

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.5
第40卷 第5期

目次

2016年10~11月期间北京市大气颗粒物污染特征与传输规律	张晗宇,程水源,姚森,王晓琦,张俊峰(1999)
餐饮排放有机颗粒物的质量浓度、化学组成及排放因子特征	王红丽,景盛翱,乔利平(2010)
泰山顶(1534 m)夏季气溶胶粒径分布特征	沈利娟,王红磊,银燕,陈魁,陈景华,施双双(2019)
郑州-新乡冬季PM _{2.5} 中元素浓度特征及其源分析	闫广轩,张朴真,黄海燕,高雅,张靖雯,宋鑫,张佳羽,李怀刚,曹治国,姜继韶,樊静,王跃思,金彩霞(2027)
我国PM _{2.5} 浓度分阶段改善目标情景分析	贺晋瑜,燕丽,王彦超,雷宇,汪旭颖(2036)
安阳市典型工业源PM _{2.5} 排放特征及减排潜力估算	杜小申,燕丽,贺晋瑜,汪旭颖,王克,张瑞芹(2043)
郑州市典型工业炉窑细颗粒物排放特征及清单	赵庆炎,韩士杰,张轶舜,杨留明,张瑞芹,燕启社(2052)
2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性	乔月珍,陈凤,赵秋月,刘倩(2062)
兰州市化石燃料燃烧源排放VOCs的臭氧及二次有机气溶胶生成潜势	刘镇,朱玉凡,郭文凯,刘晓,陈强(2069)
12种常见落叶果树BVOCs排放清单和排放特征	李双江,袁相洋,李琦,冯兆忠(2078)
我国典型陆地生态系统水化学离子特征及空间分布	黄丽,张心昱,袁国富,朱治林,唐新斋,孙晓敏(2086)
我国典型区域地表水环境中抗生素污染现状及其生态风险评价	刘昔,王智,王学雷,李珍,杨超,厉恩华,位慧敏(2094)
我国七大流域水体多环芳烃的分布特征及风险评价	范博,王晓南,黄云,李霖,高祥云,李雯雯,刘征涛(2101)
大连海域入海污染源中PFASs的赋存、输入通量和季节特征	陈虹,韩建波,张灿,程嘉熠(2115)
干旱内陆河流域降水稳定同位素的时空特征及环境意义	袁瑞丰,李宗省,蔡玉琴,邹海明(2122)
柳林泉域岩溶地下水区域演化规律及控制因素	黄奇波,覃小群,刘朋雨,程瑞瑞,李腾芳(2132)
崇左响水地区岩溶地下水主要离子特征及控制因素	周巾枚,蒋忠诚,徐光黎,覃小群,黄奇波,张连凯(2143)
三峡水库水体溶解磷与颗粒磷的输移转化特征分析	秦延文,韩超南,郑丙辉,马迎群,杨晨晨,刘志超,张雷,赵艳民(2152)
三峡水库蓄水至175 m后干流沉积物磷蓄积特征及释放潜力	黎睿,潘婵娟,汤显强,肖尚斌,李青云,杨文俊(2160)
不同水期洞庭湖水体中磷分布特征及影响因素	李莹杰,王丽婧,李虹,欧阳美凤(2170)
巢湖十五里河沉积物磷平衡浓度对外源磷的响应及释放风险	李如忠,鲍琴,戴源(2178)
闽江上游溪流沉积物有机磷空间分布及其环境意义分析	徐健,袁旭音,叶宏萌,张晓辉,周慧华,韩年(2186)
生态工程综合治理系统对农业小流域氮磷污染的治理效应	蒋倩文,刘锋,彭英湘,王华,姚燃,李红芳,罗沛,刘新亮,吴金水(2194)
太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估	张杰,郭西亚,曾野,邓建才(2202)
三峡水库支流汝溪河口水体汞的时空变化特征	马尉斌,陈秋禹,尹德良,孙涛,王永敏,王定勇(2211)
多功能型城市人工湿地水体汞分布特征及其量变分析	刘伟豪,王永敏,樊宇飞,吕东威,王定勇(2219)
不同类型城市人工湿地水体汞的分布特征	樊宇飞,刘伟豪,孙涛,苑萌,吕东威,李先源,王永敏,王定勇(2226)
微塑料对河口沉积物抗生素抗性基因的影响	黄福义,杨凯,张子兴,苏建强,朱永官,张娟(2234)
上海市郊道路地表径流多环芳烃污染特征对比及源解析	吴杰,熊丽君,吴健,沙晨燕,唐浩,林匡飞,李大雁,沈城(2240)
异龙湖不同湖区浮游植物群落特征及其与环境因子的关系	王振方,张玮,杨丽,徐玉萍,赵凤斌,王丽卿(2249)
水库热分层期藻类水华与温跃层厌氧成因分析	刘雪晴,黄廷林,李楠,杨尚业,李扬,徐进,王涵玥(2258)
绿狐尾藻对铜绿微囊藻和羊角月牙藻的抑藻效应	毕业亮,吴诗敏,周思宁,吴尚华,宿辉,白志辉,徐圣君(2265)
紫外/亚硫酸钠还原降解三氯乙酰胺的效能	伏芝萱,郭迎庆,楚文海(2271)
UV降解水溶液中拉法辛的影响因素及机制	吕娟,许志伟,王言(2278)
铝代水铁矿协同吸附砷的机制	黄博,郭朝晖,肖细元,彭驰,朱惠文,史磊,阳安迪(2287)
新型材料磁性氧化铁的除氟效能	方文侃,李小娣,方菁,吴德意(2295)
羧基改性阴极对微生物电合成系统产乙酸性能的影响机制	祁家欣,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(2302)
基于分区供氧与溶解氧调控的低C/N比污水短程硝化反硝化	吴春雷,荣懿,刘晓鹏,史会欣,章武首,金鹏康,马文伟(2310)
不同COD浓度下低基质厌氧氨氧化的启动特征	马艳红,赵智超,安芳娇,黄利,师晓娟,慕浩,陈永志(2317)
15℃SBBR短程硝化快速启动和稳定运行性能	孙艺齐,卞伟,李军,赵青,王文啸,梁东博,吴耀东(2326)
长期低聚磷条件对AO-SBR系统Accumulibacter代谢特性的影响	王少坡,李柱,赵乐丹,于静洁,赵明,郑胜达,孙力平(2333)
厌氧氨氧化颗粒污泥EPS及其对污泥表面特性的影响	杨明明,刘子涵,周杨,祁菁,赵凡,郭劲松,方芳(2341)
HN-AD菌生物强化接触氧化工艺处理猪场沼液	刘向阳,张千,吴恒,李宸,唐健泓,封丽,肖芃颖,赵天涛(2349)
温度对自养型同步脱氮工艺处理猪场废水厌氧消化液性能及微生物群落的影响	黄方玉,邓良伟,杨红男,杨含,肖友乾,王兰(2357)
城市污水处理系统真核微生物群落特性与地域性差异	秦文韬,张冰,孙晨翔,陈湛,文湘华(2368)
三江平原湿地开垦对土壤微生物群落结构的影响	王娜,高婕,魏静,刘颖,庄绪亮,庄国强(2375)
亚高山湖群中真菌群落的分布格局和多样性维持机制	刘晋仙,李鑫,罗正明,王雪,暴家兵,柴宝峰(2382)
生物质炭对双季稻田土壤反硝化功能微生物的影响	刘杰云,邱虎森,王聪,沈健林,吴金水(2394)
地膜覆盖和施肥对菜地CH ₄ 排放的影响	倪雪,江长胜,陈世杰,李晓茜,石孝均,郝庆菊(2404)
亏缺灌溉对冬小麦农田温室气体排放的影响	王晓云,蔡焕杰,李亮,徐家屯,陈慧(2413)
不同施肥模式对热区晚稻田CH ₄ 和N ₂ O排放的影响	田伟,伍延正,汤水荣,胡玉麟,赖倩倩,文冬妮,孟磊,吴川德(2426)
周期性变温对紫色土有机碳矿化的影响	曾蔓蔓,慈恩,樊晶晶,李江文,翁昊璐,李松(2435)
广西高镉异常区水田土壤Cd含量特征及生态风险评价	宋波,王佛鹏,周浪,吴勇,庞瑞,陈同斌(2443)
超富集植物藿香蓟(Ageratum conyzoides L.)对镉污染农田的修复潜力	张云霞,宋波,宾娟,周子阳,陈记玲,陈同斌(2453)
种植油菜麦评价多环芳烃污染土壤的农用风险	焦海华,郭佳佳,张婧旻,张晓霞,茹文明,白志辉(2460)
土壤重金属累积对土地利用与景观格局的响应	舒心,李艳,李锋,冯靖仪,沈嘉瑜,史舟(2471)
某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价	吕占禄,张金良,陆少游,邹天森,刘凯,张晗,谷亚亚(2483)
《环境科学》征订启事(2018)	《环境科学》征稿简则(2042)
信息(2114, 2348, 2393)	

