

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第11期

Vol.33 No.11

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

京津冀与长三角区域大气 NO ₂ 污染特征	王英, 李令军, 刘阳 (3685)
2008~2011 年夏季京津冀区域背景大气污染变化分析	杨俊益, 辛金元, 吉东生, 朱彬 (3693)
沧州市大气污染特征观测研究	王永宏, 胡波, 王跃思, 刘伟, 张武 (3705)
华北工业城市降水中金属元素污染特征及来源	李月梅, 潘月鹏, 王跃思, 王英锋, 李杏茹 (3712)
广州市交通主干道空气中苯系物的测量	叶丛雷, 谢品华, 秦敏, 凌六一, 郑尼娜, 刘文彬, 黄祖照 (3718)
基于实时交通信息的道路机动车动态排放清单模拟研究	黄成, 刘娟, 陈长虹, 张健, 刘登国, 朱景瑜, 黄伟明, 巢渊 (3725)
柴油轿车燃用煤基 F-T 合成油的排放特性	胡志远, 程亮, 谭丕强, 楼狄明 (3733)
九龙江口滨海湿地生源要素空间分布特征	余小青, 杨军, 刘乐冕, 田原, 余正, 王昌付 (3739)
南四湖水体氮、磷营养盐时空分布特征及营养状态评价	舒凤月, 刘玉配, 赵颖, 吴艳鹏, 李爱华 (3748)
天目湖流域湿地对氮磷输出影响研究	李兆富, 刘红玉, 李恒鹏 (3753)
北京市新建城区不透水地表径流 N、P 输出形态特征研究	李立青, 吕书丛, 朱仁肖, 刘泽权, 单保庆 (3760)
云阳宗海湖的分布与来源	张玉玺, 向小平, 张英, 陈玺, 刘景涛, 王金翠, 张媛静, 孙继朝 (3768)
南方某城市地表水体中粪源性污染指示微生物的分布特征研究	孙傅, 沙婧, 刘彦华 (3778)
三峡库区大宁河藻细胞昼夜垂直迁移研究	张永生, 郑丙辉, 姜霞, 郑浩, 钟娜, 陈春宵 (3787)
江淮农村生态型排水系统构建及截污作用研究	单保庆, 李楠, 唐文忠 (3797)
人工湿地植物床-沟壕系统水质净化效果	汪仲琼, 张荣斌, 陈庆华, 魏宏斌, 王为东 (3804)
潜流人工湿地演变对废水中有机物、氮及磷去除的影响	魏泽军, 谢建平, 黄玉明 (3812)
人工湿地处理含盐生活污水的特性研究	高峰, 杨朝晖, 李晨, 金卫红, 邓一兵 (3820)
催化湿式氧化法降解水中的 β -萘酚	刘杰, 于超英, 赵培庆, 陈革新 (3826)
ZVI/EDDS/Air 体系降解水中 2,4-二氯酚的研究	孙倩, 周海燕, 曹梦华, 吴琳娜, 王琳玲, 陈静, 陆晓华 (3833)
微波改性 MWNTs/TiO ₂ 复合材料对 1,2,3-三氯苯的光催化降解研究	施周, 张茜, 张伟, 徐舜开, 张骅 (3840)
腐殖酸对生物炭去除水中 Cr(VI) 的影响机制研究	丁文川, 田秀美, 王定勇, 曾晓岚, 徐茜, 陈健康, 艾小雨 (3847)
臭氧氧化-活性污泥法处理含 PVA 工业废水的试验研究	邢晓琼, 黄程兰, 刘敏, 陈滢 (3854)
复合底物对颗粒化 EBPR 系统除磷特性的影响及优化试验研究	徐少娟, 孙培德, 郑雄柳, 董毅 (3859)
进水比例对水解反应器出水水质的影响研究	梁康强, 熊娅, 戚茂荣, 林秀军, 朱民, 宋英豪 (3868)
厌氧-好氧联合型生物反应器填埋场渗滤液水质水量变化规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬, 陈馨 (3873)
我国城市污水处理回用调查研究	郭宇杰, 王学超, 周振民 (3881)
快雌醇和壬基酚在土壤中的吸附-解吸特征	姜鲁, 王继华, 李建忠, 辛佳, 李森, 刘翔 (3885)
黄土丘陵区刺槐林深层土壤有机碳矿化特征初探	马昕昕, 许明祥, 杨凯 (3893)
半干旱黄土丘陵区土壤结皮的地表水文效应	卫伟, 温智, 陈利顶, 陈瑾, 吴东平 (3901)
广西大石围巨型漏斗土壤中多环芳烃与环境因素	孔祥胜, 祁士华, 蒋忠诚, 黄保健 (3905)
酸性条件下黄铁矿氧化机制的研究	王楠, 易筱筠, 党志, 刘云 (3916)
淋洗条件下砂土和粉土盐运移过程的监测研究	付腾飞, 贾永刚, 郭磊, 刘晓磊 (3922)
空气注射修复苯污染地下水模拟研究	樊艳玲, 姜林, 张丹, 钟茂生, 贾晓洋 (3927)
不同终点检测 5 种双酚 A 类化合物对 MCF-7 的细胞毒性	张帅帅, 刘堰, 刘树深, 朱祥伟 (3935)
上海世博园后滩湿地糙足类群落特征及其对环境因子的响应	陈立婧, 吴艳芳, 景钰湘, 王聪, 张饮江 (3941)
耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究	吴涛, 谢文军, 依艳丽, 李小彬, 王君, 胡相明 (3949)
高效降酚菌株 <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10 生长动力学和苯酚降解特性的研究	陈晓华, 魏刚, 刘思远, 孙江曼, 王芳芳, 李昊源, 刘宇军 (3956)
四溴双酚 A 好氧降解菌的筛选及其降解特性研究	钱艳园, 刘莉莉, 于晓娟, 丁丛, 王志平, 施玉衡, 李晨君 (3962)
长期施用有机和无机肥对黑土 <i>nirS</i> 型反硝化菌种群结构和丰度的影响	尹昌, 范分良, 李兆君, 宋阿琳, 朱平, 彭畅, 梁永超 (3967)
三氯乙烯在不同土壤中的吸附特性及其影响因素研究	何龙, 邱兆富, 吕树光, 逯志昌, 王治立, 隋倩, 林匡飞, 刘勇弟 (3976)
多菌灵在农田土壤中的降解及其影响因素研究	肖文丹, 杨肖娥, 李廷强 (3983)
硫化物对垃圾焚烧污泥焚烧飞灰高温过程中重金属挥发的影响	刘敬勇, 孙永裕 (3990)
关于医疗垃圾飞灰中二噁英在惰性气氛下的低温热脱附研究	纪莎莎, 李晓东, 徐旭, 陈彤 (3999)
第七届环境模拟与污染控制学术研讨会论文	
稻田气溶胶 NH ₃ 和气体 NO _x 排放在线测定研究	龚巍巍, 栾胜基 (4006)
一种可同时检测挥发性氯代烷烃和氯代烯烃的电子鼻的研制	文晓刚, 刘锐, 蔡强, 万梅, 汤灵容, 陈吕军 (4012)
基于被动采样技术的垃圾焚烧厂及周边大气中 PAHs 分布研究	孙少艾, 李洋, 周轶, 王海蛟, 孙英 (4018)
涪江流域农业非点源污染空间分布及污染源识别	丁晓雯, 沈珍瑶 (4025)
人工湿地不同区域基质磷含量的差异分析	曹雪莹, 种云霄, 余光伟, 仲海涛 (4033)
基于 RT-qPCR 选择性检测水中活性病原菌	林怡雯, 李丹, 吴舒旭, 何苗, 杨天 (4040)
消毒副产物生成的温度影响和动力学模型	张小璐, 杨宏伟, 王小任, 付静, 解跃峰 (4046)
一种厌氧微观定量研究新方法	张仲良, 吴静, 蒋剑凯, 姜洁, 李怀志 (4052)
梧桐树叶作为反硝化碳源的研究	熊剑峰, 徐华, 阎宁, 张永明 (4057)
降解嗜盐菌 AD-3 的筛选、降解特性及加氧酶基因的研究	崔长征, 冯天才, 于亚琦, 董斐, 杨昕梅, 冯耀宇, 刘勇弟, 林汉平 (4062)
《环境科学》征订启事 (3711) 《环境科学》征稿简则 (3767) 信息 (3998, 4039, 4045, 4056) 专辑征稿通知 (4051)	

