

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第11期

Vol.39 No.11

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2010~2015年我国水泥工业NO_x排放清单及排放特征 蒋春来, 宋晓晖, 钟悦之, 孙亚梅, 雷宇 (4841)

兰州市煨炕污染物排放清单及其对PM_{2.5}浓度贡献 郭文凯, 刘晓, 朱玉凡, 陈强, 杜永刚 (4849)

北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 杜翔, 赵普生, 苏捷, 董群 (4858)

郑州市夏、秋季大气颗粒物中水溶性无机离子质量浓度及粒径分布特征 赵庆炎, 姜楠, 燕启社, 王申博, 韩世杰, 杨留明, 张瑞芹 (4866)

菏泽市冬季PM_{2.5}中二元羧酸类SOA的昼夜变化特征 孟静静, 刘晓迪, 侯战方, 李静, 魏本杰, 邢继钊 (4876)

我国典型钢铁行业主要工艺环节排放颗粒物源成分谱特征 温杰, 杨佳美, 李蒲, 郁佳, 吴建会, 田瑛泽, 张进生, 史国良, 冯银厂 (4885)

嘉兴市2015年人为源VOCs排放清单 郝欢, 万梅, 戎宇, 兰亚琼, 熊传芳, 晁娜 (4892)

上海某石化园区周边区域VOCs污染特征及健康风险 盛涛, 陈筱佳, 高松, 刘启贞, 李学峰, 伏晴艳 (4901)

SBR工艺城市污水处理厂微生物气溶胶逸散特征 杨凯雄, 侯红勋, 王颖哲, 史昊然, 许光素, 韩云平, 刘俊新, 李琳 (4909)

太湖有色可溶性有机物组成结构对不同水文情景的响应 石玉, 周永强, 张运林, 姚晓龙, 黄昌春 (4915)

巢湖2016年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析 胡旻琪, 张玉超, 马荣华, 张壹萱 (4925)

蓝藻水华形成过程对氮磷转化功能细菌群的影响 彭宇科, 路俊玲, 陈慧萍, 肖琳 (4938)

三峡水库低水位运行时干流回水对支流水环境的影响 陈紫娟, 宋献方, 张应华, 魏潇, 唐瑜, 秦文婧 (4946)

纳米银对胶州湾西北部海区及河口区沉积物反硝化能力和功能基因丰度的影响 白洁, 田延昭, 孙鹏飞, 白晓岩, 李岩然, 赵阳国 (4956)

澜沧江流域水体悬浮颗粒物¹⁵N空间差异及成因分析 唐咏春, 徐飘, 杨正健, 张思思, 刘德富, 纪道斌 (4964)

潮白河冲洪积扇典型包气带剖面反硝化强度垂向空间分布规律 耿宏志, 邹环, 李鸣晓, 张莹, 从辉, 席北斗 (4972)

蛤蟆通河流域地下水化学特征及控制因素 张涛, 何锦, 李敬杰, 曹月婷, 龚磊, 刘金巍, 边超, 蔡月梅 (4981)

典型岩溶地区岩溶泉溶解性碳浓度变化及其通量估算 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 郝卓, 高扬 (4991)

农村多水塘系统景观结构对非点源污染中氮截留效应的影响 李玉凤, 刘红玉, 刘军志, 娄彩荣, 王娟 (4999)

城市典型不透水下垫面径流中邻苯二甲酸酯的污染特征 刘雨童, 李田, 彭航宇 (5007)

不同降雨条件下植被对绿色屋顶径流调控效益影响 葛德, 张守红 (5015)

四氧化三铁改性沸石改良底泥对水中磷酸盐的吸附作用 王丹赫, 张宏华, 林建伟, 詹艳慧, 何思琪, 梁舒静, 汲雨, 奚秀清 (5024)

厌氧条件下可溶性有机质对汞的还原与氧化作用 卞永荣, 顾宝华, 朱波, 程虎, 谷成刚, 杨兴伦, 宋洋, 王芳, 叶茂, 蒋新 (5036)

光助-二茂铁/H₂O₂非均相体系降解磺胺二甲噻啉 张彪军, 赵姚云川, 房岐, 石凤丽, 张月起, 赵群, 田森林, 李英杰 (5043)

基于同位素技术的短程硝化过程N₂O产生途径 杨玉兵, 杨庆, 李洋, 周薛扬, 李健敏, 刘秀红 (5051)

基质比对厌氧氨氧化耦合反硝化脱氮除碳的影响 安芳娇, 黄剑明, 黄利, 乔瑞, 王瑾, 陈永志 (5058)

厌氧/好氧SPNDPR系统实现低C/N城市污水同步脱氮除磷的优化运行 于德爽, 袁梦飞, 王晓霞, 陈光辉, 甄建园, 杜世明, 张帆 (5065)

污水处理厂SNAD工艺小试 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 刘志诚, 张杰 (5074)

盐度对中试厌氧氨氧化脱氮特性的影响及其恢复动力学 唐佳佳, 于德爽, 王晓霞, 陈光辉, 张军, 赵红, 韩长民 (5081)

中试ANAMMOX-ASBR处理火电厂脱硫脱硝尾液的抑制及恢复特性 张军, 于德爽, 王晓霞, 唐佳佳, 赵红, 韩长民, 应凌俏 (5090)

碳氮比对颗粒污泥CANON反应器脱氮性能和N₂O释放的冲击影响 付昆明, 姜姍, 苏雪莹, 廖敏辉, 仇付国, 曹秀芹 (5101)

污泥性质对微波预处理-厌氧消化的影响及古菌群落结构分析 房平, 唐安平, 付兴民, 李伟, 文洋, 佟娟, 魏源送 (5108)

重庆市农地重金属基线值的厘定及其积累特征分析 伍福琳, 陈丽, 易廷辉, 杨志敏, 陈玉成 (5116)

韩江流域土壤中有有机氯农药的特征分布 刘佳, 丁洋, 祁士华, 翟程凯 (5127)

有机磷酸酯在重庆不同城市功能区土壤的分布特征及来源 杨志豪, 何明靖, 杨婷, 卢俊峰, 魏世强 (5135)

纳米零价铁和过氧化钙联合降解土壤淋洗废液的 α -HCH 姚静波, 周杰, 王明新, 苟志祥, 薛金娟 (5142)

株洲清水塘工业区周边土壤微生物群落特征 申丽, 李振桦, 曾伟民, 余润兰, 吴学玲, 李交昆, 王烁琨 (5151)

生物炭对施粪肥土壤中根际真菌群落多样性及相互作用的影响 王丹丹, 杨泽平, 赵远, 梁玉婷 (5163)

生物炭负载氮还田对水稻生长、根系形态及氮素利用的影响 俞映惊, 王悦满, 侯朋福, 杨林章, Alfred Oduor Odindo, 薛利红 (5170)

颗粒有机质对水稻稻吸收及转运的影响 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5189)

施肥对向日葵吸收积累Cd的影响 林小兵, 周利军, 王惠明, 刘晖, 武琳, 俞莹, 胡敏, 何波, 周青辉, 黄久如 (5198)

不同水稻品种对重金属的积累特性 曹柳, 杨俊兴, 郭劲君, 郭俊梅, 郑国砥, 卢一富 (5198)

芦竹和木本植物间种修复重金属污染土壤 曾鹏, 郭朝晖, 肖细元, 彭驰, 黄博 (5207)

三峡库区典型河流水-气界面CO₂通量日变化观测及其影响因素分析 罗佳宸, 李思悦 (5217)