2015年南京市城区挥发性有机物组成特征及大气反应活性

乔月珍^{1,2}, 陈凤¹, 赵秋月¹, 刘倩^{1*}

(1. 江苏省环境科学研究院, 南京 210036; 2. 江苏省环境工程重点实验室, 南京 210019)

摘要: 采用 GC-FID 自动在线监测系统对南京市 2015 年环境大气中 56 种 VOCs 开展了为期 1a 的连续观测。结果表明, 南京市城区大气 VOCs 小时平均体积分数为 $(17.49 \pm 11.35) \times 10^{-9}$, 其中 4 月最高 (22.21×10^{-9}), 7 月最低 (12.39×10^{-9}), 日均体积分数变化特征不明显。烷烃、烯烃、芳香烃和乙炔占比分别为 56.51%、11.06%、24.62% 和 7.81%, 丙烷 (15.26%)、乙烷 (14.14%)、乙炔 (7.81%)、甲苯 (6.97%)、正丁烷 (6.23%)、乙烯 (5.23%)、异丁烷 (4.34%)、丙烯 (4.13%)、异戊烷 (4.12%) 和间/对-二甲苯 (4.06%) 是含量最丰富的 VOCs 物种。T/B (甲苯/苯) 均值为 2.02, 表明南京市城区大气 VOCs 主要受机动车尤其是汽油车排放的影响。E/E (乙烷/乙炔) 均值为 2.24, 表明观测站点区域大气老化程度较严重。利用 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率 ($L^{\cdot\text{OH}}$) 和臭氧生成潜势 (OFP) 评估了大气 VOCs 的反应活性。南京市城区大气 VOCs 冬春季大气反应活性较夏秋季强。芳香烃和烯烃的活性最高, 对 $L^{\cdot\text{OH}}$ 和 OFP 的贡献依次为 46.96% 和 41.58%、33.73% 和 39.86%, 丙烯、乙烯和二甲苯等苯系物是活性最高的 VOCs 物种。

关键词: 挥发性有机物; 体积分数; 化学反应活性; $\cdot\text{OH}$ 消耗速率; 臭氧生成潜势 (OFP)

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)05-2062-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201808249

Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China

QIAO Yue-zhen^{1,2}, CHEN Feng¹, ZHAO Qiu-yue¹, LIU Qian^{1*}

(1. Jiangsu Province Academy of Environmental Science, Nanjing 210036, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Engineering, Nanjing 210019, China)

Abstract: Online gas chromatography with flame ionization detection (GC-FID) systems were employed to observe 56 species of volatile organic compounds (VOCs) in the environmental atmosphere in Nanjing in 2015. The results showed that the annual volume fraction of VOCs was $(17.49 \pm 11.35) \times 10^{-9}$. The highest concentration of VOCs was in April (22.21×10^{-9}), and the lowest in July (12.39×10^{-9}). Diurnal values of VOCs concentration had no obvious variations. Alkanes, alkenes, aromatics, and acetylene accounted for 56.51%, 11.06%, 24.62%, and 7.81%, respectively. Propane (15.26%), ethane (14.14%), acetylene (7.81%), toluene (6.97%), n-butane (6.23%), ethylene (5.23%), isobutane (4.34%), propylene (4.13%), isoprene (4.12%), and m/p-xylene (4.06%) were the most abundant VOCs species. The average ratio of toluene/benzene (T/B) was 2.02, indicating that the atmospheric VOCs were mainly affected by emissions of motor vehicles, especially gasoline vehicles. The average ratio of ethane/ethyne (E/E) was 2.24, showing that the plume had aged. The hydroxyl radical ($\cdot\text{OH}$) loss rate ($L^{\cdot\text{OH}}$) and ozone formation potential (OFP) were applied to assess the chemical reactivity of VOCs. The atmospheric activity of VOCs was higher in the winter and spring than in the summer and autumn. Aromatics and alkenes were the most important contributors to $L^{\cdot\text{OH}}$ and OFP. Their contributions to $L^{\cdot\text{OH}}$ and OFP were 46.96% and 41.58%, and 33.73% and 39.86%, respectively. Propylene, ethylene, and xylene were the most active species.

Key words: volatile organic compounds (VOCs); volume fraction; chemical reactivity; $\cdot\text{OH}$ loss rate; ozone formation potential

挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是对流层臭氧 (O_3) 和二次有机气溶胶 (SOA) 等二次污染物的关键前体物, 是参与光化学污染的重要物质^[1], 其活性物种光化学反应的二次产物 (semi-volatile organic compounds, SVOCs) 是颗粒物的重要成分^[2, 3]. 近年来, 随着城市化和工业化的迅速发展, 以 O_3 和灰霾污染为主的大气复合污染问题日益严重^[4].

VOCs 对 O_3 生成的贡献与 VOCs 物种组成、浓度水平及其化学反应活性有关. 国内学者在珠三角、京津冀和长三角等地区开展了大量研究. 珠三角地区对大气 VOCs 的研究相对较早, 有研究发现

本地污染排放和外源输送是珠三角地区 VOCs 的重要来源^[5~8]. 广州城区 O_3 主要受 VOCs 控制, 机动车是广州市 VOCs 的主要排放源, 芳香烃的臭氧生成潜势 (ozone formation potential, OFP) 最高, 甲苯、二甲苯、乙苯、1,2,4-三甲苯和 1,3,5-三甲苯的 OFP 贡献率达 44%. 文献^[9~11] 对上海市环境大

收稿日期: 2018-08-30; 修订日期: 2018-11-15

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0201502)

作者简介: 乔月珍 (1987~), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为大气化学, E-mail: 13951604625@163.com

* 通信作者, E-mail: antmayiliu@163.com

气 VOCs 做了系列研究, 其结果表明烯烃和芳香烃是大气 VOCs 中对 $\cdot\text{OH}$ 消耗速率($L^{\cdot\text{OH}}$)和 OFP 贡献最大的关键活性组分, C7 ~ C10 的芳香烃、C3 ~ C4 的烯烃、异戊二烯以及乙醛是上海大气 OFP 贡献最大的 VOCs 类物质. 人为排放的二甲苯类和 C3 ~ C4 烯烃类是最重要的 VOCs 物种, 但 VOCs 的化学反应活性由于活性 VOCs 物种的反应消耗使得观测计算结果偏低约 60%. 此外, Liu 等^[12]和印红玲等^[13]分别利用在线监测手段和离线罐采样对天津市和成都市大气环境中的 VOCs 开展了连续观测, 与珠三角和上海市大气 VOCs 组成特征类似, 烯烃和芳香烃是影响天津市和成都市 OFP 最关键的活性物种.

