

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第11期

Vol.35 No.11

**2014**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征 ..... 邵平, 安俊琳, 杨辉, 林旭, 吉东生 (4031)

亚青会期间南京污染气体与气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 邹嘉南, 安俊琳, 王红磊, 邵平, 段卿, 薛国强, 庞博 (4044)

亚青会期间南京地区气溶胶浓度变化及其与能见度的关系 ..... 袁亮, 银燕, 李琦, 肖辉, 李力 (4052)

2013年10月长株潭城市群一次持续性空气污染过程特征分析 ..... 廖志恒, 范绍佳, 黄娟, 孙家仁 (4061)

在线单颗粒气溶胶质谱 SPAMS 对细颗粒物中主要组分提取方法的研究 ..... 付怀于, 闫才青, 郑玫, 蔡靖, 李小滢, 张延君, 周振, 傅忠, 李梅, 李磊, 张远航 (4070)

PM<sub>10</sub>可替代源成分谱的建立方法及其应用 ..... 陈强, 景毅, 吴焕波, 王芳 (4078)

夏季东海和南黄海一氧化碳的浓度分布、海-气通量和微生物消耗研究 ..... 王敬, 陆小兰, 杨桂朋, 徐冠球 (4085)

三峡库区典型农田小流域水体汞的时空分布特征 ..... 王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇 (4095)

浑太水水体中不同粒径有机胶体荧光光谱特性 ..... 刘娜娜, 李斌, 刘瑞霞, 宋永会, 吴畏 (4103)

深圳湾流域 TN 和 TP 入海年通量变化规律研究 ..... 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠 (4111)

滇池沉积物有机磷垂直分布特征及其生物有效性 ..... 熊强, 焦立新, 王圣瑞, 彭希琰 (4118)

金山湖闸坝型水体表层沉积物重金属分布特征及生态风险评价 ..... 周晓红, 刘龙梅, 陈曦, 陈志刚, 张金萍, 李义敏, 刘彪 (4127)

西藏普莫雍错湖芯沉积物中重金属的垂向分布特征及生态风险评估 ..... 谢婷, 罗东霞, 杨瑞强 (4135)

西安市雨水径流中重金属季节性污染特征及分析 ..... 袁宏林, 李星宇, 王晓昌 (4143)

城市不同下垫面降雨径流多环芳烃(PAHs)分布及源解析 ..... 武子澜, 杨毅, 刘敏, 陆敏, 于英鹏, 汪青, 郑鑫 (4148)

粗放型绿色屋面填料的介质组成对出水水质的影响 ..... 陈昱霖, 李田, 顾俊青 (4157)

饮用水处理中不同来源生物活性炭微生物群落多样性和结构研究 ..... 杜尔登, 郑璐, 冯欣欣, 高乃云 (4163)

压力强化混凝除藻工艺中藻毒素安全性研究 ..... 蒋新跃, 栾清, 丛海兵, 徐思涛, 刘玉娇, 朱学源 (4171)

基于膜特征参数变化的蛋白质超滤过程膜污染研究 ..... 王旭东, 张银辉, 王磊, 张慧慧, 夏四清 (4176)

臭氧氧化水溶液中对乙酰氨基酚的机制研究 ..... 曹飞, 袁守军, 张梦涛, 王伟, 胡真虎 (4185)

电辅助微生物反应器降解苯并噻唑效能的研究 ..... 刘春苗, 丁杰, 刘先树, 程旺斌 (4192)

铁镧复合氧化物纳米吸附剂的制备、表征及 As(III)吸附性能研究 ..... 张伟, 陈静, 张高生 (4198)

重金属铬胁迫下水蚯蚓的生理响应研究 ..... 楼菊青, 杨东叶, 曹永青, 孙培德, 郑平 (4205)

光质对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)生长特征及生化组成的影响研究 ..... 唐青青, 方治国, 嵇雯雯, 夏会龙 (4212)

常温低基质下碱度和溶解氧对厌氧氨氧化的影响 ..... 任玉辉, 王科, 李相昆, 马凯丽, 张杰 (4218)

Fe<sup>2+</sup>和 Fe<sup>3+</sup>对厌氧氨氧化污泥活性的影响 ..... 李祥, 黄勇, 巫川, 王孟可, 袁怡 (4224)

CSTR 中亚硝化颗粒污泥的变化过程研究 ..... 阴方芳, 刘文如, 王建芳, 吴鹏, 沈耀良 (4230)

盐度对好氧颗粒污泥硝化过程中 N<sub>2</sub>O 产生量的影响 ..... 王珊珊, 梁红, 高大文 (4237)

硫酸盐还原反应器污泥驯化过程中微生物群落变化分析 ..... 曾国驱, 贾晓珊, 郑小红, 杨丽平, 孙国萍 (4244)

利用铅同位素方法量化不同端元源对南京土壤和长江下游悬浮物铅富集的影响 ..... 王成, 夏学齐, 张义, 廖启林, 杨忠芳, 季峻峰 (4251)

北京东南郊土壤剖面氟喹诺酮类抗生素分布特征 ..... 苏思慧, 何江涛, 杨蕾, 乔肖翠, 崔亚丰 (4257)

环境因素对土壤中几种典型四环素抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 罗方园, 熊浩徽, 焦少俊, 叶波平 (4267)

稻田土壤不同水分条件下硝化/反硝化作用及其功能微生物的变化特征 ..... 刘若萱, 贺纪正, 张丽梅 (4275)

典型岩溶土壤微生物丰度与多样性及其对碳循环的指示意义 ..... 靳振江, 汤华峰, 李敏, 黄炳富, 李强, 张家喻, 黎桂文 (4284)

变温环境对典型石灰土有机碳矿化的影响 ..... 王莲阁, 高若红, 丁长欢, 慈恩, 谢德体 (4291)

铁氧化物与电子供体基质交互作用对红壤性水稻土中 DDT 还原脱氯影响 ..... 刘翠英, 徐向华, 王壮, 姚童言 (4298)

植物套种及化学强化对重金属污染土壤的持续修复效果研究 ..... 卫泽斌, 郭晓方, 吴启堂, 龙新宪 (4305)

不同取样尺度下亚高山草甸土壤呼吸的空间变异特征 ..... 李洪建, 高玉凤, 严俊霞, 李君剑 (4313)

不同开垦年限黑土温室气体排放规律研究 ..... 李平, 郎漫, 徐向华, 李煜姗, 朱淑娟 (4321)

转 Cry1Ac 基因抗虫棉与其亲本棉花根际真菌多样性的比较 ..... 潘建刚, 焦海华, 白志辉, 齐鸿雁, 马安周, 庄国强, 张洪勋 (4329)

天津污灌区内气态汞的污染特征及在叶菜类蔬菜中的富集 ..... 郑顺安, 韩允垒, 郑向群 (4338)

1-硝基萘和 1,2-萘醌的联合细胞毒性和致 DNA 损伤 ..... 尚羽, 蒋玉婷, 张玲, 李怡 (4345)

鸡粪堆肥有机物演化对重金属生物有效性影响研究 ..... 卜贵军, 于静, 邱慧慧, 罗世家, 周大寨, 肖强 (4352)

污泥预植重金属 Cu 炭化及炭中重金属的稳定性研究 ..... 窦晓敏, 陈德珍, 戴晓虎 (4359)

上层曝气式生物反应器填埋工艺特性的研究 ..... 田颖, 王坤, 徐期勇 (4365)

硝酸盐连续回灌对生物反应器填埋场 N<sub>2</sub>O 产生的影响 ..... 卞荣星, 孙英杰, 李晶晶, 张欢欢 (4371)

中国碳强度下降和碳排放增长的行业贡献分解研究 ..... 蒋晶晶, 叶斌, 计军平, 马晓明 (4378)

泛长三角地区工业污染重心演变路径及其驱动机制研究 ..... 赵海霞, 蒋晓威, 崔建鑫 (4387)

基于污染防治技术模拟的造纸行业环境管理方法研究 ..... 张雪莹, 温宗国 (4395)

大气棕色碳的研究进展与方向 ..... 闫才青, 郑玫, 张远航 (4404)

《环境科学》征稿简则(4094) 《环境科学》征订启事(4126) 信息(4243, 4266, 4274, 4328)

# 南京北郊夏季近地层臭氧及其前体物体积分数变化特征

邵平<sup>1,2</sup>, 安俊琳<sup>1\*</sup>, 杨辉<sup>1</sup>, 林旭<sup>1</sup>, 吉东生<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室, 南京 210044; 2. 中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029)

**摘要:** 南京北郊, 钢铁、石化等重工业集中, 大气污染现状不容乐观. 为了研究此类重工业地区夏季光化学污染特征, 于 2013 年 5 月 18 日~8 月 31 日连续观测了臭氧及其前体物的浓度并同时记录了常规气象要素. 结果表明, 观测期间臭氧(O<sub>3</sub>)、氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs)平均体积分数分别为(32.01 ± 15.20) × 10<sup>-9</sup>、(21.50 ± 14.02) × 10<sup>-9</sup>、(33.16 ± 25.20) × 10<sup>-9</sup>, 一氧化碳(CO)为(0.66 ± 0.44) × 10<sup>-6</sup>; O<sub>3</sub> 体积分数小时均值最大值达 146.42 × 10<sup>-9</sup>; O<sub>3</sub> 超过国家环境空气质量二级标准 14.1%. 对污染物进行浓度频率分布近似得到观测期间 O<sub>3</sub>、NO<sub>x</sub> 和 VOCs 背景体积分数分别为(5.71 ± 2.51) × 10<sup>-9</sup>、(12.20 ± 0.36) × 10<sup>-9</sup>和(22.44 ± 0.38) × 10<sup>-9</sup>, CO 为(0.28 ± 0.01) × 10<sup>-6</sup>. 观测点污染物受周边排放源的影响较大. 在风速为 2~3 m·s<sup>-1</sup> 的西南风作用下, VOCs 中的活性物种体积分数较高, O<sub>3</sub> 体积分数容易累积达到高值; 偏东风主导下主要来自周边工业源和交通源的 NO<sub>x</sub>、CO 和 VOCs 体积分数易出现高值. 南京亚青期间对工业生产和部分机动车采取了调控措施, O<sub>3</sub> 体积分数未明显减少, 并有 4 d 超过国家二级标准.

**关键词:** 南京北郊; 工业区; O<sub>3</sub>; NO<sub>x</sub>; VOCs

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)11-4031-13 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.11.001

## Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb

SHAO Ping<sup>1,2</sup>, AN Jun-lin<sup>1</sup>, YANG Hui<sup>1</sup>, LIN Xu<sup>1</sup>, JI Dong-sheng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory for Aerosol-Cloud-Precipitation of China Meteorological Administration, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract:** It is not optimistic about current air quality in Nanjing northern suburb, an area with the agglomeration of heavy industry such as steel-making and petrochemical industry. Measurement of ozone and its precursors conducted from May 18<sup>th</sup> to August 31<sup>st</sup>, with the Meteorological data recorded simultaneously, were analyzed to characterize the local photochemical pollution in summertime. The results showed that the average volume fraction of ozone (O<sub>3</sub>), nitrogen oxide (NO<sub>x</sub>) and volatile organic compounds (VOCs) in Nanjing northern suburb was about (32.01 ± 15.20) × 10<sup>-9</sup>, (21.50 ± 14.02) × 10<sup>-9</sup> and (33.16 ± 25.20) × 10<sup>-9</sup>, respectively, and carbon monoxide (CO) was (0.66 ± 0.44) × 10<sup>-6</sup>. For O<sub>3</sub>, the maximum value reached 146.42 × 10<sup>-9</sup>, exceeding the National Ambient Air Quality Standard II by a rate of 14.1%. The background level of O<sub>3</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs and CO were estimated to be (5.71 ± 2.51) × 10<sup>-9</sup>, (12.20 ± 0.36) × 10<sup>-9</sup>, (22.44 ± 0.38) × 10<sup>-9</sup> and (0.28 ± 0.01) × 10<sup>-6</sup>, respectively, from the frequency distribution of their hourly averaged volume fraction. Pollutants were significantly affected by local emission sources near the site. When affected by the southwest wind with the speed of 2-3 m·s<sup>-1</sup>, active species of VOCs were easy to reach high level, accompanied by an increased concentration of O<sub>3</sub>; Under the influence of easterly winds, NO<sub>x</sub>, CO and VOCs, mainly emitted from industrial sources and traffic sources, were prone to reach high level. The regulation and control measures were taken on industrial production and some vehicles during the Nanjing Asian Youth Games, but the concentration of O<sub>3</sub> was not significantly reduced, and there were 4 days exceeding the National Ambient Air Quality Standard II.

