

毛卓成, 马井会, 许建明, 等. 2015. 上海地区持续东风系统控制下污染扩散条件分析. 气象, 41(7): 890-898.

# 上海地区持续东风系统控制下污染 扩散条件分析<sup>\*</sup>

毛卓成<sup>1</sup> 马井会<sup>1,2</sup> 许建明<sup>1,2</sup> 耿福海<sup>1,2</sup> 杨丹丹<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 上海市城市环境气象中心, 上海 200135

<sup>2</sup> 上海市气象与健康重点实验室, 上海 200135

**提 要:** 利用常规气象资料、物理量场资料、PM<sub>2.5</sub> 小时浓度数据和激光雷达资料, 对 2014 年上半年上海地区持续东风系统控制下两次截然不同的污染变化时空分布特征及其扩散条件进行对比分析。结果表明: 海陆温差变化造成两次过程垂直扩散条件显著不同。1 月 26 日海温相对于陆地较高, 东风气流为暖平流, 海陆热力差异造成近地层垂直温度层结趋于不稳定, 加速边界层污染物的垂直扩散; 而 3 月 10 日过程则相反, 海温相对于陆地较低, 东风气流为冷平流, 造成近地层垂直温度层结趋于稳定, 抑制边界层污染物的垂直扩散。此外, 激光雷达资料能够直观反映污染物垂直分布, 对于了解污染过程的传输特征和形成有一定指导意义。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>, 扩散条件, 温度层结, 激光雷达

**中图分类号:** P49, X16

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.07.011

## Comparative Analysis of Pollution Diffusion Conditions Under the Control of Sustained Easterly System in Shanghai

MAO Zhuocheng<sup>1</sup> MA Jinghui<sup>1,2</sup> XU Jianming<sup>1,2</sup> GENG Fuhai<sup>1,2</sup> YANG Dandan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Shanghai Urban Environment Meteorological Centre, Shanghai 200135

<sup>2</sup> Shanghai Key Laboratory of Meteorology and Health, Shanghai 200135

**Abstract:** Based on the conventional meteorological data, physical quantity data, hourly PM<sub>2.5</sub> concentration data and laser radar data, two distinct temporal and spatial distribution characteristics and diffusion condition of pollution under the control of sustained easterly system in Shanghai are comparatively analyzed. The results show that land-sea temperature difference obviously affects the vertical transportation of pollutants. In the 26 January process, the sea surface temperature is higher and easterly flow is warm advection relative to the interior. Land-sea thermal contrast makes the vertical temperature stratification in the surface layer tend to be unstable and speed up the vertical diffusion of pollutants in the boundary layer. On the contrary, In the 10 March process, the sea temperature is lower and easterly flow is cold advection relative to the interior. Land-sea thermal contrast makes the vertical temperature stratification in the surface layer tend to be stable and inhibit the vertical diffusion of pollutants in the boundary layer. In addition, the laser radar data can intuitively reflect the vertical distribution of pollutants and have a certain guiding significance for our understanding of transmission characteristics and formation of pollution process.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, diffusion condition, temperature stratification, laser radar

\* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-022)、上海市科研项目(14DZ1202904)和中国气象局气候变化专项(CCSF201503)共同资助

2014 年 7 月 3 日收稿; 2014 年 12 月 25 日收修定稿

第一作者: 毛卓成, 主要从事环境气象预报研究. Email: jlbbyhj002@163.com

通信作者: 马井会, 主要从事城市环境预报等相关工作. Email: jinghuima1223@hotmail.com

## 引言

一个城市的空气质量由两个方面决定,一是污染源的排放和分布状况(毛宇清等,2013;王跃思等,2014),二是大气对污染物的扩散能力(王宏等,2008;范绍佳等,2006;杨书申等,2005;张人禾等,2014)。在污染源相对稳定的时间内,城市大气污染物浓度时空分布的不确定性主要取决于大气的扩散条件(梅鹏蔚,2006)。研究表明,影响大气污染物扩散能力的气象因子主要有:动力因子和热力因子,包括大气层结稳定度、大气中的水分、天气形势和混合层的高度等(张保安等,2007;Quinnp et al,2003)。陈敏等(2011)从动力方面指出大气污染物的水平稀释和输送主要是平均风的作用;胡晏玲等(2005)则从热力方面研究乌鲁木齐市逆温层与可吸入颗粒物 $PM_{10}$ 浓度的正相关关系;张蕾等(2002)从大气层结的角度探讨了北京市温度层结对大气污染物垂直分布的影响,指出稳定层结下风速水平和垂直扩散能力较差;张国璜等(2010)利用天气学方法将地面天气系统进行分型,从天气形势上研究不同地面天气类型对上海空气质量的影响。此外还有研究表明,稳定的大气层结合区域内特殊地形是导致区域污染形成的重要原因(康娜等,2009;王学远等,2007;Streeters et al,2007;Hyslop,2009;齐冰等,2012;过宇飞等,2013;刘梅等,2014;张英娟等,2015)。但是以往的研究主要是对多个不利气象因子共同作用的分析,很少对其不同作用进行分析。

