

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附菲的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

北京市夏季不同 O₃ 和 PM_{2.5} 污染状况研究

王占山^{1,2}, 张大伟^{1,2}, 李云婷^{1,2*}, 董欣^{1,2}, 孙瑞雯^{1,2}, 孙乃迪^{1,2}

(1. 北京市环境保护监测中心, 北京 100048; 2. 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

摘要: 从天气背景场、气象要素、前体物和 PM_{2.5} 化学组分、气团运动轨迹以及大气氧化性等方面对北京市夏季两种不同的 O₃ 和 PM_{2.5} 污染状况进行了分析。结果表明, O₃ 达到中度污染而 PM_{2.5} 浓度优良 (O₃ 和 PM_{2.5} 一高一低) 污染状况的天气形势场为: 高空为偏西北气流, 地面受高压后部控制; 而 O₃ 和 PM_{2.5} 同时达到中度污染 (O₃ 和 PM_{2.5} 两高) 的天气形势场为: 高空为偏西气流, 地面受低压控制。与 O₃ 和 PM_{2.5} 一高一低污染状况相比, O₃ 和 PM_{2.5} 两高时的气象要素特征为: 偏南风更为明显和相对湿度更高。O₃ 和 PM_{2.5} 两高时污染物浓度演变特征为, O₃ 和 PM_{2.5} 的起始浓度较高, PM_{2.5} 日变化特征更为明显, 而 O₃ 平均浓度却低于 O₃ 和 PM_{2.5} 一高一低的污染状况。前体物、大气氧化性以及 PM_{2.5} 化学组分分析的结果表明, 较高的起始浓度在不利气象条件下的积累和吸湿增长以及当天较大偏南风造成的区域传输可能是造成 O₃ 和 PM_{2.5} 两高污染状况中 PM_{2.5} 浓度达到四级中度污染的主要原因。

关键词: 北京; 夏季; O₃; PM_{2.5}; 天气形势; 化学组分

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0807-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.004

Different Air Pollution Situations of O₃ and PM_{2.5} During Summer in Beijing

WANG Zhan-shan^{1,2}, ZHANG Da-wei^{1,2}, LI Yun-ting^{1,2*}, DONG Xin^{1,2}, SUN Rui-wen^{1,2}, SUN Nai-di^{1,2}

(1. Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, Beijing 100048, China; 2. Beijing Key Laboratory of Atmospheric Particulate Monitoring Technology, Beijing 100048, China)

Abstract: Two different pollution situations of O₃ and PM_{2.5} during summer in Beijing were analyzed from the perspective of synoptic situations, meteorological elements, precursors, atmospheric oxidation, back-trajectories of air mass and chemical compositions of PM_{2.5}. The results showed that the synoptic situations in the pollution situation that O₃ reached middle level pollution and PM_{2.5} maintained low concentrations (O₃ high-PM_{2.5} low) could be characterized as northwest gas flow in 500 hPa height and high-pressure rear in the ground. Whereas the synoptic situations in the pollution situation that O₃ and PM_{2.5} both reached middle level pollution (O₃-PM_{2.5} high) could be characterized as westerly gas flow in 500 hPa height and low pressure in the ground. Compared with the O₃ high-PM_{2.5} low situation, meteorological elements in O₃-PM_{2.5} high situation could be characterized as stronger southerly winds and higher relative humidity. In the O₃-PM_{2.5} high situation, initial concentrations of O₃ and PM_{2.5} were higher and diurnal variations of PM_{2.5} were more significant, nevertheless, the average concentrations of O₃ were lower than those in the O₃ high-PM_{2.5} low situation, respectively. The analysis of precursors, atmospheric oxidation and chemical compositions of PM_{2.5} showed that the accumulation and hygroscopic growth of PM_{2.5} under unfavorable meteorological conditions as well as the regional transport caused by strong southerly winds might be the main factors leading to high PM_{2.5} concentrations in O₃-PM_{2.5} high situation.

Key words: Beijing; summer; O₃; PM_{2.5}; synoptic situations; chemical compositions

2012 年环保部发布了新版《环境空气质量标准》(GB 3095-2012), 设定了 PM_{2.5} 浓度限值和 O₃ 8 h 滑动平均浓度限值; 同在 2012 年发布的《环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行)》(HJ 663-2012) 中, 将空气质量评价指标由 API 改为 AQI, 并增设了 PM_{2.5} 和 O₃ 评价指标。自此, PM_{2.5} 成为北京市的核心大气污染物, 而 O₃ 成为夏季北京的首要大气污染物。根据北京市环境保护监测中心发布的数据, 2014 年北京市共出现 O₃ 超标 73 d, 占全年的 20%; 夏季超标日中 O₃ 为首要污染物的天数占到 40% 以上。

Wang 等^[1] 对 2009 ~ 2011 年之间京津冀地区 O₃ 的“周末效应”进行了分析, 结果表明, 周末 VOCs

浓度的小幅度降低和 NO_x 浓度的大幅度降低造成了 VOC/NO_x 比例升高, 从而会导致 O₃ 生成处于 VOC 控制区的地区 O₃ 浓度升高。王占山等^[2] 分析了 2012 ~ 2013 年之间北京市 35 个自动监测站的 O₃ 浓度, 研究发现, 城区 O₃ 年均浓度相对较低, 郊区年均浓度较高, 生态植被优良的远郊区 O₃ 年均浓度最高。赵晨曦等^[3] 探讨了 2012 ~ 2013 年之间北

收稿日期: 2015-08-07; 修订日期: 2015-09-30

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项 (201409005); 国家科技支撑计划项目 (2014BAC23B03); 北京市优秀人才培养项目

作者简介: 王占山 (1987 ~), 男, 工程师, 主要研究方向为大气环境模拟分析、空气质量预报预警, E-mail: 18701650609@163.com

* 通讯联系人, E-mail: lee_yunting@163.com

京市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和气象要素的关系,发现风速和相对湿度是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布的最主要因素. 杨欣等^[4]对 2013 年 1 月北京市发生的 $\text{PM}_{2.5}$ 重污染过程进行了监测,研究表明,大气地表消光系数与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化呈显著线性正相关,相关系数达 0.95. 监测期间大气边界层在 91% 的时段低于 500 m,平均仅为 293 m,较低的边界层高度抑制了污染物的扩散.

