ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第37卷　第3期
2016年3月15日

目　次

北京市夏季不同 O_3 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 O_3 和 $PM_{2.5}$ 污染状况进行了分析. 结果表明,O_3 达到中度污染而 $PM_{2.5}$ 浓度优良(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 $PM_{2.5}$ 同时达到中度污染(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. 与 O_3 和 $PM_{2.5}$ 一高一低污染状况相比,O_3 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. O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高时污染物浓度演变特征为,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. 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 O_3 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; O_3; $PM_{2.5}$; 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.hjkx.2016.03.004

Different Air Pollution Situations of O_3 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 O_3 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 O_3 reached middle level pollution and $PM_{2.5}$ maintained low concentrations (O_3 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 O_3 and $PM_{2.5}$ both reached middle level pollution (O_3-$PM_{2.5}$ high) could be characterized as westerly gas flow in 500 hPa height and low pressure in the ground. Compared with the O_3 high-$PM_{2.5}$ low situation, meteorological elements in O_3-$PM_{2.5}$ high situation could be characterized as stronger southerly winds and higher relative humidity. In the O_3-$PM_{2.5}$ high situation, initial concentrations of O_3 and $PM_{2.5}$ were higher and diurnal variations of $PM_{2.5}$ were more significant, nevertheless, the average concentrations of O_3 were lower than those in the O_3 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 O_3-$PM_{2.5}$ high situation.

Key words: Beijing; summer; O_3; $PM_{2.5}$; 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 O_3 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 O_3 评价指标. 自此,$PM_{2.5}$ 成为北京市的核心大气污染物,而 O_3 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 O_3 超标 73 d,占全年的 20%; 夏季超标日中 O_3 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 O_3 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 O_3 生成处于 VOC 控制区的地区 O_3 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 O_3 浓度,研究发现,城区 O_3 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 O_3 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 $PM_{2.5}$浓度和气象要素的关系,发现风速和相对湿度是影响 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$重污染过程进行了监测,研究表明,大气地表消光系数与 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$污染状况,一种是 O_3 和 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$污染状况进行了分析,探讨其形成机制,以期为北京市大气污染防控提供科学依据,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垡站(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 $PM_{2.5}$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 $NO\text{-}NO_2\text{-}NO_x$ 分析仪和 Thermo Fisher 43i 脉冲紫外荧光法分析仪分别对 $PM_{2.5}$、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. $PM_{2.5}$、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. 本研究中使用的均为小时数据.

图1 监测站点位置示意

Fig. 1 Locations of the monitoring sites

2 结果与讨论

对2014年夏季(6~8月)的北京市 O_3 和 $PM_{2.5}$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 $PM_{2.5}$一高一低的过程两天,分别为6月14日(O_3 AQI 指数为162,$PM_{2.5}$ AQI 指数为59,过程A1)和7月14日(O_3 AQI 指数为157,$PM_{2.5}$ AQI 指数为38,过程A2); 筛选出 O_3 和 $PM_{2.5}$两高的过程两天,分别为8月2日(O_3 AQI 指数为152,$PM_{2.5}$ AQI 指数为163,过程B1)和8月21日(O_3 AQI 指数为163,$PM_{2.5}$ 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 $PM_{2.5}$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.