富营养化湖区CH₄排放特征及其影响因素 商东耀, 肖启涛, 胡正华, 谢燕红, 黄文晶, 张弥 (5227)

短期放牧对半干旱草地生态系统CO₂和N₂O排放的影响 申颜, 孙建平, 罗玉坤, 刁华杰, 闫卫东, 王常慧, 董宽虎 (5237)

覆膜方式和灌溉对夏玉米产量及农田碳排放强度的影响 罗晓琦, 张阿凤, 陈海心, 冯浩 (5246)

臭氧浓度升高对植物源挥发性有机化合物(BVOCs)影响的研究进展 冯兆忠, 袁相洋 (5257)

地下水“三氮”污染来源及其识别方法研究进展 杜新强, 方敏, 冶雪艳 (5266)

污水生物处理中抗生素的去除机制及影响因素 张翔宇, 李茹莹, 季民 (5276)

《环境科学》征订启事(4848) 《环境科学》征稿简则(4990) 信息(5188, 5216, 5236)

上海某石化园区周边区域 VOCs 污染特征及健康风险

盛涛¹, 陈筱佳², 高松^{1*}, 刘启贞¹, 李学峰³, 伏晴艳¹

(1. 上海市环境监测中心, 国家环境保护上海淀山湖科学观测研究站, 上海 200235; 2. 上海交通大学环境科学与工程学院, 上海 200240; 3. 上海祥得环保科技有限公司, 上海 200235)

摘要: 为了解石化周边区域大气 VOCs 污染特征, 使用在线 GC-FID 监测仪于 2017 年 10 月对上海市某石化周边居民区大气 VOCs 进行了为期 1 个月的连续观测; 通过最大增量反应活性(MIR)法估算了 VOCs 对臭氧(O₃)生成的贡献, 并进行了健康风险研究. 结果表明, 观测期间 VOCs 总质量浓度的范围 16.4~1 947.8 μg·m⁻³, 平均浓度为 40.7 μg·m⁻³; 烷烃、烯/炔烃和芳香烃的平均占比分别为 66.2%、25.9% 和 7.9%. VOCs 总浓度日变化特征呈现单峰型变化, 峰值浓度为 127.9 μg·m⁻³ (07:00). VOCs 总浓度的平均臭氧生成潜势(OFP)为 249.7 μg·m⁻³, 烯、炔烃对 OFP 的贡献最高, 达到 153.4 μg·m⁻³; 丙烯、反-2-丁烯、乙烯是关键活性组分. 己烷、苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯和间/对二甲苯的健康风险较小.

关键词: 上海; 石化园区; 挥发性有机化合物(VOCs); 污染特征; 健康风险

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2018)11-4901-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201803186

Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai

SHENG Tao¹, CHEN Xiao-jia², GAO Song^{1*}, LIU Qi-zhen¹, LI Xue-feng³, FU Qing-yan¹

(1. National Environmental Protection Shanghai Dianshan Lake Science Observatory Research Station, Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai 200235, China; 2. College of Environment Sciences and Engineering of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 3. Shanghai Xiangde Environmental Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200235, China)

Abstract: To investigate the pollution characteristics of volatile organic compounds (VOCs) in the vicinity of a petrochemical park, the composition and concentration of VOCs was successively monitored by application of a gas chromatography-flame ionization detector in the residential area surrounding a petrochemical park in Shanghai in October 2017. Moreover, the maximum incremental reactive method was employed to estimate the O₃-formation potential contributed by VOCs, and health risks were assessed. Results showed that during the observation period, TVOCs concentrations ranged from 16.4 μg·m⁻³ to 1 947.8 μg·m⁻³ with an average concentration of 40.7 μg·m⁻³, whereas the average proportions of alkanes, alkene/alkynes, and aromatic hydrocarbons were 66.2%, 25.9%, and 7.9%, respectively. The diurnal variation of total VOCs concentration showed a monomodal change, with a peak concentration of 127.9 μg·m⁻³ at 07:00, whereas the TVOCs had an average ozone formation potential (OFP) of 249.7 μg·m⁻³. Analysis of OFP indicated that trans-2-butene and ethylene were the most important species in ozone production with accountabilities for total OFP of 153.4 μg·m⁻³. Propylene, trans-2-butene, and ethylene were the key active species. Furthermore, health risk assessments revealed that no significant health risks had been caused by hexane, benzene, toluene, ethylbenzene, o-xylene, and m-xylene.

Key words: Shanghai; petrochemical park; volatile organic compounds (VOCs); pollution characteristics; health risks

近年来,我国大气污染的特征已由局地污染转向区域性、复合型污染^[1],二次气溶胶和光化学污染问题逐步加剧^[2,3],以 O₃ 和细颗粒物(PM_{2.5})为代表的二次污染问题日益凸显,全国范围内 O₃ 浓度明显上升且超标天数明显增加^[4~6].在京津冀和长三角, O₃ 成为仅次于 PM_{2.5} 的空气污染物,在珠三角, O₃ 已成为超过 PM_{2.5} 的首要污染物,2016 年珠三角超标天数中,以 O₃ 为首要污染物的天数占污染总天数的 70.3%^[7]. VOCs(挥发性有机化合物)是 O₃ 和 PM_{2.5} 中二次有机气溶胶(SOA)的关键前体物,对 O₃ 和 SOA 的生成具有较大的贡献^[8].同时 VOCs 中的部分物种对人体健康具有严重危

害,这类 VOCs 可通过呼吸道或皮肤直接接触等方式对人体造成急性或慢性伤害;其中苯、氯乙烯、甲醛和环氧乙烷等均已被证实为致癌物质^[9,10].大气中 VOCs 的主要来源包括石油化工行业、溶剂使用、机动车尾气排放和工业过程排放等^[11,12].近年来关于石化园区 VOCs 的污染特征、来源解析、优控污染物筛选和对二次污染物生成贡献等研究已陆

收稿日期: 2018-03-27; 修订日期: 2018-05-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201502); 上海市科委科研计划项目(16DZ1204600); 环境保护公益性行业科研专项(201509004)

作者简介: 盛涛(1989~),男,工程师,主要研究方向为大气环境监测, E-mail: shengtao0628@163.com

* 通信作者, E-mail: gs@semc.gov.cn

续开展^[13, 14]. 目前关于石化园区的 VOCs 研究主要集中在石化园区边界或内部, 关于近石化园区周边居民区的 VOCs 污染特征及健康风险评价等研究相对较少.

为了解某石化周边区域的大气 VOCs 污染特征及健康风险情况, 本研究以上海市某石化园区周边居民区内自动监测站在线数据为基础, 分析了该地区大气 VOCs 的污染特征, 通过 MIR 法估算了 VOCs 对 O₃ 生成的贡献, 并使用美国环保署提出的健康风险评价方法对 VOCs 进行了健康风险研究, 旨在为石化地区的 VOCs 污染治理提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测时间和地点

本研究所使用的自动监测站位于上海市某石化园区西南方位的居民区内(图 1), 距离石化园区西边界和交通主干道分别约 2 km 和 500 m, 自动站周围为居民区, 采样口距离地面约 20 m. 观测时间段为 2017 年 10 月 1~31 日, 观测期间盛行北风和东北风, 平均风速 2.0 m·s⁻¹, 在该气象条件下能够反映石化园区排放的 VOCs 污染特征. 观测期间平均温度为 20.0℃, 最高气温 32.0℃, 最低气温

12.4℃, 平均相对湿度为 78%.

