

董芬, 王喜全, 王自发, 等. 2013. 北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 63–70, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11035. Dong Fen, Wang Xiquan, Wang Zifa, et al. 2013. A study of the north-south differences of the air quality in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 63–70.

北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象

董芬^{1,2} 王喜全¹ 王自发¹ 晏平仲^{1,2}

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 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 利用 2006 年北京地区空气质量监测站和自动气象站网资料, 以及华北地区中尺度气象观测资料, 分析了北京地区大气污染分布的“南北两重天”现象。通过对此类现象发生过程中天气形势和北京地区气象要素的分析, 指出了造成该现象的天气学成因和气象要素特征。研究表明, 2006 年北京共发生 47 次“南北两重天”现象, 其中大部分发生在秋、冬季的午夜至次日上午, 且多为南差北好的污染物分布情景。该现象的发生与北京地区中- α 尺度天气系统活动的一些特征有关, 特别是与干冷空气进入北京地区的路径以及移动速度的区域差异有关。另外, 在弱天气系统控制下, 北京西南部地区经常出现的小尺度辐合型流场, 也是形成北京地区“南北两重天”现象的重要原因。

关键词 大气污染分布 中- α 尺度天气系统 南北两重天 北京

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0063-08

中图分类号 X16

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11035

A Study of the North-South Differences of the Air Quality in Beijing

DONG Fen^{1,2}, WANG Xiquan¹, WANG Zifa¹, and YAN Pingzhong^{1,2}

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The differences of air quality between the northern and southern parts of Beijing were studied by using observation data of air quality and meteorological factors, as well as synoptic maps of North China. Analyzing the weather patterns and meteorological factors during air pollution episodes, the authors conduct a preliminary discussion on the formation mechanism of this phenomenon. The results show that in 2006 there were 47 days with this phenomenon. It appeared in autumn and winter, mostly between midnight and the following morning. Most of time, the air quality in south Beijing was worse than that in the northern part of the city. The authors found that the phenomenon was related to the meso- α -scale weather system. The path and speed of dry cold air are considered to be the main factors. When strong convergence appeared in the southwestern part of Beijing, the dispersion condition varied between the south and the north, causing heavy air pollution in the southwest.

Keywords Air pollution distribution, Meso- α -scale weather system, North-south difference, Beijing

收稿日期 2011-03-13 收到, 2012-08-30 收到修定稿

资助项目 国家高技术研究发展计划项目 2006AA06A307, 环境保护部环保公益性行业专项资助项目 201009002, 北京市科学技术委员会 D09040903670904

作者简介 董芬, 女, 1987 年出生, 硕士研究生, 主要从事城市气候与城市大气环境研究。E-mail: dongfen870818@126.com

通讯作者 王喜全, E-mail: wxq@mail.iap.ac.cn

1 引言

对北京地区大气污染空间分布的统计分析表明,北京地区西部、北部和东北部的污染物浓度明显低于西南部、南部和东南部;从西北部山区到东南部平原,大气污染程度一般呈递增的趋势(张睿等,2004;王耀庭等,2005;徐祥德等,2005;程兴宏等,2007)。对北京地区大气污染日变化的统计分析表明,城区和清洁对照点(定陵站)的污染物浓度日变化具有显著差异,即城区污染物浓度基本呈双峰变化,清洁对照点则基本呈单峰变化,利用大气扩散数值模式对定陵站监测浓度进行条件性统计分析,证明了城区污染扩散对定陵站浓度的影响(张睿等,2004),这部分解释了城区与清洁对照点日变化差异的原因。以上北京地区大气污染的时空分布是北京地区大气污染分布的一般规律。至于造成这样分布的原因,目前的文献多有研究和解释,如污染源的分布和输送(徐祥德等,2005;程兴宏等,2007),生活和生产的高峰期(张睿等,2004),城市道路交通流量(Croxford et al., 1996),城市的形态结构(钟柯等,2001; Ratti et al., 2002, 2006; 邱巧玲, 2008; 王伟武和陈超, 2008)等。王喜全等(2007)分析了造成北京空气动力学当量直径小于等于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒物重污染的必要条件和两类典型天气形势。谢付莹等(2010)分析了奥运会期间北京地区 PM_{10} 污染天气形势和气象条件特征。徐祥德等(2005)注意到了冬季和夏季北京城区不同方位测点近地层大气动力、热力结构及建筑群上边界各类污染物种均具有“同位相”变化及其“影响域”空间尺度特征。但由于此次观测试验的测量点基本位于北京的四环路以内,再加上加强观测的时间有限,因此不可能全面反映北京地区污染物分布的某些特点,即北京地区的南部(特别是西南城郊地区)和北部地区,经常出现污染物浓度非同位相变化的特征,以及南、北部地区污染物浓度的巨大差异,即所谓的污染物分布的“南北两重天”现象。

1997 年以来,北京房山、大兴区两区有关部门花大力气,关闭了该区域的小水泥厂,使该地区的空气质量与北京其他地区一样有了改善,但其空气质量仍然是北京各区县最差的地区。分析北京地区的工业布局 and 交通流量,该地区不是北京的重点地

