

田伟, 唐贵谦, 王莉莉, 等. 2013. 北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (5): 595–606, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11199. Tian Wei, Tang Guiqian, Wang Lili, et al. 2013. Multi-site study of a typical autumn air pollution event in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (5): 595–606.

北京秋季一次典型大气污染过程多站点分析

田伟^{1,2} 唐贵谦¹ 王莉莉¹ 张红星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 中国人民解放军防化指挥工程学院, 北京 102205

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

摘要 多站点多种大气污染物的同步在线观测对深入剖析大气污染的成因和演变机制有重要意义。以龙潭湖、北京325 m塔、双清路和阳坊4监测站点实时NO_x、SO₂、O₃、PM2.5和PM10浓度观测数据为基础,介绍了北京地区2010年10月3~11日发生的一次典型污染过程。不同污染物在污染过程中变化特征不一致,表现为NO_x、SO₂、O₃浓度有明显日变化,而PM浓度升高后一直维持在高值,日变化幅度很小。通过分析不同站点、相同污染物之间的相关性和变异系数发现,4站点间一次污染物NO和SO₂空间浓度差别大,变异系数分别为77%和70%,相关系数低于0.44;而二次污染物NO₂、PM2.5、O₃空间浓度差别较小,变异系数分别为34%、36%和29%,相关系数均超过0.54。结合中尺度气象模式研究发现,该污染过程中,850 hPa高空持续的西南暖平流造成华北地区显著平流逆温,与近地层辐射逆温共同作用,使北京地区混合层高度维持在1200 m以下。低混合层高度和低风速限制了大气垂直和水平扩散,造成北京地区近地层污染物累积,形成重度污染。

关键词 数值模式 MM5模式 气象条件 天气型

文章编号 1006-9585 (2013) 05-0595-12

中图分类号 P402

文献标识号 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11199

Multi-Site Study of a Typical Autumn Air Pollution Event in Beijing

TIAN Wei^{1,2}, TANG Guiqian¹, WANG Lili¹, ZHANG Hongxing³, and WANG Yuesi¹

1 State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029

2 Institute of Chemical Defense of PLA, Beijing 102205

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academic of Sciences, Beijing 100085

Abstract Synchronous online observations of multiple sites and species are significant for in-depth analysis of the causes and evolution mechanism of air pollution. In this study, the authors analyzed a typical air pollution event that occurred during 3–11 October 2010, on the basis of NO_x, SO₂, O₃, PM2.5, and PM10 levels recorded at four monitoring sites in Beijing. Variations of the pollutants were determined to be inconsistent, with concentrations of NO_x, SO₂, and O₃ appearing as obvious diurnal variations and PM showing slight daily changes while maintaining high levels of concentration. Calculation of the correlation coefficient and coefficient of variation of concentration for these pollutants revealed the following results: The coefficients of variation for the primary pollutants of NO and SO₂, with correlation coefficients of less than 0.44, were 77% and 70%, respectively, exhibiting distinct spatial distribution. Those for the secondary pollutants NO₂, PM2.5, and O₃, with correlation coefficients above 0.54, were 34%, 36%, and 29%,

收稿日期 2011-12-18收到, 2013-03-05收到修定稿

资助项目 北京市科技计划公益应用项目 D09040903670902, 中国科学院战略性先导科技专项XDA05100100

作者简介 田伟, 男, 1982年出生, 硕士, 主要研究方向为大气物理与大气环境。E-mail: tianwei@dq.cern.ac.cn

通讯作者 王跃思, E-mail: wys@mail.iap.ac.cn

respectively, exhibiting consistent spatial distribution. These findings were applied to the Fifth-Generation Penn State/National Center for Atmospheric Research (NCAR) Mesoscale Model (MM5), which revealed that advection inversions caused by continued southeast warm air flows at 825 hPa and radiation inversions near the ground induced the mixed layer at a height lower than 1200 m, which respectively hindered the atmospheric vertical and horizontal diffusions to result in the synchronous accumulation of air pollutants.

Keywords Simulation, MM5, Weather condition, Weather pattern

1 引言

大气复合污染是指两种或者两种以上的大气污染物同时对大气产生污染的现象。随着我国经济高速发展和城市化进程加快,环境污染问题日益加剧,多种污染物均以高浓度同时存在,各种污染物相互耦合和叠加,导致光化学烟雾、大气灰霾、酸沉降的频繁发生,构成了复合型大气污染体系,这种复合污染已成为快速发展的城市大气污染的共同特征(唐孝炎等,2006),对降低城市空气质量、危害人类健康、导致气候改变有深远影响(Parrish and Zhu, 2009)。

北京城市化和工业化迅猛发展,环境问题日趋严重,近年来研究人员开展了很多研究,诸如北京市污染物时空分布和变化规律(薛敏等,2006;马志强等,2007;安俊琳等,2008;赵亚南等,2008;吉东升等,2009;谢付莹等,2010)、本地源排放贡献(钟流举等,2007)、污染成因分析(孟燕军和程丛林,2002;任阵海等,2005;孟伟等,2006;杨素英等,2010),分别从实验、理论、数值模拟作了深入的分析,形成了很多研究大气污染的方法和思路,取得了一定的成果。城市大气污染物浓度是由排放源、区域内输送和大气扩散能力共同决定的(Giorgi and Meleux, 2007),但对于短时间内,污染源变化不大的情况下,后两者起主要作用(Ziomas et al., 1995)。北京地区的空气质量主要由大气中PM、O₃、NO_x、SO₂、CO等污染物浓度高低决定,而城市中污染物的浓度除了跟污染源的分布和排放源的大小有关外,还与气象条件密不可分。研究表明,天气形势及气象要素与污染物的排放、传输、累积、扩散、(光)化学反应以及干湿沉降等方面有密切关系(Comrie, 1996)。以上这些研究多数只是从单方面入手作了分析研究,或者通过单个站点污染物数据进行分析,或者通过单一大气污染物展开阐述,结合北京地理环境、大气污染物的时空分布、污染时段气象条件,并利用野外

实验、统计分析、数值模拟多种手段分析北京大气污染的相对较少。

本文结合北京地区的西、北和东北环山的特殊地形地理条件,利用多种观测仪器在北京地区4个站点对影响空气质量的多种污染物进行了同步观测,并比较4个站点多种污染物浓度的时空分布特点,运用统计理论计算了污染物浓度的相关系数和变异系数,同时对比同期地面气象实况观测资料的变化特点,确定气象条件是本次污染过程形成的主控因素。结合中尺度气象模式MM5(Grell et al., 1994),分析了天气型、混合层结构、气象要素等对该污染过程的作用。

2 方法

2.1 站点与仪器

数据采集点龙潭湖站位于东南二环以里,东边和南边都距二环路约500 m;中国科学院大气物理研究所325 m铁塔站位于北京市北三环路与北四环路之间,距三环路约1 km,其东面200 m处为南北走向的京藏高速公路,北边50 m处为东西走向的北土城西路;双清路站位于北四环路和北五环路之间的中国科学院生态环境研究中心内,距北五环路800 m,东边距京藏高速公路900 m,西边距离南北走向的双清路50 m,处于城乡交界处,大气污染物浓度变化受环线机动车辆影响较大;阳坊站位于北京西郊,离山体较近,可较好的代表北京西北地区的大气环境状况。由此可见,4个大气污染物监测站所处地理位置从市区到市郊(如图1所示),排放源较大的差异性为分析一次污染物对二次区域污染的形成提供了便利条件,其中龙潭湖站、325 m塔站、双清路站均有自动气象观测站。

本实验中的大气污染物浓度数据采集的仪器主要是美国热电公司的I系列气体观测仪器和颗粒物监测仪(见表1)。近地面气象资料采集仪器是芬兰Vaisala公司生产的自动观测站Milos520,可观测常规气象要素数据,其技术参数为:温度-40~