京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征

王英¹, 李令军², 刘阳³

(1. 中央民族大学生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 3. Department of Environmental Health, Rollins School of Public Health, Emory University, Atlanta, GA 30322, USA)

摘要: 基于地面监测及遥感反演数据, 研究了京津冀与长三角区域大气 NO₂ 污染特征, 并进行了对比分析。从 2005 ~ 2011 年的平均近地面质量浓度和垂直柱浓度来看, 京津冀与长三角中心城市大气 NO₂ 基本处于同一污染水平; 其区域背景站的 NO₂ 浓度也差异不大, 且与两大区域过渡地带的合肥市大致相同。区域 NO₂ 高浓度中心夏季较为分散, 秋冬季高浓度范围明显扩大, 冬季全部连为一片。近年来随着中心城区污染企业的外迁, 北京、上海等城市核心区 NO₂ 近地面污染有所缓解, 但区域背景站 NO₂ 近地面浓度和垂直柱浓度都有所升高, 京津冀与长三角 NO₂ 整体污染水平形势依旧严峻。从区域分布看, 北京、上海等城市 NO₂ 浓度较高, NO₂ 柱浓度高出区域背景的 50% 左右, 大约是欧亚大陆背景水平的 3 倍; 近地面 NO₂ 浓度地域差异更大, 北京、上海等中心城市 NO₂ 近地面质量浓度是城市清洁区的 2 倍, 是区域背景的 10 倍以上, 达欧亚大陆背景站瓦里关的上千倍。北京奥运及上海世博等大型活动之前及期间大气污染集中整治效果较为明显, 但活动结束后, 城市大气 NO₂ 污染都出现反弹。结果表明, 区域空气质量的持续改善需要区域内各省市常抓不懈的联防联控, 仅靠短期内运动式的污染治理难以从根本上解决大气环境问题。

关键词: NO₂; 质量浓度; 柱浓度; 分布; 对比

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)11-3685-08

Characteristics of Atmospheric NO₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations

WANG Ying¹, LI Ling-jun², LIU Yang³

(1. College of Life and Environmental Science, Minzu University of China, Beijing 100081, China; 2. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 3. Department of Environmental Health, Rollins School of Public Health, Emory University, Atlanta, GA 30322, USA)

Abstract: The interannual variability of NO₂ levels in two major Chinese economic regions, the Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) economic circle and the Yangtze River Delta (YRD), were studied using multiple years of OMI-retrieved NO₂ columns and ground measurements. The NO₂ columns were comparable in the two regions, which were ~ 50% higher than the BTH and YRD regional background and two times higher than the Asia-Europe continental background. Satellite data showed that the high NO₂ regions scattered around Beijing and Shanghai in summer, and the coverage of high NO₂ regions increased in spring and merged in winter, affecting the entire eastern China. Ground level NO₂ concentrations in the urban centers of Beijing and Shanghai were also comparable, which were ~ 10 times greater than the regional background and 1 000 times higher than the Asia-Europe continental background. As industries gradually migrated out of the urban centers, the NO₂ concentrations in Beijing and Shanghai decreased, but the regional background NO₂ concentration in BTH and YRD increased. It reflected in part the impact of NO_x emission reductions related to fossil fuel combustion as a result of air quality control measures in BTH and YRD. NO₂ levels during the Beijing 2008 Olympic Games and the Shanghai World Expo 2010 decreased temporarily, but bounced back quickly afterwards, indicating that sustainable air quality improvement can only be achieved through long-term regional efforts.

Key words: NO₂; mass concentration; column density; distribution; comparison

NO_x 不仅是大气光化学烟雾、细粒子污染的重要前体物, 也是造成大气严重酸化的主要物质之一^[1-4], 间接影响到全球气候变化^[5]。多年来我国煤炭燃烧总量过大且缺乏控制 NO_x 排放的有效措施, 机动车排放也急剧增加, 大气中 NO_x 排放增加明显, NO_x 污染一直呈恶化趋势^[6,7]。北京、上海是我国重要的中心城市, 所在的京津冀和长三角区域又是我国主要的经济圈, 能源消费的快速增长导致

区域性大气污染异常突出^[8,9]。传统的 NO_x 研究多集中在常规的地面仪器监测^[8-11], 近年来遥感技术越来越多地应用到大气环境监测领域^[12-15]。区域内各城市间污染相互传输、互相影响, 形成了庞杂

收稿日期: 2012-01-09; 修订日期: 2012-03-27

基金项目: 中央民族大学 985 工程项目 (MUC985-9)

作者简介: 王英 (1972 ~), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为大气环境科学, E-mail: wy1972@126.com

的大气污染复合体,区域联防联控工作的开展亟须全面了解大气污染特征及其变化趋势. 传统的地面仪器监测关注局地大气污染微观特征,卫星遥感监测反映的是区域宏观污染状况. 兼取两者优势,综合分析大气污染的时空分布规律将是大气污染监测的重要发展方向. NO_2 是 NO_x 主要组成部分,两者都是我国法定监测的重要大气污染成分. 目前关于 NO_2 城市与区域整体污染水平、地面与整层污染特征及变化趋势,特别是对于京津冀与长三角两大区域的地面常规监测与遥感解译综合研究尚不多见.

本文拟对京津冀与长三角两大区域 NO_2 地面监测及大气遥感进行综合分析,研究各区域 NO_2 污染特征及变化趋势,并进一步探讨相关影响因素. 2008 年在北京、2010 年在上海相继举办了奥运会和世博会. 重大国际活动之前及期间都采取了相应的大气污染控制措施;活动结束后,大部分控制措施予以解除. 本研究还将探讨短期污染控制措施对大气 NO_2 浓度变化的作用效果及地区间差异,以期为大气环境监管提供基础数据支持.

1 材料与方法

本研究使用的 NO_2 等数据资料主要来源于两方面,一是环保部门对外发布的常规近地面监测数据(包括 NO_2 、 SO_2 质量浓度等),北京与上海大气污染物实现了自动在线监测,并对外公布逐日 NO_2 、 SO_2 等监测数据^[16,17],环境公报中发布每年污染物平均浓度. 本研究以此数据为基础,进行 NO_2 年际和年内污染变化特征分析,并探讨其污染空间差异. 此外还利用环境质量报告书公布的数据,探讨了多年来北京大气 NO_x 的变化规律及其来源影响.