**Key words:** Nanjing northern suburb; Industrial Zone; O<sub>3</sub>; NO<sub>x</sub>; VOCs

20 世纪 40 年代末美国洛杉矶地区首次发现光化学污染, 随后 Haagen-Smit<sup>[1]</sup> 一系列早期研究指出, 大气中氮氧化物(NO<sub>x</sub>)和挥发性有机物(VOCs), 在阳光中紫外线的照射下发生反应加上合适的气象条件, 能形成以高浓度臭氧(O<sub>3</sub>)为标志的严重的光化学污染. 并认为城市大气中 NO<sub>x</sub> 和 VOCs 主要来源是汽车尾气. 多年来, 国外广泛开展

了以自由基光化学为核心的臭氧形成机理研究<sup>[2~4]</sup>. 国外最新的研究结果发现, 在光化学反应

收稿日期: 2014-04-11; 修订日期: 2014-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41305135, 41275143); 中国科学院战略性先导科技专项(B类)(XDB05020206)

作者简介: 邵平(1986~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: sp@dq.cern.ac.cn

\* 通讯联系人, E-mail: junlinan@nuist.edu.cn

中仍存在一些未知且可能对大气污染产生直接或间接影响的机制<sup>[5,6]</sup>.

随着中国各地工业化和城镇化的持续推进,人为排放的大气污染物越来越多, $O_3$ 及其前体物对公众健康的危害,引起了越来越广泛的关注<sup>[7,8]</sup>.国内对 $O_3$ 及其前体物方面的研究主要集中在京津冀地区、长江三角洲地区和珠江三角洲地区. Tang等<sup>[9]</sup>发现,2001~2006年京津冀地区 $O_3$ 体积分数存在上升的趋势,平均每年增长 $(1.1 \pm 0.5) \times 10^{-9}$ ;王会祥等<sup>[10]</sup>研究指出,长三角地区 $O_3$ 含量较高;胡建林等<sup>[11]</sup>分析了长三角地区 $O_3$ 的生成过程,认为该地区的大气具有较强的氧化性;Zhang等<sup>[12]</sup>研究指出广东地区城市化和工业化不断推进造成了当地 $O_3$ 污染日益严重.

国内的一些学者,在 $O_3$ 和 $O_3$ 前体物的相互关系上也做了大量的研究工作. Tang等<sup>[13]</sup>发现华北地区 $O_3$ 生成对VOCs敏感,减少VOCs的排放,更有利于控制 $O_3$ 污染;An等<sup>[14]</sup>研究了北京高浓度 $O_3$ 污染时期VOCs各组分浓度的变化特征,发现芳香烃和烯烃对臭氧的生成贡献最大,约占73%~84%;Geng等<sup>[15]</sup>研究发现,芳香烃对上海地区 $O_3$ 的生成贡献最大,约占79%;Wang等<sup>[16]</sup>研究结果显示,在大陆风的作用下,上海地区 $O_3$ 生成受VOCs控制, $O_3$ 浓度变化有明显的“周末效应”,在海风的作用下, $NO_x$ 浓度较高, $O_3$ 浓度变化有明显的“反周末效应”;Ling等<sup>[17,18]</sup>研究了香港地区VOCs的来源,并指出要有效控制 $O_3$ 的生成,不同来源的VOCs组分有不同的最佳削减比例. 陆克定等<sup>[19]</sup>研究结果表明,珠三角城市地区的光化学速率主要受人为源排放的碳氢化合物控制,而在远郊区臭氧的光化

学产生速率主要受NO控制.

南京地处人口密集、经济发达的长江三角洲地区,环境污染问题比较突出. 南京北郊集中了较多的发电、钢铁和石化等重工企业. 南京地区的机动车保有量也快速增加(见表1),大气污染日益加剧. 特别是当地石油化工企业的生产、存储和运输等过程是大气中VOCs的重要来源,其中高活性的VOCs容易造成较高的浓度水平的臭氧<sup>[20]</sup>. 以往的相关研究<sup>[9-19]</sup>,大多只是关注于人口密集、交通繁忙的城市中心区 $O_3$ 、 $NO_x$ 和VOCs等的浓度变化特征以及 $O_3$ 污染水平,专门针对重工产业聚集区大气污染现状的研究相对较少. 另外,以往关于南京北郊近地面 $O_3$ 的研究<sup>[21-23]</sup>,也鲜有着重研究 $O_3$ 与VOCs之间浓度变化的相互关系或者缺少较长时间的 $O_3$ 及其前体物的综合观测资料作为依据. 本研究以2013年夏季的 $O_3$ 、 $NO_x$ 、CO和VOCs综合观测资料为基础进行分析讨论能很好地弥补以上不足,具有一定的研究意义.

由于南京地区5月份高日照时数和较低的降水量,南京地区容易出现 $O_3$ 高值<sup>[21]</sup>. 本研究在6~8月数据上,增加了5月下半月的数据(总的观测时间为2013年5月18日~8月31日). 以便更好地分析当地 $O_3$ 及其前体物的浓度变化特征、相互影响. 观测期间恰逢南京举办第二届亚洲青年运动会(具体时间为8月16~24日,简称“亚青会”). 为确保亚青会期间南京环境空气质量全面达标,南京市在整个8月对石化、电力等企业以及部分机动车采取一系列临时管控措施. 本研究因此专门对比分析了调控前和调控期间的污染物浓度变化,以期得出一些有用的结论,为2014年南京青奥会及以后的大气污染调控措施提供借鉴.

表1 南京地区近两年机动车保有量及增长情况

Table 1 Vehicle possession and growth during the past two years in the region of Nanjing

项目	2011年12月底	2012年6月底	2012年12月底	2013年6月底
保有量/万辆	140.15	148.73	158.53	169.87
每半年增长/%		6.12	6.60	7.15

## 1 材料与方法

### 1.1 观测站点和数据

本次观测时间为2013年5月18日~8月31日. 观测站点设于南京市江北郊区南京信息工程大学气象楼楼顶( $32^{\circ}12'N$ ,  $118^{\circ}42'E$ , 海拔62 m),四周无高大建筑物遮挡. 观测点东边500 m处为南北走向的宁六线干路,观测点东北方约5 km处是坐落

着石油化工等企业的工业区,观测点东南方约4 km处是建有钢铁、发电等工厂的工业区(见图1). 观测点位置符合中国气象局发布的《大气成分站选址要求》<sup>[24]</sup>,观测资料能够反映典型城市工业区大气污染特点. 常规气象数据来源于中国气象局综合观测培训实习基地(距观测点约1.5 km). 西部和北部为居民区、村庄和农田,西南部为龙王山风景区和老山国家森林公园.

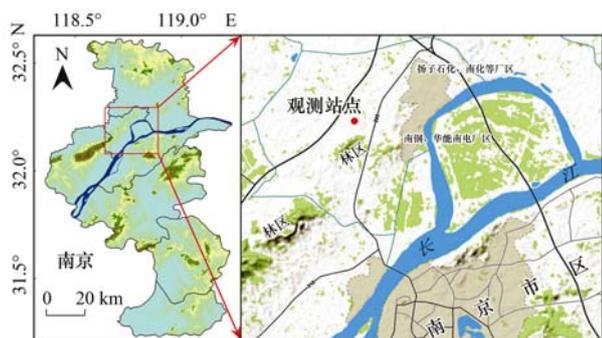


图1 观测点位置及周边环境

Fig. 1 Location of observation site and the surrounding environment

## 1.2 监测仪器

$O_3$ 、 $NO_x$  和 CO 的观测均采用美国赛默飞世尔环境设备公司出产的大气污染物环境监测分析仪. 仪器参数及标定方法见表 2. 为保证观测数据的有效性和可靠性, 观测期间对  $NO$ - $NO_2$ - $NO_x$  分析仪、 $O_3$  分析仪和 CO 分析仪每周进行一次校准.

VOCs 观测采用德国 AMA 公司生产的 GC5000 自动在线气相色谱氢火焰离子 (Gas Chromatography-Flame Ionization Detector, GC-FID). GC5000 是一台集自动采样、富集和分析功能于一体的色谱仪, 包括 GC5000-VOC (双级富集) 和

表 2 观测仪器基本参数及标定方法

Table 2 Basic parameters and calibration methods of monitoring instruments

项目	$NO$ - $NO_2$ - $NO_x$ 分析仪	CO 分析仪	$O_3$ 分析仪
检测限	$0.5 \times 10^{-9}/\text{min}$	$0.04 \times 10^{-6}/\text{min}$	$1.0 \times 10^{-9}/\text{min}$
零漂	$<0.5 \times 10^{-9}/24 \text{ h}$	$<0.1 \times 10^{-6}/24 \text{ h}$	$<1.0 \times 10^{-9}/24 \text{ h}$
跨漂 (满度值)	$\pm 1\%/24 \text{ h}$	$\pm 1\%/24 \text{ h}$	$\pm 1\%/24 \text{ h}, \pm 2\%/7 \text{ d}$
标定仪器	动态气体校准器 (Thermo 146i) 零空气发生器 (Thermo model 111)	动态气体校准器 (Thermo 146i) 零空气发生器 (Thermo model 111)	49iPS 臭氧标定仪 零空气发生器 (Thermo model 111)
标准气体	中国国家标准物质中心制作 (体积分数 $56.8 \times 10^{-6}$ , 有效期至 2013 年 12 月)	中国国家标准物质中心制作 (体积分数 $56.8 \times 10^{-6}$ , 有效期至 2013 年 12 月)	

GC5000-BTX (单级富集) 两套独立的分析色谱仪, 分别测量  $C_2 \sim C_6$  的低沸点 VOCs 物种和  $C_4 \sim C_{12}$  的高沸点 VOCs 物种. 测量原理: 环境空气样品经过干燥管后分为两路进入分析系统, 小分子 ( $C_2 \sim C_4$ ) 样品先进到吸附管中, 在低温条件下富集, 然后加热解析小分子化合物, 再进入毛细柱细分; BTEX 及其  $C_6$  以上的物质则由 Tenax 吸附管吸附, 然后由 FID 检测有机物含量. 仪器检测共计 56 种 VOCs 物种, 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可靠性, 观测期间利用 DIM200 校准模块 (稀释 100 倍) 每 3 周进行一次校准, 采用美国环保署认可的 Linde Gas American LLC 混合标准气体进行 5 点校准, 校准时相关系数均在 0.995 以上. 此外, 还定期对仪器作单点校准和峰窗漂移校准.