在近两年的监测和预报工作中,笔者发现,在夏季北京市经常会出现两种不同类型的 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况,一种是 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 同时达到中度以上污染,另一种即 O_3 出现中度以上污染,而 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度则保持优良. 这两种截然不同的污染状况为北京市夏季的大气环境分析和空气质量预报预警工作造成了较大的困难,而导致这一现象发生的原因并不明确. 为解决这一问题,本研究从天气背景场、气象要素、前体物和 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分浓度、气团运动轨迹以及大气氧化性等方面对这两种 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况进行了分析,探讨其形成机制,以期北京市大气污染防治提供科学依据,为北京市空气质量预报预警工作提供理论支撑.

1 材料与方法

选择北京市空气质量自动监测网络中的榆垓站(区域传输监控点)、官园站(城区环境监控点)和定陵站(城市清洁点)进行分析. 在线 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分分析仪安装在北京市环境保护监测中心七楼楼顶;地面气象观测数据来自北京市观象台,各监测点位置见图 1. 使用 Thermo Fisher 1405F 监测仪、Thermo Fisher 48C 气体过滤相关法分析仪、Thermo Fisher 49C 紫外光度法分析仪、Thermo Fisher 42C

化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪和 Thermo Fisher 43i 脉冲紫外荧光法分析仪分别对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 O_3 、 NO_2 和 SO_2 进行监测. 化学组分分析仪采用 RT-4 型有机碳元素碳分析仪和 URG 9000S 阴阳离子在线监测仪. 各监测仪器均有校准仪参照国家标准定期校准,保证监测数据的准确性和有效性. $\text{PM}_{2.5}$ 、 CO 、 O_3 、 NO_2 和 SO_2 监测仪输出的 5 min 数据,根据每个小时内 5 min 数据的算术平均值求得小时浓度;化学组分分析仪输出的为小时数据. 本研究使用的均为小时数据.

2 结果与讨论

对 2014 年夏季(6~8 月)的北京市 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况进行筛选,以国控站点(即顺义、怀柔、万寿西宫、昌平、东四、天坛、奥体、农展馆、古城、官园和万柳这 11 个监测站)平均 AQI 指数为标准进行统计,具体 AQI 指数的计算方法和分级体系见文献[5]. 筛选出 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 一高一低的过程两天,分别为 6 月 14 日(O_3 AQI 指数为 162, $\text{PM}_{2.5}$ AQI 指数为 59,过程 A1)和 7 月 14 日(O_3 AQI 指数为 157, $\text{PM}_{2.5}$ AQI 指数为 38,过程 A2);筛选出 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 两高的过程两天,分别为 8 月 2 日(O_3 AQI 指数为 152, $\text{PM}_{2.5}$ AQI 指数为 163,过程 B1)和 8 月 21 日(O_3 AQI 指数为 163, $\text{PM}_{2.5}$ AQI 指数为 166,过程 B2).

2.1 天气形势场特征

图 2 显示了 4 个过程在早上 08:00 的天气形势. 从 500 hPa 高空形势场来看,4 个过程中均没有明显的冷空气活动. A1 和 A2 中高空有浅槽后的特征,属于冷涡或冷槽东移后带来的弱偏西北气流;而 B1 和 B2 中高空则基本上受偏西气流的控制. 从地面形势场来看,4 个过程中北京市近地面均受弱气压场控制,天气形势比较稳定,没有明显的天气系统过境. 但 A1 和 A2 中地面属于高压后部的特征;而 B1 和 B2 中地面更接近于受低压系统的控制. 因此 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 一高一低污染状况的天气形势场为:高空为偏西北气流,地面受高压后部控制;而 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 两高的天气形势场为:高空为偏西气流,地面受低压控制.

2.2 气象要素及污染物浓度演变趋势

由图 3 可以看出,同样类型的 O_3 和 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况的气象要素条件较为接近. 从风场来看,A1 和 A2 的上午,北京市受弱东北风控制,下午转为偏南风;而 B1 和 B2 则基本上一直受偏南风控制,且平

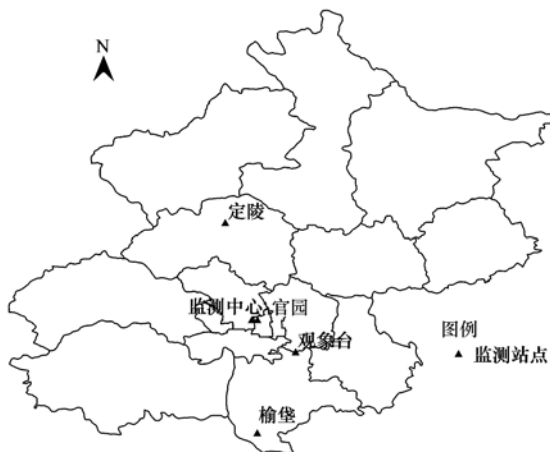


图 1 监测站点位置示意

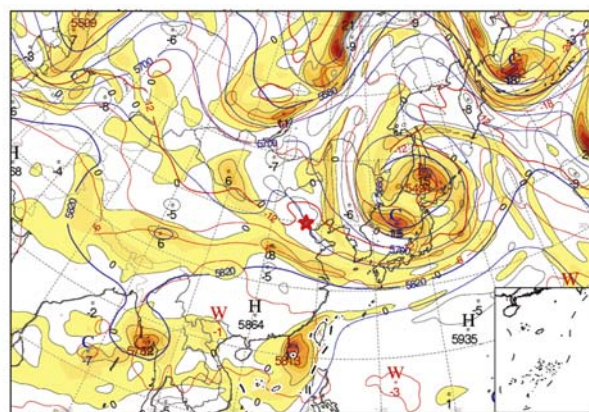
Fig. 1 Locations of the monitoring sites