二是利用 KNMI(荷兰皇家气象研究所)提供的基于 Ozone Monitoring Instrument (OMI)数据反演的 NO_2 整层柱浓度数据. 本文所使用的 NO_2 柱浓度为 2 级产品的逐日网格化数据,可以在 KNMI 网站下载获取,年均浓度为逐日浓度的算术平均值. OMI 是装载在 Arua 卫星上的臭氧观测仪,于 2004 年 7 月升入太阳同步极地轨道^[18]. 该传感器通过观测地球大气和表面的后向散射辐射获取信息,波谱范围 270 ~ 500 nm,波谱分辨率为 0.5 nm,星下点空间分辨率 13 km × 24 km,扫描幅宽为 2 600 km. 大量的地面或航空实验显示 NO_2 遥感解译结果与地基及航空实测数据具有较强的相关性,相关系数大都在 0.8 以上,很好地反映了大气 NO_2 垂直浓度特征^[12~14]. NO_2 遥感解译选取北京、上海、上甸子

(京津冀背景站)和临安(长三角背景站)、合肥(位于京津冀与长三角两大区域过渡地带)、瓦里关(欧亚大陆背景站)作为研究站点(见图 1).

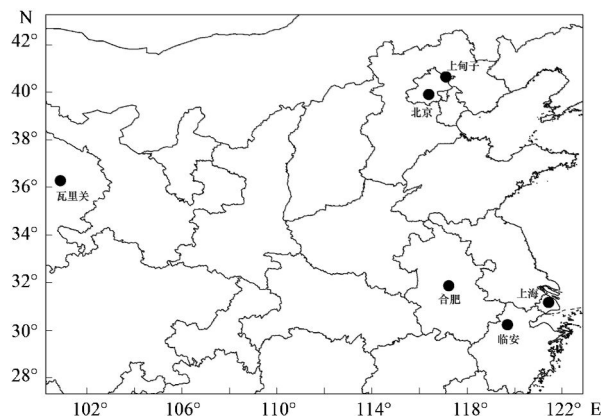


图 1 站点分布

Fig. 1 Spatial distribution of study sites

2 结果与讨论

2.1 区域分布特征

统计了 2005 年以来北京、上甸子、上海、临安、瓦里关,以及合肥的 NO_2 柱浓度变化. 发现京津冀、长三角两大区域的核心城市北京、上海 NO_2 柱浓度基本处于同一水平,两城市 2005 ~ 2011 年 NO_2 平均柱浓度分别为 $16.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 和 $16.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,北京略低于上海;两大区域的背景站上甸子与临安 NO_2 柱浓度也基本相同,并且与位于两大区域之间的过渡地带的合肥市差异不大,上甸子、临安与合肥三地 2005 ~ 2011 年 NO_2 平均柱浓度分别为 10.5×10^{15} 、 10.1×10^{15} 和 $10.2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 欧亚大陆背景站瓦里关 NO_2 柱浓度最低,2005 ~ 2011 年平均 $3.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,为两大区域背景站的 1/3 左右,北京、上海等中心城市的 1/5 左右(见图 2). 总体来看,两大区域 NO_2 柱浓度核心城市差异不大,背景区也处于同一水平;由核心城市、区域背景,向欧亚背景站 NO_2 柱浓度呈逐渐降低趋势.

2005 ~ 2011 年北京、上海城区 NO_2 近地面平均质量浓度分别为 $59.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 和 $54.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,两者差异不大. 2008 ~ 2011 年合肥市与北京城市清洁区定陵站 NO_2 近地面质量浓度同为 $27.3 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是北京、上海城区 NO_2 平均浓度的 50% 左右(见图 3). 上甸子站 2008 年 6 月至 2009 年 5 月近地面 NO_x 平均体积浓度为 13.7×10^{-9} ^[19];而临安站 2006 ~ 2007 年近地面 NO_x 年均体积浓度为 14.4×10^{-9} ^[10],两者也处在同一污染水平. 与柱浓度分布

极为类似, NO₂ 近地面质量浓度核心城市差异不大, 背景区也基本一致。

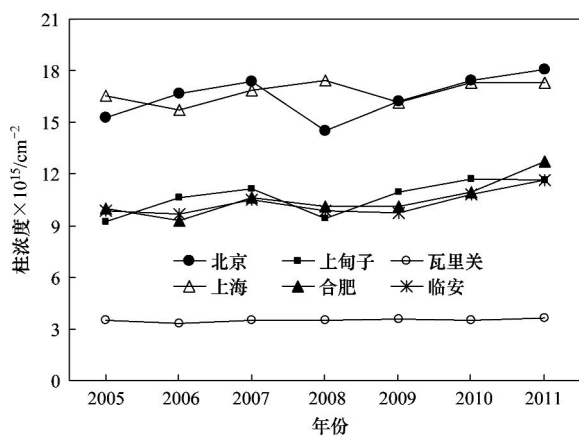


图2 OMI 解析的 NO₂ 柱浓度年际变化

Fig. 2 Interannual variability of NO₂ column measured by OMI at different sites between 2005 and 2011

临安站近地面 NO_x 年均体积浓度为 8.1×10^{-9} , 瓦里关站近地面 NO_x 年均体积浓度为 0.04×10^{-9} , 前者是后者的 200 多倍^[20]; 上甸子 NO_x 年均体积浓度远低于北京城区, 前者甚至不及后者的 1/10^[11]. NO_x 近地面体积浓度若以北京、上海等中心城市为区域背景的 10 倍, 区域背景站为欧亚大陆背景站瓦里关的 200 倍计, 上海、北京近地面 NO_x

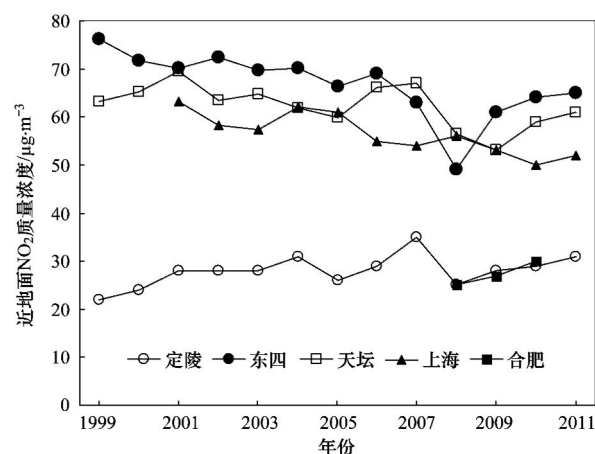


图3 北京与上海 NO₂ 近地面质量浓度年际变化

Fig. 3 Interannual variability of ground-level NO₂ mass concentration in Beijing and Shanghai between 1999 and 2011

年均体积浓度达到瓦里关的 2 000 多倍. 考虑到 NO₂ 是 NO_x 主要组成部分, NO₂ 近地面浓度的地域差异应与 NO_x 相当, 北京、上海等中心城市的 NO₂ 近地面浓度至少也应达到欧亚大陆背景站瓦里关的上千倍. 与垂直柱浓度相比, NO₂ 近地面浓度的地域性差异明显增大.