区,这使当地政府进一步采取污染控制措施,改善空气质量无从下手。

目前的气象模式和空气质量模式还不能很好地刻画北京地区污染分布的这种“南北两重天”现象。因此研究这种现象的发生条件和规律,对于改进北京地区的空气质量预报,进一步改善北京地区(特别是污染重点地区)空气质量,有重要的科学意义和实际意义。

2 数据与方法

2.1 站点与数据

截至 2006 年,北京地区有空气质量监测站 40 个(其中国控监测子站 9 个),主要集中在城八区(见图 1)。除个别站点外,这些站点提供每天 PM_{10} 、 SO_2 和 NO_x 的小时浓度。由于北京地区的主要污染物是 PM_{10} ,我们主要以其为污染状况示踪物,研究污染状况的分布和变化。气象数据选取北京市自动气象观测网的自动观测结果。由于还没有统一的区域气象观测站探测环境评估标准,北京气象局参考国家一般气象站气象探测环境保护标准以及环境对气象观测数据的可能影响程度,将北京市区域自动气象观测网的 168 个站点分为 4 类:基本符合国家一般气象站的气象探测环境规范要求的为一类(20 个);不符合国家一般气象站规范要求,但对观测要素无直接或明显影响的为二类(98 个);不符合国家一般气象站规范要求,对某观测要素可能有直接影响的为三类(38 个);观测场位于屋顶或平台之上的为四类(12 个)。由于本研究主要关注的现象的尺度基本属于中- β 尺度(东西、南北几十千米),应滤除受局地影响非常大的站点。因此,下面的分析只关注 1、2 类站点的数据。

2.2 方法

本研究以长安街为南北分界线,比较空气质量南北差异。按照南北污染状况非同步变化时华北北部地区的盛行风向,选择东北方向的顺义、平谷和怀柔站为北城代表站,房山和大兴为南城代表站。依据我国环境空气质量标准,本研究中空气质量分为 7 个等级:优(1 级),良(2 级),轻微污染[3(1)级],轻度污染[3(2)级],中度污染[4(1)级],中度重污染[4(2)级],重污染(5 级)。分析每天各站点的 PM_{10} 小时浓度,南城、北城站点空气质量差异达 2 级及以上时,我们定义出现“南北两重天”现象。利用北京市自动气象站网资料和华

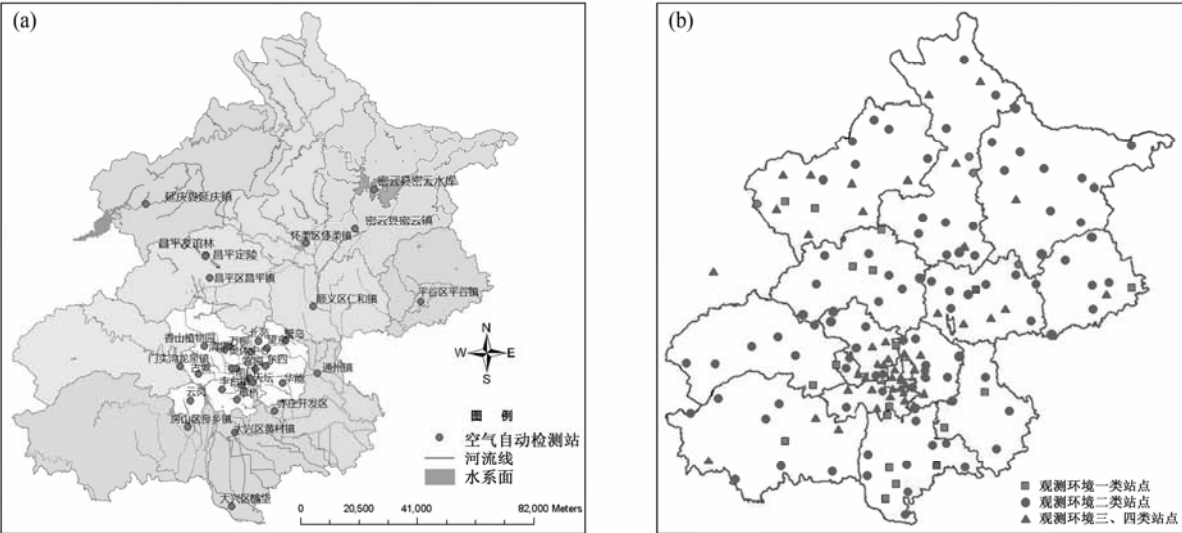


图1 北京地区 (a) 空气自动检测站和 (b) 自动气象站分布
Fig. 1 Distributions of (a) air quality monitoring stations and (b) automatic meteorological stations