均风速明显高于 A1 和 A2 (2.3 倍). 从温度来看, A1 ~ B2 在 4 个过程中最高温度分别为 32.1、34.9、33.5 和 32.5 $^{\circ}C$, 没有太显著差异, 且 A1 和 A2 过程的平均温度与 B1 和 B2 过程平均温度也较为接近. 从湿度来看, 4 个过程夜间的相对湿度均达到 80% 左右的较高水平, 但在白天特别是下午, A1 和 A2 的相对湿度降至 40% 以下, 而 B1 和 B2 的相对湿度仍保持 50% 左右的较高水平. B1 和 B2 过程的平均相对湿度比 A1 和 A2 过程平均相对湿度高于 20%. 因此, 与 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低的污染状况相比, O_3 与 $PM_{2.5}$ 两高的气象要素特征为: 偏南风更为明显和相对湿度更高.

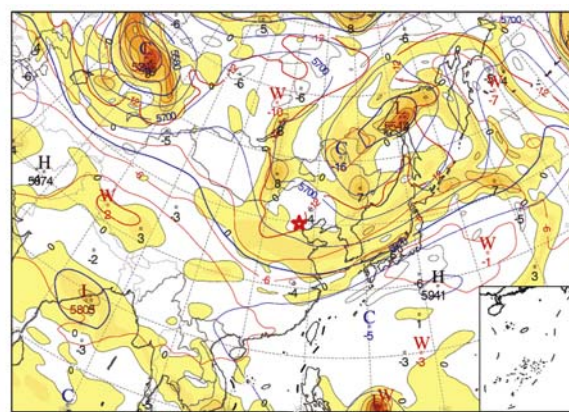
过程 A1 和 A2 中, O_3 在夜间维持较低浓度, 在白天呈现单峰型分布并在下午达到峰值. 而在过程 B1 和 B2 中, 官园和定陵站点 O_3 起始浓度 (00:00 时浓度) 却明显高于 A1 和 A2 站点起始浓度, 这可能是因为扩散条件不利造成的 O_3 浓度积累或边界层之上的 O_3 垂直输送导致的. 从整体浓度水平来看, A1 和 A2 过程的 O_3 平均浓度 ($120.6 \mu g \cdot m^{-3}$) 却高于 B1 和 B2 过程平均浓度 ($109.2 \mu g \cdot m^{-3}$), 可能的原因之一是 B1 和 B2 中较高的颗粒物浓度会造成太阳辐射的降低, 从而降低 O_3 的生成效率^[6].

过程 A1 和 A2 中, 3 个站点的 O_3 平均浓度较为接近, 而过程 B1 和 B2 中, 受明显偏南风的影响, 定陵站 O_3 浓度明显高于榆堡和官园, 体现了 O_3 传输的特性.

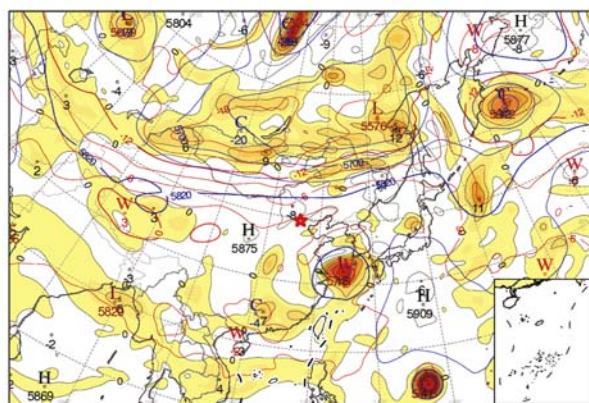
过程 A1 和 A2 中, 由于 $PM_{2.5}$ 一直维持较低浓度, 所以其日变化特征并不明显, 保持平缓. 值得注意的是, 过程 A1 的后期, 榆堡站 $PM_{2.5}$ 出现迅速上升, 官园站 $PM_{2.5}$ 浓度也出现一定程度增长, 而定陵站 $PM_{2.5}$ 浓度并没有变化, 这也体现了北京的 $PM_{2.5}$ 污染过程往往是从南部开始的. 过程 B1 和 B2 中, $PM_{2.5}$ 的起始浓度明显高于 A1 和 A2, 基本达到 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 以上, 甚至超过 $150 \mu g \cdot m^{-3}$ (过程 B1 的定陵). B1 和 B2 的夜间 (00:00 ~ 08:00), 北京市平均风速为 $1.3 m \cdot s^{-1}$, 平均相对湿度为 80.1%, 夜间较弱的风速和较高的相对湿度均不利于 $PM_{2.5}$ 的扩散, 导致了其在夜间积累. 在白天各站点 $PM_{2.5}$ 浓度表现出一定的日变化规律, 即后半夜时段和下午时段浓度有所降低, 这与之之前观测到的北京市 $PM_{2.5}$ 日变化规律较为一致^[7]. 但由于整体的扩散条件不利, 整体 $PM_{2.5}$ 浓度水平还是达到中度污染的水平. 过程 B2 的后期, 在较强的偏东北风的作用下, 定陵和官园的 $PM_{2.5}$ 得到迅速清除.