研究表明我国东部地区 NO₂ 柱浓度冬高夏低, 春秋为过渡季节^[15,21]. 图 4 为我国 2011 年 1 月、4 月、7 月和 10 月 NO₂ 柱浓度分布情况, 以上 4 个月

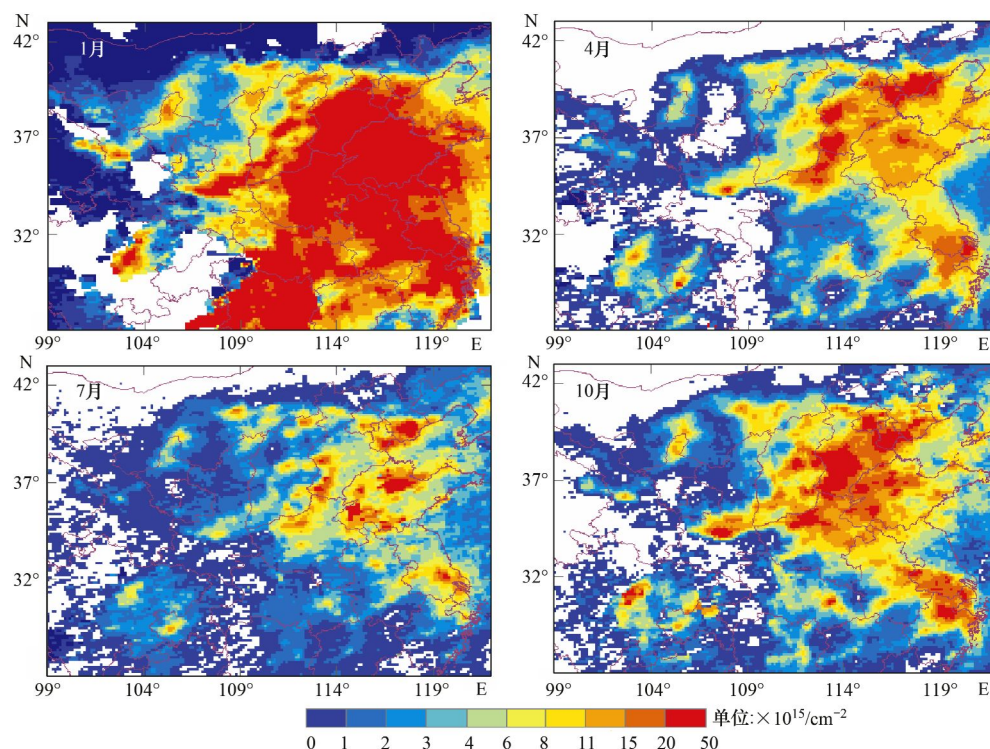


图4 2011 年 1 月、4 月、7 月以及 10 月我国东部地区 NO₂ 柱浓度分布

Fig. 4 Seasonal variations of NO₂ columns over the east of China in 2011

分别是冬、春、夏、秋季节的代表月份。7月,在京津冀、长三角以及黄河中下游等地形成一些分散的NO₂高浓度中心。4月和10月京津冀与黄河中下游NO₂高浓度范围明显扩大,并连为一片;长三角NO₂高浓度区域也明显增大,覆盖了苏南、浙北以及上海全部;合肥处于两大高浓度区域的过渡地带。1月京津冀、长三角以及黄河中下游等高浓度区域扩大、并为一体,海河、黄河、淮河以及长江中下游全部处于NO₂高浓度的覆盖。

电厂、工业以及道路移动源对我国NO_x总排放量的贡献率达到89%^[7],我国大型城市市区空气中50%以上的NO_x污染来自机动车排放^[6],而NO_x排放源主要集中在城市区域及其周边。相关统计数据显示,京津冀及长三角所在省市NO_x排放量巨大,煤炭与汽油消费量分别占全国的25%和29%,民用汽车拥有量超过全国的30%(见表1)。京津冀以及长三角区域NO_x排放主要集中在城市及其周边,因此中心城市NO₂近地面浓度明显高于区域背景,与欧

亚大陆背景的差距更为明显。总体来看,北京、上海城市NO₂柱浓度是区域背景站的1~2倍,是欧亚大陆背景站瓦里关的3倍左右;北京、上海城市NO₂近地面浓度是城市清洁区的2倍左右,是区域背景的10倍以上,是欧亚大陆背景站瓦里关站的上千倍。

城市与背景站NO₂近地面浓度的差距远远大于NO₂垂直柱浓度,主要原因是城市大气污染主要来源于近地层人为排放,近地层NO_x排放的地域差别大,但大气污染物作为流体,距离污染排放源越远,混合越均匀。垂直方向上,同一纬度1~100 hPa之间NO₂体积浓度已没有差别^[22]。城市与区域背景NO₂整层柱浓度的差异明显小于两地NO₂地面浓度的差异。综上,北京与上海城区的大气NO₂基本处于同一污染水平(包括近地面质量浓度和柱浓度),而其所在区域的背景站NO₂浓度差异也不明显,但区域内中心城市与区域背景、欧亚大陆背景之间的NO₂浓度悬殊较大,其中NO₂近地面浓度的差距又远远大于NO₂垂直柱浓度。

表1 2010年京津冀及长三角省市NO_x排放量及相关要素统计¹⁾

Table 1 Annual NO_x emissions, major source information, and ground level NO₂ concentrations in the Beijing-Tianjin-Hebei Metropolitan Region and the Yangtze River Delta

项目	北京市	天津市	河北省	上海市	江苏省	浙江省	全国
煤炭消费量×10 ⁶ /t	26.4	48.1	274.6	58.8	231.0	139.5	3 122.4
汽油消费量×10 ⁶ /t	3.7	2.0	2.4	4.2	7.5	3.7	68.9
民用汽车拥有量×10 ⁶ /辆	4.5	1.6	4.9	1.8	5.5	5.4	78.0
NO _x 排放量×10 ⁴ /t	22.3	24.6	99.6	38.0 ^[23]	161.7	71.6	2 274.0
城市NO ₂ 浓度/μg·m ⁻³	57	45	41(石家庄)	50	46(南京)	56(杭州)	

1) 数据主要来自中国统计年鉴、中国能源统计年鉴、中国环境统计年鉴,NO_x排放量来自国家及相关省市环境质量报告书

受气候条件影响,低纬度大气光化学反应活动强烈而高纬度弱得多,自然条件下NO₂柱浓度存在由低纬度向高纬度逐渐降低的趋势^[24]。扣除该因素影响,北京与上海NO₂柱浓度应差异不大。从NO₂近地面质量浓度看,北京略高于上海,主要是近地面人为排放北京明显高于上海。截至2010年底,北京机动车保有量达到481万辆,而上海机动车保有量310万辆(见表1),交通源排放北京明显高于上海。此外上海及周边长三角冬季没有大规模的采暖活动,而华北区域普遍存在冬季采暖,固定源排放也是北京多于上海。受区域大规模的污染排放输送影响,北京清洁区的NO₂近地面质量浓度与合肥城市水平一致。

2.2 NO₂变化趋势

1999~2007年北京NO₂市区近地面质量浓度呈下降趋势,东四站NO₂浓度由1999年的76 μg·m⁻³降至2007年的63 μg·m⁻³,降幅为17%;与

此同时,清洁区定陵站NO₂近地面质量浓度却缓慢升高,由1999年的22 μg·m⁻³升至2007年的35 μg·m⁻³,升幅为59%。2008年北京所有站点NO₂近地面质量浓度明显降低,2009年都有较大回升,随后呈缓慢增长趋势(见图3)。华北区域背景站上甸子2003年以来近地面NO₂浓度也基本以上升为主,2009年高达26 μg·m⁻³,甚至超过了1999年定陵站的水平^[11,19,25]。

2001~2010年上海市区NO₂近地面质量浓度基本以下降为主,由2001年的63 μg·m⁻³下降至2010年的50 μg·m⁻³(见图3),下降幅度为21%。然而长三角背景站临安近地面NO_x体积浓度20世纪90年代中期以来呈明显上升趋势,NO_x体积浓度由1994~1995年的8.1×10⁻⁹,升至2000年左右的11.3×10⁻⁹,再到2006年左右的13.5×10⁻⁹,至2007年则达到14.4×10⁻⁹,总升幅为78%^[10,20,26],

NO_x 区域整体污染水平在逐渐升高。

1996~2006 年中国东部大气对流层 NO₂ 柱浓度呈明显的增长趋势^[15,27]。2006 年以来北京、上海,以及上甸子、临安 NO₂ 柱浓度也以上升为主,2005~2011 年欧亚背景站瓦里关 NO₂ 柱浓度略有升高,但变化相对平缓(见图 2)。区域中心城市 NO₂ 柱浓度与背景点 NO₂ 的柱浓度及其近地面浓度变化规律基本一致,共同反映了区域整体污染水平变化趋势。虽然中心城市近地面 NO₂ 质量浓度有所下降,但京津冀与长三角两大区域 NO₂ 柱浓度都呈增加趋势,NO₂ 整体污染水平在加重。