大气中污染物的来源主要有地面灰尘、汽车尾气、工业排放和冬季取暖(张浩等,2010;宋娟等,

2012)。上海作为一个国际化大都市,城市机动车保有量较高,并且还有宝钢、金山石化这类重工业工厂的存在,有着比较严重的颗粒物排放源,但由于上海位于长江和钱塘江入海汇合处,大陆凸向东海的长三角东端,近地面风场和温度显著受到海面的气象条件影响(陈永林等,2010),海上清洁空气对上海空气质量有较显著的影响(陈敏等,2011)。周伟东等(2013)从气候统计角度得出上海地区处于西北风控制时颗粒物浓度较高,而东风下颗粒物浓度普遍较低的结论。

本研究以2014年3月10日重度污染过程为例,结合具有相似形势场但未出现污染的个例(2014年1月26日)(赖芬芬等,2014;董全等,2014),探讨造成该类污染情况的可能原因,以加强对重污染条件下天气特点的科学认识,并为研究重污染天气的区域影响及超大城市污染防治提供科学依据。

## 1 资料来源和选取

颗粒物浓度资料来源于上海市环境监测中心10个环境空气质量国控自动监测站逐小时资料及上海市气象局大气成分站7个区(县)站点逐分钟资料,站点空间分布见图1。激光雷达放置于浦东新区气象局楼顶的恒温室中( $23.3^{\circ}\text{C}$ ),为MPL\_4B型微脉冲激光雷达系统,该仪器自2008年5月开始正式投入观测,每30s观测一次,并提供24h实时的信号采集和数据显示。近地层水平风资料来源于宝山边界层气象要素垂直梯度观测塔(以下简称铁塔)。气象场资料采用中国气象局下发的MICAPS资料。

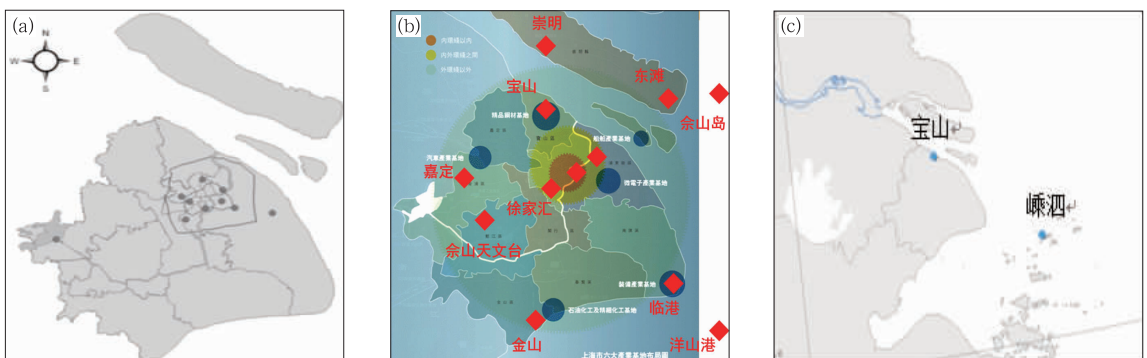


图1 上海市大气成分国控点(a)、大气成分站(b)及宝山和嵊泗站位置(c)

Fig.1 Spatial distribution of (a) air environmental quality state-controlled automatic monitoring station, (b) atmospheric composition observing station, (c) positions of Baoshan Station and Shengsi Station

## 2 污染天气过程回顾

3月9—11日受颗粒物输送和较差的污染扩散条件共同影响,上海地区出现了一次重污染天气过程。9日后期上海以偏北风为主,存在一定的颗粒物输送,环保局监测中心数据显示(图2),全市 $PM_{2.5}$ 小时值9日17:00达到轻度污染,从9日20:00浓度开始明显上升,10日上午随着高压东移入海,上海地面风向转为高压后部偏东风,对应10日05时 $PM_{2.5}$ 小时值上升至重度污染,其中10日

上午伴随相对湿度下降,地面观测天气现象由轻雾转记为霾,虽然上海白天近地面偏东风明显增大,14时整点2分钟风速近 $5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但是直到10日23:00颗粒物浓度才下降到中度污染,11日00:00颗粒物浓度明显下降至轻度污染,截止11日01:00空气污染过程结束,整个污染过程维持近30h,其中白天近18h的东风里, $PM_{2.5}$ 浓度始终维持在重度污染级别。上海市气象局监测站分钟数据显示(图3), $PM_{2.5}$ 小时最高浓度出现在宝山,为 $220.2\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 。上海东西部观测站颗粒物浓度上升和下降时间差异明显,上升阶段自西向东呈现时