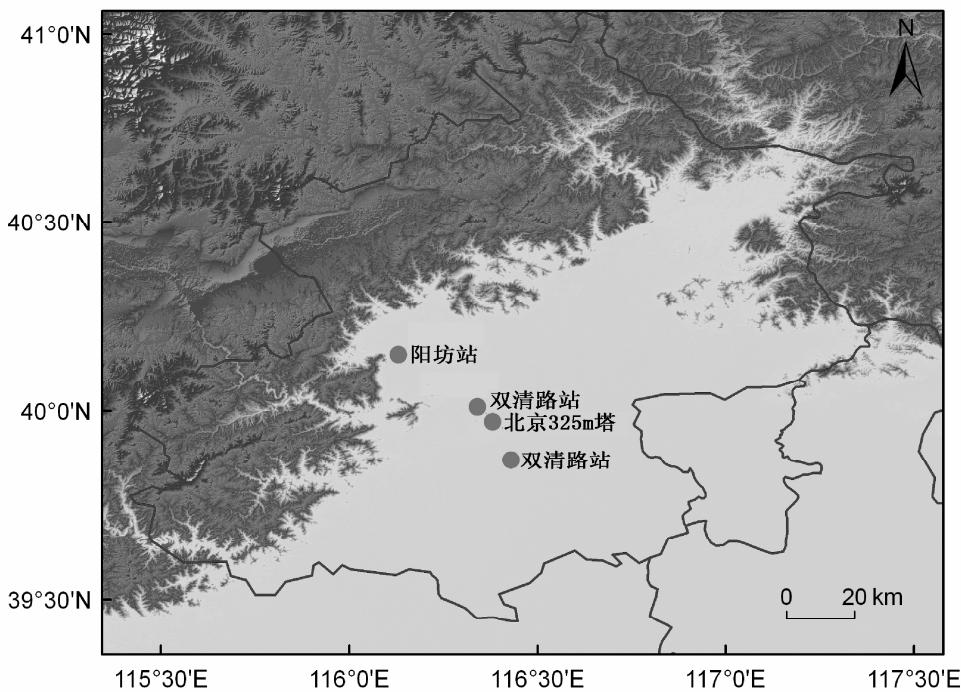


图 1 大气污染物监测站点和气象资料监测站地理位置分布

Fig. 1 Monitoring sites for atmospheric pollutants and meteorological data in Beijing

表 1 环境监测仪器参数

Table 1 Parameters of monitoring instruments

仪器型号	最低检出限	零漂/(24 h) ⁻¹	跨漂	质量分辨率	精度
49i O ₃ 分析仪	2×10^{-9}	0.4%	$\pm 2\%/(7 \text{ d})$	—	$\pm 1 \times 10^{-9}$
42i NO—NO ₂ —NO _x 分析仪	0.05×10^{-9}	0.025×10^{-9}	$\pm 1\%/(24 \text{ h})$	—	$\pm 0.4 \times 10^{-9}$
43i SO ₂ 分析仪	2×10^{-9}	0.025×10^{-9}	$\pm 1\%/(24 \text{ h})$	—	$\pm 1 \times 10^{-9}$
48i CO 分析仪	0.04×10^{-9}	0.1×10^{-6}	$\pm 1\%/(24 \text{ h})$	—	$\pm 1 \times 10^{-6}$
1400a 环境颗粒物监测仪	$0.06 \mu\text{g}/\text{m}^3$	—	—	$0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$	$\pm 1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$

60 °C, 精度 0.2 °C; 湿度量程是 1%~100%, 精度 2%; 风向量程 1°~360°, 精度 5°; 风速量程 0~75 m/s, 精度 0.4 m/s; 气压精度 0.2 hPa。而实验中获取大气边界层高度的观测仪器也是芬兰 Vaisala 公司生产的云高仪 CL31, 其性能参数为: 测量范围 0~7.5 km, 报表分辨率 5 m/10 ft, 报表周期 2~120 s; 工作环境参数: 温度 -40~60 °C, 相对湿度 0~100%, 风速 55 m/s。

2.2 统计方法与 MM5 模式简介

2.2.1 统计方法

为了探讨污染物空间分布和时间变化的关系, 本文运用统计学理论, 计算了污染物浓度的相关系数和变异系数, 以表征各站点污染物之间的相互关系。相关系数 (R) 可以反映两个站点污染物之间的变化规律的一致性 (盛骤等, 2009), 而变异系数 (CV) 则可以反映两个站点污染物浓度之间的变

化差值, 也就是空间变异性 (王文森, 2007)。

2.2.2 模式相关参数设置及数据来源

本文使用的气象模式是由美国宾夕法尼亚大学 (PSU) 和 NCAR 联合开发的中尺度数值预报模式 (MM5)。模拟区域的中心坐标为 (32.0°N, 117.0°E)。模式选用适合中纬度地区的兰伯特投影, 4 层网格嵌套, 第一层网格分辨率是 81 km, 网格数是 65×81 , 主要覆盖了东南亚大部分地区; 第二层网格分辨率是 27 km, 网格数是 79×85 , 覆盖了华北地区以北京为中心的 15 个省的区域; 第三层网格分辨率是 9 km, 网格数是 79×85 , 主要覆盖北京市、天津市、河北省和山东省北部的区域; 第四层网格分辨率是 3 km, 网格数 97×103 , 聚焦在北京地区也包括河北省局部和天津市北部区域。模式顶取在 100 hPa 高度, 垂直方向为 δ 坐标, 并在模拟中采用了不等距的 24 层。MM5 中物理过程/

参数化方案的选择包括, 考虑到凇化过程的 Reisner2 方案、Grell 积云参数化方案、MRF 行星边界层方案、RRTM 大气辐射方案、ACM2 垂直扩散方案等, 气象要素的模拟结果与观测值比对效果较好。MM5 使用的数据资料是 NCEP/NCAR 采用美国全球气候资料同化分析系统进行四维同化分析后获得的全球同化资料, 来源于美国国家气候资料中心 (NCDC, <http://dss.ucar.edu/datasets/ds083.2/> [2011-05-12])。

3 结果与讨论

3.1 污染物浓度变化时间序列

2010 年 10 月 3~11 日北京地区秋季出现一个典型的完整污染过程 (图 2)。为便于描述, 按照变化显著的颗粒物的演变特点为标准, 将整个污染过程分为 4 个阶段, 污染起始: 10 月 3 日; 污染积累: 10 月 4~5 日; 污染加重: 10 月 6~10 日; 污染清除: 10 月 11 日。

在整个污染过程中一次污染物 SO_2 、 NO_x 变化趋势不同, 而且不同站点污染物浓度变化具有很强的不一致性。对于 NO_x , 在污染起始和污染清除浓度值比较低, 没有起伏变化; 污染积累和污染加重

阶段, 浓度值的变化没有明显阶段分界, 日变化明显, 且峰值一般出现在夜间和上午, 这主要与城市早高峰机动车排放量增加和 NO 氧化物参与大气光化学反应减少有关; 谷值出现在下午, 源于高浓度 O_3 导致的气粒转化 (安俊琳等, 2007) 和对流损失; 整个污染过程中龙潭湖站最大值 $355.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、325 m 塔站最大值 $660.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、双清路站的最大值 $513.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 分别出现在 10 日、7 日夜间、6 日夜间, 阳坊站数值整体不高, 10 日出现最大值 $159.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 SO_2 在污染起始和污染清除阶段与 NO_x 相同, 浓度变化保持平稳; 污染积累阶段 SO_2 浓度值逐渐爬升, 日变化不明显; 而在污染加重阶段 3 站 SO_2 浓度起伏较大, 有明显日变化, 峰值一般在午后 12:00 至 13:00 (北京时间, 下同) 之间, 考虑到此时的大气层结状态, 对于非采暖期 SO_2 正午出现的峰值, 主要是由于电厂和工业等高架源排放的 SO_2 随混合层变化上下传输所致 (孙扬等, 2006); 整个污染过程中, 龙潭湖站 SO_2 的浓度值明显高于其他两个站点, 其中阳坊站最低。

