逐步降低,加之晚高峰时段机动车尾气排放增加,导致 BTEX 体积分数逐步升高. BTEX 的日变化趋势与 CO 质量浓度的日变化趋势相一致. 值得注意的是 C8 芳香烃组分的早高峰峰值略滞后于苯和甲苯,这一研究结果可能与不同 BTEX 组分的来源有关,苯和甲苯直接来源于机动车尾气排放,而乙苯和二甲苯多与溶剂使用有关. 2019 年 7 月各 BTEX 组分体积分数的日变化趋势与 2020 年 1 月基本相似,而 O_3 与各 BTEX 组分的日变化趋势相反. O_3 浓度在午后呈迅速上升的趋势,并于 18:00 达到峰值,这与午后气温增加大气光化学反应强烈导致 VOCs 快速消耗有关.

2.3 气象条件对 BTEX 的影响

上述有关 BTEX 日变化趋势的论述表明,BTEX

体积分数很大程度上受到气象条件的影响. 因此该部分将重点论述温度,相对湿度,风速和风向各气象要素对天津市夏冬季 BTEX 体积分数的影响. 图 4 所示为 BTEX 体积分数随风速风向变化的二元极坐标,从中可知, BTEX 体积分数在 2019 年 7 月和 2020 年 1 月表现出不同的特征. 当风速小于 $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, BTEX 体积分数的低值位于天津市西南方向. 当风速大于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, BTEX 体积分数较大的区域还是在西南方向. 这一结果表明 2020 年 1 月天津市 BTEX 体积分数很大程度上受到西南方向短距离传输的影响. 位于天津市西南方向的保定、沧州、衡水和石家庄是冬季重霾污染频发的地区,在西南风作用下携带高浓度的 BTEX 向天津市输送, BTEX 体积分数不断累积. 与 2020 年 1 月不同,当风速小于 $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时, 2019 年 7 月 BTEX 体积分数较大的区域位于南和东南方向. 这一结果表明在夏季 BTEX 浓度主要受到本地生成的影响,但是相较 2020 年 1 月影响程度较小.

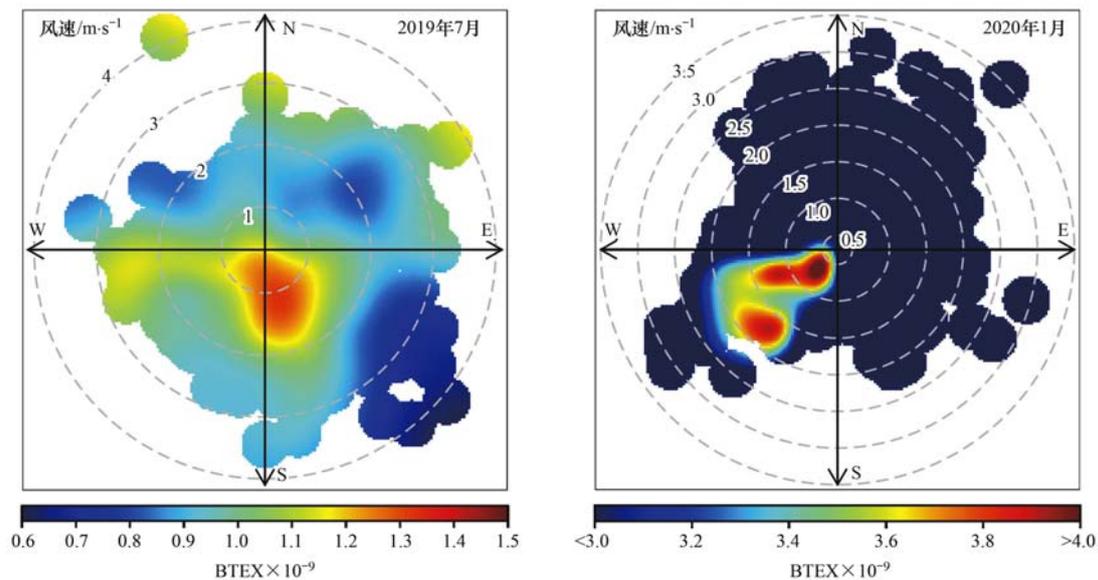


图 4 BTEX 体积分数随风速风向变化的二元极坐标

Fig. 4 Bivariate polar plots of BTEX as a function of wind direction and wind speed

图 5 所示为 BTEX 体积分数随温度和相对湿度变化的情况. 从中可以看出, 2019 年 7 月 BTEX 体积分数随温度和相对湿度的变化呈阶梯状, 即当相对湿度大于 75% 时, BTEX 的高值 ($>1.2 \times 10^{-9}$) 位于 $21 \sim 27^\circ\text{C}$ 温度区间内; 当相对湿度大于 60% 小于 75% 时, BTEX 的高值位于 $24 \sim 30^\circ\text{C}$ 温度区间; 当相对湿度处于 25% ~ 60% 时, 随着温度的增加 BTEX 浓度呈增加趋势. 但是当相对湿度小于 25% 或温度大于 33°C 时, BTEX 的体积分数值均较低. 这一研究结果表明 BTEX 的体积分数在夏季同时受到温度和相对湿度的影响. 与 2019 年 7 月的情

况不同, BTEX 的浓度很大程度上受到相对湿度的影响更大. 图 5(b) 中当温度处于 $-9 \sim -6^\circ\text{C}$ 时, BTEX 浓度随着相对湿度的增加而增加. 当相对湿度小于 35%, 温度小于 3°C 时, BTEX 浓度较低. 这一结果表明冬季温度较低时 BTEX 体积分数变化依赖于相对湿度的变化情况.

