

王跃, 王莉莉, 赵广娜, 等. 2014. 北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 19 (2): 173–184, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13178. Wang Yue, Wang Lili, Zhao Guangna, et al. 2014. Analysis of different-scales circulation patterns and boundary layer structure of PM_{2.5} heavy pollutions in Beijing during winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (2): 173–184.

北京冬季 PM_{2.5} 重污染时段不同尺度环流形势及边界层结构分析

王跃¹ 王莉莉² 赵广娜³ 王跃思² 安俊琳¹ 刘子锐² 唐贵谦²

¹ 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

² 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

³ 黑龙江省气象台, 哈尔滨 150001

摘 要 城市重霾污染事件的发生除排放源内在原因之外, 气象条件是最直接的客观外因。本文以 2013 年 2 月 21~28 日北京地区典型细颗粒物 (即 PM_{2.5}) 重污染过程为例, 基于颗粒物水平和垂直监测数据, 常规及加密自动气象站数据和高时间分辨率风廓线数据, 分析了重污染过程中不同尺度环流形势以及边界层结构的变化对细颗粒物重度污染形成、累积和消散的影响。结果表明: 弱低压场或弱高压场控制下, 局地西南风和东南风输送与北部山区偏北风在山前的汇聚, 配合边界层低层顺时针方向的风切变, 易发生大气中细颗粒物的爆发性增长; 而均压场控制和近地层持续偏南气流输送, 配合高层持续稳定的西北风, 是污染长时间持续稳步增长的主因。此外, 近地层低风速、高湿度和逆温的维持是区域霾污染爆发增长和长时间持续增长的关键气象因素。高压前部的系统性西北大风是污染得以驱散的直接外部动力。

关键词 北京 细颗粒物 环流形势 边界层结构

文章编号 1006-9585 (2014) 02-0173-12

中图分类号 P402

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13178

Analysis of Different-Scales Circulation Patterns and Boundary Layer Structure of PM_{2.5} Heavy Pollutions in Beijing during Winter

WANG Yue¹, WANG Lili², ZHAO Guangna³, WANG Yuesi², AN Junlin¹, LIU Zirui²,
and TANG Guiqian²

¹ School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

² Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³ Meteorological Center of Heilongjiang Province, Harbin 150001

Abstract The most immediate external objective of urban heavy haze pollution incidents was the weather conditions in addition to the internal reason of emission sources. Based on horizontal and vertical particulate matter (PM) data, conventional and encryption automatic meteorological station data, and wind profiler data, the analysis of the influence of changes of different scales circulation patterns and boundary layer structure on the formation, accumulation, and dissipation of heavy pollutions of PM_{2.5} in Beijing during 21–28 February 2013 was presented. The results showed that, under the control of low or high weak pressure, the gathering of the southwest local wind, southeast transport wind, and north mountain wind, with clockwise wind shears in boundary layer, tended to bring on growth spurts of fine PM.

收稿日期 2013-10-22 收到, 2014-01-14 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金重点项目 41230642, 中国科学院战略性先导科技专项 (B 类) XDB05020200

作者简介 王跃, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要研究方向为大气环境与气象条件分析。E-mail: wangyue607@126.com

通讯作者 王莉莉, E-mail: wll@mail.iap.ac.cn

Otherwise, the main cause of long time and steady growth of pollutions was the control of uniform pressure and near-surface south transport wind with high-level steady northwest wind. In addition, the key meteorological factor was near-surface low wind, high humidity, and maintaining a temperature inversion to promote and sustain the growth of regional haze pollution. A northwest wind in front of high pressure was a direct external power to disperse pollutions.

Keywords Beijing, PM_{2.5}, circulation pattern, boundary layer structure

1 引言

随着我国经济的高速发展、城市化进程的不断加快,能源与交通规模逐渐扩大,城市人口迅速膨胀,大气污染已经日益成为地区性问题,污染性质也逐渐向复合型污染转变,多种不利条件形成的北京市复合型大气环境污染亟待深入研究,因此迫切需要对北京地区大气污染带来的新问题进行全面、深入和综合性的研究,寻找解决问题的关键技术和手段,制定切实可行的大气环境污染调控政策,寻求从根本上解决北京地区的大气污染问题(王金南等,2013)。李令军等(2012)研究表明北京的大气细颗粒物污染十分严重,从长期或平均状态来说,城市污染程度取决于城市的能源结构、交通和工业排放污染物的多少,但从短期或实时状态而言,却主要与地形和气象条件有关(王继志等,2012)。厘清客观气象条件对重霾污染形成、发展和消除的影响,是准确模拟和预测颗粒物浓度、进而预警霾污染的必要前提。

大尺度环流形势和局地气象条件不仅可以影响污染物的生成、积累和清除(田伟等,2013),同时也是影响区域输送的重要外部条件(Davis and Kalkstein, 1990; Greene et al., 1999; Cheng et al., 2007a, 2007b, 2007c)。污染过程的不同阶段对应着不同的大尺度环流形势(陈朝晖等,2007),说明不同的环流形势对污染物的汇聚和清除有着不同的影响(王莉莉等,2010)。在污染源一定的条件下,污染物浓度的变化取决于局地气象条件的变化,如大气稳定度、风向、风速以及降水等(王璟等,2008)。而边界层结构中气象因子梯度分布的不同也会影响污染物的汇聚、输送和扩散(苏福庆等,2004;樊文雁等,2009)。

国内外已有很多研究分析了环流形势或者局地气象条件对污染状况的影响。Greene et al. (1999)研究分析了各种天气型特征与大气污染物之间的关系,确定出各个气象因子对污染物浓度影响程度的大小。Flocas et al. (2009)分析了4类大气环流

形势和5类局地环流对污染状况的影响,说明了城市重污染事件的发生主要是由于不利于污染物扩散的气象条件。Tai et al. (2010)利用相关性分析的方法,研究了温度、相对湿度和风向对细颗粒物(即PM_{2.5})浓度的影响,并得出了污染物的浓度分布与气象因子的变化有着密切的关系。

北京地区大气污染与气象状况的关系已经有了较多研究成果。任阵海等(2004)分析了北京不同尺度大气系统对污染边界层的影响,指出稳定的大陆高压脊影响的持续背风坡下沉气流,持续的逆温层和干结的暖空气盖是造成污染的重要原因。陈朝晖等(2007)对北京地区天气型与PM₁₀的质量浓度的关系进行了研究,说明了PM₁₀质量浓度在上升、峰值和下降阶段对应的天气形势分别为大陆弱高压场、相继出现的弱低压场和高气压梯度场。康娜等(2009)指出持续的偏南风 and 边界层低层局地性环流使得北京—天津—河北南部区域细粒子在北京山前地区出现高值。

然上述研究多基于日均值或单站点研究污染与气象的关系,基于更高时空精度的数据分析霾污染形成气象机制的研究则非常少。北京地区颗粒物小时均值变化显示(王跃思等,2013),霾污染表现为两种主要的形式,一种为“爆发增长的重污染”过程,另一种为“持续累积的污染”过程,前者表现为在短短数小时内颗粒物浓度从低值迅速增长到峰值,而后一种表现为颗粒物浓度稳步累积增长,污染持续多天。单一站点颗粒物短时间迅速增长可能与排放源有关,但区域多站点共同表现为此种形式,则与气象过程密不可分,而区域多站点同步的持续污染更是受制于气象条件,区分这两类不同霾污染对应的气象条件对厘清颗粒物增长的气象机制非常必要。因此本论文基于常规气象数据、高时空分辨率的地面流场和边界层结构数据,以及高时空分辨率的颗粒物水平和垂直分布数据,针对北京地区冬季重霾污染演变过程中细颗粒物两种污染形态,研究其发生、发展和消散对应的环流特征、局地流场、边界层结构和气象要素变化情况,从而为预测和预警细颗粒物重污染事件提供支持