1.2 监测仪器及方法

本研究所涉及的 57 种 PAMS 物种使用法国 Chromatotec 公司生产的 AirmoVOC Expert C2~C6 (低碳分析仪) 和 AirmoVOC Expert C6~C12 (高碳分析仪) 进行检测分析; 低碳分析仪对 C2~C6 进行检测, 高碳分析仪对 C6~C12 进行检测. 样品通过干燥管除水后, 低碳经 -10℃ 富集后 220℃ 高温脱附, 高碳经常温富集后 380℃ 高温脱附, 再分别经过色谱柱分离后由 FID 进行分析. 高低、碳分析仪都是单色谱柱, 低碳色谱柱为 Plot Al₂O₃/Na₂SO₄ 柱, 柱长 30 m; 高碳色谱柱为 MXT 30CE 柱, 柱长 30 m. 采用色谱保留时间定性, 使用浓度为 10 × 10⁻⁹ 的外标标准气绘制响应系数进行定量, 高、低碳分析仪监测时间分辨率均为 30 min. 本研究以单位时间内 2 组数据平均值计算的小时浓度为分析基准, 观测期间 VOCs 理论小时数据为 744 个, 由于日常维护等原因, 实际有效小时数据为 731 个.

气象参数使用德国 LUFFT 公司的 UMB-600 型气象监测仪进行监测, 监测时间分辨率为 1 s.

1.3 质量保证和控制

为了保证监测数据的有效性, 各仪器均按照相关规范要求进行质量保证(QA)和质量控制(QC). VOCs 高、低碳分析仪每月使用 57 种混合标准气进行校准, 每季度进行精密度检查, 并定期对富集管、色谱柱和检测器等进行更换; 高、低碳分析仪每 12 h 进行一次内标, 分别通过内标苯、正己烷和正丁烷的响应来判断高碳和低碳的运行状态, 如果出现 1 个及以上的内标物偏差超过 20%, 则上一次通内标至本次通内标期间数据无效. 观测期间 VOCs 高、低碳分析仪内标响应偏差均在 20% 以内, 观测期间内标响应浓度具体见图 2.

1.4 OFP 计算方法

本研究使用 MIR 法来计算不同 VOCs 的 OFP, 其中 MIR 系数使用文献[15]的研究结果(见表 1), 计算公式如下:

$$\text{OFP}_i = \rho(\text{VOCs})_i \times \text{MIR}_i \quad (1)$$

式中, OFP_i 为 VOC 物种 *i* 的臭氧生成潜势, μg·m⁻³; ρ(VOCs)_i 为 VOC 物种 *i* 的质量浓度, μg·m⁻³; MIR_i 为 VOC 物种 *i* 的最大增量反应活性系数.

1.5 健康风险评价方法

健康风险评价是以风险度作为评价指标来定量描述对人体健康危害的风险, 通常根据污染物是否

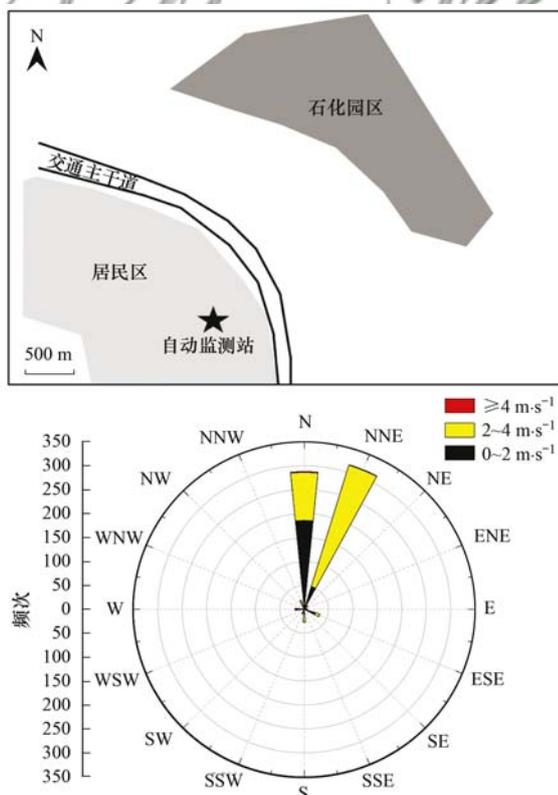


图 1 观测点位置及观测器及风向玫瑰图

Fig. 1 Map of observation station and wind rose diagram during the observation period

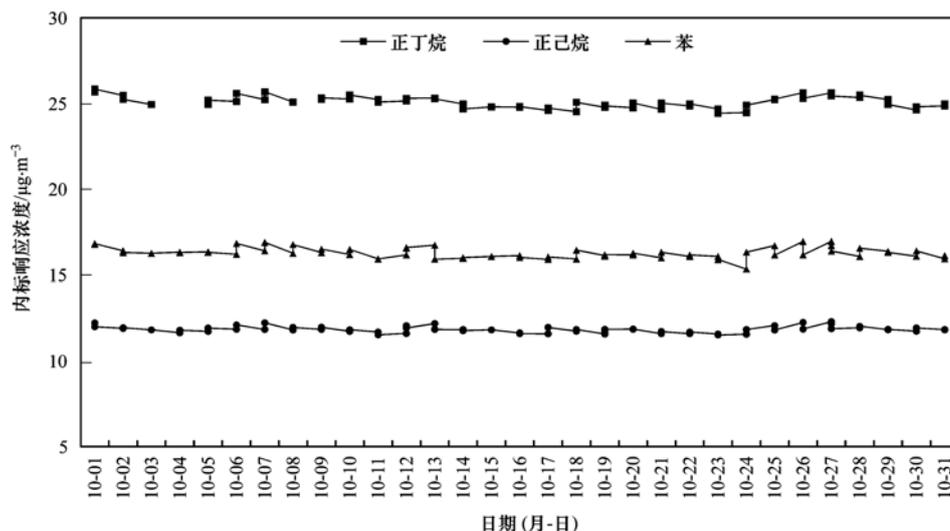


图2 观测期间 VOCs 分析仪内标响应情况

Fig. 2 Internal standard response of VOCs analyzer during the observation period

具有致癌性, 将健康风险评价分为非致癌性健康风险评价和致癌性健康风险评价. 本研究使用美国环境保护署 (U. S. EPA) 在 2009 年更新的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法 (EPA-540-R-070-002). 具体计算如下.

慢性和亚慢性暴露时的暴露浓度 (EC):

$$EC = (CA \times ET \times EF \times ED) / AT \quad (2)$$

非致癌性健康风险危害商值 (HQ):

$$HQ = EC / (RfC \times 1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}) \quad (3)$$

危害指数 (HI):

$$HI = \sum HQ_i \quad (4)$$

式中, CA 为环境浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$; ET 为每天暴露时间, 单位为 $\text{h} \cdot \text{d}^{-1}$, 取值 24; EF 为每年暴露频率, 单位为 $\text{d} \cdot \text{a}^{-1}$, 取值 365; ED 为终生暴露时间, 单位为 a, 取值 70; AT 为平均时间, 单位为 d, 取值 25 550 (即 365×70); RfC 为参考浓度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$, RfC 的值均使用 U. S. EPA 综合风险信息系统中 (网址为 <http://www.epa.gov/iris>) 中的推荐值.