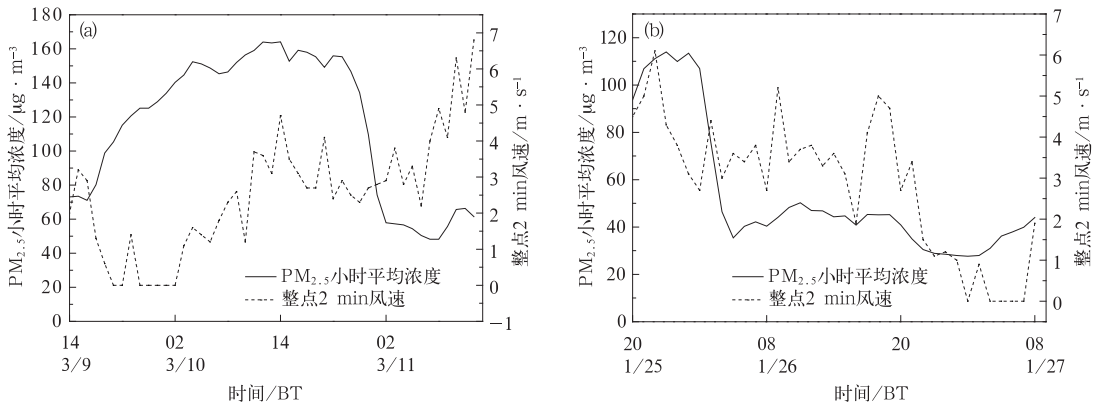


图2 2014年3月9—11日(a)和1月25—27日(b)上海 $PM_{2.5}$ 平均浓度及宝山站风速随时间变化

Fig. 2  $PM_{2.5}$  concentration at Shanghai Station and wind speed variation at Baoshan Station from 14:00 BT 9 to 14:00 BT 11 March 2014 (a) and from 20:00 BT 25 to 08:00 BT 27 January 2014 (b)

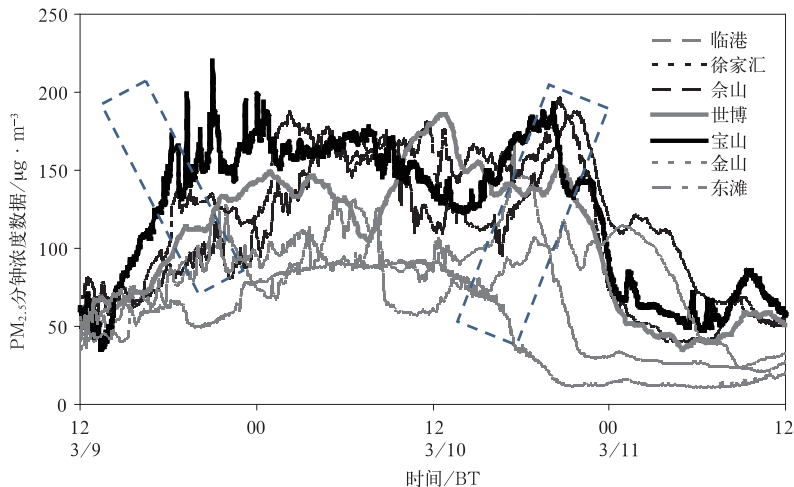


图3 2014年3月9日12时至11日12时上海市气象局大气成分站 $PM_{2.5}$ 浓度变化(矩形区域为 $PM_{2.5}$ 浓度上升和下降阶段)

Fig. 3 Time series of the observed average concentration of  $PM_{2.5}$  at Shanghai atmospheric composition observation station from 12:00 BT 9 March to 12:00 BT 11 March 2014 (The rectangle is rising and dropping stages of  $PM_{2.5}$  concentration)

间上的阶梯状递增;下降阶段,呈现自东向西的阶梯状下降。这是上海地区在东风系统控制下,PM<sub>2.5</sub>浓度一种典型的时空变化特征,同时该特征排除了颗粒物海上回流的可能性。

1月26日过程与3月10日污染过程地面天气形势较为相似,上海地区前期主导风向均为偏北风,上游地区颗粒物浓度较高(图略),因此存在明显的颗粒物对本地的输送,由图2b可见,26日20时前地面风速较大,平均风力3~4 m·s<sup>-1</sup>,PM<sub>2.5</sub>浓度明显下降,26日03时下降到轻度污染以下,14时起随着地面高压中心移出上海,风向逐渐转为偏东风,但风速较小,PM<sub>2.5</sub>浓度变化不明显,基本维持在良的低值,这是东风系统上海地区颗粒物变化的常规形态,即上海近地面转为东向风后,颗粒物浓度明显降低。但与常规形态不同,由图2a可见,3月10日上午开始,地面风速开始增大,PM<sub>2.5</sub>浓度并未伴随风力增大而降低,始终维持在140~160 μg·m<sup>-3</sup>的

