

田莉,李得勤,王扬锋,等,2020.两次秸秆焚烧导致辽宁重污染过程的气象条件对比分析[J].气象,46(6):837-849. Tian L, Li D Q, Wang Y F, et al, 2020. Comparative analysis on meteorological condition for two serious pollution events in Liaoning Province caused by crop residue burning [J]. Meteor Mon, 46(6):837-849(in Chinese).

两次秸秆焚烧导致辽宁重污染过程的 气象条件对比分析*

田莉^{1,2} 李得勤² 王扬锋¹ 段云霞³ 刘硕²

1 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

2 辽宁省气象台, 沈阳 110166

3 辽宁省沈阳市气象台, 沈阳 110168

提 要: 利用环境监测站大气污染物数据、地面自动气象站观测资料、L波段加密探空资料和 $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ 的EC再分析资料,结合MODIS遥感火点监测和HYSPLIT4后向轨迹模拟结果,对比分析了2015年11月8日和2016年11月5日的两次由于东北地区秸秆焚烧导致辽宁重污染天气过程的大气边界层特征、气象扩散条件和大气污染物输送来源等。结果表明:两次过程地面 $PM_{2.5}$ 浓度均出现快速上升和下降,其中2015年11月8日重污染过程的污染强度较2016年11月5日强,且持续时间更长。2015年11月8日重污染过程的混合层高度较低,其上层的中性层结转变为逆温层结,抑制混合层高度的发展。同时低层冷平流不断侵入到暖平流下方,使得大气层结稳定性增强,维持时间较2016年11月5日重污染过程更长,低层下沉运动和黑龙江西南部、吉林西部污染物的远距离输送增强使得辽宁地面污染物浓度快速累积。而2016年11月5日重污染天气过程主要受深厚冷空气影响,东北地区西部污染物的区域输送和地面风场辐合是地面污染物浓度快速上升的主要原因。

关键词: 重污染,混合层高度,大气层结,区域输送

中图分类号: P49, X16

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.010

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Two Serious Pollution Events in Liaoning Province Caused by Crop Residue Burning

TIAN Li^{1,2} LI Deqin² WANG Yangfeng¹ DUAN Yunxia³ LIU Shuo²

1 Institute of Atmospheric Environment, CMA, Shenyang 110166

2 Liaoning Meteorological Observatory, Shenyang 110166

3 Shenyang Meteorological Observatory of Liaoning Province, Shenyang 110168

Abstract: Based on pollutant data from environmental monitoring stations, observation data from surface automatic weather stations, L-band dense sounding data and EC $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$ reanalysis data, and combined with fire point data from satellite remote sensing and simulation results of HYSPLIT4 backward trajectory, this paper analyzes the atmospheric boundary layer features, diffusion and transport meteorological conditions of two serious pollution events in Liaoning Province caused by crop residue burning of Northeast China on 8 November 2015 and 5 November 2016. The result shows that $PM_{2.5}$ concentrations increased and decreased rapidly during the two pollution events. The serious pollution event on 8 November

* 中国气象局沈阳大气环境研究所项目(2016SYIAEZD3)、辽宁省气象局重点科研项目(201805)、国家自然科学基金项目(41705094)和辽宁省重点研发指导计划(2019JH8/10200022)共同资助

2018年12月9日收稿; 2020年2月25日收修定稿

第一作者:田莉,主要从事短期天气预报和环境气象研究. Email: tianli_2017@126.com

通讯作者:李得勤,主要从事中尺度天气预报和数据同化研究. Email: lewen05@hotmail.com

2015 had stronger intensity and longer duration than the event on 5 November 2016. In the 8 November 2015 event, the mixing layer height was lower, on which neutral layer changed into inversion layer restraining the development of mixing layer height. At the same time, the cold advection in lower layer invaded below warm advection in higher layer, making the atmosphere more stable and lasting longer. The enhanced vertical subsidence motion and long-distance horizontal regional transportation of pollutants in southwestern Heilongjiang and western Jilin provinces resulted in rapid accumulation of pollutants on the surface in Liaoning. Due to stronger cold air, regional transportation in west of Northeast China and surface wind convergence strengthened are the main reason for the rapid increase of pollutant concentration in the event on 5 November 2016.

Key words: serious pollution event, mixing layer height, atmospheric stratification, regional transportation

引 言

近年来,经济的快速发展和全球气候变暖使得城市大气污染天数显著增多,大范围雾-霾天气频发,不仅影响交通,还严重危害人体健康,重污染天气也引起了政府和社会的高度关注。污染天气主要受污染源和不利气象条件两方面因素的影响(段云霞等,2016;张红等,2008;李崇等,2017;毛宇清等,2013)。很多学者从天气形势、地面气象要素、边界层动力、热力学结构等方面对重污染天气形成和维持的气象条件进行深入研究,取得了一系列成果。重污染天气发生和持续时,地面多为均压场或弱气压场控制,风速一般小于 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相对湿度较高,气温日变化小,混合层高度较低(Liu et al, 2017; 张建忠等, 2016; 朱佳雷等, 2011; 袁东敏和马小会, 2017; 侯梦玲等, 2017)。大气边界层内多逆温存在,强度强,厚度大,逆温层底高度较低(Wang et al, 2014; 饶晓琴等, 2008; 花丛等, 2015; 尉鹏等, 2015; 马小会等, 2017)。除接地逆温外,不同高度上还存在多个悬浮逆温(张雅斌等, 2016)。同时弱的下沉运动和地面弱辐合有利于地面污染物的迅速积累(胡春梅等, 2016; 孙兴池等, 2017; 郭蕊等, 2016),污染天气加剧。

重污染天气过程中污染物浓度异常偏高时段,不仅有本地污染物的积累,还与区域污染物的输送密切相关(Li et al, 2017; Wang et al, 2015; 唐宜西等, 2013; 尹晓梅等, 2017; 祁海霞等, 2019; 吴进等, 2017),因此污染物的区域传输也是重污染天气形成的重要原因之一。朱彬等(2010)分析了 2008 年 10 月 28—29 日南京及周边地区的严重空气污染过程,江苏北部和中部秸秆焚烧产生的大气污染物的区域输送和不利于污染物扩散的气象条件,是这次污染过程的主要原因。胡晓等(2017)分析认为,北方弱冷空气南下携带的污染物近距离输送使得 2015 年

1 月 25—26 日宁波地区颗粒物浓度迅速增加。王继康等(2017)基于 CAMx 模式对 2016 年 1 月 15—19 日我国中东部重污染过程进行分析,发现外来源对武汉和南京 $\text{PM}_{2.5}$ 的贡献分别为 51% 和 58% 左右。陈镭等(2016)利用卫星沙尘监测图和 HYSPLIT-4 模式轨迹模拟研究得出,上海地区 2013 年 3 月 4—9 日污染过程主要是由内蒙古西部沙尘的远距离输送造成的,是 500 m 及以上的气流输送,而不是近地面输送。

近年来,辽宁由于秸秆焚烧引起的重污染天气频发,且主要集中在 11 月。目前,对于这类重污染天气过程研究相对较少,不利气象条件使得大气污染物爆发式增长,重污染天气增强仍然是业务预报中的难点,本文选取了 2015 年 11 月 8 日和 2016 年 11 月 5 日两次典型由于东北地区秸秆焚烧导致的辽宁重污染天气过程,对这两次过程的污染物浓度变化特征、地面气象要素、大气边界层热力、动力特征和污染物输送来源、气象扩散条件等进行对比分析,期望进一步了解此类重污染天气形成、增强和消散机理,为辽宁重污染天气潜势预报和大气污染物浓度预报提供参考。