长三角地区开展了相当多的 VOCs 研究, 但多数围绕上海市展开, 对南京市大气 VOCs 的污染特征研究较少. 文献[14 ~ 16]等利用在线观测数据对南京市大气 VOCs 开展了研究分析, 前者研究站点位于南京市北郊, 后者研究站点虽位于南京市城区但观测时间较短, 均不能代表南京市城区大气 VOCs 的污染特征. 本研究于 2015 年利用在线高分辨率设备对南京市城区大气 VOCs 开展了为期一年的观测, 分析了 VOCs 的浓度水平和物种组成特征, 估算了 VOCs 的 $L^{\cdot\text{OH}}$ 和 OFP, 识别了活性 VOCs 物种, 以期对南京市大气复合污染防治提供科学支撑.

1 采样与分析

1.1 观测站点

观测站点(32°3'N, 118°44'E)位于江苏省环境科学研究院环科楼 21 楼楼顶, 距地面约 60 m, 地处南京市鼓楼区商业和居民混合区, 2 km 范围内汇集了 3 家大型购物中心, 5 km 范围内分布了众多社区; 紧邻江东北路快速路, 交通密度较高, 机动车排放相对较密集; 距离东北方向的城北工业区(石油化工、钢铁和化工企业集中区)距离约 25 km. 观测结果消除了近地面排放的影响, 可代表南京市城区大气 VOCs 经扩散和充分混合后的污染特征. 观测时段为 2015 年 1 月 1 日 ~ 12 月 31 日, 2 月由于设备故障数据缺失, 观测期间共计得到 6 904 组有效数据.

1.2 仪器与分析方法

观测站点 VOCs 采用美国 PE 公司生产的气相色谱氢火焰离子(gas-chromatography-flame ionization detector, GC-FID)监测系统进行实时观测, 时间分辨率为 1 h. 该监测系统由热脱附采样仪和气相色谱分析仪组成, 气相色谱分析仪包括两套独立的分析仪, 分别测量 C2 ~ C6 的低碳 VOCs 物种和 C6 ~

C12 的高碳 VOCs 物种. 电子制冷的具体条件如下: 样品采集流量: 15 mL $\cdot$ min⁻¹; 冷阱富集温度: -30℃; 冷阱解吸温度: 325℃; 解吸时间: 6 min; 四通阀温度: 180℃; 传输线温度: 220℃. 气相色谱的条件为载气: 高纯氦气; 进口分流: 0 mL $\cdot$ min⁻¹; 出口分流: 4 mL $\cdot$ min⁻¹; 色谱柱压力: 38.5 psi; Dean's Switch 中间点压力: 15 psi; 色谱柱: methyl silicone column (50 m $\times$ 0.22 mm $\times$ 1 μ m) A 通道、Al₂O₃/Na₂SO₄ PLOT column (50 m $\times$ 0.32 mm) B 通道; 双火焰离子化检测器(FID)温度: 250℃; 空气流量: 350 mL $\cdot$ min⁻¹; 氢气流量: 35 mL $\cdot$ min⁻¹; 升温程序: 46℃ (15 min), 5℃ $\cdot$ min⁻¹升温至 170℃, 15℃ $\cdot$ min⁻¹升温至 200℃ (6 min). 监测分析共计 56 种 VOCs, 其中包括 29 种烷烃、10 种烯烃、16 种芳香烃和 1 种炔烃. 为保证观测数据的有效性和准确性, 观测期间每天零点采用 Linde Gas North America LLC 标准气体开展单点浓度校准, 相关系数均大于 0.995. 每个季度开展一次多点浓度校准, 精密度均小于 5%.

2 结果与讨论

2.1 大气 VOCs 污染特征

2015 年 1 ~ 12 月观测站点大气 VOCs 体积分数的时间变化序列如图 1 所示. 从中可见, 南京市城区大气 VOCs 小时体积分数为 (1.10 ~ 102.79) $\times 10^{-9}$, 平均体积分数为 (17.49 $\pm$ 11.35) $\times 10^{-9}$, 其中烷烃、烯烃、芳香烃和乙炔分别占 56.51%、11.06%、24.62% 和 7.81%, 烷烃和芳香烃含量最高. 含量最丰富的前 10 种 VOCs 物种依次为丙烷 15.26%、乙烷 14.14%、乙炔 7.81%、甲苯 6.97%、正丁烷 6.23%、乙烯 5.23%、异丁烷 4.34%、丙烯 4.13%、异戊烷 4.12% 和间/对-二甲苯 4.06%, 累计占 TVOCs 的 72.26%.

本研究结果与厦门市^[17]城区大气 VOCs 的浓度水平相当, 低于广州^[18]、上海^[19]、重庆^[20]、长沙^[21]、成都^[13]、沈阳^[22]等地的大气 VOCs 浓度水平(表 1), 这可能与观测点位的垂直高度有关. 印红玲等^[13]的研究结果表明, 当垂直高度低于 42 m 时, 大气 VOCs 浓度随着垂直高度的增加而增加, 但随着垂直高度的继续增加, 大气 VOCs 浓度呈现先降低后增加的特征. 本研究观测站点距地面约 60 m, 受机动车和生活源等排放影响, 大气 VOCs 浓度不断累积, 在一定高度范围内呈现随垂直高度增加而增加的特征. 但伴随垂直高度的继续增加, 大气 VOCs 浓度逐渐下降, 这可能与其在向上扩散过程中的光化学反应消耗有关, 因此本研究观测结果