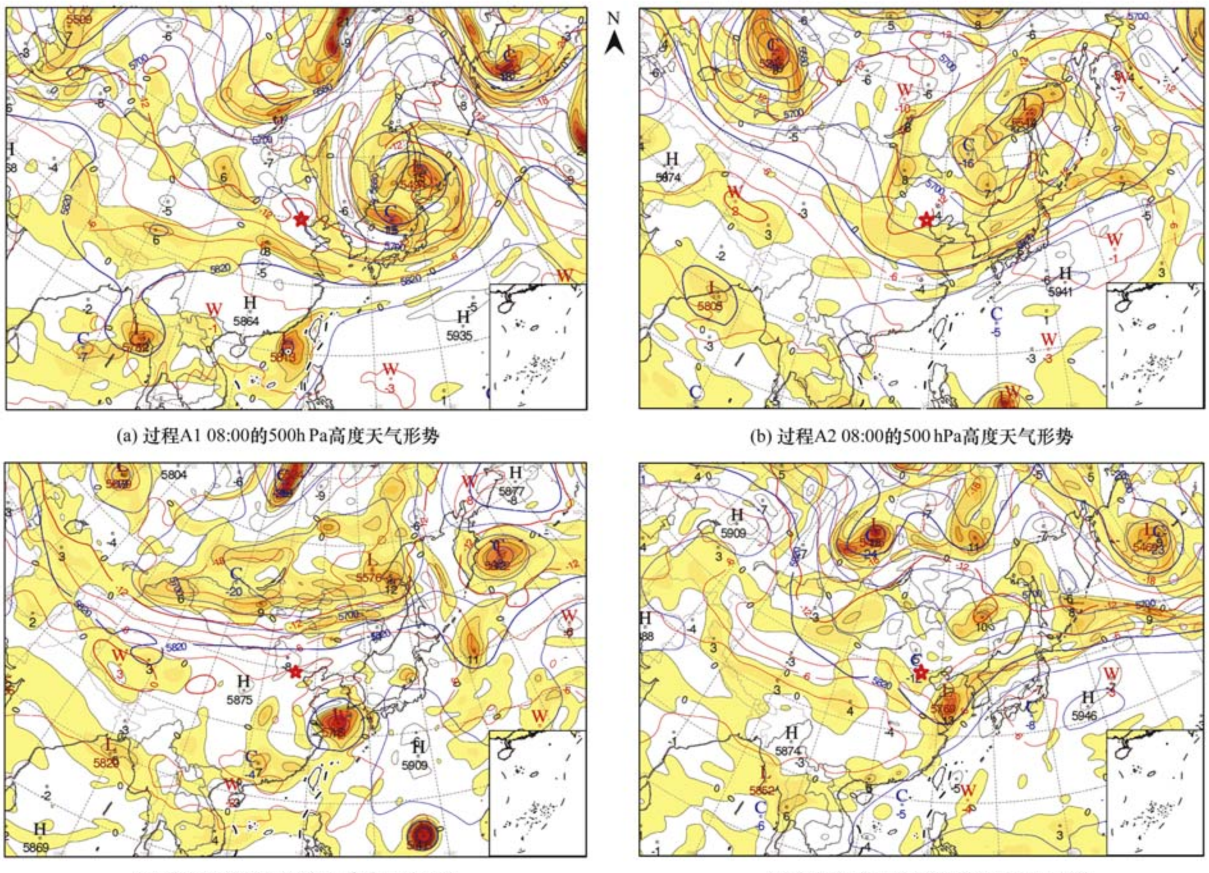
2.2 气象要素及污染物浓度演变趋势

由图3可以看出,同样类型的 O_3 和 $PM_{2.5}$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

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℃,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 浓度明显高于榆垡和官园,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,榆垡站 $PM_{2.5}$ 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.