2.4 特征物种比值分析 BTEX 来源

不同 BTEX 组分来源不同, 在大气中的寿命和光化学反应活性也存在显著差异, 因此, 许多学者运用典型 VOCs 示踪物比值法定性研究 VOCs 的来源. 较常用的特征物种比值有甲苯/苯和二甲苯/

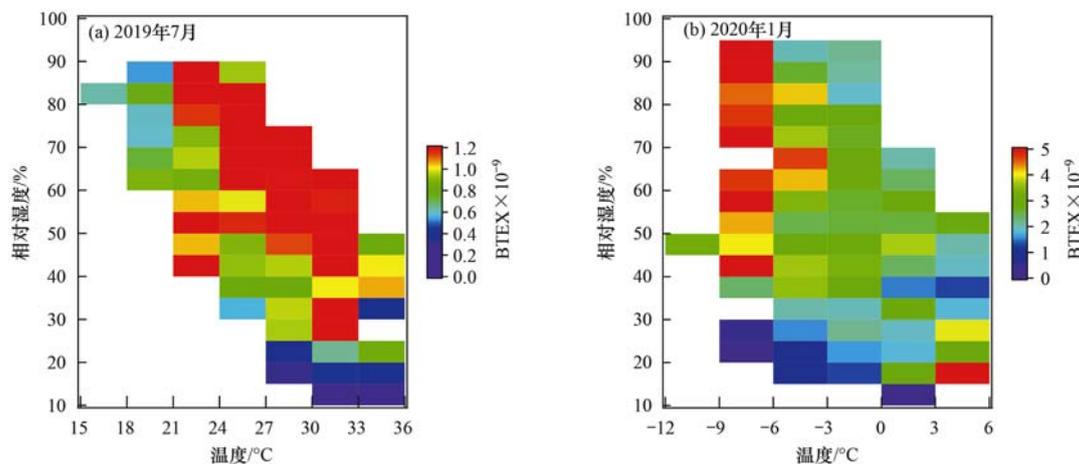


图5 BTEX 体积分数随温度和相对湿度的变化

Fig. 5 Temperature and relative humidity dependence of the mixing ratio of BTEX

乙苯. 图6所示为观测期间甲苯和苯以及间/对-二甲苯和乙苯的相关性关系. 大量研究表明甲苯和苯的比值(T/B)可以用来初步识别和判定大气中BTEX的来源^[19], 当T/B在2左右时机动车尾气排放贡献最大^[20, 21], 当T/B < 1时, 主要受到生物质燃烧, 化石燃料燃烧和燃煤排放的影响^[22], 当T/B > 2.5时则主要受到工业源及溶剂使用的影响^[23]. 在本研究中, T/B的均值在2019年7月和2020年1月分别为0.76和0.86. Wang等^[24]在隧道的观测结果表明, 当受机动车尾气排放影响时T/B为1.43, Liu等^[25]的研究发现当T/B = 0.71时燃煤排放的贡献最大. 本研究中2019年7月和2020年1月的T/B值均处于0.71 ~ 1.43之间, 表明天津市除了受到生物质燃烧, 化石燃料燃烧和燃煤影响, 一定程度上也受到交通排放源的影响.

在城市地区, 间/对-二甲苯和乙苯具有共同的来源, 但是间/对-二甲苯与大气中·OH的反应速率却是乙苯的3倍^[26, 27], 随着太阳辐射强度增加, 间/对-二甲苯发生快速反应被消耗, 间/对-二甲苯与乙苯比值逐渐降低, 比值越小表明大气的老化程度越高^[28]. 在本研究中, 间/对-二甲苯和乙苯比值(X/E)的平均值在2019年7月和2020年1月分别为1.30和0.71, 2019年7月的平均值与Xie等^[29]和Liu等^[30]在北京夏季的观测结果相近(1.23 ~ 1.43), 而2020年1月的值则与张玉欣等^[16]在南京北郊秋冬季观测结果和韩婷婷等^[31]在上甸子区域本底站2017年9月的观测结果相近. 从图6可知, 2020年1月X/E的值远小于2019年7月, 表明冬季大气老化程度更高.