范围内,造成这种差异的原因可能取决于垂直扩散条件的差异,3.3节将详细讨论。

### 3 结果分析及讨论

#### 3.1 地面天气形势分析

从3月10日20时(图4a)及1月26日20时(图4b)海平面气压场上可见,东亚大陆30°N以北基本为稳定的高一低一高天气形势,整个华东沿海处于入海高压环流控制之下,上海处于海上高压后部,风向以偏东风为主,高压中心移动缓慢,两者位置和强度基本一致。同时850 hPa温度场显示(图4粗实线),两次过程上海均处于冷温度槽底部(上海附近0°C等温线呈气旋性弯曲的底部),3月10日过程850 hPa温度较1月26日略偏低。相似的天气形势,反映出两个时段地面风场具有一定的

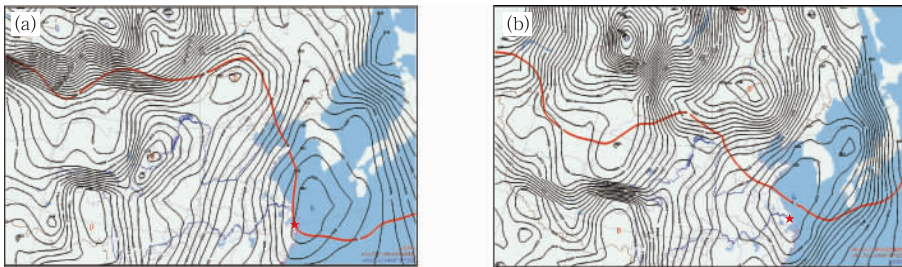


图4 2014年3月10日20时(a)和1月26日20时(b)海平面气压场及850 hPa零度等温线(粗实线代表850 hPa零度等温线,★为上海所在位置)

Fig. 4 Sea level pressure field and 850 hPa zero degree isotherm at 20:00 BT 10 March (a) and 20:00 BT 26 January 2014 (b)

(Solid line represents the 850 hPa zero degree isotherm, and the ★ is for the location of Shanghai)

相似性,但造成的空气污染状况截然不同。

#### 3.2 水平扩散条件

近地层风的变化对大气污染物的传输和扩散影响显著,对于气态污染物和颗粒态污染物来说,风主要表现了平流输送的能力(陈丽芳,2012)。宝山铁塔测风资料数据(图5)显示,3月10日上海宝山站近地层除去静风时段,主要为偏东风,3月10日凌晨10 m风速基本为静风状态,受日变化影响,白天风速略有增大,为3 m·s<sup>-1</sup>左右,PM<sub>2.5</sub>浓度随风速的增加而增大(图2a),此时水平扩散条件并未对全市污染物扩散起明显作用。但是从各观测站点的PM<sub>2.5</sub>浓度分钟数据来看(图3),来自海上空气存在

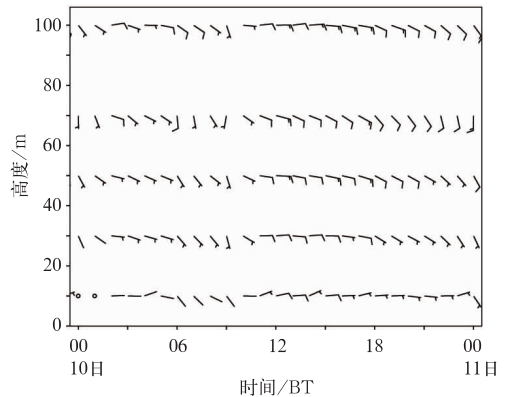


图5 2014年3月10日00:00—24:00宝山水平风垂直剖面图

Fig. 5 Vertical profile of horizontal wind observed at Baoshan Station during 00:00 to 24:00 BT 10 March 2014

一定的清洁稀释作用,自东向西存在明显的从低到高的分布形式,反映出水平扩散条件并不是空气污染的主导因素。与1月26日相比,相似点是以东风系统为主,东风时段维持了近15 h(图略),不同点是污染前期风速差异较为明显(图2),1月26日前期2分钟平均风速维持在 $3\sim 4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,明显大于3月10日。前期水平扩散条件的差异,仅仅造成了两者 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度基数上的差异,说明两者在源和水平扩散稀释上具有一定的相似性。