和依据。

2 数据与方法

2.1 站点和数据

北京地区环境监测站点包括定陵、怀柔、顺义新城、奥体中心、古城、万寿西宫和农展馆(分布见图1),这7个站点数据获取自国家环境监测总站网上实时发布数据。其中定陵、怀柔为郊区站,顺义新城为近郊站,而奥体中心、古城、万寿西宫和农展馆为城区站。云高仪(气溶胶垂直分布监测)数据取自中国科学院大气物理研究所实时监测数据。7个站点加上云高仪的垂直观测分别代表了北京地区水平空间上的7个不同方位以及垂直高度层结。本研究环境数据选取7个站点2013年2月21~28日的细颗粒物质量浓度的小时均值以及云高仪2月27和28日的观测数据。气象数据选取对应时段与环境监测站相近的7个自动气象观测站数据,同时为综合考虑北京区域的流场特征选用了全国加密站点地面气象观测资料。海平面气压场图由中国气象局提供,并利用气象信息综合分析处理系统(MICAPS)处理。温湿廓线数据取自北京南郊观象台的气象数据。为了研究此次过程中北京边界层结构的特征,加入了高时空分辨率的风廓线数据,取自海淀区边界层风廓线仪的观测数据。

2.2 监测仪器

云高仪(气溶胶垂直分布监测)采用了芬兰维

萨拉激光云高仪 CL31,其原初是用于探测云层和垂直能见度。云顶高度足够用来确定超过2 km高度的对流层,还能探测夜间150 m以下的稳定边界层。云高仪两个光学镜头的设计提供了发射器和接收器在整个测量范围上的充分重叠,能够有效地测量出夜间稳定边界层。探测范围在任何天气条件下的7.5 km高度内,分辨率5 m,测量频率可设置在2~120 s,操作环境温度为-40~60 °C,相对湿度0~100%,风速55 m/s。

3 结果与分析

3.1 污染过程分析

2013年2月21~28日研究时间段中主要出现了4次细颗粒物污染峰值,分别为21日22:00(北京时间,下同)、24日22:00、27日00:00和28日10:00,7站点细颗粒物小时区域均值最高浓度分别达到了244 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、406 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、305 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和445 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;这8天的细颗粒物浓度全部超过国家空气质量一级标准[日均值 $>35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (于新,2012)],其中21日和25~28日超过国家空气质量二级标准(日均值 $>75 \mu\text{g}/\text{m}^3$),污染非常严重。

由图2a可见,研究时段共经历了3次污染过程:21日(第一次爆发增长)和28日(第二次爆发增长)是两个快速累积和消除的污染过程,21日细颗粒物浓度增幅为 $9.8 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$,降幅为 $21 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$;28日更高达 $20.2 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$,降幅为 $48.4 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$;2月23~27日(持续增长)是一次逐渐累积持续的污染过程,经历了累积增长($7.4 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)—缓慢降低($19 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)—累积增长($5.7 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)—迅速降低($20.4 \mu\text{g m}^{-3} \text{h}^{-1}$)的过程。24日因正逢元宵佳节,夜晚燃放烟花爆竹会一定程度上增加污染物的累积和高值,这也使得2月24日成为这次污染过程中细颗粒物浓度较高天的一个重要原因;25日中午北京城区的一次短时间强降雪过程,使得奥体中心、古城和万寿西宫的细颗粒物浓度几乎降为0;28日上午北京地区霾污染严重,而下午一股强沙尘暴席卷北京,使得北京经历了一次重霾污染和沙尘污染混合又交替出现的特殊污染过程,沙尘暴过后的大风清除了污染。北京地区7个监测点污染期间细颗粒物浓度具有明显同步变化特征,说明在气象条件控制下污染变化的同步性;但又略有不同,位于北京北部郊区的定陵和

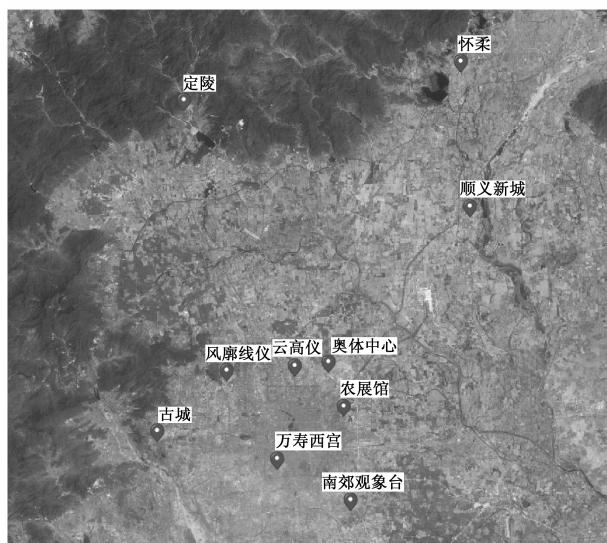


图1 北京地区大气环境和气象要素监测网格点分布

Fig. 1 Distribution of monitoring network for atmospheric environment and meteorological element in Beijing area

怀柔细颗粒物浓度整体上略低于其它 5 个站点,尤其在夜晚时段,浓度值低于其他站点,主要由于这两个站点为郊区站,无显著的排放源,而其他 5 站点在市区或近郊,冬季夜晚因采暖污染源排放较多,同时边界层高度较低,也抑制了污染的扩散。

图 2b 为 2 月 27 日和 28 日云高仪探测到的垂直方向上气溶胶后向散射分布情况。激光云高仪 CL31 通过测量气溶胶后向散射可反映颗粒物浓度的垂直分布特征以及混合层高度 (Schäfer et al., 2009)。由图 2b 可知,27 日 00:00 至 12:00,混合层的高度很低,300 m 左右,在混合层以下气溶胶后向散射值非常高,颗粒物主要集中在近地层,污染严重,与地面这一时段细颗粒物浓度高值相对应。到了 12:00 以后,颗粒物在垂直方向分布均匀并且大幅度降低,地面细颗粒物浓度也迅速降低,混合层高度高达 3.5 km 左右,污染物扩散状况非常

好。但 16:00 之后,近地面污染物浓度又开始累积,混合层高度降低到 500~1000 m 以下,颗粒物浓度增加,尤其在 28 日凌晨到 10:00 这段时间,混合层高度降到 300 m 以下,取暖的源排放和不利的扩散条件,共同导致污染物迅速累积增加,地面和近地层颗粒物浓度均达到峰值,霾污染及其严重;在 10:00 之后受沙尘暴影响,虽然近地面颗粒物浓度仍维持高值,但混合层高度上升到 1 km 左右,形成细粒子霾污染和粗粒子沙尘共同叠加的污染状况,细颗粒物浓度为 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,而 PM10 浓度值达到 $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上;28 日 15:00 后,随着大风过境,污染物又被清除,混合层高度升高。

3.2 地面环流形势和局地流场分析

第一次爆发增长 (21 日) 的污染特点为累积清除均较快,但峰值低于第二次 (28 日) 爆发增长。从 21 日 02:00 地面环流形势 (图 3a) 可知,北京

