

天气型对北京地区近地面臭氧的影响

唐贵谦¹,李昕²,王效科³,辛金元¹,胡波¹,王莉莉¹,任玉芬³,王跃思^{1*}

(1. 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 ; 2. 北京市环境保护局 ,北京 100044 ; 3. 中国科学院生态环境研究中心 ,北京 100085)

摘要 :臭氧(O₃)是夏秋季北京城市大气光化学污染物中的首要气态污染物 ,气象因素是影响其浓度水平和变化规律的主要因素之一 . 2008 年 7 月 ~ 2008 年 9 月 ,在北京市 4 个站点进行了臭氧、氮氧化物(NO_x)和一氧化碳(CO)浓度的同步连续观测 ,并对同期天气型进行了分类比对分析 . 结果显示 ,观测期间 ,北京地区处于低压前部(主要是蒙古气旋)和高压前部的比例分别为 42% 和 20% ,分别是造成臭氧浓度高值和低值的主要背景场 . 处于低压前部控制时 ,高温、低湿以及局地环流形成的山谷风造成区域臭氧累积 ,小时最大值(体积分数)高达 102. 2 × 10⁻⁹ ,并随气压的升高以 3. 4 × 10⁻⁹ Pa⁻¹ 的速率降低 ,山谷风风向的转变决定了臭氧浓度最大值出现时间 ,峰值出现在 14 00 左右 ;处于高压前部控制时 ,低温、高湿以及系统性北风造成区域臭氧低值 ,小时最大值(体积分数)仅为 49. 3 × 10⁻⁹ ,系统性北风将臭氧峰值出现时刻推后到 16 00 左右 . 北京地区臭氧光化学污染呈现出区域一致性 ,并与天气型有较好相关 ,关注天气型结构和演变对预报大气光化学污染具有重要意义 .

关键词 :臭氧 ;天气型 ;山谷风 ;光化学污染 ;北京

中图分类号 :X511 文献标识码 :A 文章编号 :0250-3301(2010)03-0573-06

Effects of Synoptic Type on Surface Ozone Pollution in Beijing

TANG Gui-qian¹, LI Xin², WANG Xiao-ke³, XIN Jin-yuan¹, HU Bo¹, WANG Li-li¹, REN Yu-fen³, WANG Yue-si¹

(1. State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry ,Institute of Atmospheric Physics ,Chinese Academy of Sciences , Beijing 100029 , China ; 2. Beijing Municipal Environmental Protection Bureau , Beijing 100044 , China ; 3. Research Center for Eco-Environmental Sciences , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100085 , China)

Abstract :Ozone (O₃) , influenced by meteorological factors , is a primary gaseous photochemical pollutant during summer to fall in Beijing 's urban ambient . Continuous monitoring during July to September in 2008 was carried out at four sites in Beijing . Analyzed with synoptic type , the results show that the ratios of pre-low cyclonic (mainly Mongolia cyclone) and pre-high anticyclonic to total weather conditions are about 42% and 20% , illustrating the high-and low-ozone episodes , respectively . At the pre-low cyclonic conditions , high temperature , low humidity , mountain and valley winds caused by local circulation induce average hourly maximum ozone concentration (volume fraction) up to 102. 2 × 10⁻⁹ , negative correlated with atmospheric pressure with a slope of - 3. 4 × 10⁻⁹ Pa⁻¹ . The time of mountain wind changed to valley wind dominates the diurnal time of maximum ozone , generally around 14 00 . At the pre-high anticyclonic conditions , low temperature , high humidity and systematic north wind induce average hourly maximum ozone concentration (volume fraction) only 49. 3 × 10⁻⁹ , the diurnal time of maximum ozone is deferred by continuous north wind till about 16 00 . The consistency of photochemical pollution in Beijing region shows that good correlation exists between synoptic type and ozone concentration . Therefore , getting an eye on the structure and evolution of synoptic type is of great significances for forecasting the photochemical pollution .

Key words :ozone ; synoptic type ; mountain and valley winds ; photochemical pollution ; Beijing

城市臭氧带来温室效应的同时还影响着全球的臭氧浓度变化^[1,2]. 另外 ,臭氧是光化学烟雾的主要组成部分 ,会严重影响局地的空气质量^[3] ,同时容易引起人和动物的呼吸系统疾病 ,损害植物的生长^[4,5].