### 3.3 垂直扩散条件

大气热力状况的变化与非绝热加热及冷暖平流过程紧密相关(张亚妮等,2013)。陈永林等(2010)曾对比2008年1月13日至2月2日浙江嵊泗和上海徐家汇温差发现,当嵊泗为北北东风时,嵊泗到徐家汇110 km内的平均温差 $1.3^{\circ}\text{C}$ ,可见地面风向对上海近地面气温的影响非常显著。从宝山和嵊泗站地面温度对比(图6a)来看,3月10日白天宝山地面温度明显高于嵊泗,相对于陆地,偏东风为近地层带

来冷平流,到了夜间,宝山和嵊泗站地面温度基本持平。3月10日850 hPa温度图上,上海08时处于冷槽里,到20时(图4a),随着850 hPa南支系统北抬,上海逐渐转为暖脊控制,850 hPa上是一个逐渐回暖过程。850 hPa上为暖平流,地面为冷平流,使温度直减率明显减小,有利于上暖下冷“暖盖”结构的形成,最终表现为垂直扩散能力明显减弱,图7a为3月10日温度层结示意图。与3月10日相反,1月26日(图6b)白天温度嵊泗和宝山站相差较小,17时起受海陆热力差异影响,两站地面温度差别开始明显加大,嵊泗温度明显高于宝山站,相对于上海陆地,偏东风为暖气流,有利于陆地上的增温。从1月26日850 hPa温度场上看(图4b),08—20时同样是冷槽向暖脊的转变,如850 hPa暖平流和地面暖平流,但地面暖平流明显大于850 hPa高度暖平流,图7b为3月10日温度层结示意图,相对于3月10日过程,更有利于温度直减率加大,加强了气流的垂直交换,最终表现为垂直扩散能力明显加强。

激光雷达资料可以直观地显示污染物的垂直结

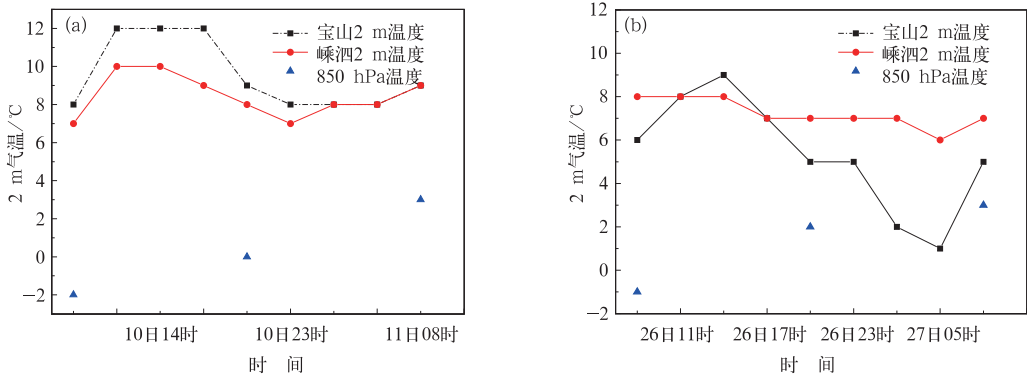


图6 2014年3月10—11日(a)和1月26—27日(b)宝山和嵊泗2 m温度及850 hPa温度随时间变化  
Fig. 6 Time series of 2 m temperature at Baoshan and Shengsi Stations and 850 hPa temperature during 26—27 January (a) and 10—11 March (b) 2014

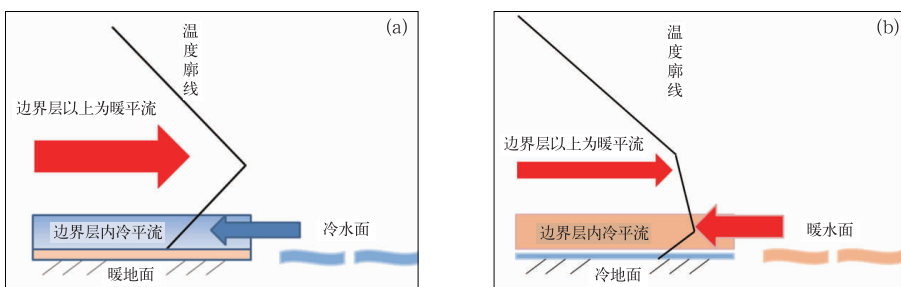


图7 2014年3月10—11日(a)和1月26—27日(b)宝山站逆温成因示意图  
Fig. 7 Diagram of mechanism of temperature inversion at Baoshan Station during 10—11 March (a) and 26—27 January (b) 2014



构日变化情况(贺千山等,2005;贺千山,2006),由图 8 可以看出,两次过程边界层顶(激光雷达观测的距离平方订正回波信号强度垂直梯度最大区)日变化均呈现白天高夜间低的日变化特征,相应的,边界层内气溶胶的上界也表现出同样的日变化特征。两次过程的激光雷达观测的距离平方订正回波信号强度垂直分布差异明显(图 9),3 月 10—11 日过程