## 2 结果与讨论

### 2.1 观测期间臭氧及其前体物体积分数变化总体特征

图 2 和表 3 给出了观测期间各物种积分分数时间序列以及统计特征 (8 月是“亚青会”调控时段. 故总体的平均统计特征仅用于描述本次观测结果, 并

不用来反映本站夏季一般条件下污染物浓度变化特征). 图 2 显示,  $O_3$  浓度变化对降水的响应很好, 降水时段体积分数下降明显; 7 月 8 日 ~ 8 月 18 日, 除去个别降水时段, 日均气温在  $30^\circ\text{C}$  以上, 日均相对湿度 20% 左右, 西南风占主导, 且风速不大. 这种高温低湿小风的条件, 非常有利于  $O_3$  生成和累积; 观测期间  $NO$ 、 $NO_2$ 、 $NO_x$ 、CO 和 VOCs 等的体积分数平均值分别为  $(4.39 \pm 3.35) \times 10^{-9}$ 、 $(17.12 \pm 11.22) \times 10^{-9}$ 、 $(21.50 \pm 14.02) \times 10^{-9}$ 、 $(0.66 \pm 0.44) \times 10^{-6}$  和  $(33.16 \pm 25.20) \times 10^{-9}$  (VOCs 各组分体积分数直接求和所得);  $O_3$  体积分数平均值为  $(32.01 \pm 15.20) \times 10^{-9}$ .  $O_3$  体积分数小时平均最大值出现在 5 月 21 日, 达  $146.42 \times 10^{-9}$ ; 8 h 滑动平均最大值出现在 8 月 11 日, 达  $136.82 \times 10^{-9}$ .  $O_x$  表示总氧化剂, 反映大气氧化能力. 它主要包括臭氧 ( $O_3$ )、过氧乙酰硝酸酯 (PAN)、二氧化氮 ( $NO_2$ )、醛类 (RCHO) 和过氧化氢 ( $H_2O_2$ ) 等具有刺激性、氧化性的物质, 其中  $O_3$  一般占  $O_x$  的 90% 以上<sup>[25]</sup>. 本研究以  $O_x = O_3 + NO_2$  作为近似,  $O_x$  体积分数平均值为  $(47.99 \pm 20.14) \times 10^{-9}$ .

从 2013 年起, 南京地区空气质量监测执行新《环境空气质量标准》<sup>[26]</sup>. 其中  $O_3$  的 1 h 平均值

限值表示成体积分数为  $102.04 \times 10^{-9}$ . 若某日中  $O_3$  体积分数小时均值最大值 ( $O_{3\_1h\ max}$ ) 大于  $102.04 \times 10^{-9}$ , 定义该日为  $O_3$  超标日, 则 99 个有效观测日内超标 10 d, 超标率为 10.1%. 新标准增设了日最大 8 h 平均限值, 体积分数为  $81.63 \times$

$10^{-9}$ . 按此标准 99 个有效观测日内超标 14 d, 超标率为 14.1%. 2008 年 WHO 报告<sup>[27]</sup>指出  $O_3$  浓度超过  $70 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  (体积分数  $35.71 \times 10^{-9}$ ) 死亡率会显著增加. 所以较高的  $O_3$ , 对当地民众健康构成了极大的威胁.

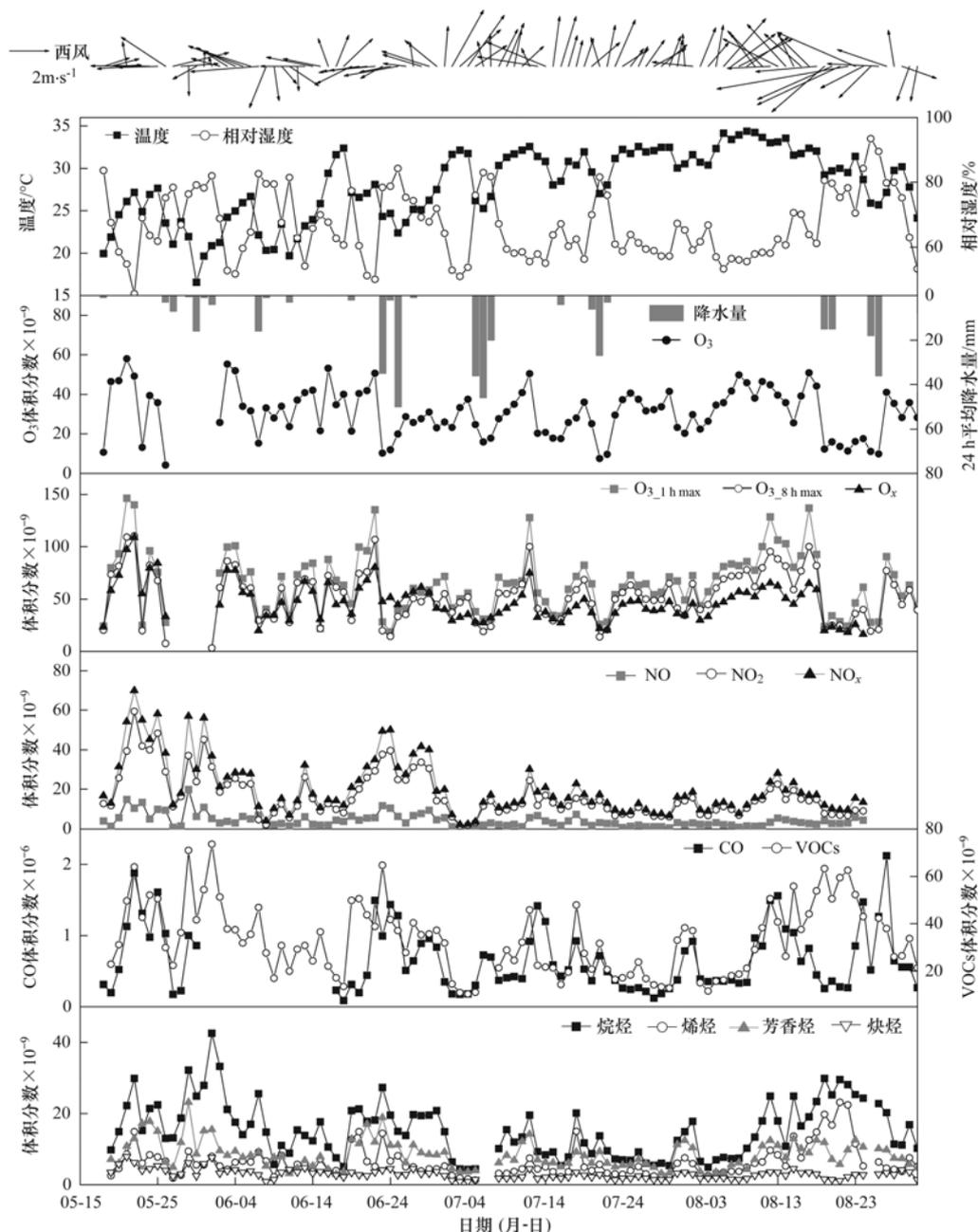


图2 观测期间  $O_3$  和其前体物体积分数以及气象要素的时间序列

Fig. 2 Time series of  $O_3$ , its precursors and meteorological factors during the observation period

某地的污染物浓度水平, 取决于当地的局地源排放、周边输送以及清除过程. 对于具体的污染物, 某一浓度值出现频率最高, 可一定程度上视为该污染物在所考察地区的背景浓度<sup>[28]</sup>. 本研究对观测期间南京北郊的  $O_3$  及其前体物按体积分数 (小时平均值)

的频数分布进行统计、作图并进行洛伦兹拟合 (结果见图 3 和表 4), 旨在通过一些统计上的方法, 对当地的  $O_3$  及其前体物浓度水平有个近似了解.

频数分布达到极大值所对应  $x$  的取值 ( $x_c$  值), 即可认为是观测期间南京北郊  $O_3$  及其前体物的背

景值. 所以观测期间 NO、NO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>、CO、VOCs、O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 背景体积分数分别为 (1.28 ± 0.04) × 10<sup>-9</sup>、(10.52 ± 0.26) × 10<sup>-9</sup>、(12.20 ± 0.36) × 10<sup>-9</sup>、(0.28 ± 0.01) × 10<sup>-6</sup>、(22.44 ± 0.38) ×

10<sup>-9</sup>、(5.71 ± 2.51) × 10<sup>-9</sup> 和 (35.57 ± 0.73) × 10<sup>-9</sup>. 所有分布图型的尾迹线较长, 延伸到高浓度值. 表明这几种污染物, 受周围源排放、气象条件等的综合影响, 其体积分数变化幅度比较大.

表 3 O<sub>3</sub> 及其前体物体积分数统计描述

Table 3 Summary statistics of O<sub>3</sub> and its precursors

项目	平均值 ± 标准偏差	最小值	最大值	国家二级标准限值	超标天数(有效天数)/d	超标率/%
NO × 10 <sup>-9</sup>	4.39 ± 3.35	0.61	19.79	— <sup>1)</sup>	—	—
NO <sub>2</sub> × 10 <sup>-9</sup>	17.12 ± 11.22	2.06	59.36	106.00	0	0
NO <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>	21.50 ± 14.02	3.06	69.88	—	—	—
CO × 10 <sup>-6</sup>	0.66 ± 0.44	0.10	2.12	3.48	0	0
VOCs × 10 <sup>-9</sup>	33.16 ± 25.20	5.13	326.67	—	—	—
O <sub>3</sub> × 10 <sup>-9</sup>	32.01 ± 15.20	4.16	89.96	—	—	—
O <sub>3-1h max</sub> × 10 <sup>-9</sup>	64.82 ± 28.91	18.69	146.42	102.04	10(99)	10.1
O <sub>3-8h max</sub> × 10 <sup>-9</sup>	—	—	—	81.63	14(99)	14.1
O <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>	47.99 ± 20.12	16.34	116.41	—	—	—

1) “—”表示没有针对该项的标准限值, 下同

表 4 O<sub>3</sub> 及其前体物按体积分数频数分布洛伦兹拟合参数

Table 4 Parameters of fitted Lorentz curve equation

项目	洛伦兹拟合方程: $y = y_0 + 2Aw / [4\pi(x - x_c)^2 + w^2]$						
	NO	NO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO <sup>1)</sup>	VOCs	O <sub>3</sub>	O <sub>x</sub>
修正的 R <sup>2</sup>	0.89	0.94	0.93	0.87	0.88	0.90	0.84
$x_c \times 10^{-9}$	1.28 ± 0.04	10.52 ± 0.26	12.20 ± 0.36	0.28 ± 0.01	22.44 ± 0.38	5.71 ± 2.51	35.57 ± 0.73
$y_0$	0.53 ± 0.13	-0.69 ± 0.54	0.06 ± 0.56	0.48 ± 0.11	-0.37 ± 0.36	-2.92 ± 0.87	-0.88 ± 0.67
$w$	1.62 ± 0.04	20.97 ± 0.89	21.80 ± 1.03	0.32 ± 0.01	29.60 ± 1.28	71.41 ± 6.08	44.98 ± 2.88
$A$	231 ± 5	3 233 ± 111	2 984 ± 113	20 ± 1	2 979 ± 101	5 641 ± 585	2 806 ± 169

1) CO 的  $x_c$  值为 (0.28 ± 0.01) × 10<sup>-6</sup>

### 2.2 影响臭氧浓度变化的因素

气象要素在空气中污染的形成、沉降、输送以及扩散过程中扮演着重要的角色. 对 O<sub>3</sub> 及其前体物浓度变化结合气象要素进行同步的观测和分析, 有助于揭示产生高浓度 O<sub>3</sub> 的原因.

表 5 给出了不同温度范围内相应的污染物的体积分数. 从中可知, O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 的体积分数随温度的增加而增加, 平均变化率为 80.9% 和 43.9%, 相关系数分别为 0.55 和 0.34(通过显著水平为 0.01 的双侧检验, 下同). O<sub>3</sub> 日最大小时体积分数和温度

之间的相关系数则达 0.79. O<sub>3</sub> 前体物的变化则相对较复杂, NO、NO<sub>2</sub> 和 CO 在 20 ~ 29℃ 的区间内较前一个区间体积浓度有所上升, 达最高值, 然后体积分数随温度升高而降低, 下降阶段平均变化率 -66.5%、-36.7% 和 -45.6%, 相关系数分别为 -0.40、-0.56 和 -0.40; VOCs 体积分数随气温的增加而降低, 平均变化率 -17.4%, 相关系数为 -0.43. 温度对 O<sub>3</sub> 浓度的变化有着较大影响, 较高的温度有利于臭氧的生成, 大气氧化性的增加, 进而更多的 NO 被氧化.