与一次污染物不同, 4 站二次污染物 O_3 和 PM 浓度变化体现区域性特征, 污染物浓度变化特征一致。4 站 O_3 的浓度变化与 NO_x 相似, 在污染积累和

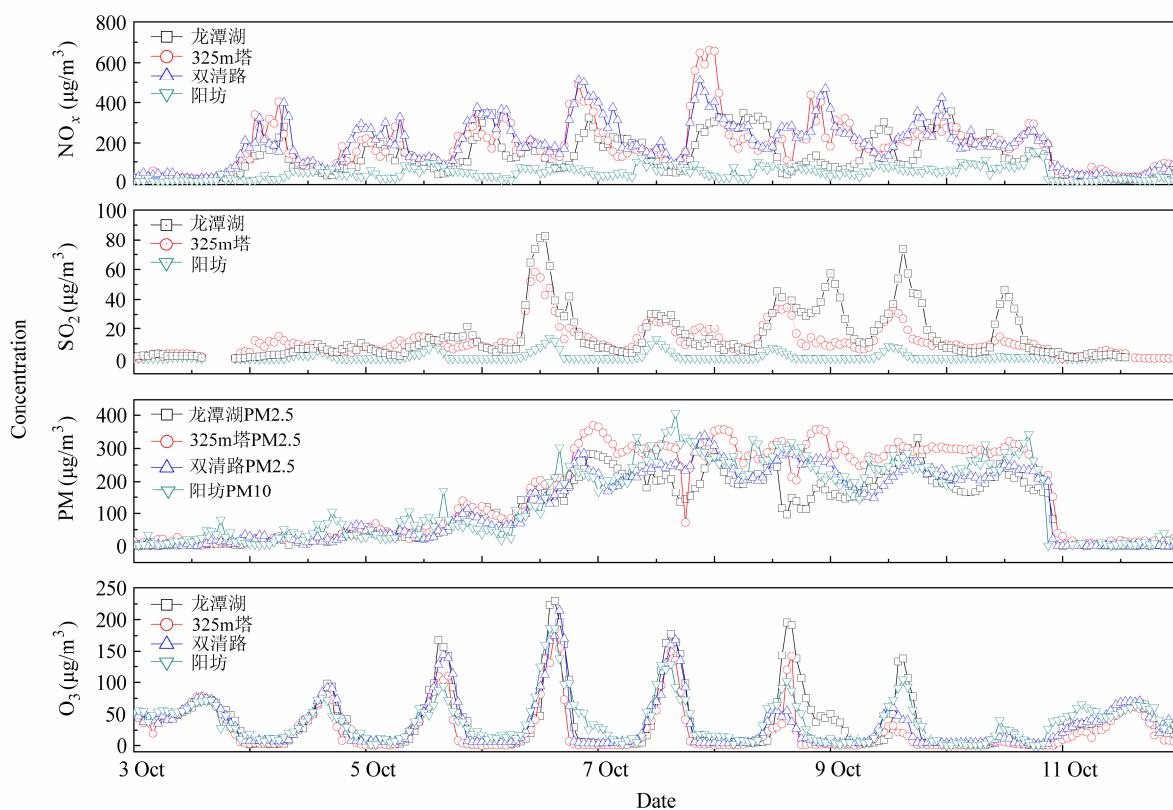


图 2 2010 年 10 月 3~11 日 4 站 NO_x 、 SO_2 、 O_3 和 PM 浓度

Fig. 2 Concentrations of NO_x , SO_2 , O_3 , and PM for four stations during 3–11 Oct 2010

污染加重阶段日变化明显, 峰值一般出现在每天14:00至16:00; 其中龙潭湖站、325 m塔站、双清路站和阳坊站O₃浓度分别有4 d、1 d、3 d和2 d达到171.2 μg/m³以上, 4站最大值229.4 μg/m³、183.8 μg/m³、214.3 μg/m³和187.1 μg/m³均出现在6日; 在污染起始和污染清除阶段4站O₃浓度值相当, 数值在85.6 μg/m³以下。对于PM来说, 进入污染加重阶段以后, 各站点的颗粒物浓度迅速上升, 并维持在高浓度状态, 在污染加重阶段龙潭湖站、325 m塔站和双清路站的PM2.5浓度均值分别为193.34 μg/m³、270.69 μg/m³和212.56 μg/m³, 而阳坊站的PM10浓度的均值为157.23 μg/m³。

3.2 气象要素变化

如图3所示, 污染起始和污染清除阶段风速较大, 10 min平均风速最大值在3日和11日出现, 分别是5.2 m/s和3.3 m/s; 而污染积累和污染加重阶段风速较小, 均低于2.4 m/s; 污染加重阶段静风频繁出现。整个过程中风向表现多为阵性, 污染过程中夜间到早上主要为东北风和偏东风, 而从午间到晚上为偏西风和偏南风。紫外辐射的衰减主要受

到细粒子浓度的影响(胡波等, 2007), 紫外辐射的峰值在进入到污染过程的污染积累阶段以后明显下降(如图3所示)。6~10日紫外辐射日最大值分别是14.49 W m⁻²、8.14 W m⁻²、6.52 W m⁻²、6.22 W m⁻²、2.88 W m⁻², 而污染起始和去处阶段分别是24.35 W m⁻²和22.80 W m⁻², 由此可知污染加重阶段大气气溶胶中细粒子的浓度维持在较高水平。能见度在污染过程的污染起始和污染清除阶段维持在30 km; 污染积累阶段后能见度明显下降, 5日在15 km左右; 在污染加重阶段大部分时间能见度数值都在3 km以下, 10日夜间甚至低于1 km, 这说明在污染加重阶段大气能见度不佳。温度和湿度均有明显的日变化规律; 在污染积累和污染加重阶段, 整体上温度有下降趋势, 而湿度则表现为上升的趋势。

除了气温、湿度、风场、气压常规气象因子之外, 边界层高度也是影响大气污染物浓度的重要因子。由于边界层高度观测数据较少, 本文利用MM5气象模式模拟了污染过程4站每天的边界层的最大值PBLH_{max}(见图3)。如图3所示, 4站PBLH_{max}