2 结果与讨论

2.1 VOCs 浓度特征

观测期间 VOCs 总浓度的范围 $16.4 \sim 1947.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 平均浓度为 $40.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; VOCs 总浓度超过 $1000 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 共出现 2 次, 期间烷烃占比均超过 90%, 主要烷烃物种为异戊烷、正戊烷、正丁烷、丙烷和乙烷等 C2 ~ C5 烃类, 其中异戊烷主要来源为汽油挥发排放^[16], 表明受石化园区和机动

车排放影响该地区有出现高浓度 VOCs 的可能. 观测期间 VOCs 的组成特征见图 3, 可知观测期间 VOCs 组分以烷烃为主, 其次为烯、炔烃和芳香烃, 平均占比分别为 66.2%、25.9% 和 7.9%. 各组分占比情况与文献[13, 17]中石油化工园区的 VOCs 研究结果较为类似, 烷烃的占比均达到了 60% 以上, 但本研究的烷烃占比 (66.2%) 低于上述文献的研究 (烷烃占比分别为 86.7% 和 86.0%), 主要原因可能为文献中的研究地点为石化园区的边界处, 而本研究距离石化园区边界约 2 km, 与站点还受到机动车尾气排放和周围生活源的影响有关. VOCs 各物种 MIR 值和观测期间的 P5、P25、P50、P75、P95 情况见表 1, 烷烃中浓度较高的主要为丙烷、乙烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷等 C2 ~ C5 物种, P50 分别为 3.44、3.08、2.99、2.75 和 1.77 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$; 烯、炔烃中主要为丙烯、乙炔、异戊二烯、

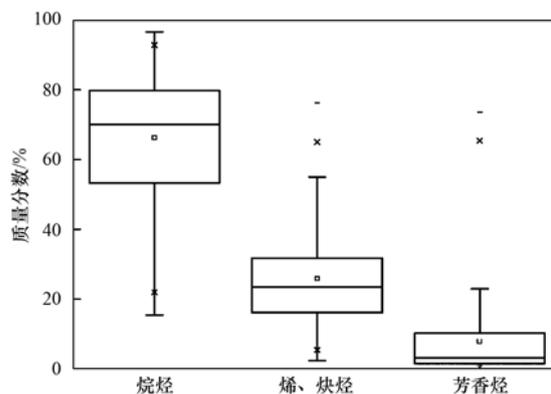


图3 观测期间 VOCs 各组分占比情况

Fig. 3 Composition characteristics of VOCs in the study area

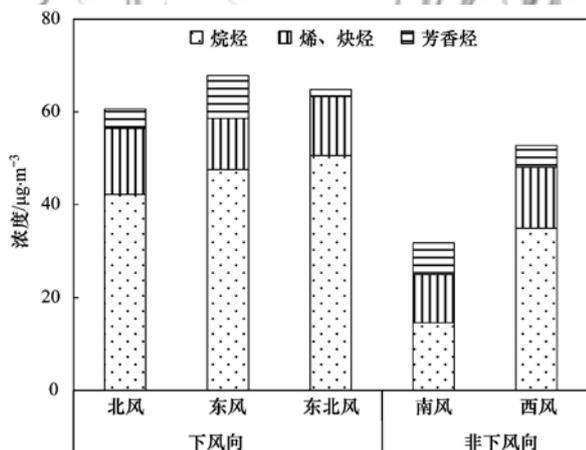
表 1 观测期间 VOCs 质量浓度情况及 MIR 值

Table 1 VOCs concentration level during the observation period and MIR

组分	物种	P5	P25	P50	P75	P95	MIR(O_3/VOC_i)
		$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$/\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$
烷烃	乙烷	1.75	2.36	3.08	4.62	13.56	0.28
	丙烷	1.73	2.35	3.44	5.18	14.87	0.49
	正丁烷	0.96	1.66	2.99	6.18	26.40	1.15
	异丁烷	0.51	0.80	1.39	2.61	6.70	1.23
	2,2-二甲基丁烷	0.06	0.10	0.15	0.25	0.74	1.17
	2,3-二甲基丁烷	0.22	0.39	0.60	0.96	1.81	0.97
	正戊烷	0.35	0.71	1.77	3.54	8.92	1.31
	异戊烷	0.55	1.06	2.75	6.32	17.62	1.45
	环戊烷	0.09	0.13	0.20	0.38	0.81	2.39
	甲基环戊烷	0.04	0.08	0.08	0.51	4.89	2.19
	2-甲基戊烷	0.08	0.12	0.19	0.25	0.45	1.50
	3-甲基戊烷	0.08	0.12	0.19	0.25	0.41	1.80
	2,3-二甲基戊烷	0.05	0.09	0.13	0.25	0.74	1.34
	2,4-二甲基戊烷	0.05	0.11	0.20	0.40	1.06	1.55
	2,2,4-三甲基戊烷	0.05	0.10	0.18	0.41	1.14	1.26
	2,3,4-三甲基戊烷	0.03	0.05	0.05	0.10	0.25	1.03
	正己烷	0.25	0.50	0.85	1.29	2.13	1.24
	环己烷	0.06	0.13	0.24	0.57	2.06	1.25
	甲基环己烷	0.04	0.04	0.09	0.10	0.19	1.70
	2-甲基己烷	0.05	0.05	0.15	0.34	0.94	1.19
	3-甲基己烷	0.20	0.59	0.85	1.22	1.73	1.61
	正辛烷	0.05	0.05	0.10	0.10	0.20	0.90
	正庚烷	0.05	0.07	0.15	0.30	0.87	1.07
	2-甲基庚烷	0.04	0.10	0.15	0.36	0.89	1.07
3-甲基庚烷	0.05	0.08	0.10	0.15	0.36	1.24	
正壬烷	0.06	0.06	0.12	0.20	0.37	0.78	
正癸烷	0.03	0.06	0.13	0.31	1.07	0.68	
十一烷	0.04	0.08	0.14	0.21	0.49	0.61	
十二烷	0.23	0.34	0.53	0.61	0.75	0.55	
烯、炔烃	乙烯	0.25	0.46	0.82	1.57	8.56	9.00
	丙烯	4.94	5.34	6.18	7.26	9.45	11.66
	1-丁烯	0.05	0.11	0.19	0.41	1.19	9.73
	顺-2-丁烯	0.15	0.20	0.25	0.44	1.23	14.24
	反-2-丁烯	0.60	0.71	0.81	1.11	2.21	15.16
	1-戊烯	0.03	0.06	0.09	0.17	0.44	7.21
	顺-2-戊烯	0.03	0.06	0.13	0.22	0.56	10.38
	反-2-戊烯	0.03	0.09	0.20	0.45	1.54	10.56
	异戊二烯	0.08	0.18	1.05	1.57	1.85	10.61
	1-己烯	0.04	0.04	0.08	0.11	0.34	5.49
	乙炔	0.38	0.73	1.10	2.21	25.65	0.95
	芳香烃	苯	0.42	0.72	1.15	2.73	29.81
甲苯		0.87	1.40	2.23	4.21	8.20	4.00
乙苯		0.05	0.10	0.14	0.24	0.59	3.04
邻二甲苯		0.43	0.66	1.04	2.02	4.96	7.64
间/对二甲苯		0.05	0.05	0.10	0.11	0.19	7.80
苯乙烯		0.28	0.49	0.90	1.59	3.60	1.73
1,2,3-三甲苯		0.05	0.05	0.11	0.13	0.32	11.97
1,2,4-三甲苯		0.03	0.05	0.11	0.19	0.45	8.87
1,3,5-三甲苯		0.04	0.05	0.11	0.12	0.19	11.76
间-乙基甲苯		0.05	0.08	0.11	0.27	3.49	7.39
对-乙基甲苯		0.03	0.08	0.11	0.16	0.48	4.44
邻-乙基甲苯		0.01	0.04	0.06	0.09	0.13	5.59
正丙苯		0.03	0.05	0.11	0.38	4.05	2.03
异丙苯		0.03	0.05	0.11	0.11	0.16	2.52
间-二乙苯		0.12	0.24	0.39	0.61	0.96	7.10
对-二乙苯	0.09	0.24	0.30	0.48	0.90	4.43	