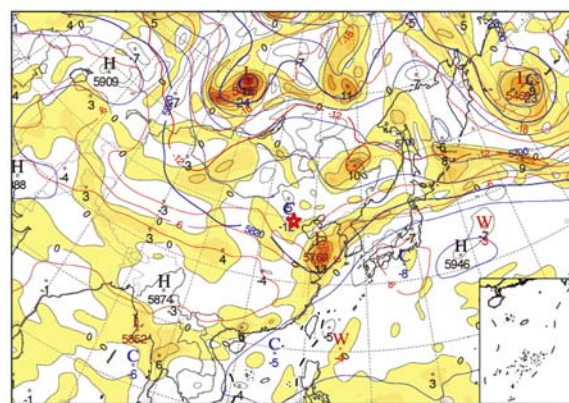
(a) 过程A1 08:00的500hPa高度天气形势



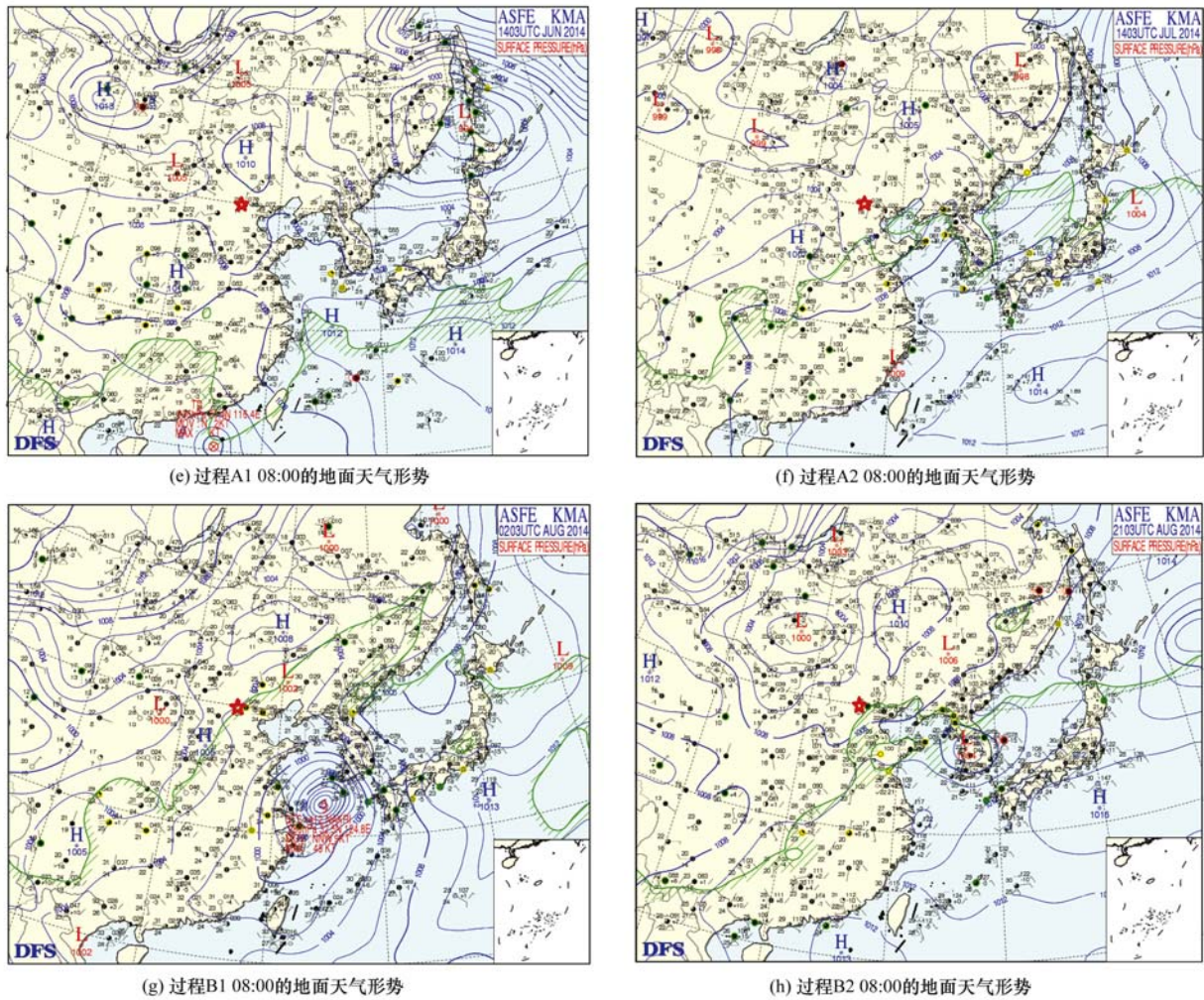
(b) 过程A2 08:00的500hPa高度天气形势



(c) 过程B1 08:00的500hPa高度天气形势



(d) 过程B2 08:00的500hPa高度天气形势



红色五角星代表北京市位置
图 2 4 个过程的 08:00 天气形势

Fig. 2 Weather maps at 08:00 in the four processes

因此,两种不同的污染状况的污染物演变特征为: O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高时, O_3 和 $PM_{2.5}$ 的起始浓度较高, $PM_{2.5}$ 日变化特征更为明显,而 O_3 平均浓度却低于 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低的污染状况.

为进一步讨论各过程之间污染物浓度的差异,从统计学上对其进行分析. 首先对各组数据进行单样本 K-S (kolmogorov-smirnov) 统计检验,得出各组数据分布均不服从正态分布,因此采用成组两样本秩和检验方法进行分析,结果如表 1 所示. 4 个过程之间的 O_3 浓度均未表现出显著性差异,即 O_3 污染水平较为一致. B1 和 B2 过程的 $PM_{2.5}$ 浓度未表现出显著差异,即 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高污染状况中 $PM_{2.5}$ 污染水平也较为一致,其他过程之间 $PM_{2.5}$ 浓度均表现出显著性差异.

为研究 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高污染状况中 $PM_{2.5}$ 起始浓度较高的形成原因,进一步分析了 B1 和 B2 的前