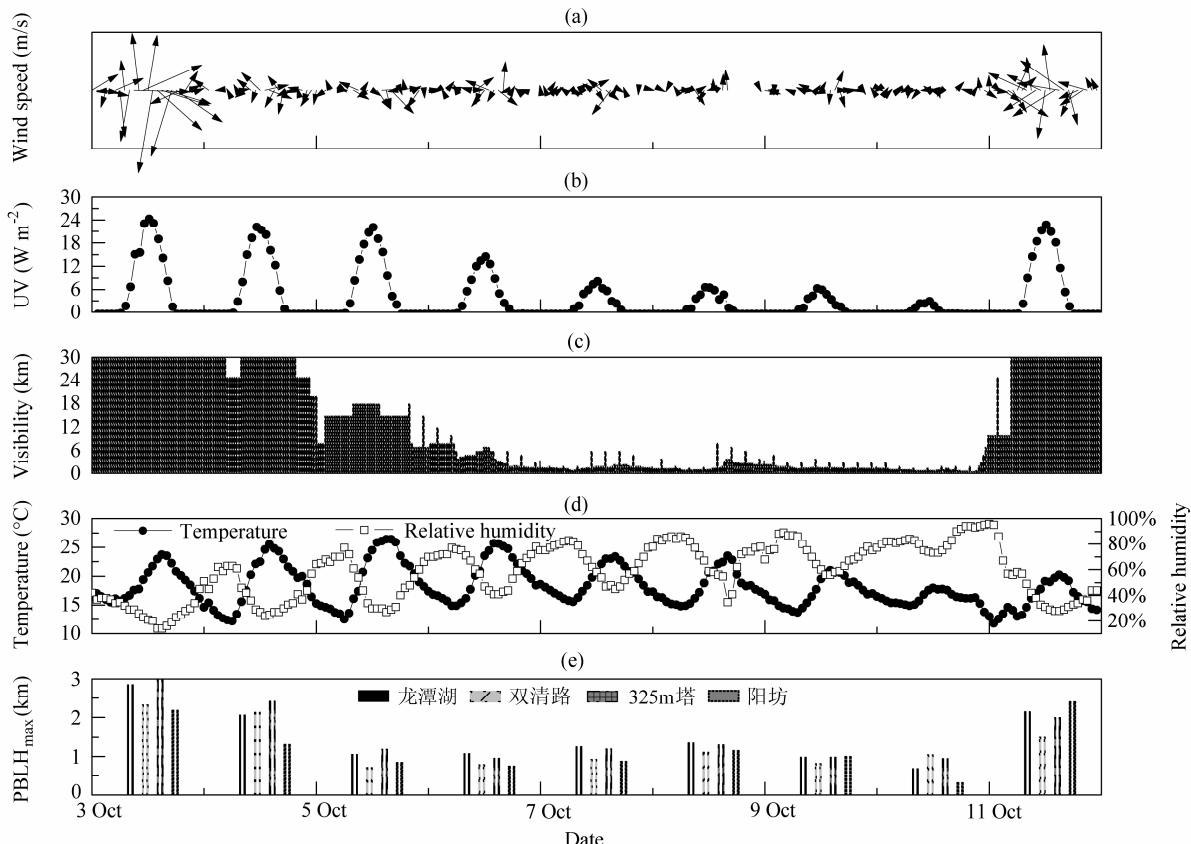


图3 2010年10月3~11日铁塔地面(a)风速、(b)紫外辐射、(c)温度和湿度小时均值时间序列及(d)4站边界层高度模拟最大值(PBLH_{max})
Fig. 3 Times series of (a) wind speed, (b) ultraviolet radiation (UV), (c) temperature and humidity at the site of 325 m Tower, and (d) maximum planetary boundary layer height (PBLH_{max}) for four sites during 3–11 Oct 2010

的模拟值变化趋势一致：3 日、11 日清洁时期 $PBLH_{max}$ 值较高，均在 2~3 km 之间；进入污染时期 $PBLH_{max}$ 值迅速下降，并在污染加重阶段维持在 1200 m 以下，其中阳坊站 10 日达到 305 m。从图 2 和图 3 看出， $PBLH_{max}$ 的变化与二次污染物变化有很好的反相关性。当 $PBLH_{max}$ 处于污染物的高值时，3 站 PM2.5 值和 O_3 的日最大值较低；反之，3 站 PM2.5 的均值和 O_3 的日最大值较高。

3.3 4 站大气污染物浓度的统计关系

利用统计学理论对数据进行 4 站污染物浓度数据初步分析，通过计算分别求出了 4 站一次污染物和二次污染物浓度的相关系数和变异系数，从而初步判断 4 个监测站所测量的污染物浓度随时间和空间的变化关系。

首先，利用 4 站污染物浓度小时均值数据求出日均值，根据变异系数公式分别求出各污染物的不同时间的变异系数（其中 CO 因为只有龙潭湖和双清路两个站数据未作处理，阳坊站 PM10 根据其他北京 325 m 塔站的 PM2.5 和 PM10 浓度的小时均值折算出 PM2.5 小时浓度均值）。其次，根据监测站所获一次污染物 (NO 、 SO_2) 和二次污染物 ($PM2.5$ 、 O_3 、 NO_2 和 O_x) 浓度数据两两计算污染物相关系数的大小（见表 2）。

表 2 4 个监测站大气污染物浓度的统计分析

Table 2 The statistics for air pollutants at four stations

污染物	相关系数	变异系数
NO	0.19	77%
NO_2	0.54	34%
SO_2	0.44	70%
PM2.5	0.83	36%
O_3	0.73	29%
O_x	0.75	19%

从表 2 看出，4 站污染物浓度之间一次污染物两两相关系数较小， NO 和 SO_2 的相关系数分别为 0.19 和 0.44，而二次污染物相关系数相对较大，均在 0.54 以上；4 站一次污染物 CV 值较高， NO 和

SO_2 的 CV 值分别达到了 77% 和 70%；二次污染物与一次污染物差别较大， NO_2 、PM2.5、 O_3 和 O_x 的 CV 值分别为 34%、36%、29% 和 19%。因此可见，一次污染物较差的相关性和较大的差异性反映了各地排放源有较大差别，而二次污染物显示出较强的相关性和较小的差异性。也就是说，排放源的差异与二次污染物的一致性形成了较大反差，说明排放源的变化并没有引起二次污染物有较大差异。根据 Ziomas et al. (1995) 对影响污染过程的两个主要因素排放源和气象条件的讨论和任阵海等 (2005) 对污染物在大气中的扩散、稀释的速率，输送距离、范围和混合层高度关系的描述，结合本文对不同站点之间的相关性和变异系数的分析，发现气象条件是本次污染过程的主控因素。

3.4 污染成因分析

3.4.1 模式验证

为了检验气象要素模拟结果与实际情况的吻合程度，本文采用了一系列的统计参数来检验模式模拟性能，这些统计参数包括平均值 M (Mean)、平均偏差 MB (Mean Bias)、正态平均偏差 NMB (Normalized Mean Bias)、均方根误差 RMSE (Root-mean-square error)、正态平均误差 NME (Normalized Mean Error) 和相关系数 R ，并利用这些参数比较了双清路站、325 m 塔和龙潮湖站的 4 个气象要素的观测和模拟值，包括气温 T 、相对湿度 RH、风速 v 和边界层高度 ($PBLH$)。

如表 3 所示，3 个气象站地面温度和相对湿度的观测值和模拟值非常接近，平均偏差较小，分别是 1.99 °C 和 8.94%。然而风速却存在较大差异，观测和模拟的平均值分别是 0.87 m/s 和 2.81 m/s，这主要因为 MM5 模式下垫面粗糙度的参数设置难以完全符合实际地表特征和近地面湍流复杂性，使得风速模拟值存在偏差，一般模拟值会偏大 (Hanna and Yang, 2001)。另外，从表 3 看到 $PBLH_{max}$ 的相关系数达到 0.79。通过表 3 统计数据的比较分析，说明 MM5 模拟结果与实际观测情况基本一致

表 3 双清路站、325 m 塔站、龙潭湖站气象要素观测和模拟结果统计分析

Table 3 Statistical analysis of observed and simulated meteorological elements at Shuangqinglu station, 325 m Tower station, and Longtanhu station

气象要素	观测平均值	模拟平均值	平均偏差	正态平均偏差	均方根误差	正态平均误差	相关系数
气温	17.64 °C	16.82 °C	1.99 °C	-6.22%	2.45 °C	11.19%	0.82
相对湿度	61.67%	65.30%	8.94%	5.88%	11.09%	14.50%	0.88
风速	0.87 m/s	2.81 m/s	2.03 m/s	331.29%	3.32 m/s	223.56%	0.48
最大边界层高度	994.6 m	1203.9 m	341.84 m	21.05%	467.8 m	34.37%	0.79

(Tang et al., 2011)。

3.4.2 大尺度天气形势分析

天气形势是确定气象要素分布和演变的主要背景场, 也是影响大气污染物的扩散与大气稳定度的主要因素。在污染过程伊始, 华北上空 500 hPa、850 hPa 高度气压系统分布一致, 北京处于高空槽后脊前气压场配置下, 在强偏北气流控制之下(见图 4a)。此时, 从地面和高空风速较大, 大气层结不稳定, 大气扩散能力强, 不利于污染物积累, 这也说明污染起始阶段大气污染物浓度不高的原因。此后, 地面气压系统东移, 逐渐移出北京, 而高压系统逐渐靠近北京, 并在 10 月 4~5 日到达北京, 此时气压梯度减小导致高压系统减弱。在 500 hPa、850 hPa 气压系统基本一致, 北京地区被高压脊控制, 垂直方向是下沉气流, 而水平方向由偏北气流逐渐变为偏西气流。而地面高压均压场控制, 气压梯度减小导致风速减小, 此时由西南和偏南气流主导(见图 4b)。这种气压系统配置使得整层大气稳定, 整体处于静稳状态, 此时大气扩散能力弱, 使得大气污染物浓度开始累积。