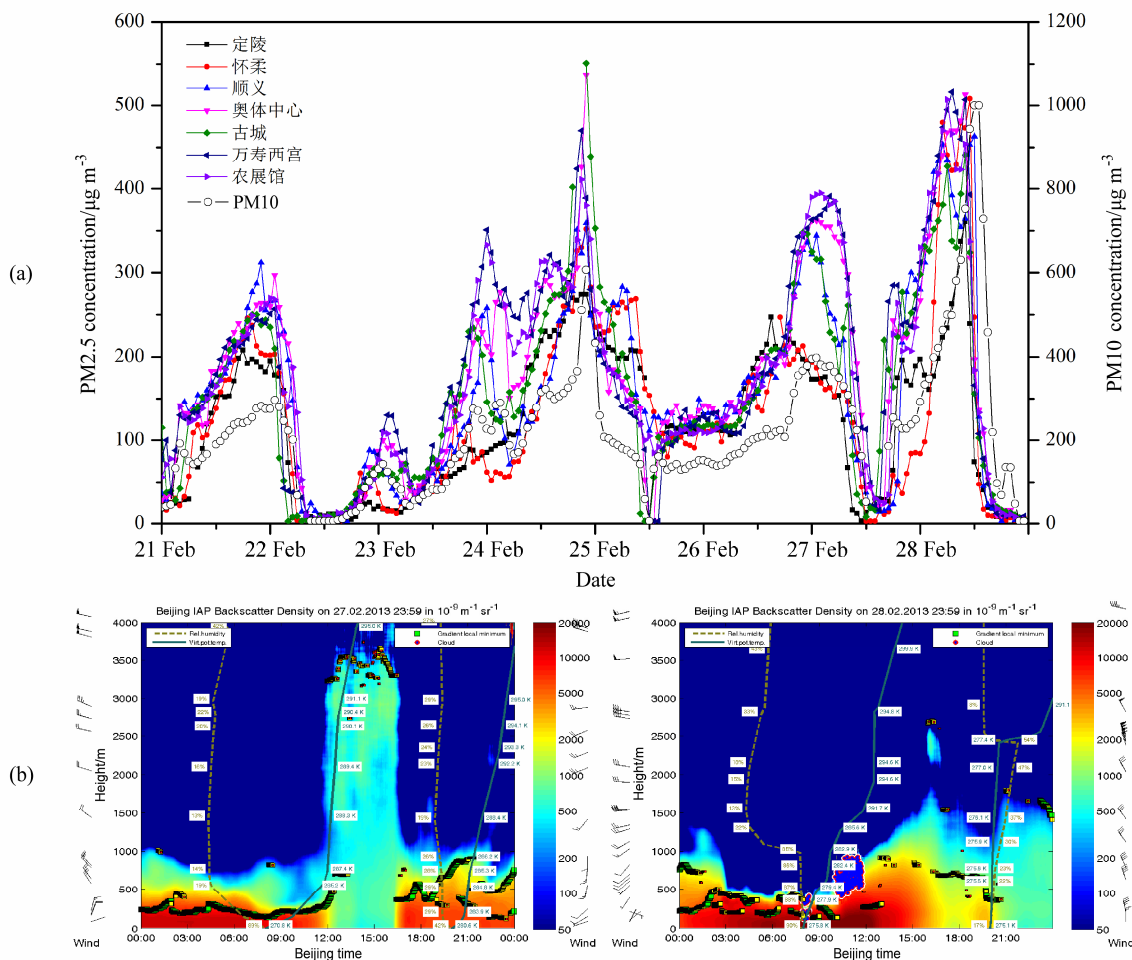


图 2 北京各站点 2013 年 2 月 (a) 21~28 日细颗粒物小时均值、(b) 27 和 28 日气溶胶后向散射系数垂直分布

Fig. 2 (a) Mass concentration of PM2.5 during 21~28 Feb 2013 at the stations in Beijing area and (b) vertical distributions of aerosol backscattering coefficients on 27 Feb and 28 Feb 2013

处于高压底部, 地面为偏东风控制, 偏东风的输送给污染物的形成带来了足够的水汽条件。第一次爆发增长过程中, 北京地面主要受弱高压场控制, 地面和低空风速较小, 有时地面出现静风, 伴有较强的辐射逆温和下沉逆温, 逆温层厚度大、强度高, 低层大气层结稳定, 不利于空气中细颗粒物的扩散和稀释, 形成了当天晚上爆发增长的污染峰值。由 22 日 02:00 地面环流形势(图 3b)可知, 北京地区

处在高压前部, 高压前部带来较强的偏北风, 使得北京的污染物疏散清除。

第二次爆发增长(28 日)的污染特点为累积清除均很迅速并且峰值高于第一次爆发增长。27 日 14:00, 低压系统东移至北京地区, 使其处于弱低压场控制。此时边界层低层引起弱上升气流, 使得细颗粒物在低空汇聚, 而近地面主要受西南风控制, 西南风输送不仅带来充足的水汽使得粒子急剧吸