北中尺度气象观测资料，采用主观分析法研究“南北两重天”现象出现时天气系统的演变和地面气象要素的特征，初步分析“南北两重天”现象的成因。

3 北京地区空气污染“南北两重天”现象

气象条件、排放源分布和输送等因素造成污染物分布在时空方面的差异。从平均状况看，北京地区污染状况的变化与华北平原北部地区的城市有同步变化的特征（程兴宏等，2007）。一般情况下，北京地区平原站的变化也表现出变化的同步性（程兴宏等，2007）。这保证了利用天气尺度和中- α 尺度气象场资料做北京地区空气质量预报的可行性。但利用小时空气质量监测资料的分析表明，北京平原站的污染物浓度也经常表现出时间上的非同步变化特征，以及空间分布上的巨大梯度差异。这两种情况的存在，给利用天气尺度和中- α 尺度气象场资料做空气污染精细预报造成了巨大的困难。为了形象起见，我们将这种现象称为北京地区空气污染的“南北两重天”现象。

通过对 2006 年北京市逐日 PM10 分布的统计分析，本研究共筛选出“南北两重天”日数 47 d、16 个比较典型的过程。表 1 列出 2006 年北京空气污染“南北两重天”现象过程的日期、时段、类型、空气质量等级差异程度、天气以及对应的天气现象。通过分析得到以下结论：

表 1 2006 年北京空气污染“南北两重天”现象过程
Table 1 Obvious south–north difference of air pollution in Beijing in 2006

时段	特征	南北差异程度	备注
1 月 2 日 05:00（北京时间，下同）至 12:00，2 日 21:00 至 3 日 07:00	南差北好	2~3(2)	大雾
1 月 3 日 16:00 至 24:00	北差南好	1~3(1)	小雪
1 月 10 日 01:00 至 09:00	南差北好	2~3(2)	烟、轻雾
1 月 19 日 01:00 至 10:00	南差北好	3(1)~5	轻雾
1 月 26 日 20:00 至 27 日 08:00	南差北好	2~4(2)	大雾
2 月 28 日 23:00 至 3 月 1 日 07:00	北差南好	1~3(1)	小雪转轻雾
3 月 10 日 13:00 至 23:00	南差北好	2~3(2)	扬沙
3 月 15 日 18:00 至 24:00	北差南好	1~3(1)	
4 月 3 日 01:00 至 07:00	南差北好	3(1)~4(1)	烟
5 月 31 日 00:00 至 07:00	南差北好	1~3(1)	雷暴转大雾
6 月 4 日 23:00 至 5 日 09:00	南差北好	2~3(2)	烟、霾、大雾
9 月 21 日 23:00 至 22 日 11:00，22 日 21:00 至 23 日 09:00	南差北好	1~3(1)	烟、轻雾
10 月 25 日 00:00 至 08:00	南差北好	2~3(2)	小雨、轻雾
11 月 1 日 22:00 至 2 日 09:00	南差北好	1~3(1)	烟、轻雾
12 月 12 日 22:00 至 13 日 09:00	南差北好	2~5	烟
12 月 20 日 04:00 至 21 日 12:00	南差北好	2~5	烟、大雾

（1）从出现季节分析，“南北两重天”现象大部分发生在秋、冬两季，共出现 11 次，占总次数的 68.8%，其中 12 月的两个个例中，“南北两重天”过程发生在北京地区重度污染过程期间。春季的 3~5 月，共出现“两重天”现象 4 次，夏季发生频率不高，仅 6 月发生 1 次“南北两重天”现象。

(2) 除个别以外,“南北两重天”现象多属南差北好的污染分布情景。发生的时段主要有两类:一是午夜至次日上午,共出现 12 次,占总次数的 75%。二是傍晚至午夜,这一类出现较少。

(3) “南北两重天”过程期间伴有的天气现象一般为大雾、烟、轻雾、霾和小雪等低能见度天气,其中大雾天气出现 5 次、轻雾 6 次、烟 7 次、霾 1 次、小雪 2 次。这些天气现象在一次过程中有同时出现或相互转化。

4 结果与讨论

为了研究天气形势对“南北两重天”的影响,我们用主观分析的方法,分析了 2006 年发生的“南北两重天”过程的天气形势演变和北京地区气象条件与污染状况变化的关系。通过总结分析发现,“南北两重天”过程中 α 尺度天气系统活动的一些特征是造成此种污染状况的关键因素。下面对两种不同类型的“南北两重天”现象的过程进行细致分析,以进一步对其成因给出说明。

4.1 “南差北好”型“两重天”分析

4.1.1 空气质量演变过程

2006 年 1 月 2~3 日,北京地区发生两次“南差北好”的两重天污染分布情景,分别为 1 月 2 日 05:00 至 12:00 和 2 日 21:00 至 3 日 07:00 两个时段。图 2 给出这段时间南北区域代表站的 PM₁₀ 浓度变化趋势。