10 月 6 日以后大陆高压继续东移, 占据了华北、华中、华东大部分地区。6~10 日低空 850 hPa 和地面是高压均压场主导, 北京地面处于高压的后部, 主要由西南气流和偏南气流控制, 地面平均风速低于 0.5 m/s 大气层结稳定, 污染物浓度连续累积(见图 4c)。4 站监测的大气污染物分别在 7 日、8 日、9 日、10 日有峰值出现, 北京地区空气质量下降。10 日 14:00 在 500 hPa 和 850 hPa 高度, 北京处于脊后槽前, 西南气流明显加强, 图 5d 所示地面是低压中心, 大气由低到高辐合上升, 大气处于不稳定状态; 低层西南气流水汽输送使得大气水分充足, 从而形成区域大范围降水, 24 h 降水量达到 22 mm, 对大气污染物有明显的清除作用, 污染物浓度大幅下降; 另外北京地区西部高压继续东移, 使北京地区处于高压前部, 风速加大, 有利于污染物扩散, 污染物浓度下降, 空气质量显著好转, 达到良好状况, 至此污染过程结束。

从天气形势的过程分析看出: 一方面, 华北地区从低到高一致的西南和偏南气流将大气污染物从河北、天津、河南、山东等地区输送到北京, 同

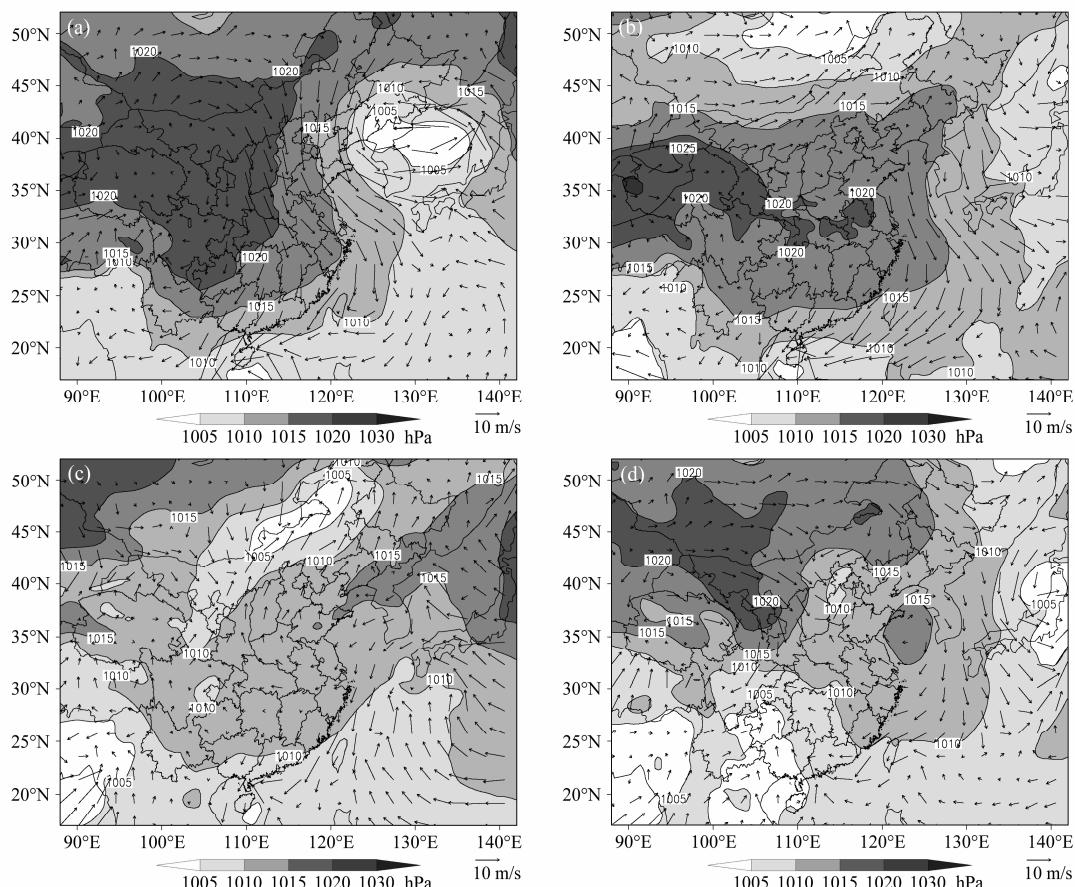


图 4 2010 年 10 月 (a) 3 日 14:00、(b) 5 日 08:00、(c) 9 日 02:00、(d) 10 日 14:00 海平面气压场和风场

Fig. 4 Sea level pressure and winds at (a) 1400 LST 3 Oct, (b) 0800 LST 5 Oct, (c) 0200 LST 9 Oct, and (d) 1400 LST 10 Oct in 2010

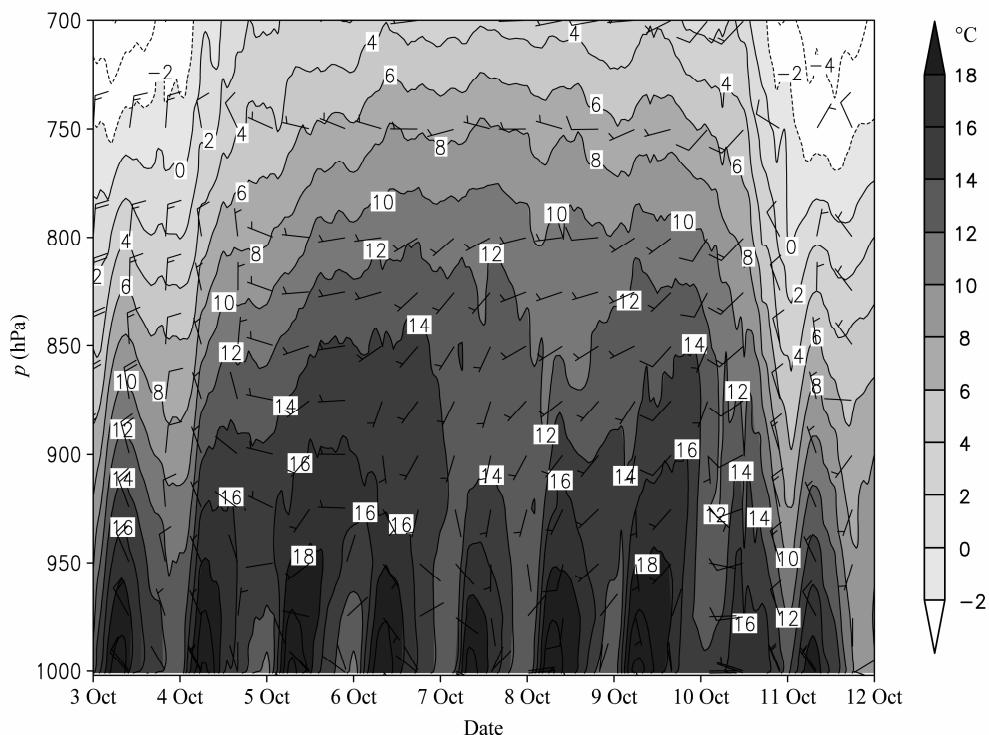


图 5 2010 年 10 月 4~11 日阳坊站风矢量和温度(填色)的垂直廓线

Fig. 5 The vertical profiles of winds and temperature (shaded) at Yangfang station during 4–11 Oct 2010