表 5 不同温度范围内的污染物体积分数

Table 5 Average value of atmospheric pollutants determined in selected ranges of temperature

气温范围/℃	NO × 10 <sup>-9</sup>	NO <sub>2</sub> × 10 <sup>-9</sup>	NO <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>	CO × 10 <sup>-6</sup>	VOCs × 10 <sup>-9</sup>	O <sub>3</sub> × 10 <sup>-9</sup>	O <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>
10 ~ 19	4.07	17.62	21.70	0.55	40.31	14.40	30.40
20 ~ 29	6.08	21.48	27.56	0.82	40.02	20.51	41.34
30 ~ 39	1.90	11.01	12.90	0.53	25.09	45.71	55.81
>40	0.68	8.29	8.97	0.35	21.51	81.02	89.74

表 6 给出了不同风速范围内的污染物体积分数. 可以看出, 总体上 NO、NO<sub>2</sub> 和 VOCs 体积分数随风速的增加而递减, 平均变化率分别为:

-15.1%、-19.7% 和 -9.1%, 相关系数分别是 -0.06、-0.18 和 -0.21(通过显著水平为 0.01 的双侧检验); O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 的体积分数随风速的增加呈

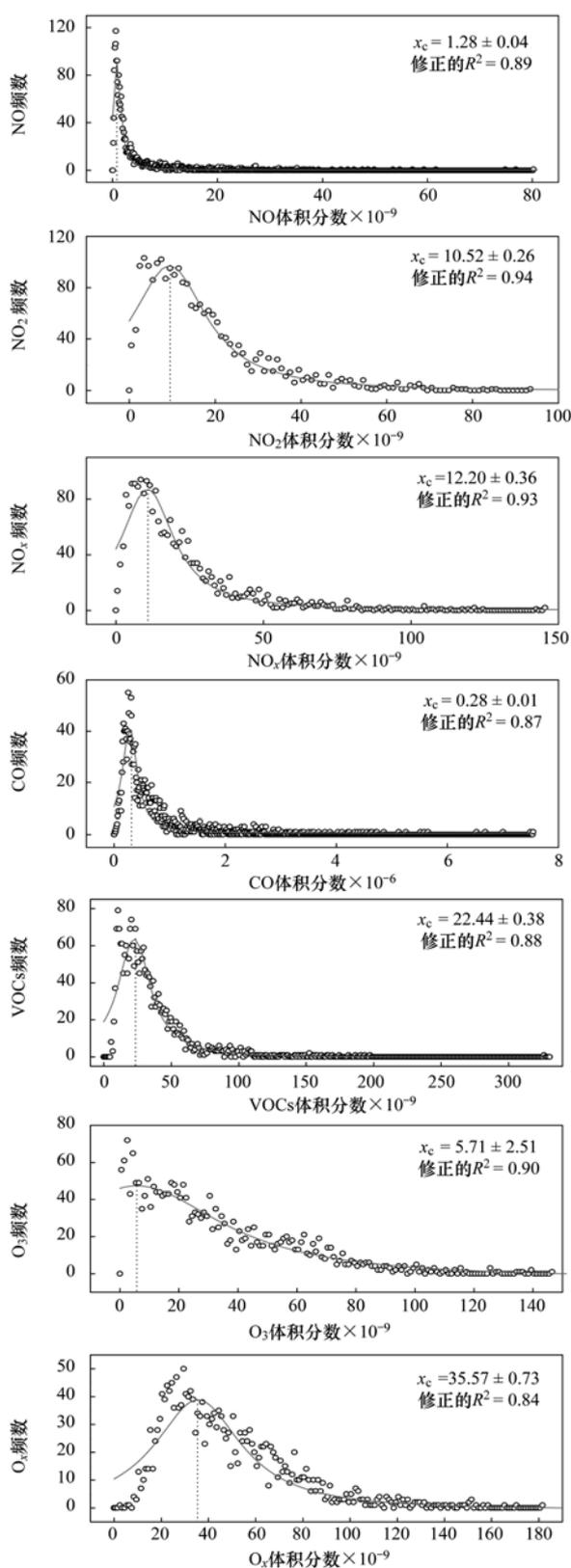


图3 O<sub>3</sub>及其前体物按体积分数小时均值的频数分布及洛伦兹拟合

Fig. 3 Frequency distribution of hourly average values of O<sub>3</sub> and its precursors with Lorentz curve fittings

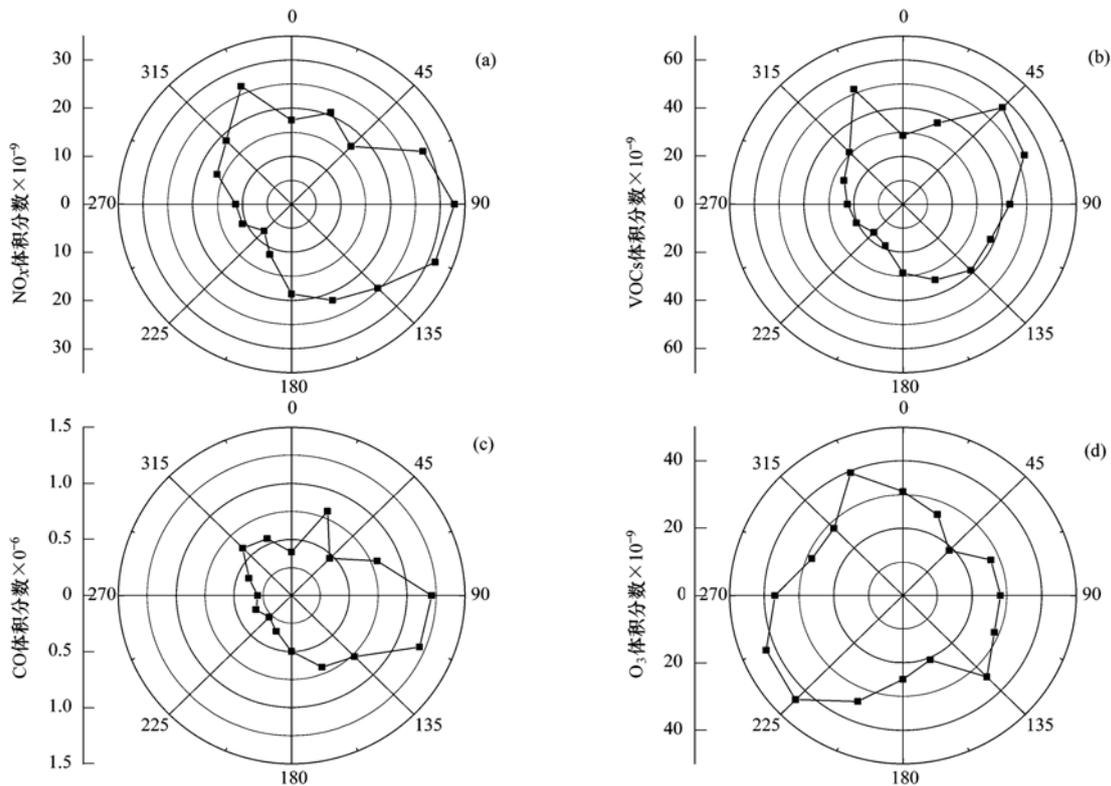
先上升后下降的变化规律,均在  $2.1 \sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速范围内达到最大值. 这可能是风速的增加使得大气边界层高度增加,高层的 O<sub>3</sub> 向下混合<sup>[29]</sup>. Li 等<sup>[30]</sup> 研究也发现,在长三角典型城市地区, O<sub>3</sub> 生成的气相化学过程主要发生在  $300 \sim 1500 \text{ m}$  高空,高空 O<sub>3</sub> 向地面的垂直扩散是近地面 O<sub>3</sub> 的重要来源之一. 风速的增加同时也有利于 O<sub>3</sub> 的水平扩散. 当风速较低时 O<sub>3</sub> 向下的混合作用强于扩散作用,从而 O<sub>3</sub> 体积分数不断累积,但风速达到一定值时,两种作用相当. 因此风速继续增加时,水平扩散过程逐渐占据主导, O<sub>3</sub> 体积分数随之下降; CO 体积分数变化情况比较复杂, CO 体积分数总体上也是随风速的增加而递减. 在  $2.1 \sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速范围内达到最大值,这可能和 O<sub>3</sub> 体积分数增加的原因类似. 在  $2.1 \sim 3.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的风速条件下,大气边界层高度增加,残留在高层的 CO 以向下混合,体积分数累积达到高值.

图4给出了 O<sub>3</sub> 及其前体物体积分数在不同风向上的分布. 从4(a)~4(c)可以看出,当观测点以偏东风为主时, NO<sub>x</sub>、VOCs 和 CO 体积分数都普遍达到高值. 观测站点往东约 500 m 有一条南北走向的交通干道,站点往东 4~5 km 就是坐落着若干石化、发电等企业的综合工业区. 它们都是 NO<sub>x</sub>、VOCs 和 CO 的重要产生源地; 在西南风作用下, NO<sub>x</sub>、VOCs 和 CO 体积分数一般较低,但 O<sub>3</sub> 体积分数达到最大值.

经计算, VOCs 各组分中, 烷烃所占比例最高, 占总 VOCs 的 46.4%, 其次是烯烃, 占 25.8%; 本研究采用丙烯等量体积分数比较 VOCs 反应活性活时, 发现烷烃所占比例最高, 烷烃最低. 这也与本地区相关研究结果一致<sup>[31]</sup>. 本研究分别计算了不同风向上烷烃和烯烃等的丙烯等量体积分数(见图5, 算法参见文献[32]). 在东北风或西南风的作用下, 烯烃的丙烯等量体积分数都能达到高值. 这可能是因为观测点东北方向是石化工业区, 生产、存储和运输过程中排放的 VOCs 经东北风水平输送作用抵达站点周围; 观测点西南方向是一个森林覆盖率达 80% 的国家森林公园. 在西南风作用下, 烯烃的丙烯等量体积分数也能达到高值. 特别是异戊二烯[见图5(c)], 其大气光化学活性较高, 且主要来源于植被排放<sup>[33]</sup>. 在西南风控制下, 异戊二烯的丙烯等量体积分数约占全部烯烃的 97.5%, 异戊二烯的丙烯等量体积分数是其他风向下平均值的 3.2 倍.

表 6 不同风速范围内的污染物体积分数

风速范围/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$\text{NO}_x \times 10^{-9}$	$\text{NO}_2 \times 10^{-9}$	$\text{NO}_x \times 10^{-9}$	$\text{CO} \times 10^{-6}$	$\text{VOCs} \times 10^{-9}$	$\text{O}_3 \times 10^{-9}$	$\text{O}_x \times 10^{-9}$
<1.0	5.71	21.99	27.70	0.69	39.92	21.33	41.15
1.1~2.0	4.13	17.82	21.95	0.66	35.42	27.62	45.95
2.1~3.0	4.05	17.45	21.50	0.72	31.67	36.05	53.73
3.1~4.0	3.63	14.11	17.74	0.60	27.40	34.61	48.29
>4.0	2.89	8.66	11.55	0.51	29.58	31.22	39.30

图 4  $\text{O}_3$  及其前体物体积分数与风向的关系Fig. 4 Relationship between  $\text{O}_3$  and its precursors and wind direction

$\text{O}_3$  主要由其关键前体物 VOCs 中的活性组分与  $\text{NO}_x$  之间的复杂化学反应而生成,除了 VOCs 和  $\text{NO}_x$  浓度水平的高低,两项前体物之间的相对比例也决定了  $\text{O}_3$  的生成量<sup>[34]</sup>.