臭氧是由 NO_x 和 VOC_s 等一系列前体物在光照条件下生成的 ,气象因子(紫外辐射、温度、大气稳定度、混合层高度和长距离输送)和排放源共同影响着大气中臭氧浓度的时空分布^[6-8]. 目前国外已有一些针对天气型对大气光化学污染影响的研究 ,

着重分析了大气光化学污染时段天气型的变化^[8-13]. 为了更深入地进行研究 ,又将天气型进行了分类 ,得出了不同天气型下光化学污染的状况^[14-16]. 国内针对天气型与大气污染关系的研究主要集中在颗粒物方面 . 任振海等^[17]提出 ,大范围均

收稿日期 2009-04-09 ;修订日期 2009-06-04
基金项目 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB407303) ;
中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-06-01) ;
国家自然科学基金项目(40675073)
作者简介 唐贵谦(1982 ~) ,男 ,博士研究生 ,主要研究方向是大气光化学污染的观测和数值模拟 ,E-mail :tgq@ dq. cern. ac. cn
* 通讯联系人 ,E-mail :wys@mail. iap. ac. cn

压场的持续演变是形成区域重污染的重要气象条件. 苏福庆等^[18]指出, 河套倒槽、东北低压槽、东北地形槽和华北地形槽等是造成北京地区 PM_{10} 重污染的重要天气系统. 陈朝晖等^[19]对北京地区 PM_{10} 质量浓度与天气型的关系进行了研究, 说明了 PM_{10} 质量浓度在上升、达到峰值和下降阶段对应的天气形势分别为大陆高压均压场、相继出现的低压均压场和高气压梯度场. 王喜全等^[20]通过海平面气压场的主观分析, 确定了 2 类北京 PM_{10} 重污染的典型天气形势, 即高压南下东移阻滞型和北上台风(或热带低压)相关联的弱高压控制型. 国内针对气象因子和大气光化学污染的关系进行了详尽的研究, 说明了高温、低湿和高风速(临界风速下)容易造成臭氧的浓度高值^[21-24], 但目前仍鲜见天气型与大气光化学污染关系方面的研究.

本研究针对奥运时段进行了臭氧及其前体物浓度的观测, 结合气象资料说明了不同天气型对北京区域光化学污染的影响, 并分析了对应高低臭氧浓度的 2 种极端天气型下风矢量的变化规律及其对光化学污染的影响, 以期通过天气型的变化对大气光化学污染预警预报提供诊断方法.

1 材料与方法

1.1 监测站点和监测数据

大气污染物观测数据来源于 2008 年夏秋季(7 月 18 日~9 月 14 日)北京地区 325 m 铁塔(BJT)、阳坊(YF)、奥运村(AYC)和龙潭湖(LTH)4 个监测站点的臭氧及其前体物 NO_x 和 CO 实时监测, 监测站点由北京西山逐渐向东南部延伸, 见图 1. 气象数据由设在北京 325 m 铁塔 8 m 的自动气象站提供; 海平面气压场数据由气象信息综合分析处理系统(MICAPS)提供.

1.2 实验仪器

4 个站点试验仪器都是采用美国热电环境设备公司(TE)设备. O_3 浓度观测采用 49C 紫外光度法 O_3 分析仪. 其原理为 O_3 分子吸收波长 254 nm 的紫外光, 该波段紫外光被吸收的程度直接与 O_3 浓度相关, 通过检测样品气通过时紫外光被吸收的程度来计算出 O_3 浓度. 分析仪最低检测限 2×10^{-9} (体积分数), 精度 1×10^{-9} (体积分数); 零漂 $\pm 0.4\%$ (24 h); 跨漂 $\pm 1\%$ (24 h), $\pm 2\%$ (7 d). NO_x 浓度观测采用 42CTL 高精度化学发光 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪, 其原理基于 NO 与 O_3 的化学发光反应产生激发态的 NO_2 分子, 当激发态的 NO_2 分子返回基态时发出

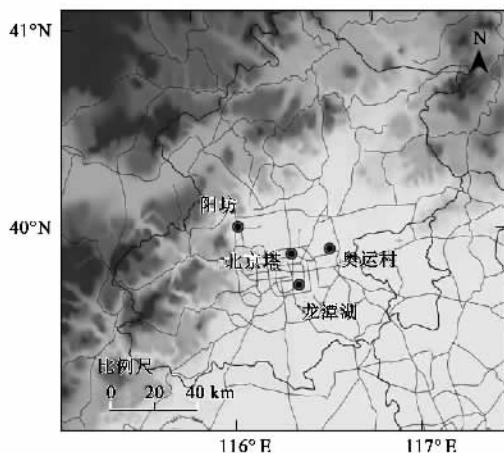


图 1 北京大气环境监测网站点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring network for atmospheric environment research in Beijing