乙烯和反-2-丁烯, P50 分别为 6.18、1.10、1.05、0.82 和 0.81 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其中丙烯的 P50 为监测的 VOCs 物种中最高; 芳香烃中浓度较高的主要为苯系物, 浓度从高到低依次为甲苯、苯、邻-二甲苯和苯乙烯, P50 分别为 2.23、1.15、1.04、0.90 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 一般石油炼化地区大气 VOCs 主要物种为乙烷、丙烷等烷烃^[13, 17], 本研究地区 VOCs 主要组分和物种特征与石油炼化地区大气 VOCs 的组成特征较为吻合, 区别于城市区域大气环境 VOCs^[18, 19], 表明该地区受石油化工和机动车尾气排放共同影响。

自动监测站位于石化园区和交通主干道西南方位, 观测期间不同风向下 VOCs 的浓度情况见图 4. 当自动监测站位于石化园区和交通主干道下风向(东风、东北风和北风)时, 受石化园区和机动车尾气排放影响, VOCs 总浓度平均值为 64.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 较非下风向平均浓度高出 52.3%. 从不同风向下各组分的浓度特征来看, 2 种类型的风向(下风向和非下风向)下, 浓度差异较大的主要是烷烃, 下风向时烷烃平均浓度为 46.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 较非下风向时平均浓度高出 89.0%; 烯、炔烃和芳香烃的平均浓度在 2 种类型的风向下没有明显差异. 表明该站点受到石化园区排放和机动车尾气影响时, 烷烃浓度大幅度升高。



未分析风向出现频次小于 10 次的情况

图 4 观测期间不同风向下 VOCs 各组分浓度情况

Fig. 4 Concentration of VOCs under different wind directions during the observation period

VOCs 各组分昼夜浓度变化见图 5, 观测期间 VOCs 总浓度呈现双峰性变化特征, 峰值分别出现在 07:00 和 11:00. 在 06:00 ~ 07:00 VOCs 总浓度开始迅速上升, 07:00 为全天中浓度最高, 峰值浓度为 127.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 08:00 ~ 10:00 呈现下降趋势,

VOCs 总浓度在 11:00 出现第二个峰值, 浓度为 70.6 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 从 VOCs 组分情况来看, 06:00 ~ 07:00 和 11:00 高浓度 VOCs 时烷烃浓度有较大升高, 烷烃平均浓度分别为 90.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 51.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 这可能主要与石化园区排放和机动车出行高峰等生产活动的加强有关。

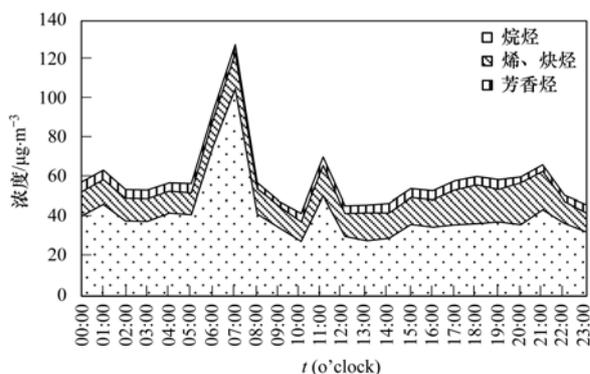


图 5 观测期间 VOCs 各组分昼夜浓度分布情况

Fig. 5 Diurnal variation of VOCs during the observation period

VOCs 同分异构体一般在环境空气中呈现出较好的相关性^[20], 本研究中的 3 对同分异构体物种对顺/反-2-丁烯、正/异戊烷和正/异丁烷的 Pearson 相关系数分别达到了 0.99 ($P < 0.01$)、0.98 ($P < 0.01$) 和 0.62 ($P < 0.01$). 同分异构体物种对较好的相关性表明了观测期间的 VOCs 数据质量较好。

苯/甲苯 (B/T) 的比值常用来判断该地区 VOCs 的来源, 通常认为 B/T 大于 0.5 (体积比) 时 VOCs 主要来源为机动车尾气和石油化工排放; B/T 小于 0.5 时 VOCs 主要来源为溶剂挥发源^[21]. 观测时间段内 B/T 的平均值为 2.19 ± 8.17 (体积比), 说明该地区大气中 VOCs 主要受石油化工和交通主干道机动车尾气排放共同影响。

乙烷/乙炔 (E/A) 比值可以用来初步判断气团的光化学龄^[22, 23], 其中乙炔为活性较大的物种, 而乙烷的活性较低; 由于乙炔的活性较大, 在光化学进程中被不断地消耗, 因此 E/A 的比值呈现上升趋势. 研究发现观测地区的 E/A 的比值平均值为 10.66 ± 55.55 (体积比), 高于一般城区大气中的比值 (0.98 ± 0.68)^[18] 和新鲜机动车尾气中的比值 (0.47 ± 0.26)^[24], 表明该地区大气 VOCs 气团经历的化学进程较长, 老化程度较高。

2.2 VOCs 的臭氧生成潜势分析

观测期间平均 OFP 为 249.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 烷烃、烯、炔烃和芳香烃的平均浓度及其对 OFP 的贡献见图 6. 从中可知, 平均浓度最低的烯、炔烃 (17.5

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 对 OFP 的贡献最高, 达到了 $153.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 对总 OFP 的贡献率为 61.4%; 贡献其次的为芳香烃, 平均浓度为 $16.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 的芳香烃对 OFP 的贡献为 $53.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 贡献率为 21.3%; 平均浓度最高的烷烃($39.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) 对 OFP 的贡献为 $43.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 贡献率为 17.3%. 表明该地区大气 VOCs 中活性较高的为烯、炔烃和芳香烃, 对总 OFP 的贡献率达到了 82.7%, 是关键的活性组分.

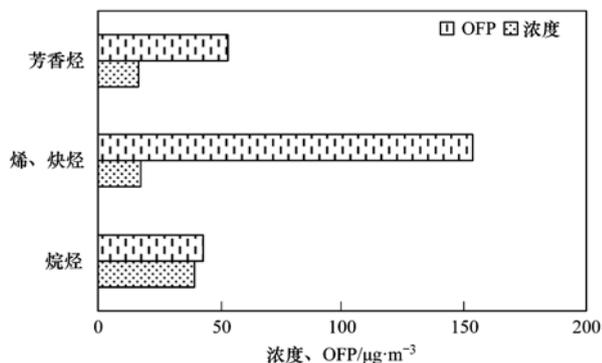


图6 观测期间 VOCs 各组分平均浓度及对 OFP 的贡献情况
Fig. 6 Concentrations of VOCs and their contribution to OFP in the atmosphere during the observation period

从各物种对 OFP 贡献大小来看, 对 OFP 贡献排名前 10 的物种中(图 7), 烯炔有 6 种, 芳香烃和烷烃分别有 2 种, 排名前 10 的物种对总 OFP 的贡献率达到了 74.4%. 其中贡献最高的为丙烯, 对 OFP 的贡献为 $76.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 其次为反-2-丁烯, 对 OFP 的贡献为 $20.1 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 乙烯、甲苯、邻二甲苯、异戊二烯、异戊烷、顺-2-丁烯、正丁烷和反-2-戊烯对 OFP 的贡献分别为 16.9 、 13.8 、 13.4 、 10.5 、 10.5 、 8.6 、 8.3 和 $7.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 由此可知, 丙烯、反-2-丁烯和乙烯是该地区大气 VOCs 中对 OFP

贡献较高的物种, 与一般城区大气中关键活性 VOCs 物种(主要为二甲苯、甲苯和乙苯等)^[18] 存在明显的差异.

