

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第8期

Vol.33 No.8

**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

南海北部大气气相多溴联苯醚的含量及来源 ..... 李琦路, 李军, 刘向, 徐维海, 张干 (2533)

河北张家口市大气污染观测研究 ..... 邵平, 王莉莉, 安俊琳, 周彦丽, 王跃思 (2538)

大气中丙烷光氧化臭氧生成活性的烟雾箱模拟 ..... 黄丽华, 莫创荣, 徐永福, 贾龙 (2551)

膜生物反应器处理甲苯性能及机制 ..... 叶杞宏, 魏在山, 肖盼, 李华琴, 张再利, 樊青娟 (2558)

厨余垃圾堆肥过程中恶臭物质分析 ..... 张红玉, 邹克华, 杨金兵, 李国学, 杨青原, 张锋 (2563)

北京城市生态系统地表水硝酸盐污染空间变化及其来源研究 ..... 徐志伟, 张心昱, 任玉芬, 孙晓敏, 王效科, 王升忠 (2569)

枯、平、丰水期长江3条支流表层水中多氯联苯的分布特征及风险评价 ..... 李昆, 赵高峰, 周怀东, 曾敏, 廖柏寒, 吴正勇, 张盼伟, 柳敏 (2574)

三峡库区丰水期表层水中酚类的分布特征及潜在风险 ..... 吴正勇, 赵高峰, 周怀东, 李科林, 李昆, 张盼伟 (2580)

东湖表层水体中全氟辛酸和全氟辛磺酸空间分布特征 ..... 陈静, 王琳玲, 朱湖地, 王贝贝, 刘黄诚, 曹梦华, 苗竹, 胡丽, 陆晓华, 刘光虹 (2586)

三峡库区大宁河与磨刀溪重金属污染特征 ..... 安立会, 张艳强, 郑丙辉, 刘玥, 宋双双, 李子成, 陈浩, 赵兴茹, 林进 (2592)

长江水系表层沉积物重金属污染特征及生态风险性评价 ..... 王岚, 王亚平, 许春雪, 安子怡 (2599)

江苏如东滩涂贝类养殖区表层沉积物中重金属来源分析及其潜在生物毒性 ..... 李磊, 王云龙, 蒋玫, 袁骥, 沈新强 (2607)

扰动强度对太湖沉积物中磷释放及其形态转化的影响 ..... 李大鹏, 黄勇 (2614)

干流倒灌异重流对香溪河库湾营养盐的补给作用 ..... 张宇, 刘德富, 纪道斌, 杨正健, 陈媛媛 (2621)

常年淹水和干旱对三峡库区消落带菖蒲生长恢复的影响 ..... 李强, 高祥, 丁武泉, 朱启红, 欧媛, 刘瑜 (2628)

温州城市降雨径流磷的负荷及其初始冲刷效应 ..... 周栋, 陈振楼, 毕春娟 (2634)

沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征 ..... 于兴修, 李振炜, 刘前进, 井光花 (2644)

城郊农业区小流域土地利用结构对氮素输出的影响 ..... 杨峰, 王鹏举, 杨珊珊, 吴金水, 胡荣桂 (2652)

基于 AnnAGNPS 模型四岭水库小流域氮磷流失特征的模拟研究 ..... 边金云, 王飞儿, 杨佳, 俞洁, 楼莉萍, 俞丹萍 (2659)

基于 GIS 和 L-THIA 模型的深圳市观澜河流域非点源污染负荷变化分析 ..... 白凤姣, 李天宏 (2667)

黄土丘陵区坡面水蚀对降雨和下垫面微观格局的响应 ..... 卫伟, 贾福岩, 陈利顶, 吴东平, 陈瑾 (2674)

强化混凝对腐殖酸和富里酸去除对比研究 ..... 周玲玲, 张永吉, 叶河秀, 张一清 (2680)

九龙江下游水源水中新发病原微生物和抗生素抗性基因的定量 PCR 检测 ..... 王青, 林惠荣, 张舒婷, 于鑫 (2685)

布吉河丰水期总细菌和氨氧化细菌的定性和定量研究 ..... 孙海美, 白姣姣, 孙卫玲, 邵军 (2691)

曝气生物滤池工艺脱氮性能及反硝化细菌群落结构特征研究 ..... 彭晓兰, 刘聪, 陈吕军 (2701)

城市污水处理厂氧化沟工艺微生物种群分析 ..... 郭云, 杨殿海, 卢文健 (2709)

IC 反应器处理啤酒废水的效能及其微生物群落动态分析 ..... 朱文秀, 黄振兴, 任洪艳, 阮文权 (2715)

原子力显微镜液池成像技术应用于微絮凝过滤工艺过程中的实验条件优化 ..... 郑蓓, 葛小鹏, 于志勇, 原盛广, 张文婧, 孙景芳 (2723)

UV/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 法对印染废水生化出水中不同种类有机物的去除效果 ..... 李新, 刘勇弟, 孙贤波, 徐宏勇, 钱飞跃, 李欣珏, 李暮 (2728)

蛋白核小球藻 *Chlorella pyrenoidosa*-15 的异养培养条件优化及污水养殖 ..... 王秀锦, 李兆胜, 邢冠岚, 李卓凝, 袁红莉, 杨金水 (2735)

“Fe<sup>0</sup>/优势脱氯菌”体系降解 2,4,6-TCP 特性及机制研究 ..... 戴友芝, 郭丽丽, 史雷, 刘智勇, 高宝钗 (2741)

树脂 D201 上粗漆酶的固定化及对孔雀石绿的脱色 ..... 戚绪亮, 刘翔, 刘波, 王林, 王小春, 方超 (2747)

TiO<sub>2</sub>/PS/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 光催化剂的低温制备及其光催化和磁回收性能 ..... 王雪姣, 任学昌, 念娟妮, 肖举强, 王刚, 常青 (2752)

微波加热下苯的催化氧化性能研究 ..... 张钰彩, 卜龙利, 王晓晖, 刘海楠, 张浩 (2759)

纳米磁粉协同解偶联剂作用下活性污泥性能的研究 ..... 高丽英, 汤兵, 梁玲燕, 黄绍松, 付丰连, 罗建中 (2766)

好氧颗粒污泥沉降选择实验研究与定量描述 ..... 苏德足, 邓绣坤, 郑丽, 王畅, 金旺红, 沈俊 (2773)

超声波促进好氧/缺氧污泥消化过程中水解酶活性变化研究 ..... 叶运弟, 孙水裕, 郑莉, 刘宝建, 许燕滨, 占星星, 刘敬勇 (2780)

微生物营养剂浓度对生物沥浸法促进城市污泥脱水性能的影响 ..... 宋永伟, 刘奋武, 周立祥 (2786)

实验室条件下蓝藻结皮对低温光照胁迫的响应与微结构变化 ..... 饶本强, 李华, 熊瑛, 兰书斌, 李敦海, 刘永定 (2793)

西南地区紫色水稻土活性碳库的季节动态 ..... 吴艳, 江长胜, 郝庆菊 (2804)

典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究 ..... 尹春艳, 骆永明, 滕应, 章海波, 陈永山, 赵永刚 (2810)

土壤铜硒复合污染中金属形态转化及其对生物有效性的影响 ..... 胡斌, 梁东丽, 赵文龙, 缪树寅 (2817)

土壤微生物群落对多环芳烃污染土壤生物修复过程的响应 ..... 张晶, 林先贵, 刘魏魏, 尹睿 (2825)

可可毛色二孢菌对焦化厂土壤多环芳烃污染修复 ..... 张志远, 王翠苹, 刘海滨, 孙红文 (2832)

广西茶山梯矿尾砂中微量元素的淋滤实验研究 ..... 蔡永兵, 李玲, 魏晓飞, 张国平, 李海霞, 付志平 (2840)

北京市近郊区土壤砷累积特征 ..... 戚浩, 王美娥, 汪自强, 欧阳志云 (2849)

抗氧化酶基因作为多环麝香污染分子标志物研究 ..... 陈春, 周启星, 刘潇威 (2855)

臭氧污染对不同品种小麦干物质与生物量碳积累与分配的影响 ..... 寇太记, 于伟伟, 朱建国, 朱新开 (2862)

尿素分解共沉淀法中反应时间对 ZnAl 类水滑石结构和磷吸附性能的影响 ..... 陆英, 程翔, 邢波, 孙中恩, 孙德智 (2868)

铅和铜离子在纳米羟基磷灰石上的竞争吸附动力学研究 ..... 胡田田, 仓龙, 王玉军, 司友斌, 周东美 (2875)

pH 和 Ni<sup>2+</sup> 对人工纳米氧化硅吸附菲的影响 ..... 罗沛, 孙红文, 张鹏 (2882)

铀在凹凸棒石上的吸附特性与机制研究 ..... 刘娟, 陈迪云, 张静, 宋刚, 罗定贵 (2889)

环丙沙星在潮土中的吸附特性 ..... 崔皓, 王淑平 (2895)

中高温区水合肼 SNCR 脱硝反应机制和特性研究 ..... 洪塗, 陈德珍, 王渡, 黄慷 (2901)

H<sub>2</sub>S 选择性催化氧化工艺及催化剂研究现状 ..... 郝郑平, 姜广玉, 张鑫, 曲思秋 (2909)

《环境科学》征稿简则 (2550)      《环境科学》征订启事 (2568)      信息 (2684, 2714, 2848, 2916)

# 河北张家口市大气污染观测研究

邵平<sup>1,2</sup>, 王莉莉<sup>2</sup>, 安俊琳<sup>1</sup>, 周彦丽<sup>3</sup>, 王跃思<sup>2\*</sup>

(1. 南京信息工程大学大气物理学院, 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; 3. 河北省张家口市气象局, 张家口 075000)

**摘要:** 冀北重镇张家口, 全年干旱少雨风沙大, 自然生态环境极其脆弱, 但近年来工业发展极为迅速. 为了解张家口市大气污染物浓度水平及季节变化, 2009年12月1日~2010年11月30日, 利用自动在线仪器对张家口市区大气典型污染物  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{10}$  进行了连续观测研究. 结果表明, 张家口市首要污染物为可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ ), 年均质量浓度达  $(137 \pm 105) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{SO}_2$  和  $\text{O}_3$  年均质量浓度分别为:  $(8 \pm 13)$ 、 $(30 \pm 15)$ 、 $(19 \pm 26)$  和  $(54 \pm 35) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{NO}_x$  和  $\text{SO}_2$  质量浓度冬季最高, 分别达  $(51 \pm 35) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(42 \pm 29) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 夏季最低, 分别为  $(28 \pm 8) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(4 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{O}_3$  质量浓度夏季最高, 达  $(92 \pm 40) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 最高小时均值可达  $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 冬季最低, 为  $(34 \pm 20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $\text{PM}_{10}$  质量浓度春季最高, 达  $(144 \pm 131) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 冬季最低, 为  $(130 \pm 129) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 但季节变化不明显. 依照国家二级标准  $\text{PM}_{10}$  日均值超标率为 28%. 季节统计日变化显示  $\text{NO}_x$  和  $\text{PM}_{10}$  为早晚双峰型,  $\text{SO}_2$  为午间单峰型,  $\text{O}_3$  为午后单峰型. 张家口市区大气污染日变化受到交通源显著影响, 气态污染物冬季受取暖燃煤显著影响. 夏季东南气流对张家口  $\text{O}_3$  有输送作用, 自西北的沙尘及局地扬尘 (浮尘) 对张家口  $\text{PM}_{10}$  影响显著, 并对华北平原区域造成一定影响.