为了更好地识别BTEX的来源, 如图7所示, 本研究给出了清洁天和典型污染过程中苯(B)、甲苯(T)和乙苯(E)相关性分析. 从中可知将BTEX的来

源大致分为3类, 分别是: 生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤、交通源排放和工业源及溶剂使用排放^[32]. 生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤的B:T:E均值为69%:27%:4%, 交通源排放为31%:59%:10%, 工业源及溶剂使用为6%:59%:35%. 从图7可见, BTEX主要来源于生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤和交通源排放, 而工业源及溶剂使用对BTEX来源的贡献基本可以忽略不计. 图7(d)中B:T:E的值基本上全部分布在生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤范围内, 表明在2020年1月霾污染过程中燃煤等的排放对BTEX贡献最大. 相比较而言, 清洁天受到燃煤等排放的影响较小, 有一部分B:T:E的值位于交通源排放的范围内, 还有一部分散落于这3类来源之外, 表明BTEX可能还有其他来源. 与2020年1月的BTEX来源略不同的是, 2019年7月BTEX受到生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤和交通源排放共同影响. 在臭氧污染过程中, >95%的样品位于生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤范围内, 也有相当一部分位于交通源排放的范围内, 表明在天津臭氧污染过程中BTEX同时来源于生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤和机动车尾气排放. 此外, 本研究基本上没有发现工业过程或溶剂使用的排放.

3 健康风险评估

苯系物对人体健康具有一定的危害, 苯甚至是一种致癌物. 因此, 需要对环境大气中BTEX的健康风险进行定量评估. 空气中的BTEX主要通过呼吸道进入人体内部器官, 因此本研究运用2009年美国环保署提出的针对特定场所的吸入途径健康风险评估方法(EPA-540-R-070-002), 评估各BTEX组分的健康风险及苯的致癌风险. 具体的计算方法如下.

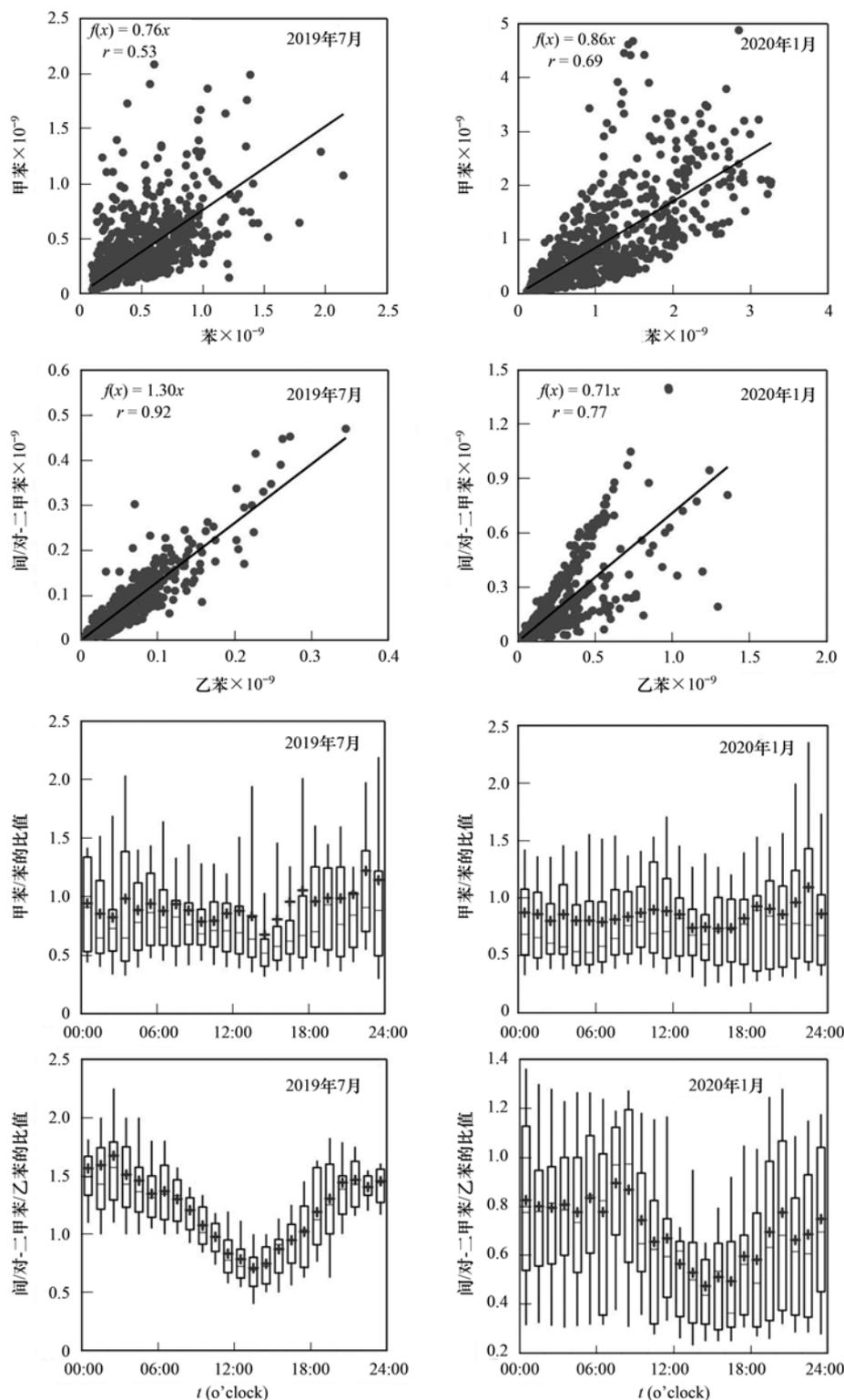


图 6 观测期间苯和甲苯以及间/对-二甲苯和乙苯相关性关系

Fig. 6 Correlations between benzene and toluene, *m,p*-xylenes, and ethylbenzene during the observation period