一定波长的光, 所发出光的强度与 NO 的浓度呈线性正相关. 检测 NO_2 时先将 NO_2 通过钼转换器转换成 NO, 然后再通过化学发光反应进行定量分析. 42CTL 型 $\text{NO}-\text{NO}_2-\text{NO}_x$ 分析仪最低检测限 0.05×10^{-9} (体积分数); 零漂 $< 0.025 \times 10^{-9}$ (24 h); 跨漂 $\pm 1\%$ (24 h, 满度值). CO 浓度观测采用 48i 气体滤波相关红外吸收法 CO 分析仪. 它的工作原理基于 CO 可以吸收 4.6 微米的红外线, 通过检测样品气通过时红外线被吸收的程度来计算出 CO 浓度. 分析仪最低检测限 0.04×10^{-6} (体积分数); 精度 0.1×10^{-6} (体积分数); 零漂 $< 0.1 \times 10^{-6}$ (24 h); 跨漂 $\pm 1\%$ (24 h, 满度值).

4 个站点的标定仪器也都是采用美国热电环境设备公司(TE)设备. NO_x 和 CO 采用的标定仪器为 TEI 111 零气发生器和 TEI 146C 稀释器; O_3 采用的标定仪器为 TEI 49CPS.

2 结果与讨论

2.1 区域光化学污染

臭氧是由 NO_x 、 VOC_s 和 CO 等前体物反应生成的二次污染物, 臭氧的生成受排放源排放的前体物和气象因素共同控制. 由于缺乏各个站点的 VOC_s 观测数据, 用与 VOC_s 浓度相关性较高的 CO 代替 VOC_s 进行讨论^[25]. 图 2 为 2008-07-18~2008-09-14 臭氧 8h 滑动平均值最大值、臭氧小时最大值、CO 和 NO_x 的日均值图. 北京地区 4 个站点臭氧小时最大值都反映出很强的一致性(表 1), 4 个站点的臭氧 8h 滑动平均值最大值和臭氧小时最大值变化趋势

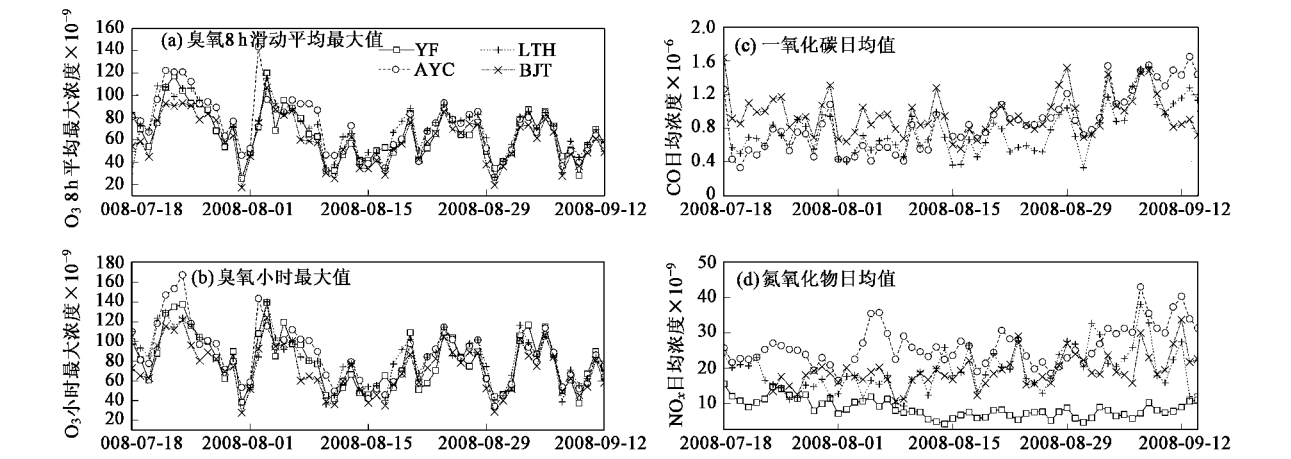


图2 2008-07-18 ~2008-09-14 污染物浓度
Fig.2 Concentrations of maximum 8h average O₃ , hourly maximum O₃ , daily average CO
and daily average NO_x during 18 July to 14 September in 2008

大体相同[图2(a)、2(b)].图2(c)、2(d)显示出各个站点臭氧的前体物NO_x和CO浓度差异较大,体现出了不同站点的特征.各站点之间前体物浓度的非均一性与臭氧最大浓度的强相关性(表1)形成了极大的反差.因此,在现有污染源排放情景下,天气型变化是造成区域光化学污染事件的主要原因.