**关键词:** 张家口; 大气污染;  $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_2$ ;  $\text{O}_3$ ;  $\text{PM}_{10}$ ; 区域污染

中图分类号: X511 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)08-2538-13

## Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei

SHAO Ping<sup>1,2</sup>, WANG Li-li<sup>2</sup>, AN Jun-lin<sup>1</sup>, ZHOU Yan-li<sup>3</sup>, WANG Yue-si<sup>2</sup>

(1. Institute of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & 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; 3. Meteorological Bureau of Zhangjiakou, Zhangjiakou 075000, China)

**Abstract:** Zhangjiakou is an important city in the north of Hebei province with rapidly developing industry in recent years, which has little precipitation and a very fragile ecological environment. The observation of atmospheric pollutants was done from December 2009 to November 2010 to illuminate the air pollution situation. The results showed that the annual mean concentration of  $\text{PM}_{10}$ , the primary pollutant, reached  $(137 \pm 105) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and those of  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$  and  $\text{O}_3$  were  $(8 \pm 13)$ ,  $(30 \pm 15)$ ,  $(19 \pm 26)$  and  $(54 \pm 35) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively; The seasonal mean concentrations of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_2$  were highest in winter, with values of  $(51 \pm 35) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and  $(42 \pm 29) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively, and lowest in summer, only  $(28 \pm 8)$  and  $(4 \pm 3) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , respectively. For  $\text{O}_3$ , the highest value was recorded in summer, with seasonal mean of  $(92 \pm 40) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  and the highest daily maximum hourly concentration of  $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , whereas the lowest seasonal mean value of  $(34 \pm 20) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  was obtained in winter. The highest seasonal average  $\text{PM}_{10}$  was measured in spring, reaching  $(144 \pm 131) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , and lowest in winter, with a value of  $(130 \pm 129) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , indicating little seasonal variation of  $\text{PM}_{10}$ . The rate that  $\text{PM}_{10}$  exceeded the National Ambient Air Quality Standard II was 28%. The diurnal variations of pollutants in four seasons showed that the average diurnal variations of  $\text{NO}_x$  and  $\text{PM}_{10}$  were similar with peaking in early morning and evening, while the peak of  $\text{SO}_2$  and  $\text{O}_3$  appeared at noon and in the afternoon, respectively. The diurnal variation of air pollutants was significantly affected by the traffic, and the seasonal variation of gas pollutants was significantly affected by coal-fired heating in winter. In summer, the air masses from southeast regions could transport  $\text{O}_3$  and its precursors to Zhangjiakou. Dust carried by northwestern air masses and local dust with strong winds greatly affected  $\text{PM}_{10}$  in Zhangjiakou, and North China Plain was also affected in some degree.

**Key words:** Zhangjiakou; atmospheric pollution;  $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_2$ ;  $\text{O}_3$ ;  $\text{PM}_{10}$ ; regional air pollution

二氧化硫 ( $\text{SO}_2$ )、氮氧化物 ( $\text{NO}_x$ )、近地层臭氧 ( $\text{O}_3$ ) 和可吸入颗粒物 ( $\text{PM}_{10}$ ) 是影响城市大气环境质量的重要污染物, 由于它们在大气光化学中的作用及其生态环境和人体健康效应而引起了科学家和公众的普遍关注<sup>[1~7]</sup>. 京津冀地区大气污染具有明显的复合型和区域性特征<sup>[8~11]</sup>, 这导致仅在局地

进行排放源控制往往难以改善空气质量. 张家口市

收稿日期: 2011-10-18; 修订日期: 2012-02-21

基金项目: 北京市科技计划公益应用项目 (D09040903670902); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-Q02-03); 环保公益性行业科研专项 (201009001)

作者简介: 邵平 (1986~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境, E-mail: yuwenlangxi@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

地处河北省西北部,位于内蒙古高原和华北平原的过渡地带,东南毗连北京市,距北京市区约 200 km. 属寒温带大陆性季风气候,海拔 400 ~ 1 800 m. 全市年平均气温 4.5℃,年平均降雨量 330 ~ 550 mm,降雨主要集中在夏秋季. 由于干旱少雨空气得不到洗涤净化,生态环境脆弱,土地沙化荒漠化程度较重,风沙土壤较多<sup>[12]</sup>,西北大风过境容易形成扬沙和沙尘暴天气. 另外,张家口是老工业城市,钢铁冶金、电力、化工等传统能耗型产业比重较大;同时当地机动车保有量不断增加,机动车尾气污染也越来越严重. 作为首都的西北大门,张家口环境质量状况不仅影响到当地人民群众的生产生活,而且会影响到北京的环境质量. 因此,对张家口市环境空气特点及其对策的探索,具有重要的意义.

以往的研究结果表明<sup>[13]</sup>,张家口市空气质量污染程度严重,主要污染物是降尘和总悬浮颗粒物. 1999 ~ 2000 年监测结果为:总悬浮颗粒物日均值范围在 60 ~ 2 780  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 年日均值 370  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,超标率 52%;降尘量范围为 9 ~ 145  $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,年平均降尘量为 53  $\text{t}\cdot\text{km}^{-2}$ ,降尘最高超标率为 92%; $\text{SO}_2$  日均值范围为 3 ~ 232  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,日均超标率为 7%. 然而,针对张家口市大气污染现状的研究较少,不利

于对环境状况的深层次认知. 因此,本研究利用 2009 年 12 月 ~ 2010 年 11 月的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{10}$  观测数据,分析了张家口市大气污染物的变化特征以及与气象要素的关系,以期深入了解张家口市区的污染状况,为制定切实可行的污染预防措施提供有效支持.

## 1 数据与方法

### 1.1 观测站点和数据

观测站点位于张家口市区东南部一层平房房顶(40°46'N, 114°55'E, 海拔 777 m),东面距外环路约 200 m,西距张家口市气象局约 1.5 km. 四周无高大建筑遮挡,无重大污染源(如图 1). 监测点站房为无窗结构,墙体有较好的保温性能. 站房内装有空调,室内温度保持在 25℃ ± 5℃,保证仪器运行稳定. 环境数据为 2009 年 12 月 1 日 ~ 2010 年 11 月 30 日对应时间段的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{PM}_{10}$  数据. 所有气态污染物分析仪输出单位为 ppb,故气态污染物单位根据如下关系转换:  $\text{ppb} = f \cdot (\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$ ,  $f$  为换算因子. 其中  $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{O}_3$  和  $\text{SO}_2$  的  $f$  分别为 1.22、1.89、1.96 和 2.63<sup>[14]</sup>. 气象数据为对应时段此站点的常规气象数据(由张家口市气象局提供).



图 1 观测点位置及周围环境示意

Fig. 1 Sampling site and its surroundings

### 1.2 监测仪器

监测仪器为美国赛默飞世尔(TE)环境设备公司出产的大气污染物环境监测分析仪,包括可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )监测仪、氮氧化物( $\text{NO}$ - $\text{NO}_2$ - $\text{NO}_x$ )分析仪、二氧化硫( $\text{SO}_2$ )和臭氧( $\text{O}_3$ )分析仪. 观测仪器参数及标定方法见表 1.

## 2 结果与讨论

### 2.1 污染物季节变化和月变化

图 2 给出了 2009 年 12 月 ~ 2010 年 11 月张家口市区的  $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{O}_3$ 、 $\text{PM}_{10}$  观测数据日均值变化曲线,其中  $\text{O}_3$  为日均值和日小时均值最大

( $O_3$ -Max). 图 3 给出了污染物浓度日均值的月变化箱体图,包括月均值、最大值、最小值、以及 95%、75%、50%、25% 和 5% 分位数. 污染物浓度季节统计特征见表 2. 本研究按气象划分法划分四季,即 3

~5 月为春季,依此类推. 从图 2 可见,冬春秋三季以西北风为主,且风速较大,夏季以东南风为主,时有偏北风. 夏季秋季降水最多,春季次之,冬季最少,只有零星降水.

表 1 观测仪器基本参数及标定方法

Table 1 Basic parameters and calibration methods of the monitoring instruments

项目	颗粒物监测仪 (型号:RP1400a)	NO-NO <sub>2</sub> -NO <sub>x</sub> 分析仪 (型号:TE-42i)	SO <sub>2</sub> 分析仪 (型号:TE-43i)	O <sub>3</sub> 分析仪 (型号:TE-49i)
检测限/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.06(1 h 平均值)	0.5(1 min 平均值)	2.6(1 min 平均值)	2.0(1 min 平均值)
零漂/ $\mu\text{g}\cdot(\text{m}^3\cdot 24 \text{ h})^{-1}$		<0.5	<2.6	<2
跨漂(满度值)		$\pm 1\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$	$\pm 1\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$	$\pm 1\% \cdot (24 \text{ h})^{-1}$ $\pm 2\% \cdot (7 \text{ d})^{-1}$
标定仪器		动态气体稀释校准仪(热电 146i)、零空气发生器(热电 model 111)和标准气体(Scott-Marrin. inc 生产,经 US EPA 认证)	动态气体稀释校准仪(热电 146i)、零空气发生器(热电 model 111)和标准气体(Scott-Marrin. inc 生产,经 US EPA 认证)	TECO 49C PS 校准仪(每年溯源到美国国家标准物质研究所一级标准)和零空气发生器(热电 model 111)
精密度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	$\pm 1.5$ (1 h 平均值) $\pm 0.5$ (24 h 平均值)			
采集频率	1 个数据 $\cdot(10 \text{ min})^{-1}$			
测量范围/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0~5			
分辨率/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$	0.1			
准确度/%	$\pm 0.75$			

表 2 张家口市各污染物浓度季节均值的统计描述<sup>1)</sup>/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Table 2 Summary statistics of atmospheric pollutants in different seasons/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

污染物	平均值 $\pm$ 标准偏差				国家二级标准 日均值阈值	超标比例(1 a)/%
	春	夏	秋	冬		
NO	5 $\pm$ 5	3 $\pm$ 2	11 $\pm$ 14	15 $\pm$ 18	—	
NO <sub>2</sub>	26 $\pm$ 11	25 $\pm$ 7	35 $\pm$ 16	35 $\pm$ 21	120	0
NO <sub>x</sub>	31 $\pm$ 15	28 $\pm$ 8	46 $\pm$ 29	51 $\pm$ 35	—	
SO <sub>2</sub>	11 $\pm$ 20	4 $\pm$ 3	20 $\pm$ 26	42 $\pm$ 29	150	0*
O <sub>3</sub> -Max	87 $\pm$ 34	145 $\pm$ 48	69 $\pm$ 38	56 $\pm$ 20	200**	5
O <sub>3</sub>	53 $\pm$ 22	92 $\pm$ 40	37 $\pm$ 22	34 $\pm$ 20		
PM <sub>10</sub>	144 $\pm$ 131	135 $\pm$ 58	140 $\pm$ 86	130 $\pm$ 129	150	30***

1) \* 超标 1 d(有效观测日 358 d); \*\* 表示阈值为日小时均值最大值; \*\*\* 表示 PM<sub>10</sub> 统计时未剔除沙尘日

一次污染物 NO 日均值变化范围为 1~94  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,全年平均值为(8  $\pm$  13)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; NO<sub>2</sub> 日均值变化范围为 6~90  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,全年平均值为(30  $\pm$  15)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; NO<sub>x</sub> 日均值变化范围为 6~170  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,全年平均值为(39  $\pm$  26)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; SO<sub>2</sub> 日均值变化范围为 3~156  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 全年平均值为(19  $\pm$  26)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . NO<sub>x</sub> 和 SO<sub>2</sub> 季节平均质量浓度变化表现为冬季 > 秋季 > 春季 > 夏季. 随着 11 月采暖开始,NO<sub>x</sub>、SO<sub>2</sub> 浓度显著增大,在 11、12 和 1 月浓度值最高,但 NO<sub>2</sub> 在 9、10 月浓度就有所上升,可能与烧荒和秸秆焚烧有密切联系<sup>[15]</sup>; 与 NO<sub>2</sub> 相比 NO 的季节变化幅度较大,冬季采暖期(2009 年 12 月~2010 年 3 月和 2010 年 11 月)的 NO 浓度大约是非采暖期(2010 年 4~10 月)的 4 倍. 观测期间

NO<sub>2</sub> 质量浓度值均未超过国家环境空气质量标准二级标准(GB/T 18883-2002《环境空气质量标准》;日均值  $\geq 120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  超标). 而 SO<sub>2</sub> 除了 2010 年 1 月 1 日(日均值 156  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ )外,其他时间质量浓度均达到国家二级标准(日均值  $\geq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  超标). 由于 SO<sub>2</sub> 主要来源是工业生产和燃烧排放<sup>[16,17]</sup>,从图 3 中 SO<sub>2</sub> 变化趋势来看,冬季采暖燃煤而产生的大量排放使得冬季的浓度较高,这一时期的 SO<sub>2</sub> 浓度明显高于非采暖期,大约是非采暖期的 11 倍.

