

文章编号: 2096-1618(2017)04-0419-07

北京地区一次持续重污染过程的气象成因分析

鞠诗尧¹, 张小玲², 范广洲^{1,3}, 孙兆彬², 李梓铭²

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室气候与环境变化联合实验室, 四川成都 610225; 2. 京津冀环境气象预报预警中心, 北京 100892; 3. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

摘要:为揭示北京一次持续重污染过程的气象成因,利用北京地区常规及特种气象资料、风云二号 C 卫星数据及 PM_{2.5} 观测资料,分析了高低空环流形势、局地气象要素的动力和热力结构对其的影响。结果表明:过程期间,高空以西北或偏西气流为主,地面受高压后部弱气压场和低压辐合区控制;地面呈现小风或静风的状态;850 hPa 以下相对湿度维持在 80 % 以上;存在多层逆温且维持时间长;不利于污染物扩散的气象条件是 PM_{2.5} 前期积累的主因,而局地环流所形成的风场辐合线北抬是 PM_{2.5} 浓度在后期短时内爆发性增长的关键因素。

关键词:大气物理学与大气环境;大气污染;持续重污染;爆发性增长;气象条件

中图分类号: P401

文献标志码: A

doi: 10. 16836/j. cnki. jcuit. 2017. 04. 012

0 引言

随着国民经济的快速增长和工业化、城市化进程的加快,中国环境问题日益突出。在中国诸多环境问题中,大气污染问题较为严重。由于产业结构的改变,目前中国大气颗粒物污染形势严峻,当今主要城市的雾霾已经不完全是自然现象,气溶胶污染日趋严重已变成雾霾天气频率增大的主因^[1]。

排入大气中的污染物主要来源于自然排放和人类活动的排放^[2-3]。而在一段时期内,自然排放和人类活动排放的污染物总量是大致稳定的,在不同的气象条件下,同一污染源排放所造成的地面污染物的稀释扩散能力随着气象条件的不同而发生巨大变化,这说明,气象条件是决定性的控制因素之一^[4-8]。研究表明,导致霾天气的大气污染物主要聚集在边界层内^[9],因此边界层结构中的风、温、湿等各个气象要素不同的梯度分布也对污染物的汇聚、扩散和输送起到了重要的作用^[10-12]。通常,在地面附近为小风或静风等不利于污染物水平扩散的条件下容易出现严重污染;不能够抵达地面的下沉运动被认为是一种不利于污染物垂直扩散的气象条件,当京津冀秋冬季的雾霾天气发生时,逆温层高度较低,下沉运动一般在逆温层以上^[13];此外,当对流层底层存在逆温层,大气处于稳定状态,同样会限制污染物的垂直扩散^[14-15];由于一些气溶胶具有很强的吸湿性,因此大气湿度近饱和状

态时,干气溶胶粒子吸湿增长并活化成凝结核参与雾滴的形成,导致有时出现雾-霾转换、雾-霾混合的情况^[16-17]。除了受气象背景场、排放源结构、大气化学演变等因子影响外,从区域的角度来分析北京地区空气污染与华北区域性流场的输送关系也尤为重要^[18-25],苏福庆等^[18]提出,太行山山前,燕山山前常年存在输送汇,输送汇使得地面流场形成一条狭长的风场辐合线,风场辐合线的摆动常造成华北平原及北京地区区域大气污染物汇聚,是形成重污染区的主要形式。

对于目前已有大气污染研究中,针对气象条件和地面流场形成的风场辐合线相结合来分析探讨二者对于污染过程的分析较少,而对重污染过程中污染物浓度爆发性增长的成因分析更是缺乏。所以本文利用相关观测资料,在京津冀区域重污染背景下,从边界层动力和热力结构的角度,对本次重污染过程中风场辐合线和气象条件对 PM_{2.5} 浓度爆发性增长及空间分布进行研究分析,为重污染天气的预报、预警和污染防控治理提供依据。

1 资料与方法

研究使用了气象站地面观测数据、微波辐射计、风云二号 C 卫星云量观测数据、风廓线雷达探测资料和 L 波段雷达秒探空连续观测资料。其中,微波辐射仪设在北京大兴的观象台,有 12 个通道。垂直探测高度 10 km,温湿廓线的分辨率为 0.1 ~ 1 km,时间分辨率

为1 min。风廓线雷达位于海淀气象站,是一部频率为1290 MHz、探测高度3500 m的边界层雷达,测风资料的垂直分辨率50 m,时间间隔6 min。

气溶胶浓度来自观测范围内环境监测站,采用美国的 1400a Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) 仪器观测,数据时间分辨率为5 min,并且使用极值法、连续性和多物理量相关判定对比等方法对数据质量进行了控制。

