

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

南京夏季市区 VOCs 特征及 O₃ 生成潜势的相关性分析

杨笑笑^{1,2}, 汤莉莉^{1,2,3*}, 张运江^{1,2}, 母应峰⁴, 王鸣^{1,2}, 陈文泰³, 周宏仓^{1,2}, 花艳^{1,2}, 江蓉馨^{1,2}

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 江苏省大气环境监测与污染控制高新技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 江苏省环境监测中心, 南京 210036; 4. 南京市环境监测中心站, 南京 210013)

摘要: 挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 是大气中光化学污染臭氧 (O₃) 的重要前体物, 其在大气中的浓度水平直接影响着臭氧的污染特征. 本研究运用大气挥发性有机物快速在线连续自动监测系统, 于 2013 年 8 月对南京市市区大气中 98 种 VOCs 进行观测, 分析南京夏季 VOCs 体积分数水平及组成特征, 分析臭氧及其前体物的变化, 运用 VOCs/NO_x 比值法研究南京臭氧生成敏感性控制因素. 结果表明, 夏季南京市市区大气 VOCs 最高体积分数达 200×10^{-9} , 平均体积分数为 52.05×10^{-9} , 各物种体积分数大小为烷烃 > 含氧有机物 > 烯烃 > 芳香烃; 臭氧平均质量浓度 $76.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 小时质量浓度超标率为 5.9%. 臭氧质量浓度高值期, 其前体物 VOCs 与 NO_x 变化趋势基本一致, 并与 O₃ 变化呈明显的反相关; 不同臭氧质量浓度阶段, 同种类的 VOCs 体积分数也存在一定的差异; 夏季南京市区的臭氧生成对 VOCs 较敏感, 属于 VOCs 控制区.

关键词: 南京; 挥发性有机物; 臭氧; 最大臭氧生成潜势; 相关性

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0443-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.006

Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District

YANG Xiao-xiao^{1,2}, TANG Li-li^{1,2,3*}, ZHANG Yun-jiang^{1,2}, MU Ying-feng⁴, WANG Ming^{1,2}, CHEN Wen-tai³, ZHOU Hong-cang^{1,2}, HUA Yan^{1,2}, JIANG Rong-xin^{1,2}

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environmental Monitoring and Pollution Control, Nanjing 210044, China; 3. Jiangsu Environmental Monitoring Center, Nanjing 210036, China; 4. Nanjing Environmental Monitoring Center Station, Nanjing 210013, China)

Abstract: Volatile organic compounds (VOCs) is an important precursor of photochemical ozone pollution (O₃) in the atmosphere. Their concentration variation directly affects the characteristics of the ozone pollution. The concentration, speciation of VOCs, ozone and its precursors in Nanjing were analyzed and measured using online gas detection systems in August 2013. VOCs/NO_x discriminant method was used to get the sensitive control factors of ozone. The results showed that the averaged volume fraction of VOCs was 52.05×10^{-9} , and the largest one reached 200×10^{-9} in Nanjing urban district. The order of volume fraction of each species VOCs was alkane > oxygen-containing VOCs > alkene > aromatics. The averaged concentration of ozone was $76.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ and the exceeding concentration of hourly standard was 5.9%. The change trends of ozone precursors VOCs and NO_x were basically identical and Ozone showed the obvious negative correlation during the period of high concentrations of ozone. There were some differences in the concentrations of the same VOCs in different ozone concentration periods. The ozone generation in Nanjing urban district was sensitive to VOCs, and Nanjing belonged to VOCs control area in summer.

Key words: Nanjing urban district; volatile organic compounds (VOCs); ozone (O₃); maximum ozone formation potential (OFP); correlation

臭氧是城市大气的重要污染物, 主要由挥发性有机物 (volatile organic compounds, VOCs) 和氮氧化物 (NO_x) 经光化学反应生成^[1,2]. VOCs 作为参与光化学反应的重要物种, 其组分特征越来越复杂, 且体积分数有大幅上升的趋势^[3-5]. 现代城市中由 VOCs 引发的污染问题已引起人们广泛关注, 尤其在长三角、珠三角和京津冀等经济发达的区域, 交通运输、工业及建筑施工等排放的污染物并未得到很好的控制, 大气污染由单一向复合型转变, 由 VOCs 引起的环境问题日益突出. 因此, VOCs 作为近地层大气 O₃ 的重要前体物, 研究其在大气中的含

量、变化特征及臭氧生成潜势等, 对于城市大气光化学污染原因解析及控制措施的制定有重要意义.

VOCs 和 O₃ 作为城市空气质量监测的重要对象, 很多学者对香港^[3]、上海^[4-8]、北京^[9-13]、广州^[14-19]、厦门^[20]、杭州^[21]、深圳^[22]等地区 O₃ 及

收稿日期: 2015-05-05; 修订日期: 2015-09-13

基金项目: 江苏省科技支撑计划项目 (BE2012771); 江苏省自然科学基金项目 (BK2012884); 江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目 (11KJA170002); 江苏省监测科研基金项目 (1016)

作者简介: 杨笑笑 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为大气污染控制, E-mail: 13851903412@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lily3258@163.com