1 资料和方法

本文所用资料主要包括:(1)全国大气污染物逐小时资料,要素包括空气质量指数(AQI)、首要污染物、空气质量等级和 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、CO、 NO_2 、 O_3 、 SO_2 六种大气污染物小时浓度, O_3 的 8 h 平均浓度等;(2)辽宁地面自动气象站逐小时观测资料,要素包括降水量、温度、露点温度、相对湿度、风向、风速、能见度等;(3)沈阳 L 波段加密探空资料,要素包括各层高度、温度、气压、湿度、风向、风速等;(4)欧洲中心 ERA-Interim 逐日再分析资料,要素包括海平面气压场、10 m 风场和各层位势高度、风场、温度场、相对湿度、垂直速度等,水平分辨率为 $0.125^\circ \times$

0.125°,时间分辨率为6 h;(5)MODIS 遥感监测的全球火点数据(<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/>)。

所用方法包括:(1)混合层高度的计算采用罗氏法(饶晓琴等,2008);(2)输送通量为风矢量与污染物浓度的乘积,即 $F=U \times C$,其中 F 为输送通量, U 为全风速, C 为污染物浓度(贾海鹰等,2015);(3)后向轨迹聚类使用美国国家海洋和大气管理局(NOAA)开发的HYSPLIT-4模式计算,资料为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的GDAS数据。

2 重污染过程分析

2.1 污染物浓度和火点监测实况

受东北地区秸秆焚烧的影响,2015年和2016年的11月上旬辽宁分别出现了两次明显的重污染天气过程。2015年11月6日辽宁北部(沈阳、铁岭)开始出现重度污染,7日重污染范围向南扩展,除了辽西(朝阳、葫芦岛)和辽东(丹东)部分地区,其他地区都达到了重度及以上污染级别,严重污染区域主要集中在辽河流域,8日重污染天气明显增强,PM_{2.5}质量浓度剧增,辽宁中部6个城市出现污染“爆表”,其中沈阳PM_{2.5}质量浓度高达 $908 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,在近几年极其罕见(图1a)。2016年11月4日辽宁西部和北部开始出现中度污染,5日污染范围向东、向南扩展,污染天气加剧,全省9个城市达到重度及以上污染级别,其中辽宁西北部阜新PM_{2.5}质量浓度为 $308 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,达到了严重污染,沈阳、大连、鞍山、营口、阜新、辽阳、铁岭部分时段也出现了污染“爆表”情况(图1b)。11月正值东北地区秸秆焚烧频发期(段云霞等,2016;李崇等,2017),从MODIS遥感监测结果可以看出,在这两次过程中,东北地区的火点密集区主要集中在黑龙江西部和东部、吉林西部,辽宁西部和中部也有部分火点存在(图2),并且2015年11月6—9日的火点较2016年11月3—5日密集。本文主要选取这两次过程中重污染天气显著增强、污染“爆表”、PM_{2.5}质量浓度剧增阶段,即2015年11月8日(简称过程1)和2016年11月5日(简称过程2)进行研究。

从辽宁北部沈阳和南部大连PM_{2.5}质量浓度的逐小时变化(图3)可以看出,过程1和过程2中沈阳和大连PM_{2.5}质量浓度变化剧烈,均出现快速上升和下降的现象,质量浓度峰值均超过 $500 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,尤其过程1中沈阳PM_{2.5}质量浓度在8日14时高达

$1308 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。在这两次重污染过程中大连PM_{2.5}质量浓度峰值的出现时间比沈阳分别滞后3 h和7 h,由此推断,存在污染物的区域输送。同时过程1和过程2中PM₁₀质量浓度的变化(图略)与PM_{2.5}基本一致,PM_{2.5}/PM₁₀大部分在0.7以上,这与张秋晨等(2012)、刘晓慧等(2016)研究的南京和河北秸秆焚烧中PM_{2.5}/PM₁₀结果一致。另外,在污染最严重阶段,过程1中沈阳和大连PM_{2.5}/PM₁₀差异较大,过程2变化基本一致,这可能与过程1中两地污染物的来源不完全一样有关。由于观测资料有限,本文对于污染源差异的分析较少,需要在以后的研究中借助数值模拟等手段对污染物的化学成分和物理、化学转化过程做进一步探索。总体来看,过程1的污染强度和持续时间高于过程2,两次重污染过程都有污染物从北向南输送的趋势。

2.2 地面气象要素

以沈阳为例,从相对湿度和能见度的逐小时变化(图4)来看,而过程1的能见度明显低于过程2,过程2的能见度变化比过程1大。过程1中2015年11月7日20时至8日14时,地面为弱的偏北风,相对湿度呈明显下降趋势,PM_{2.5}质量浓度快速上升,使得悬浮在大气中的气溶胶颗粒增加,对大气的散射能力增强,能见度降低,基本维持在1 km以下。8日14—16时,沈阳出现弱的降水,一方面使得能见度继续下降,15—16时达到300 m以下,相对湿度明显增大,另一方面对于大气污染物有一定的清除作用,使得PM_{2.5}质量浓度下降。16时后,随着降水结束和PM_{2.5}质量浓度快速下降,能见度逐渐转好(图4a)。过程2中2016年11月4日14时至5日04时,PM_{2.5}质量浓度变化缓慢,维持在 $150 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右。其中4日14时至5日02时偏南风减小(图7b),相对湿度增大,气溶胶颗粒吸湿增长,散射能力增强,能见度下降,5日01时左右还出现能见度小于800 m的大雾天气,5日02—04时,偏南风由 $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 增大到 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图7b),相对湿度下降,雾消散,能见度转好,达到4.8 km。5日04—08时,风向转为偏北风,PM_{2.5}质量浓度由 $128 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 急剧上升到 $669 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,大气中的气溶胶颗粒迅速增加,能见度由4.8 km骤降到1 km左右。5日08—11时,PM_{2.5}质量浓度从 $779 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 下降到 $69 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,相对湿度也快速下降,能见度明显好转,达到11 km。5日11时后,相对湿度变化缓慢,能见度的变化趋势与PM_{2.5}浓度基本呈反位相变化(图4b)。

2.3 天气形势分析

从天气形势来看,过程 1 中 500 hPa 辽宁由平直的纬向型环流转为受弱高空槽底部西南偏西气流

的影响,850 hPa 华北低涡东移入海,向东北方向移动,辽宁位于低涡顶部,850 hPa 风场比较弱,风速平均小于 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,辽宁中东部相对湿度在 95% 以上,水汽条件较好(图 5 a),地面由倒槽顶部

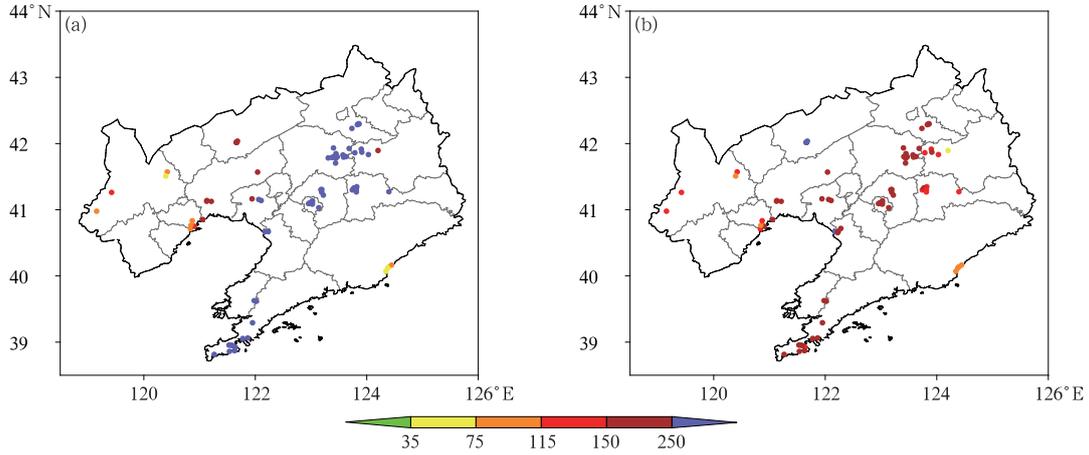


图 1 2015 年 11 月 8 日(a)和 2016 年 11 月 5 日(b)辽宁省 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度(单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)分布
Fig. 1 The distribution of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration (unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$) in Liaoning Province
(a) 8 November 2015, (b) 5 November 2016