二次污染物 O<sub>3</sub> 日均值变化范围为 2~200  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  全年平均值为(54  $\pm$  35)  $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 观测期间 361 个有效观测日中总计 17 d 的 O<sub>3</sub> 浓度超过了国家二级标准(O<sub>3</sub> 小时均值最大值  $\geq 200 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  超标),超标率 5%. 其中 5 月 1 d,6~8 月 15 d,9 月 1

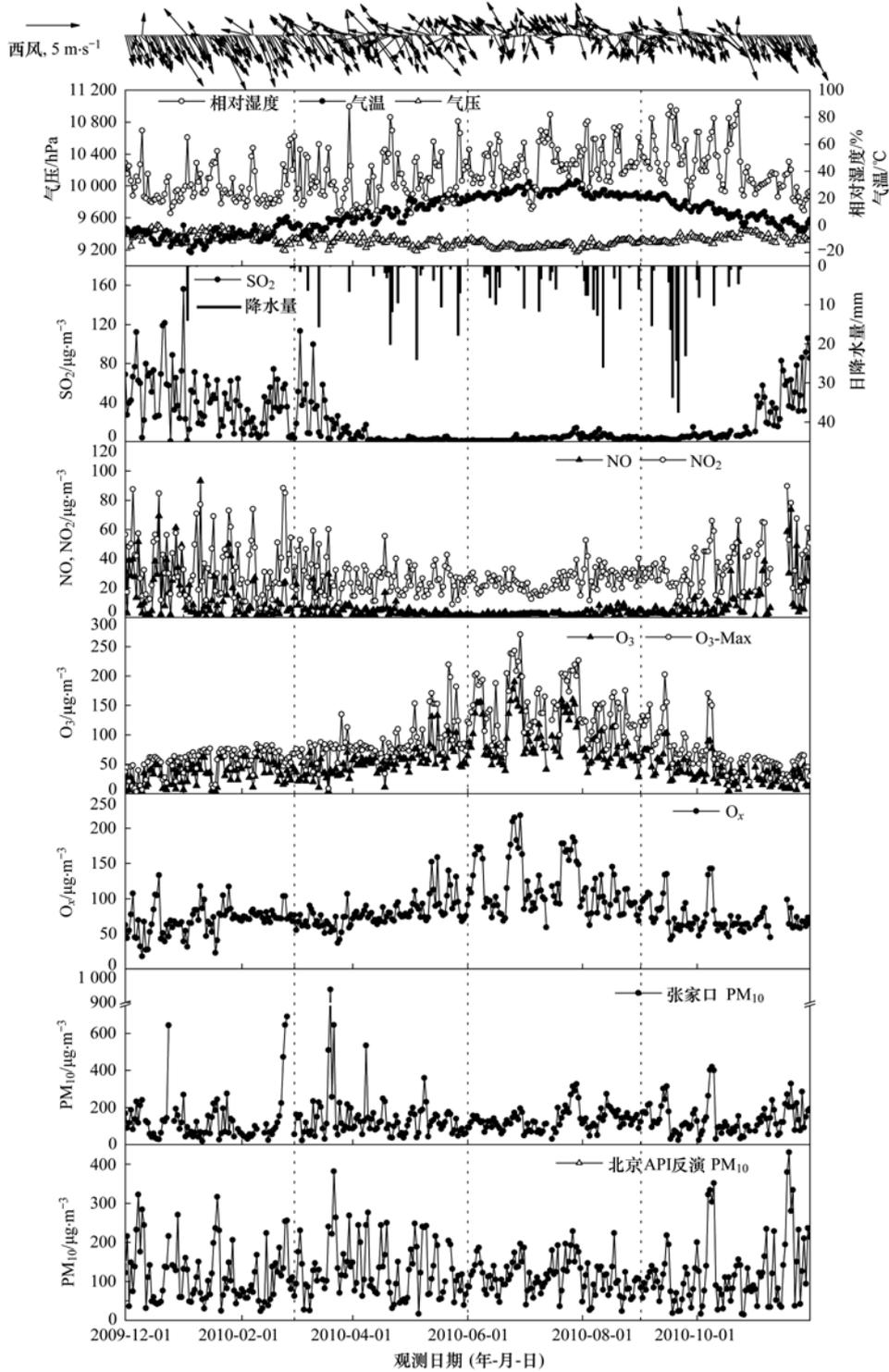


图2 污染物浓度和气象要素逐日变化

Fig. 2 Daily variation of observed atmospheric pollutants and meteorology parameters

d.  $O_3$  质量浓度日小时均值最大值出现在 6 月 29 日, 达到了  $271 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .  $O_3$  浓度呈现明显冬春低、夏秋高的单峰型的季节变化. 主要因为  $O_3$  是由  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  在紫外线作用下光化学反应生成, 并受气温、相对湿度等气象要素影响很大<sup>[18]</sup>. 夏秋季气温

较高、辐射较强因而有利于  $O_3$  生成, 冬春季则相反. 全年数据表明近地层  $O_3$  污染出现相对集中, 高峰出现在 5~6 月附近, 高浓度的臭氧已经严重超过了国家环境空气质量标准, 对环境的威胁较大.

张家口地区是河北省以扬沙和沙尘暴为主的沙

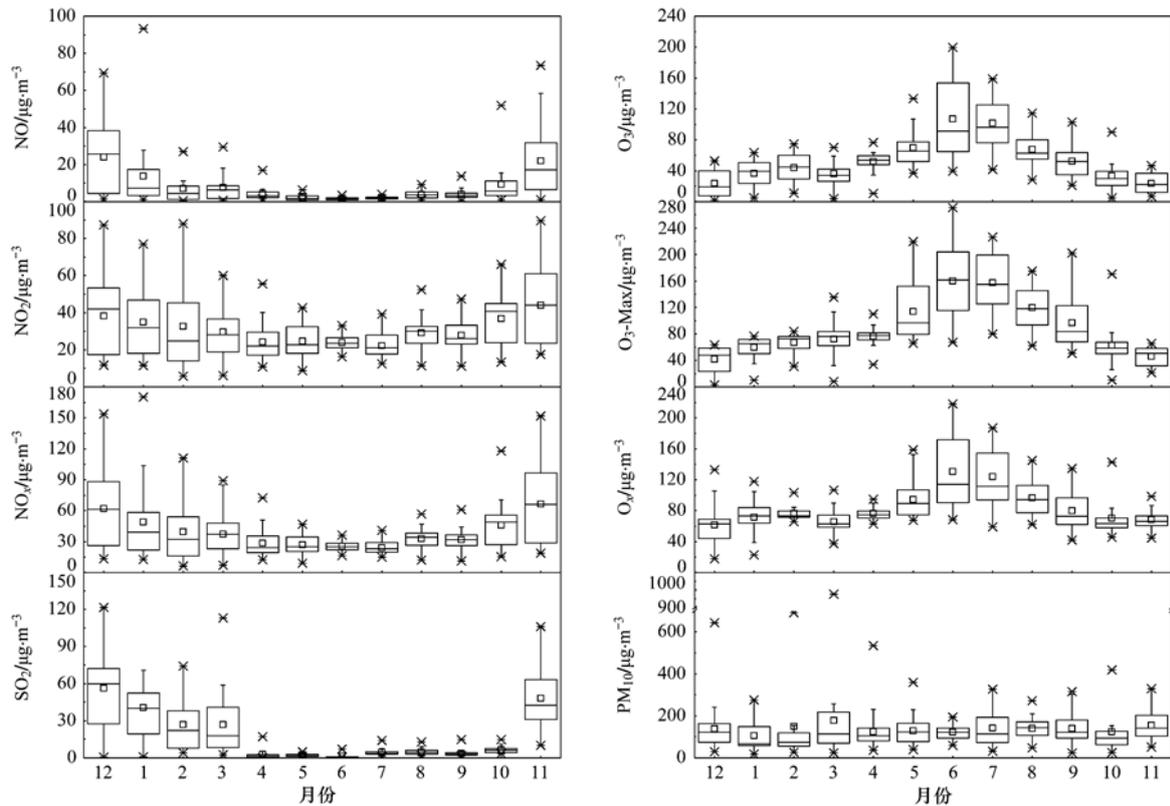


图3 污染物浓度月变化

Fig. 3 Monthly statistics of atmospheric pollutant concentrations

尘天气高发区。这一地区沙尘天气以扬沙为主,但是沙尘暴也占有相当大的比重,浮尘天气发生频率很低<sup>[19]</sup>。扬沙是大风将地面沙尘吹起后形成的,沙尘物质主要来源于本地。张家口沙尘天气以扬沙为主,这也说明了本地源对沙尘天气具有重要影响。观测结果显示,张家口市PM<sub>10</sub>浓度全年均值为(137 ± 105) µg·m<sup>-3</sup>。受春季沙尘天气多发的影响,春季浓度最高,秋季、夏季次之,冬季最低,但季节差异不明显。相较非采暖期采暖期PM<sub>10</sub>平均浓度仅增加11%。观测期间除去沙尘暴天气(2009年12月24、25日,24日均值为644 µg·m<sup>-3</sup>,25日仪器故障没有数据;2010年2月23~25日,日均值分别为473、645和691 µg·m<sup>-3</sup>;2010年3月19~22日,日均值分别为510、939、257和646 µg·m<sup>-3</sup>),全年351个有效观测日,有100 d日均值超过国家二级标准(PM<sub>10</sub>日均值 ≥ 150 µg·m<sup>-3</sup> 超标)超标,超标率28%,说明张家口地区可吸入颗粒物污染严重。

张家口地区可吸入颗粒物污染严重,并且年季浓度变化幅度较小,本研究结合风和降水对这种现象进行相关讨论。图2、图4和表3讨论了张家口不同风速风向和降水量与PM<sub>10</sub>浓度的逐日变化,以及