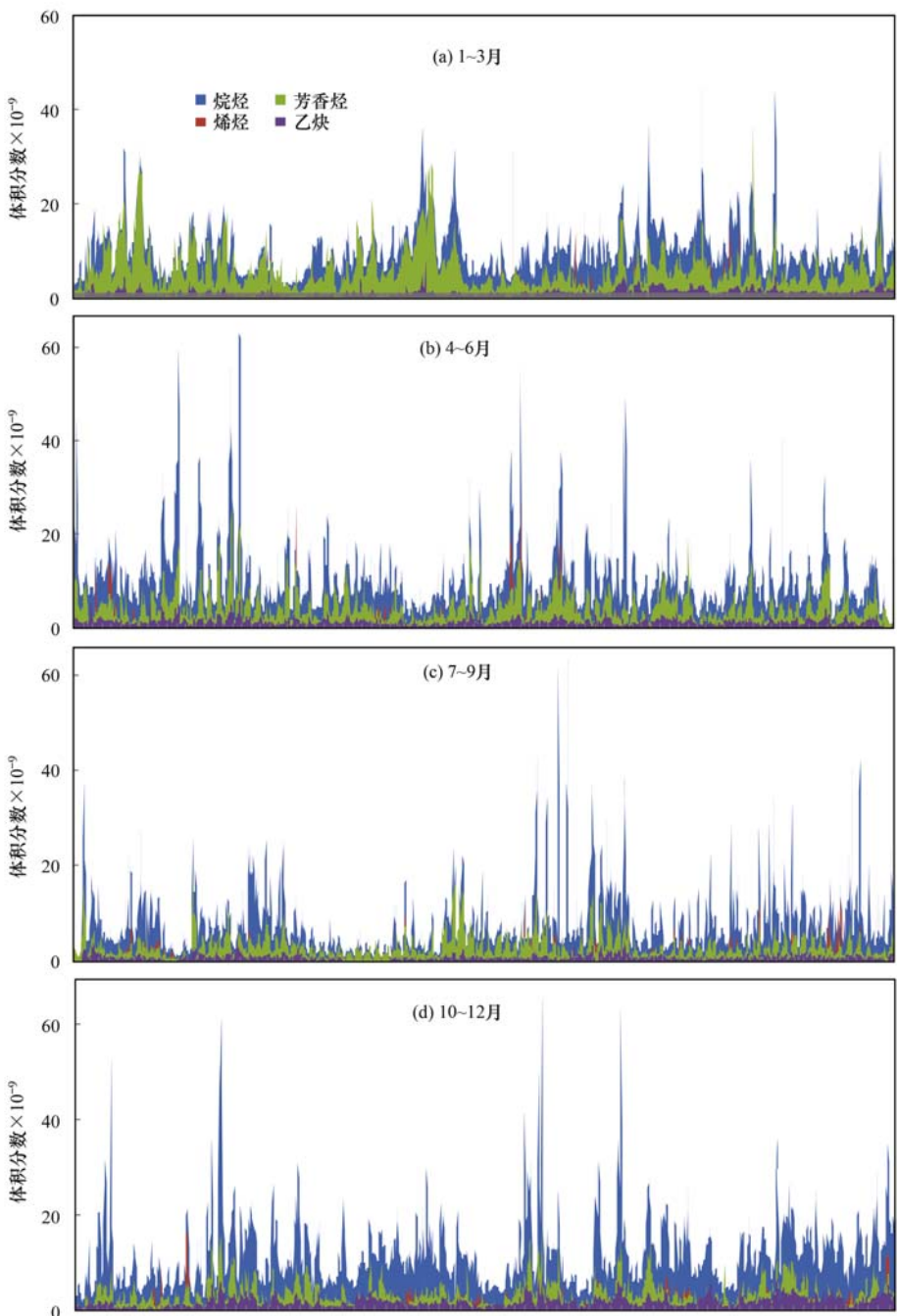


图1 2015年南京市城区大气 VOCs 的连续时间变化序列

Fig. 1 Time series of ambient VOCs in urban Nanjing in 2015

相对较低. 沈阳市大气 VOCs 浓度水平较高, 这与当地的污染排放特征和气象条件有关. 本地研究中, 南京北郊^[14]大气 VOCs 浓度水平和烯烃浓度占比均显著高于本研究结果, 这与北郊观测站点受临近石化工业区的污染排放有关.

2.2 大气 VOCs 浓度时间变化规律

南京市城区大气 VOCs 的小时日均浓度变化如图 2 所示. 从中可见, 大气 VOCs 日变化特征不明显, 这可能亦与本研究站点观测高度有关. 近地面不同污染源排放的 VOCs 在向上扩散过程中不断混合, 加之外源气团的中和作用, 使得站点周围的大

气气团相对均匀稳定, 大气 VOCs 浓度变化较平缓, 有别于其他研究获取的显著双峰或单峰日变化特征.

南京市城区大气 VOCs 的月均浓度变化如图 3 所示, 呈现两头高中间低的变化特征. 4 月南京市大气 VOCs 体积分数最高, 达 22.21×10^{-9} , 这主要与气象条件有关. 一方面 4 月温度上升加速了有机溶剂等含 VOCs 物料的挥发速率, 另一方面南京市春季大气混合层高度较低抑制了 VOCs 扩散. 7 月大气 VOCs 体积分数最低, 为 12.39×10^{-9} , 这主要是由于 VOCs 参与 O_3 生成的光化学反应消耗造成的.

表 1 国内不同城市大气 VOCs 浓度分布

城市	年份	VOCs 物种	TVOCs 体积分数 × 10 ⁻⁹	烷烃 /%	烯烃 /%	芳香烃 /%	含氧化合物			炔烃 /%	卤代烃 /%	来源
							醇类/%	酯类/%	酮类/%			
南京	2015	56	17.49 ± 11.35	56.51	11.06	24.62	/	/	/	7.81	/	本研究
南京	2011 ~ 2012	56	43.52	45.10	25.30	22.30	/	/	/	/	7.30	[14]
广州	2008	56	51.30	49.00	14.80	13.50	22.70	/	/	[18]	/	
上海	2010	56	26.45 ± 23.36	46.72	33.18	11.23	/	/	/	8.76	/	[19]
厦门	2014	48	16.90	48.51	11.31	40.18	/	/	/	/	/	[17]
重庆	2012 ~ 2013	78	33.89	31.50	10.40	30.70	/	/	/	/	27.40	[20]
长沙	2008	76	30.55	29.00	30.00	10.00	/	/	/	/	31.00	[21]
成都	2015	41	69.94 μg·m ⁻³	41.18	23.02	16.3	6.59	6.98	5.93	/	/	[13]
沈阳	2008 ~ 2009	108	(371.0 ± 132.4) μg·m ⁻³	11.40	3.00	8.5	/	57.2	/	/	20.00	[22]

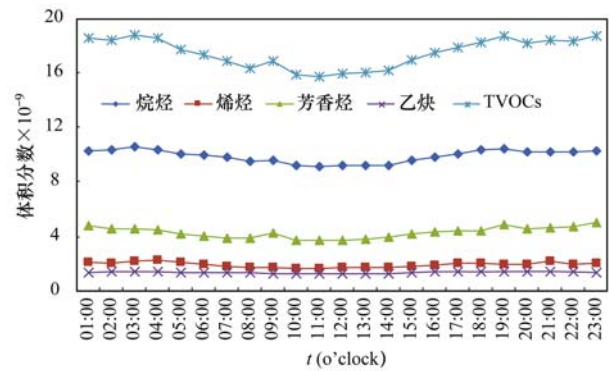


图 2 南京市城区大气中 TVOCs 以及各组分浓度日变化

Fig. 2 Diurnal variation of TVOCs and their components in urban Nanjing

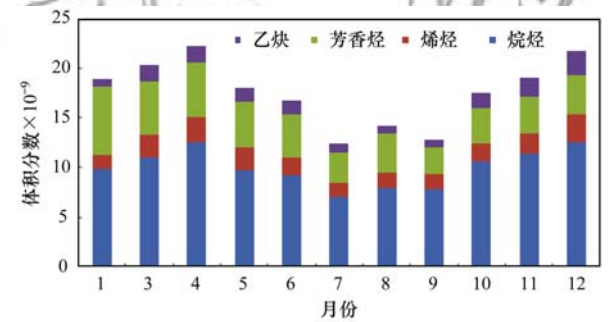


图 3 南京市城区大气 VOCs 的月均浓度变化

Fig. 3 Monthly average VOCs concentration in urban Nanjing

2.3 大气 VOCs 的 T/B 和 E/E 比

机动车排放和有机溶剂挥发是芳香烃的主要污染源,其中苯是机动车尾气 VOCs 的典型物种,而甲苯除机动车外还受多种污染源的影响,因此许多研究采用甲苯与苯的浓度比 T/B 来评价环境大气受机动车尾气影响的程度^[23]. 通常认为, T/B < 2.0 表示受机动车尾气影响显著^[24],而受溶剂挥发等其他 VOCs 排放源影响时, T/B 则相对较大^[25, 26]. 南京市城区大气 VOCs T/B 逐月变化趋势如图 4 所示,其在 1.55 ~ 2.53 比值范围内,全年 T/B 均值为 2.02,说明南京市城区大气 VOCs 主要受机动车排放的影响. 研究显示, C3 ~ C5 的烷烃和烯烃即南京市城区大气 VOCs 的关键