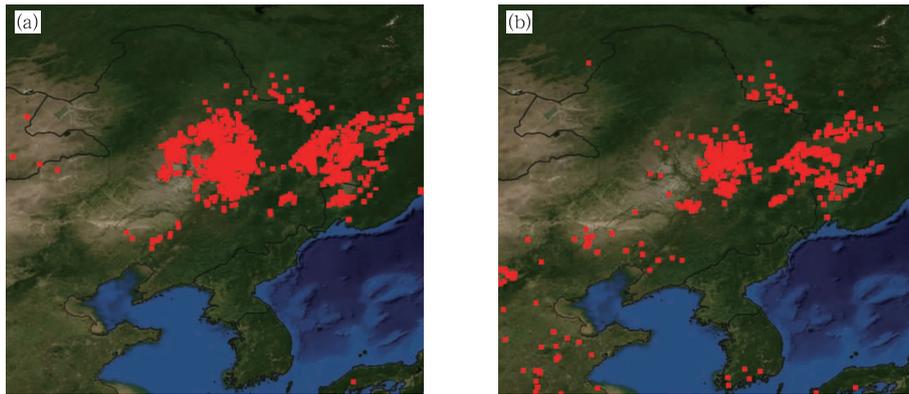


图 2 2015 年 11 月 6—9 日(a)和 2016 年 11 月 3—5 日(b) MODIS 遥感监测的东北地区火点分布
Fig. 2 Distribution of fire points in Northeast China monitored by MODIS remote sensing
(a) from 6 to 9 November 2015, (b) from 3 to 5 November 2016

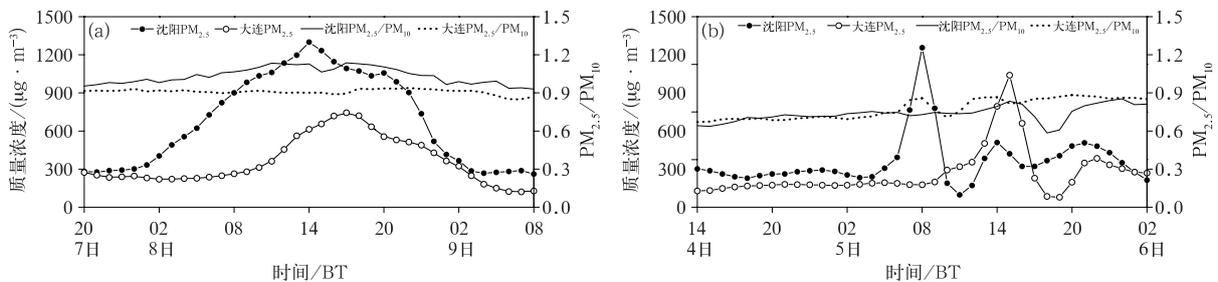


图 3 沈阳和大连 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度、 $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ 浓度比逐小时变化
(a)2015 年 11 月 7 日 20 时至 9 日 08 时,(b)2016 年 11 月 4 日 14 时至 6 日 02 时

Fig. 3 Time series of $\text{PM}_{2.5}$ mass concentration and $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$ concentration ratio in Shenyang and Dalian
(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015, (b) from 14:00 BT 4 to 02:00 BT 6 November 2016

转为低压后部、黑龙江北部高压底部东北风的影响(图 5b)。过程 2 中 500 hPa 高空冷涡后部横槽下

摆,高空锋区加强,850 hPa 偏北风加强,沈阳上空风速大于 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6a),地面由低压内部均压

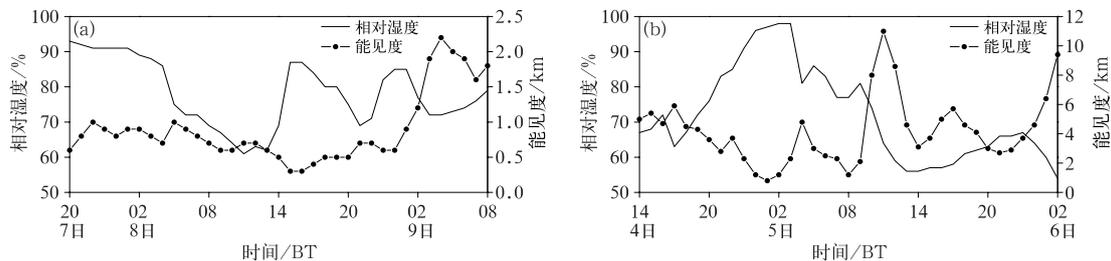


图 4 沈阳相对湿度和能见度逐小时变化

(a)2015年11月7日20时至9日08时,(b)2016年11月4日14时至6日02时

Fig. 4 Time series of relative humidity and visibility in Shenyang

(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015, (b) from 14:00 BT 4 to 02:00 BT 6 November 2016

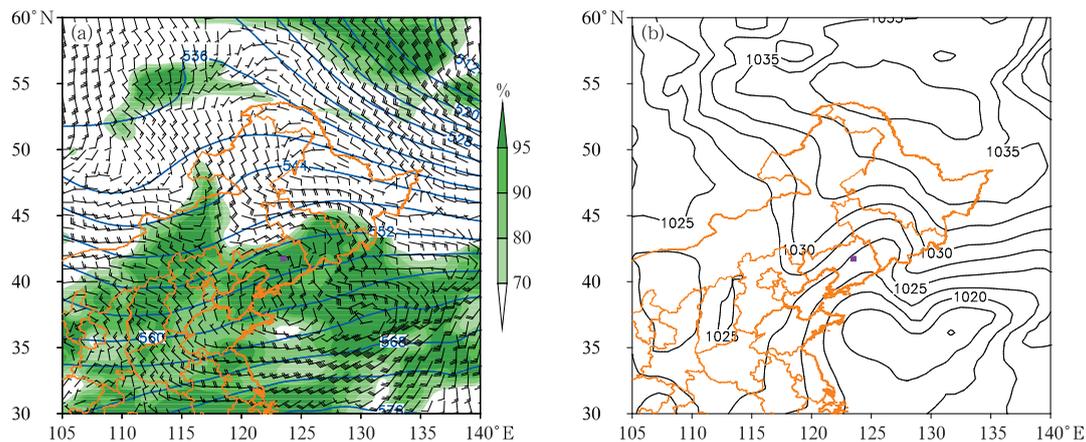


图 5 2015年11月8日08时(a)500 hPa 高度场(等值线,单位:dagpm)、850 hPa 风场(风羽)和 850 hPa 相对湿度场(填色),(b)海平面气压场(等值线,单位:hPa)

(■为沈阳位置,下同)

Fig. 5 Distributions of (a) geopotential height (contour, unit: dagpm) at 500 hPa, wind field (wind bar) and relative humidity (colored area) at 850 hPa, (b) sea level pressure (contour, unit: hPa) at 08:00 BT 8 November 2015

(■ indicates the location of Shenyang, the same below)