1 km 以下信号强度变化梯度大,可以明显地看到越接近地面信号强度越大,说明颗粒物集中在较低的气层内,而随着高度增加,信号强度减小。与该次过程明显不同,1 月 26—27 日过程边界层内信号强度垂直分布均匀,说明边界层内混合作用强,垂直扩散条件好。

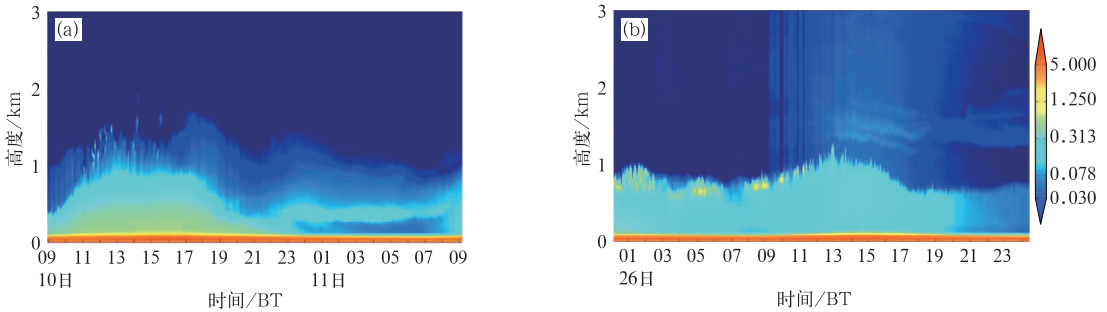


图 8 2014 年 3 月 10—11 日(a)和 1 月 26 日(b)上海市浦东站激光雷达观测的距离平方订正回波信号强度随时间变化图

Fig. 8 Time series of the laser radar distance square reduction of echo signal strength at Pudong Station during 10—11 March (a) and 26—27 January (b) 2014

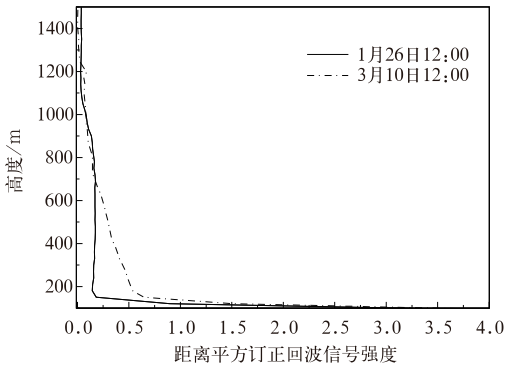


图 9 激光雷达观测的距离平方订正回波信号强度随高度变化

Fig. 9 The vertical profile of the laser radar distance square reduction of echo signal strength

以 3 月 10—11 日为例,分析典型时次消光系数的垂直分布情况,分别取上午(09—10 时)、下午(14—15 时)、上半夜(20—21 时)和午夜(00—01 时)4 个时段的消光系数随高度的分布(图 10),可见与边界层顶日变化相反,下午时段近地面消光系数数值最大,午夜时段近地面消光系数最小,上午时段次之,上半夜近地面消光系数介于上午和下午之间。这也很好地验证了东风气流带来海上较低温度平流与 925 hPa 暖脊叠加形成较稳定温度层结抑制污染

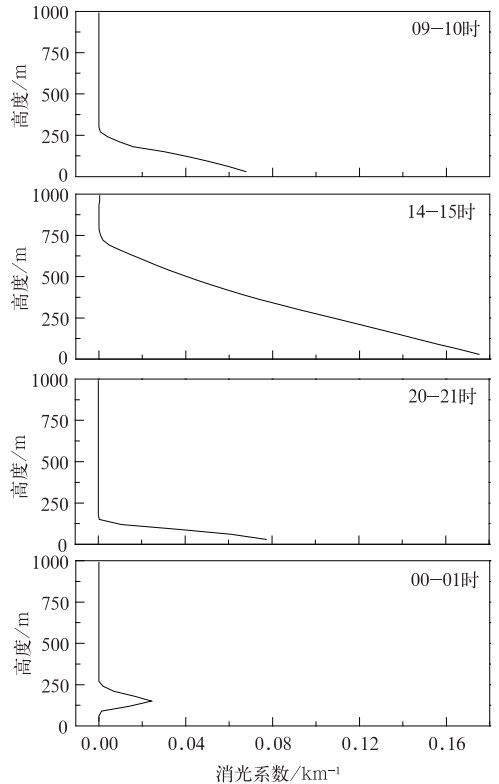


图 10 2014 年 3 月 10—11 日消光系数(527 nm)垂直廓线图

Fig. 10 The vertical profile of extinction coefficient (527 nm) in 10—11 March 2014