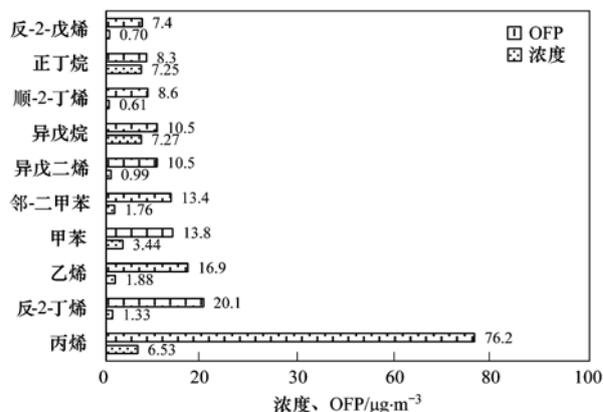


图7 观测期间对 OFP 贡献最大的前 10 种 VOCs 物种
Fig. 7 Species of VOCs with top 10 contributions to the OFP during the observation period

VOCs 总浓度与 OFP 的 Pearson 相关系数为 $0.99 (P < 0.01)$, VOCs 平均 MIR 约为 $2.90 \text{g}\cdot\text{g}^{-1}$, 与乙苯的 MIR (3.04) 较为接近, 这一结果高于 2013 年广州中心城区大气 VOCs 的平均 MIR^[25], 说明该地区空气中 VOCs 具有较强的化学反应活性, 该地区有潜在 O_3 污染可能性, 对于该地区的 O_3 状况还需要进一步研究.

2.3 健康风险评价

本研究所涉及的 57 种 VOCs 物种中, 己烷、苯、甲苯、乙苯、邻二甲苯和间/对二甲苯属于 U. S. EPA 公布的有毒有害空气污染物. 对上述污染物的 HQ 进行研究(图 8), HQ 最高的为苯($2.19\text{E} - 01$), 最低的为乙苯($2.01\text{E} - 04$), HI 为 $2.40\text{E} - 01$, 与国内外其他地区相比处于中等水平, 一般认

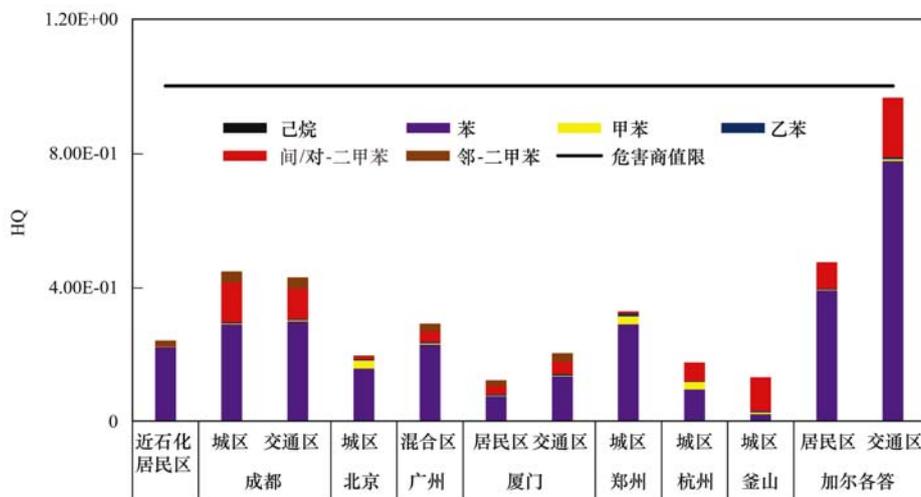


图8 本研究及国内外其他地区健康风险研究情况

Fig. 8 Health risk research in this study area and other areas

为危害商值在 1 以下时, 污染物不会对人体健康造成明显伤害. 由此可知, 本研究区域内己烷、苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯和间/对-二甲苯的健康风险较小. 现有的评价方法为美国环境保护署在 2009 年更新的针对特定场所吸入途径污染物的健康风险评价方法.

图 8 所列举的各地区的 HI 在 $1.22E-01 \sim 9.65E-01$ 之间^[26~33], 非致癌风险均不会对人体健康造成明显伤害. 印度加尔各答地区的 HI 高于其他地区, 居民区和交通区的 HI 分别为 $4.74E-01$ 和 $9.65E-01$; HI 较低的为厦门居民区, HI 为 $1.22E-01$. 除韩国釜山 HQ 最高的为间/对-二甲苯外, 其他地区 HQ 最高的均为苯.

3 结论

(1) 观测期间 VOCs 中主要组分为烷烃, 平均占比达到了 66.2%, 主要烷烃为丙烷、乙烷、正丁烷、异戊烷和正戊烷等 C2~C5 物种. 本研究地区 VOCs 主要组分和物种特征与石油炼化地区大气 VOCs 的组成特征较为吻合, 表明该地区受石油化工和机动车尾气排放共同影响. 当自动监测站位于石化园区下风向时, VOCs 总浓度平均值较非下风向时高出 52.3%, 主要升高组分为烷烃, 较非下风向时烷烃平均浓度高出 89.0%. 表明石化园区周边大气 VOCs 的主要组分为烷烃, 区别于城市区域大气环境 VOCs.

(2) 该地区 VOCs 的平均 OFP 为 $249.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 烯/炔烃、芳香烃和烷烃对总 OFP 的贡献率分别为 61.4%、21.3% 和 17.3%, 其中丙烯、反-2-丁烯、乙烯是关键活性组分. VOCs 平均 MIR 约为 $2.90 \text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 说明该地区空气中 VOCs 具有较强的化学反应活性.

(3) 近石化园区环境空气中己烷、苯、甲苯、乙苯、邻-二甲苯和间/对-二甲苯的 HQ 范围为 $2.01E-04 \sim 2.19E-01$, HI 低于危害商值, 表明该地区环境空气 VOCs 健康风险较小.

致谢: 感谢上海市环境监测中心原副总工程师魏海萍教授对文章提出的宝贵修改建议.

参考文献:

- [1] 郝吉明, 李欢欢, 沈海滨. 中国大气污染防治进程与展望[J]. 世界环境, 2014, (1): 58-61.
Hao J M, Li H H, Shen H B. Process and prospects of China air pollution control[J]. World Environment, 2014, (1): 58-61.
- [2] Cocker III D R, Mader B T, Kalberer M, et al. The effect of water on gas-particle partitioning of secondary organic aerosol: II. *m*-xylene and 1, 3, 5-trimethylbenzene photooxidation systems[J]. Atmospheric Environment, 2001, 35(35): 6073-6085.
- [3] Liu W T, Hsieh H C, Chen S P, et al. Diagnosis of air quality through observation and modeling of volatile organic compounds (VOCs) as pollution tracers[J]. Atmospheric Environment, 2012, 55: 56-63.
- [4] Liu T, Li T T, Zhang Y H, et al. The short-term effect of ambient ozone on mortality is modified by temperature in Guangzhou, China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 76: 59-67.
- [5] Chen P F, Quan J N, Zhang Q, et al. Measurements of vertical and horizontal distributions of ozone over Beijing from 2007 to 2010[J]. Atmospheric Environment, 2013, 74: 37-44.
- [6] Huang J P, Zhou C H, Lee X, et al. The effects of rapid urbanization on the levels in tropospheric nitrogen dioxide and ozone over East China[J]. Atmospheric Environment, 2013, 77: 558-567.
- [7] 2016年《中国环境状况公报》(摘录)[J]. 环境保护, 2017, 45(11): 35-47.
- [8] 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.
- [9] Smith M T, Zhang L P. Biomarkers of leukemia risk: benzene as a model[J]. Environmental Health Perspectives, 1998, 106(S4): 937-946.
- [10] Sponring A, Filipiak W, Ager C, et al. Analysis of volatile organic compounds (VOCs) in the headspace of NCI-H1666 lung cancer cells[J]. Cancer Biomarkers, 2010, 7(3): 153-161.
- [11] 高松, 崔虎雄, 伏晴艳, 等. 某化工区典型高污染过程 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4094-4102.
Gao S, Cui H X, Fu Q Y, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs of high pollution process at chemical industrial area in winter of China[J]. Environmental Science, 2016, 37(11): 4094-4102.
- [12] 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.
- [13] 毛瑶, 李刚, 胡天鹏, 等. 某典型石油化工园区冬季大气中 VOCs 污染特征[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 525-532.
Mao Y, Li G, Hu T P, et al. Characteristics of VOCs pollution in the winter atmosphere of a typical petrochemical industry park[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 525-532.
- [14] 武蕾丹, 王秀艳, 杨文, 等. 某工业园区 VOCs 臭氧生成潜势及优控物种[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 511-516.
Wu L D, Wang X Y, Yang W, et al. Ozone formation potential and priority species of VOCs in an industrial park[J]. Environmental Science, 2018, 39(2): 511-516.
- [15] Carter W P L. Development of the SAPRC-07 chemical mechanism[J]. Atmospheric Environment, 2010, 44(40): 5324-5335.
- [16] 付琳琳. 大气挥发性有机物(VOCs)人为源排放特征研究[D]. 北京: 北京大学, 2005.
- [17] 胡天鹏, 李刚, 毛瑶, 等. 某石油化工园区秋季 VOCs 污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2018, 39(2): 517-524.
Hu T P, Li G, Mao Y, et al. Characteristics and source apportionment of VOCs of a petrochemical industrial park during autumn in China[J]. Environmental Science, 2018, 39(2):

- 517-524.
- [18] 陈长虹, 苏雷燕, 王红丽, 等. 上海市城区 VOCs 的年变化特征及其关键活性组分[J]. 环境科学学报, 2012, **32**(2): 367-376.
Chen C H, Su L Y, Wang H L, *et al.* Variation and key reactive species of ambient VOCs in the urban area of Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 367-376.
- [19] 蔡长杰, 耿福海, 俞琼, 等. 上海中心城区夏季挥发性有机物(VOCs)的源解析[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(5): 926-934.
Cai C J, Geng F H, Yu Q, *et al.* Source apportionment of VOCs at city centre of Shanghai in summer [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, **30**(5): 926-934.
- [20] 王鸣. 基于外场观测的挥发性有机物(VOCs)排放清单验证[D]. 北京: 北京大学, 2013.
- [21] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities[J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [22] Duffy B L, Nelson P F. Non-methane exhaust composition in the Sydney harbour tunnel: a focus on benzene and 1,3-butadiene [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(15): 2759-2768.
- [23] Touaty M, Bonsang B. Hydrocarbon emissions in a highway tunnel in the Paris area [J]. *Atmospheric Environment*, 2000, **34**(6): 985-996.
- [24] 王伯光, 邵敏, 张远航, 等. 机动车排放中挥发性有机污染物的组成及其特征研究[J]. 环境科学研究, 2006, **19**(6): 75-80.
Wang B G, Shao M, Zhang Y H, *et al.* A study of volatile organic compounds and its emission factors from city vehicles [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2006, **19**(6): 75-80.
- [25] 李雷, 李红, 王学中, 等. 广州市中心城区环境空气中挥发性有机物的污染特征与健康风险评价[J]. 环境科学, 2013, **34**(12): 4558-4564.
Li L, Li H, Wang X Z, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in the downtown area of Guangzhou, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(12): 4558-4564.
- [26] 李友平, 唐娅, 范忠雨, 等. 成都市大气环境 VOCs 污染特征及其健康风险评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(2): 576-584.
Li Y P, Tang Y, Fan Z Y, *et al.* Pollution characteristics and health risk assessment of atmospheric VOCs in Chengdu [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(2): 576-584.
- [27] 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.
- [28] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds[J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.
- [29] 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价[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.
- [30] 南淑清, 张霖琳, 张丹, 等. 郑州市环境空气中 VOCs 的污染特征及健康风险评价[J]. 生态环境学报, 2014, **23**(9): 1438-1444.
Nan S Q, Zhang L L, Zhang D, *et al.* Pollution condition and health risk assessment of VOCs in ambient air in Zhengzhou [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, **23**(9): 1438-1444.
- [31] 张平. 杭州市空气中苯系物的污染特征、来源及健康风险[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- [32] Choi E, Choi K, Yi S M. Non-methane hydrocarbons in the atmosphere of a Metropolitan City and a background site in South Korea: sources and health risk potentials [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(40): 7563-7573.
- [33] Dutta C, Som D, Chatterjee A, *et al.* Mixing ratios of carbonyls and BTEX in ambient air of Kolkata, India and their associated health risk [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, **148**(1-4): 97-107.