表1 2008-07-18 ~2008-09-14 各站点每天小时最大臭氧浓度相关系数

Table 1 Summary of inter-site correlation of hourly maximum ozone concentration observed during 18 July to 14 September in 2008					
地点	项目	阳坊	奥运村	龙潭湖	北京塔
阳坊	R^2	1	0.80	0.73	0.82
	斜率	1	0.95	0.77	0.79
奥运村	R^2		1	0.71	0.81
	斜率		1	0.71	0.74
龙潭湖	R^2			1	0.86
	斜率			1	0.90
北京塔	R^2				1
	斜率				1

2.2 天气型对区域大气光化学污染的影响

2.2.1 天气型与区域光化学污染的关系

北京市臭氧浓度的统计日变化研究显示,北京地区臭氧浓度在14:00或者15:00出现最大值^[26~28].在2008-07-18~2008-09-14的观测期内,基于59d的天气图分析,将北京地区每天14:00(臭氧浓度出现最大值的时刻)的海平面形势场(简称海平面天气型)分为4种.表2的统计数据显示,北京地区处于低压前部、高压前部和均压场分别占监测总天数的42%、20%和22%;与3种天气型对应的最大温度分别为32.9、28.5和31.3℃;平均温度

露点差分别为9.5、7.4和9.2℃;每日最大臭氧浓度的平均值(体积分数)分别为 102.2×10^{-9} 、 49.3×10^{-9} 和 70.5×10^{-9} .

3种天气型分别代表了3种不同的大气光化学污染状态.北京市处于低压前部时,本地排放的污染物不容易扩散,高温低湿的气象条件有利于本地臭氧的生成;同时,较强的复合气流易将河北、天津乃至山东、山西等地的污染物传输到北京,加之西部和北部山区的阻挡极易造成污染物的积累.因此,北京市处于低压前部时,本地生成和区域输送的共同影响产生了臭氧浓度的高值.北京市处于高压前部时,低温高湿的气象条件不利于本地臭氧的生成;同时,气压梯度明显增强,系统性的北风将北部的清洁空气带入到北京,对局地的污染物有强烈的清除作用.因此,本地较低的生成量和污染物的快速清除使得臭氧浓度较低.北京市处于均压场控制时,温度和湿度介于上面2种天气型之间,区域气压梯度不明显,既不利于传输也不利于扩散.因此,处于均压场时的臭氧浓度也介于低压前部和高压前部2种天气型之间.

图3是北京地区处于低压前部时气压与臭氧小时最大浓度的相关关系.从中可以看出,北京地区处于低压前部时,臭氧小时最大浓度和气压的负相关性较好,大气压每增加1Pa,臭氧浓度(体积分数)降低 3.4×10^{-9} .这说明了北京地区受越强的低压影响,越有利于臭氧的生成和传输,大气光化学污染越严重.因此,可以根据北京处于低压前部时的气压值判断当天的光化学污染状况,为空气质量预警预报提供参考.

表 2 2008-07-18 ~ 2008-09-14 海平面气压形势场分类统计

Table 2 Statistical results of atmospheric pressure of sea level during 18 July to 14 September in 2008

气压形势场	天数/d	百分比/%	最大温度/℃	平均温度露点差/℃	O ₃ 体积分数 × 10 ⁻⁹
低压前部	25	42	32.9	9.5	102.2
高压前部	12	20	28.5	7.4	49.3
均压场	13	22	31.3	9.2	70.5
其他天气型	9	15	31	7.9	71.8