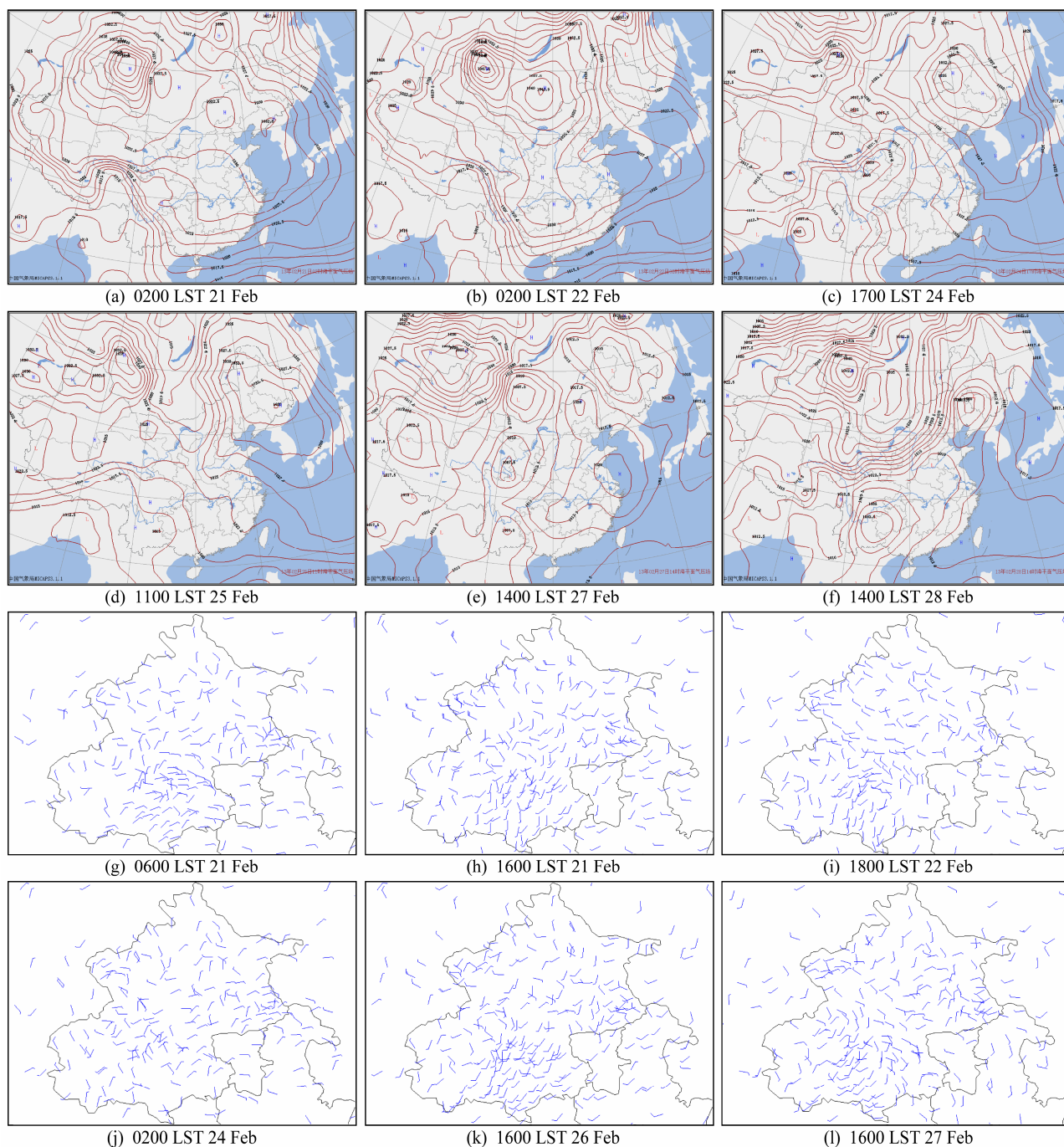


图 3 2013 年 2 月 21~28 日 (a-f) 海平面气压(单位: hPa)与 (g-l) 地面流场

Fig. 3 (a-f) The sea level pressure (hPa) and (g-l) surface stream during 21–28 Feb 2013

湿增长,而且会将区域高浓度污染物传输至北京,同时边界层上层的西南暖湿气流增强了平流逆温,形成细颗粒物在低空急剧输入汇聚以及不利于扩散的特征,北京地区细粒子平均峰值爆发性增长至 $445 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。28 日 14:00,较强的冷高压系统侵入北京,造成了当日下午的沙尘暴天气,使得 PM10 的浓度急剧增大,而沙尘暴伴随的大风则对细粒子迅速清除。

持续增长(23~27 日)的污染特点为缓慢累积后不完全清除再次增长并且持续时间较长。由图 3c 可知 23~24 日北京一直受均压场控制,无明显的高压或者低压系统影响。25 日 11:00 以后北京处于等压线密集区,气压梯度力大,城区出现短时间的降雪过程,对城区 4 个站点的污染物有所清除,其余 3 站污染维持,但冬季降雪并不能有效清除污染。并由于北京特殊的地理位置,北部燕山的阻挡,使得污染物无法疏散,仍大部分在北京停滞。25 日 20:00 以后,北京地面开始受弱高压场控制,使得污染物再次累积增加,造成了 27 日 01:00 的细颗粒物污染高值。之后受高压系统影响,在西北风作用下,污染物浓度迅速下降,在 27 日中午污染被有效清除。但短短 2 h 之后受东移低压影响,风向由北转南,从北京地区吹走的污染物,叠加北京以南地区排放的污染物,伴随静稳气象条件导致了 28 日爆发增长的重污染发生。

从图 3g-l 中可以看出,第一次爆发增长过程中,21 日 02:00 至 12:00 北京南部主要为弱的偏东风输送,而北部大部分地区为偏西以及东北风的输送,由于弱的偏东气流输送不会对污染物有明显清除反而会带来足够的水汽,给污染物的加速形成提供条件。这样的风场控制也是造成其余 5 个站点较怀柔 and 定陵细颗粒物浓度值高的一个重要原因。16:00 以后北京大部分地区转变为偏南风的输送,加上北部山区偏北风的汇聚,加速了污染物的形成累积,造成了第一次爆发增长的细颗粒物污染高值。22 日 06:00 后,北京地面流场转变成了较强西北风控制,将北京的细颗粒物从西北向东南方向输送,这也是 22 日 14:00 北京定陵和怀柔监测点比其它 5 个站点细颗粒物浓度值提前降低的一个原因。

第二次爆发增长过程中,短短 10 h 内细颗粒物浓度增长了 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右。由图 3l 可知,27 日 16:00 北京西南部地区为西南风输送,东南部

地区为东南风输送,北部山区为偏北风控制,北京成为风场汇聚中心。尽管 27 日上午的强西北风将北京地区的高浓度污染物驱散,但在这样风场的转变下,偏南气流将北京吹出的污染再送回,同时也输送了南部排放的污染物,叠加南风带来的高湿气象条件(相对湿度 90%),粒子吸湿增长显著,因此第二次爆发增长十分剧烈,不管从污染形成速度还是浓度高值看,都远高于第一次爆发增长。

在持续增长过程中,22 日 18:00 北京南部发生明显的风切变,由原来的偏北风转为偏南风,并且之后维持较长时间的偏南风。而北部地区则主要以偏北风为主,在山前有气流的汇聚,促进细颗粒物的增长。24 日 00:00 的一次污染降低过程则是由于偏北风的影响,08:00 以后北京主要风场又转变为了偏东风,与 21 日风场类似。但由于 24 日晚,正逢元宵佳节,大量烟花爆竹的燃放增加了北京的局地污染源,使得 24 日 22:00 细颗粒物的小时最高浓度值达到了 $406 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。25 日凌晨时分,北京地面流场转变为较强的东南风控制,清洁的海风对北京的细颗粒物浓度有所稀释,再加上 09:00 左右北京地区大范围的降雪,使得 25 日上午细颗粒物浓度有所降低。但由于北京西面山区的阻挡,使得气流输送停滞在北京,所以虽然个别站点因降雪细颗粒物得以清除,但多数站点还是维持在 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 左右,超过国家空气质量二级标准($>75 \mu\text{g}/\text{m}^3$)。26 日 16:00,北京地面流场又变为西南风控制,区域污染物的输送加上北京西南部一直停滞的细颗粒物,使得北京南部地区的细颗粒物浓度再次升高,峰值达到了 $310 \mu\text{g}/\text{m}^3$,而怀柔和定陵的细颗粒物浓度只上升到了 $221 \mu\text{g}/\text{m}^3$,比其余 5 个站点的最高污染浓度低了约 $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。27 日 08:00 北京地面出现较强的西北风,使得污染物得以清除。

由此可见,北京地区在局地源影响不大的情况下,加上弱低压场或弱高压场的影响,南部偏南或偏东风加上北部山前偏北风的控制往往会造成污染物汇聚、积累,由于偏南气流同时富含水汽和气态污染物,在北京山前地区积聚的同时,通过物理、化学过程转化,细颗粒物浓度会进一步升高,是造成北京细颗粒物爆发性增长的重要原因。而均压场的控制和持续的偏南气流输送往往会造成细颗粒物持续多天的增长,偏西或偏北气流的输送则会一定程度上对污染起到消散的作用。

3.3 边界层结构及气象要素分析

3.3.1 边界层结构分析

由风廓线资料(图 4)可知,第一次爆发增长过程中,21 日 08:00 至 23:00 600 m 以下低层风速都较低,最高风速只有 2 m/s,600 m 以上高空 13:00 之前为西南风控制,之后转变为持续的西北风控制。13:00 至 20:00 在 600 m 左右出现风切变,上层为干冷的西北风,下层为暖湿的西南风,这样的风场结构容易促进 600 m 层结处水汽的增多,加速细颗粒物的生成,从而导致了第一次爆发增长的发