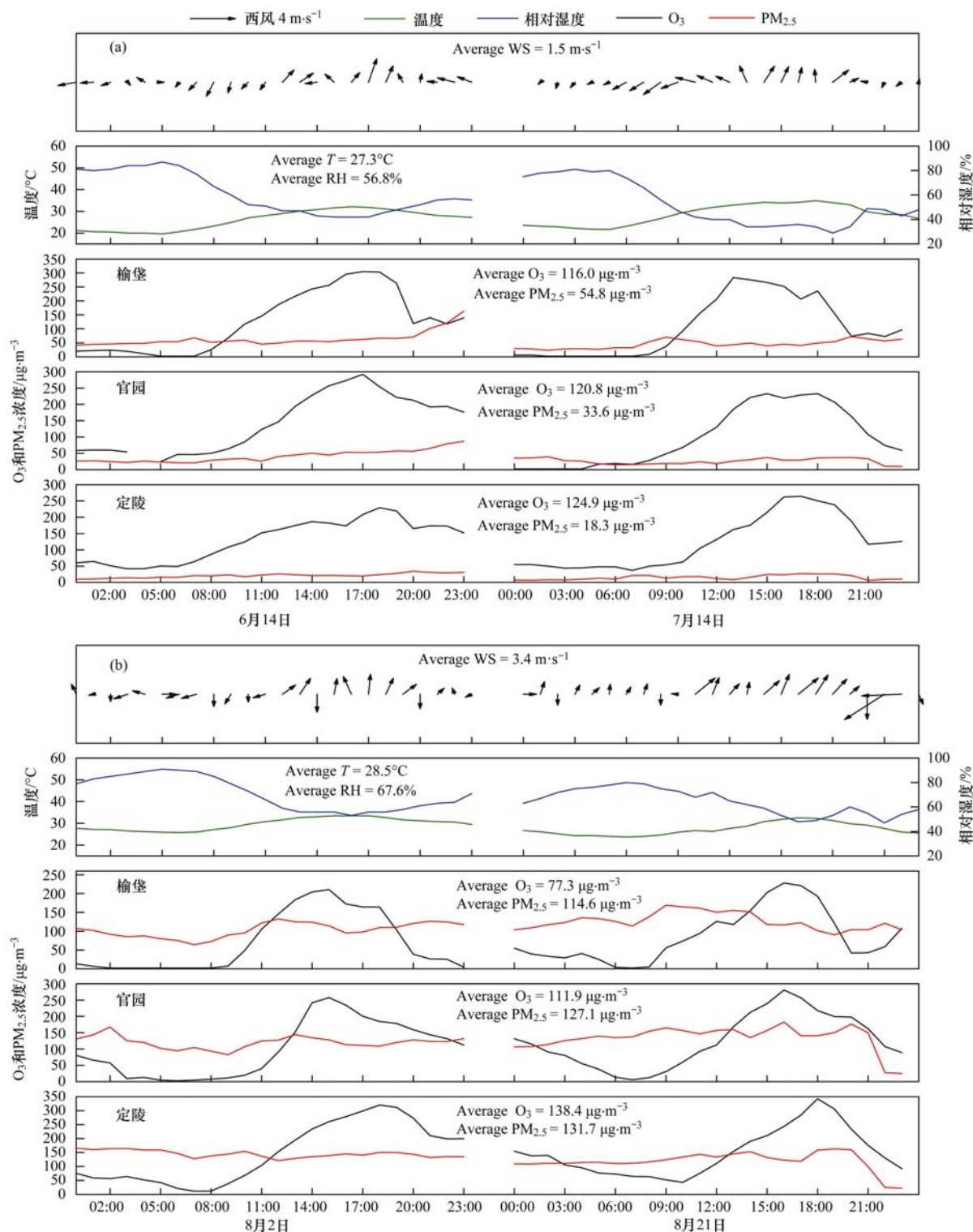
表 1 4 个过程中 O_3 和 $PM_{2.5}$ 浓度的秩和检验结果¹⁾

Table 1 Rank sum test results of concentrations of O_3 and $PM_{2.5}$ in the four processes

污染物	过程	A1	A2	B1	B2
O_3	A1				
	A2	-			
	B1	-	-		
	B2	-	-	-	
$PM_{2.5}$	A1				
	A2	+			
	B1	+	+		
	B2	+	+	-	

1) + 表示有显著性差异,且置信水平均为 $\alpha = 0.01$ (2-tailed); - 表示无显著性差异

3 d 的气象要素和各站点 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律(图 4). 可以看出,过程 B1 之前是一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程,过程 B2 之前虽然没有发生重污染,但 $PM_{2.5}$ 浓度也发生了一定的积累,达到 $100 \mu g \cdot m^{-3}$ 左右. 从



(a)展示了过程A1和A2;(b)展示了过程B1和B2,WS表示风速
图3 4个过程中气象要素和3个站点O₃、PM_{2.5}浓度演变规律

Fig. 3 Evolutions of meteorological elements and concentrations of O₃, PM_{2.5} in the three sites during the four processes

风场上来看,在B1和B2的前期北京市的主导风向多为西南风。7月30日,在偏东风的作用下PM_{2.5}浓度出现过几个小时的明显下降,但海上气流也造成了较高的相对湿度,30日的下午PM_{2.5}出现迅速反弹。从相对湿度来看,B1和B2的前期时段的夜间,相对湿度基本上能达到80%的较高水平,且各站点PM_{2.5}浓度峰值基本出现在相对湿度浓度峰值之后的3~5 h,体现了相对湿度对PM_{2.5}浓度的影响。因