物种,主要来源于机动车尾气和汽油挥发等交通源排放,侧面反映了机动车对南京城区大气 VOCs 的重要影响,与本研究通过 T/B 获得的判断结果一致. 另根据汽油车和柴油车原始排放的 T/B^[27],分别为 2.26 和 0.74,判断汽油车对南京市大气 VOCs 的影响较大.

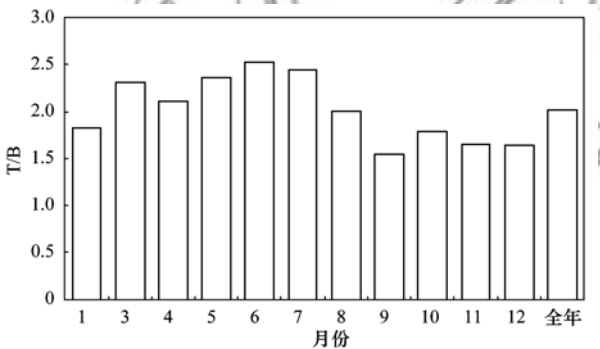


图 4 南京市城区大气 T/B (甲苯/苯) 变化

Fig. 4 Monthly variation of ambient T/B (toluene/benzene) in urban Nanjing

乙炔化学性质较活泼,在大气光化学反应中不断消耗减少,而乙烷的化学性质较稳定,因此常用乙烷与乙炔的浓度比即乙烷/乙炔 (E/E) 来表征大气气团的光化学年龄. 研究显示^[28],机动车原始排放的污染气团中 E/E 比为 0.47 ± 0.26. 南京市城区大气 VOCs 每月 E/E 比如图 5 所示,其在 0.90 ~ 3.53 比值范围内,全年均值为 2.24,显著高于机动车原始排放值和上海市城区大气 E/E (0.98)^[19],说明观测站点区域大气老化程度较严重,这可能与区域输送的影响有关.

2.4 大气 VOCs 的反应活性

VOCs 的大气反应活性是指 VOCs 物种参与大气化学反应的能力,通常采用等效丙烯浓度、L^{·OH}和 VOCs 最大增量反应活性 (MIR) 来衡量^[29, 30]. 本研究采用 L^{·OH}法和 VOCs 最大增量反应活性法来研究各种 VOCs 化合物大气反应活性的大小. VOCs 与 ·OH 的反应是大气中 O₃ 形成过程的关键步骤,

其反映的是单个 VOCs 物种对日间光化学反应的相对贡献^[31], 本研究使用的 $L^{\cdot OH}$ 常数取自文献^[32, 33]. VOCs 最大增量反应活性计算的是单个 VOCs 物种的 OFP, OFP 可以用来简单估计各 VOCs 物种在一定条件下能生成的 O_3 量, MIR 的计算依据来自 Carter 的修正值^[34].

南京市城区大气 VOCs 的 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 如图6所示. 从中可见, 与 VOCs 浓度时间变化特征类似, 冬春季大气 VOCs 的 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 相对较高, 大气气团反应活性和氧化性随之增强, 对南京市城区冬春季以 $PM_{2.5}$ 和 O_3 为特征污染物的复合大气污染有一

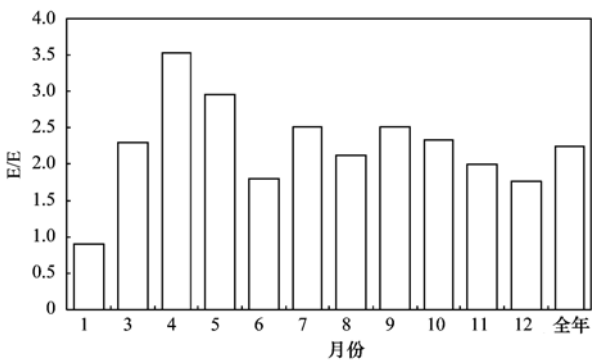
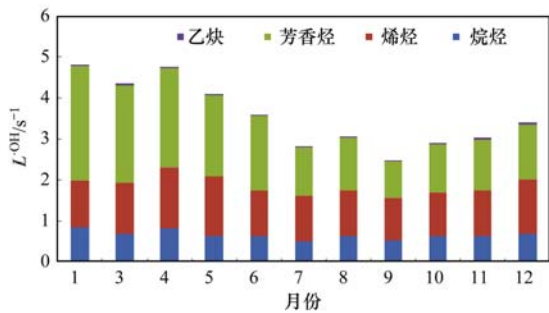


图5 南京市城区大气 E/E(乙烷/乙炔)变化
Fig. 5 Monthly variation of ambient E/E (ethane/ethyne) in urban Nanjing

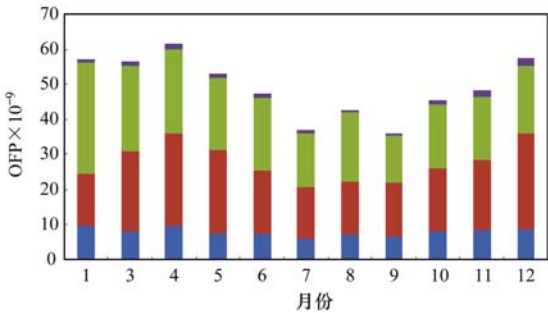


图6 南京市城区大气 VOCs 的 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 月变化

Fig. 6 Monthly variation of $L^{\cdot OH}$ and OFP of ambient VOCs components in urban Nanjing

定的影响.

南京市城区大气 VOCs 物种的 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献如图7所示. 由于 VOCs 物种繁多, 化学结构迥异, 反应活性不一, 导致了烷烃、烯烃、芳香烃和乙炔对大气 VOCs 的 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献不一致. 由图可见, 含量占比 24.62% 的芳香烃, 其 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献最高, 依次为 46.96% 和 41.58%; 含量占比 11.06% 的烯烃, 其 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献略次于芳香烃, 分别为 33.73% 和 39.86%; 含量水平最高的烷烃 (56.51%), 其对 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献仅为 18.50% 和 15.97%. 可见, 芳香烃和烯烃是南京市大气 VOCs 中活性最高的物种, 同时也是 VOCs 污染控制的优先物种.