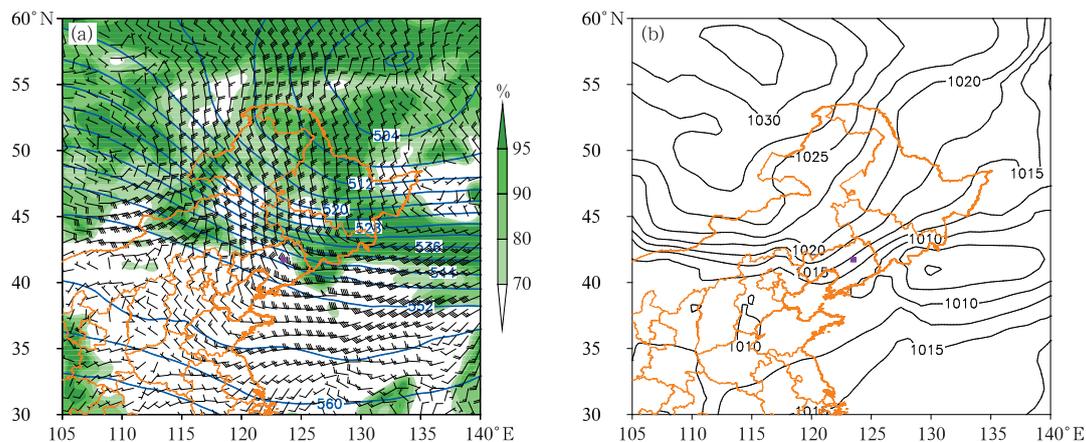


图 6 同图 5,但为 2016 年 11 月 5 日 08 时

Fig. 6 Same as Fig. 5, but at 08:00 BT 5 November 2016

场快速转为受冷锋系统影响(图6b),地面东北风明显增大。从两次过程动力场的对比分析来看,过程2风速增大反而是污染物输送增加的主要原因。

3 气象条件对比分析

3.1 混合层高度

混合层高度能够表征大气近地面层的稳定性和垂直交换能力,也是用来衡量大气污染扩散能力的主要气象因子之一(郭蕊等,2016)。图7给出了两次重污染过程沈阳混合层高度和风速随时间的变化,从图中可以看出,过程1沈阳的混合层高度基本维持在500~1000 m,平均为736 m(图7a)。这主要是由于2015年11月7—8日受地面倒槽的影响,沈阳以多云到阴的天气为主,8日14时后还出现了弱的降水。云层的存在使得地面温度变化不明显,基本维持在0℃附近,减小了气温随高度的变化,湍流和对流活动减弱,有效抑制了混合层高度的抬升。较低的混合层高度不利于污染物在垂直方向上的扩散稀释,使得污染物在边界层低层不断堆积,同时地面基本维持弱的偏北风,风速在 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,大气水平扩散条件较差。过程2中沈阳的混合层高度变化显著。2016年11月4日14时到5日03时,混合层高度下降,同时地面为偏南风,风速明显减弱,大气的水平和垂直扩散条件较差。5日04—08时地面污染物浓度快速上升阶段,混合层高度也快速上升,基本维持在1200 m以上,08时达到了1752 m(图7b),这是由于5日02时后,500 hPa高空冷涡后部横槽下摆,冷空气开始影响沈阳,大气垂直运动

和湍流扩散能力增强,使得混合层高度逐渐抬升。但受强冷空气影响,地面风向由西南风转为偏北风,风速迅速增大到 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,大气水平输送条件转好,使得东北地区污染物的区域输送增强,沈阳地面污染物浓度急剧增大。

3.2 温度层结

混合层高度取决于地面的增温状况和温度的垂直结构(吴兑和邓雪娇,2001)。在这两次重污染过程污染物浓度快速上升阶段,过程1的地面温度基本为0℃,变化不明显,过程2的地面温度呈明显降温的趋势。从沈阳的 $T-\ln p$ 图(图略)看出,两次过程都有逆温存在,逆温层抑制了大气垂直对流和湍流输送,限制了混合层高度的发展。本文主要分析2500 m以下的逆温,将底高低于100 m的逆温定义为贴地逆温,底高在100~500 m的逆温定义为低悬逆温,底高于500 m的逆温定义为高悬逆温。利用沈阳L波段加密探空资料来分析这两次重污染天气过程中大气层结的变化。由于污染物主要存在于地面至2000 m的大气层内(刘璇等,2015),因此对气象要素的分析也主要集中在2000 m以下。

从图8可以看出,两次过程中沈阳2000 m以下均有多个逆温层存在,不同时刻逆温层的高度和厚度有所变化,且两次污染物快速上升阶段大气层结存在异同。过程1中(图8a)在2015年11月7日20时,345~465 m为低悬逆温,650~840 m为高悬逆温,逆温厚度分别为120和190 m,1030~1360 m为中性层结,位于混合高度层上,大气层结稳定,不利于污染物的垂直扩散。8日08时,100 m以下开始出现贴地逆温,500 m以下的低悬逆温依然存在,

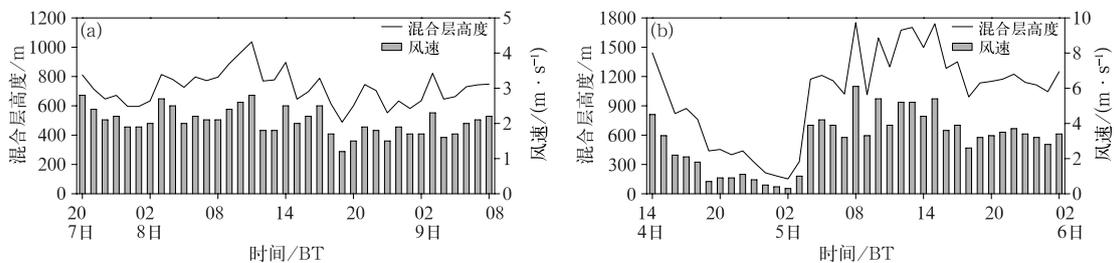


图7 沈阳混合层高度和地面风速逐小时变化

(a)2015年11月7日20时至9日08时,(b)2016年11月4日14时至6日02时

Fig. 7 Time series of mixing layer height and surface wind speed in Shenyang

(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015, (b) from 14:00 BT 4 to 02:00 BT 6 November 2016

同时 500~1500 m 的中性层结发展成逆温层结,逆温厚度增加到 455 m,逆温层顶达到 1200 m 附近,使得大气层结更加稳定,垂直扩散条件更差。20 时,受冷空气影响,整层大气开始出现降温,贴地逆温被打破,悬浮逆温层底被抬升,2000 m 以下两个悬浮逆温均为高悬逆温,逆温层底分别为 650 m 和 1000 m,其中 500~750 m 的高悬逆温厚度减弱到 65 m,大气垂直扩散条件好转,有利于地面污染物浓度下降。9 日 08 时,整层大气温度明显下降,500 m 以上的两个高悬逆温层底再次被抬升,分别到达 1000 和 1800 m,1750~2500 m 的逆温厚度减弱到 250 m 左右,垂直扩散条件明显好转。过程 2 中(图 8b)在 2016 年 11 月 4 日 20 时,2000 m 以下仅有逆温厚度为 100 m 的贴地逆温存在,逆温强度比较弱,对大气的对流和湍流有一定的抑制作用。5 日 08 时,受强冷空气影响,地面至 1500 m 强降温,贴地逆温被打破,750~1750 m 有两个高悬逆温,逆温层底分别位于 750 和 1300 m 附近,逆温厚度分别约为 200 和 240 m。20 时,整层大气降温明显,两

个高悬逆温层底分别迅速抬升至 1100 和 2100 m,逆温厚度减弱,大气垂直扩散条件较好。

为了进一步研究逆温层与地面污染物浓度的相关性,对这两次重污染天气过程中沈阳 2000 m 以下总的逆温厚度和逆温强度进行计算。从表 1 和表 2 可以看出,逆温厚度与地面污染物浓度的变化趋势有较好的一致性,即当逆温厚度不断增加时,有利于地面污染物累积,污染物浓度上升,而当逆温层底抬升,逆温厚度减小时,地面污染物浓度下降。逆温强度的变化与污染物浓度的对应关系不明显。

综上所述,在这两次地面污染物浓度快速上升阶段,2000 m 以下逆温厚度增强,都有悬浮逆温存在,且最低的悬浮逆温层底均在 1000 m 以下,尤其过程 1 还出现了贴地逆温和低悬逆温,低悬逆温层底位于 500 m 以下,使得大气层结更加稳定。地面污染物浓度快速下降阶段,逆温厚度减弱,最低的悬浮逆温层底均被抬升至 1000 m 以上,1000 m 以下气温基本随高度递减,大气垂直扩散条件转好,有利于地面污染物的垂直扩散。