2 结果与分析

2.1 PM_{2.5}浓度变化趋势分析

图1是由分布在北京、保定、天津各区域的91个环境监测站点监测到的PM_{2.5}逐时浓度做出的各市质量浓度逐时平均。结合《环境空气质量标准》(GB3015-2012)可以看出,这是一次持续5 d的重度-严重区域污染过程。值得注意的是,在30日前,三市的PM_{2.5}质量浓度趋势整体保持一致,而30日北京PM_{2.5}质量浓度变化异于其他两地,PM_{2.5}质量浓度出现了大幅度波动(图1方框)。此次过程中北京地区PM_{2.5}质量浓度的演变特征是:重污染过程初期,PM_{2.5}质量浓度逐时增加为累积增长阶段,由11月26日19时-11月27日12时,经过17 h PM_{2.5}已增至186 μg·m⁻³以上;第2阶段为PM_{2.5}高浓度维持阶段;第3阶段为PM_{2.5}质量浓度波动阶段,有骤降-激增现象,在30日07时至19时,PM_{2.5}浓度由54 μg·m⁻³跃升至527 μg·m⁻³,12 h内增长近10倍(北京平均),北京城区多个站点PM_{2.5}浓度突破600 μg·m⁻³,12月1日13时之后,PM_{2.5}浓度逐渐下降,到12月2日04时基本结束。

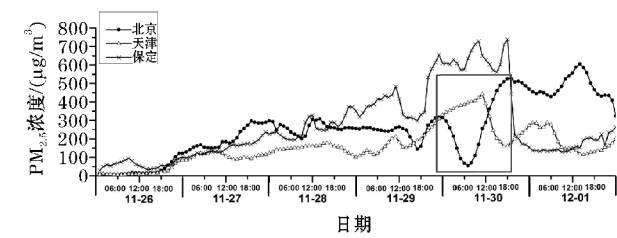
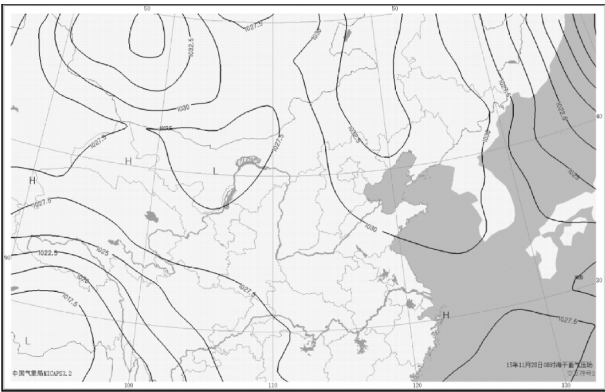


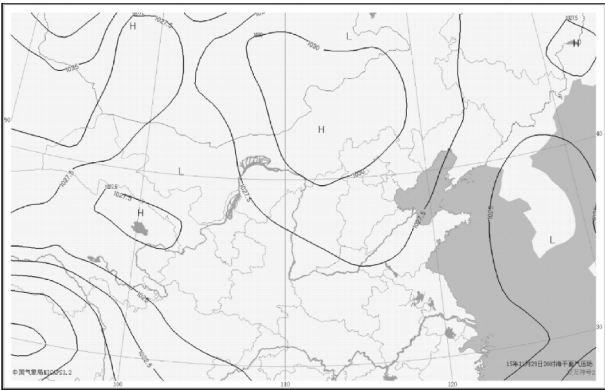
图1 2015年11月26-12月1日北京、保定、天津PM_{2.5}逐时质量浓度变化

2.2 大气环流背景分析

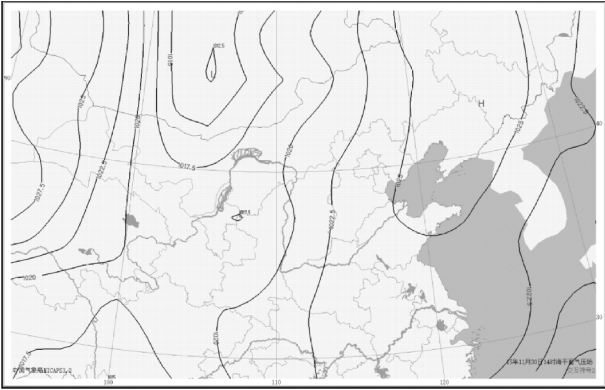
天气形势决定了气象要素的分布和变化,继而决定了大气的扩散能力与大气稳定程度以及污染物的空间分布和区域性特征^[26-28]。由地面天气形势(图2)