单个 VOCs 物种对 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP 贡献排序如图8

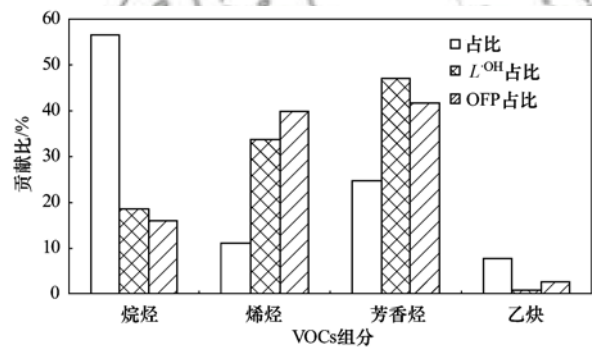


图7 南京市城区大气 VOCs 中各分组的体积分数
及其对 $L^{\cdot OH}$ 以及 OFP 贡献比

Fig. 7 Mixing ratio of VOCs components and their contribution to $L^{\cdot OH}$ and OFP in urban Nanjing

所示. 从中可见, 乙苯、邻二甲苯、1,2,4-三甲基苯、甲苯、乙烯、间/对二甲苯、丙烯对 $L^{\cdot OH}$ 和 OFP

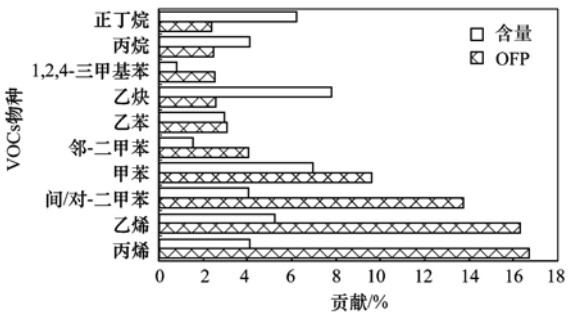
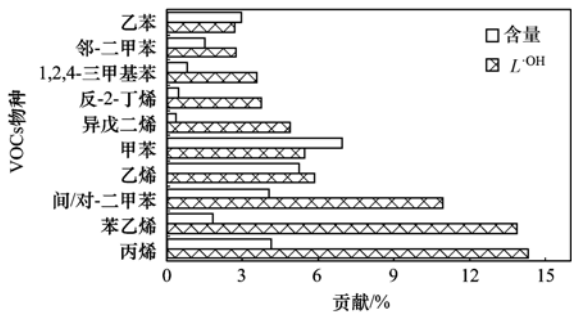


图8 南京市城区 VOCs 物种对 $L^{\cdot OH}$ 及 OFP 贡献最大的前10 种物质

Fig. 8 Top 10 species of VOCs contributing to $L^{\cdot OH}$ and OFP in urban Nanjing

贡献均位于前10种物种之列。含量占比第8位的丙烯对 L^{OH} 和OFP贡献最高,活性最大。含量占比第1位和第5位的丙烷、正丁烷对OFP的贡献分别居于第9位和第10位。由此可见,丙烯、乙烯和二甲苯等苯系物是南京市大气VOCs的关键活性物种。

3 结论

(1)南京市城区大气VOCs平均体积分数为 $(17.49 \pm 11.35) \times 10^{-9}$,其中烷烃、烯烃、芳香烃和乙炔占比分别为56.51%、11.06%、24.62%和7.81%。丙烷、乙烷、乙炔、甲苯、正丁烷、乙烯、异丁烷、丙烯、异戊烷和间/对-二甲苯是浓度最高的VOCs物种,累计占TVOCs浓度的72.26%。

(2)南京市城区大气VOCs呈两头高中间低的月均体积分数变化特征,其中4月最高(22.21×10^{-9}),7月最低(12.39×10^{-9})。观测区域基本不受近地面污染源排放影响,VOCs小时日均浓度变化特征不明显。

(3)南京市城区大气VOCs T/B均值为2.02,主要受机动车尤其是汽油车排放的影响;观测站点区域大气VOCs E/E均值为2.24,大气老化程度较严重,可能受区域输送影响。

(4)南京市城区大气VOCs冬春季 L^{OH} 和OFP较高,大气气团反应活性和氧化性较强。芳香烃和烯烃大气反应活性较高,丙烯、乙烯和二甲苯等苯系物是活性最强的VOCs物种。

参考文献:

- [1] Baudic A, Gros V, Sauvage S, *et al.* Seasonal variability and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the Paris megacity (France) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, **16**(18): 11961-11989.
- [2] Ebersviller S, Lichtveld K, Sexton K G, *et al.* Gaseous VOCs rapidly modify particulate matter and its biological effects-part 1: simple VOCs and model PM [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(24): 12277-12292.
- [3] Cheng C L, Li M, Chan C K, *et al.* Mixing state of oxalic acid containing particles in the rural area of Pearl River Delta, China: implication for seasonal formation mechanism of secondary organic aerosol (SOA) [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(15): 9519-9533.
- [4] Yue X, Unger N, Harper K, *et al.* Ozone and haze pollution weakens net primary productivity in China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(9): 6073-6089.
- [5] Shao M, Zhang Y H, Zheng 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.
- [6] Zou Y, Deng X J, Zhu D, *et al.* Characteristics of 1 year of observational data of VOCs, NO_x and O_3 at a suburban site in Guangzhou, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(12): 6625-6636.
- [7] Zheng J Y, Shao M, Che W W, *et al.* Speciated VOC emission inventory and spatial patterns of ozone formation potential in the Pearl River Delta, China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43**(22): 8580-8586.
- [8] Wang J L, Wang C H, Lai C H, *et al.* Characterization of ozone precursors in the Pearl River Delta by time series observation of non-methane hydrocarbons [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6233-6246.
- [9] Wang H L, Chen C H, Wang Q, *et al.* Chemical loss of volatile organic compounds and its impact on the source analysis through a two-year continuous measurement [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **80**: 488-498.
- [10] 王红丽. 上海市光化学污染期间挥发性有机物的组成特征及其对臭氧生成的影响研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
Wang H L. Characterization of volatile organic compounds (VOCs) and the impact on ozone formation during the photochemical smog episode in Shanghai, China [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1603-1611.
- [11] 王倩, 陈长虹, 王红丽, 等. 上海市秋季大气VOCs对二次有机气溶胶的生成贡献及来源研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(2): 424-433.
Wang Q, Chen C H, Wang H L, *et al.* Forming potential of secondary organic aerosols and sources apportionment of VOCs in autumn of Shanghai, China [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(2): 424-433.
- [12] 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.
- [13] 印红玲, 袁桦蔚, 叶芝祥, 等. 成都市大气中挥发性有机物的时空分布特征及臭氧生成潜势研究 [J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(2): 386-393.
Yin H L, Yuan H W, Ye Z X, *et al.* Temporal and spatial distribution of VOCs and their OFP in the atmosphere of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(2): 386-393.
- [14] 安俊琳, 朱彬, 王红磊, 等. 南京北郊大气VOCs变化特征及来源解析 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
An J L, Zhu B, Wang H L, *et al.* Characteristics and source apportionment of volatile organic compounds (VOCs) in the northern suburb of Nanjing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(12): 4454-4464.
- [15] 李用宇, 朱彬, 安俊琳, 等. 南京北郊秋季VOCs及其光化学特征观测研究 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(8): 2933-2942.
Li Y Y, Zhu B, An J L, *et al.* Characteristics of VOCs and their photochemical reactivity in autumn in Nanjing northern suburb [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(8): 2933-2942.
- [16] 杨笑笑, 汤莉莉, 张运江, 等. 南京夏季市区VOCs特征及 O_3 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.
- [17] 徐慧, 张哈, 邢振雨, 等. 厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势 [J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 11-17.
Xu H, Zhang H, Xing Z Y, *et al.* Pollution characteristics and ozone formation potential of ambient VOCs in winter and spring in Xiamen [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 11-17.
- [18] 罗玮, 王伯光, 刘舒乐, 等. 广州大气挥发性有机物的臭氧生成潜势及来源研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(5): 80-86.