VOCs 的污染变化规律做了深入分析. 吴方堃等^[12]对北京奥运期间 VOCs 体积分数变化和 O_3 潜势进行分析, 各组分体积分数中烷烃最高, 芳烃次之, 而烯烃最少; 但是芳烃对 O_3 生成的贡献最高, 烯烃、烷烃次之. 解鑫等^[14]对广州大气挥发性有机物的日变化特征和在臭氧生成中的作用进行了研究, 结果表明对臭氧生成有很大贡献的典型物种和影响城区 VOCs 含量的物种的日变化特征是不同的. 烷烃和烯烃类主要与机动车排放有关, 芳烃类则与交通排放和溶剂挥发等有关; 也有学者对南京地区的 VOCs 和 O_3 污染进行了相关研究, 李用宇等^[23]对南京北郊秋季的 VOCs 变化特征进行研究, 白天与 O_3 质量浓度曲线呈负相关, 烯烃的臭氧生成潜势 (OFP) 最大, 臭氧生成成为 VOCs 控制^[24]; 杨俊梅等^[25]对南京夏季北郊 O_3 、 NO_2 和 SO_2 变化特征进行分析, 结果显示 O_3 质量浓度较高, 与 NO_2 的日变化呈负相关, 但对 VOCs 与 O_3 的研究未有涉及; 南京北郊地理位置特殊, 多数季节处于化工园区下风向, VOCs 受园区工业排放影响较重, 而本研究观测点位于南京城区, 其周边主要为居民、商业和餐饮等, 主要污染来源为交通、居民生活餐饮、工业排放长距离传输等. 南京位于长江三角洲西部, 是重要的工业、交通和经济文化中心, 随着工业的发展和机动车数量的增长, VOCs 排放量增长迅速, 由此带来的 VOCs 和 O_3 污染日益严重^[26]. 本研究在南京 2013 年 8 月亚青会期间开展了对 VOCs 等气态污染物观测, 分析了 VOCs 各组分和体积分数随时间的变化特征, 以及 VOCs 的臭氧生成潜势, 比较不同种类 VOCs 对臭氧贡献大小, 以筛选出南京城区优先控制的 VOCs 物种, 同时进行了 O_3 生成敏感性控制分析, 以期对南京城区 VOCs 减排及臭氧污染控制措施的制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 观测地点与时间

观测地点在江苏省南京市鼓楼区凤凰西街某环境监测站 6 楼楼顶 (如图 1, 北纬 32.04° , 东经 118.75° , 相对地面高度约 18 m), 位于南京鼓楼区凤凰西街, 周边主要为居民区、商业区. 观测时间为 2013 年 8 月 1 日至 8 月 31 日, 采用 24 h 连续在线观测模式, 样品采集频率间隔为 1 h. 观测过程中因停电, 仪器故障和正常维护等原因导致部分数据丢失, 剔除观测时间少于 18 h 的整天数据后, 数据的有效天数为 29 d.

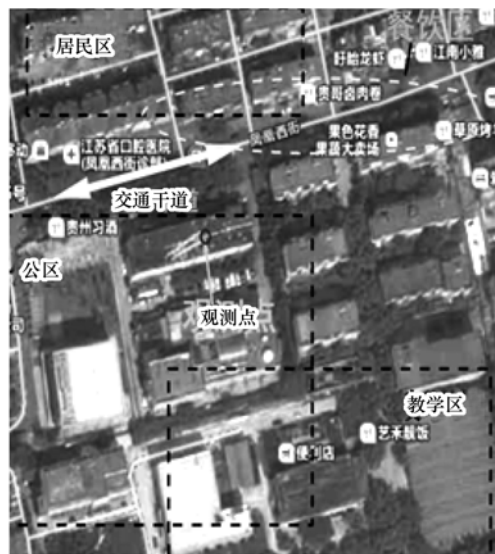


图 1 采样地点示意

Fig. 1 Location of sampling sites

1.2 观测仪器原理

VOCs 观测由武汉天虹研发的 TH-300B 大气挥发性有机物快速在线连续自动监测系统, 进行实时连续监测, 采样频率为 1 h, 检出限范围为 $0.008 \times 10^{-9} \sim 0.05 \times 10^{-9}$, 各个物种的检出限见表 1. TH-300B 监测系统具体包括, 载气系统, 电子制冷超低温预浓缩采样系统, GC-FID/MS (气相色谱-火焰离子化检测器/质谱检测器) 分析系统, 记录系统. 监测时环境空气样品通过采样系统采集后, 进入浓缩系统, 在低温条件下, 大气中 C2 ~ C4 的碳氢化合物由 PLOT 柱捕集, 其他的 VOCs 则由去活石英毛细管空柱捕集; 然后快速加热解析, 使化合物进入分析系统, 经气相色谱柱分离后 C2 ~ C4 的碳氢化合物由 FID 检测器检测, 其他的 VOCs 则由 MS 检测器检测, 整个过程全部通过控制软件自动完成, 同时还配有自动反吹和自动标定系统. 该系统一次采样可以检测 98 种 VOCs (碳氢化合物、卤代烃、含氧挥发性有机物).

氮氧化物浓度由 $NO-NO_2-NO_x$ 分析仪 (Thermo 42i, US) 通过化学发光法测量, 原理为 NO 在电子刺激状态下会生产激发态的 NO_2 分子, 这些激发态的 NO_2 分子会迅速返回到基态的 NO_2 , 同时在 600 ~ 2400 nm 光谱范围内发光, 产生的光强度与 NO 浓度成正比. 该仪器最低检出限为 0.40×10^{-9} ; 零漂: 小于 $0.40\% / 24 h$; 跨漂: $\pm 1\% / 24 h$ (满量程); 线性度: $\pm 1\%$ (满刻度); 响应时间: 80 s (60 s 平均时间); 零噪声: 0.20×10^{-9} .

臭氧浓度由 O_3 分析仪 (Thermo 49i, US) 通过

紫外光度法测量,原理为样气进入仪器后通过除水器分成两路气流,一路通过臭氧净气器成为参比气,另一路成为有臭氧的样气,臭氧分子对 254 nm 波长的紫外光有特征吸收,两路气体通过吸收池时分别被光检测器检测光强度,该波段紫外光被吸收的程度与臭氧浓度有关,可通过该波段紫外光被吸收的程度计算臭氧浓度. 仪器处理系统根据朗伯-比耳定律求出臭氧的质量浓度. 分析仪最低检出限为 0.50×10^{-9} ; 零漂: 小于 1%/24 h, 小于 2%/7 d; 跨漂: 1%/1 月(满度值); 线性度: $\pm 1\%$ (满刻度) 响应时间: 20 s (10 s 滞后时间); 零噪声: 0.25×10^{-9} .