CONTENTS

Emissions Inventory and Characteristics of NO _x from Cement Industry	JIANG Chun-lai, SONG Xiao-hui, ZHONG Yue-zhi, <i>et al.</i> (4841)
Emissions Inventory of Smoldering Chinese Kangs and Their Contribution to PM _{2.5} Pollution in Lanzhou City	GUO Wen-kai, LIU Xiao, ZHU Yu-fan, <i>et al.</i> (4849)
Size Distributions of Water-soluble Components in Ambient Aerosol of Beijing	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, SU Jie, <i>et al.</i> (4858)
Size Distribution Characteristics of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Autumn in Zhengzhou	ZHAO Qing-yan, JIANG Nan, YAN Qi-she, <i>et al.</i> (4866)
Diurnal Variation of Dicarboxylic Acids and Related SOA in PM _{2.5} from Heze City in Winter	MENG Jing-jing, LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, <i>et al.</i> (4876)
Chemical Source Profiles of PM Emitted from the Main Processes of the Iron and Steel Industry in China	WEN Jie, YANG Jia-mei, LI Pu, <i>et al.</i> (4885)
VOCs Emission Inventory of Anthropogenic Sources in Jiaxing	HAO Huan, WAN Mei, RONG Yu, <i>et al.</i> (4892)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of VOCs in Areas Surrounding a Petrochemical Park in Shanghai	SHENG Tao, CHEN Xiao-jia, GAO Song, <i>et al.</i> (4901)
Characteristics of Bioaerosols Emitted from WWTP with SBR Treatment Process	YANG Kai-xiong, HOU Hong-xun, WANG Ying-zhe, <i>et al.</i> (4909)
Response of Chromophoric Dissolved Organic Matter Composition to Different Hydrological Scenarios in Large Eutrophic Lake Taihu	SHI Yu, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (4915)
Spatial and Temporal Dynamics of Floating Algal Blooms in Lake Chaohu in 2016 and Their Environmental Drivers	HU Min-qi, ZHANG Yu-chao, MA Rong-hua, <i>et al.</i> (4925)
Dynamic Changes of Nitrogen-Transforming and Phosphorus-Accumulating Bacteria Along with the Formation of Cyanobacterial Blooms	PENG Yu-ke, LU Jun-ling, CHEN Hui-ping, <i>et al.</i> (4938)
Impact of Mainstream Backwater on the Water Environment of the Tributaries of the Three Gorges Reservoir at Low Water Level	CHEN Zi-juan, SONG Xian-fang, ZHANG Ying-hua, <i>et al.</i> (4946)
Effect of Silver Nanoparticles on Denitrification and Functional Gene Abundances of Sediment in Dagu River Estuary and Northwest of Jiaozhou Bay	BAI Jie, TIAN Yan-zhao, SUN Peng-fei, <i>et al.</i> (4956)
Spatial Difference and Causes Analysis of the δ ¹⁵ N of Suspended Particulate Matter in the Lancang River Basin	TANG Yong-chun, XU Piao, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (4964)
Vertical Spatial Distribution of Denitrification Intensity in the Vadose Zone of Typical Sections of Chaobai River Alluvial Fan	GENG Hong-zhi, HUAN Huan, LI Ming-xiao, <i>et al.</i> (4972)
Major Ionic Features and Possible Controls in the Groundwater in the Hamatong River Basin	ZHANG Tao, HE Jin, LI Jing-jie, <i>et al.</i> (4981)
Concentration Variations and Flux Estimation of Dissolved Carbon in Karst Spring of a Typical Karst Area	XIONG Bai-lian, ZHANG Jin-zhong, PENG Tao, <i>et al.</i> (4991)
Effect of Different Multi-pond Network Landscape Structures on Nitrogen Retention Over Agricultural Watersheds	LI Yu-feng, LIU Hong-yu, LIU Jun-zhi, <i>et al.</i> (4999)
Characteristics of Phthalic Acid Esters Pollution in Urban Surface Runoff in Shanghai, China	LIU Yu-tong, LI Tian, PENG Hang-yu (5007)
Impacts of Vegetation on Hydrological Performances of Green Roofs Under Different Rainfall Conditions	GE De, ZHANG Shou-hong (5015)
Adsorption of Phosphate from Aqueous Solutions on Sediments Amended with Magnetite-Modified Zeolite	WANG Dan-he, ZHANG Hong-hua, LIN Jian-wei, <i>et al.</i> (5024)
Reduction and Oxidation of Mercury by Dissolved Organic Matter Under Anaerobic Conditions	BIAN Yong-rong, GU Bao-hua, ZHU Bo, <i>et al.</i> (5036)
Photo-assisted Degradation of Sulfamethazine by Ferrocene-catalyzed Heterogeneous Fenton-like System	ZHANG Biao-jun, ZHAO Yao-yun-chuan, FANG Qi, <i>et al.</i> (5043)
N ₂ O Production Pathways in Partial Nitrification Based on Isotope Technology	YANG Yu-bing, YANG Qing, LI Yang, <i>et al.</i> (5051)
Effect of Substrate Ratio on Removal of Nitrogen and Carbon Using Anaerobic Ammonium Oxidation and Denitrification	AN Fang-jiao, HUANG Jian-ming, HUANG Li, <i>et al.</i> (5058)
Simultaneous Nitrogen and Phosphorus Removal Characteristics of An Anaerobic/Aerobic Operated SPNDPR System Treating Low C/N Urban Sewage	YU De-shuang, YUAN Meng-fei, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5065)
Lab-scale SNAD Process in Wastewater Treatment Plant	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (5074)
Effect of Salinity on Nitrogen Removal Performance of a Pilot-scale Anaerobic Ammonia Oxidation Process and Its Recovery Kinetics	TANG Jia-jia, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5081)
Suppression and Recovery Characteristics of Pilot-scale ANAMMOX-ASBR System Treating Desulfurization and Denitrification Tailings from Thermal Power Plant	ZHANG Jun, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (5090)
Impact of C/N Ratio on Nitrogen Removal Performance and N ₂ O Release of Granular Sludge CANON Reactor	FU Kun-ming, JIANG Shan, SU Xue-ying, <i>et al.</i> (5101)
Impacts of Sludge Characteristics on Anaerobic Digestion with Microwave Pretreatment and Archaeal Community Structure Analysis	FANG Ping, TANG An-ping, FU Xing-min, <i>et al.</i> (5108)
Determination of Heavy Metal Baseline Values and Analysis of Its Accumulation Characteristics in Agricultural Land in Chongqing	WU Fu-lin, CHEN Li, YI Ting-hui, <i>et al.</i> (5116)
Characteristics of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Soil Samples of Hanjiang River Basin, Southeast China	LIU Jia, DING Yang, QI Shi-hua, <i>et al.</i> (5127)
Occurrence and Distribution of the Organophosphate Esters in Soils of Mixed-land Use Area in Chongqing City	YANG Zhi-hao, HE Ming-jing, YANG Ting, <i>et al.</i> (5135)
Degradation of α-HCH in Soil Washing Solutions with nZVI and CaO ₂	YAO Jing-bo, ZHOU Jie, WANG Ming-xin, <i>et al.</i> (5142)
Microbial Communities in Soils of Qingshuitang Industrial District in Zhuzhou	SHEN Li, LI Zhen-hua, ZENG Wei-min, <i>et al.</i> (5151)
Effect of Biochar Addition on the Diversity and Interaction of Rhizosphere Fungi in Manure-fertilized Soil	WANG Dan-dan, YANG Ze-ping, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (5163)
Effects of Returning Nitrogen by Biochar Loading on Paddy Growth, Root Morphology, and Nitrogen Use Efficiency	YU Ying-liang, WANG Yue-man, HOU Peng-fu, <i>et al.</i> (5170)
Effect of Particulate Organic Matter on Cadmium Uptake and Transport in Rice	GUO Yi-xuan, ZHAO Xiu-lan (5180)
Effect of Fertilizers on Cadmium Uptake and Accumulation by Sunflowers	CAO Liu, YANG Jun-xing, GUO Jin-jun, <i>et al.</i> (5189)
Accumulation of Heavy Metals in Different Rice Varieties	LIN Xiao-bing, ZHOU Li-jun, WANG Hui-ming, <i>et al.</i> (5198)
Intercropping <i>Arundo donax</i> with Woody Plants to Remediate Heavy Metal-Contaminated Soil	ZENG Peng, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (5207)
Daily Variation of CO ₂ Flux at Water-Air Interface and Analysis of Its Affecting Factors in a Typical River of the Three Gorges Reservoir	LUO Jia-chen, LI Si-yue (5217)
CH ₄ Emissions Characteristics and Its Influencing Factors in an Eutrophic Lake	SHANG Dong-yao, XIAO Qi-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (5227)
Short-term Effects of Different Grazing Intensities on Greenhouse Gas Fluxes in Semi-arid Grassland	SHEN Yan, SUN Jian-ping, LUO Yu-kun, <i>et al.</i> (5237)
Effects of Plastic Film Mulching Patterns and Irrigation on Yield of Summer Maize and Greenhouse Gas Emissions Intensity of Field	LUO Xiao-qi, ZHANG A-feng, CHEN Hai-xin, <i>et al.</i> (5246)
Effects of Elevated Ozone on Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) Emission: A Review	FENG Zhao-zhong, YUAN Xiang-yang (5257)
Research Progress on the Sources of Inorganic Nitrogen Pollution in Groundwater and Identification Methods	DU Xin-qiang, FANG Min, YE Xue-yan (5266)
Mechanisms and Influencing Factors of Antibiotic Removal in Sewage Biological Treatment	ZHANG Xiang-yu, LI Ru-ying, JI Min (5276)