四季不同量级的风速和降水与PM<sub>10</sub>的统计关系。结果显示张家口全年降水以小雨(日降水量0~10 mm)为主,降水频次少,降水量小,这种强度的降水对PM<sub>10</sub>的平均清除效果不明显。张家口全年偏北风较多,尤其是春秋冬三季,且风速集中在2~3 m·s<sup>-1</sup>,夏季风向以东南风为主,其次是偏北风,各个季节不同的风向风速对PM<sub>10</sub>影响不同。春季PM<sub>10</sub>质量浓度最高,春季大风频率(风速 ≥ 2 m·s<sup>-1</sup>)最高,大风带来的外源性沙尘以及局地扬尘与较高浓度的PM<sub>10</sub>密切相关;虽然春季降水日也占有一定比例,但日降水量集中为0~10 mm的微量降水,不足以有效清除PM<sub>10</sub>。秋季浓度均值仅次于春季,主要因为此季节降水少,叠加在弱风情况下,PM<sub>10</sub>质量浓度会累积达到高值;如在偏北风风速 ≤ 2 m·s<sup>-1</sup>时,PM<sub>10</sub>质量浓度均值仅次于此风速下的冬季均值;随着11月开始供暖引起的源排放量变大,PM<sub>10</sub>浓度也有一定的上升。夏季PM<sub>10</sub>浓度仍然较高,主要因夏季多为短时雷阵雨,降水量集中在0~10 mm,对PM<sub>10</sub>的清除作用不明显;降雨前阵风较大,引起严重的地面扬尘;而在夏季非降水时段,以风速较小的东南风为主,不利于污染扩散,PM<sub>10</sub>浓度累

积增长较高. 与华北其他城市  $PM_{10}$  冬季最高夏季最低的特征<sup>[20]</sup>不同, 张家口市区  $PM_{10}$  浓度冬季最低; 根据气象监测数据, 张家口冬季多次下雪导致地面积雪覆盖时间较长, 一定程度上抑制了地面扬尘, 与此同时冬季偏北大风对  $PM_{10}$  进行较有效清除, 但弱北风(风速  $\leq 2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )时  $PM_{10}$  质量浓度大于其他季节, 说明冬季因采暖引起的本地排放量较高; 所以冬季在以风速较高的偏北风为主的情况下, 尽管采暖使得  $PM_{10}$  排放量增加, 但相比其他季节, 冬季整体  $PM_{10}$  浓度较低. 综合分析显示张家口全年降水频次少, 降水量小不利于清除污染

物, 而风向以偏北风为主, 夏季以东南风为主, 大风带来的沙尘和局地扬尘以及在弱风条件下的累积积累, 导致  $PM_{10}$  总体上季节差异不大且浓度值均较高.

由于京津冀地区大气污染显著的复合型 and 区域性特征<sup>[10,11]</sup>, 污染物区域之间相互影响和输送密切<sup>[21]</sup>. 图 2 中还给出了利用北京市 API(空气污染指数)反演的对应本次观测期间的  $PM_{10}$  日均值, 将京张两地的  $PM_{10}$  对比可以发现, 春秋两季两地的  $PM_{10}$  浓度变化趋势比较一致, 体现出区域污染的特点.

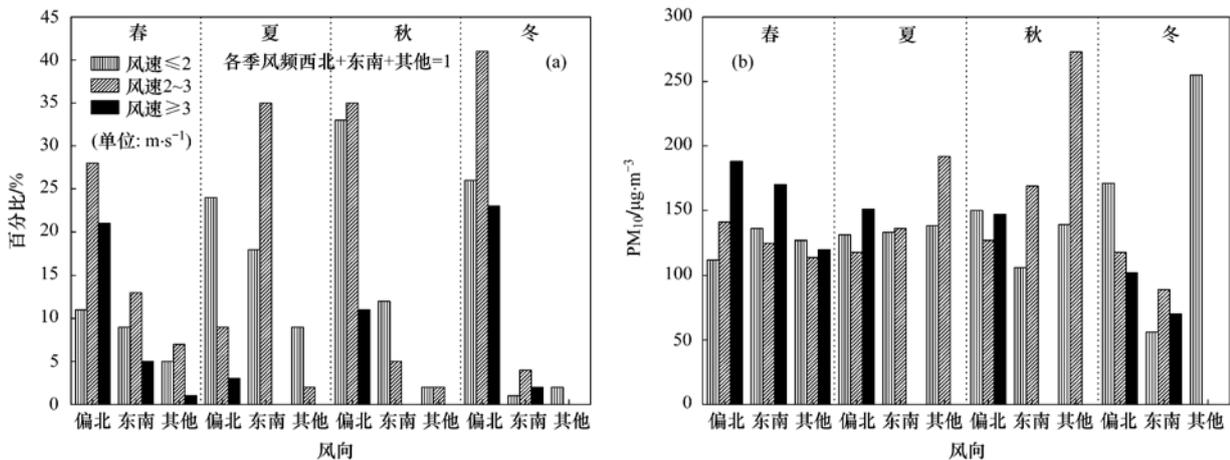


图 4 不同风向上的风速频率以及  $PM_{10}$  浓度与风速风向的关系

Fig. 4 Wind speed frequency in different directions and the relationship between  $PM_{10}$  concentration and different wind speed and directions

表 3 张家口市  $PM_{10}$  平均浓度与降水统计描述

Table 3 Summary statistics of  $PM_{10}$  concentration and precipitation

降水率 / $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$	降水天天数/d				$PM_{10}$ 平均浓度/ $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ (平均值 $\pm$ 标准偏差)				$PM_{10}$ 浓度降水时段比 非降水时段下降/%			
	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬	春	夏	秋	冬
0	62	64	75	84	158 $\pm$ 115	145 $\pm$ 57	149 $\pm$ 82	131 $\pm$ 132	—	—	—	—
0 ~ 10 (含)	24	22	9	5	144 $\pm$ 174	117 $\pm$ 40	89 $\pm$ 58	103 $\pm$ 40	9	19	40	22
>10	6	6	7	1	79 $\pm$ 75	78 $\pm$ 27	64 $\pm$ 36	95	45	47	25	28

## 2.2 大气污染物浓度的日变化

四季污染物浓度的统计日变化见图 5. 秋冬季一次污染物 NO 在 08:00 和 18:00 有 2 个峰值, 日变化呈双峰型, 均与交通高峰源排放和稳定的边界层结构相关. 早上上班高峰期车流量增大, 混合层还未发展, 加之光学反应较弱的共同作用使得 NO 在上午出现峰值, 春夏季 NO 峰值在 07:00, 秋冬季在 08:00, 春夏季比秋冬季出现峰值早的原因是夏季混合层发展时刻较早, NO 积累的时间比秋季少的缘故. 下午由于对流和光化学反应增强, 污染物浓度降低. 18:00 左右近地面稳定层逐渐形成, 虽然 NO 有下班高峰期的排放, 但白天积累的  $O_3$  的持续滴定作

用,  $NO$  小幅度累积上升. 春夏季 18:00 左右  $NO$  上升幅度不显著的原因是春夏季  $O_3$  浓度 18:00 左右仍然较高, 滴定效果明显,  $NO$  转化较多.  $NO_2$  日变化四季均成双峰型, 早高峰在 08:00 左右, 春夏秋三季晚高峰在 18:00, 而冬季晚高峰在 22:00 左右. 秋冬季  $NO$  比  $NO_2$  日变化幅度大很多, 而春季两者变化幅度接近, 夏季  $NO$  比  $NO_2$  日变化幅度小,  $NO_x$  日变化主要有  $NO$  主导, 这与  $NO_2$  的光化学反应的季节变化相联系<sup>[22]</sup>.  $SO_2$  秋冬季浓度明显大于春夏季, 而且日变化明显. 与  $NO_x$  不同,  $SO_2$  秋冬季日最大值出现在中午, 下午由于对流混合浓度值逐渐降低, 秋季晚上浓度值显著低于白天, 冬季上午 08:00 左右

和夜间 21:00 左右各有一个次峰值,主要是因为上午 08:00 左右供暖繁忙期,燃烧排放比较集中,大气扩散条件还未发展充分或存在逆温,有利于 SO<sub>2</sub> 的积累;从傍晚开始,进入 1d 中第 2 个供暖繁忙期,加之大气稳定度增加,混合层下降,污染物扩散能力快速减弱,SO<sub>2</sub> 积累浓度迅速上升.造成秋冬季 SO<sub>2</sub> 浓度在中午出现峰值的可能原因之一是随着太阳的热力作用使得垂直对流发展,将早上残留在高层逆温层中的 SO<sub>2</sub> 输送到地面<sup>[23]</sup>.

O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 日最大值出现在 14:00,最小值出现在 06:00. 最大值出现时,对应 NO 和 NO<sub>2</sub> 的最小值,

与局地光化学反应生成 O<sub>3</sub> 相关.夏季 O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 日较差(日小时均值最大与最小值差值)远大于冬季,主要由于夏季气象条件相对有利于 O<sub>3</sub> 生成,而冬季则不利于其生成,春秋两季 O<sub>3</sub> 和 O<sub>x</sub> 日较差接近.

颗粒物呈双峰型日变化. PM<sub>10</sub> 出峰时间与 NO<sub>x</sub> 较一致,分别是 08:00 和 18:00. 反映出 PM<sub>10</sub> 和 NO<sub>x</sub> 峰值形成的机制可能相同,与交通高峰源排放及其引发的地面扬尘有关.但是春夏秋三季晚上峰值明显高于早上,而冬季则不明显,这反映春夏秋三季颗粒物局地污染源较重,而冬季则与远距离传输有关<sup>[24]</sup>.

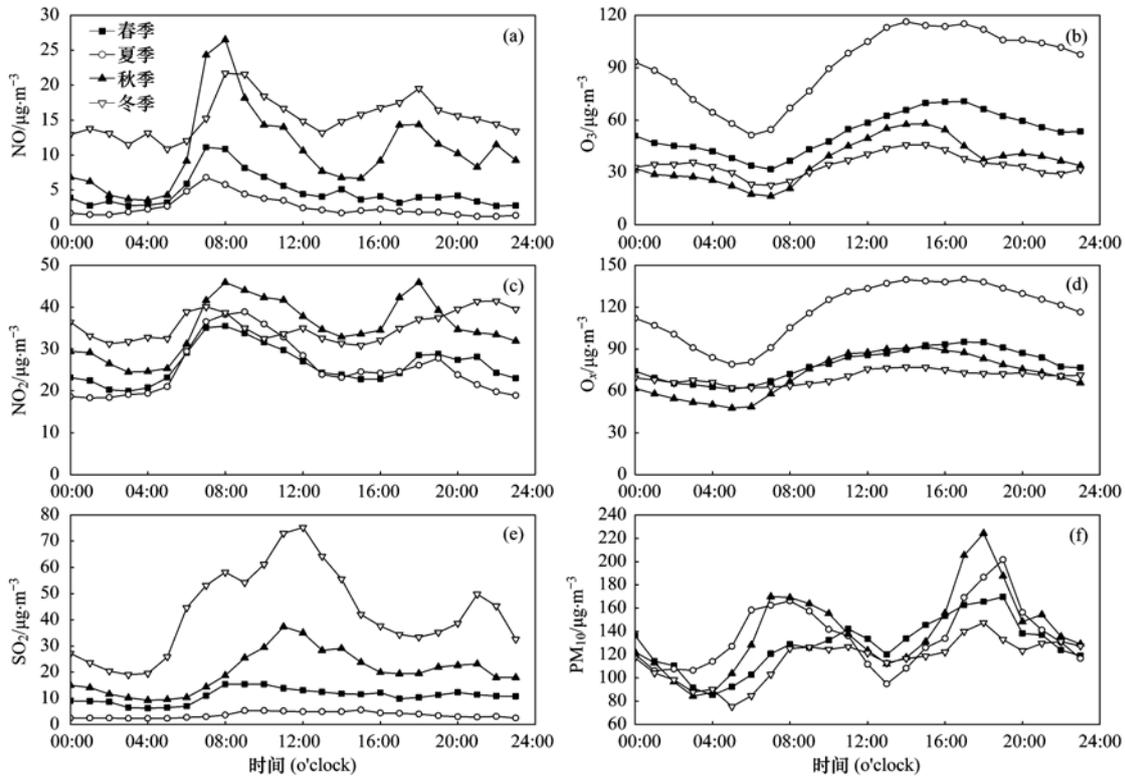


图 5 四季污染物浓度的统计日变化(PM<sub>10</sub> 不含沙尘日)