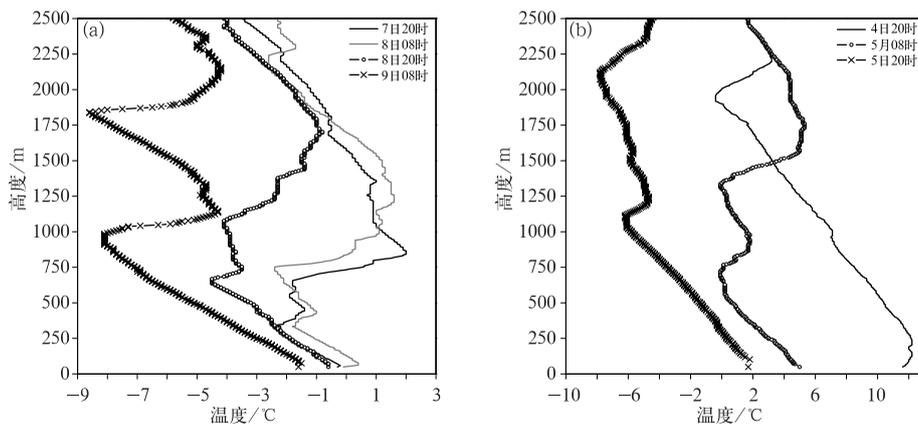


图 8 沈阳温度垂直廓线

(a)2015 年 11 月 7 日 20 时至 9 日 08 时,(b)2016 年 11 月 4 日 20 时至 6 日 08 时

Fig. 8 Vertical profile of temperature in Shenyang

(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015,

(b) from 20:00 BT 4 to 08:00 BT 6 November 2016

表 1 2015 年 11 月 7 日 20 时至 9 日 08 时沈阳的 PM_{2.5} 质量浓度与逆温厚度、逆温强度

Table 1 PM_{2.5} mass concentration, and thickness and intensity of inversion temperature layer in Shenyang from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015

时间	逆温厚度/m	逆温强度/[°C · (100 m) ⁻¹]	PM _{2.5} 质量浓度/(μg · m ⁻³)
7 日 20 时	566	0.94	282
8 日 08 时	682	0.84	901
8 日 20 时	844	0.56	1056
9 日 08 时	518	1.60	262

表 2 同表 1, 但为 2016 年 11 月 4 日 20 时至 5 日 20 时

Table 2 Same as Table 1, but from 20:00 BT 4 to 20:00 BT 5 November 2016

时间	逆温厚度/m	逆温强度/[$^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$]	PM _{2.5} 质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$
4 日 20 时	310	0.45	139
5 日 08 时	708	1.09	669
5 日 20 时	340	0.56	257

3.3 污染物扩散与输送气象条件

由图 8 温度层结曲线的时间变化可见,在地面污染物浓度快速上升和下降阶段,不同高度出现了不同程度的降温。因此,这两次重污染过程大气层结的变化与冷空气的强度和持续时间密切相关。

利用 EC 再分析资料计算沈阳 700 hPa 以下的温度平流,从图 9 可以看出,两次过程冷空气的强度和影响层次有所不同。过程 1 中(图 9a),2015 年 11 月 7 日 20 时受高空暖脊的影响,700 hPa 以下为一一致的暖平流,不同高度上的暖平流强度有差异,同时 925 hPa 以下有弱的下沉运动,中心值为 $5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$,位于 975 hPa 附近,有利于污染物在近地面积累。8 日 02 时,随着 925 hPa 低涡和地面倒槽东移,925 hPa 以下开始出现冷平流,925 hPa 以上仍旧维持暖平流,使得大气层结更加稳定。02—14 时,一方面 925 hPa 以下的冷平流逐渐增强,925 hPa 以上的暖平流减弱,大气稳定性增强;另一方面 1000 ~ 925 hPa 由低层到高层逐渐开始出现下沉运动,下沉速度逐渐增强,大气垂直扩散条件转差,地面污染物浓度快速积累。8 日 14 时,低层冷平流达到最强,为 $-120 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$,同时 925 hPa 以下转为一致的下沉运动。由于气溶胶颗粒主要聚集在 850 m (925 hPa 附近)以下(刘璇等,2015)。因此 8 日 14 时,随着大气稳定性和 925 hPa 下沉运动增强,地面污染物浓度上升到最大值。14 时后,925 hPa 以上转为冷平流影响,中低层为一致的下沉运动,下沉速度逐渐增强,受持续冷空气的影响,地面污染物浓度开始下降。过程 2 中(图 9b),2016 年 11 月 4 日 14—20 时,同样受高空暖脊影响,700 hPa 以下基本为暖平流,仅在 20 时左右 975 hPa 以下出现弱的冷平流,近地面出现弱的逆温,下沉运动比较弱,975 hPa 以上为强的上升运动,大气垂直扩散条件较好。4 日 20 时至 5 日 02 时,850 hPa 暖脊增强,925~800 hPa 暖平流显著增强,975 hPa 以上的上

升运动增强,700 hPa 以下为一一致的暖平流,大气层结和近地面的下沉运动变化不明显。02—08 时,500 hPa 高空冷涡后部横槽快速下摆,地面低压冷锋过境,950 hPa 以下的冷平流较上层冷平流略超前影响沈阳,使得不稳定层结减弱,但持续时间较短。在这个阶段,冷平流迅速增强,地面污染物浓度却出现快速上升的现象,这与地面风速加强,污染物的区域输送加强有关。08 时以后,700 hPa 以下为一一致的冷平流影响,强度不断增强。大气的水平和垂直扩散条件转好,使得地面污染物浓度快速下降。

为了研究污染物的输送气象条件,对这两次重污染天气过程的污染物输送来源进行分析。图 10 为这两次地面污染物浓度快速上升阶段地面平均风场和 PM_{2.5}平均水平输送通量的分布,过程 1 输送通量的大值区分布在吉林西部、黑龙江西南部和辽宁北部一带,基本为一一致的偏北风,使得上述地区的高浓度 PM_{2.5}向下游辽宁地区输送。过程 2 输送通量的大值中心位于吉林西部、黑龙江西南部,强度较过程 1 强,次大值中心在辽宁西北部,两个输送通量的大值中心在风场上基本表现为一致的偏北风,平均风速明显大于过程 1,因此过程 2 水平输送强度大于过程 1。

应用 HYSPLIT-4 模式分别对这两次重污染过程做后向轨迹聚类分型(图 11),起始点设为沈阳,起始高度为 500 m,结合对应时段的卫星火点分布(图 2)和水平输送通量分布(图 10),对污染的传输路径进行分析。结果显示,过程 1 中 44%的气团来自辽宁东部,气团相对清洁,38%的来自黑龙江西部,经过吉林西部到达沈阳,该气团高度低于 500 m,来自近地层,19%的气团经过吉林中西部到达沈阳,前 12 h 气团高度低于 1000 m,有利于吉林中西部边界层顶部的污染物向沈阳近地层输送。过程 2 中 56%的气团轨迹较短,高度低于 500 m,主要来自辽宁省西北部,25%的气团从内蒙古中部经过渤海,19%的气团经过火点较密集的黑龙江西部和