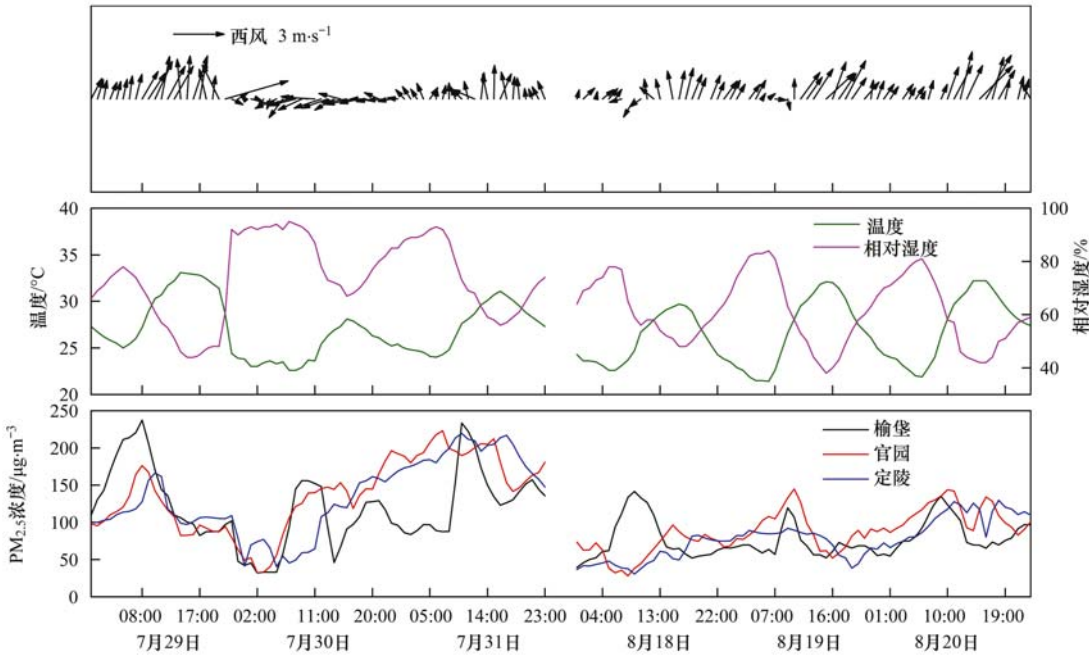


图4 2014年7月29~31日以及8月18~20日气象要素和3个站点PM_{2.5}浓度

Fig. 4 Meteorological variables and concentrations of PM_{2.5} in the three sites during 29-31 July, 2014 and 18-20 August, 2014

此,O₃和PM_{2.5}两高污染状况中PM_{2.5}较高的起始浓度同样是由持续性的偏南风 and 较高的相对湿度等不利的气象条件造成的.

2.3 前体物和大气氧化性特征

本研究中将SO₂和NO₂作为PM_{2.5}的前体物,将CO和NO_x(NO+NO₂)作为O₃的前体物.另外,大气氧化剂OX(NO₂+O₃)可作为评价大气氧化能力的指标^[8~11].对PM_{2.5}和O₃与其前体物和OX浓

度进行Spearman相关性分析,首先对各组数据分别进行K-S统计检验,得出所有数据均不服从正态分布,因此对各组数据进行Spearman相关分析,样本量分别为144个,结果见表2.过程B1和B2中SO₂和NO₂的浓度略高于A1和A2,但并无显著差异;两种污染状况下PM_{2.5}与NO₂均未表现出显著相关性,与SO₂的相关性也较为接近.过程B1和B2的OX浓度略低于A1和A2,且PM_{2.5}与OX的相关性

表2 各过程中官园站PM_{2.5}和O₃与其前体物和大气氧化性的相关性系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients among PM_{2.5}, O₃ and their precursor as well as OX at Guanyuan Station during different processes

过程	污染物 (平均浓度/μg·m ⁻³)	PM _{2.5}	O ₃	SO ₂	NO ₂	NO	CO	NO _x	OX
A1 + A2	PM _{2.5} (33.6)	1	0.619	0.418	—	—	0.665	—	0.709
	O ₃ (120.8)		1	0.315 ¹⁾	-0.780	-0.614	—	-0.805	0.960
	SO ₂ (4.1)			1	—	-0.355	0.509	—	0.414
	NO ₂ (44.4)				1	0.365	0.306	0.980	-0.658
	NO (3.3)					1	—	0.492	-0.496
	CO (0.7)						1	—	0.416
	NO _x (47.7)							1	-0.679
	OX (165.2)								1
B1 + B2	PM _{2.5} (127.1)	1	0.308	0.623	—	—	0.673	—	0.404
	O ₃ (111.9)		1	—	-0.769	-0.437	—	-0.778	0.972
	SO ₂ (7.6)			1	—	—	0.433	—	0.350
	NO ₂ (49.8)				1	0.665	0.589	0.988	-0.653
	NO (5.4)					1	0.407	0.705	-0.305
	CO (1.2)						1	0.600	—
	NO _x (55.2)							1	-0.666
	OX (161.7)								1

1) —表示无显著相关性,黑体数值表示置信水平为α=0.05 (2-tailed),其余均为α=0.01 (2-tailed)

也低于 A1 和 A2. 因此, B1 和 B2 中的高浓度 $PM_{2.5}$ 中由本地排放的前体物发生光化学反应二次生成的比例相对较小, 较高的起始浓度在不利气象条件下的积累和吸湿增长等其他大气化学过程以及当天较大偏南风造成的区域传输可能是造成 $PM_{2.5}$ 浓度达到四级中度污染的主要原因之一. 对 O_3 来说, B1 和 B2 中各前体物的浓度略高于 A1 和 A2 中, O_3 与前体物的相关性略低于 A1 和 A2.

2.4 $PM_{2.5}$ 化学组分特征和气团轨迹特征

由图 5 可以看出, 过程 A1 和 A2 中, $PM_{2.5}$ 中各主要化学组分浓度均处于相对较低的水平, 浓度最高的组分为 OC. 过程 B1 和 B2 中, 各组分浓度

均出现一定程度的增长, 与 A1 和 A2 中平均浓度相比, 浓度增幅最为明显的为 SO_4^{2-} , 达到 532.4%; 增幅最小的为 OC, 仅为 30.1%. 过程 B1 和 B2 中, SO_4^{2-} 浓度占据绝对主导作用, 与 A1 和 A2 中平均浓度相比, NH_4^+ 浓度也有明显的升高, 增幅为 353.8%. 由于 SO_4^{2-} 主要来自于前体物 SO_2 的化学转化, 而北京市 SO_2 的排放源较少, 因此之前的研究多将 SO_4^{2-} 作为北京市 $PM_{2.5}$ 区域传输的示踪组分^[12~15]. 4 个过程中 $PM_{2.5}$ 化学组分的分析也支持前体物和大气氧化性分析的结论, 即区域传输对 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高的污染状况有较为重要的贡献.