Fig. 5 Diurnal variations of atmospheric pollutants in the four seasons (curves of PM<sub>10</sub> excluded dust days)

2.3 夏季臭氧浓度与气象要素的关系

我国城市近地层臭氧监测执行二级标准,小时均值限值为 200 µg·m<sup>-3</sup>. WHO 在 2005 年根据最新研究结果,对部分准则值进行了修订<sup>[25]</sup>,提出每日最大 8 h 均值,限值为 100 µg·m<sup>-3</sup>,过渡性中期限为 160 µg·m<sup>-3</sup>. 本次整个观测中有 17 d 的日臭氧最大小时值大于国家二级标准,其中又有 15 d 的臭氧高值发生在夏季. 出现小时浓度超标的观测日记作臭氧超标日,如此计算则夏季的“日超标率”达到 17%. 而参照 WHO 标准,选择每日最大 8 h 均值,以其过渡性中期限值作为临界浓度. 经计算,在 90 个

有效观测日内有 23 个观测日发生臭氧高值,臭氧高值日发生频率为 26%,表明夏季张家口臭氧污染严重. 以每日最大 8 h 均值超过这一浓度限值记作臭氧高值日,并以此为基础结合同时段的气象要素研究张家口地区夏季臭氧污染现状以及与气象因素的相互关系. 本研究为简化计算过程,将观测期内每日 11:00 ~ 18:00 这 8 h 的平均值近似记作每日最大 8 h 均值,而不进行每日筛选,一般而言,作这样的近似是合理且可行的. 从图 5(b)可知,夏季 O<sub>3</sub> 浓度小时均值全天分布呈单峰结构,06:00 左右出现最小值随着太阳辐射强度和气温逐渐升高,O<sub>3</sub> 小时均值

逐渐增大,至 14:00 左右出现最大值,1 d 内小时均值最高的 8 h 为 11:00 ~ 18:00.

夏季午后是高浓度臭氧污染事件的易发期,而午后典型气象特征体现为高温、低湿和较大的风速.考察臭氧高值日的每日最大 8 h 均值与 14:00 气温、相对湿度和风速的关系,如图 5(a) ~ 5(c) 所示,取每日最大 8 h 均值大于  $160 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  为臭氧浓度高值,可见绝大多数臭氧浓度高值都发生在 14:00 气温  $> 25^\circ\text{C}$ ,相对湿度  $< 40\%$  的情况下,臭氧浓度与风速关系相对复杂,午后风速的高低都可能带来高浓度臭氧,这可能与风向有关.对每日最大 8 h 均值

与 14:00 风向作散点图[图 6(d)],23 d 的每日最大 8 h 均值高值中除 2 d 风向偏北,其余为偏东和偏南方向.考察整个夏季偏东( $45^\circ < \text{风向} \leq 135^\circ$ )和偏南风向( $135^\circ < \text{风向} \leq 225^\circ$ )的每日最大 8 h 均值平均值分别为  $(139 \pm 45) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和  $(129 \pm 40) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,高于偏西( $225^\circ < \text{风向} \leq 315^\circ$ )的  $(103 \pm 44) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  和偏北(风向  $> 315^\circ$  或  $\leq 45^\circ$ )的  $(98 \pm 30) \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ .夏季偏东和偏南风容易引起张家口市区高浓度的  $\text{O}_3$ ,说明除了局地光化学反应生成,东南方的北京地区对张家口近地层  $\text{O}_3$  的远距离输送可能具有一定的贡献.

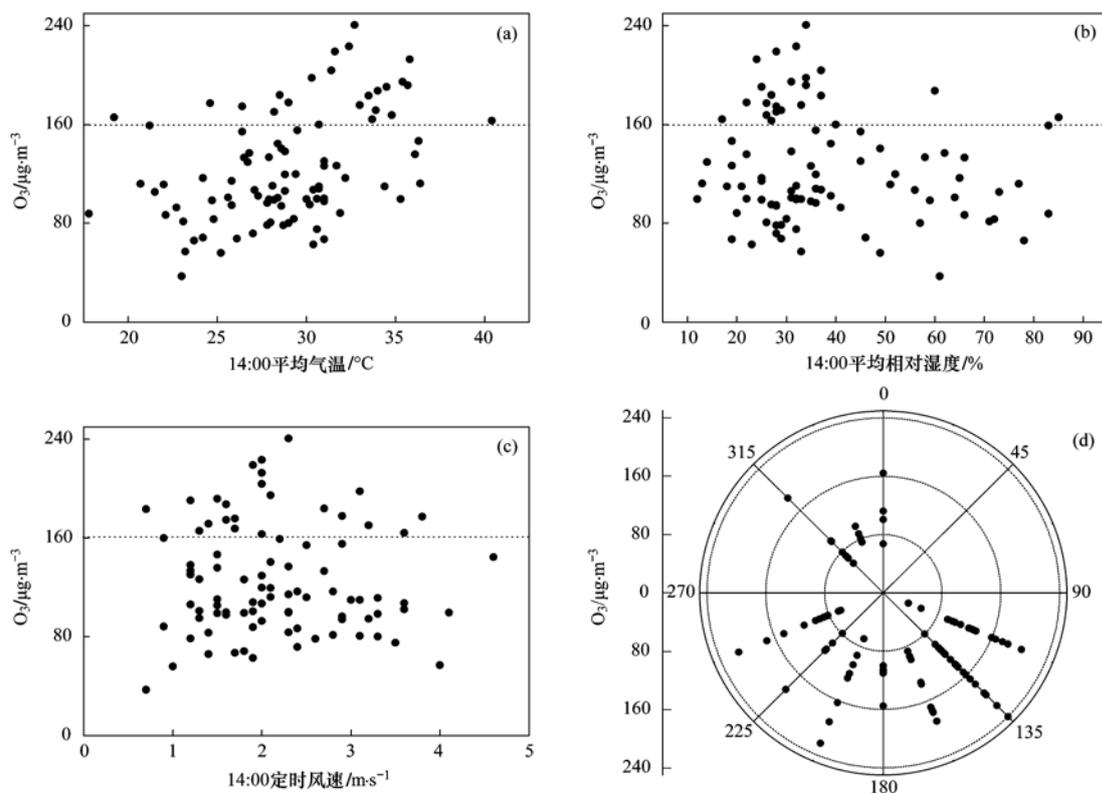


图 6 臭氧最大 8 h 浓度与 14:00 气象要素的关系

Fig. 6 Correlation between maximum 8-hour ozone concentration and meteorological parameters at 14:00 o'clock

在合适的光化学反应条件下,由前体物反应生成  $\text{O}_3$  需要一定的过程,城市地区的气团在向下风方向传输过程中,经过“老化”,导致下风方向的臭氧浓度水平往往高于市区<sup>[26]</sup>.为了进一步说明东南方向的气流对张家口近地层  $\text{O}_3$  的远距离输送的作用,本研究选取了 2010 年 6 月 3 ~ 7 日,张家口市区出现的一次  $\text{O}_3$  持续积累过程进行分析.由图 7 可以发现,前 4 d 的 14:00 前后张家口当地最高气温都在  $25^\circ\text{C}$  以上,最低相对湿度均在 20% 左右,这些合适的气象条件有利于  $\text{O}_3$  的生成,可这 4 d 的  $\text{O}_3$  变化趋势一致且并不是呈现午后单峰的规律, $\text{O}_3$  的峰值

出现在夜间.例如,从 6 月 3 日 03:00 开始,张家口  $\text{O}_3$  开始增加,持续到当天 22:00 左右,浓度由  $14 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  增加到  $137 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,出峰时间比夏季统计平均时间延后约 8 h.同时前 4 d 的风向明显具有日变化特征,西北与东南风交替.6 月 7 日全天以东南风为主,  $\text{O}_3$  日变化变得很不规则,全天浓度维持在较高水平.夜间局地光化学反应早已终止,并且  $\text{O}_3$  的增加过程与东南风的起止时间十分一致.东南风可以将北京地区排放的较高浓度的  $\text{NO}_x$  和  $\text{VOCs}$  等  $\text{O}_3$  前体物以及  $\text{O}_3$  本身向张家口输送,并且在输送过程中,富含前体物的气团不断“老化”,使得  $\text{O}_3$  浓

度不断升高,因此张家口 O<sub>3</sub> 的增加与其东南部地区高浓度 O<sub>3</sub> 及其前体物的输送紧密相关. 马志强

等<sup>[27]</sup>从由于东北气流引起的北京对兴隆 O<sub>3</sub> 传输影响的观测中也有类似结果.

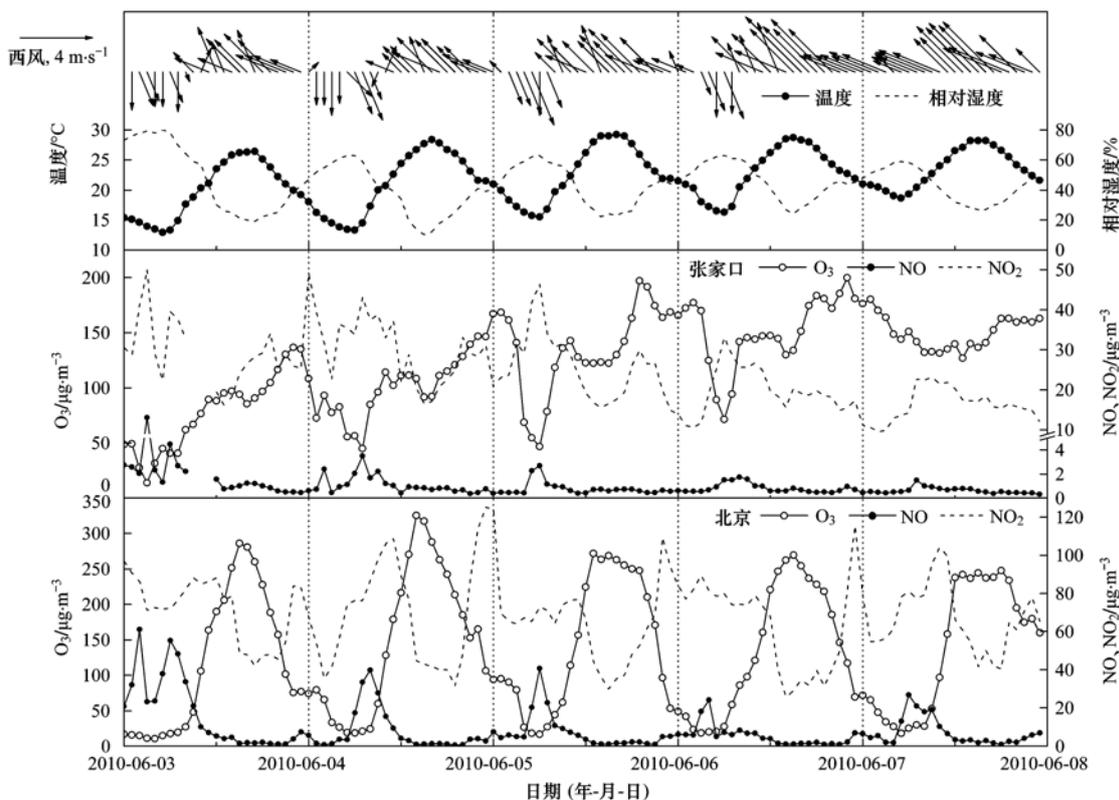


图7 张家口当地气象要素以及张家口、北京臭氧观测结果

Fig. 7 Local meteorological factors measured in Zhangjiakou and ozone measured in Zhangjiakou and Beijing