生。而第一次爆发增长的清除则是由于 22 日凌晨 01:00,500 m 以下的西南风逐渐转变为较强的西北风,整个边界层都变为较强的西北风控制,使污染物得以扩散清除。

第二次爆发增长开始前,整个边界层的风速开始变小,低层基本为静风。27 日 16:00 低层出现西南风,而 500 m 以上层结出现了较强的风切变,由原来的西北风控制切变成了东南风控制,此切变过程易带来暖湿气流,促进了细颗粒物的急剧生成。而 27 日 12:00 至 16:00 的两次边界层风场的变化过

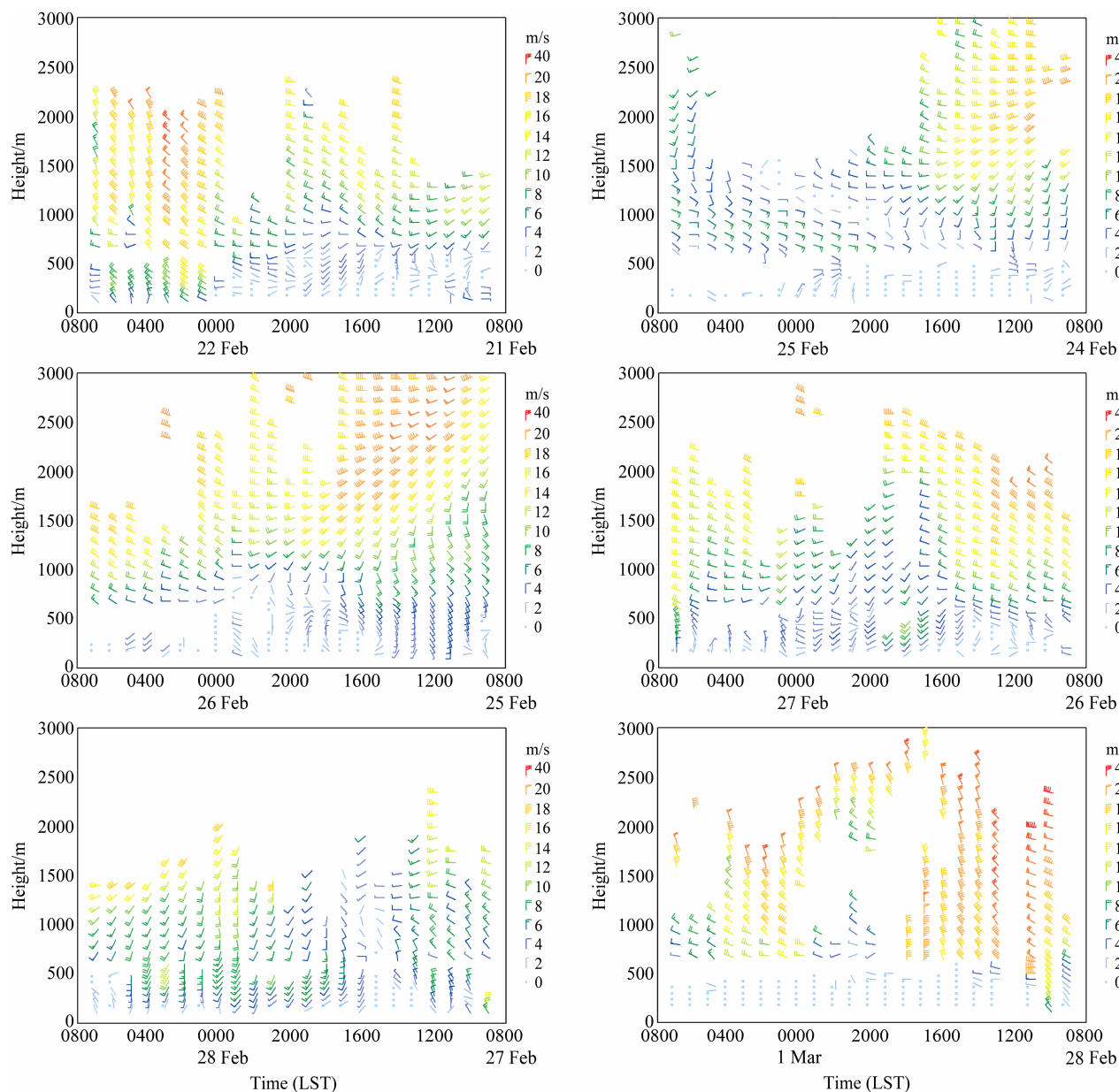


图 4 2013 年 2 月 (a) 21 日 08:00 至 22 日 08:00、(b) 24 日 08:00 至 25 日 08:00、(c) 25 日 08:00 至 26 日 08:00、(d) 26 日 08:00 至 27 日 08:00、(e) 27 日 08:00 至 28 日 08:00、(f) 2 月 28 日 08:00 至 3 月 1 日 08:00 细颗粒物污染过程中典型边界层风廓线图

Fig. 4 Wind profiles during (a) 0800 LST 21 Feb–0800 LST 22 Feb, (b) 0800 LST 24 Feb–0800 LST 25 Feb, (c) 0800 LST 25 Feb–0800 LST 26 Feb, (d) 0800 LST 26 Feb–0800 LST 27 Feb, (e) 0800 LST 27 Feb–0800 LST 28 Feb, (f) 0800 LST 28 Feb–0800 LST 1 Mar 2013

程,促使了污染物的再次增长与积聚。另外,27日16:00 边界层低层为西南风控制,中低空(500~1000 m)为东南风控制,这样的垂直风场控制促使了高低空污染物的混合,加重了第二次爆发增长的污染程度。28日08:00,整个边界层的偏南风迅速转变为较强的西北风控制,而且风速迅速由平均1.6 m/s 增大到平均6.0 m/s,瞬时风速高达8.2 m/s。该次沙尘过程将北京雾霾吹走,随之带来了大量的浮尘使得北京天空由灰霾转为黄沙密布,但是到12:00 随着低层风的减弱天空转换为晴空。

持续增长过程中,24日08:00 至次日08:00 北京低层为持续的弱东风控制,并且经常出现静风。18:00 左右中低空出现明显的风切变,下层为东南风控制,上层为西北风控制。此为一个较强的顺时针方向的暖湿风切变,给北京中低层结带来了充足的暖湿气流,促进了二次气溶胶的生成,从而导致了细颗粒物浓度的增长。同时24日上午高层较强的西南风带来了高浓度的污染物以及局地烟花爆竹的燃放,加上此时地面高压系统出现的下沉气流,将高层的污染物输送至地面,造成了夜间污染物浓度的高值。25日上午的大范围降雪加上低层较强的东南清洁海风控制,使得凌晨时污染物浓度大幅度下降。尤其是11:00 低层的东南风突然加强,对污染物有所稀释,使得北京南部地区出现了短时间的细颗粒物浓度低值。25日下午至26日上午,高层由强的西南风转变为西风控制,再进一步逐渐转为西北风的偏西风配置。这种结构的演变减缓了污染过程中污染物浓度的上升和下降的速度,是造成污染过程持续维持的一个原因。而另一个原因则