气象参数(空气温度、湿度)由江苏省气象台自

动观测站提供相关资料.
为保证观测数据的有效性和可靠性,观测期间每天进行一次校零和校标.

1.3 OFP 计算方法

以 Carter 研究给出的最大增量反应活性(max incremental reactivities, MIR)的修正值计算臭氧生成潜势(OFP), OFP 为某 VOCs 化合物环境体积分数与该 VOCs 的 MIR 系数的乘积,计算公式为:

$$OFP_i = MIR_i \times [VOCs]_i$$

式中, $[VOCs]_i$ 表示实际观测中的某 VOCs 大气环境浓度,单位为 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$; MIR_i 表示某 VOCs 化合物在臭氧最大增量反应中的臭氧生成系数,本研究引用 Carter 研究所得的 MIR 系数^[27],见表 1.

表 1 2013 年 8 月南京观测期间 69 种主要 VOCs 的平均值及其臭氧生成潜势¹⁾

Table 1 Averaged concentrations of 69 kinds of major VOCs and ozone formation potential during the observation period in August 2013 in Nanjing ¹⁾						
项目	组分名称	检出限 $\times 10^{-9}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MIR	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OFP % /%
烷烃	乙烷	0.05	4.60	0.28	1.29	0.35
	丙烷	0.021	5.18	0.49	2.54	0.69
	异丁烷	0.012	4.64	1.23	5.71	1.56
	正丁烷	0.03	4.70	1.15	5.40	1.47
	环戊烷	0.026	0.30	2.39	0.73	0.20
	2-甲基丁烷	0.012	4.47	1.45	6.48	1.77
	正戊烷	0.026	1.94	1.31	2.54	0.69
	2,2-二甲基丁烷	0.007	0.22	1.17	0.26	0.07
	2,3-二甲基丁烷	0.005	0.19	0.97	0.19	0.05
	2-甲基戊烷	0.005	2.40	1.5	3.60	0.98
	3-甲基戊烷	0.007	1.54	1.8	2.77	0.76
	正己烷	0.016	3.24	1.07	3.46	0.94
	2,4-二甲基戊烷	0.005	0.19	1.55	0.29	0.08
	甲基环戊烷	0.008	0.70	2.19	1.54	0.42
	2-甲基己烷	0.008	0.61	1.19	0.72	0.20
	环己烷	0.004	0.70	1.46	1.03	0.28
	2,3-二甲基戊烷	0.016	0.31	1.34	0.41	0.11
	3-甲基己烷	0.006	0.70	1.61	1.13	0.31
	2,2,4-三甲基戊烷	0.003	0.18	1.26	0.23	0.06
	正庚烷	0.007	0.86	1.07	0.92	0.25
	甲基环己烷	0.008	0.52	1.7	0.88	0.24
	2,3,4-三甲基戊烷	0.008	0.14	1.03	0.14	0.04
	2-甲基庚烷	0.008	0.25	1.07	0.27	0.07
	3-甲基庚烷	0.009	0.24	1.24	0.29	0.08
	正辛烷	0.121	0.52	0.9	0.47	0.13
	正壬烷	0.021	0.61	0.78	0.48	0.13
	正癸烷	0.03	1.13	0.68	0.77	0.21
	十一烷	0.02	1.00	0.61	0.61	0.17
	十二烷	0.01	1.82	0.55	1.00	0.27
烯/炔烃	乙烯	0.03	2.57	9	23.13	6.31
	丙烯	0.025	1.73	11.66	20.14	5.49
	乙炔	0.048	4.73	0.95	4.49	1.22
	反-2-丁烯	0.031	0.33	15.16	4.97	1.36
	正丁烯	0.03	0.57	9.73	5.53	1.51
	顺-2-丁烯	0.023	0.28	14.24	3.99	1.09
	1,3-丁二烯	0.03	0.07	12.61	0.85	0.23
	1-戊烯	0.009	0.20	7.21	1.43	0.39
	反-2-戊烯	0.008	0.11	10.56	1.18	0.32
	异戊二烯	0.015	1.35	10.61	14.32	3.91

续表 1

项目	组分名称	检出限 $\times 10^{-9}$	平均值/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	MIR	OFP/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	OFP* /%
烯/炔烃	顺-2-戊烯	0.008	0.08	10.38	0.82	0.22
	1-己烯	0.011	0.17	5.49	0.93	0.25
芳香烃	苯	0.007	4.33	0.72	3.12	0.85
	甲苯	0.005	13.30	4	53.20	14.51
	乙基苯	0.003	5.74	3.04	17.45	4.76
	间,对-二甲苯	0.002	6.81	7.8	53.11	14.49
	邻-二甲苯	0.003	2.07	7.64	15.81	4.31
	苯乙烯	0.013	0.67	1.73	1.17	0.32
	异丙基苯	0.02	0.40	2.52	1.01	0.28
	丙基苯	0.016	0.40	2.03	0.81	0.22
	间-甲乙苯	0.02	0.73	7.39	5.40	1.47
	对-甲乙苯	0.02	0.55	4.44	2.44	0.67
	1,3,5-三甲苯	0.004	0.50	11.76	5.89	1.61
	邻-甲乙苯	0.02	0.40	5.59	2.23	0.61
	1,2,4-三甲苯	0.003	0.92	8.87	8.19	2.23
	1,2,3-三甲苯	0.002	0.46	11.97	5.50	1.50
	1,3-二乙基苯	0.02	0.34	7.1	2.43	0.66
	1,4-二乙基苯	0.03	0.95	4.43	4.20	1.15
含氧有机物	丙烯醛	0.022	0.32	7.45	2.40	0.66
	丙醛	0.014	1.23	7.08	8.69	2.37
	2-甲基丙烯醛	0.01	1.01	6.01	6.07	1.66
	丁醛	0.015	0.32	5.97	1.91	0.52
	戊醛	0.010	0.22	5.08	1.14	0.31
	正己醛	0.017	1.06	4.35	4.62	1.26
	丙酮	0.011	16.06	0.36	5.78	1.58
	丁烯酮	0.015	2.21	9.65	21.35	5.82
	2-丁酮	0.014	1.85	1.48	2.73	0.75
	2-戊酮	0.007	0.18	2.81	0.51	0.14
	3-戊酮	0.020	0.09	1.24	0.11	0.03
	甲基叔丁基醚	0.025	1.92	0.73	1.40	0.38
TVOCs			128.74		366.62	1