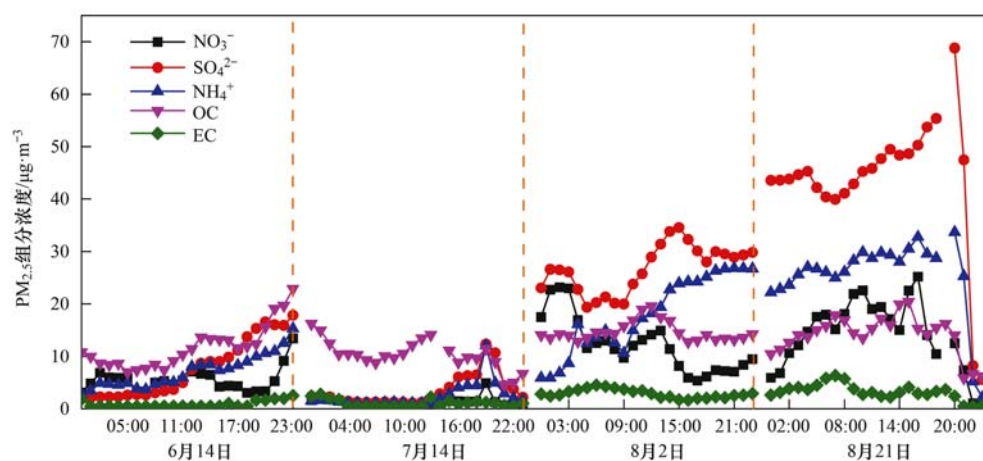


图 5 4 个过程中 $PM_{2.5}$ 主要化学组分浓度

Fig. 5 Concentrations of major chemical components of $PM_{2.5}$ in the four processes

图 6 显示了 4 个过程中 20:00 时北京市地面 100、500 和 1 500 m 高度后向 12 h 气团轨迹^[16~20]. 整体来看, 4 个过程中影响北京市的气团大都来自偏南方向为主, 但 A1 和 A2 中不同高度气团的来源地并不一致, 且高空的气流有明显的下沉作用, 将高空相对清洁的空气带至近地面. 良好的垂直扩散条件是过程 A1 和 A2 中 $PM_{2.5}$ 浓度较低的原因之一. 而过程 B1 和 B2 中, 不同高度气团的来源方向更为一致, 整层的气团运动更有利于污染物的区域传输, 与 $PM_{2.5}$ 化学组分的分析结果一致. 另外, 过程 B1 和 B2 中高空的气团并没有明显的下沉运动, 大气垂直扩散条件较差是 $PM_{2.5}$ 高浓度的原因之一. 虽然过程 B1 中 1 500 m 高空气团来自北京市北部方向, 但并没有将相对清洁的空气带至近地面.

3 结论

(1) 对北京市夏季经常出现的 O_3 达到四级中

度污染 $PM_{2.5}$ 浓度为优良以及 O_3 和 $PM_{2.5}$ 同时达到四级中度污染的两种污染状况进行了分析. 从天气形势场看, O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低污染状况的天气形势场为: 高空为偏西北气流, 地面受高压后部控制; 而 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高的天气形势场为: 高空为偏西气流, 地面受低压控制.

(2) 从气象要素来看, 与 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低的污染状况相比, O_3 与 $PM_{2.5}$ 两高的气象要素特征为: 偏南风更为明显和相对湿度更高. O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高时的污染物浓度演变规律为, 受到前期持续性的偏南风 and 较高的相对湿度的影响, O_3 和 $PM_{2.5}$ 的起始浓度较高; $PM_{2.5}$ 日变化特征更为明显; 而 O_3 平均浓度却低于 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低的污染状况.

(3) 两种污染状况中 $PM_{2.5}$ 前体物浓度较为接近, $PM_{2.5}$ 与前体物的相关性也较为接近, 且 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高污染状况中 OX 浓度以及 $PM_{2.5}$ 与 OX 的相关性均低于 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低污染状况. 因