4.1.2 天气形势演变

此次过程在东亚地面天气图(图略)上,1 月 1 日 08:00 北京及华北处于东北弱低伸向华北浅槽后部,14:00 河西有高脊,地形槽内有弱新冷锋,20:00 处于弱冷高前部,渐转弱高压,2 日 20:00 西部冷高与其前方小高合并,3 日形势无大变化。在相应的 850 hPa 和 700 hPa 高空图上,北京处于东北(东亚)槽后,相继又有河西(或河套)生小槽东移,500 hPa 高空东亚槽后渐转平。几日来不断有弱冷空气补充因而未形成中重度污染。这种弱冷空气不断补充的天气尺度天气过程使北京地区大气每日有所更新,是北京大气保持轻一中度污染的一种天气尺度环流背景,而这种条件下的“南北两重天”也有它的某些特征。

图 3 给出此次“南北两重天”过程华北区域地面天气系统的演变。2 日华北区域的背景天气为东北南伸低压槽,槽内部气压场分布明显不均匀,北

京西北一侧有一呈东北—西南走向的等压线密集区,北京东南部位于槽前均压区。地形槽内有明显的偏北风及弱西南风切变,切变以南是烟雾天气而形成“南差北好”的两重天污染分布。2 日 20:00 华北地形槽逐渐随东北低压东移而被东移高脊取代,华北区演变为倒槽为主的形势。随着倒槽的加强,有小股冷空气南下,北京东南部出现偏东风,有时稍偏南,使污染物在北京西部和稍北部有所集中,南北污染物浓度差异开始减小。3 日傍晚至 4 日,随着冷空气的加厚,波及面的扩大,北京及华北北部地区普遍为系统性偏北风控制时,整个京区及华北北部地区污染物迅速扩散而结束“两重天”的形势。对 1 月 10 日、11 月 1~2 日、12 月 12~13 日“南差北好”过程的分析表明,这 3 次“南北两重天”污染过程也是在东北南伸低压槽,槽内京区西北部等压线密集,东南区均压的天气形势下发生的。对 1 月 19 日、9 月 21~23 日、10 月 25 日、12 月 20~21 日“南差北好”过程的分析表明,这 4 次过程北京地区的背景天气系统是内蒙古高压前部或底部,在北京西北部有东北—西南走向的等压线密集区,等压线变疏后南北区域污染差异逐渐变小。

此次过程中未发生强冷空爆发过程,接连出现弱冷空气的频发,天气尺度系统多系移动较快的系统。图 4 给出了两次冷空气移动过程露点温度的变化,以表示干冷气流移动到不同站点的时间和移动路径。这两次中 α 系统在北京附近摆动造成 1 月 2 日和 3 日两次轻一中污染下的“南差北好”的两重天形势。1 月 3 日傍晚至 1 月 4 日凌晨,弱冷空气由自北京东南部南下的路径又逐渐转为自西北方南下的路径(见图 4b),使北京的轻污染出现了“南好北差”的形势,随即结束了两重天。

4.1.3 风场特征

从图 5 可以看出,1 月 1 日北京地区北部和东南部主要为东北风,在西南部大兴、房山区出现反气旋性辐合流场,使污染物在东南区聚集。2 日 12:00 在昌平、顺义区有东北风及西南风的切变,污染物被吹向西北方后南北差异减弱。2 日傍晚,北京北部及东南部受东北风控制,将污染物吹回南部,使南北污染物浓度呈反向变化,加重“南差北好”形势。3 日下午,风向主要为西南风,有时东南风,使污染物在北边聚集而形成“南好北差”的分布。4 日凌晨,北京地区受偏北风控制,风速加大,空气质量转好而结束这次过程。