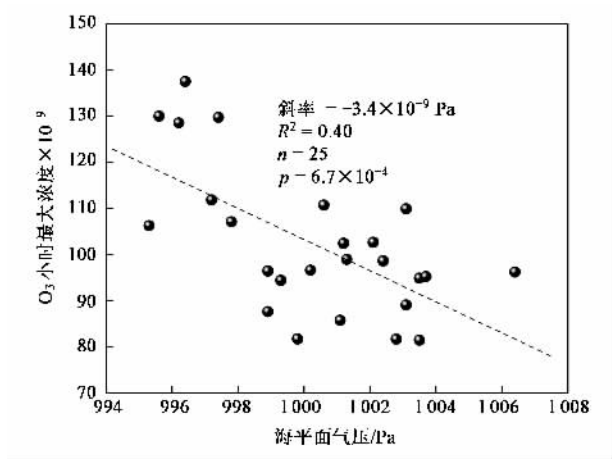


图 3 北京地区处于低压前部时气压与臭氧小时最大浓度的相关关系

Fig. 3 Correlation between atmospheric pressure and hourly maximum ozone with pre-low cyclonic conditions

2.2.2 2 种极端天气型下地面风矢量对区域大气光化学污染的影响

为了解 2 种极端天气型下的地面风矢量与区域光化学污染的关系,按照天气型分析了北京处于低压前部和高压前部时的地面风矢量变化规律. 图 4 为北京地区处于低压前部和高压前部 2 种天气型的风玫瑰和风矢量统计日变化图. 从图 4(a)中可以看出,北京地区处于低压前部时,北京地区低层大气的流动受地形影响较大,山谷风明显,表现为中午前后的“北转南”和凌晨前后的“南转北”. 在山谷风的影响下,上午山风将早晨排放的高浓度污染物输送到北京南部,污染物在传输过程中逐渐老化使得 VOC_s/NO_x 的比值更容易生成臭氧,中午谷风将老化的气团以及南部新排放的污染物又传输回北京,新污染物的加入以及气团的二次老化是造成此种天气条件下北京地区臭氧浓度高值的主要原因. 图 4(b)显示出,北京地区处于高压前部时,北京地区低层大气的流动受地形影响较小,山谷风不明显,主要表现为白天的北风和夜间的西风. 在这种较强的系统性风向影响下,北京地区新排放出来的污染物很

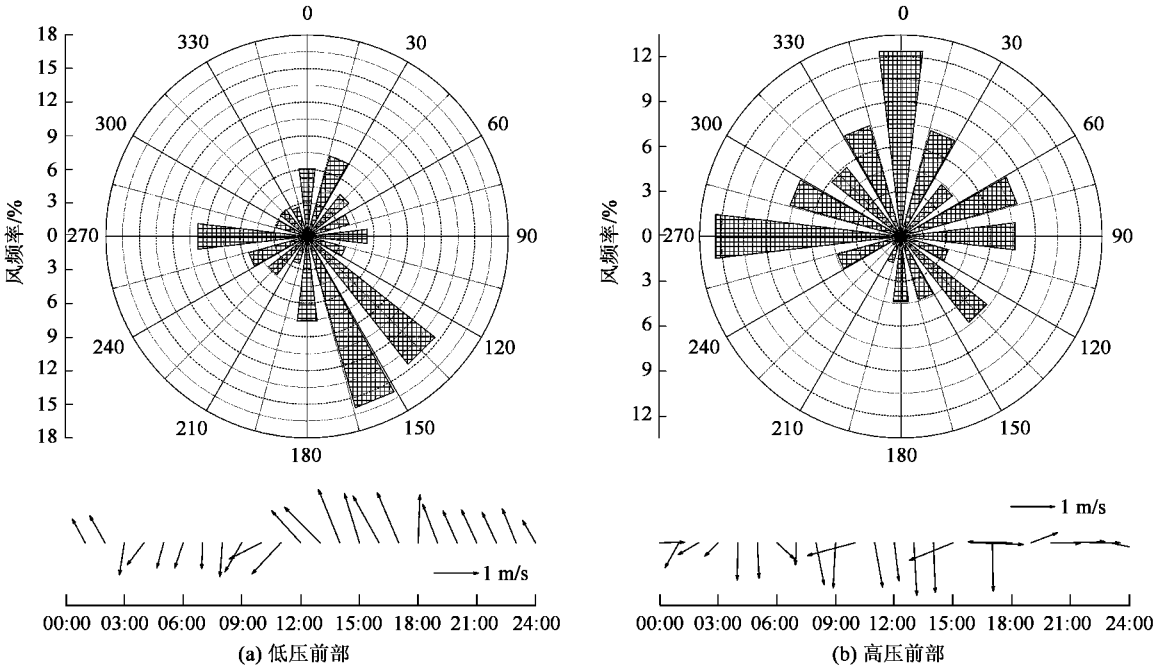


图 4 2 种天气型的风玫瑰图和风矢量统计日变化

Fig. 4 Wind direction rose and diurnal variation of vector winds for pre-low cyclonic and pre-high anticyclonic conditions