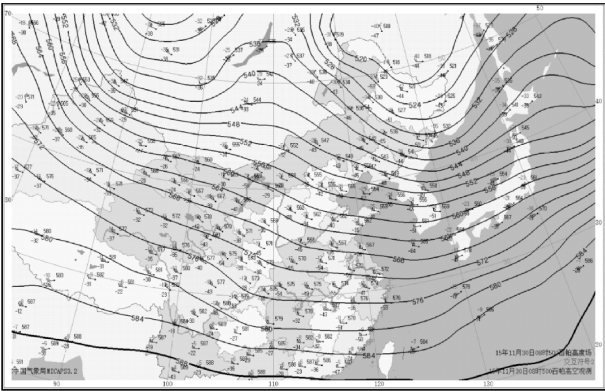
(a)2015年11月28日08时海平面气压场



(b)2015年11月29日20时海平面气压场



(c)2015年11月30日14时海平面气压场



(d)2015年11月30日08时500 hPa高度场

图2 天气形势

可知,11月27–28日白天北京地区受高压后部弱气压场控制,28日夜后至29日上午转受低压辐合区影响,29日午后低压辐合区东移入海,北京北部出现弱高压,入夜后此高压向东移动并有所南压,北京受此高压影响,近地层大气加压,东北方向弱冷空气南下影响除城南以外的大部分地区,为后期风场辐合线北抬提供环流背景。30日白天高压东移,北京再度处于高压后部,京津冀平原地区偏南风加强,30日夜后至12月1日白天北京地区由高压后部转受低压辐合区影响,扩散条件进一步转差。从500 hPa高空图可知,27日至30日北京受西北或偏西气流影响,其中28日夜北京北部有高空槽过境,12月1日北京受深厚的高空槽前偏南气流影响。从850 hPa温压场,可以看到,27日北京上空受偏西风和偏北风影响,28日北京上空转为偏南风影响,出现明显的暖平流,28日夜北京上空有高空槽过境,29日为西北风,有弱冷平流,但850 hPa无明显降温,30日至12月1日京津冀地区上空转为一致的偏南风,风速增大,再次出现明显暖平流。12月1日夜受西北方向冷空气影响,北京地区扩散条件自西北向东南转好,有利于空气污染物扩散和清除,此次重污染过程结束。

2.3 垂直扩散条件

气溶胶在某地上空长时间停留并最终达到一定的浓度还取决于近地面层水平风的分布^[29],研究使用L波段雷达风廓线资料来讨论重污染持续期间北京上空风的分布及逐3小时演变。由图3可知,重污染过程初期(27日),0.6 km高度以下的风速明显减小,地面附近的风速基本在 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右或以下。该期间污染物浓度快速上升白天低层以西南风为主,风向随高度增大顺转为较一致的西北风,有明显的风切变,且切变位置也有变化,中午切变位置最高可达1.6 km。而至下午切变位置主要位于0.75 km左右,这与高空的下沉气流抑制了地面的污染物向上传输扩散有关,也是28、29日污染浓度在一定范围内稳定维持而没有持续上升的原因之一,夜间低层以偏东风为主,高层以偏西风和西北风为主。在高浓度维持阶段中,28日白天低层以东北和偏东风为主,高层以西南和偏西风为主,夜间低层则转为以西南风为主,高层以偏西风为主,1 km高度以下的风速基本维持在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,地面基本呈现小风或静风状态,有利于维持初期达到的较高浓度的污染水平;29日08时开始1 km高度以下的风速明显增大,且垂直方向上转为一致的西北风,风速出现起伏,说明近地面存在较小尺度的湍流,这与冷空气入侵有关,夜间高层转为偏西风,18时后0.6 km以

下最大风速可达 $3 \sim 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,对该期间污染物浓度大幅度下降有贡献。30日00时前后1 km高度以下风速再次出现了波动,降至 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右或以下,且风向从地面至2 km转为一致的西南风,这为07时后污染物浓度激增提供了有利的动力条件,这种有利于污染物浓度输送、汇聚及累积的状态一直维持到12月1日11时,11时后从地面至高空逐渐转为一致的西北风,过程结束。