时由于北京北部燕山山脉、西部太行山地形阻挡，使得污染物在北京地区连续积累，这与杨素英等（2010）之前得到的结论一致；另一方面，在污染过程中北京地区持续受高压均压场控制，低风速和稳定的层结使得大气水平和垂直扩散能力降低，污染物浓度连续累积导致北京空气质量下降。

3.4.3 局地气象特征分析

在前文对污染过程天气形势演变的分析的基础上，利用 MM5 模拟结果，本文得到了污染过程监测站点地面到 700 hPa 高度的风矢、垂直温度廓线的时间剖面图。由于 4 站地理位置相差不大，气象要素垂直分布基本一致，以阳坊为例，分别给出 2010 年 10 月 3~11 日的风矢、垂直温度廓线的时间分布序列（见图 5）。

在污染过程中，阳坊站先后经历了高压前部、高压均压区、高压后部（见图 4），与阳坊站 4 个污染阶段相对应，风场和温度场在垂直方向表现不同的阶段特征。如图 5，在污染过程开始阶段北京地区处于大陆高压前，地面到高空一致为偏北风，风速 $\geq 4 \text{ m/s}$ ，此时大气扩散能力强，污染物不易积累。进入污染积累阶段后，从 4 日 08:00 开始，地面至高空风向逐渐转为西南风和偏西风，风速降低，温度垂直廓线从地面向高空迅速抬升。此时阳坊站进

入高压均压场控制范围，在 5 日 00:00 至 12:00，阳坊站上空 900 hPa 高度出现等温线闭合，也就是说在该高度有逆温层形成，并且从 6~10 日该逆温层维持在 950~800 hPa，略有加强，整体高度有所抬升（见图 5）。所以在污染过程的污染积累和污染加重阶段，逆温层使得北京地区上空形成暖空气盖结构，并且持续稳定。逆温层以上是干冷空气，相对湿度随时间推移从地面到高空逐渐增大（图略），逆温层以下水汽向上输送，地面空气湿度增大；同时由于地面到高空逐渐受较一致的西南气流和偏南气流主导，使不同高度上逆温层得到加强和维持，导致大气扩散能力减弱，污染物浓度连续积累。10 日以后，阳坊站处于高压后低压前，风速加大，风向逐渐由偏西风为转西北风，等温线垂直梯度加大，恢复到污染过程初期的状况，同时 10 日夜间降水冲刷也使得污染物浓度降低，大气质量提高。通过以上分析发现，本次污染过程是一次逆温影响大气扩散，导致大气污染形成的典型过程。

另外，污染过程中这种逆温层形成的暖盖结构影响着 PBLH 的变化，而 PBLH 的高低又直接影响着污染物的存在空间，从而影响污染物浓度。目前全国有很多科研机构和监测站点均配备激光雷达和云高仪等设备，探寻 PBLH 值与 PM 浓度值的关

系值, 可以帮助我们通过 PBLH 的监测数据了解污染状况。因此, 本文通过方程拟合的方法(唐贵谦等, 2010), 作了试探性研究, 旨为研究 PBLH 高度与污染物浓度变化的关系提供一种新思路。具体方法如下: 在污染过程中 PBLH 与 PM2.5 存在较好的反相关性(见图 2 和图 3)。也就是说, 污染时段 PBLH 降低, PM2.5 浓度升高; 反之, 清洁时段 PBLH 升高, PM2.5 浓度值降低。利用中尺度气象模式(MM5)模拟的 PBLH 日最大值与同时刻 4 站 PM2.5 组成的一组散点样本, 运用统计软件进行曲线拟合得到指数关系式(见图 6)。分析表明, 随着 PBLH 从 3000 m 降低到 1500 m 左右时, PM2.5 的浓度值变化较小, 当 PBLH 从 1500 m 继续下降时, PM2.5 浓度值迅速增加。由于我国现无 PM2.5 观测标准, 为了探讨污染物超标的可能性, 将世界卫生组织(World Health Organization, WHO)过渡时期 PM2.5 日均浓度值 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 代入关系式, 得到 PBLH 高度值为 1251 m。因此来看, PBLH 高度低于 1200 m 时, PM2.5 浓度值基本都会超过 WHO 过渡时期标准。通过 PBLH 的观测能够初步了解空气质量状况和发展态势, 对空气质量预报有预警效果。

3.4.4 逆温成因

逆温按照不同的形成原因可以分为辐射逆温、平流逆温、湍流逆温、下沉逆温、锋面逆温 5 种(王晓明等, 2009)。为了分析逆温形成原因, 结合单站纵向剖面图(见图 5), 对不同高度的温度场和 24 h 变温场进行了分析研究(见图 7 和图 8)(姜大膀等, 2001; 安兴琴等, 2002; 安兴琴和吕世华, 2007)。

如图 5 所示, 从整个污染过程上看, 相对于污染起始和污染清除阶段, 污染积累和污染加重阶段等温线从地面向高空有明显抬升, 以 12°C 线为例,

3 日和 11 日分别达到 1100 m(880 hPa) 和 800 m(920 hPa) 左右, 而从 4~9 日大部分时间里超过 1500 m(850 hPa)。从图 5 上看到, 5~10 日在阳坊站上空不同高度等温线出现闭合, 或者在一定的高度大气层出现上暖下冷的情况, 这说明在整个污染过程中, 逆温层在不同时间和高度上出现和维持, 并且逆温层在 500 m(5 日和 6 日)左右, 这有利于污染物的积累, 也与污染物浓度的变化非常一致。分析逆温出现的原因主要由下几方面: 一方面是在污染过程中北京地区由高压均压场控制, 对照天气实况, 除了 6 日夜间出现多云外, 其他时间均是晴朗少云的天气, 这样白天地面对太阳辐射地面温度升高, 夜间地面辐射冷却温度降低从而影响近地面层大气温度, 形成辐射逆温, 这种逆温影响着北京夜间的边界层高度; 另一方面, 污染过程中北京上空各高度一致的西南或偏南气流(见图 5), 将西南和南部的暖空气带到北京上空, 也对污染过程北京上空各层温度的升高有贡献。从图 7 可见, 不论是 850 hPa 高度还是 925 hPa 高度, 高温中心均在北京地区西南部, 并且在这两个高度均有西南气流控制, 风向与等温线相交或者垂

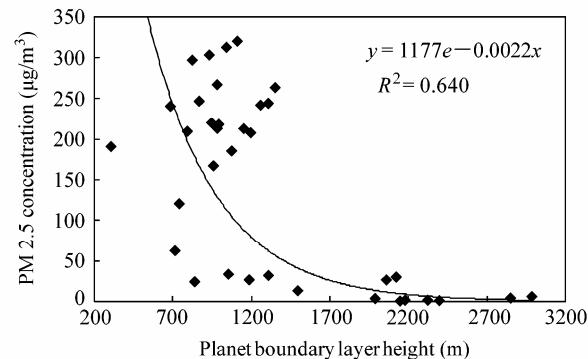


图 6 4 个站点 PBLH 最大值与 PM2.5 浓度关系

Fig. 6 Relationship of PBLH_{\max} and PM2.5 concentration at four sites

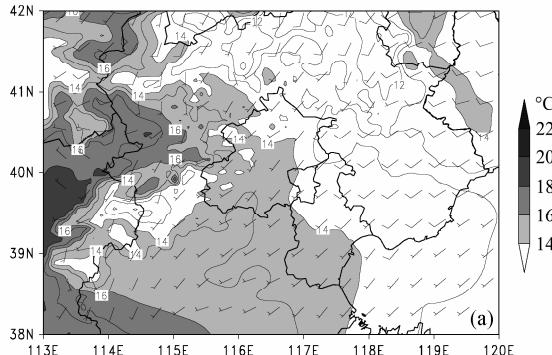
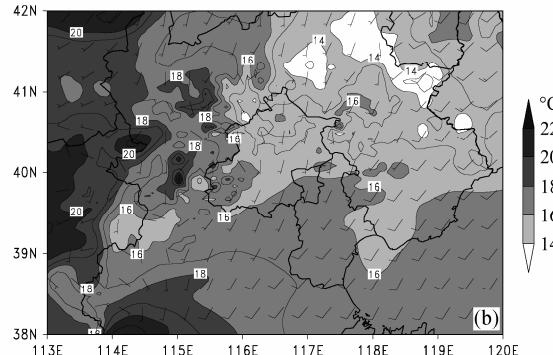