1) OFP* 表示各个物种的 OFP 占总测量 VOCs 的 OFP 的百分比

2 分析与讨论

2.1 南京夏季 VOCs 体积分数水平及组成特征

本研究共监测出 98 种挥发性有机化合物,其中烷烃 29 种,烯/炔烃 12 种,芳烃 16 种,含氧有机物 12 种,而其余 29 种物种为 28 种卤代烃和乙腈,因其对臭氧生成的贡献很低,本研究主要对表 1 中的 69 种非甲烷碳氢化合物和含氧有机物进行分析. 亚青会期间,烷烃、烯炔、芳香烃及含氧有机物的平均体积分数依次为 18.84×10^{-9} 、 6.92×10^{-9} 、 10.46×10^{-9} 和 15.83×10^{-9} .

南京大气中 VOCs 与国内其他典型城市的 VOCs 体积分数水平的研究结果在污染状况相近的情景下进行比较,结果见图 2. 发现北京^[12] VOCs 浓度水平最低,广州^[18]、上海^[28]、南京的 VOCs 体积分数水平大体相同,南京 VOCs 总平均体积分数达 52.05×10^{-9} ,已赶超北京,VOCs 污染较为严重.

由图 3 得出排名前 10 的物种中烷烃含量最大,

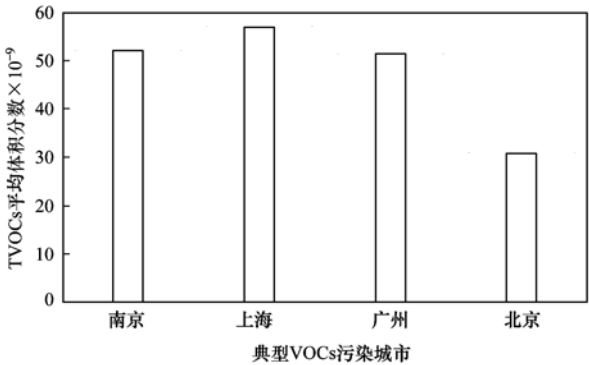


图 2 典型污染城市 VOCs 体积分数

Fig. 2 Volume concentration of VOCs in typical polluted cities

但臭氧生成贡献最小. 其中乙烷、丙烷、正/异丁烷等烷烃主要来源于液化石油气的泄漏^[29,30], 甲苯、间/对二甲苯和乙烯、乙炔等主要来源于涂料/溶剂的实用,工业排放的石油化工源和交通排放^[31,32]. 芳香烃对 OFP 的贡献最大,其次为含氧有机物和烯炔,主要来源于涂料/溶剂的实用和工业生产的排

放^[33,34],因此在进行 VOCs 污染和臭氧污染的控制中要着重控制烷烃和芳香烃的源排放. 由图 4 得出南京 8 月各类组分含量百分比为:烷烃 > 含氧有机物 > 芳香烃 > 烯/炔烃,并且各组份含量有明显的差

别;而各类组分 OFP 百分比的大小为:含氧有机物 > 烯/炔烃 > 芳香烃 > 烷烃,且有一定差别. 由此看出各组份含量占比与其 OFP 占比并不一致,即各组份含量与其 OFP 贡献不成正比.

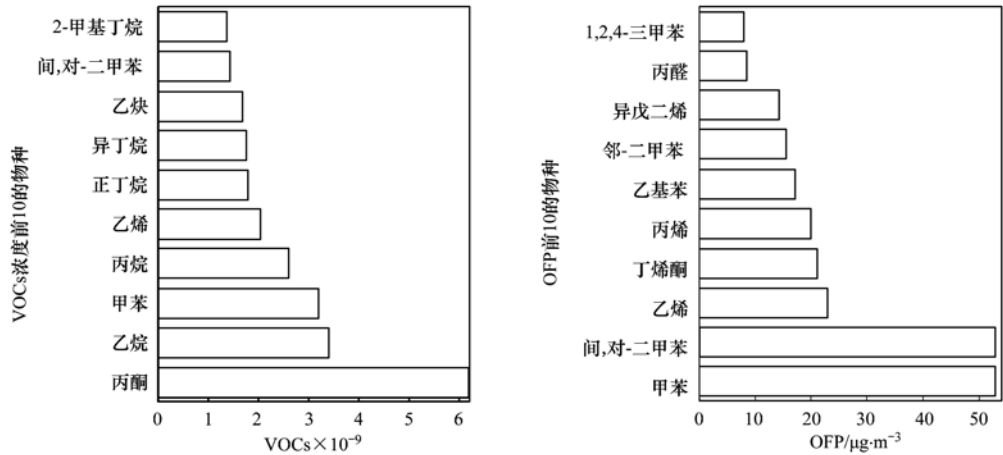


图 3 2013 年 8 月观测期间 VOCs 体积分数和其 OFP 前 10 位的物种

Fig. 3 Ten most abundant species of VOCs concentration and its OFP during the observation period in August 2013