城市核心区监测站近地面 NO₂ 主要来源于周边局地源排放,反映了站点周边污染排放特征;而城市的清洁区,大气污染物主要来自城市污染输送,NO₂ 浓度则反映了城市总体污染水平,NO₂ 区域背景浓度则反映了区域整体污染特征,这与大气颗粒物污染分布规律基本一致^[28]。大气污染物垂直柱浓度相对于地面质量浓度来说,反映了区域整体污染状况^[29],因此北京 NO₂ 柱浓度与城市清洁点定陵 NO₂ 质量浓度相关性较好,2004 年 10 月~2010 年 12 月两者逐月平均浓度相关系数达 0.895,而与城市中心站点 NO₂ 质量浓度的相关性较差^[21]。城市 NO₂ 柱浓度反映了城市整体污染水平,背景区 NO₂ 柱浓度反映了区域污染水平,从图 2 的统计结果来看,两者变化趋势也基本一致。

近年来,北京、上海等城市核心区进行了大规模的污染治理工作;对于一些严重污染企业,或关停或迁至周边地区;机动车排放标准逐渐提高。2005 年北京东方石油化工有限公司有机化工厂、北京化二股份有限公司由朝阳区搬至房山区。2007 年北京焦化厂迁至河北唐山。截止 2008 年,北京完成了东南郊化工地区和四环路内 276 家企业调整搬迁,市区少有燃煤企业。首钢 2007 年与 2010 年在石景山区分别减压产 4×10^6 t,而 2010 年首钢钢总产量却达到 32×10^6 t 左右,大部分产量主要迁往了周边河北省有关地市。1998 年,北京大约有 135 万辆欧 0 (业界一般将实施欧 I 前的阶段称为欧 0) 排放汽车,1999 年开始实施国 I (相当于欧 I) 排放标准,2002 年、2005 年和 2008 年,北京又先后实施了国 II、国 III 和国 IV 排放标准。近年来北京机动车保有量虽然明显增加,但 NO_x 排放因子明显减小,汽油车由欧 0 的 $2.4 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ 降至国 IV 的 $0.1 \text{ g} \cdot \text{km}^{-1}$ ^[30]。“十一五”期间,上海市对市区燃煤设施实施了清洁能源替代,中心城区 682 km² 范围内

基本建立了无燃煤区。大规模的城市污染治理致使北京、上海等城市核心区 NO₂ 近地面浓度逐渐降低(见图 3)。

北京、上海城市核心区大气污染的治理并没有从根本上改变区域大气污染恶化趋势。一些污染企业只是由市区搬向郊区,或搬向临近的其他中小城市。区域乃至全国大气污染排放在逐年增加。1980~2007 年中国能源消费明显增加^[31],大气中 NO_x 排放增加明显,由 2000 年的 12.1×10^6 t 升至 2005 年的 19.1×10^6 t,区域性 NO₂ 污染呈明显恶化趋势。如果不采取相应的减排措施,2030 年全国 NO_x 排放量将达到 35.4×10^6 t^[7]。从京津冀、长三角城市与背景浓度 NO₂ 柱浓度都在增加的趋势看,我国东部地区整体大气污染形势逐渐恶化。近年来北京城区的 CO 近地面浓度在降低,城市与背景点的柱浓度则在上升^[29],与 NO₂ 变化规律较为相似。区域大气环境质量的整体改善需要各省市协同污染防治工作,推进区域大气污染联防联控,将污染水平降到最低。

2.3 北京与上海大气 NO₂/SO₂ (NO_x/SO₂) 比值长期变化

城市大气 SO₂ 主要来自燃煤排放,反映了煤烟型污染;NO_x (NO₂) 不仅来自燃煤排放,而且越来越多地反映机动车尾气排放^[32]。NO₂/SO₂ 比值的增减可以反映煤烟型污染与机动车排放型污染此消彼长的变化。2000~2011 年北京与上海 NO₂、SO₂ 浓度变化以下降为主,其中 SO₂ 浓度下降速度更为明显,因此两城市 NO₂/SO₂ 比值基本呈上升趋势,分别由 2000 年的 1.00 和 1.36 上升至 2011 年的 1.96 和 1.78(见表 2)。北京与上海逐渐由煤烟型向机动车型污染变化。

北京有更长时间序列的 NO_x 和 SO₂ 监测数据,两者污染来源的不同,比值的增减同样反映了大气污染类型的变化。统计了 1984~2011 年北京天坛、车公庄以及清洁区站点定陵 NO_x 浓度长期变化趋势(见图 5),天坛站大气污染处于全市平均水平^[32],可代表北京的城市水平;车公庄站位于首体南路与车公庄西路交通干道的交汇点,为典型的交通站点。定陵站代表整个北京城市区域 NO_x 浓度水平。

1984 年以来定陵 NO_x 浓度基本呈上升趋势,说明整个北京区域 NO_x 污染在加重。城区的天坛站和车公庄站 NO_x 浓度变化过程分为两个阶段:1984~1998 年逐渐升高,特别是交通站车公庄 NO_x 浓度上升非常明显,由 1984 年的 $77 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 升至 1998 年

的 $265 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 升幅高达 244%; 1998 年以来则出现了明显回落, 最低降至 2005 年的 $100 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$. 20 世纪 80 ~ 90 年代北京城区大气 NO_x 浓度的快速增长源于该段时间各类污染源排放量的增长; 21 世

纪以来北京大气 NO_x 浓度的回落, 得益于各类污染治理措施的实施, 特别是机动车排放标准在 1999 ~ 2008 年期间由国 I 提高到国 IV, 机动车排放因子明显降低.

表 2 2000 ~ 2011 年北京与上海 NO_2 、 SO_2 浓度以及 NO_2/SO_2 比值逐年变化¹⁾

Table 2 Annual mean NO_2 and SO_2 levels as well as their ratios in Beijing and Shanghai between 2000 and 2011

城市	项目	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
北京	NO_2	71	71	76	72	71	66	66	66	49	53	57	55
	SO_2	71	64	67	61	55	50	53	47	36	34	32	28
	NO_2/SO_2	1.00	1.11	1.13	1.18	1.29	1.32	1.25	1.40	1.36	1.56	1.78	1.96
上海	NO_2	61	63	58	57	62	61	55	54	56	53	50	52
	SO_2	45	43	35	43	55	61	51	55	51	35	29	29
	NO_2/SO_2	1.36	1.47	1.66	1.33	1.13	1.00	1.08	0.98	1.10	1.51	1.72	1.78

1) 数据来自北京、上海市环境质量公布, NO_2 、 SO_2 浓度单位 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

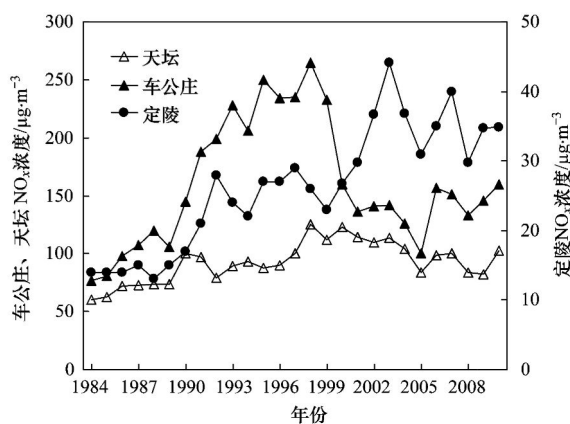


图 5 1984 ~ 2011 年北京 NO_x 浓度年际变化

Fig. 5 Interannual variability of NO_x concentrations at 3 sites in Beijing between 1984 and 2011