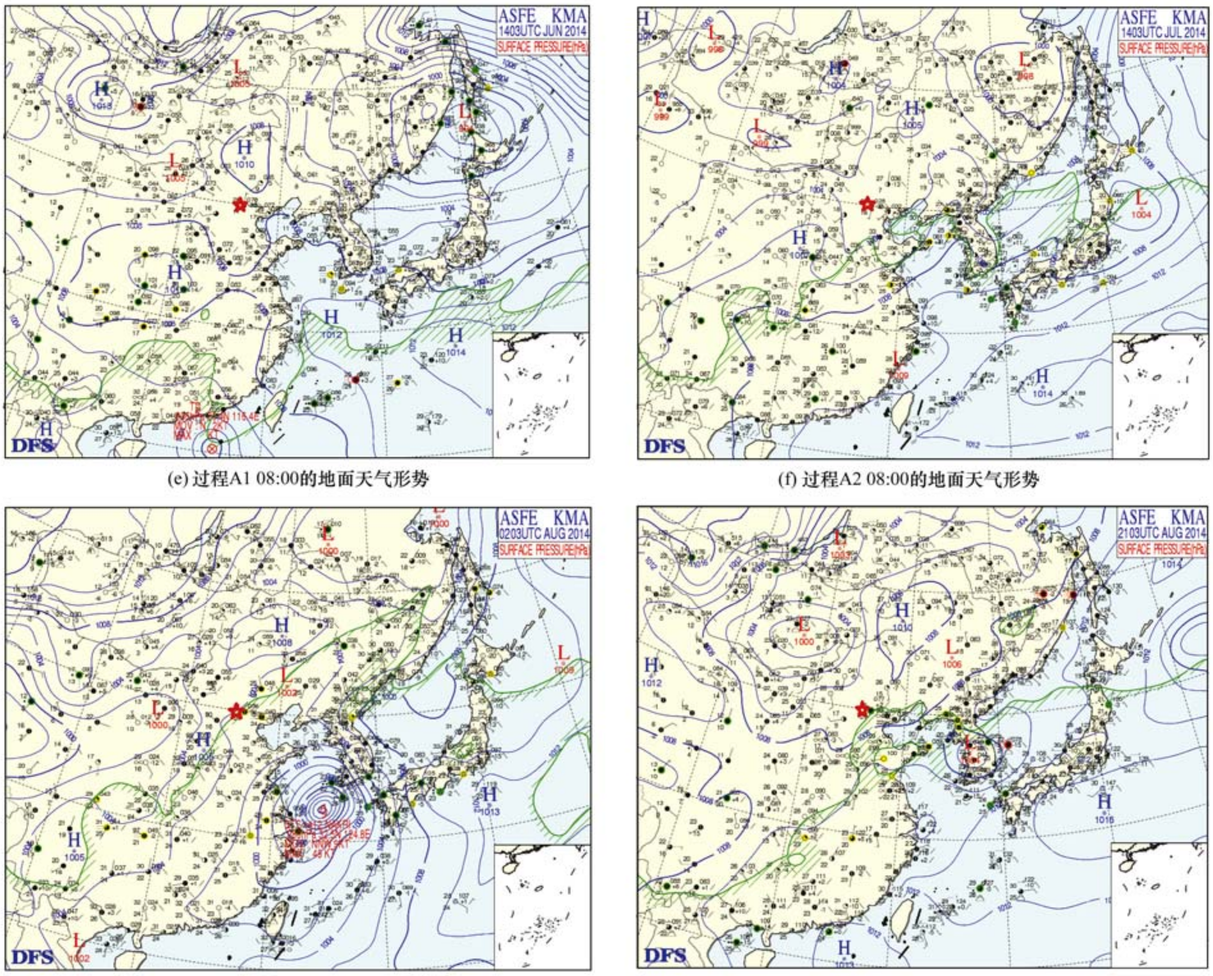


(a) 过程A1 08:00的500 hPa高度天气形势

(b) 过程A2 08:00的500 hPa高度天气形势

(c) 过程B1 08:00的500 hPa高度天气形势

(d) 过程B2 08:00的500 hPa高度天气形势



(e) 过程A1 08:00的地面天气形势

(f) 过程A2 08:00的地面天气形势

(g) 过程B1 08:00的地面天气形势

(h) 过程B2 08:00的地面天气形势

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.