2.4 污染过程分析

为分析在污染过程中张家口与周边主要城市北京的污染状况和相互关系,图8~11给出了2次污

染过程张家口和北京的污染物浓度逐时变化图,以及利用美国海洋与大气管理局(NOAA)空气资源实验室(ARL)提供的混合型单粒子拉格朗日综合轨

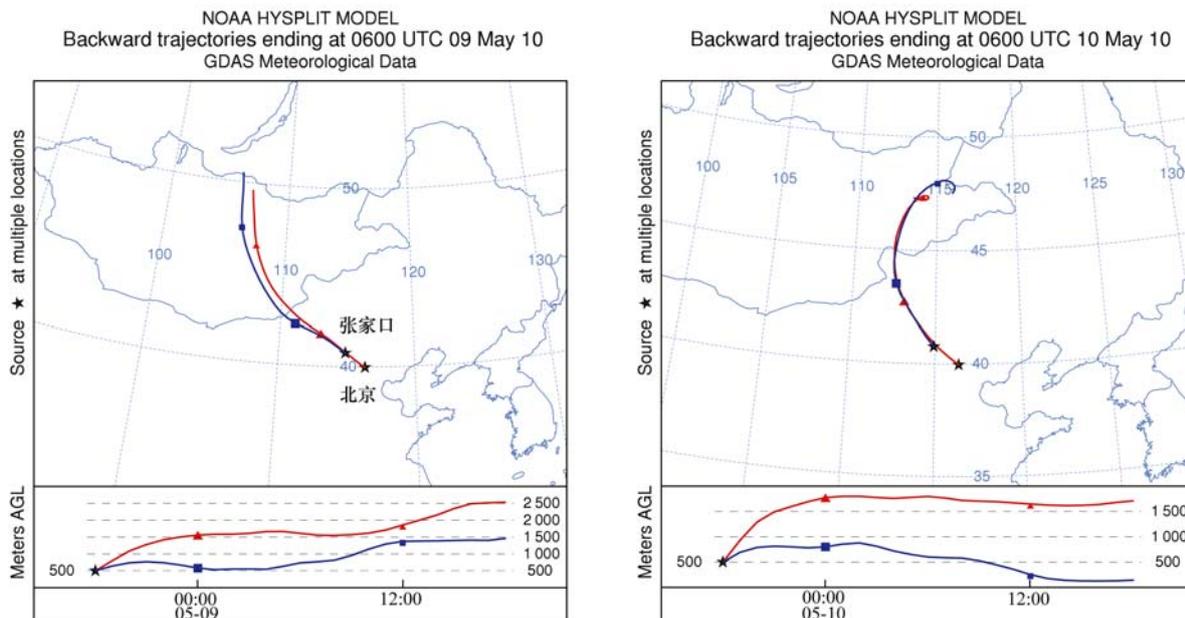


图8 京张两地5月9、10日14:00(北京时间)24 h后向轨迹

Fig. 8 24 h backward trajectories at 14:00 (Beijing time) on 9 and 10 May at Beijing and Zhangjiakou

迹(HYSPLIT)模式(选取 500 m 的高度层,气象场选取 NCEP GDAS),分别计算的后向轨迹.如图 8 和 9 所示,5 月 8~10 日的污染过程表现为,在西北气团影响下,张家口和北京的颗粒物污染严重.京张两

地气态污染物浓度具有同步变化特征,属于同一天气形势控制下的区域污染.西北大风的影响下,两地  $\text{NO}_x$  和  $\text{O}_3$  的日变化变得极不规则.9 日张家口  $\text{PM}_{10}$  小时均值最大值达到  $865 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,北京达到 509

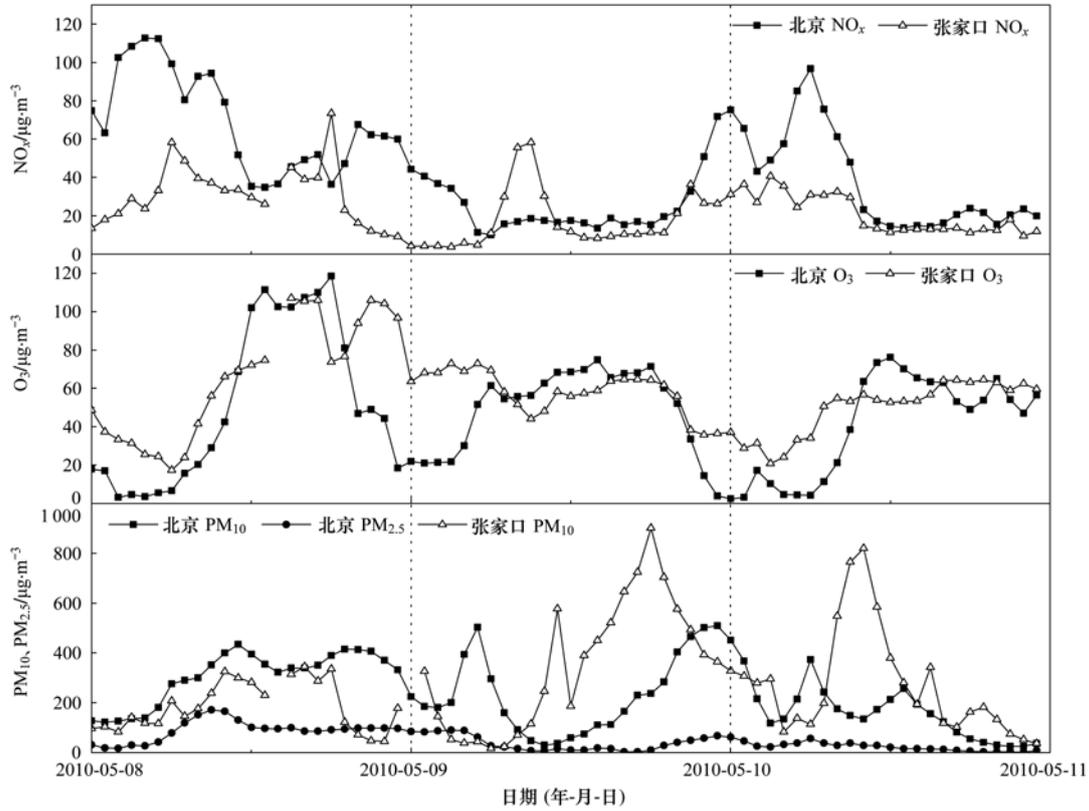


图 9 京张两地污染物浓度逐时变化图

Fig. 9 Hourly variation of atmospheric pollutants in Beijing and Zhangjiakou

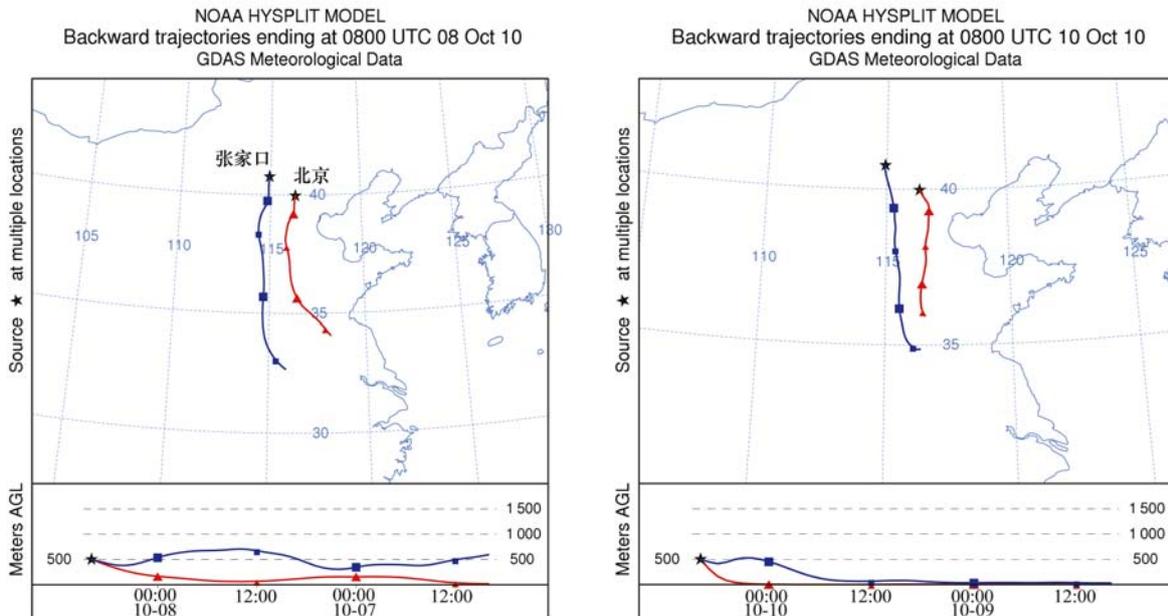


图 10 京张两地 10 月 8、10 日 16:00(北京时间) 48 h 后向轨迹

Fig. 10 48 h backward trajectories at 16:00 (Beijing time) on 8 and 10 October in Beijing and Zhangjiakou

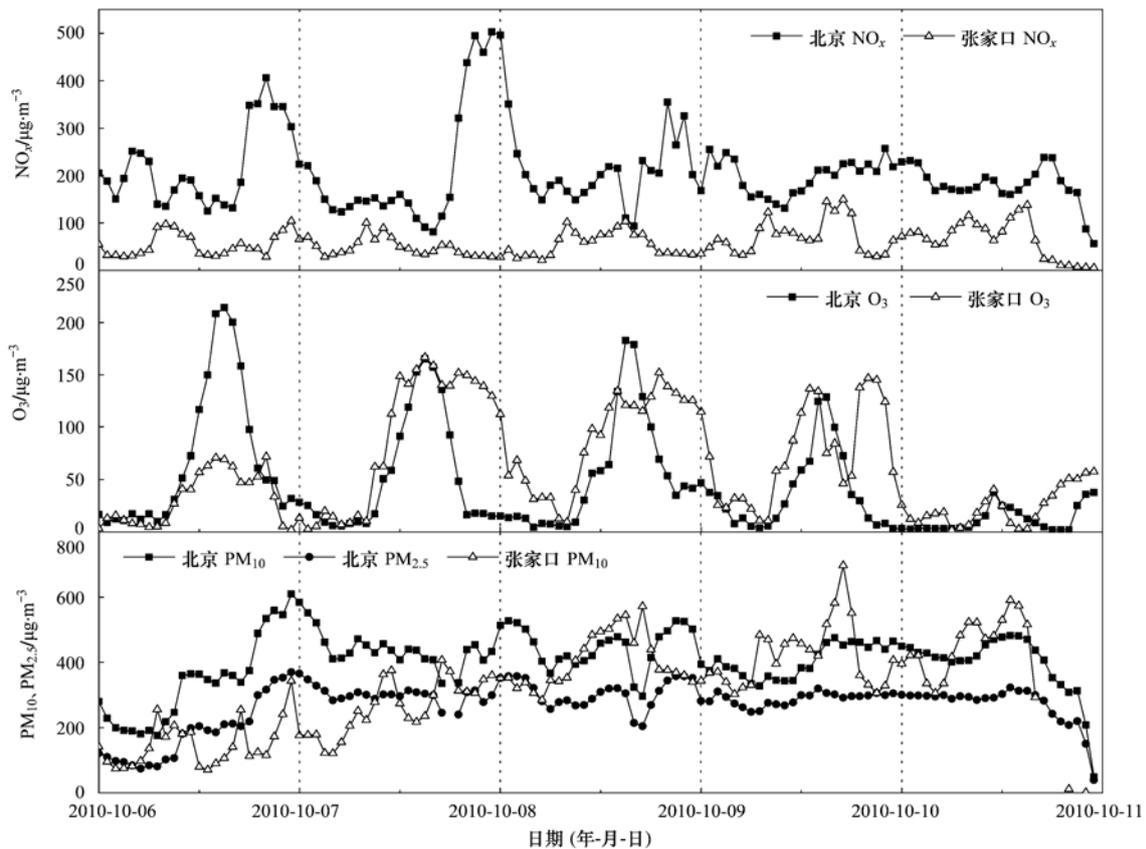


图 11 京张两地污染物浓度逐时变化图

Fig. 11 Hourly variation of atmospheric pollutants in Beijing and Zhangjiakou

$\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,而且出峰时间北京比张家口晚约 4 h. 抵达北京的气团过去 24 h 所经过张家口,表明由大风引起的沙尘污染从张家口往北京输送;9、10 日两天北京的大气细粒子( $\text{PM}_{2.5}$ )浓度值日变化不明显且保持在  $100\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以下,反映出在西北气团或西北大风影响下,张家口、北京的粗颗粒物污染严重,两地污染表现出一致性. 因西北风风速较大,来自西北的沙尘对北京等华北城市的影响虽大,但持续时间较短,且以粗粒子污染为主.