物垂直扩散有直接关系。消光系数垂直伸展高度与边界层日变化一致,下午最高(750 m),上午和午夜次之(250 m),上半夜最低(130 m),说明温度日变化对颗粒物的垂直扩散速度有一定的影响。与其他几个时段不同,午夜时段在 120~250 m 存在单峰结构,说明污染物在午夜抬升至该高度层,低空存在逆温层,抑制污染物垂直扩散,底层偏东风带来相对清洁空气,消光系数在底层较小。

### 3.4 垂直和水平作用分析对比

通过以上分析可知,3月10日污染过程水平扩散条件和垂直扩散条件作用相反,究竟该次过程谁起主要作用呢?由图2a可见,3月10日全市PM<sub>2.5</sub>浓度变化大致可以分成上升—平衡—下降三个阶段,上升阶段在9日20时至10日05时,平衡阶段为10日05—23时,下降阶段为10日23时至11日01时。从各个污染等级变化时间(图11)可以看出:从轻度上升到中度污染仅3h,从中度上升到重度污染需要8h,维持在重度污染18h,而从中度转为轻度污染仅1h,轻度转为良1h,上升过程明显比下降过程慢,说明上升和下降过程中,主导扩散条件有了明显的改变。

在上升阶段,水平方向上存在着弱的清洁稀释作用,此时风速较小,对全市的水平扩散作用基本可以忽略,海上清洁空气仅对东部站点起到了清洁稀释作用。但是从垂直温度场上看,850 hPa的暖脊配合地面来自海上较低温度的东风气流,形成低空暖平流,近地层冷平流,气温直减率趋于减小(图12),由表1可见,3月10日,嵊泗温度垂直递减率绝对值小于宝山,在东风情况下,下游温度垂直递减率绝对值趋于减小,垂直稳定性增加。1月26日,嵊泗温度垂直递减率绝对值大于宝山,在东风情况下,下游温度垂直递减率绝对值趋于增大,垂直稳定性减小。大气扩散条件的主导因素还是以垂直方向上湍流交换变弱为主,最终导致单位体积里,颗粒物浓度明显上升,垂直方向上的净累积量要远大于水平方向的浓度稀释速率,尤其是在中心城区(图3),这就很好地解释了PM<sub>2.5</sub>分钟浓度数据出现站点自东向西、从低到高的空间分布,以及为什么一直处于海上偏东气流控制下,全市PM<sub>2.5</sub>浓度还是处于上升阶段。平衡阶段,水平风速受日变化影响有所增大,此时水平扩散条件和稀释作用并存,水平方向的浓度减少速率开始与垂直方向上的净累积量

逐渐达到平衡,温度直减率进一步减小,全市PM<sub>2.5</sub>平均浓度基本维持不变,但是各站点浓度还是存在显著空间差异(图3),东滩随着水平风速加大(12时)开始下降,而中西部站点在20时前后出现了短暂的小高峰,这是由于一方面主城区源存在“晚高峰”现象(杨柳等,2012),另外一方面逆温层是影响层结稳定和空气质量的重要气象条件,逆温层的存在意味着低空暖且轻的空气位于冷且重的空气上面,形成稳定的大气层结(唐宜西等,2013),最终垂直方向上的净累积量进一步增大。到了下降阶段,随着上海本地排放源的进一步减少,垂直方向上的