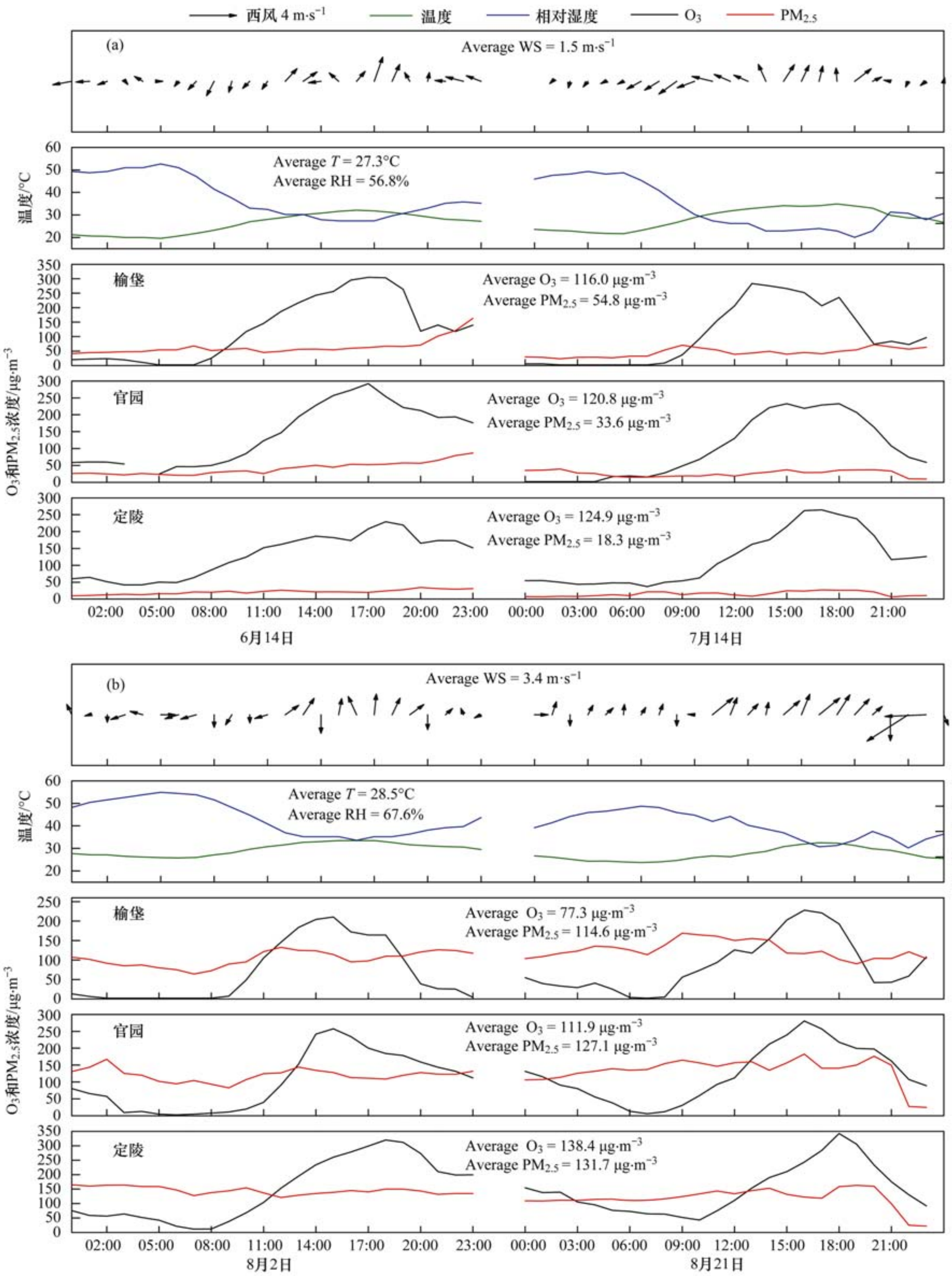
为研究 O_3 和 $PM_{2.5}$ 两高污染状况中 $PM_{2.5}$ 起始浓度较高的形成原因,进一步分析了 B1 和 B2 的前 3 d 的气象要素和各站点 $PM_{2.5}$ 浓度变化规律(图 4). 可以看出,过程 B1 之前是一次 $PM_{2.5}$ 重污染过程,过程 B2 之前虽然没有发生重污染,但 $PM_{2.5}$ 浓度也发生了一定的积累,达到 100 $\mu g \cdot m^{-3}$ 左右. 从

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



(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 O_3、$PM_{2.5}$ 浓度演变规律

Fig. 3　Evolutions of meteorological elements and concentrations of O_3, $PM_{2.5}$ 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