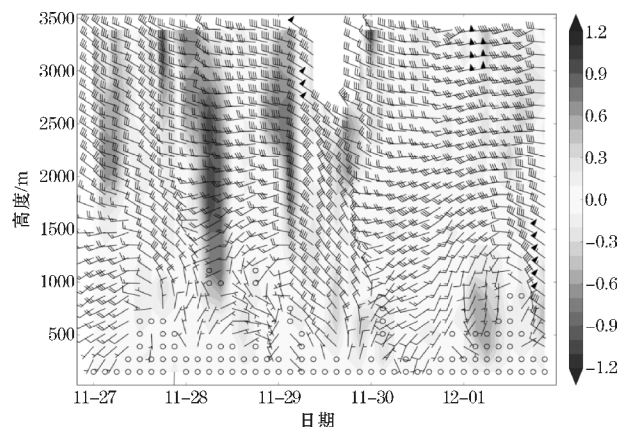


图3 重污染过程期间风廓线和垂直速度
(每日间隔3 h取1次,阴影代表垂直速度)

使用北京观象台微波辐射仪和L波段雷达秒探空连续观测资料统计得到了温湿垂直结构(图4)。加密观测资料表明,在这次持续重污染过程中(图4a),近地面层相对湿度维持在较高的水平,最高相对湿度超过了90%。从相对湿度垂直结构来看,本次过程可以分为3部分:29日12时前属于本次重污染过程的初期及维持阶段,可以看到相对湿度的垂直结构呈现随高度递增状态,从地面至高层分层明显。0.25~1.5 km相对湿度维持在56%~74%。29日18时至30日06时,相对湿度整层下降,加之29日的冷空气入侵,使得北京地区污染物浓度得到一定的清除。30日06时直至过程结束,850 hPa以下相对湿度维持在80%以上,这样的高湿条件有利于气溶胶的吸湿增长、污染物的聚集和二次转化,使 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度增加^[30],而重污染的形成使到达地面的辐射减少,大气层结稳定度增加,从而进一步使大气污染物不断地累积和汇聚,这样正反馈的恶性循环使重污染过程维持并加剧^[31]。值得注意的是,污染物浓度爆发性增长过程中整层的相对湿度,尤其是地面的相对湿度远高于30日前,这也是污染物浓度增幅明显大于初期的原因之一。

逆温是影响层结稳定和空气质量的重要气象条件,逆温层的厚度和强度是使污染物浓度增长和维持的主要原因之一^[32]。从图4(b)、4(c)可知:整个污染过程中北京呈现多层逆温共存的现象,逆温的垂直分布呈现:贴地逆温、低空逆温、高层逆温的分布状态,其

中强度较大的是低空逆温。27~29 日白天,逆温层一般出现在0.5~0.8 km,强度不大,由于垂直方向上整体呈现几近等温的状态,有利于污染物在高湿静风的状态下累积;夜间会出现多层逆温,强度比白天大。30 日除保持多层逆温外,无论是白天还是夜间逆温强度和逆温维持时间都高于前一个时段,更有利于大气层结的稳定,进而不利于污染物的垂直扩散。12 月 1 日白天呈现高层逆温、低层等温的状态,大气层结稳定,有利于维持由 30 日污染物浓度激增达到的严重污染水平。