图 10 和 11 显示了 10 月 6 ~ 10 日污染物从生成到清除的过程. 受途经污染较重的保定、石家庄等地的偏南气团影响,同时又受到风速较小的静稳天气控制,在本地污染物排放和外来输送的共同影响下,北京和张家口的  $\text{PM}_{10}$  逐渐累积到高值;北京的细粒子( $\text{PM}_{2.5}$ ),除 10 日夜间降水的清除之外,7 日到 10 日傍晚浓度值均在  $200\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  以上,整个污染过程中细粒子占  $\text{PM}_{10}$  的比值平均为 66%,表明这次污染过程中北京细粒子污染较重;北京的  $\text{NO}_x$  浓度远高于张家口,说明北京的  $\text{NO}_x$  源排放较重. 5 d 中的北京  $\text{NO}_x$  平均浓度大约是张家口的 4 倍,但

京张两地  $\text{O}_3$  浓度差异不大,5 d 中的北京  $\text{O}_3$  平均浓度大约是张家口的 73%. 5 d 中北京的  $\text{O}_3$  日变化是比较明显的午后单峰型,振幅较大. 表明由于北京地区  $\text{O}_3$  前体物的浓度高于张家口,北京地区的光化学产生和消耗的也规模高于张家口. 但张家口的  $\text{O}_3$  日变化除了午后出现峰值,夜间还有一个峰值,有时甚至超过午后峰值(如 10 月 8 日 14:00 峰值为  $134\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 19:00 为  $152\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 10 月 9 日 13:00 为  $136\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 20:00 为  $146\ \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ),这一现象跟 2.3 节中张家口夏季一次  $\text{O}_3$  持续积累过程类似. 偏南方向来的气团将石家庄、保定甚至北京地区排放的  $\text{NO}_x$  和 VOCs 等  $\text{O}_3$  前体物向张家口输送,并且在输送过程中,富含前体物的气团不断“老化”,使得张家口  $\text{O}_3$  浓度不断升高,在夜间局地光化学过程终止的情况下仍能出现峰值. 偏南气流对北京的  $\text{O}_3$  也有输送作用,但北京  $\text{NO}_x$  局地排放较大,夜间  $\text{NO}$  对臭氧的滴定作用明显. 在偏南气团影响向下,南部周边城市污染物外源的输入,除了对北京造成重污染还对张家口地区造成影响,且偏南风控制时持续时间较长,细粒子污染较重. 说明污染预防应以区域联

合行动控制南部气流为主。

### 3 结论

(1) 张家口市大气可吸入颗粒物为首要污染物,相对国家日均浓度二级标准年超标率近三成(剔除沙尘暴日)。张家口全年降水频次少,降水量小不利于清除污染物,而风向以偏北风为主,夏季以东南风为主,大风带来的沙尘和局地扬尘以及在弱风条件下的累积积累,导致  $PM_{10}$  总体上季节差异不大且浓度值均较高。气态污染物季节变化明显,冬季采暖期  $SO_2$  和  $NO$  的浓度分别是非采暖期的 11 倍和 4 倍;而夏季  $O_3$  平均浓度约为其他三季平均浓度的 2 倍。工业排放和冬季燃煤取暖排放是张家口地区重要的人为大气污染源。

(2) 张家口市可吸入颗粒物  $PM_{10}$  和气态污染物  $NO_x$  浓度日变化呈早、晚双峰型; $SO_2$  为午间单峰型;夏季  $O_3$  和  $O_x$  呈午后单峰型。城区机动车排放及其引发的地面扬尘日趋严重,周边燃煤  $SO_2$  排放比市区严重,夏季光化学污染也不可忽视。机动车排放及其造成的扬尘是张家口地区大气污染趋于严重的另一重要因素。

(3) 西北强气流过境、叠加局地扬尘是张家口地区可吸入颗粒物经常超标的重要气象条件;夏季午后气温高于  $25^\circ C$ 、相对湿度低于 40% 及偏东或偏南弱风时,大气臭氧超标几率最高。偏东南弱气流往往引起张家口市区大气污染积累升高,导致  $O_3$  在夜间出现峰值。而西北强气流则有利于该地区大气污染物扩散,但强西北气流易引起局地扬尘及传输沙尘,造成局地环境恶化,同时对华北平原区域空气质量产生影响。

**致谢:**感谢中国科学院大气物理研究所 CERN 大气科学分中心和张家口市气象局在观测期间给予的无私帮助。

#### 参考文献:

- [ 1 ] Burnett R T, Brook J R, Yung W T, *et al.* Association between ozone and hospitalization for respiratory diseases in 16 Canadian cities[J]. *Environmental Research*, 1997, **72**(1): 24-31.
- [ 2 ] Odum J R, Jungkamp T P W, Gruffin R J, *et al.* The atmospheric aerosol-forming potential of whole gasoline vapor[J]. *Science*, 1997, **276**(5309): 96-99.
- [ 3 ] Streets D G, Fu J S, Jang C J, *et al.* Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(3): 480-492.
- [ 4 ] Borrego C, Sá E, Monteiro A, *et al.* Forecasting human exposure to atmospheric pollutants in Portugal-A modelling approach[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(36): 5796-5806.
- [ 5 ] 陈仁杰,陈秉衡,阚海东. 我国 113 个城市大气颗粒物污染的健康经济学评价[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(3): 410-415.
- [ 6 ] 张国珍,褚润,南忠仁. 兰州市大气污染对人体健康影响及经济损失研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, **22**(8): 120-123.
- [ 7 ] Sun Y, Wang Y S, Zhang C C. Measurement of the vertical profile of atmospheric  $SO_2$  during the heating period in Beijing on days of high air pollution[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(2): 468-472.
- [ 8 ] Xin J Y, Wang Y S, Tang G Q, *et al.* Variability and reduction of atmospheric pollutants in Beijing and its surrounding area during the Beijing 2008 Olympic Games[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, **55**(18): 1937-1944.
- [ 9 ] Zhang Y H, Hu M, Zhong L J, *et al.* Regional integrated experiments on air quality over Pearl River Delta 2004 (PRIDE-PRD2004): overview[J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6157-6173.
- [ 10 ] 贺克斌,贾英韬,马永亮,等. 北京大气颗粒物污染的区域性本质[J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(3): 482-487.
- [ 11 ] 张志刚,高庆先,韩雪琴,等. 中国华北区域城市间污染物输送研究[J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(1): 14-20.
- [ 12 ] 殷巨龙,李克文,闫凤岐,等. 张家口市文冠果资源现状与发展对策[J]. *河北果树*, 2011, (2): 1.
- [ 13 ] 赵秀英. 张家口市区环境空气质量现状及其发展对策初探[J]. *河北林果研究*, 2003, **18**(3): 273-274.
- [ 14 ] 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. 710-711.
- [ 15 ] Cheung V T F, Wang T. Observational study of ozone pollution at a rural site in the Yangtze Delta of China[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35**(29): 4947-4958.
- [ 16 ] 田贺忠,郝吉明,陆永琪,等. 中国生物质燃烧排放  $SO_2$ 、 $NO_x$  量的估算[J]. *环境科学学报*, 2002, **22**(2): 204-208.
- [ 17 ] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中  $SO_2$ 、 $NO_x$ 、CO 和  $O_3$  体积分数变化分析[J]. *生态环境*, 2007, **16**(6): 1585-1589.
- [ 18 ] Camalier L, Cox W, Dolwick P. The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends[J]. *Atmospheric Environment*, 2007, **41**(33): 7127-7137.
- [ 19 ] 王仁德,邹学勇,程宏,等. 河北省沙尘天气时空分布特征及影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2009, **29**(6): 57-63.
- [ 20 ] 李杨. 2000-2007 年中国重点城市  $PM_{10}$  的时空变化特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2009, **23**(9): 51-54.
- [ 21 ] 徐祥德,周丽,周秀骥,等. 城市环境大气重污染过程周边源影响域[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*, 2004, **34**(10): 958-966.
- [ 22 ] 安俊琳,王跃思,李昕,等. 北京大气中  $NO$ 、 $NO_2$  和  $O_3$  浓度变化的相关性分析[J]. *环境科学*, 2007, **28**(4): 706-711.
- [ 23 ] Lin W, Xu X, Ge B, *et al.* Characteristics of gaseous pollutants at Gucheng, a rural site southwest of Beijing[J]. *Journal of*

- Geophysical Research, 2009, **114**: D00G14, doi: 10.1029/2008JD010339.
- [24] 王莉莉, 王跃思, 吉东生, 等. 天津滨海新区秋冬季大气污染特征分析[J]. 中国环境科学, 2011, **31**(7): 1077-1086.
- [25] 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[S]. 2005 年全球更新版.
- [26] Wang T, Ding A J, Gao J, *et al.* Strong ozone production in urban plumes from Beijing, China [J]. Geophysical Research Letters, 2006, **33**: L21806, doi: 10.1029/2006GL027689
- [27] 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.
- [28] 姚青, 孙玫玲, 刘爱霞. 天津臭氧浓度与气象因素的相关性及其预测方法[J]. 生态环境学报, 2009, **18**(6): 2206-2210.