3.1 非致癌风险

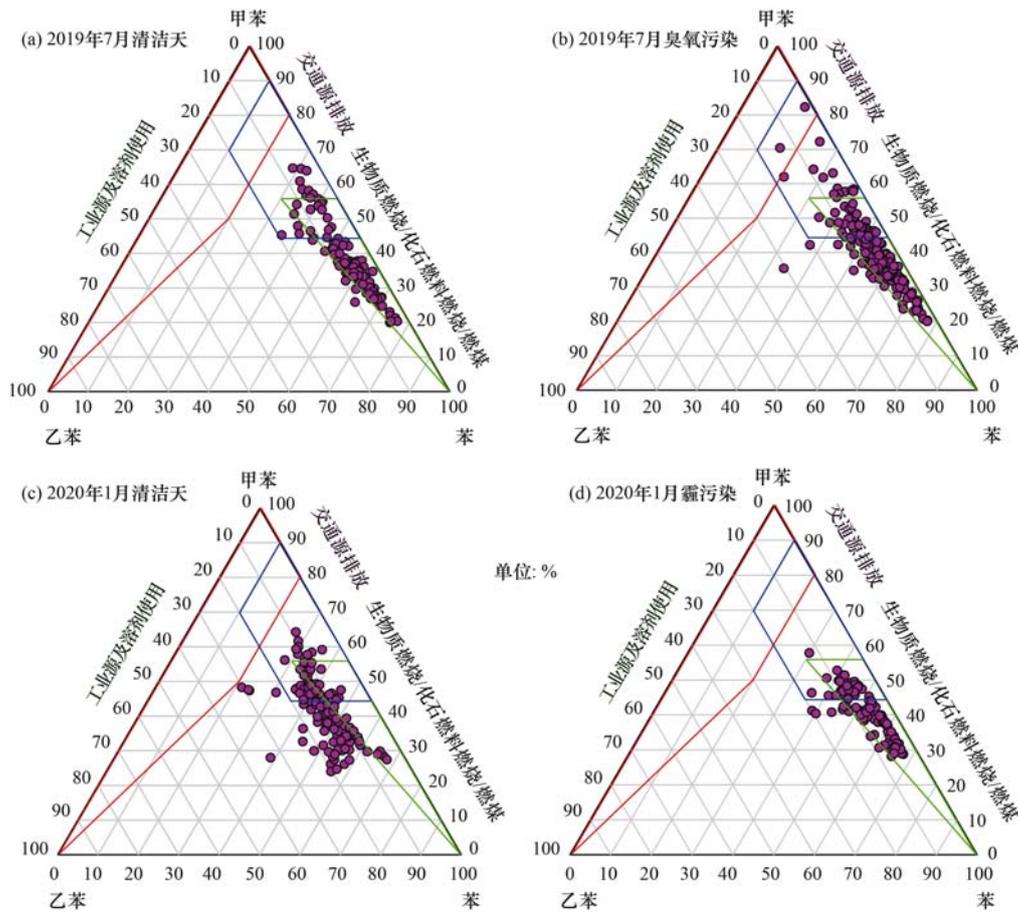
$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (1)$$

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

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

式中, EC 为慢性和亚慢性暴露浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; CA 为污染物环境浓度, $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; ET 是暴露时间, 指导

数值是 $24 \text{ h} \cdot \text{d}^{-1}$; EF 为暴露频率, 指导数值是 $365 \text{ d} \cdot \text{a}^{-1}$; ED 为人体终生暴露时间, 指导数值为 70 a; AT 为平均时间, 数值为 $70 \times 365 \times 24 \text{ h}$; HQ 为非致癌危险商; RfC 为污染物参考量, 单位为 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$, 苯、甲苯、乙苯、间/对-二甲苯和邻-二甲苯的 RfC 值分别为 0.03、5、1、0.1 和 0.1 HI



绿线区域表示生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤, 蓝线区域表示交通源排放, 红线区域表示工业源及溶剂使用, 图中粉色圆点表示 3 种组分体积分数的比值(%)

图 7 清洁天和典型污染过程中苯、甲苯和乙苯相关性关系

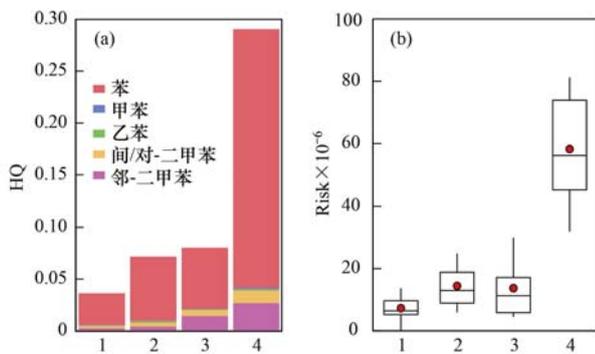
Fig. 7 Proportions of benzene, toluene, and ethylbenzene during clean day and typical pollution episodes