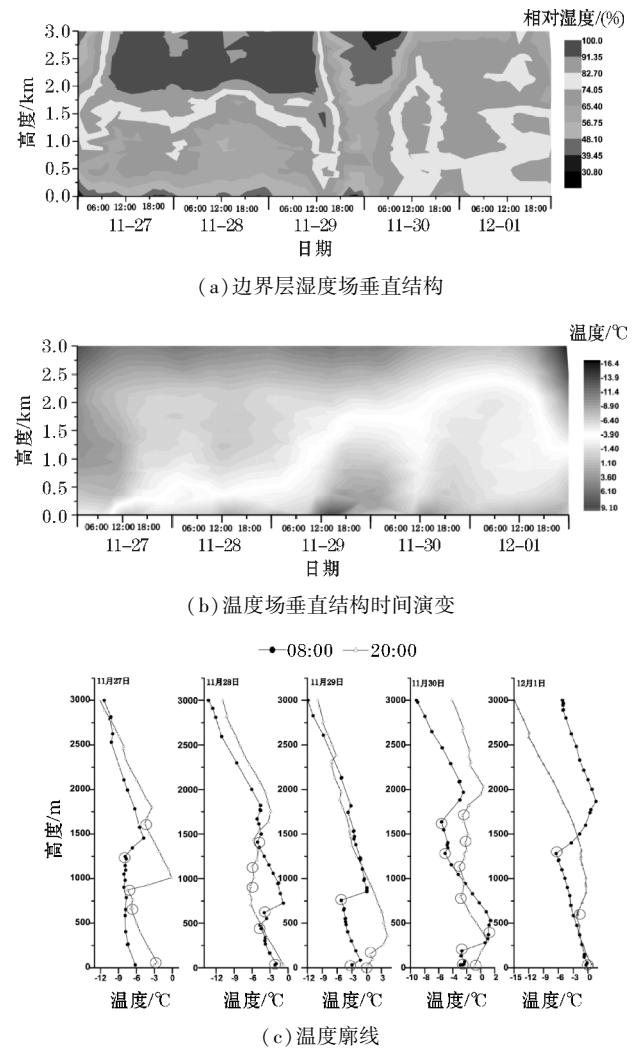


图 4 2015 年 11 月 27 日~12 月 1 日北京

低层大气中污染物的扩散和输送很大程度上依赖边界层结构,最大混合高度即边界层顶的高度,影响污染物的浓度和长距离扩散^[33]。因此计算混合层高度非常必要,通过风云二号 C 卫星云量观测数据以及海淀气象自动站资料,并利用罗氏法^[34]对此次重污染过程的混合层高度(即 MLH)进行计算,得到每天 8 个时刻的 MLH(图 5)。结合图 1 和图 5,总体看,污染物浓度与混合层高度呈负相关性,混合层高度均低于 800 m,且白天 MLH 明显高于夜间。从 29 日 11 时开

始 MLH 较前期迅速下降,后期整体 MLH 较前期偏低,白天维持在 450~500 m 左右,夜间维持在 200~300 m 左右,对应图 4c,30 日温度廓线,可以发现逆温存在的高度与 MLH 吻合,垂直扩散条件的转差及源源不断的污染物输送,是 30 日污染物浓度激增及增幅大于前期的重要原因之一。

由此可见,持续重污染过程期间边界层内的大气扩散能力差,低层大气层结持续稳定、风速偏小、多层逆温长时间维持、相对湿度较大、混合层高度较低,在这些均不利于污染物垂直扩散的气象条件的共同作用下,本次重污染过程得以形成并稳定维持在重度~严重污染水平。

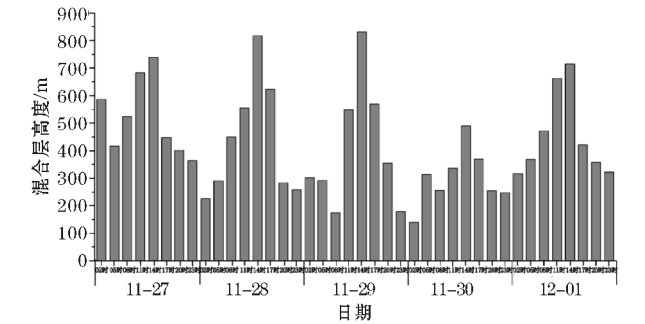


图 5 混合层高度时序变化

2.4 风场辐合线的摆动、演变对 PM_{2.5} 浓度爆发性增长的影响

北京周边的大气边界层除了受大尺度、中小尺度天气系统影响外,还直接受着太行山、燕山地形的动力作用影响^[35-36]。在高层西风带天气型及地形动力、热力背景影响下,太行山和燕山山风与华北平原风带在山前交汇常形成辐合流场。选取了此次重污染过程中第三阶段的气象自动站观测数据和大气成分监测数据绘制了 PM_{2.5} 质量浓度分布场和地面 10 m 风场的叠加(图 6),以便直观看到地面流场形成的辐合线对污染物浓度分布的影响。结合图 1 可以看到,29 日 22 时,辐合线位于北二环,PM_{2.5} 浓度增至 317 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是重污染过程第二阶段的最大值;随着冷空气入侵,山风将辐合线南推,由于冷空气势力较弱,且遇到南风气流阻挡,截至 30 日 06 时,只能将其推至南六环,PM_{2.5} 平均浓度 8 h 内骤降至 54 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;此后,随着北京地区局地环流南北风向的转换^[37-38],南风加强,北风减弱,辐合线开始北推,14 时辐合线已到达大兴与丰台交界处,PM_{2.5} 平均浓度也骤跃至 460 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,而 18 时,辐合线已北抬至北六环,北京大部分地区 PM_{2.5} 浓度反弹,PM_{2.5} 平均浓度也达到激增阶段最大值 527 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,房山单站更是在 10 h 内 PM_{2.5} 浓度激增至 630 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