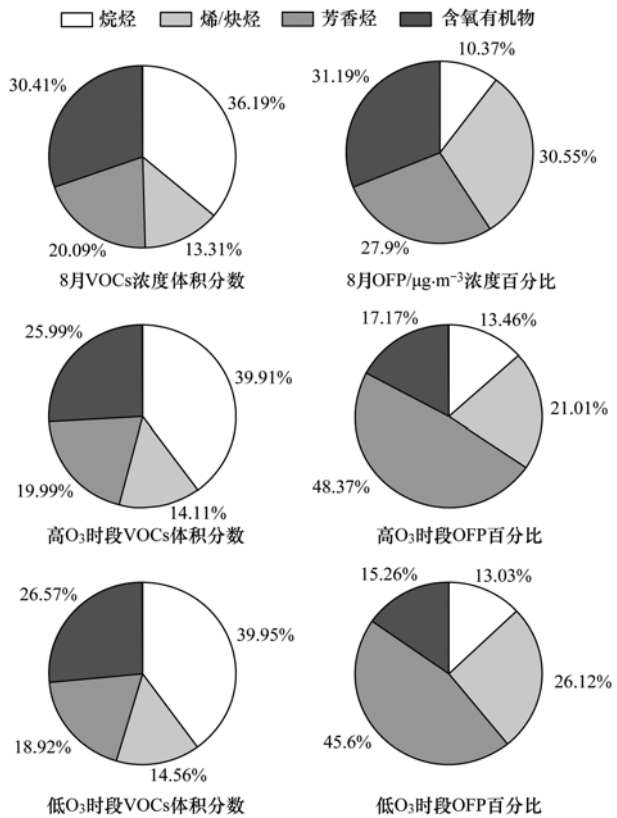


图 4 2013 年 8 月及高、低臭氧质量浓度日 VOCs 化学组成及其 OFP 所占百分比

Fig. 4 Percentage of VOCs groups and its OFP on days with high and low ozone concentration during the observation period in August 2013

南京在观测期间出现高臭氧浓度时段为 8 月 10~18 日,低臭氧浓度时段为 8 月 19~27 日. 选取

该高、低 O₃ 时段进行分析, VOCs 总体积分数和臭氧生成潜势分别为 42.94×10^{-9} 、 $374.96 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 42.47×10^{-9} 、 $361.45 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, VOCs 总体积分数和臭氧生成潜势相差很小,这是由于 VOCs 化学组成的含量差别造成的. 而之所以在高、低臭氧浓度时段出现相差不大的臭氧生成潜势,是因为 O₃ 的生成与前体物 VOCs 的大气环境浓度关系十分复杂^[7]. O₃ 的生成是前体物 VOCs 消耗的结果,相比 O₃ 浓度与 VOCs 环境水平的关系, O₃ 浓度与 VOCs 消耗量关系更紧密^[35]. 观测点高、低质量浓度臭氧时段 VOCs 化学组成的变化特征及其 OFP 所占百分比(如图 4),结果表明臭氧高、低质量浓度时段 VOCs 各组分含量和臭氧生成潜势也无明显的差别. 在高、低质量浓度臭氧时段的情况下各组分含量均为:烷烃 > 含氧有机物 > 芳香烃 > 烯/炔烃,而 VOCs 各类组分 OFP 百分比的大小为:芳香烃 > 烯/炔烃 > 含氧有机物 > 烷烃.

结果得出高、低臭氧质量浓度时段 VOCs 含量最高的都是烷烃,分别为 39.91% 和 39.96%,由于烷烃化学活性低,因此对臭氧生成贡献较低分别为 13.46% 和 13.03%;含氧有机物含量分别 25.99% 和 26.57%,对臭氧生成贡献分别为 17.17% 和 15.26%;芳香烃和烯/炔烃虽然含量相对较低,但其化学活性较高,因此臭氧生成贡献较大. 其中高臭氧时段含量分别为 19.99% 和 14.11%,臭氧生成贡献分别为 48.37% 和 21.01%. 低臭氧时段芳香烃和烯/炔烃含

量分别为 18.92% 和 14.56%, 臭氧生成贡献分别为 45.60% 和 26.12%。烯烃百分比低于低臭氧质量浓度日, 芳香烃百分比却高于低臭氧质量浓度日, 这可能是由于在高臭氧质量浓度日, 太阳辐射比较强烈, 烯烃的沸点低挥发较快, 且光化学反应加剧, 较多的活泼烯烃光化学氧化生成臭氧, 而芳香烃在光照强烈日由于溶剂挥发加强而含量增加, 由此可知对臭氧有生成贡献的主要是烯/炔烃和芳香烃。

2.2 南京夏季臭氧及其前体物的变化

南京城区大气中 VOCs 总平均体积分数为 52.05×10^{-9} (图 5), 体积分数水平大致在 $(30 \sim 95) \times 10^{-9}$ 之间, 而 8 月 6 日下午到 7 日下午体积分数水平较高, 6 日晚上出现最高体积分数 200×10^{-9} ;

而 8 月南京市整体 O_3 质量浓度较高, 有明显的日变化特征。期间 8 月 10 ~ 18 日的 O_3 最高小时质量浓度均超过《环境空气质量标准》(GB 3095-1996) 二级标准的 $200 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。 O_3 质量浓度高值则主要集中在 8 月 11、12、13、17 和 18 日的 11:00 ~ 16:00, 且 O_3 小时均值累积有 5 ~ 7h 超标, 最高值达到 $354 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 已经严重超标, 因此可以看出南京市夏季 O_3 污染比较严重。 8 月 19 ~ 23 日 O_3 质量浓度较低, 此期间 VOCs 较 8 月 6 日和 8 月 7 日反而显著减少。 而由图 6 可知 O_3 的另一前体物 NO_x 与 O_3 呈明显的反相关关系, 且期间并无降雨, 辐射强度大, 又因在高温, 低湿状态下有利于光化学反应的加强, 所以对 O_3 生成贡献加大。