为污染物非致癌风险总量。

3.2 致癌风险

$$\text{Risk} = \text{EC} \times \text{IUR} \quad (4)$$

式中, Risk 为苯致癌风险值, 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} 。



1. 2019 年 7 月清洁天, 2. 2019 年 7 月臭氧污染, 3. 2020 年 1 月清洁天, 4. 2020 年 1 月霾污染

图 8 清洁天和典型污染过程中 BTEX 各组分 HQ 和 risk 的变化

Fig. 8 Variations of HQ and risk values in BTEX species during clean day and typical pollution episodes

图 8 所示为基于上述健康风险评价方法计算的清洁天和典型污染过程中 BTEX 各组分的 HQ 和 Risk. 无论是在清洁天还是典型污染过程中, 苯的 HQ 最高, 邻-二甲苯和间/对-二甲苯次之, 甲苯和乙苯最低. 2019 年 7 月臭氧污染和 2020 年 1 月霾污染过程中 BTEX 的 HI 分别为 0.072 和 0.29, 均处于 EPA 认定的安全范围内 ($\text{HI} < 1$). 图 8(b) 中苯的致癌风险值分别为 7.27×10^{-6} 、 1.44×10^{-5} 、 1.37×10^{-5} 和 5.82×10^{-5} , 无论是在清洁天还是污染过程中, 苯的致癌风险均高于 EPA 规定的安全阈值 (1.00×10^{-6}), 在霾污染过程中甚至高达 5.82×10^{-5} . 这一结果表明应高度重视环境大气中苯系物尤其是苯的健康风险, 因地制宜地制定减排措施切实降低苯系物浓度, 降低其对人体健康的影响。

4 结论

(1) 2020 年 1 月天津市 BTEX 体积分数平均值为 2.74×10^{-9} , 是 2019 年 7 月的 2.47 倍. 臭氧和霾污染过程中 BTEX 体积分数平均值分别为 1.32×10^{-9} 和 4.83×10^{-9} , 苯的体积分数占比最大, 其

次是甲苯,乙苯和二甲苯占比最小。

(2)2020年1月天津市BTEX体积分数很大程度上受到西南方向短距离传输的影响,而在2019年7月BTEX浓度受到本地排放的影响,但是影响程度相对较小,BTEX浓度较2020年1月明显较低。BTEX浓度随温度和相对湿度变化的结果表明,BTEX浓度水平在夏季同时受到温度和相对湿度的影响,而在2020年1月当温度较低时BTEX浓度对相对湿度的变化更敏感。

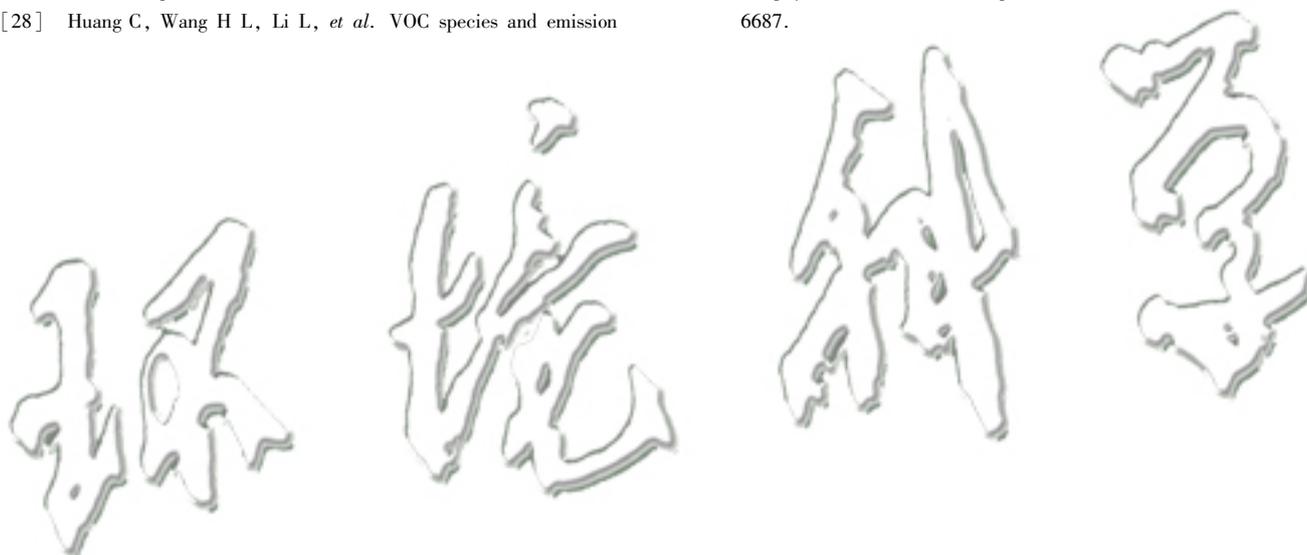
(3)特征物种比值结果表明,天津市BTEX在霾污染过程中受生物质燃烧/化石燃料燃烧/燃煤排放的影响较大,而在臭氧污染过程中除了受到燃烧排放源影响,交通源排在很大程度上也有影响。