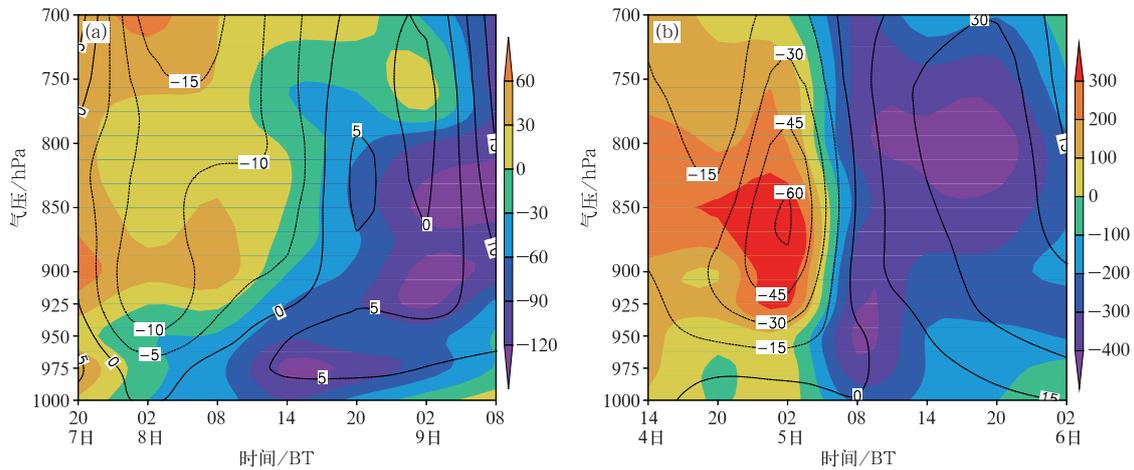


图 9 沈阳温度平流(填色,单位: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)和垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)时间-高度剖面
(a)2015年11月7日20时至9日08时,(b)2016年11月4日14时至6日02时

Fig. 9 Time-height cross section of temperature advection (colored, unit: $10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) and vertical velocity (soild lines, unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) in Shenyang
(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 9 November 2015,
(b) from 14:00 BT 4 to 02:00 BT 6 November 2016

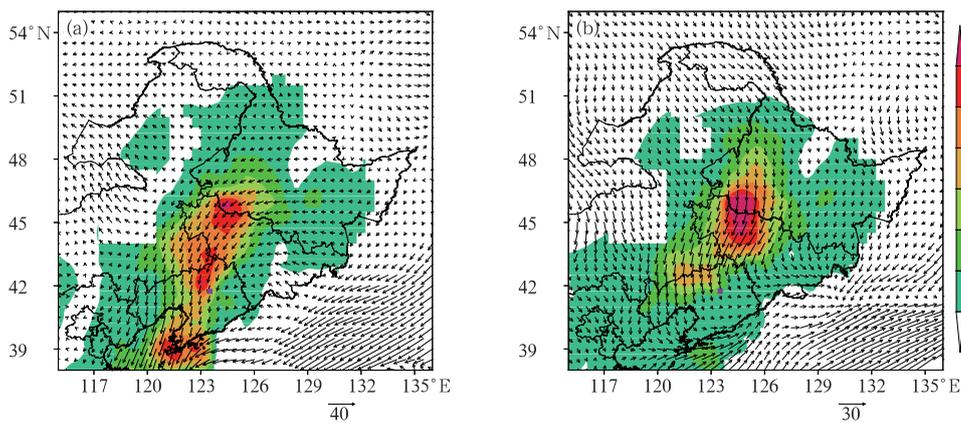


图 10 东北地区地面平均风场(箭头)和 $\text{PM}_{2.5}$ 平均水平输送通量(填色,单位: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)分布
(a)2015年11月7日20时至8日08时,(b)2016年11月5日02—08时

Fig. 10 Surface average wind field (arrow) and average horizontal transport flux of $\text{PM}_{2.5}$ (colored, unit: $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in Northeast China
(a) from 20:00 BT 7 to 08:00 BT 8 November 2015,
(b) from 02:00 BT to 08:00 BT 5 November 2016

吉林西部到达沈阳。因此过程 1 的污染物传输以黑龙江西南部和吉林西部的远距离输送占主导,过程 2 不仅有远距离输送,还有辽宁西北部的近距离输送。

风是边界层内影响污染物扩散的重要动力因子,风向决定着大气中污染物的输送方向,风速决定着大气中污染物扩散稀释速度,特别是低层风向、风

速的变化直接影响空气污染物的聚散及浓度的分布(孙燕等,2010)。风速增大,本地污染物向下游地区的输送将会加强。过程 1 中,2015 年 11 月 8 日 02 时(图 12a),东北地区主导风向为偏北风, $\text{PM}_{2.5}$ 水平输送通量大值区的吉林西部、黑龙江西南部的风速分别为 $4\sim 6$ 和 $2\sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$;8 日 14 时(图 12b),入海低压向东北方向移动,黑龙江西南部风速明显