快就被稀释、扩散传输到下风向区域,没有足够的前体物参与反应,臭氧浓度处于低值。

2.2.3 天气型与臭氧日变化峰值出现时间的关系

为研究天气型与臭氧日变化峰值出现时间的关系,对观测时段所有数据进行了分类挑选,并选择出2个极端事件时段:第一个时段为2008-07-21~2008-07-25,对应连续多日的臭氧高浓度污染时段;第二个是2008-08-10~2008-08-15,对应臭氧的低浓度时段。

2008-07-21~2008-07-25 海平面气压场显示出北京地区始终处于蒙古气旋前部[以7月25日14 00为例,见图5(a)]。与此对应,北京地区出现了连续5d的臭氧浓度高值,5d内5个站点平均小时最大浓度值都在 110.0×10^{-9} 以上,其中7月24日出现最大浓度值(体积分数) 137.5×10^{-9} [图6

(a)]。在5d的观测时段内,北京的局地环流受山谷风影响,山谷风的变化主导了臭氧浓度的日变化,臭氧浓度峰值出现的时间与北风转南风的时间相吻合,也就是说,北京地区出现偏南风(谷风)时,臭氧浓度出现峰值[如图6(a)中标记所示]。因此,北京地区在低压前部时,臭氧浓度峰值出现时间受山风向谷风风向转变的时间所控制,臭氧峰值出现时间在14 00左右[图6(b)]。

2008-08-10~2008-08-15海平面气压场显示出北京地区处于高压前部[以2008年8月10日14 00为例,见图5(b)]或者均压场下。与此天气型对应,北京地区出现了连续5d的臭氧浓度低值,10日出现最低浓度(体积分数) 46.5×10^{-9} ,13日均压场控制时出现最高浓度(体积分数) 75.0×10^{-9} 。10、11和14日北京地区处于高压前部,此时没有明

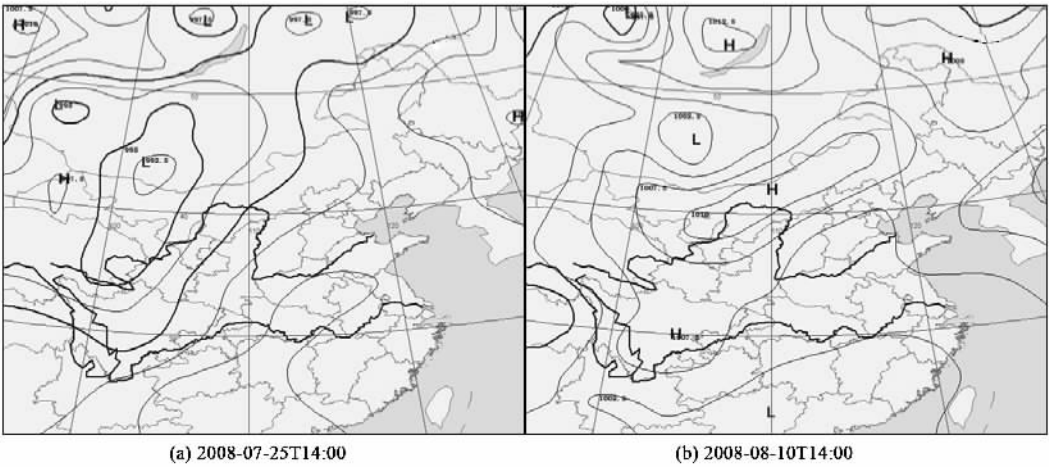


图5 海平面气压场
Fig. 5 Atmospheric pressure of sea level at 14 00 25 July 2008 and 14 00 10 August 2008