(4)2019年7月臭氧污染和2020年1月霾污染过程中BTEX的HI分别为0.072和0.29,均处于EPA认定的安全范围内,其中苯的HQ最高,邻二甲苯和间/对二甲苯次之,甲苯和乙苯最低。苯的致癌风险在清洁天和污染过程中均高于EPA规定的安全阈值,需引起高度重视。

参考文献:

- [1] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [2] Russell A, Milford J, Bergin M S, *et al.* Urban ozone control and atmospheric reactivity of organic gases[J]. *Science*, 1995, **269**(5223): 491-495.
- [3] Shao M, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Ground-level ozone in the Pearl River Delta and the roles of VOC and NO_x in its production [J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, **90**(1): 512-518.
- [4] Odum J R, Jungkamp T P, Griffin R J, *et al.* The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor[J]. *Science*, 1997, **276**(5309): 96-99.
- [5] Sato K, Takami A, Isozaki T, *et al.* Mass spectrometric study of secondary organic aerosol formed from the photo-oxidation of aromatic hydrocarbons[J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(8): 1080-1087.
- [6] Yuan B, Hu W W, Shao M, *et al.* VOC emissions, evolutions and contributions to SOA formation at a receptor site in eastern China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(17): 8815-8832.
- [7] Bari A, Kindziarski W B. Ambient volatile organic compounds (VOCs) in Calgary, Alberta: sources and screening health risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **631-632**: 627-640.
- [8] Weichenthal S, Kulka R, B elisle P, *et al.* Personal exposure to specific volatile organic compounds and acute changes in lung function and heart rate variability among urban cyclists [J]. *Environmental Research*, 2012, **118**: 118-123.
- [9] Liu B S, Liang D N, Yang J M, *et al.* Characterization and source apportionment of volatile organic compounds based on 1-year of observational data in Tianjin, China[J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 757-769.
- [10] 卢学强, 韩萌, 冉靛, 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.
- [11] Li L Y, Xie S D, Zeng L M, *et al.* Characteristics of volatile organic compounds and their role in ground-level ozone formation in the Beijing-Tianjin-Hebei region, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2015, **113**: 247-254.
- [12] 高璟赟, 肖致美, 徐虹, 等. 2019年天津市挥发性有机物污染特征及来源[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 55-64.
- [13] 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.
- [14] 姚青, 蔡子颖, 马志强, 等. 天津大气中BTEX的变化特征与健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(9): 3276-3284.
- [15] 陈丹, 张志娟, 高龙飞, 等. 珠江三角洲某炼油厂苯系物的健康风险评估[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(5): 1961-1970.
- [16] 张玉欣, 安俊琳, 王健宇, 等. 南京北郊大气BTEX变化特征和健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 453-460.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Niu Z C, Zhang H, Xu Y, *et al.* Pollution characteristics of volatile organic compounds in the atmosphere of Haicang District in Xiamen City, Southeast China [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2012, **14**(4): 1144-1151.
- [20] Barletta B, Meinardi S, Simpson I J, *et al.* Ambient mixing ratios of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in two major urban centers of the Pearl River Delta (PRD) region: Guangzhou and Dongguan [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(18): 4393-4408.
- [21] Nelson P F, Quigley S M. The hydrocarbon composition of exhaust emitted from gasoline fuelled vehicles [J]. *Atmospheric Environment*(1967), 1984, **18**(1): 79-87.
- [22] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic

- compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [23] Kumar A, Singh D, Kumar K, *et al.* Distribution of VOCs in urban and rural atmospheres of subtropical India: temporal variation, source attribution, ratios, OFP and risk assessment [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 492-501.
- [24] 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.
- [25] Liu Y, Shao M, Fu L L, *et al.* Source profiles of volatile organic compounds(VOCs) measured in China: part I[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6247-6260.
- [26] Nelson P F, Quigley S M. The m,p-xylenes: ethylbenzene ratio. A technique for estimating hydrocarbon age in ambient atmospheres[J]. *Atmospheric Environment (1967)*, 1983, **17**(3): 659-662.
- [27] Atkinson R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds; a review[J]. *Atmospheric Environment. Part A. General Topics*, 1990, **24**(1): 1-41.
- [28] Huang C, Wang H L, Li L, *et al.* VOC species and emission inventory from vehicles and their SOA formation potentials estimation in Shanghai, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(19): 11081-11096.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 韩婷婷, 李颖若, 邱雨露, 等. 上甸子区域背景站 VOCs 污染特征及其对臭氧生成贡献[J]. *环境科学*, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- Han T T, Li Y R, Qiu Y L, *et al.* Characteristics of VOCs and their roles in ozone formation at a regional background site in Beijing, China [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(6): 2586-2595.
- [32] Zhang Z, Zhang Y L, Wang X M, *et al.* Spatiotemporal patterns and source implications of aromatic hydrocarbons at six rural sites across China's developed coastal regions [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(11): 6669-6687.