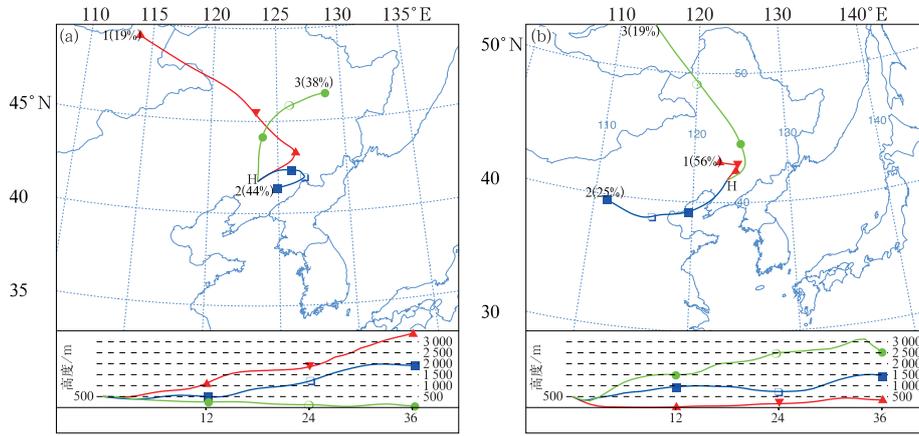


图 11 沈阳 36 h 聚类后向轨迹模拟

(a)2015 年 11 月 6—9 日,(b)2016 年 11 月 3—6 日

Fig. 11 The 36 h backward trajectory simulations in Shenyang

(a) from 6 to 9 November 2015, (b) from 3 to 6 November 2016

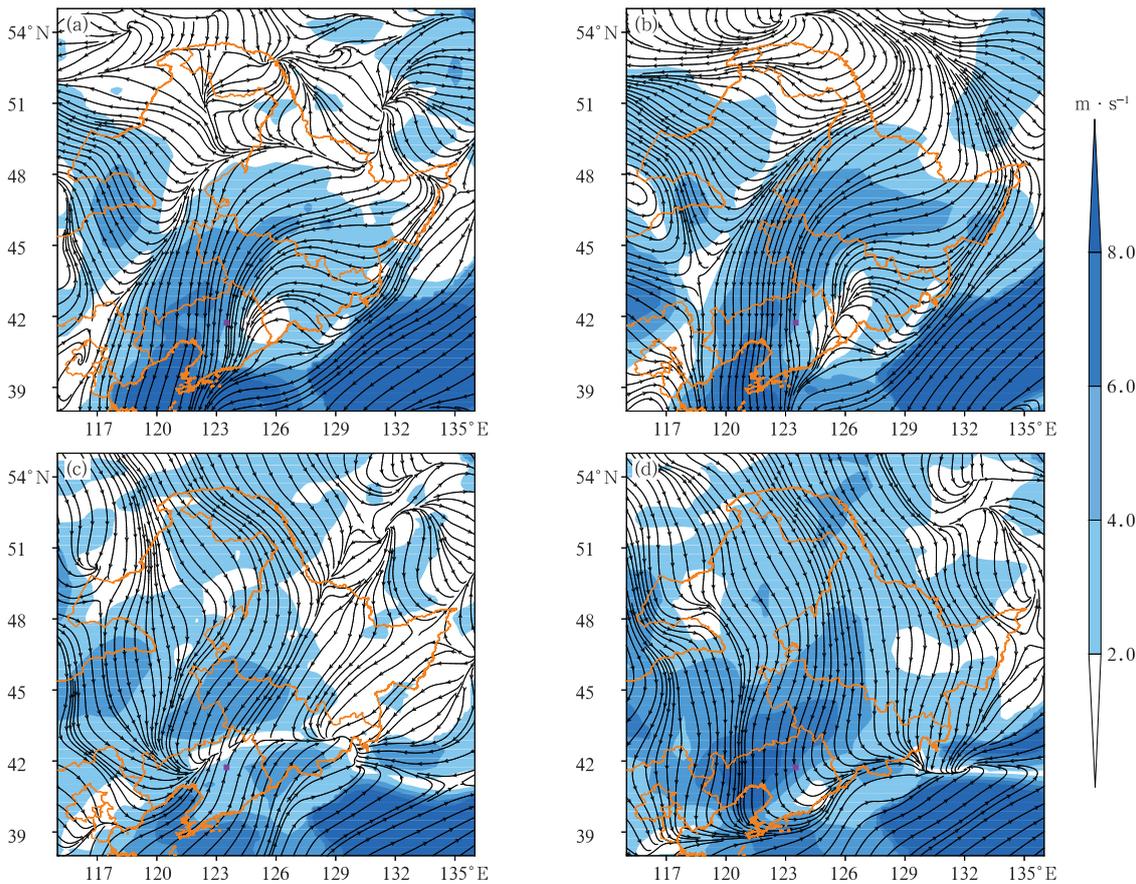


图 12 东北地区地面流场和风速(填色)分布

(a)2015 年 11 月 8 日 02 时,(b)2015 年 11 月 8 日 14 时,(c)2016 年 11 月 5 日 02 时,(d)2016 年 11 月 5 日 08 时

Fig. 12 Surface flow field and wind speed (colored) in Northeast China

(a) 02:00 BT 8 November 2015, (b) 14:00 BT 8 November 2015,

(c) 02:00 BT 5 November 2016, (d) 08:00 BT 5 November 2016

增大,达到 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,使得污染物的区域输送加强,造成沈阳地面污染物浓度快速上升;8日14时后(图略),东北地区逐渐转为西北风,沈阳污染物的输送减少,使得地面污染物浓度逐渐下降。过程2中,2016年11月5日02时(图12c), $\text{PM}_{2.5}$ 水平输送通量大值区吉林西部、黑龙江西南部的风速分别为 $4\sim 6$ 和 $2\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为东北风,次大值区辽宁西北部的风场较弱,风速小于 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,并且存在一弱的东北风和西南风的地面辐合线,沈阳位于辐合线前部,辐合线附近水平扩散条件较差;5日02—08时(图12d),冷锋过境,地面风速显著增强,输送通量大值区的风速为 $4\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,次大值区达到 $6\sim 8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向为一致的偏北风,一方面使得黑龙江西南部、吉林西部的污染物区域输送加强,另一方面辽宁西北部的地面辐合线东移,辐合线附近的污染物不断累积,使得沈阳地面污染物浓度快速上升。5日08时后,锋区加强东移,地面辐合线移出辽宁,大气扩散条件转好,沈阳地面污染物浓度下降。

4 结 论

本文通过对2015年11月8日和2016年11月5日两次由于东北地区秸秆焚烧导致辽宁重污染过程的气象条件对比分析,得出以下结论。

(1)两次过程中沈阳和大连 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度均出现快速上升和下降的现象,峰值异常偏高,过程1的污染强度和持续时间高于过程2;大连峰值出现的时间比沈阳滞后,存在污染物由北向南输送。

(2)地面污染物浓度快速上升阶段,两次过程均有多层逆温存在,过程1混合层高度变化不大,维持在1000 m以下,逆温厚度增强,低悬逆温层底较低,位于300 m附近,混合层高度上层的中性层结转变为逆温层结,使得大气层结更加稳定。过程2混合层高度快速上升至1200 m以上,贴地逆温被打破,高悬逆温层底较高,位于750 m附近,较过程1不利于地面污染物的积累;地面污染物快速下降阶段,逆温厚度减弱,最低的悬浮逆温层底均被抬升至1000 m以上。逆温层厚度和最低的悬浮逆温层底高对于地面污染物浓度的积累有较好指示意义。

(3)过程1中925 hPa以下冷平流不断侵入到

上层暖平流下方,低层大气稳定性增强,持续时间较长,配合下沉运动,抑制了污染物垂直向上扩散,利于污染物在近地面积累。同时地面东北风加强,污染物的区域输送加强。过程2冷空气势力较强,地面风速快速增大,上游污染物的水平输送加强,同时地面风场辐合不利于本地污染物的扩散。

(4)过程2的污染物水平输送强度较过程1强,过程1黑龙江西南部和吉林西部的远距离输送占主导,过程2不仅有黑龙江西南部和吉林西部的远距离输送,还有辽宁西北部的近距离输送。

参考文献

- 陈镭,马井会,耿福海,等,2016.上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析[J].气象,42(2):203-212. Chen L, Ma J H, Geng F H, et al. 2016. Analysis of a typical air pollution event in Shanghai[J]. Meteor Mon, 42(2):203-212(in Chinese).
- 段云霞,李得勤,田莉,等,2016.沈阳市一次持续性重污染天气过程特征分析[J].干旱气象,34(5):803-810. Duan Y X, Li D Q, Tian L, et al. 2016. Characteristic analysis of a continuous and serious pollution weather process in Shenyang[J]. J Arid Meteor. 34(5):803-810(in Chinese).
- 郭蕊,段浩,马翠平,等,2016.河北中南部连续12 d重霾污染天气过程特征及影响因素分析[J].气象,42(5):589-597. Guo R, Duan H, Ma C P, et al. 2016. Analysis on the characters and influencing factors of a 12 d heavy haze pollution weather process[J]. Meteor Mon, 42(5):589-597(in Chinese).
- 侯梦玲,王宏,赵天良,等,2017.京津冀一次重度雾霾天气能见度及边界层关键气象要素的模拟研究[J].大气科学,41(6):1177-1190. Hou M L, Wang H, Zhao T L, et al. 2017. A modeling study of the visibility and PBL key meteorological elements during a heavy fog-haze episode in Beijing-Tianjin-Hebei of China[J]. Chin J Atmos Sci, 41(6):1177-1190(in Chinese).
- 胡春梅,刘德,陈道劲,2016.重庆地区两次连续空气污染天气过程对比分析[J].气象与环境学报,32(1):25-32. Hu C M, Liu D, Chen D J. 2016. Comparative analysis of two continuous air pollution events in Chongqing[J]. J Meteor Environ, 32(1):25-32(in Chinese).
- 胡晓,徐璐,俞科爱,等,2017.宁波地区一次重污染天气过程的成因分析[J].高原气象,36(5):1412-1421. Hu X, Xu L, Yu K A, et al. 2017. Impact factors of a heavy air pollution process over Ningbo[J]. Plateau Meteor. 36(5):1412-1421(in Chinese).
- 花丛,张碧辉,张恒德,2015.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析[J].气象,41(9):1144-1151. Hua C, Zhang B H, Zhang H D. 2015. Analysis on boundary layer characteristics in fog and haze processes in North China from January to February 2013[J]. Meteor Mon, 41(9):1144-1151(in Chinese).