- Luo W, Wang B G, Liu S L, *et al.* VOC ozone formation potential and emission sources in the atmosphere of Guangzhou [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, **34**(5): 80-86.
- [19] 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.
- [20] 祁心, 郝庆菊, 吉东生, 等. 重庆市北碚城区大气中 VOCs 组成特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(9): 3293-3301.
- Qi X, Hao Q J, Ji D S, *et al.* Composition characteristics of atmospheric volatile organic compounds in the urban area of Beibei District, Chongqing [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(9): 3293-3301.
- [21] 刘全, 王跃思, 吴方堃, 等. 长沙大气中 VOCs 研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(12): 3543-3548.
- Liu Q, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Observation and study on atmospheric VOCs in Changsha City [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(12): 3543-3548.
- [22] 刘雅婷, 彭跃, 白志鹏, 等. 沈阳市大气挥发性有机物 (VOCs) 污染特征[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- Liu Y T, Pen Y, Bai Z P, *et al.* Characterization of atmospheric volatile organic compounds in Shenyang, China [J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(9): 2777-2785.
- [23] Chan C Y, Chan L Y, Wang X M, *et al.* Volatile organic compounds in roadside microenvironments of metropolitan Hong Kong [J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(12): 2039-2047.
- [24] Barletta B, Meinardi S, Rowland F S, *et al.* Volatile organic compounds in 43 Chinese cities [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(32): 5979-5990.
- [25] Ho K F, Lee S C, Guo H, *et al.* Seasonal and diurnal variations of volatile organic compounds (VOCs) in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Science of the Total Environment*, 2004, **322**(1-3): 155-166.
- [26] Tsai W Y, Chan L Y, Blake D R, *et al.* Vehicular fuel composition and atmospheric emissions in South China: Hong Kong, Macau, Guangzhou, and Zhuhai [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2006, **6**(11): 3281-3288.
- [27] 乔月珍, 王红丽, 黄成, 等. 机动车尾气排放 VOCs 源成分谱及其大气反应活性[J]. *环境科学*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- Qiao Y Z, Wang H L, Huang C, *et al.* Source profile and chemical reactivity of volatile organic compounds from vehicle exhaust [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(4): 1071-1079.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] Martien P T, Harley R A, Milford J B, *et al.* Evaluation of incremental reactivity and its uncertainty in Southern California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, **37**(8): 1598-1608.
- [31] 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 大气环境化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. 255-256.
- [32] Atkinson R, Arey J. Atmospheric degradation of volatile organic compounds [J]. *Chemical Reviews*, 2003, **103**(12): 4605-4638.
- [33] Atkinson R. Kinetics and mechanisms of the gas-phase reactions of the hydroxyl radical with organic compounds under atmospheric conditions [J]. *Chemical Reviews*, 1985, **86**(1): 69-201.
- [34] Carter W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. *Air & Waste*, 1994, **44**(7): 881-899.