## 《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性,论点明确,文字精炼,数据可靠.全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献).国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示).作者投稿时请先登陆我刊网站([www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn))进行注册,注册完毕后以作者身份登录,按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写.论文各部分的排列顺序为:题目;作者姓名;作者工作单位、地址、邮政编码;中文摘要;关键词;中图分类号;英文题目;作者姓名及单位的英译名;英文摘要;关键词;正文;致谢;参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容,一般不超过 20 字,少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字,以第三人称写.摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论,重点是结果和结论.英文摘要与中文对应,注意人称、时态和语言习惯,以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等.科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简,同一内容不得用图表重复表达,要有中英文对照题目.图应大小一致,曲线粗于图框,图中所有字母、文字字号大小要统一.表用三线表.图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI).论文中物理计量单位用字母符号表示,如 mg(毫克),m(米),h(小时)等.科技名词术语用国内通用写法,作者译的新名词术语,文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式,左起顶格书写,3 级以下标题可用(1), (2)……表示,后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写,正斜体.生物的拉丁学名为斜体.缩略语首次出现时应给出中文全称,括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献,可在出现页以脚注表示.文献按文中出现的先后次序编排.常见文献书写格式为:

**期刊**:作者(外文也要姓列名前).论文名[J].期刊名,年,卷(期):起页-止页.

**图书**:作者.书名[M].出版地:出版社,年.起页-止页.

**会议文集**:作者.论文名[A].见(In);编者.文集名[C].出版地:出版社(单位),年.起页-止页.

**学位论文**:作者.论文名[D].保存地:保存单位,年份.

**报告**:作者.论文名[R].出版地:出版单位,出版年.

**专利**:专利所有者.专利题名[P].专利国别:专利号,出版日期.

11. 来稿文责自负,切勿一稿多投.编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节.在 3 个月内未收到本刊选用通知,可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址,邮编,电话号码,电子邮箱等.编辑部邮政地址:北京市 2871 信箱;邮编:100085;电话:010-62941102,010-62849343;传真:010-62849343;E-mail:[hjxx@rcees.ac.cn](mailto:hjxx@rcees.ac.cn);网址:[www.hjxx.ac.cn](http://www.hjxx.ac.cn)

## CONTENTS

Levels and Sources of Gaseous Polybrominated Diphenyl Ethers in Air over the Northern South China Sea .....	LI Qi-lu, LI Jun, LIU Xiang, <i>et al.</i> (2533)
Observation and Analysis of Air Pollution in Zhangjiakou, Hebei .....	SHAO Ping, WANG Li-li, AN Jun-lin, <i>et al.</i> (2538)
Smog Chamber Simulation of Ozone Formation from Atmospheric Photooxidation of Propane .....	HUANG Li-hua, MO Chuang-rong, XU Yong-fu, <i>et al.</i> (2551)
Mechanism and Performance of a Membrane Bioreactor for Treatment of Toluene Vapors .....	YE Qi-hong, WEI Zai-shan, XIAO Pan, <i>et al.</i> (2558)
Analysis of Odor Pollutants in Kitchen Waste Composting .....	ZHANG Hong-yu, ZOU Ke-hua, YANG Jin-bing, <i>et al.</i> (2563)
Spatial Changes and Sources of Nitrate in Beijing Urban Ecosystem Surface Water .....	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, REN Yu-fen, <i>et al.</i> (2569)
Distribution Characteristics and Potential Risk of PCBs in Surface Water from Three Tributaries of Yangtze River in Different Periods .....	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2574)
Distribution Characteristics and Potential Risks of Phenols in the Rainy Season Surface Water from Three Gorges Reservoir .....	WU Zheng-yong, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (2580)
Spatial Distribution of Perfluorooctanoic Acids and Perfluorinate Sulphonates in Surface Water of East Lake .....	CHEN Jing, WANG Lin-ling, ZHU Hu-di, <i>et al.</i> (2586)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in Daninghe River and Modaoxi River of Three Gorges Reservoir Areas .....	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (2592)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in the Surface Sediments of the Yangtze River .....	WANG Lan, WANG Ya-ping, XU Chun-xue, <i>et al.</i> (2599)
Analysis of the Source, Potential Biological Toxicity of Heavy Metals in the Surface Sediments from Shellfish Culture Mudflats of Rudong Country, Jiangsu Province .....	LI Lei, WANG Yun-long, JIANG Mei, <i>et al.</i> (2607)
Effect of Disturbance Intensity on Phosphorus Release and Its Transformation in the Sediment from Taihu Lake .....	LI Da-peng, HUANG Yong (2614)
Effects of Intrusions from Three Gorges Reservoir on Nutrient Supply to Xiangxi Bay .....	ZHANG Yu, LIU De-fu, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2621)
Influence of Perennial Flooding and Drought on Growth Restoration of <i>Acorus calamus</i> in Water-level-fluctuation Zone of the Three Gorges Reservoir .....	LI Qiang, GAO Xiang, DING Wu-quan, <i>et al.</i> (2628)
Pollution Load and the First Flush Effect of Phosphorus in Urban Runoff of Wenzhou City .....	ZHOU Dong, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan (2634)
Output Characteristics of Rainfall Runoff Phosphorus Pollution from a Typical Small Watershed in Yimeng Mountainous Area .....	YU Xing-xiu, LI Zhen-wei, LIU Qian-jin, <i>et al.</i> (2644)
Influence of Land Use Structure on Nitrogen Output in the Watershed of Suburban Agriculture Regions .....	YANG Feng, WANG Peng-ju, YANG Shan-shan, <i>et al.</i> (2652)
Simulation of Nitrogen and Phosphorus Loss in Siling Reservoir Watershed with AnnAGNPS .....	BIAN Jin-yun, WANG Fei-er, YANG Jia, <i>et al.</i> (2659)
GIS and L-THIA Based Analysis on Variations of Non-point Pollution in the Guanlan River Watershed, Shenzhen .....	BAI Feng-jiao, LI Tian-hong (2667)
Response of Sloping Water Erosion to Rainfall and Micro-earth Pattern in the Loess Hilly Area .....	WEI Wei, JIA Fu-yang, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (2674)
Comparison Study of Enhanced Coagulation on Humic Acid and Fulvic Acid Removal .....	ZHOU Ling-ling, ZHANG Yong-ji, YE He-xiu, <i>et al.</i> (2680)
Real-time PCR Detection and Quantification of Emerging Waterborne Pathogens (EWPs) and Antibiotic Resistance Genes (ARGs) in the Downstream Area of Jiulong River .....	WANG Qing, LIN Hui-rong, ZHANG Shu-ting, <i>et al.</i> (2685)
Quantitative and Qualitative Analysis of Total Bacteria and Ammonia-oxidizing Bacteria in Buji River in Wet Season .....	SUN Hai-mei, BAI Jiao-jiao, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (2691)
Study on the Nitrogen Removal Performance and the Characteristics of Denitrification Bacterial Community Structure of Biological Aerated Filter .....	PENG Xiao-lan, LIU Cong, CHEN Li-jun (2701)
Analysis of Microbial Community Structure at Full-scale Wastewater Treatment Plants by Oxidation Ditch .....	GUO Yun, YANG Dian-hai, LU Wen-jian (2709)
Performance and Microbial Community Dynamic Characteristics of an Internal Circulation Reactor Treating Brewery Wastewater .....	ZHU Wen-xiu, HUANG Zhen-xing, REN Hong-yan, <i>et al.</i> (2715)
Coupling AFM Fluid Imaging with Micro-Flocculation Filtration Process for the Technological Optimization .....	ZHENG Bei, GE Xiao-peng, YU Zhi-yong, <i>et al.</i> (2723)
Study on Removal Effect of Different Organic Fractions from Bio-treated Effluent of Dye Wastewater by UV/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> Process .....	LI Xin, LIU Yong-di, SUN Xian-bo, <i>et al.</i> (2728)
Optimization of <i>Chlorella pyrenoidosa</i> -15 Photoheterotrophic Culture and Its Use in Wastewater Treatment .....	WANG Xiu-jin, LI Zhao-sheng, XING Guan-lan, <i>et al.</i> (2735)
Characteristics and Mechanism of 2,4,6-TCP Degradation by the "Fe <sup>0</sup> /Enriched-Bacteria" System .....	DAI You-zhi, GUO Li-li, SHI Lei, <i>et al.</i> (2741)
Immobilization of Crude Laccase onto Anion Exchange Resin and Its Application in Decoloration of Malachite Green .....	QI Xu-liang, LIU Xiang, LIU Bo, <i>et al.</i> (2747)
Low-Temperature Preparation of TiO <sub>2</sub> /PS/Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> and Its Photocatalytic Activity and Magnetic Recovery .....	WANG Xue-jiao, REN Xue-chang, NIAN Juan-ni, <i>et al.</i> (2752)
Study on Catalytic Oxidation of Benzene by Microwave Heating .....	ZHANG Yu-cai, BO Long-li, WANG Xiao-hui, <i>et al.</i> (2759)
Synergistic Effects of Nano-sized Magnetic Particles and Uncoupler to the Characteristics of Activated Sludge .....	GAO Li-ying, TANG Bing, LIANG Ling-yan, <i>et al.</i> (2766)
Experimental and Modeling Research on the Settlement of Aerobic Granular Sludge .....	SU Kui-zu, DENG Xiu-kun, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2773)
Analysis of Hydrolytic Enzyme Activities on Sludge Aerobic/Anoxic Digestion After Ultrasonic Pretreatment .....	YE Yun-di, SUN Shui-yu, ZHENG Li, <i>et al.</i> (2780)
Effect of Microbial Nutrient Concentration on Improvement of Municipal Sewage Sludge Dewaterability Through Bioleaching .....	SONG Yong-wei, LIU Fen-wu, ZHOU Li-xiang (2786)
Response of the Artificial Cyanobacterial Crusts to Low Temperature and Light Stress and the Micro-structure Changes Under Laboratory Conditions .....	RAO Ben-jiang, LI Hua, XIONG Ying, <i>et al.</i> (2793)
Seasonal Dynamics of Soil Active Carbon Pool in a Purple Paddy Soil in Southwest China .....	WU Yan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (2804)
Pollution Characteristics and Accumulation of Antibiotics in Typical Protected Vegetable Soils .....	YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (2810)
Transformation and Influences of Copper and Selenium Fractions on Heavy Metals Bioavailability in Co-contaminated Soil .....	HU Bin, LIANG Dong-li, ZHAO Wen-long, <i>et al.</i> (2817)
Response of Soil Microbial Community to the Bioremediation of Soil Contaminated with PAHs .....	ZHANG, Jing, LIN Xian-gui, LIU Wei-wei, <i>et al.</i> (2825)
Bioremediation of PAHs Contaminated Soil from Beijing Coking Plant by <i>Lasiodiplodia theobromae</i> .....	ZHANG Zhi-yuan, WANG Cui-ping, LIU Hai-bin, <i>et al.</i> (2832)
Leaching Experiments on the Release of Trace Elements from Tailings of Chashan Antimony Mine, Guangxi, China .....	CAI Yong-bing, LI Ling, WEI Xiao-fei, <i>et al.</i> (2840)
Accumulation Characteristics of Arsenic in Suburban Soils of Beijing .....	QI Jie, WANG Mei-e, WANG Zi-qiang, <i>et al.</i> (2849)
Antioxidant Enzyme Gene Expression as Molecular Biomarkers of Exposure to Polycyclic Musks .....	CHEN Chun, ZHOU Qi-xing, LIU Xiao-wei (2855)
Effects of Ozone Pollution on the Accumulation and Distribution of Dry Matter and Biomass Carbon of Different Varieties of Wheat .....	KOU Tai-ji, YU Wei-wei, ZHU Jian-guo, <i>et al.</i> (2862)
Influence of Reaction Time of Urea Hydrolysis-Based Co-precipitation on the Structure of ZnAl Layered Double Hydroxides and the Phosphate Adsorption .....	LU Ying, CHENG Xiang, XING Bo, <i>et al.</i> (2868)
Competitive Adsorption Kinetics of Aqueous Pb <sup>2+</sup> and Cu <sup>2+</sup> on Nano-HAP Surfaces .....	HU Tian-tian, CANG Long, WANG Yu-jun, <i>et al.</i> (2875)
Effects of pH and Ni <sup>2+</sup> on Sorption Behavior of Phenanthrene on Engineered Nano-Silica .....	LUO Pei, SUN Hong-wen, ZHANG Peng (2882)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Uranium on Attapulgite .....	LIU Juan, CHEN Di-yun, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2889)
Adsorption Characteristics of Ciprofloxacin in Ustic Cambosols .....	CUI Hao, WANG Shu-ping (2895)
Kinetic Mechanism and Characteristics Researches for Hydrazine-based NO <sub>x</sub> Removal at Moderate to High Temperatures .....	HONG Liu, CHEN De-zhen, WANG Du, <i>et al.</i> (2901)
Current Research Situation of H <sub>2</sub> S Selective Catalytic Oxidation Technologies and Catalysts .....	HAO Zheng-ping, DOU Guang-yu, ZHANG Xin, <i>et al.</i> (2909)

# 《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8月15日 33卷 第8期

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 8 Aug. 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. 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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行