从图 6 可以看出:29 日 22 时,可以看到污染的大值中心在北京西南部的保定,虽然北京从北部有冷空气入侵,但其强度较弱使得影响范围没有抵达河北中部;30 日 06 时,来自河北中南部的污染仍源源不断的输送至北京南部,受到辐合线的压制,在大兴通州地区汇聚累积,这对后期北京局地污染物浓度激增提供了一定的源输送;随着 30 日 08 时北京地区南北风向发生转换,山风转向谷风,即南风增强,北风减弱,辐合线开始北抬,浓度大值中心也不断随之北推;截止到 18 时,大值中心已从保定北抬至南二环。显然,北京平原

地区高浓度中心的移动和变化以及污染物浓度的区域分布,与辐合线的摆动及其伴随的北京地区南北风风向的转换和演变密切相关。大值中心的移动轨迹和辐合线的摆动趋势是一致的。

在 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度爆发性增长阶段,在整个区域大气边界层处于静稳状态有利于重污染形成以及源源不断的污染源输送前提下,风场辐合线的形成,局地环流日变化而造成的北京地区南北风向转换、进而产生的辐合线摆动,无疑成为促使污染物浓度爆发性增长的动力机制,是爆发性增长的关键因素。

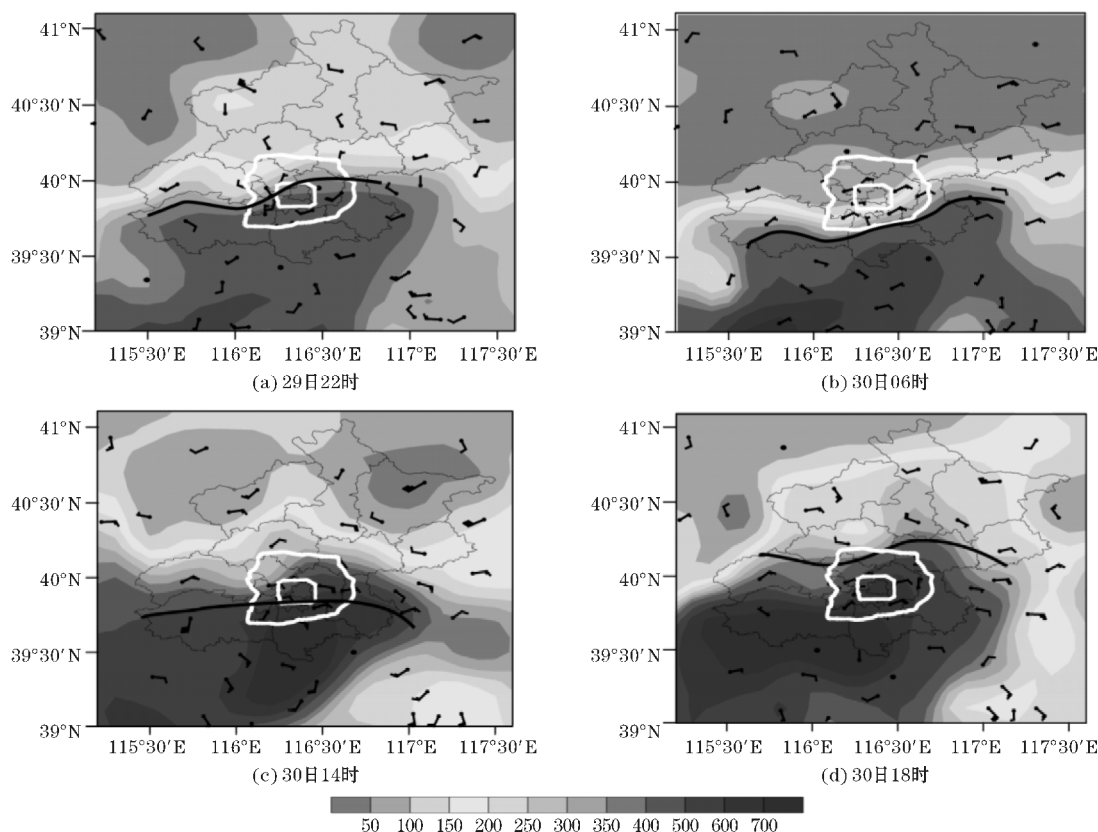


图 6 2015 年 11 月 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布与地面 10 m 风场叠加 (阴影部分代表 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布)

3 结 论

利用北京地区常规气象站、风廓线雷达、微波辐射仪、风云二号 C 卫星以及研究区域内的环境监测站等观测资料,针对造成本次持续重污染过程的气象成因进行分析。主要结论如下:

(1) 此次重污染过程期间的气象条件基本呈现为:高空均以西北或偏西气流为主,地面受高压后部弱气压场和低压辐合区控制。其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度爆发性增长期间(30 日),北京地区转受低压辐合区影响,低压带来的动力辐合条件更好,有利于风场辐合线的形成;地面风速降至 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右或以下;相对湿度大,从地面至高空维持在 80 % 以上,最高相对湿度超过了

90 %;存在多层逆温,且逆温持续时间长,混合层高度在 800 m 以下,其中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度爆发性增长期间,平均在 300 m 左右,大气稳定度极高。

(2) 本次重污染过程波动阶段 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 12 h 内从 $54 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 跃升至 $527 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,爆发性增长近 10 倍。在大气层结稳定的基础上,受北京地形和局地环流的影响,地面流场形成一条风场辐合线,由于局地环流的日变化而产生的南北风向转换造成风场辐合线的南北摆动,辐合线的南北摆动与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空分布以及污染物浓度大值中心位置的移动形成极强的对应关系。风场辐合线的南北摆动,一方面将北京周边区域污染源排放源源不断输送至北京,另一方面使得输入的污染物往复累积。30 日 08–18 时风场辐合线的北抬是北京地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在冷空气入侵区域污染得

到清除后,短时间内爆发性增长的关键因素。

参考文献:

- [1] 张小曳,孙俊英,王亚强,等.我国雾-霾成因及其治理的思考[J].科学通报,2013,58(13):1178-1187.
- [2] Giorgi F, Meleux F. Modelling the regional effects of climate change on air quality[J]. Comptes Rendus Geoscience, 2007, 339(11): 721-733.
- [3] 谈荣华,张元茂,郑叶飞,等.上海市城区典型居民住宅区 $PM_{2.5}$ 的污染状况分析[J].环境与职业医学, 2004, 21(3): 226-229.
- [4] 吴兑.关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论[J].气象, 2005, 31(4): 3-7.
- [5] Comrie A C. An All-Season Synoptic Climatology of Air Pollution in the US-Mexico Border Region[J]. The Professional Geographer, 1996, 48(3): 237-251.
- [6] Elbir T, Muezzinoglu A. Estimation of emission strengths of primary air pollutants in the city of Izmir, Turkey[J]. Atmospheric Environment, 2004, 38(13): 1851-1857.
- [7] Greene J S, Kalkstein L S, Ye H, et al. Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities [J]. Theoretical and Applied Climatology, 1999, 62(3-4): 163-174.
- [8] Flocas H, Kelessis A, Helmis C, et al. Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2009, 95(3-4): 265-277.
- [9] 陈训来,冯业荣,王安宇,等.珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究[J].中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(4): 103-107.
- [10] 王璟,伏晴艳,王汉峥,等.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, 2008, 13(1): 53-60.
- [11] 樊文雁,胡波,王跃思,等.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, 2009, 14(6): 631-638.
- [12] 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.
- [13] 赵秀娟,蒲维维,孟伟,等.北京地区秋季雾霾天 $PM_{2.5}$ 污染与气溶胶光学特征分析[J].环境科学, 2013, 34(2): 416-423.
- [14] 周丽,徐祥德,丁国安,等.北京地区气溶胶 $PM_{2.5}$ 粒子浓度的相关因子及其估算模型[J].气象学报, 2003, 61(6): 761-768.
- [15] 戴永立,陶俊,林泽健,等.2006~2009年我国超大城市霾天气特征及影响因子分析[J].环境科学, 2013, 34(8): 2925-2932.
- [16] Deng Z Z, Zhao C S, Ma N, et al. Size-resolution and bulk activation properties of aerosols in North China Plain: the importance of aerosols size distribution in the prediction of CNN number concentration [J]. Atmosphere Chemistry and Physics, 2011, 11: 3835-38646.
- [17] Zhang Q, Meng J, Quan J, et al. Impact of aerosol composition on cloud condensation nuclei activity [J]. Atmosphere Chemistry and Physics, 2012, 12: 3783-3790.
- [18] 苏福庆,高庆先,张志刚,等.北京边界层外来污染物输送通道[J].环境科学研究, 2004, 17(1): 26-29.
- [19] 苏福庆,任阵海,高庆先,等.北京及华北平原边界层大气中污染物的汇聚系统——边界层输送汇[J].环境科学研究, 2004, 17(1): 21-25.
- [20] 徐祥德,周丽,周秀骥,等.城市环境大气重污染过程周边源影响域[J].中国科学D辑:地球科学, 2004, 34(10): 958-966.
- [21] 刘伟东,江玉华,李炬,等.北京地区一次重污染天气气溶胶分布与传输特征研究[J].气候与环境研究, 2010, 15(2): 152-160.
- [22] Davis R E, Kalkstein L S. Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations [J]. Physical Geography, 1990, 11(4): 320-342.
- [23] Cheng C S, Campbell M, Li Q, et al. 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, 2007, 182(1-4): 131-148.
- [24] Cheng C S, Campbell M, Li Q, et al. 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, 2007, 182(1-4): 117-130.
- [25] Cheng S Y, Chen D S, Li J B, et al. The assessment of emission-source contributions to air quality