CONTENTS

Disinfection By-products in Drinking Water and Their Control Strategies: A Review	CHU Wen-hai, XIAO Rong, DING Shun-ke, <i>et al.</i>	(5059)
Advances in Mechanism and Influencing Factors Affecting Hydrogen Sulfide Adsorption by Biochar	XU Qi-yong, LIANG Ming-shen, XU Wen-jun, <i>et al.</i>	(5086)
Effect of Vegetation Coverage on the Temporal and Spatial Distribution of PM _{2.5} Concentration in China's Eight Major Economic Regions from 1998 to 2016	YANG Yu-lian, YANG Kun, LUO Yi, <i>et al.</i>	(5100)
Evolution and Potential Source Apportionment of Atmospheric Pollutants of Two Heavy Haze Episodes During the COVID-19 Lockdown in Beijing, China	ZHAO De-long, TIAN Ping, ZHOU Wei, <i>et al.</i>	(5109)
Characteristics and Origin Analysis of Air Pollution During the Spring Festival in Linfen, Fenwei Plain	LIU Wei-jie, HU Tian-peng, MAO Yao, <i>et al.</i>	(5122)
Spatio-Temporal Characteristics and Potential Source Areas of Seasonal Atmospheric Pollution in Shijiazhuang	NIE Sai-sai, WANG Shuai, CUI Jian-sheng, <i>et al.</i>	(5131)
Impact of Air Humidity on PM _{2.5} Mass Concentration and Visibility During Winter in Tianjin	DING Jing, TANG Ying-xiao, HAO Tian-yi, <i>et al.</i>	(5143)
Seasonal Variation and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} in Chengde	HE Bo-wen, NIE Sai-sai, WANG Shuai, <i>et al.</i>	(5152)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission Inventory from Domestic Sources in China	LIANG Xiao-ming, CHEN Lai-guo, SHEN Guo-feng, <i>et al.</i>	(5162)
Characteristics of Industrial Volatile Organic Compounds (VOCs) Emission in China from 2011 to 2019	LIU Rui-yuan, ZHONG Mei-fang, ZHAO Xiao-ya, <i>et al.</i>	(5169)
VOCs Emission Inventory and Uncertainty Analysis of Industry in Qingdao Based on Latin Hypercube Sampling and Monte Carlo Method	XU Wan-ying, FU Fei, LÜ Jian-hua, <i>et al.</i>	(5180)
Emission Characteristics and Environment Impacts of VOCs from Typical Rubber Manufacture	WANG Hai-lin, XIN Guo-xing, ZHU Li-min, <i>et al.</i>	(5193)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Different Functional Zones of Shenyang, China	KU Ying-ying, REN Wan-hui, SU Cong-cong, <i>et al.</i>	(5201)
Characteristics of BTEX and Health Risk Assessment During Typical Pollution Episodes in Summer and Winter in Tianjin Urban Area	HAN Ting-ting, LI Ying-ruo, PU Wei-wei, <i>et al.</i>	(5210)
Atmospheric NH ₃ Emission Inventory and Analysis of the Driving Force in Zhengzhou City	JI Yao, WANG Chen, LU Xuan, <i>et al.</i>	(5220)
Interactive Effects of the Influencing Factors on the Changes of O ₃ Concentrations Based on GAMs Model in Chengdu	ZHANG Ying, NI Chang-jian, FENG Xin-yuan, <i>et al.</i>	(5228)
Spatial Variation Characteristics and Remote Sensing Retrieval of Total Suspended Matter in Surface Water of the Yangtze River	LI Jian-hong, HUANG Chang-chun, ZHA Yong, <i>et al.</i>	(5239)
Spatial Distribution Characteristics of the Spectrum, Source Analysis, and Nitrogen Response of Dissolved Organic Matter in Summer Rainfall in the Hebei Province	ZHANG Zi-wei, ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, <i>et al.</i>	(5250)
Distribution and Influencing Factors of DOM Components in Urban and Suburban Polluted Rivers	ZHU Yi, CHEN Hao, DING Guo-ping, <i>et al.</i>	(5264)
Composition and Distribution of Microplastics in the Water and Sediments of Urban Rivers in Beijing	HU Jia-min, ZUO Jian-e, LI Di, <i>et al.</i>	(5275)
Nontarget Screening and Ecological Risk Assessment of Polar Organic Pollutants in Surface Water on the West Bank of Taihu Lake	LU Xin-yan, WANG Fei, ZHANG Li-min, <i>et al.</i>	(5284)
Optimization of Extraction Methods and Distribution Characteristics of Antibiotics and Metabolites in Sediments of a River Water-Groundwater Interaction Zone	LI Yu-qiong, TONG Lei, YAN Han, <i>et al.</i>	(5294)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Antibiotics and Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments of Desilting Demonstration Area in Baiyangdian Lake	WANG Tong-fei, ZHANG Wei-jun, LI Li-qing, <i>et al.</i>	(5303)
Dynamic Mechanisms of Groundwater Quality by Residual Contaminants of the Tanghe Wastewater Reservoir in Xiong'an New Area	ZHANG Zhi-xiong, WANG Shi-qin, ZHANG Yi-zhang, <i>et al.</i>	(5312)