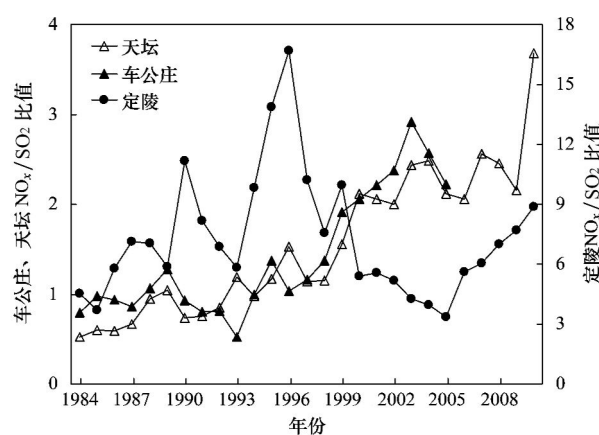


图 6 1984 ~ 2011 年北京 NO_x/SO_2 比值年际变化

Fig. 6 Interannual variability of the ratio of NO_x to SO_2 concentrations at 3 sites in Beijing between 1984 and 2011

此外还统计了 NO_x/SO_2 比值长期变化趋势. 近 28 年来天坛站、车公庄站 NO_x/SO_2 比值一直在缓慢增加(见图 6). 城市中 NO_x 和 SO_2 主要为化石燃料使用过程中所排放; SO_2 来源相对单一, 主要来自煤炭燃烧; 而 NO_x 却来自所有化石的燃烧, 特别是随着机动车保有量的快速增加, 机动车尾气排放已占相当比例. 城区 NO_x/SO_2 比值的增加说明北京由煤烟型污染快速向机动车尾气型污染转变.

2.4 大型活动对 NO_2 污染的影响

2008 年北京举办了奥运会, 2010 年上海举办了世博会, 活动期间举办城市都实施了不同程度的空气质量保障措施. 奥运期间北京及周边六省市同时实行了大规模的污染减排措施, 空气质量短期内得到了明显改善. 2008 年北京首钢压缩 $4 \times 10^6 \text{ t}$ 产量; 奥运前, 北京 4 大电厂完成了脱硝改造, 化二股份有限公司与东方石油化工有限公司有机化工厂停产. 2008 年新车执行国家第四阶段机动车排放标

准, 8 ~ 9 月实行机动车单双号限行. 源于奥运之前及期间空气质量保障措施作用, 2008 年北京所有站点的 NO_2 近地面质量浓度都明显下降, 定陵、东四、天坛比 2007 年分别下降 28.2%、22.2% 和 15.9% (见图 3). 北京及上甸子 NO_2 柱浓度也同步回落, 分别下降 16.4% 和 15.3% (见图 2). 受世博前及期间空气质量保障措施影响, 上海 NO_2 近地面质量浓度 2008 ~ 2010 年逐年降低, 2010 年降至有记录以来的新低, 比 2009 年降低 6.7% (见图 3). 与北京奥运相比, 世博前后上海及周边省市空气质量保障措施力度弱得多, 上海 NO_2 近地面浓度下降幅度明显低于北京; 区域的另一中心城市杭州城区 NO_2 近地面浓度 2008 ~ 2010 年分别为 $53 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $52 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $56 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 世博之年最高; 上海及临安 NO_2 柱浓度 2009 ~ 2010 年世博会前后甚至有所增长(见图 2), 长三角区域 NO_2 整体污染水平改善效果并不明显.

大型活动结束后,随着空气质量保障措施的取消,北京与上海等举办城市大气污染都有所回升. 2008 年以后北京 NO₂ 近地面质量浓度出现反弹,清洁区定陵及市区的天坛和东四逐年升高(见图 3);北京城市与上甸子 NO₂ 柱浓度上升也较明显(见图 2). 定陵 NO₂ 近地面质量浓度由 2008 年的 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 逐渐升至 2011 年的 31 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$;北京城市 NO₂ 柱浓度由 2008 年的 $14.5 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 升至 2011 年的 $18.1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$,并超过出了奥运前的最高水平. 世博会后,上海 NO₂ 近地面质量浓度由 2010 年的 50.1 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升至 2011 年的 51.8 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,但其柱浓度变化不大;临安 NO₂ 柱浓度略有增加,由 2008 年的 $10.8 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$ 升至 2011 年的 $11.7 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$. 区域 NO₂ 污染在持续加重.

北京奥运期间空气质量的迅速改善,得益于北京及周边省市大气污染治理及监管的协同作用. 上海世博会期间大气污染治理力度相对较小,且主要限于上海本地,区域内的另一中心城市杭州 NO₂ 近地面浓度甚至在升高. 奥运及世博会过后,举办城市大气污染都有所加重. 因此,区域空气质量的持续改善需要区域内各省市的联防联控,形成完备的区域大气环境管理的法规、标准和政策,建立统一的大气污染联防联控体系. 仅靠短期内运动式的污染治理难以从根本上解决大气环境问题.

3 结论

(1)京津冀与长三角的中心城市上海、北京等大气 NO₂ 污染水平较高,两城市近地面质量浓度及垂直柱浓度基本一致. 两城市群的 NO₂ 背景浓度之间的差异也不大,并与位于两大区域过渡地带的安徽省省会合肥市处于同一污染水平. 两大区域中心城市的 NO₂ 柱浓度超出区域背景浓度的 50% 左右,是欧亚大陆背景站瓦里关的 5 倍. 近地面浓度中心城市为区域背景的 10 左右,是欧亚大陆背景站瓦里关的上千倍. NO₂ 近地面浓度城市地区与背景区域的差距远大于两者柱浓度之间的差距.

(2)京津冀与长三角的中心城市上海、北京等 NO₂ 近地面浓度 2000 年以来基本呈下降趋势;两大区域城市清洁区、区域背景站 NO₂ 近地面浓度基本以上升为主;中心城市及区域背景点 NO₂ 柱浓度也在缓慢升高. 中心城市大气污染治理措施仅仅减缓了城市核心区污染程度,但并没有改变区域 NO₂ 整体污染加重的趋势. 近年来上甸子、临安 NO₂ 柱浓度的上升趋势,说明京津冀、长三角等区域 NO₂

整体污染水平不容乐观.

(3)区域空气质量的持续改善需要区域内各省市的联防联控,仅靠短期内运动式的污染治理难以从根本上解决大气环境问题.