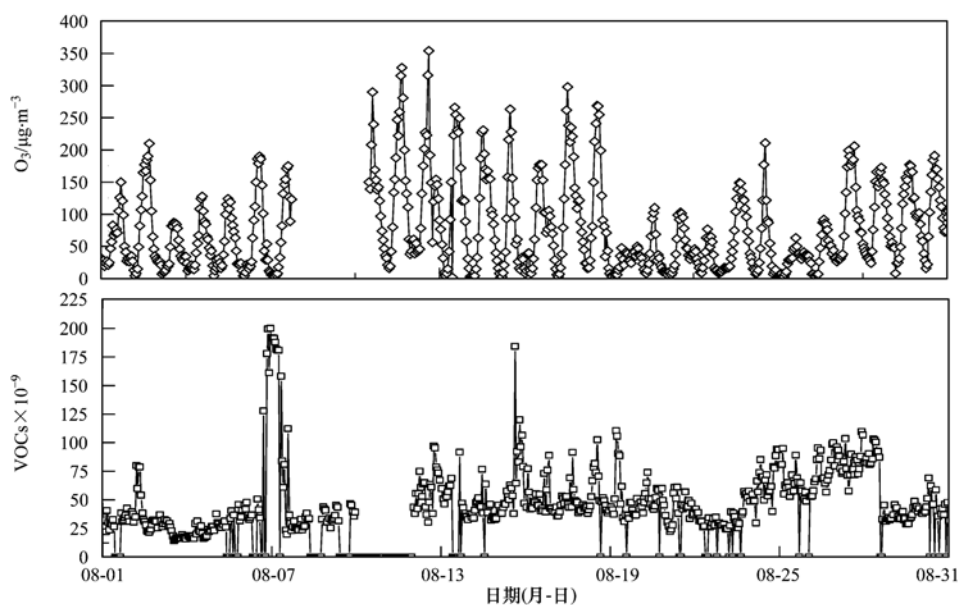


图 5 2013 年 8 月南京观测期间 VOCs 和 O_3 时间序列变化

Fig. 5 Time series of VOCs and O_3 during the observation period in August 2013 in Nanjing

臭氧是二次污染物, 其生成依赖于 NO 、 NO_2 和 CO 等前体物的浓度和化学反应, 而白天的光化学反应又是全天 O_3 变化的基础。 2013 年 8 月 12 ~ 19 日观测臭氧超标时段的 VOCs、 O_3 、 NO 、 NO_2 浓度的变化趋势 (图 7), 污染物浓度都处于较高水平, 属于污染时段。 臭氧污染期间, 前体物 VOCs 和 NO_x (NO 、 NO_2) 变化基本一致, 与 O_3 变化呈明显的反相关关系; NO 和 NO_2 均在早晨出现高质量浓度, NO 峰值的出现最早。 日出后人类活动 (尤其是交通运输和工业排放) 排放的 NO 、VOCs 量增加, 使 NO 质量浓度在 07:00 左右达到峰值, 随着光化学反应的加剧, O_3 质量浓度逐渐升高, NO 被 O_3 等氧化剂氧

化为 NO_2 , 随后在 08:00 左右出现 NO_2 的第一个峰, 傍晚太阳辐射减弱, 因光化学反应造成的 NO_2 损失减少, NO_2 累积且在 19:00 左右出现峰值, 夜间 NO 和 NO_2 等一次污染物不断积累并消耗 O_3 , 则日出前 O_3 质量浓度达到一天的最低值。

2.3 南京夏季臭氧生成控制敏感性分析

用 VOCs 与 NO_x 的比值来判断臭氧生成是受 VOCs 控制还是 NO_x 控制, 是一种定性分析大气臭氧质量浓度与 VOCs 和 NO_x 的关系的方法^[36,37]。 光化学生成 O_3 反应始于 OH 自由基与 VOCs 反应, 此过程中 NO_x 和 VOCs 争夺 OH 自由基, 在特定 VOCs/ NO_x 的比值下使产生的臭氧质量浓度最高,

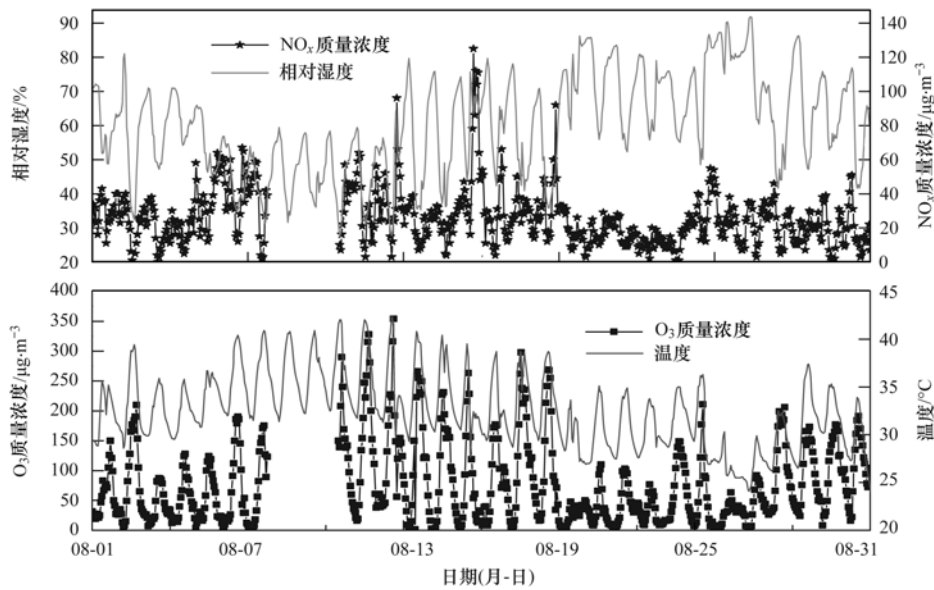


图 6 2013 年 8 月南京观测期间 O₃、NO_x 及温湿度变化

Fig. 6 Variation of O₃, NO_x, temperature and humidity during the observation period in August 2013 in Nanjing