偏西南气流(风向  $202.5^\circ \sim 247.5^\circ$ )作用下,观测期间观测点平均  $\text{VOCs}/\text{NO}_x = 3.44$ (鉴于 VOCs 各组分活性不一,本研究中涉及  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  的 VOCs 体积分数均表示各组分丙烯等量体积分数之和),其中在西南风( $225^\circ$ )主导下,观测点平均  $\text{VOCs}/\text{NO}_x = 3.40$ ,这时的  $\text{O}_3$  体积分数都能达到较高的值. 在东北气流( $22.5^\circ \sim 67.5^\circ$ )占主导时,观测点  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  的平均值为 5.38,  $\text{O}_3$  体积分数处在低值. 观测期间 14 个  $\text{O}_3$  超标日白天(07:00~17:00)平均  $\text{VOCs}/\text{NO}_x = 3.2$ . 表明当地  $\text{VOCs}/\text{NO}_x$  比值过

高可能不利于  $\text{O}_3$  的生成.

表 7 给出了不同相对湿度范围内的污染物体积分数.  $\text{O}_3$  和  $\text{O}_x$  的体积分数随相对湿度的增加逐渐减小,相关系数分别为  $-0.76$  和  $-0.65$ (通过显著水平为 0.01 的双侧检验,下同),平均变化率分别为:  $-44.4\%$ 、 $-34.7\%$ ,反映出较高的相对湿度影响了光化学进程,也有利于  $\text{O}_3$  的湿清除;  $\text{NO}$ 、 $\text{CO}$  和 VOCs 体积分数随相对湿度的增加大体上呈上升的趋势,相关系数分别为 0.31、0.17 和 0.30;  $\text{NO}_2$  的体积分数随相对湿度的增加振荡变化,相对比较复杂. 反映了大气中的水汽在光化学过程中扮演重要的角色,对  $\text{O}_3$  前体物之间的光化学反应影响较大,进而影响了  $\text{O}_3$  的生成.

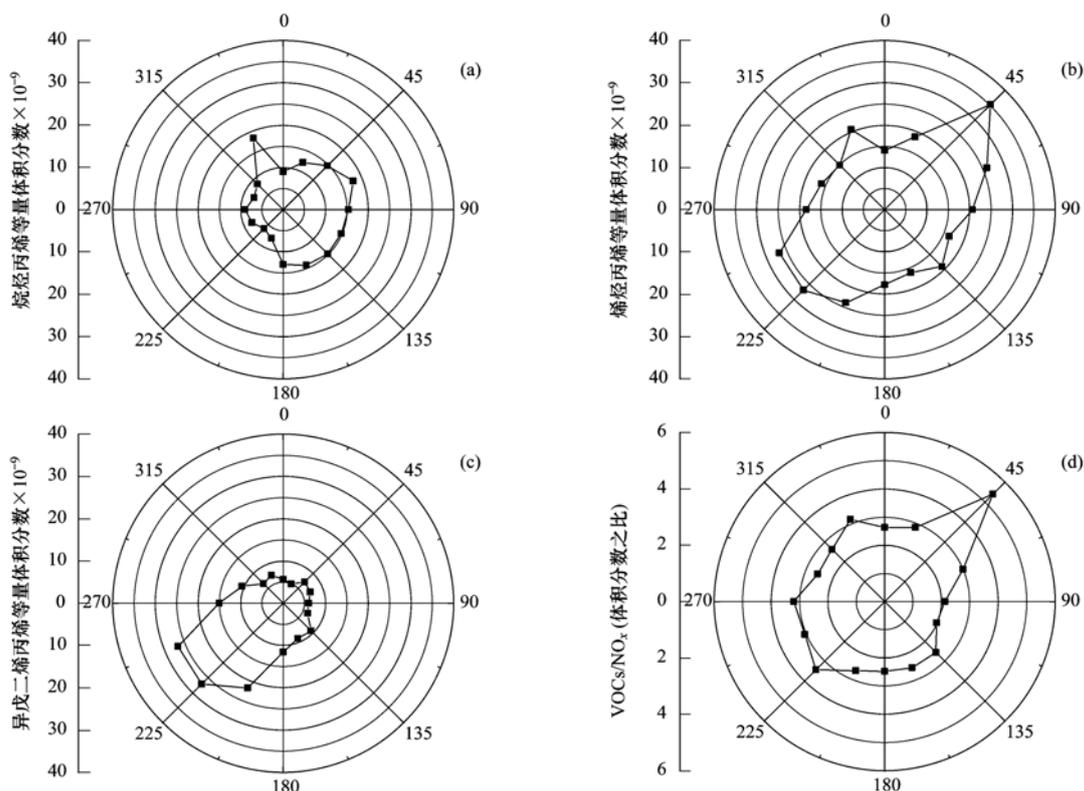


图5 不同风向上 VOCs 丙烯等量体积分数和 VOCs/NO<sub>x</sub> 之比的变化

Fig. 5 Variations of VOCs mixing ratios in propylene-equivalent and the ratio of VOCs/NO<sub>x</sub> in different wind directions

表7 不同相对湿度范围内的污染物体积分数

Table 7 Average value of atmospheric pollutants determined in selected ranges of relative humidity

相对湿度范围/%	NO × 10 <sup>-9</sup>	NO <sub>2</sub> × 10 <sup>-9</sup>	NO <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>	CO × 10 <sup>-6</sup>	VOCs × 10 <sup>-9</sup>	O <sub>3</sub> × 10 <sup>-9</sup>	O <sub>x</sub> × 10 <sup>-9</sup>
≤40	1.45	15.91	17.36	0.47	24.61	79.67	98.56
41~60	2.00	12.87	14.87	0.52	24.24	48.56	61.35
61~80	5.23	20.00	25.23	0.72	35.85	19.62	37.32
>80	5.86	16.04	21.90	0.81	45.16	12.83	27.22

### 2.3 亚青会调控前、调控期间臭氧及其前体物浓度变化特征

本次观测期间恰逢南京举办第二届“亚青会”。为确保亚青会期间南京环境空气质量全面达标,南京市在整个8月对石化、电力等企业采取一系列临时管控措施,对高污染车辆如黄标车、无标车、危化品车和排放超标的客运货运车限行或禁止进入南京主城区。但不涉及私家车公交车等其他机动车。

图6给出了5~7月、8月和亚青会期间O<sub>3</sub>及其前体物平均体积分数变化特征。对比5~7月,8月NO<sub>x</sub>体积分数下降27.7%,其中NO减少31.6%,NO<sub>2</sub>减少26.8%;而VOCs没有明显的变化,下降2.0%;CO体积分数增加21.6%;二次污染物O<sub>3</sub>体积分数较5~7月基本没有减少。在亚青会比赛期间(剔除19日、20日、25日以及26日这

4个降水天的数据)较5~7月NO<sub>x</sub>体积分数下降5.8%;VOCs体积分数增加26.4%;CO体积分数增加61.5%;二次污染物O<sub>3</sub>体积分数增加14.3%,O<sub>x</sub>增加8.2%。

相关研究表明<sup>[23,31]</sup>,南京北郊O<sub>3</sub>的生成主要受VOCs控制。南京北郊VOCs主要来源是交通尾气(贡献率33.1%)和燃料挥发(25.8%),工业排放的贡献(23.2%)排在前二者之后。所以未对全部机动车进行限行,而只是对一些高污染企业进行限产,可能不足以有效减少大气中VOCs体积分数。

Chang等<sup>[35,36]</sup>研究发现可利用NMHC/3MCSA(非甲烷烃/3-甲基戊烷)特征比值法推估VOCs物种来自于交通和非交通污染源的所占比例。即先获取机动车排放源中NMHC和3-甲基戊烷体积分数之比,再比较所考察地区大气中的NMHC和3-甲基

戊烷体积分数的比值关系. 再分别对比前后的比值, 进而能作出相应的推算.

本研究采用文献[35]提供的机动车排放源中 NMHC/3MC5A 的特征比值. NMHC 主要选取乙烯、甲苯和间, 对-二甲苯. 乙烯主要由工业生产排放, 机动车燃料不完全燃烧也排放一定量的乙烯; 甲苯来源除了机动车排放以外, 溶剂使用和化学合成过程中也有排放. 间, 对-二甲苯除了机动车排放以外, 石油化工等企业也有大量排放.

5~7月, 乙烯/3-甲基戊烷平均比值是 31.87, 是机动车排放中两者比值的 4.23 倍, 反映出 80.9% 的乙烯来自非机动车源; 甲苯/3-甲基戊烷的比值是 16.41, 是机动车排放中两者比值的 3.06 倍, 反映出 75.3% 的甲苯来自非机动车源; 间, 对-二甲苯/3-甲基戊烷的比值是 5.67, 是机动车排放中两者的 3.76 倍, 反映出 79.0% 的间, 对-二甲苯来自非机动车源. 间, 对-二甲苯/3-甲基戊烷的比值是 7.27, 是机动车排放中两者比值的 4.82 倍, 反映出 82.8% 的间, 对-二甲苯来自非机动车源.

8月, 乙烯/3-甲基戊烷平均比值是 36.74, 是机动车排放中两者的 4.88 倍, 反映出 83.1% 的乙烯来自非机动车源; 甲苯/3-甲基戊烷的比值是 16.79, 是机动车排放中两者的 3.13 倍, 反映出

75.8% 的甲苯来自非机动车源; 间, 对-二甲苯/3-甲基戊烷的比值是 5.67, 是机动车排放中两者的 3.76 倍, 反映出 79.0% 的间, 对-二甲苯来自非机动车源.

相比 5~7月, 乙烯和甲苯非机动车源的贡献比例在 8月有所增加, 即乙烯和甲苯机动车源的贡献比例在 8月有所减少, 但下降不明显. 观测站点地处南京北郊距离南京市区 20 km 左右. 禁止高污染车辆进入南京主城区, 可能并没连带地显著减少北部郊区的高污染机动车的流量; 而间, 对-二甲苯非机动车源的贡献比例在 8月有所减少, 这可能是石油化工等企业停产限产造成的削减作用大于机动车限行的削减作用, 导致 8月间, 对-二甲苯非机动车源的贡献比下降.

8月白天(07:00~17:00) VOCs/NO<sub>x</sub> 平均值为 4.67, 亚青会期间白天 VOCs/NO<sub>x</sub> 平均值为 3.56. VOCs/NO<sub>x</sub> 比值在 3.40 附近, O<sub>3</sub> 容易达到较高的浓度水平, 从而不利于有效控制高浓度 O<sub>3</sub> 污染.

8月主导风为西南风和东南风. 在偏东风的作用下, CO 和 VOCs 的平均体积分数也较高, 尤其是亚青会期间完全由东南风为主导风, 可能非常有利于 CO 和 VOCs 的体积分数累积达到较高值. O<sub>3</sub> 在西南风和东南风作用下, 平均体积分数也较高.