- 贾海鹰,程念亮,何友江,等,2015.2014年春季山东省PM_{2.5}跨界输送研究[J].环境科学,36(7):2353-2360. Jia H Y, Cheng N L, He Y J, et al, 2015. Numerical study on the characteristics of regional transport of PM_{2.5} in Shandong Province during spring in 2014[J]. Environ Sci, 36(7):2353-2360(in Chinese).
- 李崇,袁子鹏,吴宇童,等,2017.沈阳一次严重污染天气过程持续和增强气象条件分析[J].环境科学研究,30(3):349-358. Li C, Yuan Z P, Wu Y T, et al, 2017. Analysis of persistence and intensification mechanism of a heavy haze event in Shenyang[J]. Res Environ Sci, 30(3):349-358(in Chinese).
- 刘晓慧,马翠平,赵玉广,等,2016.2014年河北中南部两次重霾天气成因分析[J].中国环境科学,36(6):1621-1629. Liu X H, Ma C P, Zhao Y G, et al, 2016. Formation mechanism of two severe haze episodes over central and southern Hebei in 2014[J]. China Environ Sci, 36(6):1621-1629(in Chinese).
- 刘璇,朱彬,侯雪伟,等,2015.基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析——以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例[J].中国环境科学,35(3):641-651. Liu X, Zhu B, Hou X W, et al, 2015. Analysis of haze events based on satellite remote sensing and field observations: a case study of severe haze pollution over the Yangtze River Delta[J]. China Environ Sci, 35(3):641-651(in Chinese).
- 马小会,廖晓农,唐宜西,等,2017.北京地区重空气污染天气分型及个例分析[J].气象与环境学报,33(5):53-60. Ma X H, Liao X N, Tang Y X, et al, 2017. Weather pattern and case analysis of air heavy pollution days in Beijing[J]. J Meteor Environ, 33(5):53-60(in Chinese).
- 毛宇清,李聪,沈澄,等,2013.两次秸秆焚烧污染过程的气象条件对比分析[J].气象,39(11):1473-1480. Mao Y Q, Li C, Shen C, et al, 2013. Comparative analysis on meteorological condition for two air pollution events from crop residue burning[J]. Meteor Mon, 39(11):1473-1480(in Chinese).
- 祁海霞,崔春光,赵天良,等,2019.2015年冬季湖北省PM_{2.5}重污染传输特征及影响天气系统的数值模拟[J].气象,45(8):1113-1122. Qi H X, Cui C G, Zhao T L, et al, 2019. Numerical simulation on the characteristics of PM_{2.5} heavy pollution and the influence of weather system in Hubei Province in winter 2015[J]. Meteor Mon, 45(8):1113-1122(in Chinese).
- 饶晓琴,李峰,周宁芳,等,2008.我国中东部一次大范围霾天气的分析[J].气象,34(6):89-96. Rao X Q, Li F, Zhou N F, et al, 2008. Analysis of a large-scale haze over middle and eastern China[J]. Meteor Mon, 34(6):89-96(in Chinese).
- 孙兴池,韩永清,李静,等,2017.垂直运动对雾-霾及空气污染过程的影响分析[J].高原气象,36(4):1106-1114. Sun X C, Han Y Q, Li J, et al, 2017. Analysis of the influence of vertical movement on the process of fog and haze with air pollution[J]. Plateau Meteor, 36(4):1106-1114(in Chinese).
- 孙燕,张备,严文莲,等,2010.南京及周边地区一次严重烟霾天气的分析[J].高原气象,29(3):794-800. Sun Y, Zhang B, Yan W L, et al, 2010. Analysis of a heavy haze event in Nanjing and its surrounding areas[J]. Plateau Meteor, 29(3):794-800(in Chinese).
- 唐宜西,张小玲,熊亚军,等,2013.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,29(5):12-19. Tang Y X, Zhang X L, Xiong Y J, et al, 2013. Meteorological characteristics of a continuous haze process in Beijing[J]. J Meteor Environ, 29(5):12-19(in Chinese).
- 王继康,花丛,桂海林,等,2017.2016年1月我国中东部一次大气污染物传输过程分析[J].气象,43(7):804-812. Wang J K, Hua C, Gui H L, et al, 2017. Transport of PM_{2.5} of the haze pollution episode over mid-eastern China in January 2016[J]. Meteor Mon, 43(7):804-812(in Chinese).
- 尉鹏,任阵海,王文杰,等,2015.2014年10月中国东部持续重污染天气成因分析[J].环境科学研究,28(5):676-683. Wei P, Ren Z H, Wang W J, et al, 2015. Analysis of meteorological conditions and formation mechanisms of lasting heavy air pollution in eastern China in October 2014[J]. Res Environ Sci, 28(5):676-683(in Chinese).
- 吴兑,邓雪娇,2001.环境气象学与特种气象预报[M].北京:气象出版社. Wu D, Deng X J, 2001. Environmental Meteorology and Special Meteorological Forecasts[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 吴进,李琛,孙兆彬,等,2017.北京地区两次重污染过程中PM_{2.5}浓度爆发性增长及维持的气象条件[J].干旱气象,35(5):830-838. Wu J, Li C, Sun Z B, et al, 2017. Meteorological condition of explosive increase and maintaining of PM_{2.5} concentration during two heavy pollution processes in Beijing[J]. J Arid Meteor, 35(5):830-838(in Chinese).
- 尹晓梅,孙兆彬,郭淳薇,2017.2016年12月京津冀一次重污染天气过程分析[J].生态环境学报,26(12):2071-2083. Yin X M, Sun Z B, Guo C W, 2017. Analysis of a heavily polluted event in Beijing-Tianjin-Hebei Region in December, 2016[J]. Ecol Environ Sci, 26(12):2071-2083(in Chinese).
- 袁东敏,马小会,2017.2016年12月16—21日重度霾过程及大气环流异常[J].气候与环境研究,22(6):757-764. Yuan D M, Ma X H, 2017. The severe haze process in 16—21 December 2016 and associated atmospheric circulation anomalies[J]. Climatic Environ Res, 22(6):757-764(in Chinese).
- 张红,邱明燕,黄勇,2008.一次由秸秆焚烧引起的霾天气分析[J].气象,34(11):96-100. Zhang H, Qiu M Y, Huang Y, 2008. Analysis on the case of smoke haze[J]. Meteor Mon, 34(11):96-100(in Chinese).
- 张建忠,李坤玉,王冠岚,等,2016.京津冀4次重度污染过程的气象要素分析[J].气象与环境科学,39(1):19-25. Zhang J Z, Li K Y, Wang G L, et al, 2016. Meteorological element analysis of four severe pollution processes in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Meteor Environ Sci, 39(1):19-25(in Chinese).
- 张秋晨,朱彬,苏继峰,等,2012.南京3类不同大气污染过程下气溶

- 胶水溶性无机离子的特征研究[J]. 环境科学, 33(6):1944-1951. Zhang Q C, Zhu B, Su J F, et al, 2012. Characteristics of aerosol water-soluble inorganic ions in three types air-pollution incidents of Nanjing City[J]. Environ Sci, 33(6):1944-1951 (in Chinese).
- 张雅斌, 林琳, 吴其重, 等, 2016. “13·12”西安重污染气象条件及影响因素[J]. 应用气象学报, 27(1):35-46. Zhang Y B, Lin L, Wu Q Z, et al, 2016. Meteorological conditions and impact factors of a heavy air pollution process at Xi'an in December 2013[J]. J Appl Meteor Sci, 27(1):35-46 (in Chinese).
- 朱彬, 苏继锋, 韩志伟, 等, 2010. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析[J]. 中国环境科学, 30(5):585-592. Zhu B, Su J F, Han Z W, et al, 2010. Analysis of a serious air pollution event resulting from crop residue burning over Nanjing and surrounding regions[J]. China Environ Sci, 30(5):585-592 (in Chinese).
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉, 等, 2011. 江苏省一次重霾污染天气的特征和机理分析[J]. 中国环境科学, 31(12):1943-1950. Zhu J L, Wang T J, Xing L, et al, 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province[J]. China Environ Sci, 31(12):1943-1950 (in Chinese).
- Li J, Du H Y, Wang Z F, et al, 2017. Rapid formation of a severe regional winter haze episode over a mega-city cluster on the North China Plain[J]. Environ Pollut, 223:605-615.
- Liu T T, Gong S L, He J J, et al, 2017. Attributions of meteorological and emission factors to the 2015 winter severe haze pollution episodes in China's Jing-Jin-Ji Area[J]. Atmos Chem Phys, 17(4):2971-2980.
- Wang Q Z, Zhuang G S, Huang K, et al, 2015. Probing the severe haze pollution in three typical regions of China: characteristics, sources and regional impacts[J]. Atmos Environ, 120:76-88.
- Wang Y S, Yao L, Wang L L, et al, 2014. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. Sci China Earth Sci, 57(1):14-25.