参考文献:

- [1] Knowlton K, Rosenthal J E, Hogrefe C, *et al.* Assessing ozone-related health impacts under a changing climate [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2004, **112** (15): 1557-1563.
- [2] Duan F K, He K B, Ma Y L, *et al.* Concentration and chemical characteristics of PM_{2.5} in Beijing, China: 2001-2002 [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **355** (1-3): 264-275.
- [3] Likens G E, Bormann F H. Acid Rain: A Serious regional environmental problem[J]. *Science*, 1974, **184** (4142): 1176-1179.
- [4] Tang A H, Zhuang G S, Wang Y, *et al.* The chemistry of precipitation and its relation to aerosol in Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39** (19): 3397-3406.
- [5] Martin R V, Jacob D J, Chance K, *et al.* Global inventory of nitrogen oxide emissions constrained by space-based observations of NO₂ columns[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, **108**: 4537, doi: 10.1029/2003JD003453.
- [6] 陈罕立,王金南. 关于我国 NO_x 排放总量控制的探讨[J]. *环境科学研究*, 2005, **18** (5): 107-110.
- [7] 张楚莹,王书肖,邢佳,等. 中国能源相关的氮氧化物排放现状与发展趋势分析[J]. *环境科学学报*, 2008, **28** (12): 2470-2479.
- [8] 王会祥,唐孝炎,邵可声,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:地球科学*, 2003, **33** (2): 114-118.
- [9] 孙颖,潘月鹏,李杏茹,等. 京津冀典型城市大气颗粒物化学成分同步观测研究[J]. *环境科学*, 2011, **32** (9): 2732-2740.
- [10] 牛彧文,顾骏强,浦静姣,等. 长三角区域背景地区 SO₂ 和 NO_x 本底特征[J]. *环境化学*, 2009, **28** (4): 590-593.
- [11] 刘洁,张小玲,徐晓峰,等. 北京地区 SO₂、NO_x、O₃ 和 PM_{2.5} 变化特征的城郊对比分析[J]. *环境科学*, 2008, **29** (4): 1059-1065.
- [12] Kramer L J, Leigh R J, Remedios J J, *et al.* Comparison of OMI and ground-based in situ and MAX-DOAS measurements of tropospheric nitrogen dioxide in an urban area[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D16S39, doi: 10.1029/2007JD009168.
- [13] Bucesla E J, Perring A E, Cohen R C, *et al.* Comparison of tropospheric NO₂ from in situ aircraft measurements with near-real-time and standard product data from OMI[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D16S31, doi: 10.1029/2007JD008838.
- [14] Huijnen V, Eskes H J, Poupkou A, *et al.* Comparison of OMI NO₂ tropospheric columns with an ensemble of global and European regional air quality models[J]. *Atmospheric Chemistry*

- and Physics, 2009, **9**(5): 22271-22330.
- [15] Zhang X Y, Zhang P, Zhang Y, *et al.* The trend, seasonal cycle, and sources of tropospheric NO₂ over China during 1997-2006 based on satellite measurement[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, **50**(12): 1877-1884.
- [16] <http://zx.bjmemc.com.cn>
- [17] <http://www.envir.gov.cn/airnews>
- [18] Schoeberl M R, Douglass A R, Hilsenrath E, *et al.* Overview of the EOS aura mission[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2006, **44**(5): 1066-1074.
- [19] 刘希文, 徐晓斌, 林伟立. 北京及周边地区典型站点近地面 O₃ 的变化特征[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(7): 946-953.
- [20] 颜鹏, 李兴生, 罗超, 等. 我国地面 O₃, NO_x, SO₂ 背景值的观测研究[J]. 应用气象学报, 1997, **18**(1): 53-61.
- [21] 李令军, 王英. 基于卫星遥感与地面监测分析北京大气 NO₂ 污染特征[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(12): 2762-2768.
- [22] 简俊, 陈月娟, 郑彬, 等. 北半球中层大气中 NO_x 的垂直分布特征[J]. 大气科学, 2001, **25**(5): 697-706.
- [23] 黄成, 陈长虹, 李莉, 等. 长江三角洲地区人为源大气污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(9): 1858-1871.
- [24] Martin R V, Chance K, Jacob D J, *et al.* An improved retrieval of tropospheric nitrogen dioxide from GOME[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, **107**(20): 4437, doi: 10.1029/2001JD001027.
- [25] 孟昭阳, 丁国安, 汤洁, 等. 北京上甸子本底站 2003 年秋冬季痕量气体浓度变化特征[J]. 气象科技, 2007, **35**(4): 550-557.
- [26] 徐晓斌, 林伟立, 颜鹏, 等. 1994-2006 年长江三角洲和东北平原酸性气体浓度变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, **4**(4): 195-201.
- [27] Irie H, Sudo K, Akimoto H, *et al.* Evaluation of long-term tropospheric NO₂ data obtained by GOME over East Asia in 1996-2002[J]. Journal of Geophysical Research, 2005, **32**: L11810, doi: 10.1029/2005GL022770.
- [28] 李令军, 王英, 李金香. 北京清洁区大气颗粒物污染特征及长期变化趋势[J]. 环境科学, 2011, **32**(2): 319-323.
- [29] Li L J, Liu Y. Space-borne and ground observations of the characteristics of CO pollution in Beijing, 2000-2010[J]. Atmospheric Environment, 2011, **45**(14): 2367-2372.
- [30] 蔡皓, 谢绍东. 中国不同排放标准机动车排放因子的确定[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2010, **46**(3): 319-326.
- [31] 朱勤, 彭希哲, 陆志明, 等. 中国能源消费碳排放变化的因素分解及实证分析[J]. 资源科学, 2009, **31**(12): 2072-2079.
- [32] 王英, 金军, 李令军, 等. 北京大气污染区域分布及变化趋势研究[J]. 中央民族大学学报(自然科学版), 2008, **17**(1): 59-65.