2013年8月包括南京地区在内的整个长三角

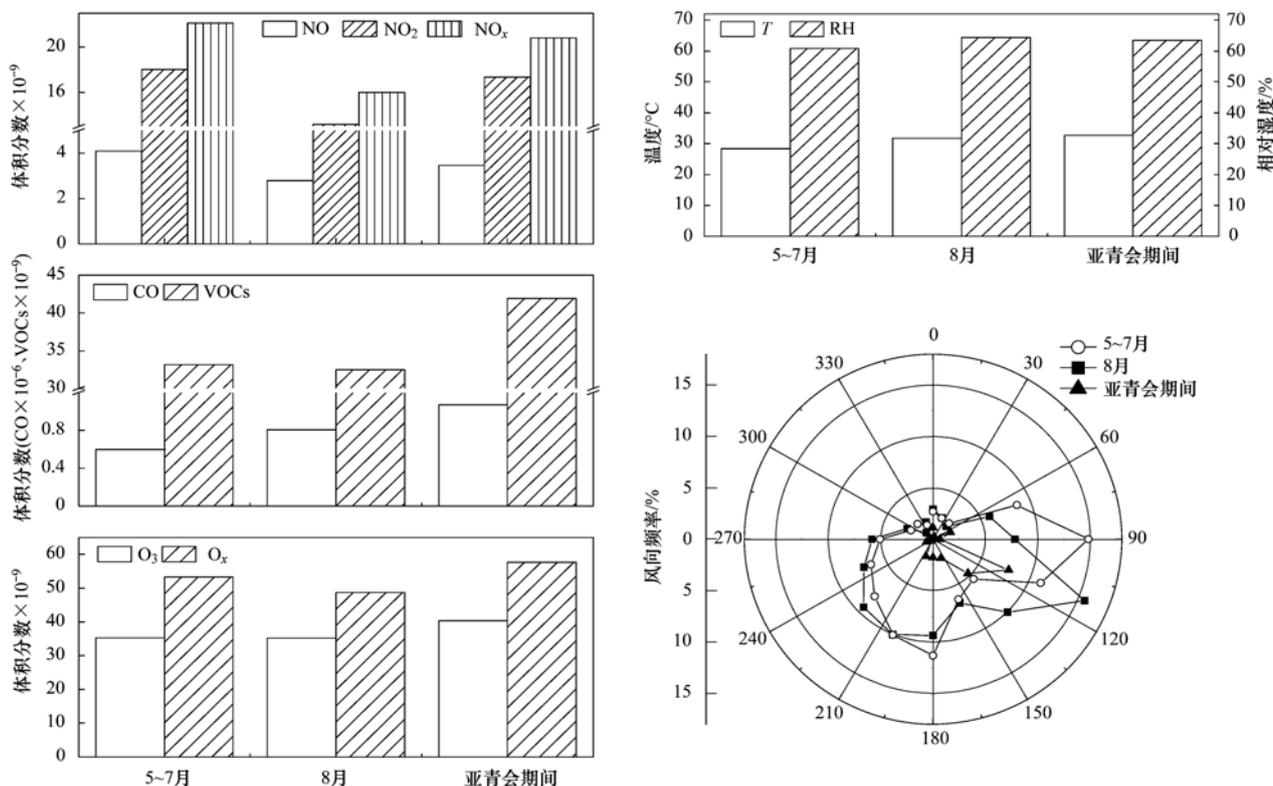


图 6 亚青会前、亚青会期间 O<sub>3</sub> 及其前体物平均体积分数变化特征

Fig. 6 Averaged variations of O<sub>3</sub> and its precursors mixing ratios before and during Nanjing Asian Youth Games

地区,出现了持续的高温天气. 高温低湿的环境非常有利于  $O_3$  的生成. 对  $O_3$  体积分数和气温  $T$  进行线性拟合可得:  $O_3 = (2.80 \pm 1.20)T + (-56.17 \pm 3.62)$ . 即气温每发生  $1^\circ\text{C}$  的变化,能引起  $O_3$  体积浓度约  $(2.80 \pm 1.20) \times 10^{-9}$  的变化. 8 月平均气温较整个 5~7 月上升约  $3.70^\circ\text{C}$ ,可能引起的  $O_3$  体积分数增加  $(5.90 \sim 14.76) \times 10^{-9}$ ,而实际测得  $O_3$  体积分数增加  $4.53 \times 10^{-9}$ ; 特别是亚青会期间,平均气温较 5~7 月上升约  $4.68^\circ\text{C}$ ,可能引起的  $O_3$  体积分数增加  $(7.49 \sim 18.72) \times 10^{-9}$ ,而实

际测得  $O_3$  体积分数增加  $9.64 \times 10^{-9}$ . 高温可能也是引起 8 月尤其是亚青会期间  $O_3$  体积分数增加的一个重要原因.

#### 2.4 臭氧超标事件个例分析

观测期间  $O_3$  超标时段以 5 月和 8 月居多(按  $O_{3,8h \max}$  体积分数  $> 81.63 \times 10^{-9}$  共计 14 d, 5 月 4 d, 8 月 6 d). 本研究选取了两个  $O_3$  超标时段(分别是 5 月 20~22 日,记为时段 1; 8 月 16~18 日,记为时段 2)分析  $O_3$  及其前体物体积分数的变化特征(见图 7).

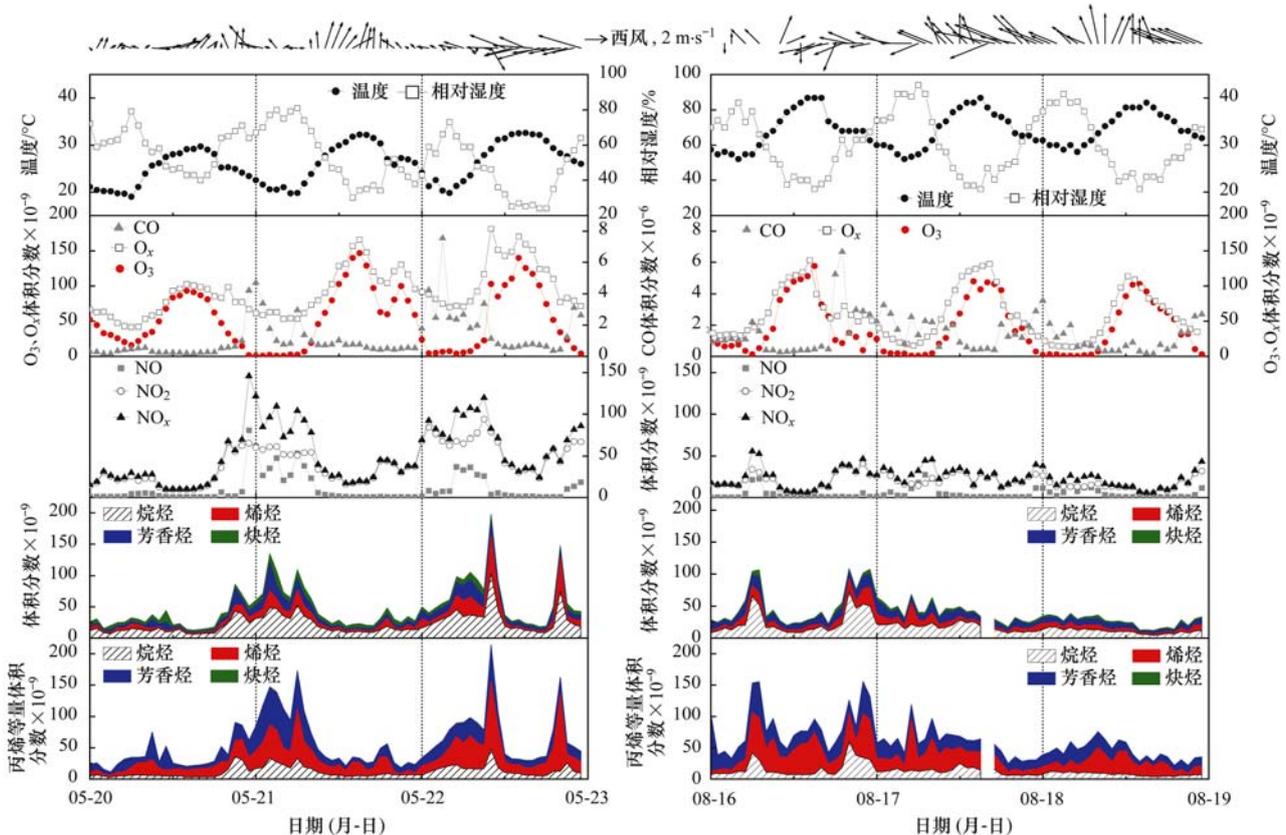


图 7 5 月 20~22 日和 8 月 16~18 日气象要素、臭氧及其前体物体积分数对比

Fig. 7 Variation of meteorological parameters, ozone and its precursors over May 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> and August 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup>, respectively

对比两个时段可以发现,在时段 1 内,西南风与偏东风交替作用,平均气温  $26^\circ\text{C}$ ,最高气温  $30^\circ\text{C}$  左右,平均相对湿度 53%; 而在时段 2,偏东风为主导风,平均气温  $33^\circ\text{C}$ ,最高气温均超过  $35^\circ\text{C}$ ,平均相对湿度 60%.

$NO_x$  体积分数在时段 1 内平均值为  $51.83 \times 10^{-9}$ ,明显高于时段 2 内的  $23.67 \times 10^{-9}$ . CO 体积分数在时段 1 内平均值为  $1.18 \times 10^{-6}$ ,低于时段 2 内的  $1.38 \times 10^{-6}$ .

VOCs 体积分数在时段 1 内平均值为  $48.25 \times$

$10^{-9}$ ,高于时段 2 内的  $39.15 \times 10^{-9}$ . 烷烃、烯烃、芳香烃和炔烃体积分数在时段 1 内的平均值分别为  $22.32 \times 10^{-9}$ 、 $9.35 \times 10^{-9}$ 、 $9.88 \times 10^{-9}$  和  $6.69 \times 10^{-9}$ ; 在时段 2 内的平均值分别为  $17.86 \times 10^{-9}$ 、 $7.73 \times 10^{-9}$ 、 $10.31 \times 10^{-9}$  和  $3.25 \times 10^{-9}$ . 对比时段 1,烷烃、烯烃和炔烃的体积分数均值在时段 2 内有不同程度的减少,只有芳香烃体积分数均值有所增加.

对比 VOCs 等量丙烯体积分数均值,时段 1 内的平均值为  $56.98 \times 10^{-9}$ ,要低于时段 2 内的  $61.88$

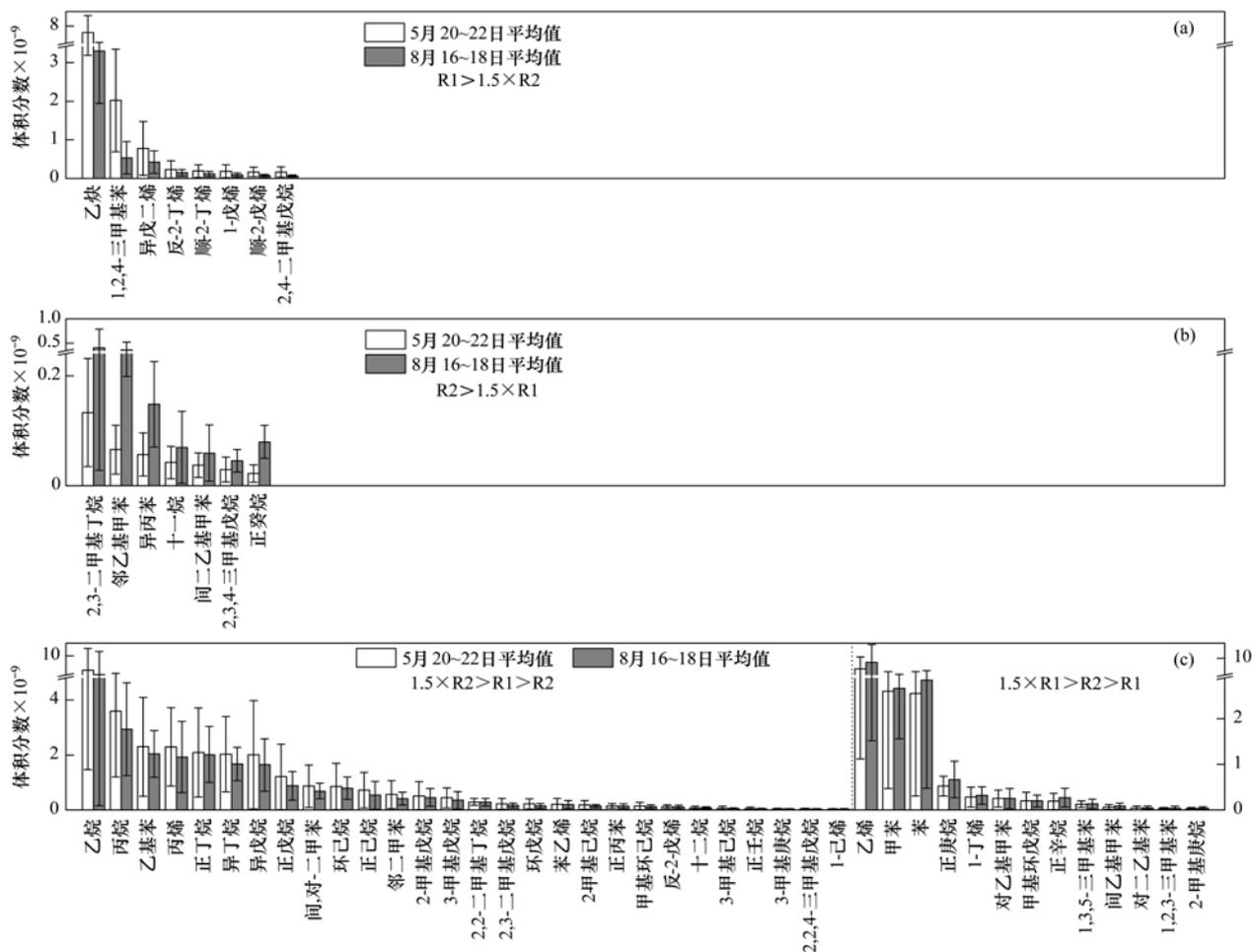
$\times 10^{-9}$ . 时段 1 内的烷烃、烯烃、芳香烃和炔烃的等量丙烯体积分数均值分别是  $11.63 \times 10^{-9}$ 、 $24.24 \times 10^{-9}$ 、 $20.66 \times 10^{-9}$  和  $0.46 \times 10^{-9}$ ; 在时段 2 内的平均值分别为  $12.40 \times 10^{-9}$ 、 $26.19 \times 10^{-9}$ 、 $22.87 \times 10^{-9}$  和  $0.22 \times 10^{-9}$ . 相较时段 1, 虽然烷烃和烯烃在时段 2 内的体积分数均值有所减少, 但是它们的等量丙烯体积分数均值却有所增加, 表明时段 2 内烷烃和烯烃中光化学活性强的组分比重较大. 两个时段内, 芳香烃和炔烃的等量丙烯体积分数均值与它们的体积分数均值的变化较为一致, 即相较时段 1, 芳香烃在时段 2 内体积分数均值略有增加, 炔烃在时段 2 内体积分数均值有较大的减少.