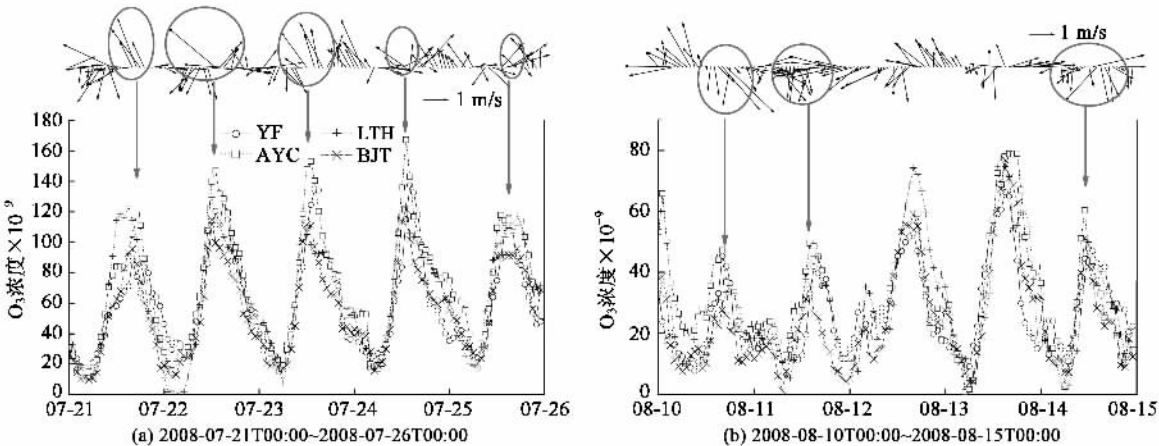


图6 臭氧浓度和风矢量图(标记为臭氧浓度最大值出现时对应的风矢量)

Fig. 6 Time-series variations of ozone and vector winds during 21 July 0 : 00 to 26 July 0 00 and 10 August 0 00 to 15 August 0 00 in 2008 (Marks show vector winds at the time of maximum ozone)

显的山谷风现象 ,较大的气压梯度使得大尺度系统引起的风向以北风居多 . 在北风的控制下 ,3 d 的臭氧浓度最大值较低 ,最大值出现时间都在午后16 :00 [如图 6(b)标记所示]. 由此看来 ,北京地区处于高压前部时 ,系统性北风将臭氧峰值出现时间推后到了 16 :00.

3 结 论

(1)北京市处于低压前部是造成臭氧浓度高值的主要背景场 ,局地环流所造成的山谷风支配着区域光化学污染时空分布 ,臭氧峰值出现时间由山谷风风向转变的时刻所决定 .

(2)北京处于高压前部是造成臭氧浓度低值的主要背景场 ,且系统性北风将臭氧峰值出现时间推后 .

(3)在现有污染源排放情景下 ,天气型变化是造成区域光化学污染事件的主要原因 ,关注天气型的结构和演变对预报大气光化学污染过程有重要意义 .

致谢 :感谢 CERN 城市生态系统观测站、中国科学院遥感所奥运村站和中国人民解放军防化指挥工程学院阳坊站对观测实验的大力支持 ;感谢中国气象局国家气象信息中心提供的数据支持 .

参考文献 :

[1] Houghton J T , Ding Y , Griggs D J , *et al.* Intergovernmental panel on Climate Change (IPCC) , Climate Change 2001 : The science of Climate Change [M]. New York : Cambridge Univ Press , 2001 .

[2] Akimoto H . Global air quality and pollution [J]. Science , 2003 , **302**(5651) : 1716-1719 .

[3] Finlayson-pitts B , Pitts J N . Chemistry of the upper and lower troposphere , theory , experiment , and applications [M]. San Diego : Academic Press , 2000 .

[4] National Research Council (NRC) . Committee on tropospheric ozone formation and measurement , Rethinking the ozone problem in urban and regional air pollution [M]. Washington DC : National Academy Press , 1991 .

[5] POPG . Ozone in the United Kingdom . Fourth Report of the UK photochemical oxidants review group [R]. London : Department of the Environment , Transport and the Regions , 1997 .

[6] Sillman S . The relation between ozone , NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments [J]. Atmospheric Environment , 1998 , **33** : 1821-1845 .

[7] Jenkin M E , Clemitshaw K C . Ozone and other secondary photochemical pollutants : chemical processes governing their formation in the planetary boundary layer [J]. Atmospheric Environment , 1999 , **34** : 2499-2527 .

[8] Solomon P , Cowling E , Hidy G , *et al.* Comparison of scientific findings from major ozone field studies in North America and Europe [J]. Atmospheric Environment , 2000 , **34**(12-14) : 1885-1920 .