CONTENTS

Characteristics of Atmospheric NO ₂ in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the Yangtze River Delta Analyzed by Satellite and Ground Observations	··· WANG Ying, LI Ling-jun, LIU Yang (3685)
Variation Analysis of Background Atmospheric Pollutants in North China During the Summer of 2008 to 2011	····· YANG Jun-yi, XIN Jin-yuan, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (3693)
Characteristics of Atmospheric Pollutants in Cangzhou	····· WANG Yong-hong, HU Bo, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3705)
Chemical Characteristics and Sources of Trace Metals in Precipitation Collected from a Typical Industrial City in Northern China	····· LI Yue-mei, PAN Yue-peng, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (3712)
BTX Monitoring Nearby Main Road Traffic in Guangzhou	····· YE Cong-lei, XIE Pin-hua, QIN Min, <i>et al.</i> (3718)
Dynamic Road Vehicle Emission Inventory Simulation Study Based on Real Time Traffic Information	····· HUANG Cheng, LIU Juan, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (3725)
Emission Characteristics of a Diesel Car Fueled with Coal Based Fischer-Tropsch (F-T) Diesel and Fossil Diesel Blends	····· HU Zhi-yuan, CHENG Liang, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (3733)
Spatial Variations of Biogenic Elements in Coastal Wetland Sediments of the Jiulong River Estuary	····· YU Xiao-qing, YANG Jun, LIU Le-mian, <i>et al.</i> (3739)
Spatio-Temporal Distribution of TN and TP in Water and Evaluation of Eutrophic State of Lake Nansi	····· SHU Feng-yue, LIU Yu-pei, ZHAO Ying, <i>et al.</i> (3748)
Impact on Nitrogen and Phosphorous Export of Wetlands in Tianmu Lake Watershed	····· LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, LI Heng-peng (3753)
Nitrogen and Phosphorus Composition in Urban Runoff from the New Development Area in Beijing	····· LI Li-qing, LÜ Shu-cong, ZHU Ren-xiao, <i>et al.</i> (3760)
Distribution and Sources of Arsenic in Yangzonghai Lake, China	····· ZHANG Yu-xi, XIANG Xiao-ping, ZHANG Ying, <i>et al.</i> (3768)
Occurrence of Fecal Indicator Bacteria in Urban Surface Water: A Case Study in Southern China	····· SUN Fu, SHA Jing, LIU Yan-hua (3778)
Vertical Migration of Algal Cells in the Daning River Bay of the Three Gorges Reservoir	····· ZHANG Yong-sheng, ZHENG Bing-hui, JIANG Xia, <i>et al.</i> (3787)
Construct of Yangtze-Huai River Rural Areas Ecological Drainage System and Its Retention Effect on Pollutants	····· SHAN Bao-qing, LI Nan, TANG Wen-zhong (3797)
Water Treatment Efficiency of Constructed Wetland Plant-Bed/Ditch Systems	····· WANG Zhong-qiong, ZHANG Rong-bin, CHEN Qing-hua, <i>et al.</i> (3804)
Effect of the Subsurface Constructed Wetland Evolution into Free Surface Flow Constructed Wetland on the Removal of Organic Matter, Nitrogen, and Phosphor in Wastewater	····· WEI Ze-jun, XIE Jian-ping, HUANG Yu-ming (3812)
Treatment Characteristics of Saline Domestic Wastewater by Constructed Wetland	····· GAO Feng, YANG Zhao-hui, LI Chen, <i>et al.</i> (3820)
Degradation of β -Naphthol by Catalytic Wet Air Oxidation	····· LIU Jie, YU Chao-ying, ZHAO Pei-qing, <i>et al.</i> (3826)
Degradation of 2,4-Dichlorophenol in Aqueous Solution by ZVI/EDDS/Air System	····· SUN Qian, ZHOU Hai-yan, CAO Meng-hua, <i>et al.</i> (3833)
Study on Photocatalytic Degradation of 1,2,3-Trichlorobenzene Using the Microwaved MWNTs/TiO ₂ Composite	····· SHI Zhou, ZHANG Qian, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3840)
Mechanism of Cr(VI) Removal from Aqueous Solution Using Biochar Promoted by Humic Acid	····· DING Wen-chuan, TIAN Xiu-mei, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (3847)
Research on the Treatment of Wastewater Containing PVA by Ozonation-Activated Sludge Process	····· XING Xiao-qiong, HUANG Cheng-lan, LIU Min, <i>et al.</i> (3854)
Effects of Composite Substrates on the Phosphorus Removal in Granule-based EBPR System and Its Optimization Experiment	····· XU Shao-juan, SUN Pei-de, ZHENG Xiong-liu, <i>et al.</i> (3859)
Research of Input Water Ratio's Impact on the Quality of Effluent Water from Hydrolysis Reactor	····· LIANG Kang-qiang, XIONG Ya, QI Mao-rong, <i>et al.</i> (3868)
Evolution of Leachate Quantity and Quality in the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	····· HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin, <i>et al.</i> (3873)
National Survey of Urban Sewage Reuse in China	····· GUO Yu-jie, WANG Xue-chao, ZHOU Zhen-min (3881)
Sorption and Desorption of 17 α -Ethinyl Estradiol and 4- <i>n</i> -Nonylphenol in Soil	····· JIANG Lu, WANG Ji-hua, LI Jian-zhong, <i>et al.</i> (3885)
Soil Organic Carbon Mineralization of Black Locust Forest in the Deep Soil Layer of the Hilly Region of the Loess Plateau, China	····· MA Xin-xin, XU Ming-xiang, YANG Kai (3893)
Effects of Soil Crusts on Surface Hydrology in the Semiarid Loess Hilly Area	····· WEI Wei, WEN Zhi, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (3901)
Environmental Factors on Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soils from Dashiwei Karst Giant Doline (Tiankeng) in Guangxi, China	····· KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, JIANG Zhong-cheng, <i>et al.</i> (3905)
Investigation on Mechanism of Pyrite Oxidation in Acidic Solutions	····· WANG Nan, YI Xiao-yun, DANG Zhi, <i>et al.</i> (3916)
Monitoring of Water and Salt Transport in Silt and Sandy Soil During the Leaching Process	····· FU Teng-fei, JIA Yong-gang, GUO Lei, <i>et al.</i> (3922)
Simulation on Remediation of Benzene Contaminated Groundwater by Air Sparging	····· FAN Yan-ling, JIANG Lin, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3927)
Detecting the Cytotoxicities of Five Bisphenol A Analogues to the MCF-7 Human Breast Carcinoma Cell Line Through Different Endpoints	····· ZHANG Shuai-shuai, LIU Yan, LIU Shu-shen, <i>et al.</i> (3935)
Response of Copepod Community Characteristics to Environmental Factors in the Backshore Wetland of Expo Garden, Shanghai	····· CHEN Li-jing, WU Yan-fang, JING Yu-xiang, <i>et al.</i> (3941)
Isolation, Identification and Characterization of Halotolerant Petroleum-degrading Bacteria	····· WU Tao, XIE Wen-jun, YI Yan-li, <i>et al.</i> (3949)
Growth Kinetics and Phenol Degradation of Highly Efficient Phenol-degrading <i>Ochrobactrum</i> sp. CH10	····· CHEN Xiao-hua, WEI Gang, LIU Si-yuan, <i>et al.</i> (3956)
Isolation of Aerobic Degrading Strains for TBBPA and the Properties of Biodegradation	····· QIAN Yan-yuan, LIU Li-li, YU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3962)
Influences of Long-term Application of Organic and Inorganic Fertilizers on the Composition and Abundance of <i>nirS</i> -type Denitrifiers in Black Soil	····· YIN Chang, FAN Fen-liang, LI Zhao-jun, <i>et al.</i> (3967)
Characteristics and Influencing Factors of Trichloroethylene Adsorption in Different Soil Types	····· HE Long, QIU Zhao-fu, LÜ Shu-guang, <i>et al.</i> (3976)
Degradation of Carbendazim in Paddy Soil and the Influencing Factors	····· XIAO Wen-dan, YANG Xiao-e, LI Ting-qiang (3983)
Effects of Sulphur Compounds on the Volatile Characteristics of Heavy Metals in Fly Ash from the MSW and Sewage Sludge Co-combustion Plant During the Disposal Process with Higher Temperature	····· LIU Jing-yong, SUN Shui-yu (3990)
Low-temperature Thermal Treatment of Dioxin in Medical Waste Fly Ash Under Inert Atmosphere	····· JI Sha-sha, LI Xiao-dong, XU Xu, <i>et al.</i> (3999)
Hourly Measurement on Aerosol NH ₃ and Gas NO _x Emission in the Rice Field	····· GONG Wei-wei, LUAN Sheng-ji (4006)
Implementation of an Electronic Nose for Rapid Detection of Volatile Chloralkane and Chloroalkene	····· WEN Xiao-gang, LIU Rui, CAI Qiang, <i>et al.</i> (4012)
Pilot Study on PAHs of the Atmosphere Around the Refuse Incineration Plant Based on the Technology of Passive Sampling	····· SUN Shao-ai, LI Yang, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (4018)
Spatial Distribution and Pollution Source Identification of Agricultural Non-Point Source Pollution in Fujian Watershed	····· DING Xiao-wen, SHEN Zhen-yao (4025)
Difference of P Content in Different Area Substrate of Constructed Wetland	····· CAO Xue-ying, CHONG Yun-xiao, YU Guang-wei, <i>et al.</i> (4033)
Selective Detection of Viable Pathogenic Bacteria in Water Using Reverse Transcription Quantitative PCR	····· LIN Yi-wen, LI Dan, WU Shu-xu, <i>et al.</i> (4040)
Formation of Disinfection By-products; Temperature Effect and Kinetic Modeling	····· ZHANG Xiao-lu, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (4046)
A Novel Quantitative Approach to Study Dynamic Anaerobic Process at Micro Scale	····· ZHANG Zhong-liang, WU Jing, JIANG Jian-kai, <i>et al.</i> (4052)
Leaves of <i>Platanus orientalis</i> as the Carbon Source for Denitrification	····· XIONG Jian-feng, XU Hua, YAN Ning, <i>et al.</i> (4057)
Isolation, Characterization of an Anthracene Degrading Bacterium <i>Martellella</i> sp. AD-3 and Cloning of Dioxygenase Gene	····· CUI Chang-zheng, FENG Tian-cai, YU Ya-qi, <i>et al.</i> (4062)

《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)

2012年11月15日 33卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 11 Nov. 15, 2012

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. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. 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: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