两个时段内存在一些气象条件和前体物浓度水平的差异, 但这两个时段都出现了  $O_3$  超标的情况. 其中峰值分别出现在 5 月 21 日 15:00 的  $146.42 \times 10^{-9}$  和 8 月 16 日 15:00 的  $128.36 \times 10^{-9}$ .

图 8 给出了两个时段 VOCs 各组分平均体积分数

的变化情况. 其中时段 1 (5 月 20 ~ 22 日) 中各物种的平均体积分数表示为  $R_1$ , 时段 2 (8 月 16 ~ 18 日) 中各物种的平均体积分数表示为  $R_2$ . 图 8(a) 表示时段 1 中各物种平均体积分数较时段 2 增加 50% 以上 (即  $R_1 > 1.5 \times R_2$ ), 记为第一类情况; 图 8(b) 表示时段 2 中各物种平均体积分数较时段 1 增加 50% 以上 (即  $R_2 > 1.5 \times R_1$ ), 记为第二类情况; 图 8(c) 表示在第一、二类情况之外的两个时段中各物种平均体积分数变化.

从图 8(a) 中可以发现, 主要源自植被排放的异戊二烯体积分数是  $R_1 > 1.5 \times R_2$  情形, 正如前文所述, 时段 1 内西南风与偏东风交替作用. 观测点西南方向植被茂盛, 在西南风作用下, 观测点容易观测到较高体积分数的异戊二烯. 其他主要源自植被排放的物种诸如乙基苯、二甲苯、环己烷、2-甲基戊烷和 3-甲基己烷等<sup>[37]</sup>, 观测结果均是  $R_1 > R_2$  [见图 8(c) 虚线左边部分]. 站点西南方向的林区, 也是



(a) 第一类情况:  $R_1 > 1.5 \times R_2$ ; (b) 第二类情况:  $R_2 > 1.5 \times R_1$ ; (c) 体积分数变化在第一、二类情况之外

图 8 5 月 20 ~ 22 日 VOCs 各物种平均体积分数和 8 月 16 ~ 18 日 VOCs 各物种平均体积分数

Fig. 8 Average mixing ratios over May 20<sup>th</sup>-22<sup>nd</sup> and August 16<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> for individual VOC species

大气环境中 VOCs 的重要来源。而乙炔、2-丁烯和戊烯等也属于  $R1 > 1.5 \times R2$  的情形,它们主要来自机动车尾气排放、汽油挥发和工业排放<sup>[38,39]</sup>。这可能是受偏东风的水平输送影响的结果,观测点东边是工业区和交通主干道。

图 8(b)和图 8(c)虚线右边部分显示,两个时段体积分数变化属于  $R2 > 1.5 \times R1$  情形的,全部是高碳烷烃类和芳香烃类有机物。另外,属于  $R2 > R1$  情形且平均体积分数较大的,也主要集中在高碳烷烃和芳香烃。高碳烷烃主要来源于工业生产过程<sup>[40]</sup>,除了交通源排放和有机溶剂挥发外,工业生产也是芳香烃类 VOCs 的主要来源<sup>[41,42]</sup>。表明受偏东风的影响,周边工业生产排放以及交通源排放的 VOCs 很容易水平输送到观测点附近。

### 3 结论

(1)南京北郊夏季  $O_3$ 、 $NO_x$ 、CO 和 VOCs 的平均体积分数分别为  $(32.01 \pm 15.20) \times 10^{-9}$ 、 $(21.50 \pm 14.02) \times 10^{-9}$ 、 $(0.66 \pm 0.44) \times 10^{-6}$  和  $(33.16 \pm 25.20) \times 10^{-9}$ ; 污染物按浓度频率分布并进行洛伦兹拟合,近似得到  $O_3$ 、 $NO_x$ 、CO 和 VOCs 的背景体积分数分别为  $(5.71 \pm 2.51) \times 10^{-9}$ 、 $(12.20 \pm 0.36) \times 10^{-9}$ 、 $(0.28 \pm 0.01) \times 10^{-6}$  和  $(22.44 \pm 0.38) \times 10^{-9}$ 。  $O_3$  体积分数超过新的国家二级标准 14.1%。

(2)臭氧前体物体积分数受周边工业、交通和植被等局地源排放的影响较大。偏东风主导下  $NO_x$ 、CO 和 VOCs 体积分数易出现高值; 风速为  $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的西南风控制下时,大气中一些光化学活性较高的物种体积分数容易达到高值,  $O_3$  体积分数也容易累积到高值。

(3)南京“亚青会”调控时段 VOCs 和 CO 的体积分数并未显著减少。调控期间烷烃和烯烃的体积分数有所减少,但光化学活性强的组分比重有所增加。加上异常高温天气可能造成的影响,调控期间的  $O_3$  体积分数较其他时段未明显减少,且有 4 d 超标。

致谢:感谢南京信息工程大学中国气象局气溶胶与云降水重点开放实验室全体老师同学为观测实验正常运行所做的辛勤工作。

#### 参考文献:

[ 1 ] Haagen-Smit A J. Chemistry and physiology of los angeles smog [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1952, **44**(6): 1342-1346.

[ 2 ] Atkinson R. Gas-phase tropospheric chemistry of organic compounds: A review [J]. Atmospheric Environment. Part A. General Topics, 1990, **24**(1): 1-41.

[ 3 ] Madronich S, Calvert J G. Permutation reactions of organic peroxy radicals in the troposphere [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1990, **95**(D5): 5697-5715.

[ 4 ] Ehhalt D H. Photooxidation of trace gases in the troposphere Plenary Lecture [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 1999, **1**(24): 5401-5408.

[ 5 ] Hofzumahaus A, Rohrer F, Lu K D, *et al.* Amplified trace gas removal in the troposphere [J]. Science, 2009, **324**(5935): 1702-1704.

[ 6 ] Lelieveld J. Atmospheric chemistry: A missing sink for radicals [J]. Nature, 2010, **466**(7309): 925-926.

[ 7 ] Zhang Y H, Huang W, Stephanie J L, *et al.* Ozone and daily mortality in Shanghai, China [J]. Environmental Health Perspectives, 2006, **114**(8): 1227-1232.

[ 8 ] 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.

[ 9 ] Tang G Q, Li X, Wang Y S, *et al.* Surface ozone trend details and interpretations in Beijing, 2001-2006 [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2009, **9**: 8813-8823.

[ 10 ] 王会祥,唐孝炎,王木林,等. 长江三角洲痕量气态污染物的时空分布特征[J]. 中国科学(D辑), 2003, **33**(2): 114-118.

[ 11 ] 胡建林,张远航. 长江三角洲地区臭氧生成过程分析[J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 13-18.

[ 12 ] Zhang Y N, Xiang Y R, Chan L Y, *et al.* Procuring the regional urbanization and industrialization effect on ozone pollution in Pearl River Delta of Guangdong, China [J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(28): 4898-4906.

[ 13 ] Tang G Q, Wang Y S, Li X, *et al.* Spatial-temporal variations in surface ozone in Northern China as observed during 2009-2010 and possible implications for future air quality control strategies [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2012, **12**: 2757-2776.

[ 14 ] An J L, Wang Y S, Wu F K, *et al.* Characterizations of volatile organic compounds during high ozone episodes in Beijing, China [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, **184**(4): 1879-1889.

[ 15 ] 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.

[ 16 ] Wang P, Zhao W. Assessment of ambient volatile organic compounds (VOCs) near major roads in urban Nanjing, China [J]. Atmospheric Research, 2008, **89**(3): 289-297.

[ 17 ] Ling Z H, Guo H, Cheng H R, *et al.* Sources of ambient volatile organic compounds and their contributions to photochemical ozone formation at a site in the Pearl River Delta, southern China [J]. Environmental Pollution, 2011, **159**(10): 2310-2319.

- [18] Ling Z H, Guo H. Contribution of VOC sources to photochemical ozone formation and its control policy implication in Hong Kong [J]. *Environmental Science & Policy*, 2014, **38**: 180-191.
- [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: 化学*, 2010, **40**(4): 407-420.
- [20] Ryerson T B, Trainer M, Angevine W M, *et al.* Effect of petrochemical industrial emissions of reactive alkenes and NO<sub>x</sub> on tropospheric ozone formation in Houston, Texas [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**(D8): 4249-4272.
- [21] 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, **19**(6): 1383-1386.
- [22] 安俊琳, 朱彬, 李用宇. 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.
- [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] QX/T 174-2012, 大气成分站选址要求[S].
- [25] 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.
- [26] GB 3095-2012, 环境空气质量标准[S].
- [27] 世界卫生组织关于颗粒物、臭氧、二氧化氮和二氧化硫的空气质量准则(2005 年全球更新版)[S].
- [28] Lin W L, Xu X B, Ge B Z, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural site southwest of Beijing [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2009, **114**(D2), doi: 10.1029/2008JD010339.
- [29] 安俊琳. 北京大气臭氧浓度变化特征及其形成机制研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007. 68-72.
- [30] Li L, Chen C H, Huang C, *et al.* Process analysis of regional ozone formation over the Yangtze River Delta, China using the Community Multi-scale Air Quality modeling system [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**: 10971-10987.
- [31] 杨辉, 朱彬, 高晋徽, 等. 南京市北郊夏季挥发性有机物的源解析[J]. *环境科学*, 2013, **34**(12): 4519-4528.
- [32] Chameides W L, Fehsenfeld F, Rodgers M O, *et al.* Ozone precursor relationships in the ambient atmosphere [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**(D5): 6037-6055.
- [33] Sharkey T D, Wiberley A E, Donohue A R. Isoprene emission from plants: why and how [J]. *Annals of Botany*, 2008, **101**(1): 5-18.
- [34] Evtuygina M G, Pio C, Nunes T, *et al.* Photochemical ozone formation at Portugal West Coast under sea breeze conditions as assessed by master chemical mechanism model [J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(10): 2171-2182.
- [35] Chang C C, Wang J L, Liu S C, *et al.* Assessment of vehicular and non-vehicular contributions to hydrocarbons using exclusive vehicular indicators [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(33): 6349-6361.
- [36] Chang C C, Wang J L, Lung S C C, *et al.* Source characterization of ozone precursors by complementary approaches of vehicular indicator and principal component analysis [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(10): 1771-1778.
- [37] 高伟, 谭国斌, 洪义, 等. 在线质谱仪检测植物排放的挥发性有机物[J]. *分析化学*, 2103, **41**(2): 258-262.
- [38] Guo H, Lee S C, Louie P K K, *et al.* Characterization of hydrocarbons, halocarbons and carbonyls in the atmosphere of Hong Kong [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(10): 1363-1372.
- [39] Jorquera H, Rappenglück B. Receptor modeling of ambient VOC at Santiago, Chile [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(25): 4243-4263.
- [40] Srivastava A, Sengupta B, Dutta S A. Source apportionment of ambient VOCs in Delhi City [J]. *Science of the Total Environment*, 2005, **343**(1-3): 207-220.
- [41] Borbon A, Coddeville P, Locoge N, *et al.* Characterising sources and sinks of rural VOC in eastern France [J]. *Chemosphere*, 2004, **57**(8): 931-942.
- [42] 席劲瑛, 武俊良, 胡洪营, 等. 工业 VOCs 排放源废气排放特征调查与分析[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(11): 1558-1562.