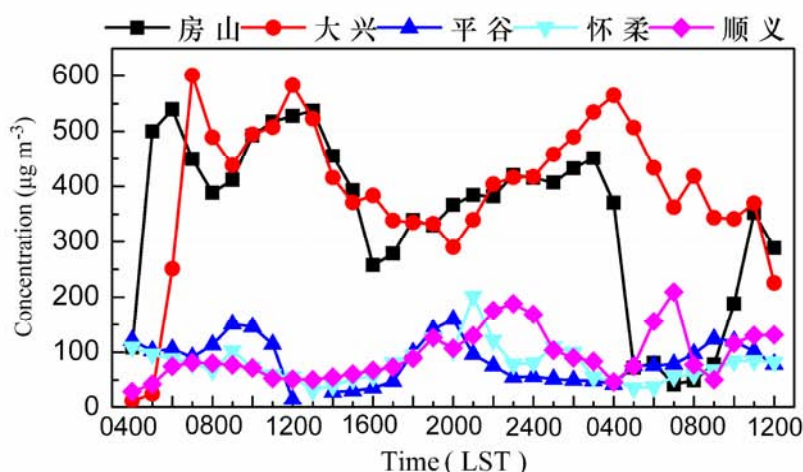


图2 2006年1月2~3日北京地区PM10浓度变化

Fig. 2 The hourly variations of PM10 concentration from 2 Jan to 3 Jan 2006

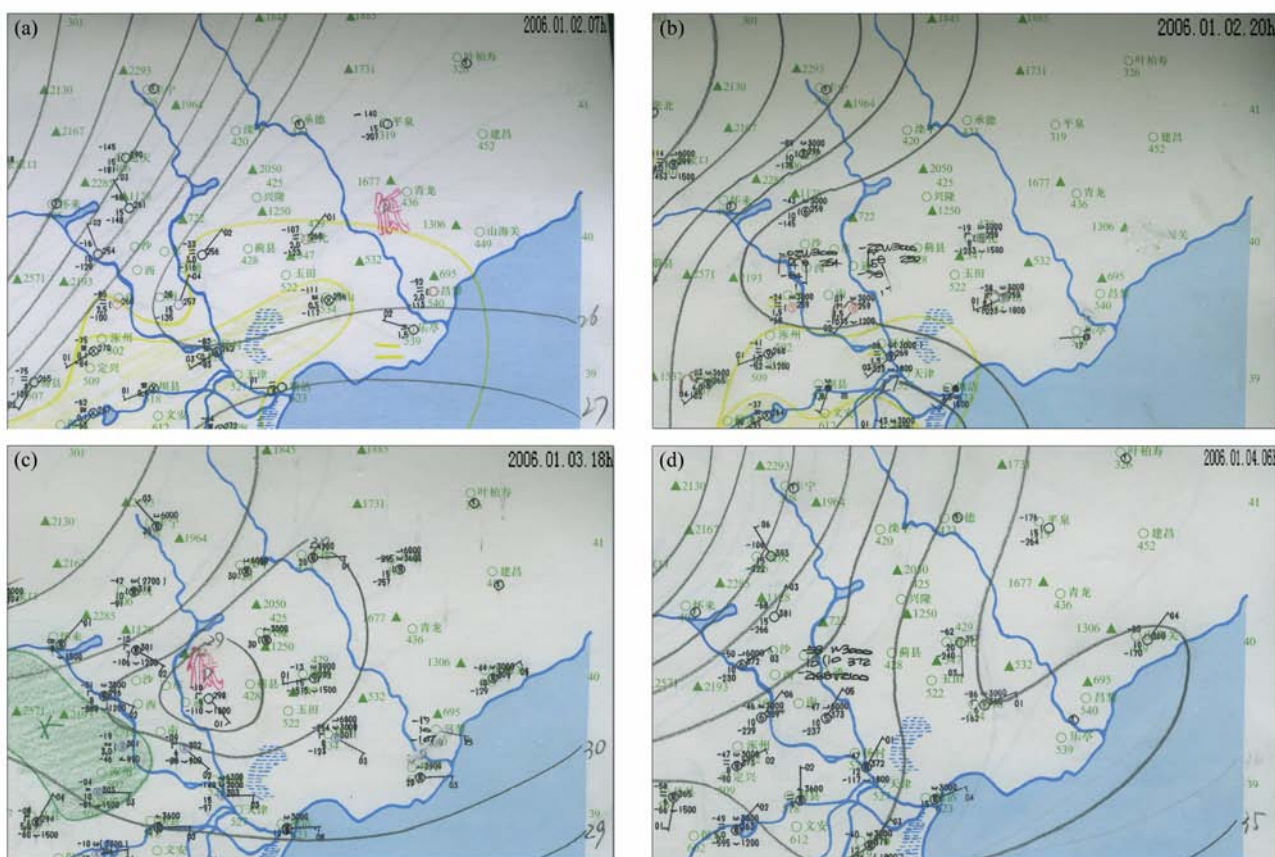


图3 2006年1月2日 (a) 07:00、(b) 20:00、(c) 3日18:00、(d) 4日06:00华北区域地面天气形势

Fig. 3 The synoptic pattern in North China at (a) 0700 LST and (b) 2000 LST on 2 Jan, (c) 1800 LST on 3 Jan, and (d) 0600 LST on 4 Jan 2006

4.2 “南好北差”型“两重天”分析

4.2.1 空气质量演变过程

2月28日至3月1日,北京发生一次“南好北差”的污染过程,28日23:00至次日07:00南北区域空气质量差异明显(见图6所示)。

4.2.2 天气形势演变

2月28日08:00东北平原南部有一气旋,气旋后部有自东向西伸的低槽,槽内似有一冷锋。850 hPa天气图上,28日08:00有内蒙小槽,20:00北京处于东亚槽后河套高前。700 hPa天气图上,东亚