是较强东南风对污染物的稀释受北京西北面山区的阻挡,使得污染物仍停滞在北京地区。26日14:00 之前,低层为弱风,500 m 以上层结为持续的西北风控制。14:00 之后,低层出现大于3 m/s 西南风,500 m 以上层结出现风切变,由原来的西北风转变为统一的西南风控制。这样的风场变化再次促使了细颗粒物的累积增长,最终在27日00:00 左右达到了细颗粒物浓度的峰值,从图2b 中也可以看出气溶胶的后向散射在低空很显著。27日01:00,低层的西南风逐渐转变为了西北风,高层也慢慢转变为西风,最终整个层结都变为较强西北风控制,对污染物有明显的清除。

综上所述,当中低层出现较强的风切变,一种为垂直方向表现为低层东南风或者西南风,高层西北风控制,另一种为水平方向随时间由西北风切变为东南风控制,这两种风场的切变都易造成相对湿度的增加,形成促进污染物爆发性增长的有利条件。当低层为持续的偏东或偏南风控制,高层为偏西风的控制,易造成污染物的持续累积,是污染物持续累积发展的重要原因。但一旦中低层出现较强的风切变,则会出现污染物的爆发性增长。

从图5的温湿廓线可以看出,两次污染爆发性增长和一次持续污染增长阶段,边界层都存在明显的逆温层,并且从相对应的湿度廓线也可以看出,由于逆温的存在,使得低空的水汽难以输送到高空,近地面形成了高湿层,且混合层高度很低,促使了污染物的累积和吸湿增长。云高仪的数据也显示了污染时段,混合层高度较低,维持在低空400 m 左右。21日高空700 m 和26日高空600 m 处都出

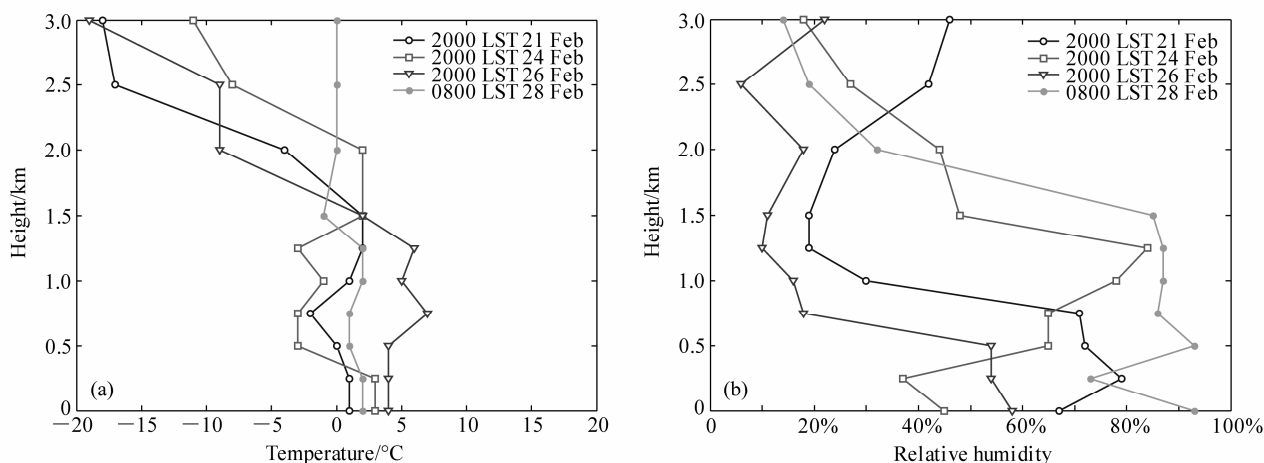


图5 2013年2月21日20:00、24日20:00、26日20:00和28日08:00温度和相对湿度的垂直廓线

Fig. 5 The profile of temperature and relative humidity at 2000 LST 21 Feb, 2000 LST 24 Feb, 2000 LST 26 Feb, and 0800 LST 28 Feb 2013

现了较强的逆温现象,逆温层较厚,抑制了污染物的扩散。相对应的湿度廓线也在这两个时刻出现了切变,低空的水汽一直积累在近地面并持续增加,为细粒子吸湿增长提供了很好的增长条件,是污染物爆发性增长和持续累积增长的重要原因。

3.3.2 气象要素分析

在分析地面环流形势和局地流场的演变基础上,讨论局地气象要素的变化对大气污染的影响,进一步探讨细颗粒物重污染过程的气象成因。由图 6a 可知,4 次污染高值都对应了相对湿度的高值。第一次爆发增长过程中,21 日当天相对湿度维持在 40%以上,夜晚最高值 90%对应了污染的高值。第二次爆发增长过程中的相对湿度则在 22 h 内从 10%增长到 90%。而当日的沙尘过程西北的干冷气团入侵北京地区,本身气团相对湿度很小,造成 28 日 12:00 相对湿度降低至 10%左右。持续增长过程中,相对湿度一直持续增加,从原来的 10%增加到 85%,25 日当天相对湿度日均值达到了 64%。而 26~28 日夜间(00:00 至 08:00)的相对湿度都维持在 70%左右,28 日从 09:00 相对湿度开始下降,10:00 左右下降到 20%以下,并长时间维持。而 24 日元宵节之夜大量烟花爆竹燃放的气溶胶对大气中的水汽有所吸收,使得当晚大气相对湿度下降约为 20%。因此,较高的相对湿度是促进细颗粒物污染物生成的重要条件,所以相对湿度的增加,加上局地源的增多,往往会形成细颗粒物重污染的状况。

两次爆发增长过程都对应了较低的风速,甚至出现静风天气,并且地面风向主要以偏南风为主。偏南风的影响不但会带来暖湿气流,还会随之带来较高浓度的污染物。而清除过程则对应了较大的风速,最高风速可达 7 m/s,地面风向主要为西北风或者东北风。持续增长过程中,风速也一直很小,平均风速小于 1.5 m/s,地面主导偏南风。由此可见,较低的风速和偏南风的控制会使得污染物在北京停滞生成并且很难输送出去,导致了污染天的出现。而较大的风速则对污染物有清除作用,尤其是偏北风控制下,使得污染物完全从北京地区疏散清除。

结合污染时段区域气压的变化和天气形势图 3a-f 可以看到,第一次爆发增长开始前,北京地面受弱高压控制,高压系统带来垂直方向的下沉运动,使得污染物难以扩散出去,并将高空的污染物输送至低空,在低空汇聚累积。而 21 日 12:00 以后

原来的弱高压系统被一个短时间的低压系统所代替,低压辐合系统带来足够的水汽,使原来就难以扩散而积累的污染颗粒物继续发展,生成了更多更高浓度的污染物,造成了第一次爆发增长的污染峰值。第二次爆发增长则是由于低压系统对北京地区的影响,气压一直保持着降压的过程,使得地面形成一个大气辐合系统,提供了充足的水汽,促使了污染物的形成和累积。持续增长过程中,北京地面主要受均压场控制,大气压维持在 1025 hPa 左右,平均风速维持在 1.5 m/s 以下。

从温度曲线的变化,还可以看出 23 日、27 和 28 日的日夜温差都较大(为 10 °C 左右)。强的温度日较差(一天中气温最高值与最低值之差)会导致夜间出现强辐射逆温层,形成稳定的边界层结构,有利于夜间污染物的积累,形成污染的爆发性增长。

表 1 风速和相对湿度与细颗粒物浓度的相关统计

Table 1 The relationship statistics of wind speed and relative humidity with mass concentration of PM_{2.5}