CONTENTS

Pollution Characteristics and Regional Transport of Atmospheric Particulate Matter in Beijing from October to November, 2016	ZHANG Han-yu, CHENG Shui-yuan, YAO Sen, <i>et al.</i> (1999)
Chemical Compositions, Mass Concentrations, and Emission Factors of Particulate Organic Matters Emitted from Catering	WANG Hong-li, JING Sheng-ao, QIAO Li-ping (2010)
Size Distributions of Aerosol During the Summer at the Summit of Mountain Taishan (1534 m) in Central East China	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, YIN Yan, <i>et al.</i> (2019)
Concentration Characteristics and Source Analysis of PM _{2.5} During Wintertime in Zhengzhou-Xinxiang	YAN Guang-xuan, ZHANG Pu-zhen, HUANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2027)
Scenario Analysis of PM _{2.5} Concentration Targets and Milestones in China	HE Jin-yu, YAN Li, WANG Yan-chao, <i>et al.</i> (2036)
PM _{2.5} Emission Characteristics and Estimation of Emission Reduction Potential from Typical Industrial Sources in Anyang	DU Xiao-shen, YAN Li, HE Jin-yu, <i>et al.</i> (2043)
Emission Characteristics and List of Inorganic Elements in Fine Particles of Typical Industrial Kilns in Zhengzhou City	ZHAO Qing-yan, HAN Shi-jie, ZHANG Yi-shun, <i>et al.</i> (2052)
Composition and Atmospheric Reactivity of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in the Urban Area of Nanjing, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, ZHAO Qiu-yue, <i>et al.</i> (2062)
Formation Potential of Ozone and Secondary Organic Aerosol of VOCs from Fossil Fuel Combustion in Lanzhou City	LIU Zhen, ZHU Yu-fan, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (2069)
Inventory and Characteristics of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOCs) for 12 Deciduous Fruit Trees	LI Shuang-jiang, YUAN Xiang-yang, LI Qi, <i>et al.</i> (2078)
Ion Concentrations and Their Spatial Variability in Underground Water and Surface Water in Typical Terrestrial Ecosystems in China	HUANG Li, ZHANG Xin-yu, YUAN Guo-fu, <i>et al.</i> (2086)
Status of Antibiotic Contamination and Ecological Risks Assessment of Several Typical Chinese Surface-Water Environments	LIU Xi, WANG Zhi, WANG Xue-lei, <i>et al.</i> (2094)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water Bodies in Seven Basins of China	FAN Bo, WANG Xiao-nan, HUANG Yun, <i>et al.</i> (2101)
Occurrence, Input, and Seasonal Variations of Poly- and Perfluoroalkyl Substances (PFASs) in Rivers and Drain Outlets from the Dalian Coastal Area, China	CHEN Hong, HAN Jian-bo, ZHANG Can, <i>et al.</i> (2115)
Space-time Characteristics and Environmental Significance of Stable Isotopes in Precipitation at an Arid Inland River Basin	YUAN Rui-feng, LI Zong-xing, CAI Yu-qin, <i>et al.</i> (2122)
Regional Evolution and Control Factors of Karst Groundwater in Liulin Spring Catchment	HUNAG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (2132)
Major Ionic Characteristics and Controlling Factors of Karst Groundwater at Xiangshui, Chongzuo	ZHOU Jin-mei, JIANG Zhong-cheng, XU Guang-li, <i>et al.</i> (2143)
Analysis of Transport and Transformation Characteristics Between Dissolved Phosphorus and Particulate Phosphorus in Water of the Three Gorges Reservoir	QIN Yan-wen, HAN Chao-nan, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2152)
Vertical Distribution Profiles and Release Potential of Mainstream Column Sediments in the Three Gorges Reservoir After Impoundment to 175 m	LI Rui, PAN Chan-juan, TANG Xian-qiang, <i>et al.</i> (2160)
Distribution Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus in the Dongting Lake at Different Water Periods	LI Ying-jie, WANG Li-jing, LI Hong, <i>et al.</i> (2170)
Effects of Exogenous Carbon Addition on Equilibrium Phosphate Concentration and Risk of Phosphorus Release from Sediments in the Shiwuli River, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, BAO Qin, DAI Yuan (2178)
Spatial Distribution of Organic Phosphorus in Sediment and Its Environmental Implication in the Upper Stream of Minjiang River	XU Jian, YUAN Xu-yin, YE Hong-meng, <i>et al.</i> (2186)
Nitrogen and Phosphorus Removal by Integrated Ecological Engineering Treatment System in a Small Agricultural Watershed	JIANG Qian-wen, LIU Feng, PENG Ying-xiang, <i>et al.</i> (2194)
Spatial Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in River Sediments from Lake Taihu Basin	ZHANG Jie, GUO Xi-ya, ZENG Ye, <i>et al.</i> (2202)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in the Water of the Ruxi River Estuary, a Typical Tributary of the Three Gorges Reservoir Area	MA Wei-bin, CHEN Qiu-yu, YIN De-liang, <i>et al.</i> (2211)
Mercury Distribution Characteristics and Its Mass Balance in a Multifunctional Urban Wetland	LIU Wei-hao, WANG Yong-min, FAN Yu-fei, <i>et al.</i> (2219)
Distribution Characteristics of Mercury in Different Urban Constructed Wetlands	FAN Yu-fei, LIU Wei-hao, SUN Tao, <i>et al.</i> (2226)
Effects of Microplastics on Antibiotic Resistance Genes in Estuarine Sediments	HUANG Fu-yi, YANG Kai, ZHANG Zi-xing, <i>et al.</i> (2234)
Comparison and Source Apportionment of PAHs Pollution of Runoff from Roads in Suburb and Urban Areas of Shanghai	WU Jie, XIONG Li-jun, WU Jian, <i>et al.</i> (2240)
Characteristics of Phytoplankton Community and Its Relationship with Environmental Factors in Different Regions of Yilong Lake, Yunnan Province, China	WANG Zhen-fang, ZHANG Wei, YANG Li, <i>et al.</i> (2249)
Algal Bloom and Mechanism of Hypoxia in the Metalimnion of the Lijiahe Reservoir During Thermal Stratification	LIU Xue-qing, HUANG Ting-lin, LI Nan, <i>et al.</i> (2258)
Allelopathic Effects and Allelochemicals of <i>Myriophyllum elatinoide</i> s on <i>Microcystis aeruginosa</i> and <i>Selenastrum capricornutum</i>	BI Ye-liang, WU Shi-min, ZHOU Si-ning, <i>et al.</i> (2265)
Removal Efficiency of Trichloroacetamide by UV/Sodium Sulfite	FU Zhi-xuan, GUO Ying-qing, CHU Wen-hai (2271)
Influencing Factors and Transformation Mechanism of Venlafaxine Degradation by UV	LÜ Juan, XU Zhi-wei, WANG Yan (2278)
Mechanism of Synergistic Adsorption of Arsenic and Cadmium by Aluminium-substituted Ferrihydrites	HUANG Bo, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, <i>et al.</i> (2287)
Fluoride Removal Efficiency of Novel Material: Magnetite Core/Zirconia Shell Nanocomposite	FANG Wen-kan, LI Xiao-di, FANG Jing, <i>et al.</i> (2295)
Impact Mechanisms of Carboxyl Group Modified Cathode on Acetate Production in Microbial Electrosynthesis Systems	QI Jia-xin, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (2302)
Partial Nitrification and Denitrification of Low C/N Ratio Sewage Based on Zoning Oxygen and Dissolved Oxygen Control	WU Chun-lei, RONG Yi, LIU Xiao-peng, <i>et al.</i> (2310)
Start-up Performance of Low-substrate Anaerobic Ammonium Oxidation Under Different COD Concentrations	MA Yan-hong, ZHAO Zhi-chao, AN Fang-jiao, <i>et al.</i> (2317)
Partial Nitrification Fast Start-up and Stable Performance of 15°C SBBR	SUN Yi-qi, BIAN Wei, LI Jun, <i>et al.</i> (2326)
Effects of Long-term Poly-P Deficiency on the Metabolic Properties of <i>Accumulibacter</i> in AO-SBR System	WANG Shao-po, LI Zhu, ZHAO Le-dan, <i>et al.</i> (2333)
Extracellular Polymeric Substances of ANAMMOX Granular Sludge and Its Effects on Sludge Surface Characteristics	YANG Ming-ming, LIU Zi-han, ZHOU Yang, <i>et al.</i> (2341)
Treatment of Piggery Biogas Slurry by Enhanced Biological Contact Oxidation with HN-AD Bacteria	LIU Xiang-yang, ZHANG Qian, WU Heng, <i>et al.</i> (2349)
Effect of Different Temperatures on the Performance of Autotrophic Nitrogen Removal and Microbial Community from Swine Wastewater	HUANG Fang-yu, DENG Liang-wei, YANG Hong-nan, <i>et al.</i> (2357)
Characteristics and Regional Heterogeneity of Eukaryotic Microbial Community in Wastewater Treatment Plants	QIN Wen-tao, ZHANG Bing, SUN Chen-xiang, <i>et al.</i> (2368)
Effects of Wetland Reclamation on Soil Microbial Community Structure in the Sanjiang Plain	WANG Na, GAO Jie, WEI Jing, <i>et al.</i> (2375)
Distribution Pattern and Diversity Maintenance Mechanisms of Fungal Community in Subalpine Lakes	LIU Jin-xian, LI Cui, LUO Zheng-ming, <i>et al.</i> (2382)
Influence of Biochar Amendment on Soil Denitrifying Microorganisms in Double Rice Cropping System	LIU Jie-yun, QIU Hu-sen, WANG Cong, <i>et al.</i> (2394)
Effects of Plastic Film Mulching and Nitrogen Fertilizer Application on CH ₄ Emissions from a Vegetable Field	NI Xue, JIANG Chang-sheng, CHEN Shi-jie, <i>et al.</i> (2404)
Effects of Water Deficit on Greenhouse Gas Emission in Wheat Field in Different Periods	WANG Xiao-yun, CAI Huan-jie, LI Liang, <i>et al.</i> (2413)
Effects of Different Fertilization Modes on Greenhouse Gas Emission Characteristics of Paddy Fields in Hot Areas	TIAN Wei, WU Yan-zheng, TANG Shui-rong, <i>et al.</i> (2426)
Effects of Cyclical Temperature Fluctuations on Organic Carbon Mineralization in Purple Soil	ZENG Man-man, CI En, FAN Jing-jing, <i>et al.</i> (2435)
Cd Content Characteristics and Ecological Risk Assessment of Paddy Soil in High Cadmium Anomaly Area of Guangxi	SONG Bo, WANG Fo-peng, ZHOU Lang, <i>et al.</i> (2443)
Remediation Potential of <i>Ageratum conyzoides</i> L. on Cadmium Contaminated Farmland	ZHANG Yun-xia, SONG Bo, BIN Juan, <i>et al.</i> (2453)
Evaluation of the Potential Agricultural Risks of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Contaminated Soil by Planting <i>Lactuca sativa</i> L.	JIAO Hai-hua, GUO Jia-jia, ZHANG Jing-min, <i>et al.</i> (2460)
Impacts of Land Use and Landscape Patterns on Heavy Metal Accumulation in Soil	SHU Xin, LI Yan, LI Feng, <i>et al.</i> (2471)
Pollution Characteristics and Evaluation of Heavy Metal Pollution in Surface Soil Around a Municipal Solid Waste Incineration Power Plant	LÜ Zhan-lu, ZHANG Jin-liang, LU Shao-you, <i>et al.</i> (2483)