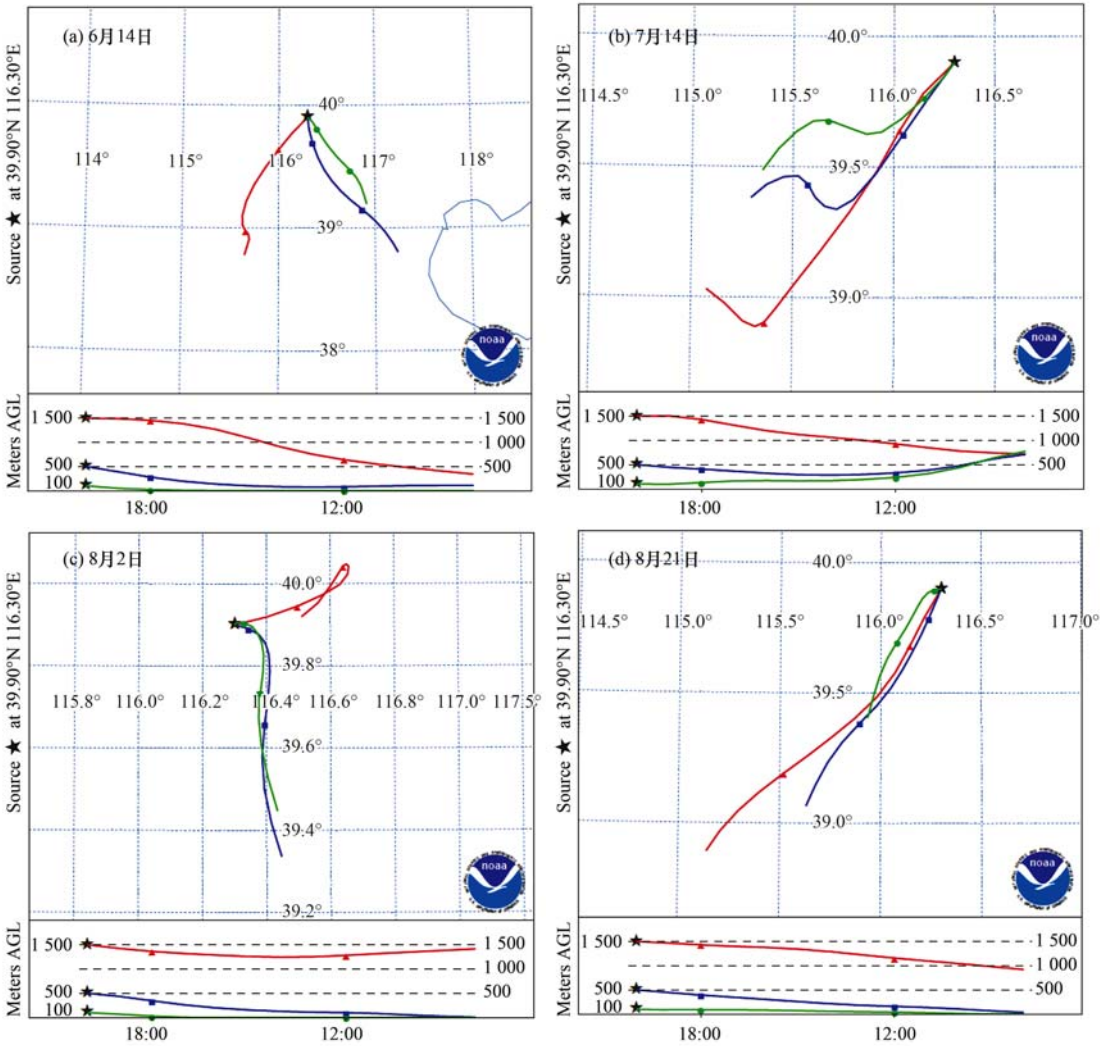


图6 4个过程中20:00时北京市地面100、500和1500 m高度后向12 h 气团轨迹

Fig. 6 12-hour back-trajectories at heights of 100, 500 and 1500 m in Beijing at 20:00 in the four processes

此, O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高时高浓度 $PM_{2.5}$ 不太可能全部是化学反应二次生成的, 可能是由较高的起始浓度在不利气象条件下的积累和吸湿增长以及当天较大偏南风造成的区域传输造成的. $PM_{2.5}$ 化学组分分析结果也表明, 区域传输对 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高污染状况有较为重要的贡献.

(4) 在今后北京市夏季空气质量预报预警工作中, 若遇到未来几天高空为偏西气流, 地面受低压控制且温度较高, 同时受到持续性的偏南风 and 较高的湿度影响且 $PM_{2.5}$ 起始浓度较高时, 则未来几天可能出现 O_3 和 $PM_{2.5}$ 同时达到中度及以上污染的复合型大气污染, 应该密切关注, 并及时通知公众加强预防.

参考文献:

[1] Wang Y H, Hu B, Ji D S, *et al.* Ozone weekend effects in the Beijing-Tianjin-Hebei metropolitan area, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(5): 2419-2429.

[2] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 北京城区臭氧日变化特征及与前体物的相关性分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(12): 3001-3008.

[3] 赵晨曦, 王云琦, 王玉杰, 等. 北京地区冬春 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 污染水平时空分布及其与气象条件的关系[J]. *环境科学*, 2014, **35**(2): 418-427.

[4] 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 北京2013年1月连续强霾过程的污染特征及成因分析[J]. *中国环境科学*, 2014, **34**(2): 282-288.

[5] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[S].

[6] Zhang Y H, Su H, Zhong L J, *et al.* Regional ozone pollution and observation-based approach for analyzing ozone-precursor relationship during the PRIDE-PRD2004 campaign [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(25): 6203-6218.

[7] 王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布[J]. *地理学报*, 2015, **70**(1): 110-120.

[8] Clapp L J, Jenkin M E. Analysis of the relationship between ambient levels of O_3 , NO_2 and NO as a function of NO_x in the

- UK[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, **35** (36): 6391-6405.
- [9] Stephens S, Madronich S, Wu F, *et al.* Weekly patterns of México City's surface concentrations of CO , NO_x , PM_{10} and O_3 during 1986-2007 [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(17): 5313-5325.
- [10] Zhang W, Capps S L, Hu Y, *et al.* Development of the high - order decoupled direct method in three dimensions for particulate matter: enabling advanced sensitivity analysis in air quality models [J]. *Geoscientific Model Development*, 2011, **5** (2): 355-368.
- [11] 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.
- [12] 李璇, 聂滕, 齐珺, 等. 2013 年 1 月北京市 $PM_{2.5}$ 区域来源解析[J]. *环境科学*, 2015, **36**(4): 1148-1153.
- [13] 刘辉, 贺克斌, 马永亮, 等. 2008 年奥运前后北京城、郊 $PM_{2.5}$ 及其水溶性离子变化特征[J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(1): 177-185.
- [14] 徐宏辉, 王跃思, 温天雪, 等. 北京大气气溶胶中水溶性离子的粒径分布和垂直分布[J]. *环境科学*, 2007, **28**(1): 14-19.
- [15] 黄怡民, 刘子锐, 陈宏, 等. 北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征[J]. *环境科学*, 2013, **34**(4): 1236-1244.
- [16] Alam M S, Delgado-Saborit J M, Stark C, *et al.* Investigating PAH relative reactivity using congener profiles, quinone measurements and back trajectories[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(5): 2467-2477.
- [17] Wang F W, Lin T, Li Y Y, *et al.* Sources of polycyclic aromatic hydrocarbons in $PM_{2.5}$ over the East China Sea, a downwind domain of East Asian continental outflow [J]. *Atmospheric Environment*, 2014, **92**: 484-492.
- [18] 郭晓方, 崔阳, 王开扬, 等. 近 3 年太原市夏季降水的化学特征研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(2): 388-395.
- [19] 雷育涛, 刘明, 陈来国, 等. 海南五指山大气气态总汞含量变化特征[J]. *环境科学*, 2015, **36**(3): 817-823.
- [20] Xue J, Yuan Z B, Lau A K H, *et al.* Insights into factors affecting nitrate in $PM_{2.5}$ in a polluted high NO_x environment through hourly observations and size distribution measurements [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119** (8): 4888-4902.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong, JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun, ZHANG Peng, YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行