	细颗粒物浓度		
	<75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	75~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	>150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
风速	2.5 m/s	1.5 m/s	0.9 m/s
相对湿度	29%	65%	62%

从图 7 可以看出,细颗粒物浓度小于 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,相对湿度都在 40%以下。而当相对湿度大于 40%以后,细颗粒物浓度和相对湿度有一定的线性增加趋势。相对湿度为 45%左右时,细颗粒物浓度出现了几个高值,此为 24 日(元宵节)之夜大量烟花爆竹燃放粒子的局地点源,使得相对湿度在 45%时造成了细颗粒物高浓度。图中还可以看出,风速很大时对应的细颗粒物浓度较低,而当风速较小时对应的细颗粒物浓度有高有低。当较小的风速对应较低的相对湿度时,细颗粒物浓度低;而当较小的风速对应较大的相对湿度时,细颗粒物浓度则较大。

从表 1 中可以看出,当污染物浓度小于 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,风速平均为 2.5 m/s,相对湿度在 29%左右;当污染物浓度在 75~150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,风速平均为 1.5 m/s,相对湿度平均为 65%;当污染物浓度大于 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,风速平均为 0.9 m/s,相对湿度仍保持在 62%,而去除元宵节局地点源排放,相对湿度则为 71%。由此可见,较低的风速和较高的相对湿度往往会形成细颗粒物的重污染天,而较低的相对湿度或较大的风速对应的是清洁天。

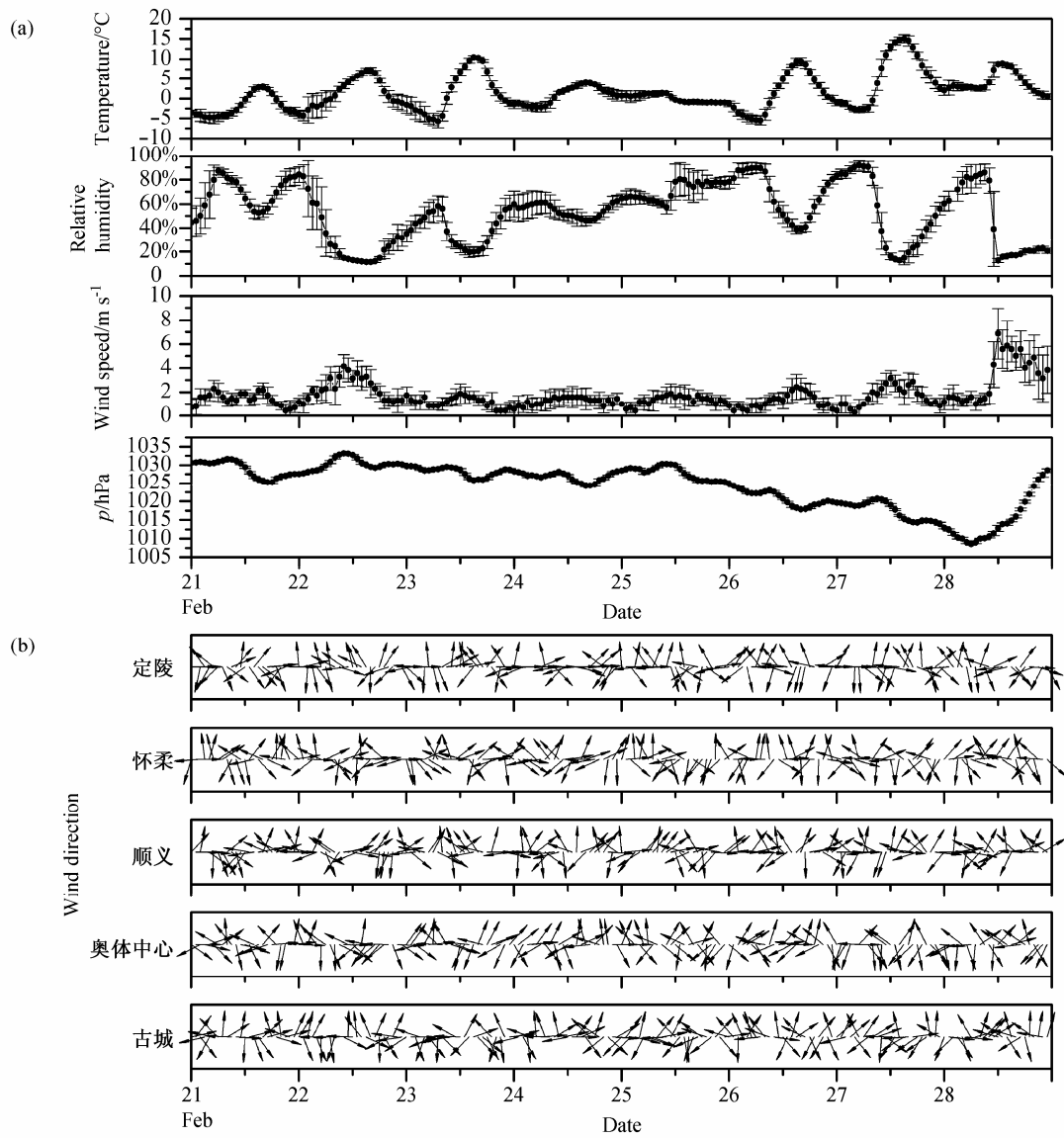


图 6 2013 年 2 月 21~28 日温度、相对湿度、风速和气压的变化曲线以及 5 个站点风向的演变过程
Fig. 6 Variations of the temperature, relative humidity, wind speed, air pressure, and wind direction at five stations during 21–28 Feb 2013

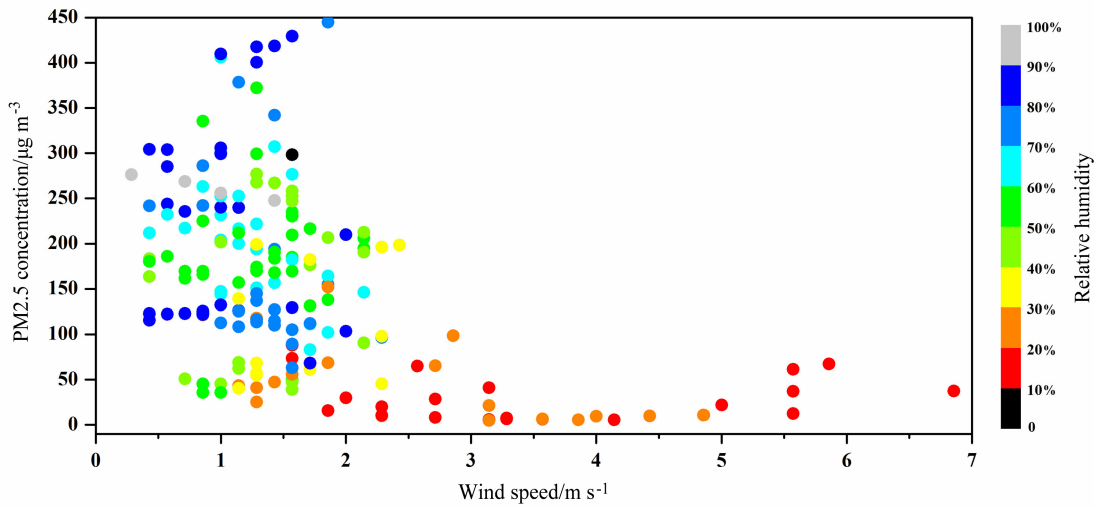


图 7 2013 年 2 月 21~28 日细颗粒物浓度与风速和相对湿度的关系
Fig. 7 Relationships of mass concentration of PM_{2.5} with wind speed and relative humidity during 21–28 Feb 2013