## CONTENTS

Variation Characteristics of Surface Ozone and Its Precursors During Summertime in Nanjing Northern Suburb .....	SHAO Ping, AN Jun-lin, YANG Hui, <i>et al.</i> (4031)
Distribution Characteristics of Pollution Gases and Water Soluble Ion in Aerosol During the Asian Youth Games of Nanjing, China .....	ZOU Jia-nan, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4044)
Aerosol Concentration Variation in Nanjing During Asian Youth Games and the Relationship Between Aerosol Concentration and Visibility .....	YUAN Liang, YIN Yan, LI Qi, <i>et al.</i> (4052)
Characteristic Analysis of a Multi-day Pollution Event in Chang-Zhu-Tan Metropolitan Area During October 2013 .....	LIAO Zhi-heng, FAN Shao-jia, HUANG Juan, <i>et al.</i> (4061)
Application of On-line Single Particle Aerosol Mass Spectrometry (SPAMS) for Studying Major Components in Fine Particulate Matter .....	FU Huai-yu, YAN Cai-qing, ZHENG Mei, <i>et al.</i> (4070)
Establishment and Application of Replaceable Source Profiles of PM <sub>10</sub> .....	CHEN Qiang, JING Yi, WU Huan-bo, <i>et al.</i> (4078)
Distribution, Flux and Biological Consumption of Carbon Monoxide in the East China Sea and the South Yellow Sea in Summer .....	WANG Jing, LU Xiao-lan, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (4085)
Spatial and Temporal Distribution of Mercury in Water of a Small Typical Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region .....	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (4095)
Fluorescence Characteristics of Fractionated Colloidal Organic Matter in Freshwater from Hunhe and Taizihe Watersheds .....	LIU Na-na, LI Bin, LIU Rui-xia, <i>et al.</i> (4103)
Variations of Annual Load of TN and TP in the Deep Bay Watershed, Shenzhen .....	ZHAO Chen-chen, ZHANG Shi-yan, MAO Xian-zhong (4111)
Characteristics and Bioavailability of Organic Phosphorus from Different Sources of Sediments in Dianchi Lake .....	XIONG Qiang, JIAO Li-xing, WANG Sheng-rui, <i>et al.</i> (4118)
Heavy Metals Distribution Characteristics and Ecological Risk Evaluation in Surface Sediments of Dammed Jinshan Lake .....	ZHOU Xiao-hong, LIU Long-mei, CHEN Xi, <i>et al.</i> (4127)
Vertical Distribution Pattern and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in a Sediment Core from Pumoyum Co, Tibet .....	XIE Ting, LUO Dong-xia, YANG Rui-qiang (4135)
Heavy Metals Pollution and Analysis of Seasonal Variation Runoff in Xi'an .....	YUAN Hong-lin, LI Xing-yu, WANG Xiao-chang (4143)
Distribution and Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Urban Rainfall Runoff .....	WU Zi-lan, YANG Yi, LIU Min, <i>et al.</i> (4148)
Influence of the Substrate Composition in Extensive Green Roof on the Effluent Quality .....	CHEN Yu-lin, LI Tian, GU Jun-qing (4157)
Investigation of the Microbial Diversity and Structure of Biological Activated Carbon from Different Sources in Drinking Water Treatment Process .....	DU Er-deng, ZHENG Lu, FENG Xin-xin, <i>et al.</i> (4163)
Microcystin Safety Study During <i>Cyanobacteria</i> Removal by Pressure Enhanced Coagulation Process .....	JIANG Xin-yue, LUAN Qing, CONG Hai-bing, <i>et al.</i> (4171)
Membrane Fouling Based on Change of Membrane Characteristic Parameters During Ultrafiltration of Protein .....	WANG Xu-dong, ZHANG Yin-hui, WANG Lei, <i>et al.</i> (4176)
Impact Factors and Degradation Mechanism for the Ozonation of Acetaminophen in Aqueous Solution .....	CAO Fei, YUAN Shou-jun, ZHANG Meng-tao, <i>et al.</i> (4185)
Degradation of Benzothiazole in Electro-Assisted Microbial Reactor .....	LIU Chun-miao, DING Jie, LIU Xian-shu, <i>et al.</i> (4192)
Preparation and Evaluation of Fe-La Composite Oxide Nanoadsorbent for As(III) Removal from Aqueous Solutions .....	ZHANG Wei, CHEN Jing, ZHANG Gao-sheng (4198)
Physiological Responses of Tubificidae to Heavy Metal Chromium Stress .....	LOU Ju-qing, YANG Dong-ye, CAO Yong-qing, <i>et al.</i> (4205)
Effects of Light Quality on the Growth Characteristics and Biochemical Component of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> .....	TANG Qing-qing, FANG Zhi-guo, JI Wen-wen, <i>et al.</i> (4212)
Influence of Alkalinity and DO on ANAMMOX Bioreactor at Normal Temperature and Low Substrate Concentration .....	REN Yu-hui, WANG Ke, LI Xiang-kun, <i>et al.</i> (4218)
Effect of Fe <sup>2+</sup> and Fe <sup>3+</sup> on the Activity of ANAMMOX .....	LI Xiang, HUANG Yong, WU Chuan, <i>et al.</i> (4224)
Research on Change Process of Nitrosation Granular Sludge in Continuous Stirred-Tank Reactor .....	YIN Fang-fang, LIU Wen-ru, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (4230)
Effects of Salinity on N <sub>2</sub> O Production During Nitrification Using Aerobic Granular Sludge .....	WANG Shan-shan, LIANG Hong, GAO Da-wen (4237)
Analysis of Microbial Community Variation in the Domestication Process of Sludge in a Sulfate-reducing Reactor .....	ZENG Guo-qu, JIA Xiao-shan, ZHENG Xiao-hong, <i>et al.</i> (4244)
Quantifying the Influence of Different Matrices on Pb Accumulation in the Soil from Nanjing and Suspended Matter from the Lower of the Yangtze River with Pb Isotopic Technique .....	WANG Cheng, XIA Xue-qi, ZHANG Yi, <i>et al.</i> (4251)
Contamination Characteristics of Fluoroquinolones in Different Kinds of Soil Profiles in Southeast Suburb of Beijing .....	SU Si-hui, HE Jiang-tao, YANG Lei, <i>et al.</i> (4257)
Effect of Environmental Factors on the Formation of Several Typical Tetracycline Resistance Genes in Soil .....	ZHANG Jun, LUO Fang-yuan, XIONG Hao-hui, <i>et al.</i> (4267)
Response of Nitrification/Denitrification and Their Associated Microbes to Soil Moisture Change in Paddy Soil .....	LIU Ruo-xuan, HE Ji-zheng, ZHANG Li-mei (4275)
Microbial Community Abundance and Diversity in Typical Karst Ecosystem to Indicate Soil Carbon Cycle .....	JIN Zhen-jiang, TANG Hua-feng, LI Min, <i>et al.</i> (4284)
Effects of Variable Temperature on Organic Carbon Mineralization in Typical Limestone Soils .....	WANG Lian-ge, GAO Yan-hong, DING Chang-huan, <i>et al.</i> (4291)
Influence of the Interaction Between Iron Oxide and Electron Donor Substances on 1,1,1-Trichloro-2,2-bis( <i>p</i> -chlorophenyl)ethane (DDT) Reductive Dechlorination in Hydragic Acrisols .....	LIU Cui-ying, XU Xiang-hua, WANG Zhuang, <i>et al.</i> (4298)
Continuous Remediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Co-Cropping System Enhanced with Chelator .....	WEI Ze-bin, GUO Xiao-fang, WU Qi-tang, <i>et al.</i> (4305)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow at Different Sampling Scales .....	LI Hong-jian, GAO Yu-feng, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (4313)
Study on Regularity of Greenhouse Gas Emissions from Black Soil with Different Reclamation Years .....	LI Ping, LANG Man, XU Xiang-hua, <i>et al.</i> (4321)
Comparison Between Transgenic Insect-Resistant Cotton Expressing CryI <sub>Ac</sub> Protein and Its Parental Variety in Rhizospheric Fungal Diversity .....	PAN Jian-gang, JIAO Hai-hua, BAI Zhi-hui, <i>et al.</i> (4329)
Concentrations of Mercury in Ambient Air in Wastewater Irrigated Area of Tianjin City and Its Accumulation in Leafy Vegetables .....	ZHENG Shun-an, HAN Yun-lei, ZHENG Xiang-qun (4338)
Combined Effects of 1-Nitropyrene and 1,2-Naphthoquinone on Cytotoxicity and DNA Damage in A549 Cells .....	SHANG Yu, JIANG Yu-ting, ZHANG Ling, <i>et al.</i> (4345)
Influence of Organic Matter Evolution During Composting on the Bioavailability of Heavy Metals .....	BU Gui-jun, YU Jing, DI Hui-hui, <i>et al.</i> (4352)
Carbonization of Heavy Metal Cu Implanted Sewage Sludge and Stability of Heavy Metal in the Resulting Char .....	DOU Xiao-min, CHEN De-zhen, DAI Xiao-hu (4359)
Technological Characteristics of Bioreactor Landfill with Aeration in the Upper Layer .....	TIAN Ying, WANG Shen, XU Qi-yong (4365)
Impact of Nitrate Continuous Injection on N <sub>2</sub> O Releases from Bioreactor Landfill .....	BIAN Rong-xing, SUN Ying-jie, LI Jing-jing, <i>et al.</i> (4371)
Research on Contribution Decomposition by Industry to China's Carbon Intensity Reduction and Carbon Emission Growth .....	JIANG Jing-jing, YE Bin, JI Jun-ping, <i>et al.</i> (4378)
Shifting Path of Industrial Pollution Gravity Centers and Its Driving Mechanism in Pan-Yangtze River Delta .....	ZHAO Hai-xia, JIANG Xiao-wei, CUI Jian-xin (4387)
Method for Environmental Management in Paper Industry Based on Pollution Control Technology Simulation .....	ZHANG Xue-ying, WEN Zong-guo (4395)
Research Progress and Direction of Atmospheric Brown Carbon .....	YAN Cai-qing, ZHENG Mei, ZHANG Yuan-hang (4404)

# 《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年11月15日 第35卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 11 Nov. 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行