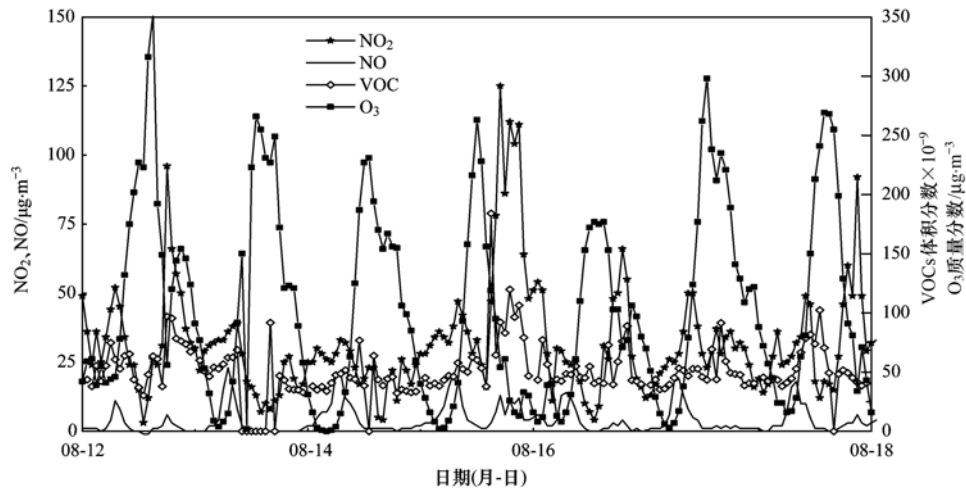


图 7 臭氧污染期间南京城区观测点 O₃、NO₂、NO、VOCs 的时间序列

Fig. 7 Time series of O₃, NO₂, NO, VOCs during ozone pollution in the observation period in Nanjing City

此时 OH 自由基与 VOCs 和 NO_x 的反应速率相等. 在 VOCs/NO_x 比值较小时, OH 自由基和 NO_x 反应占主导地位, 臭氧生成对 VOCs 体积分数比较敏感; 反之臭氧生成对 NO_x 比较敏感^[36]. 而在城市典型大气条件下这个特定的 VOCs/NO_x 比值为 5.5. 当 VOCs/NO_x 比值小于 5.5 时 OH 自由基和 NO_x 反应比 OH 自由基和 VOCs 反应快, 在争夺反应中占主导地位, 臭氧生成对 VOCs 体积分数较敏感; 反之, 则臭氧生成对 NO_x 质量浓度更为敏感.

以夏季南京 VOCs/NO_x 所有小时体积分数比值进行分析, 得出 VOCs/NO_x 比值小于 5.5 的小时频率远大于 VOCs/NO_x 比值大于 5.5 的小时频率(图

8), 则减少 NO_x 有利于臭氧生成, 则此段时间内南

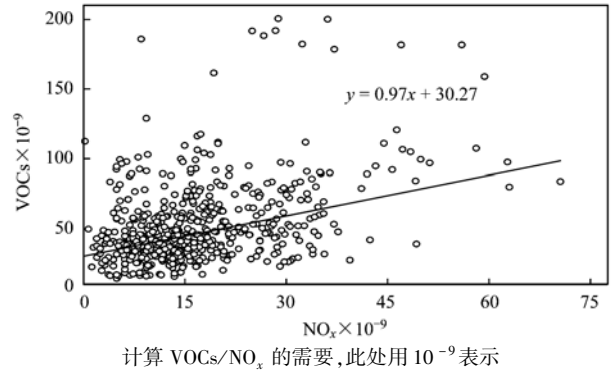


图 8 观测期间 VOCs/NO_x 比值

Fig. 8 Ratio of VOCs/NO_x during the observation period

京臭氧生成对 VOCs 比较敏感,属于 VOCs 控制区^[36].而 VOCs/NO_x 比值的高值则是因为 NO_x 出现极小值造成的,VOCs 值并未出现高值.

3 结论

(1) 南京大气中共检测出 98 种 VOCs 物种,VOCs 体积分数水平在 30 ~ 95 μg·m⁻³之间,最高体积分数达到 200 μg·m⁻³,平均体积分数为 43.7 μg·m⁻³.

(2) 南京 8 月各组分含量及其 OFP 百分比分别为:烷烃 > 含氧有机物 > 芳香烃 > 烯/炔烃,含氧有机物 > 烯/炔烃 > 芳香烃 > 烷烃;臭氧高、低质量浓度时段 VOCs 总体体积分数和臭氧生成潜势相差不大,VOCs 各组分含量和 OFP 百分比均分别为:烷烃 > 含氧有机物 > 芳香烃 > 烯/炔烃,芳香烃 > 烯/炔烃 > 含氧有机物 > 烷烃.

(3) 南京市夏季 O₃ 污染比较严重,有明显日变化特征.污染期间臭氧前体物 VOCs,NO_x 质量浓度较高,且变化趋势基本一致,与 O₃ 变化呈明显的反相关关系.

(4) 南京市夏季臭氧生成对 VOCs 较敏感,属于 VOCs 控制区.