4 结论

通过对 2013 年 2 月 21~28 日北京地区典型重霾污染过程细颗粒物浓度、不同尺度环流形势以及边界层结构特征变化的分析研究, 得出以下结论:

(1) 当北京地面受弱高压场或弱低压场控制时, 容易发生爆发性重霾污染; 均压场控制则会形成多天持续污染; 当北京处在高压前部, 较强的偏北风可快速将污染物疏散清除。

(2) 当西南气流与东南气流在北京地区交汇时, 有助于北京霾污染爆发性增长, 持续弱偏南高湿气流输送易造成长时间持续污染。

(3) 北京地面低风速、高湿度会造成细颗粒物迅速累积增长, 辐射逆温有利于稳定边界层的形成, 是细颗粒物爆发性增长的有利条件。

(4) 低空顺时针垂直风切变带来暖湿气流, 促使低空细颗粒物汇聚成霾; 当低层持续被偏东或偏南风控制、高层被偏西风控制时, 污染物垂直扩散被限制, 强霾污染过程维持。

致谢 感谢中国环境监测总站以及中国气象局为本研究分别提供颗粒物数据和气象数据。

参考文献 (References)

- 陈朝晖, 程水源, 苏福庆, 等. 2007. 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, 20 (2): 99–105. Chen Zhaohui, Cheng Shuiyuan, Su Fuqing, et al. 2007. Analysis of large-scale weather pattern during heavy air pollution process in Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 20 (2): 99–105.
- Cheng C S, Campbell M, Li Q, et al. 2007a. A synoptic climatological approach to assess climatic impact on air quality in south-central Canada. Part I: Historical analysis [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 182 (1–4): 131–148.
- Cheng C S, Campbell M, Li Q, et al. 2007b. A synoptic climatological approach to assess climatic impact on air quality in south-central Canada. Part II: Future estimates [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 182 (1–4): 117–130.
- Cheng S Y, Chen D S, Li J B, et al. 2007c. The assessment of emission-source contributions to air quality by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ modeling system: A case study in the Beijing metropolitan region, China [J]. Environmental Modelling and Software, 22 (11): 1601–1616.
- Davis R E, Kalkstein L S. 1990. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations [J]. Physical Geography, 11 (4): 320–342.
- 樊文雁, 胡波, 王跃思, 等. 2009. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 631–638. Fan Wenyan, Hu Bo, Wang Yuesi, et al. 2009. Measurements on the vertical distribution of PM_{2.5} concentration in fog and haze days in Beijing city [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 631–638.
- Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. 2009. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area [J]. Theoretical and Applied Climatology, 95 (3–4): 265–277.
- Greene J S, Kalkstein L S, Ye H, et al. 1999. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities [J]. Theoretical and Applied Climatology, 62 (3–4): 163–174.
- 康娜, 辛金元, 蔺永耀, 等. 2009. 北京山前典型细粒子污染过程的气象条件分析 [J]. 环境科学研究, 22 (9): 1013–1020. Kang Na, Xin Jinyuan, Lin Yongyao, et al. 2009. Meteorological condition analysis of a typical fine particle pollution event in the piedmont region of Beijing [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 22 (9): 1013–1020.
- 李令军, 王英, 李金香, 等. 2012. 2000~2010 北京大气重污染研究 [J]. 中国环境科学, 32 (1): 23–30. Li Lingjun, Wang Ying, Li Jinxiang, et al. 2012. The analysis of heavy air pollution in Beijing during 2000–2010 [J]. China Environmental Science (in Chinese), 32 (1): 23–30.
- 任阵海, 万本太, 虞统, 等. 2004. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平场输送 [J]. 环境科学研究, 17 (1): 7–13. Ren Zhenhai, Wan Bentai, Yu Tong, et al. 2004. Influence of weather system of different scales on pollution boundary layer and the transport in horizontal current field [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (1): 7–13.
- Schäfer K, Wang Y S, Münkel C, et al. 2009. Evaluation of continuous ceilometer-based mixing layer heights and correlations with PM_{2.5} concentrations in Beijing [C]// SPIE Europe Remote Sensing. International Society for Optics and Photonics, 74750N-74750N-12.
- 苏福庆, 杨明珍, 钟继红, 等. 2004. 华北地区天气型对区域大气污染的影响 [J]. 环境科学研究, 17 (3): 16–20. Su Fuqing, Yang Mingzhen, Zhong Jihong, et al. 2004. The effects of synoptic type on regional atmospheric contamination in North China [J]. Research of Environmental Sciences (in Chinese), 17 (3): 16–20.
- Tai A P K, Mickley L J, Jacob D J. 2010. Correlations between fine particulate matter (PM_{2.5}) and meteorological variables in the United States: Implications for the sensitivity of PM_{2.5} to climate change [J]. Atmospheric Environment, 44 (32): 3976–3984.
- 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. 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.
- 王继志, 杨元琴, 李怡, 等. 2012. 北京 PM_{2.5} 浓度变化的气象条件 PLAM 指数诊断和预测研究 [C]// S6 大气成分与天气气候变化. 北京: 中国气象学会. Wang Jizhi, Yang Yuanqin, Li Yi, et al. 2012. Study of Diagnose and Prediction on Meteorological Condition PLAM index with PM_{2.5} concentrations in Beijing [C]// S6 Atmospheric Composition and Weather Climate Change (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Society.
- 王金南, 宁淼, 孙亚梅, 等. 2013. 改善区域空气质量 努力建设蓝天中国——重点区域大气污染防治“十二五”规划目标、任务与创新 [J].

- 环境保护, 41 (5): 18–21. Wang Jinnan, Ning Miao, Sun Yamei, et al. 2013. Improve regional air quality, strive to build a blue sky Chinese—The regional air pollution prevention and control of “twelfth five-year” planning objectives, tasks, and innovation [J]. Environmental Protection (in Chinese), 41 (5): 18–21.
- 王璟, 伏晴艳, 王汉峥, 等. 2008. 上海市一次罕见的连续 11 天空气污染过程的特征及成因分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 53–60. Wang Jing, Fu Qingyan, Wang Hanzhen, et al. 2008. Study on an infrequent multi-day air pollution episode in Shanghai [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 53–60.
- 王莉莉, 王跃思, 王迎红, 等. 2010. 北京夏末秋初不同天气形势对大气污染物浓度的影响 [J]. 中国环境科学, 30 (7): 924–930. Wang Lili, Wang Yuesi, Wang Yinghong, et al. 2010. Relationship between different synoptic weather patterns and concentrations of atmospheric pollutants in Beijing during summer and autumn [J]. China Environmental Science (in Chinese), 30 (7): 924–930.
- 王跃思, 姚利, 刘子锐, 等. 2013. 京津冀大气霾污染及控制策略思考 [J]. 中国科学院院刊, 28 (3): 353–363. Wang Yuesi, Yao Li, Liu Zirui, et al. 2013. Atmospheric haze pollution and the control strategy thinking in Beijing–Tianjin–Hebei Province [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences (in Chinese), 28 (3): 353–363.
- 于新. 2012. 国家颁布空气质量新标准 [J]. 环境, (3): 25. Yu Xin. 2012. New air quality standards of the Country [J]. Environment (in Chinese), (3): 25.