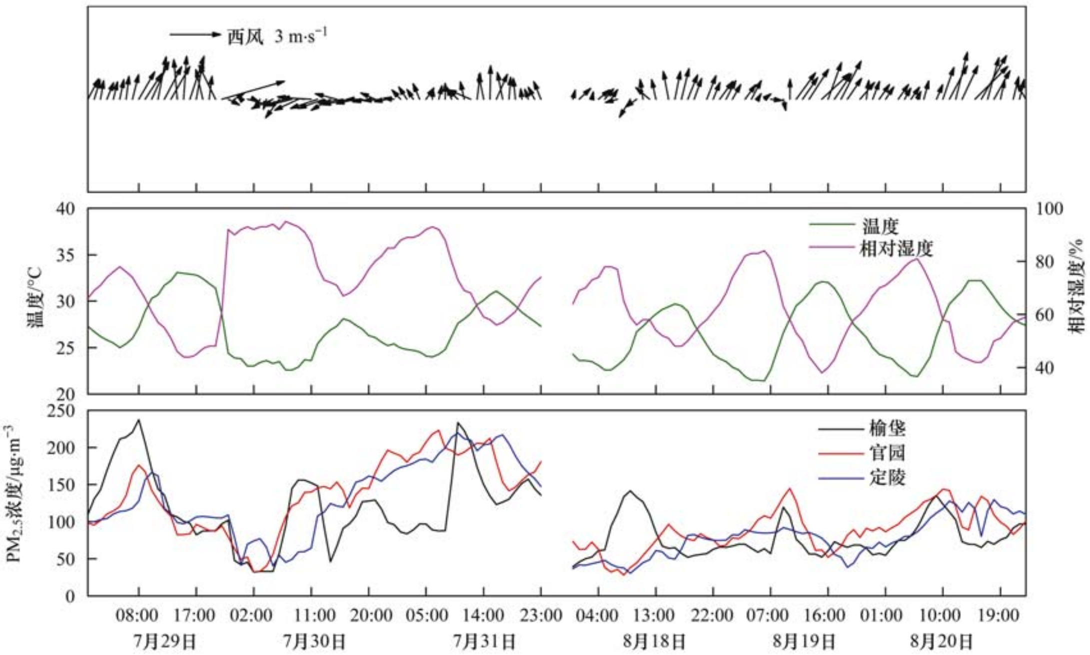


图 4　2014 年 7 月 29 ~ 31 日以及 8 月 18 ~ 20 日气象要素和 3 个站点 $PM_{2.5}$ 浓度

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，O_3 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和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 SO_2 和 NO_2 作为 $PM_{2.5}$ 的前体物，将 CO 和 NO_x($NO+NO_2$)作为 O_3 的前体物. 另外，大气氧化剂 OX(NO_2+O_3)可作为评价大气氧化能力的指标[8~11]. 对 $PM_{2.5}$ 和 O_3 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 SO_2 和 NO_2 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 NO_2 均未表现出显著相关性，与 SO_2 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 O_3 与其前体物和大气氧化性的相关性系数1)

Table 2　Correlation coefficients among $PM_{2.5}$, O_3 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 $\alpha=0.05$ (2-tailed)，其余均为 $\alpha=0.01$ (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.

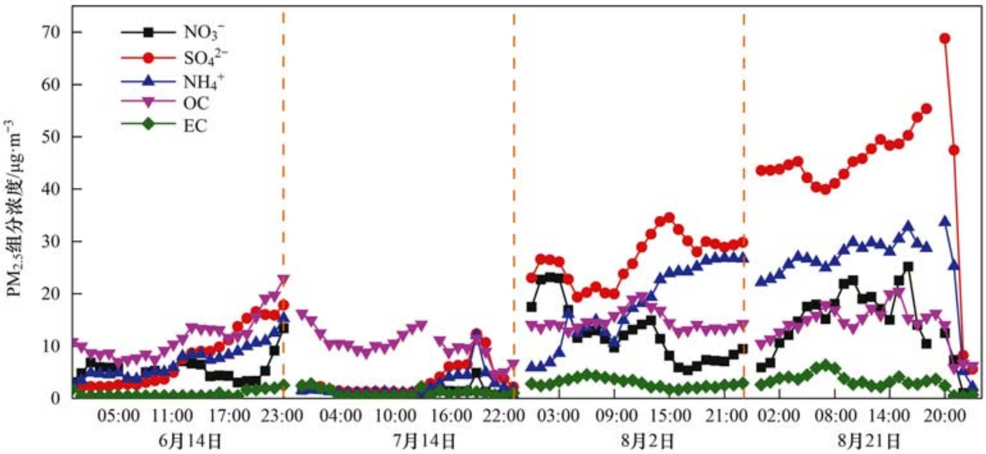


图 5　4 个过程中 $PM_{2.5}$ 主要化学组分浓度

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以来自偏南方向为主,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和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