参考文献:

- [1] 朱彬,安俊岭,王自发,等.光化学臭氧日变化特征与其前体物关系的探讨[J].南京气象学院学报,2006,29(6): 744-749.
- [2] 安俊林,朱彬,李用宇,等.南京北郊大气 VOCs 体积分数变化特征[J].环境科学,2013,34(12): 4504-4512.
- [3] Zhang J Y, Wang T, Chameides W L, et al. Source characteristics of volatile organic compounds during high ozone episodes in Hong Kong, Southern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2008, 8(3): 8847-8879.
- [4] Geng F H, Zhao C S, Tang X, et al. Analysis of ozone and VOCs measured in Shanghai: A case study [J]. Atmospheric Environment, 2007, 41(5): 989-1001.
- [5] 王红丽,陈长虹,黄成,等.上海市城区春节和“五一”节期间大气挥发性有机物的组成特征[J].环境科学学报,2010,30(9): 1749-1757.
- [6] Cai C J, Geng F H, Tie X X, et al. Characteristics of ambient volatile organic compounds (VOCs) measured in Shanghai, China [J]. Sensors, 2010, 10(8): 7843-7862.
- [7] 王红丽.上海市大气挥发性有机物化学消耗与臭氧生成的关系[J].环境科学,2015,36(9): 3159-3167.
- [8] Geng F H, Tie X X, Xu J M, et al. Characterizations of ozone, NO_x, and VOCs measured in Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(29): 6873-6883.
- [9] 王雪松,李金龙.人为源排放 VOC 对北京地区臭氧生成的贡献[J].中国环境科学,2002,22(6): 501-505.
- [10] 邵敏,付琳琳,刘莹,等.北京市大气挥发性有机物的关键活性组分及其来源[J].中国科学 D 辑:地球科学,2005,35(增刊 I): 123-130.
- [11] 马志强,王跃思,张小玲,等.北京城区与下游地区臭氧对比研究[J].环境科学,2011,32(4): 924-929.
- [12] 吴方堃,王跃思,安俊琳,等.北京奥运时段 VOCs 浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J].环境科学,2010,31(1): 10-16.
- [13] 刘玉彻,徐敬,王淑凤,等.影响北京夏季 O₃ 污染的 O₃ 前体物浓度及天气条件分析[J].气象与环境学报,2006,22(6): 34-37.
- [14] 解鑫,邵敏,刘莹,等.大气挥发性有机物的日变化特征及在臭氧生成中的作用——以广州夏季为例[J].环境科学学报,2009,29(1): 54-62.
- [15] 王伯光,张远航,邵敏.珠江三角洲大气环境 VOCs 的时空分布特征[J].环境科学,2004,25(增刊): 7-15.
- [16] 余应新,文晟,吕辉雄,等.广州森林大气中 VOCs 昼夜变化特征及对 O₃ 的影响[J].环境科学与技术,2009,32(3): 94-98.
- [17] 陈洪伟,李攻科,李核,等.广州地区大气中挥发性有机物的污染状况[J].环境化学,2003,22(1): 89-92.
- [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.
- [19] 陆克定,张远航,苏杭,等.珠江三角洲夏季臭氧区域污染及其控制因素分析[J].中国科学 B 辑:化学,2010,40(4): 407-420.
- [20] 徐慧,张晗,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.
- [21] 洪盛茂,焦荔,何曦,等.杭州典型区域 C₂₋₁₂ 质量浓度变化及臭氧潜势量分析[J].环境科学研究,2009,22(8): 938-943.
- [22] 朱少峰,黄晓锋,何凌燕,等.深圳大气 VOCs 浓度的变化特征与化学反应活性[J].中国环境科学,2012,32(12): 2140-2148.
- [23] 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.
- [24] 安俊琳,杭一纤,朱彬,等.南京北郊大气臭氧浓度变化特征[J].生态环境学报,2010,26(6): 1383-1386.
- [25] 杨俊梅,李培仁,李义宇,等.南京北郊 O₃、NO₂ 和 SO₂ 变化特征分析[J].气象与环境学报,2014,30(3): 66-70.
- [26] Zhang Y J, Tang L L, Wang Z, et al. Insights into characteristics, sources, and evolution of submicron aerosols during harvest seasons in the Yangtze River delta region, China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2015, 15(3): 1331-1349.
- [27] Cater W P L. Development of ozone reactivity scales for volatile organic compounds [J]. Journal of the Air and Waste Management Association, 1994, 44(7): 881-899.
- [28] 崔虎雄,吴迺名,高松,等.上海城区典型污染过程 VOCs 特征及臭氧潜势分析[J].环境科学,2011,32(12): 3537-3542.
- [29] 邵敏,赵美萍,白郁华,等.北京地区大气中非甲烷碳氢化

- 合物(NMHC)的人为源排放特征研究[J]. 中国环境科学, 1994, **14**(1): 6-12.
- [30] Thornhill D A, Williams A E, Onasch T B, *et al.* Application of positive matrix factorization to on-road measurements for source apportionment of diesel- and gasoline-powered vehicle emissions in Mexico City[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2010, **10**(8): 3629-3644.
- [31] Batterman S A, Peng C Y, Braun J, *et al.* Levels and composition of volatile organic compounds on commuting routes in Detroit, Michigan[J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(39-40): 6015-6030.
- [32] Chiang P C, Chiang Y C, Chang E E. Characterizations of hazardous air pollutants emitted from motor vehicles [J]. Toxicological and Environmental Chemistry, 1996, **56**(1-4): 85-104.
- [33] 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.
- [34] Chan L Y, Chu K W, Zou S C, *et al.* Characteristics of nonmethane hydrocarbons (NMHCs) in industrial, industrial-urban, and industrial-suburban atmospheres of the Pearl River Delta (PRD) region of south China[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, **111**: D11304.
- [35] 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.
- [36] 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. 225-233.
- [37] Sillman S. The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(12): 1821-1845.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行