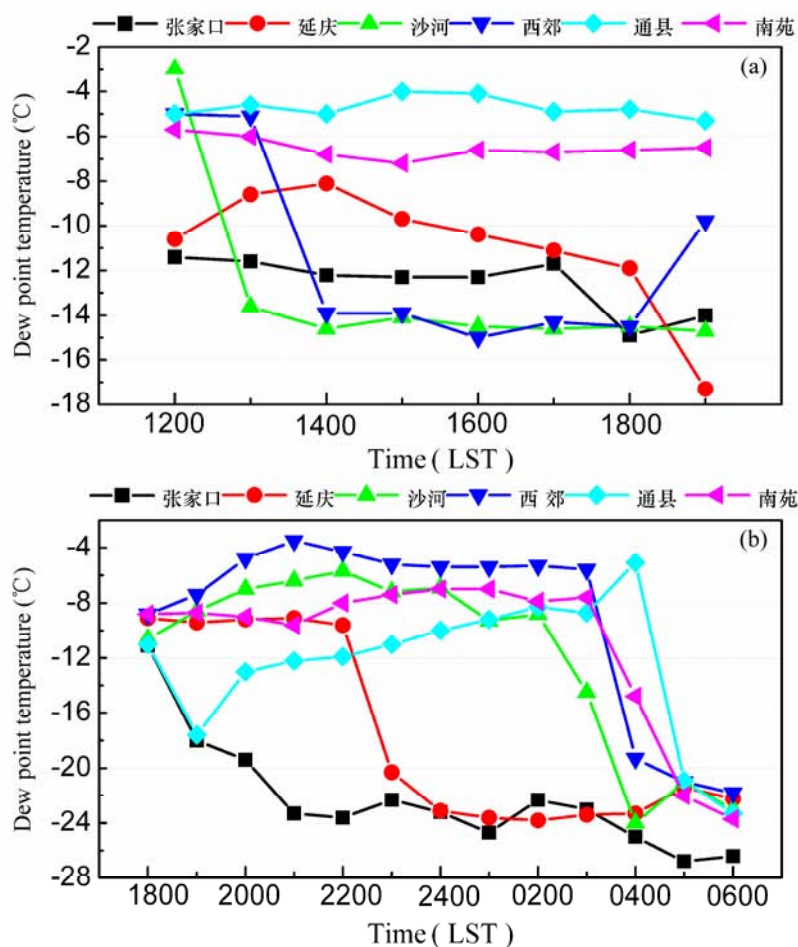


图4 2006年1月 (a) 1日和 (b) 3日露点温度变化

Fig. 4 The hourly variations of dew point temperature on (a) 1 Jan and (b) 3 Jan 2006

大槽 28 日 08:00 将过北京, 20:00 北京位于东亚大槽后部。28 日, 在华北区域天气图上, 背景天气系统为东北低槽, 槽内无明显冷锋, 至 28 日 10:00 后低槽内冷锋变得明显起来, 大致位于多伦—张北—脊, 尚未过张家口, 15:00 左右过张家口, 露点温度由原来的 -6.2°C 降为 -11.5°C , 17:00 过延庆、怀来, 22:00 过西郊, 23:00 过沙河、良乡、南苑, 3 月 1 日 02:00 过通州。从图 7 可见, 弱冷空气一直沿太行山东坡自北向南, 比东移速度快, 随着冷空气的南下、东扩, 北京的西部、南部污染迅速减轻, 北京以东及东北方由于冷空气运动迟缓而维持了相当时间的“南好北差”的两重天分布。

此次过程中北京地区 2 月 28 日主要为偏南风, 随着西边冷空气到达北京, 15:00 北京西北部转为西北风, 风速增大。由于冷空气在北京南边移动速度更快, 19:00 南区风向转为偏西风, 东北区为弱东北风, 使污染物在北京东北区汇聚, 造成“南好北差”的分布状况。1 日凌晨冷空气到达东北区,

风向转为偏西风, 下午时北京地区普遍受西南风控制, 污染物消散, 这一过程结束。

5 总结

通过对 2006 年北京地区“南北两重天”污染时空分布特征和对应时期天气形势、气象要素的分析, 得出以下结论:

(1) 2006 年北京地区共出现 47 d “南北两重天”现象, 大多发生在秋、冬季节, 占总次数的 68.8%。发生时段主要是午夜至次日上午, 少数几次出现在傍晚至午夜。“南北两重天”现象多属于“南差北好”的污染分布情景, 过程期间伴随有大雾、烟、轻雾、霾和小雪等低能见度天气现象。

(2) 造成“南北两重天”现象的因素与北京地区中- α 尺度天气系统活动的一些特征有关。过程期间在华北区天气图上有不同于东亚天气图的中- α 系统: 1) 北京地区位于低压槽或高压脊前, 槽内