图 7 2010 年 10 月 6 日 20:00 北京及周边 (a) 850 hPa、(b) 925 hPa 温度(填色)和水平风场

Fig. 7 Temperature (shaded) and horizontal wind fields at (a) 850 hPa and (b) 925 hPa in Beijing and its surrounding areas at 2000 LST 6 Oct 2010



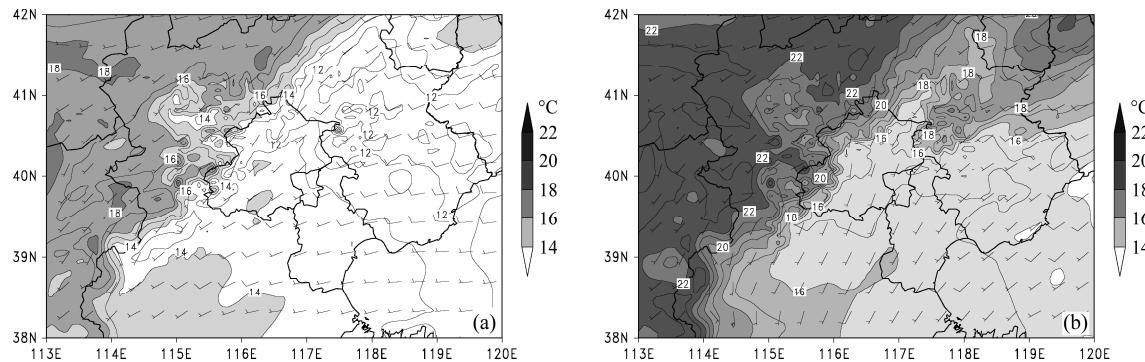


图 8 同图 7, 但为 2010 年 10 月 9 日 14:00

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for 1400 LST 9 Oct 2010

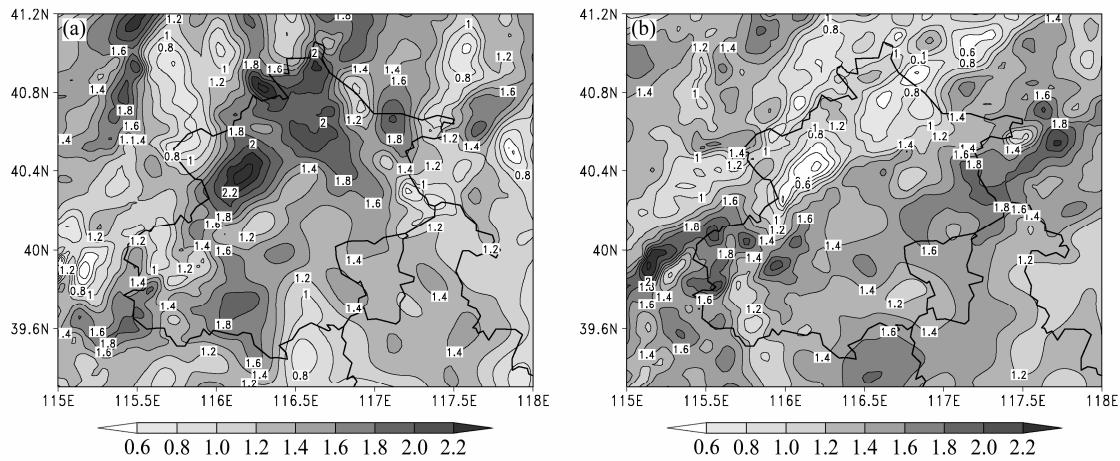


图 9 2010 年 10 月 (a) 6 日 20:00 和 (b) 9 日 14:00 北京及周边 850 hPa 高度 24 h 变温分布

Fig. 9 24-h variable temperature at 850 hPa in Beijing and its surrounding areas at (a) 2000 LST 6 Oct and (b) 1400 LST 9 Oct in 2010

直, 这说明在这两个高度西南暖平流流向北京地区上空, 使北京近地面大气温度升高。图 8 也说明了同样的问题, 只是有偏南气流控制的暖空气影响北京地区近地面温度。如图 9 所示, 在高温中心位于西南、气流从低空到高空由西南或偏南气流控制的风场和温度场配合下(见图 7 和图 8), 10 月 6 日 20:00 和 10 月 9 日 14:00 北京上空 850 hPa 高度 24 h 变温均为正变温, 变温幅度分别为 0.8~2.4 °C 和 0.6~2.0 °C。因此来看, 西南和南部暖平流是造成阳坊站上空等温线闭合(见图 5)的重要原因, 这种平流逆温影响着北京白天的边界层高度。

综上所述, 在污染过程中近地面层上空, 由于夜间地面辐射冷却形成辐射逆温和偏南、西南暖气流形成平流逆温两方面作用, 这种复合交织作用使得北京近地面上空大气形成暖盖结构, 大气层结处于稳定状态, 阻碍了大气的垂直运动, 从而降低了大气的扩散能力, 使得各污染物浓度都不容易扩

散, 污染物浓度在近地面层持续增加, 导致北京上空污染过程的形成。

4 结论

(1) 北京地区不同污染物浓度变化特征存在显著差异。 O_3 和 NO_x 浓度日变化显著, 但变化形式不同, 成因亦不同; $PM_{2.5}$ 和 SO_2 均无显著日变化, 但在污染过程其浓度呈现显著积累上升, 并存在明显区域复合输送特征。

(2) 同一区域不同站点一次排放的污染物间显著性差异反映出排放源存在较大差别, 但排放源差别并没有造成二次污染物站点间的显著差异, 结合地面气象实况资料与污染资料的对比分析结果, 在排放源强度基本稳定的情况下, 气象条件是北京地区此次大气复合污染事件形成的主因。

(3) 本次污染过程, 源于平流逆温和夜间辐射逆温复合交织, 形成近地面上空暖盖, 混合层高度

极低, 阻碍了污染物水平和垂直扩散, 造成污染物浓度持续累积上升, 导致污染过程形成。

致谢 感谢潘月鹏博士和宋涛博士在撰写论文过程中的帮助, 感谢胡波副研究员和吉东升博士在获取数据方面的协调和努力, 感谢刘子锐博士和刘全博士 325 m 铁塔观测的数据支持, 感谢王效科研究员和孙旭老师在数据采集方面的帮助和支持, 同时对中国科学院生态环境研究中心和北京教学植物园两单位对实验的顺利开展和数据获取中的帮助表示诚挚的谢意!