- ty by using a coupled MM5-ARPS-CMAQ modeling system; A case study in the Beijing metropolitan region, China [J]. *Environmental Modelling and Software*, 2007, 22(11): 1601 - 1616.
- [26] 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.
- [27] 田伟,唐贵谦,王莉莉,等. 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*, 2013, 18(5): 595 - 606.
- [28] 王莉莉,王跃思,王迎红,等. 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*, 2010, 30(7): 924 - 930.
- [29] 廖晓农,张小玲,王迎春,等. 北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析[J]. *环境科学*, 2014, 35(6): 2031-2044.
- [30] 陈媛,岑况, Nora S, 等. 北京市区大气气溶胶 PM_{2.5} 污染特征及颗粒物溯源追踪分析[J]. *现代地质*, 2010, 24(2): 345-354.
- [31] 唐宜西,张小玲,熊亚军,等. 北京一次持续霾天气过程气象特征分析[J]. *气象与环境学报*, 2013, 29(5): 12-19.
- [32] 夏恒霞. 北京城区逆温气象特征及其对大气污染的影响[J]. *城市管理与科技*, 2004, 6(2): 63 - 68.
- [33] 李梦,唐贵谦,黄俊,等. 京津冀冬季大气混合层高度与大气污染的关系[J]. *环境科学*. 2015, 36(6): 1935-1943.
- [34] 周燕秋,倪长健,刘培川,等. 成都市混合层厚度的计算及方法对比[J]. *成都信息工程学院学报*. 2015, 30(1): 102-105.
- [35] 任阵海,万本太,虞统,等. 不同尺度大气系统对污染边界层的影响及其水平流场输送[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(1): 7-13.
- [36] 李令军,王英,李金香,等. 2000-2010 北京大气重污染研究[J]. *中国环境科学*, 2012, 32(1): 23 - 30.
- [37] 刘树华,刘振鑫,李炬,等. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟[J]. *中国科学 D 辑:地球科学*. 2009, 39(1): 88-98.
- [38] 窦晶晶,王迎春,苗世光. 北京城区近地面比湿和风场时空分布特征[J]. *应用气象学报*, 2014, 25(5): 559-569.

Analysis of Meteorological Conditions for a Continuous Heavy Pollution Process in Beijing

JU Shi-yao¹, ZHANG Xiao-ling², FAN Guang-zhou^{1,3}, SUN Zhao-bin², LI Zi-ming²

(1. School of Atmospheric Sciences/Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province/Joint Laboratory of Climate and Environment Change, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, 610225, China; 2. Environmental Meteorology Forecast Center of Beijing-Tianjin-Hebei, Beijing 100089, China; 3. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to reveal the meteorological conditions for a continuous heavy pollution process in Beijing, the observation data from regular and special meteorological stations, FY-2C satellite and PM_{2.5} concentration data were used to analyze the upper and lower circulation pattern and the influence of the dynamic and thermal structure produced by local meteorological elements. The results showed that during the process of heavy pollution, northwest or west flow was dominated on the high latitude and the ground was controlled by the low atmospheric pressure field of the rear high pressure and the low pressure convergence zone. Moreover, the ground showed a state of light wind or calm, below 850 hPa, the relative humidity maintained at above 80 %, and there was multiple-layer inversion and it had maintained for a long time. The unfavorable meteorologic condition of pollutant diffusion is the principal cause, the accumulation of PM_{2.5} concentration at the earlier stage of the process, influenced by the Beijing topography and local circulation. The surface convergence line formed by the surface flow field in Beijing area elevated northward, which is the key factor for the explosive growth of PM_{2.5} concentration in a short time in Beijing area.

Keywords: atmospheric physics and atmospheric environment; atmospheric pollutants; continuous heavy pollution; explosive growth; meteorological conditions