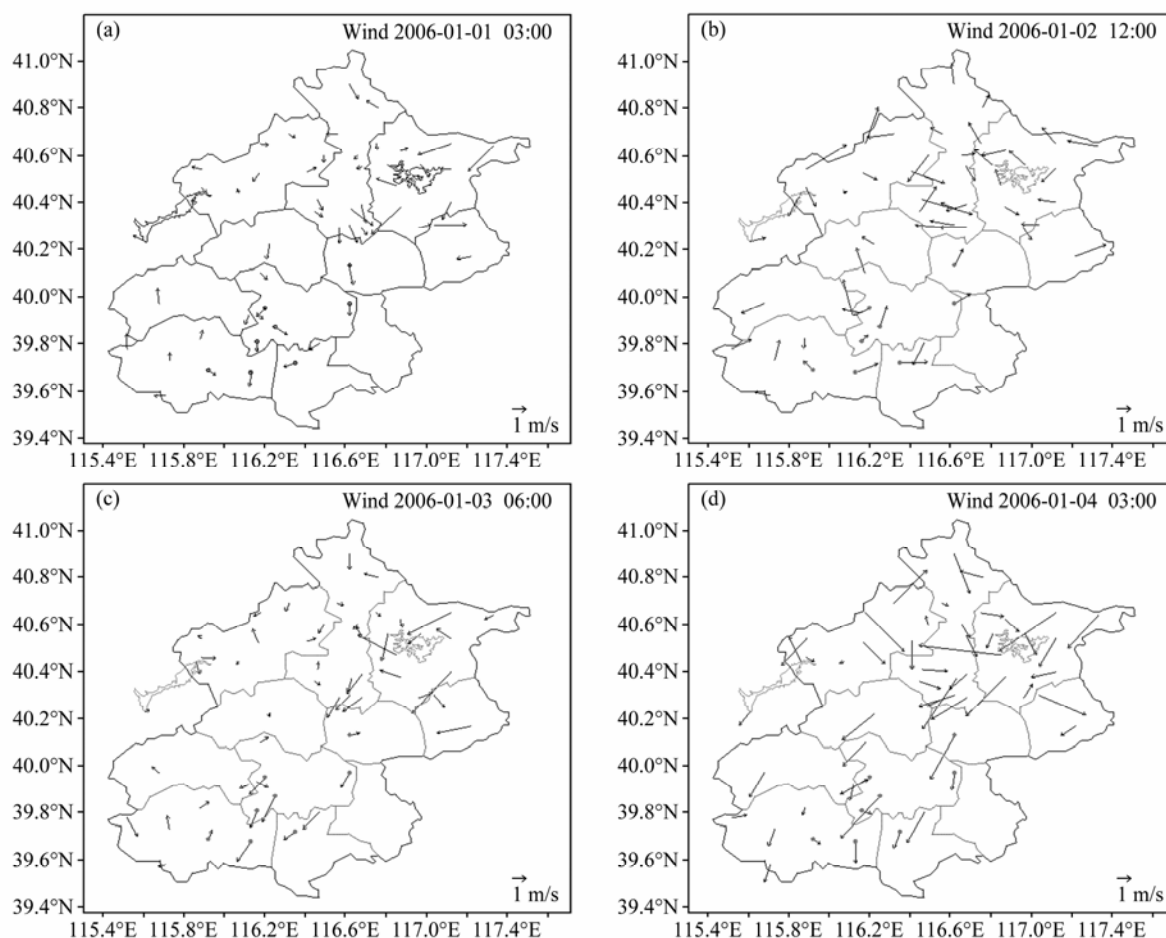


图5 2006年1月1~4日北京地区风场

Fig. 5 Wind fields in Beijing from 1 Jan to 4 Jan 2006

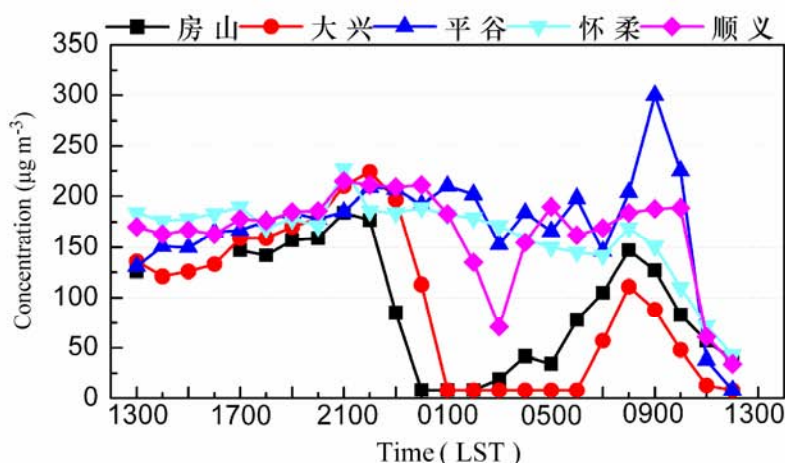


图6 2006年2月28日至3月1日北京地区PM10浓度变化

Fig. 6 The hourly variations of PM10 concentration from 28 Feb to 1 Mar 2006

部气压场分布上存在显著不均匀性，西北一侧为等压线密集区，而槽前北京南区为均压。2) 北京地区时常有弱偏北风与弱南风构成的中- α 切变线摆动于北京地区，切变线即“南北两重天”的“分水岭”。