参考文献 (References)

- 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 2007. 北京大气中 NO、NO₂ 和 O₃ 浓度变化的相关性分析 [J]. 环境科学, 28 (4): 706–711. An Junlin, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2007. Analysis of the relationship between NO, NO₂ and O₃ concentrations in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 28 (4): 706–711.
- 安俊琳, 王跃思, 李昕, 等. 2008. 北京大气 O₃ 与 NO_x 的变化特征 [J]. 生态环境, 17 (4): 1420–1424. An Junlin, Wang Yuesi, Li Xin, et al. 2008. Characteristics of atmospheric O₃ and NO_x concentrations in the urban area [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 17 (4): 1420–1424.
- 安兴琴, 吕世华. 2007. 兰州市冬季大气边界层结构特征的观测和数值模拟研究 [J]. 气象科学, 27 (4): 374–380. An Xingqin, Lü Shihua. 2002. Observation and simulation study on structure characteristics of atmospheric boundary layer over Lanzhou in winter [J]. Meteorological Sciences (in Chinese), 27 (4): 374–380.
- 安兴琴, 陈玉春, 吕世华. 2002. 中尺度模式对冬季兰州市低空风场和温度场的数值模拟 [J]. 高原气象, 21 (2): 186–192. An Xingqin, Chen Yuchun, Lü Shihua. 2002. Mesoscale simulations of winter low-level wind and temperature field in Lanzhou city [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 21 (2): 186–192.
- Comrie A C. 1996. An all-season synoptic climatology of air pollution in the U. S.–Mexico border region [J]. The Professional Geographer, 48: 237–251.
- Giorgi F, Meleux F. 2007. Modelling the regional effects of climate change on air quality [J]. Comptes Rendus Geoscience, 339: 721–733.
- Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. 1994. A description of the Fifth Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5) [R]. Note NCAR/TN-3981STR, 121 pp.
- Hanna S R, Yang R X. 2001. Evaluations of mesoscale models' simulations of near-surface winds, temperature gradients, and mixing depths [J]. J. Appl. Meteor., 40 (6): 1095–1104.
- 胡波, 王跃思, 刘广仁. 2007. 北京城市紫外辐射变化特征及经验估算方程 [J]. 高原气象, 26 (3): 511–518. Hu Bo, Wang Yuesi, Liu Guangren. 2007. The variation characteristics and estimating model for ultraviolet radiation in Beijing [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 26 (3): 511–518.
- 吉东升, 王跃思, 孙扬, 等. 2009. 北京大气中 SO₂ 浓度变化特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (1): 69–76. Ji Dongsheng, Wang Yuesi, Sun Yang, et al. 2009. Characteristics of atmospheric SO₂ in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (1): 69–76.
- 姜大膀, 王式功, 郎咸梅, 等. 2001. 兰州市区低空大气温度层结特征及其与空气污染的关系 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 37 (4): 131–136. Jiang Dabang, Wang Shigong, Lang Xianmei, et al. 2002. The characteristics of stratification of lower-layer atmospheric temperature and their relations with air pollution in Lanzhou Proper [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese), 37 (4): 131–136.
- 马志强, 王跃思, 孙扬, 等. 2007. 北京大气中常规污染物的垂直分布特征 [J]. 环境科学研究, 20 (5): 1–6. Ma Zhiqiang, Wang Yuesi, Sun Yang, et al. 2007. Characteristics of vertical air pollutants in Beijing [J]. Research of Environment Science (in Chinese), 20 (5): 1–6.
- 孟伟, 高庆先, 张志刚, 等. 2006. 北京及周边地区大气污染数值模拟研究 [J]. 环境科学研究, 19 (5): 11–18. Meng Wei, Gao Qingxian, Zhang Zhigang, et al. 2006. The numerical study of atmospheric pollution in Beijing and its surrounding regions [J]. Research of Environment Science (in Chinese), 19 (5): 11–18.
- 孟燕军, 程丛林. 2002. 影响北京大气污染物变化的地面天气形势分析 [J]. 气象, 28 (4): 42–47. Meng Yanjun, Cheng Conglin. 2002. Impact of surface synoptic situations on air pollution in Beijing area [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 28 (4): 42–47.
- Parrish D D, Zhu T. 2009. Clean air for Megacities [J]. Science, 326 (5953): 647–675.
- 任阵海, 苏福庆, 高庆先, 等. 2005. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析 [J]. 大气科学, 29 (1): 57–63. Ren Zhenhai, Su Fuqing, Gao Qingxian, et al. 2005. Analysis of the serious atmospheric pollution event caused by emissions in boundary layer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 57–63.
- 盛驥, 谢式千, 潘承毅. 2009. 概率论与数理统计(第三版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 27–30. Sheng Zhou, Xie Shiqian, Pan Chenyi. 2009. Probability and Mathematical Statistics (Third Edition) (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 27–30.
- 孙扬, 王跃思, 刘广仁, 等. 2006. 北京地区一次大气环境持续严重污染过程中 SO₂ 的垂直分布分析 [J]. 环境科学, 27 (3): 408–414. Sun Yang, Wang Yuesi, Liu Guangren, et al. 2006. Analysis for vertical profile of atmospheric SO₂ during air seriously polluted days in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 27 (3): 408–414.
- Tang G, Wang Y, Li X, et al. 2011. Spatial-temporal variations of surface ozone and ozone control strategy for Northern China [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 11: 26057–26109.
- 唐贵谦, 李昕, 王效科, 等. 2010. 天气型对北京地区近地面臭氧的影响 [J]. 环境科学, 30 (3): 573–578. Tang Guiqian, Li Xin, Wang Xiaoke, et al. 2010. Effects of synoptic type on surface ozone pollution in Beijing [J]. Environmental Science (in Chinese), 30 (3): 573–578.
- 唐孝炎, 张远航, 邵敏. 2006. 大气环境化学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 7–8. Tang Xiaoyan, Zhang Yuanhang, Shao Min. 2006. Atmospheric Environment Chemistry (Second Edition) (in Chinese) [M]. Beijing: Higher Education Press, 7–8.
- 王文森. 2007. 变异系数——一个衡量离散程度简单而有用的统计指标 [J]. 中国统计, (6): 41–42. Wang Wensen. 2007. Coefficient of variation —A simple and useful indicator to measure the degree of dispersion [J]. Chinese Statistics (in Chinese), (6): 41–42.
- 王晓明, 云天, 张志勇, 等. 2009. 吉林省冬季逆温天气特征分析 [J]. 气象, 35 (8): 91–98. Wang Xiaoming, Yun Tian, Zhang Zhiyong, et al.

2009. Analysis on synoptic and climatic features of temperature inversion under different conditions of geographical environment in winter [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 35 (8): 91–98.
- 谢付莹, 王自发, 王喜全. 2010. 2008 年奥运会期间北京地区 PM10 污染天气形势和气象条件特征研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (5): 584–594.
- Xie Fuying, Wang Zifa, Wang Xiquan. 2010. A study of the characteristics of the synoptic situations and meteorological conditions in PM10 air pollution episodes of Beijing during the 2008 Olympic Games period [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 584–594.
- 薛敏, 王跃思, 孙扬, 等. 2006. 北京市大气中 CO 的浓度变化监测分析 [J]. 环境科学, 27 (2): 200–206. Xue Min, Wang Yuesi, Sun Yang, et al. 2006. Measurement on the atmospheric CO concentration in Beijing [J]. Environment Science (in Chinese), 27 (2): 200–206.
- 杨素英, 赵秀勇, 刘宁微. 2010. 北京秋季一次重污染天气过程的成因分析 [J]. 气象与环境学报, 26: 13–16. Yang Suying, Zhao Xiuyong, Liu Ningwei. 2010. Impacting factors of a heavy air pollution process in autumn over Beijing [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 26: 13–16.
- 赵亚南, 王跃思, 张凯, 等. 2008. 工作日、双休日和春节期间 PM10 中水溶性离子浓度变化特征 [J]. 环境科学研究, 21 (5): 150–153. Zhao Yanan, Wang Yuesi, Zhang Kai, et al. 2008. Concentration variation of water-soluble ions of PM10 on workday, weekend and spring festival period [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 21 (5): 150–153.
- 钟流举, 郑君瑜, 雷国强, 等. 2007. 大气污染物排放源清单不确定性定量分析方法及案例研究 [J]. 环境科学研究, 20 (4): 15–20. Zhong Liuju, Zheng Junyu, Lei Guoqiang, et al. 2007. Quantitative uncertainty analysis in air pollutant emission inventories: Methodology and case study [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (4): 15–20.
- Ziomas I C, Melas D, Zerefos C S, et al. 1995. Forecasting peak pollutant levels from meteorological variables [J]. Atmos. Environ., 29 (24): 3703–3711.