[9] Mueller S F , Song A , Norris W B , *et al.* Modeling pollutant transport during high-ozone episodes in the southern Appalachian mountains [J]. Journal of Applied Meteorology , 1996 , **35**(11) : 2105-2120 .

[10] Seaman N L , Michelson S A . Mesoscale meteorological structure of a high-ozone episode during the 1995 NARSTO-Northeast study [J]. Journal of Applied Meteorology , 2000 , **39**(3) : 384-398 .

[11] Wang T , Kwok J Y H . Measurement and analysis of a multiday photochemical smog episode in the Pearl River delta of China [J]. Journal of Applied Meteorology , 2003 , **42**(3) : 404-416 .

[12] Wang Z F , Sha W M , Ueda H . Numerical modeling of pollutant transport and chemistry during a high-ozone event in northern Taiwan [J]. Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology , 2000 , **52**(5) : 1189-1205 .

[13] Lagouvardos K , Kallos G , Kotroni V , *et al.* An analysis of the meteorological and air quality conditions during an extreme ozone episode over the northeastern USA [J]. International Journal of Environment and Pollution , 2000 , **14**(1-6) : 581-587 .

[14] Schichtel B A , Husar R B . Eastern North American transport climatology during high-and low-ozone days [J]. Atmospheric Environment , 2001 , **35**(6) : 1029-1038 .

[15] Comrie A C , Yarnal B . Relationships between Synoptic-Scale Atmospheric Circulation and Ozone Concentrations in Metropolitan Pittsburgh , Pennsylvania [J]. Atmospheric Environment , Part B-Urban Atmosphere , 1992 , **26**(3) : 301-312 .

[16] Dayan U , Levy I . Relationship between synoptic-scale atmospheric circulation and ozone concentrations over Israel [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres , 2002 , **107**(D24) , 4813 , doi : 10. 1029/2002JD002147 .

[17] 任振海 , 苏福庆 , 高庆先 . 边界层内大气排放物形成重污染背景解析 [J]. 大气科学 , 2005 , **29**(1) : 57-63 .

[18] 苏福庆 , 杨明珍 , 钟继红 , 等 . 华北地区天气型对区域大气污染的影响 [J]. 环境科学研究 , 2004 , **17**(3) : 16-20 .

[19] 陈朝晖 , 程水源 , 苏福庆 , 等 . 北京地区一次重污染过程的大尺度天气型分析 [J]. 环境科学研究 , 2007 , **20**(2) : 99-105 .

[20] 王喜全 , 齐彦斌 , 王自发 , 等 . 造成北京 PM₁₀ 重污染的两类典型天气形势 [J]. 气候与环境研究 , 2007 , **12**(1) : 81-86 .

[21] 周艳明 , 刘厚凤 , 吴保庆 . 边界层臭氧浓度变化特征及其相关因子分析 [J]. 气象与环境学报 , 2008 , **24**(1) : 63-66 .

[22] 叶芳 , 安俊琳 , 王跃思 , 等 . 北京近地层 O₃、NO_x、CO 及相关气象因子的分析 [J]. 生态环境 , 2008 , **17**(4) : 1425-1432 .

[23] 段欲晓 , 徐晓峰 , 张小玲 . 北京地面 O₃ 污染特征及气象条件分析 [J]. 气象科技 , 2001 , **29**(4) : 15-18 .

[24] 任丽红 , 胡非 , 周德刚 , 等 . 北京夏季近地层臭氧垂直变化及其环境效应的观测研究 [J]. 中国科学院研究生院学报 , 2005 , **22**(4) : 429-435 .

[25] Stephens S , Madronich S , Wu F , *et al.* Weekly patterns of Mexico City 's surface concentrations of CO , NO_x , PM₁₀ and O₃ during 1986-2007 [J]. Atmos Chem Phys Discuss , 2008 , **8** : 8357-8384 .

[26] 安俊琳 , 王跃思 , 李昕 , 等 . 北京大气 O₃ 与 NO_x 的变化特征 [J]. 生态环境 , 2008 , **17**(4) : 1420-1424 .

[27] 胡非 , 陈辉 , 石立庆 , 等 . 北京气象塔夏季大气臭氧观测研究 [J]. 中国环境科学 , 2003 , **23**(4) : 353-357 .

[28] 吴瑞霞 , 浦一芬 , 张美根 , 等 . 北京市夏季臭氧变化特征的观测研究 [J]. 南京气象学院学报 , 2005 , **28**(5) : 690-694 .