(3) 弱干冷空气进入北京地区的不同路径以及

到达北京后移动速度的区域差异是造成“南北两重天”污染分布的关键因素。冷空气的活动主要以干空气为主，表现在湿度的变化方面。

(4) 在上述天气形势的影响下，北京地区南北风场差异明显，主城区与郊区之间不同的风向，以

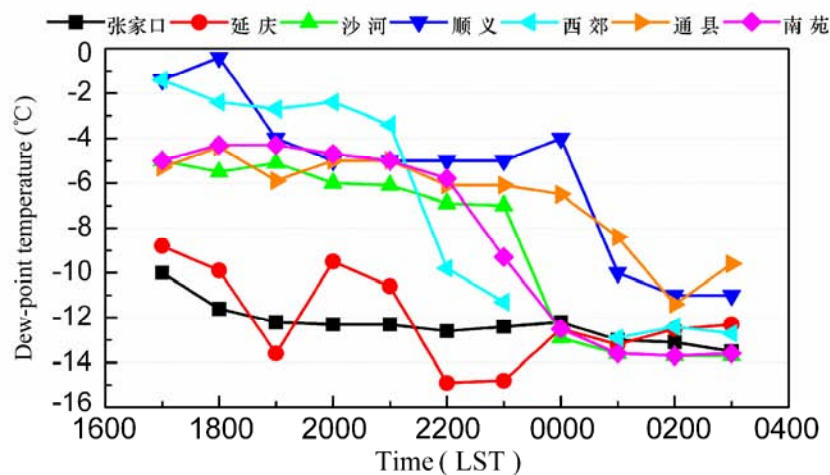


图7 2006年2月28日至3月1日露点温度变化

Fig. 7 The hourly variations of dew point temperature from 28 Feb to 1 Mar 2006

及流场在城郊西南部出现的反气旋性辐合形成了南北区域不同的扩散条件,是造成“南北两重天”分布的重要因素。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所李鸿洲教授、北京环境保护监测中心虞统高级工程师、北京市气象局郭虎高级工程师、北京军区空军气象中心孙明生高级工程师在本研究中提供的帮助和建议。

参考文献 (References)

- 程兴宏, 徐祥德, 陈尊裕, 等. 2007. 北京地区PM₁₀浓度空间分布特征的综合变分分析 [J]. 应用气象学报, 18 (2): 165–172. Cheng Xinghong, Xu Xiangde, Chan Chuenyu, et al. 2007. Integrated analysis on spatial distribution characteristics of PM₁₀ concentration based upon variational processing method in Beijing [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 18 (2): 165–172.
- Croxford B, Penn A, Hillier B. 1996. Spatial distribution of urban pollution: Civilizing urban traffic [J]. The Science of the Total Environment, 189/190: 3–9.
- 邱巧玲. 2008. 城市空气输送通道的布置与节约城市建设用地关系的研究 [J]. 中国园林, (10): 76–81. Qiu Qiaoling. 2008. Study on the relationship between urban air transportation corridors and the layout of urban construction land conservation [J]. Chinese Landscape Architecture (in Chinese), (10): 76–81.
- Ratti C, Di Sabatino S, Britter R, et al. 2002. Analysis of 3-D urban databases with respect to pollution dispersion for a number of European and American cities [J]. Water Air and Soil Pollution, Focus 2: 459–469.
- Ratti C, Di Sabatino S, Britter R. 2006. Urban texture analysis with image processing techniques: Winds and dispersion [J]. Theor. Appl. Climatol., 84: 77–90.
- 王伟武, 陈超. 2008. 杭州城市空气污染物空间分布及其影响因子的定量分析 [J]. 地理研究, 27 (2): 241–249. Wang Weiwu, Chen Chao. 2008. A quantitative analysis on spatial distribution of the pollutants in the urban air and their impact factors based on geostatistics and GIS: A case study of Hangzhou city [J]. Geographical Research (in Chinese), 27 (2): 241–249.
- 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 2007. 造成北京PM₁₀重污染的二类典型天气形势 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 81–86. Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. 2007. The influence of synoptic pattern on PM₁₀ heavy air pollution in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 81–86.
- 王耀庭, 王桥, 杨一鹏, 等. 2005. 利用Landsat/TM影像监测北京地区气溶胶的空间分布 [J]. 地理与地理信息科学, 21 (3): 19–22. Wang Yaoting, Wang Qiao, Yang Yipeng, et al. 2005. Monitoring spatial distribution of aerosols in Beijing based on landsat TM Data [J]. Geography and Geo-Information Science (in Chinese), 21 (3): 19–22.
- 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]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (5): 584–594.
- 徐祥德, 周秀骥, 施晓晖. 2005. 城市群落大气污染源影响的空间结构及尺度特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 35 (S1): 1–19. Xu Xiangde, Zhou Xiuji, Shi Xiaohui. 2005. Spatial structure and scale feature of the atmospheric pollution source impact of city agglomeration [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 35 (S1): 1–19.
- 张睿, 蔡旭晖, 宋宇. 2004. 北京地区大气污染物时空分布及累积效应分析 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 40 (6): 42–48. Zhang Rui, Cai Xuhui, Song Yu. 2004. Spatial-temporal variation and accumulation effect of air pollutants over Beijing area [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinesis (in Chinese), 40 (6): 42–48.
- 钟柯, 亢燕铭, 王翠萍. 2001. 城市街口规划设计与城市空气环境的关系 [J]. 中国环境科学, 21 (5): 460–463. Zhong Ke, Kang Yanming, Wang Cuiping. 2001. Relationship between street corner design in urban plan and urban air environment [J]. China Environmental Science (in Chinese), 21 (5): 460–463.