Analysis and Prediction of Health Risk from Heavy Metals in Drinking Water Sources Based on Time Series Model	JI Chao, HOU Da-wei, XIE Li, <i>et al.</i>	(5322)
Spatial Distribution, Risk, and Influencing Factors of River Water-Sediment Heavy Metals in the Lower Reaches of the Qianhe River	GAO Yu, WANG Guo-lan, JIN Zi-han, <i>et al.</i>	(5333)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Dissolved Heavy Metals in Chaohu Lake Basin During the Wet Season	HE Miao, LIU Gui-jian, WU Lei, <i>et al.</i>	(5346)
Impact of Enclosure Culture on Heavy Metal Content in Surface Sediments of Hongze Lake and Ecological Risk Assessment	ZI Xin-yuan, ZHANG Ming, GU Xiao-hong, <i>et al.</i>	(5355)
Natural Water Chemistry Change in the Surface Water of Chengdu and Impact Factors	XU Qiu-jin, LAI Cheng-yue, DING Yao, <i>et al.</i>	(5364)
Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Groundwater in the Leizhou Peninsula	PENG Hong-xia, HOU Qing-qin, ZENG Min, <i>et al.</i>	(5375)
Land-based Nitrogen Pollution Source Structure and Spatial Distribution in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DONG Si-qi, HUANG Chong, <i>et al.</i>	(5384)
Output Characteristics of Nitrogen and Phosphorus from Non-Point Source Pollution of Typical Land Use in a Micro-Watershed in Hilly Red Soil Region	FANG Zhi-da, SU Jing-jun, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5394)
Effects of Different Fertilization Patterns on Nitrogen Leaching Loss from Paddy Fields Under Reduced Nitrogen	JIANG Hai-bin, ZHANG Ke-qiang, ZOU Hong-tao, <i>et al.</i>	(5405)
Effects of <i>Spartina alterniflora</i> Invasion on Soil Phosphorus Forms in the Jiaozhou Bay Wetland	SHA Meng-qiao, CHAI Na, ZHAO Hong-tao, <i>et al.</i>	(5414)
Contrasting Analysis of Microbial Community Composition in the Water and Sediments of the North Canal Based on 16S rRNA High-Throughput Sequencing	PENG Ke, DONG Zhi, DI Yan-ming, <i>et al.</i>	(5424)
Characteristics of Phosphorus Adsorption in Aqueous Solution by Si-modified Peanut Shell Biochar	ZHAO Min, ZHANG Xiao-ping, WANG Liang-rong, <i>et al.</i>	(5433)
Adsorption Characteristics of Pb(II) on Eucalyptus Biochar Modified by Potassium Permanganate	MO Zhen-lin, ZENG Hong-hu, LIN Hua, <i>et al.</i>	(5440)
Preparation of Mixed Metal Oxide/Carbon Composites and Its Adsorption Performance for Pb(II)	LU Yu-shen, ZONG Li, YU Hui, <i>et al.</i>	(5450)
Fabrication of Supported Titanium Xerogel Adsorbent and Performance Evaluation for Arsenite Removal	SUN Ye-yang, ZHOU Chang, GAN Yong-hai, <i>et al.</i>	(5460)
Nitrite Regulation During Start-up of Combined Partial Nitrification and ANAMMOX Process	ZUO Fu-min, ZHENG Rui, SUI Qian-wen, <i>et al.</i>	(5472)
Effects of Biochar and Straw Return on Soil Aggregate and Organic Carbon on Purple Soil Dry Slope Land	DENG Hua, GAO Ming, LONG Yi, <i>et al.</i>	(5481)
Response of Soil Organic Carbon Content in Different Slope Positions to Fertilization Management in Purple Soil Sloping Fields	XU Man, YU Luo, WANG Fu-hua, <i>et al.</i>	(5491)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Soil Heavy Metals in the Eastern Mountainous Area of the Nanyang Basin	LAI Shu-ya, DONG Qiu-yao, SONG Chao, <i>et al.</i>	(5500)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Suburban Farmland Soil	ZHANG Xiu-xiu, LU Xiao-li, WEI Yu-chen, <i>et al.</i>	(5510)
Accumulation Characteristics and Dietary Exposure Estimation of Heavy Metals in Vegetables from the Eastern Coastal Region of China	SUN Shuai, GENG Ning-bo, GUO Cui-cui, <i>et al.</i>	(5519)
Security Risk and Influencing Factors of Agro-Products in Farmland Soil Around a Typical Mining Smelter	HUO Yan-hui, WANG Mei-e, XIE Tian, <i>et al.</i>	(5526)
Cd Pollution and Safe Planting Zoning in Paddy Soils: A Case Study in a District of Chongqing	CAO Shu-zhen, MU Yue, CUI Jing-xin, <i>et al.</i>	(5535)
Characteristics and Influencing Factors of Cadmium Accumulation in Different Rice Varieties Under Cadmium Contaminated Field Conditions	WANG Yu-hao, YANG Li, KANG Yu-chen, <i>et al.</i>	(5545)
Effects of Nano-membrane on Aerobic Composting Process and Odor Emission of Livestock Manure	LI Yong-shuang, SUN Bo, CHEN Ju-hong, <i>et al.</i>	(5554)