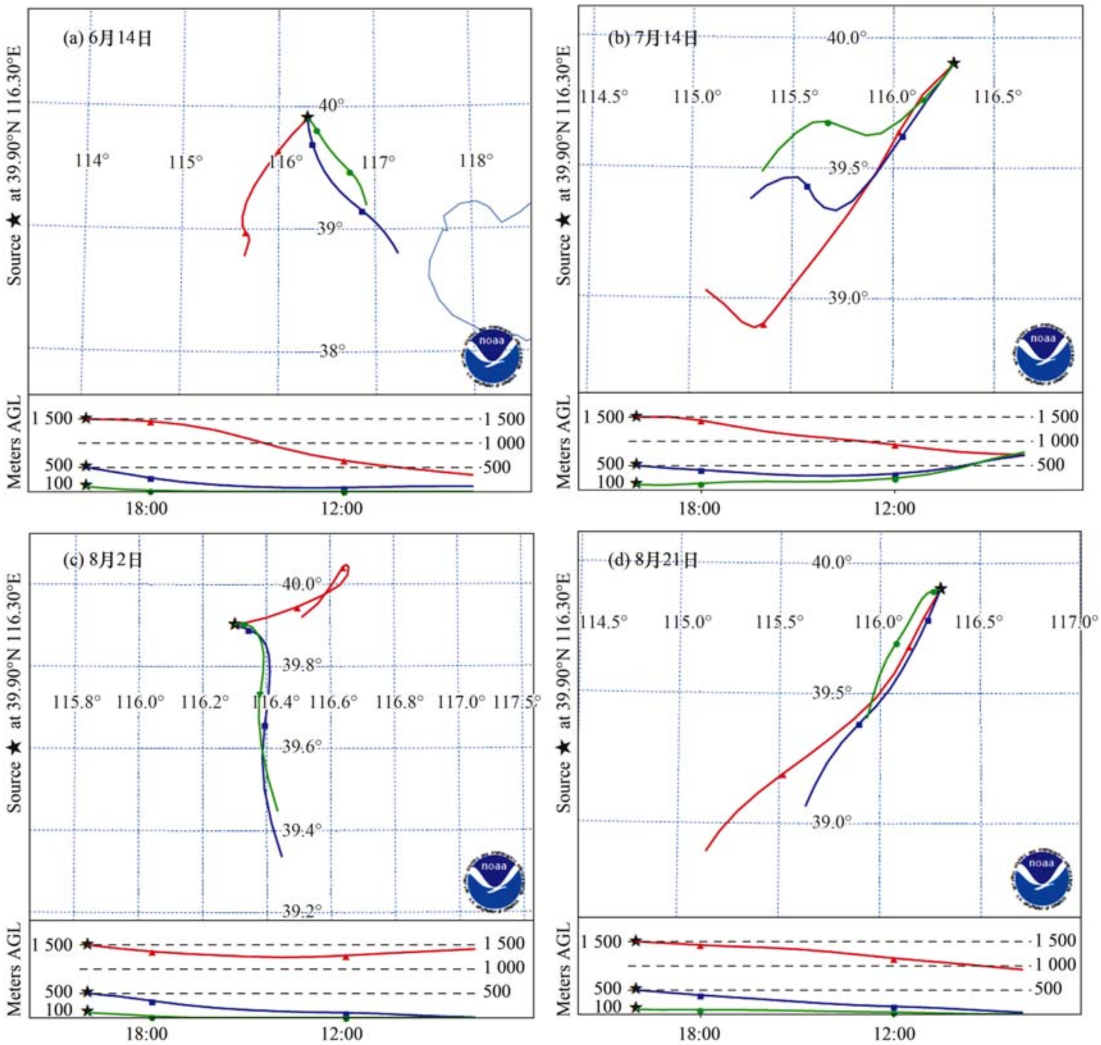


图 6 4 个过程中 20:00 时北京市地面 100、500 和 1 500 m 高度后向 12 h 气团轨迹

Fig. 6 12-hour back-trajectories at heights of 100, 500 and 1 500 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和较高的湿度影响且 $PM_{2.5}$ 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.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 37 No. 3

Mar. 15, 2016

CONTENTS

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