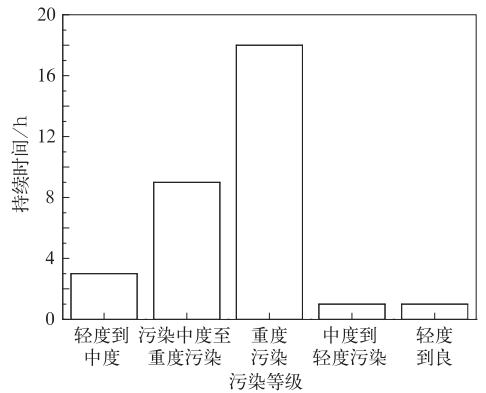


图 11 2014年3月10日过程各污染阶段时间

Fig. 11 Duration of pollution process on 10 March 2014

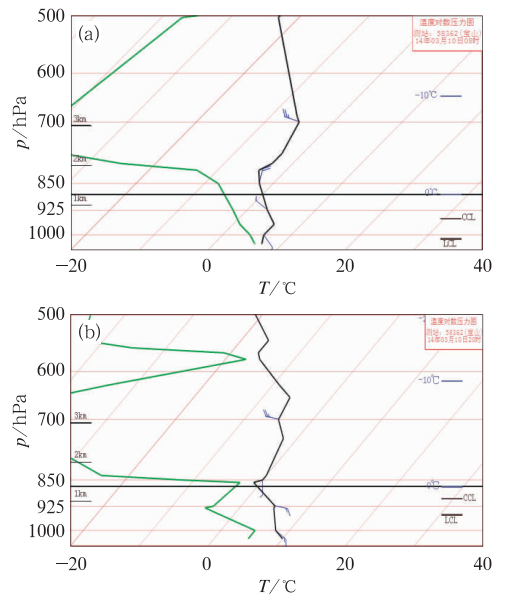


图 12 2014年3月10日08时(a)和20时(b)宝山站探空资料

Fig. 12 Sounding data from Baoshan Station

at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 10 March 2014

**表 1 地面至 850 hPa 温度垂直递减率**  
**Table 1 Vertical temperature lapse rate from surface to 850 hPa**

	3月10日		1月26日	
	08时	20时	08时	20时
宝山	-0.66	-0.59	-0.45	-0.19
嵊泗	-0.59	-0.46	-0.58	-0.32

积累作用明显减弱,加上水平风速依旧维持在  $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右,此时水平方向上的清洁稀释和扩散作用开始占主导作用,全市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度开始明显下降。

1月26日过程(图13)则相反,低空虽然有暖平流,但近地层同样为暖平流,近地层暖平流强度较低空大,抑制了气温直减率的减小,使气层稳定度减小,进而促进垂直方向上的扩散,加上水平方向的浓度稀释速率也在增加,最终全市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度维持在较低水平,整个过程中,水平扩散和垂直扩散条件作用相同,均以扩散为主,从而造成颗粒物浓度伴随风向转变及风力增大而迅速降低。

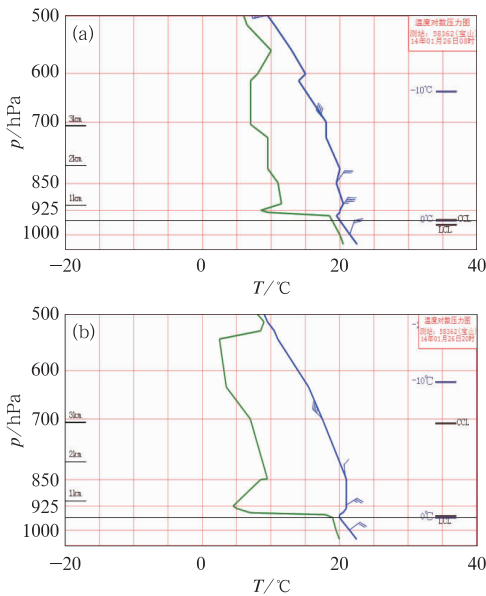


图 13 2014 年 1 月 26 日 08 时(a)和 20 时(b)宝山站探空资料

Fig. 13 Sounding data from Baoshan Station at 08:00 BT (a) and 20:00 BT (b) January 2014

## 4 结论和讨论

2014 年 3 月 10 日和 1 月 26 日上海地区在具有相似的地面天气形势,且在持续东风系统影响下,

$\text{PM}_{2.5}$  浓度变化上存在明显差别。通过对这两个时段的常规气象资料、物理量场资料、 $\text{PM}_{2.5}$  浓度数据以及激光雷达资料对比分析,得出以下结论:

(1) 上海处于相似的气压场控制下,在不同的季节会出现截然不同的空气污染状况,这是动力、热力条件共同作用的结果。

(2) 上海地区在东风系统控制下仍可能出现重度污染天气,垂直扩散条件较差是主要原因,当水平扩散稀释作用远低于垂直上的污染物积累时,颗粒物浓度增加。

(3) 不同季节,海陆温差造成的近地面温度层结状况截然相反,当上海吹东风时,冬季海温较高,相对于内陆为暖平流,不利于建立稳定层结;而在春季则相反,为冷平流,因此当低空气温变化不大时,近地面是冷平流时,近地层大气层结趋于稳定,从而抑制污染物垂直扩散,反之有利于污染物垂直扩散。

(4) 激光雷达可以清晰地监测颗粒物污染天气过程,通过监测消光系数的空间分布,可以得到污染时段的时空变化情况及边界层高度情况。通过分析激光雷达观测的距离平方订正回波信号强度垂直分布情况,可以判断垂直扩散条件,近地层垂直分布不均匀,说明存在抑制边界层混合作用的热力因子。

本文针对 3 月 10—11 日东风系统重污染过程研究表明,其发生发展有区别于以往重污染天气的特点:海陆热力差异造成近地层垂直温度层结趋于稳定、抑制边界层污染物的垂直扩散,预报中关注此类天气过程,探讨类似污染天气过程的形成机理,为今后空气质量预报预警提供新的思路。

## 参考文献

陈丽芳. 2012. 杭州市灰霾气候特征及与清洁过程的对比分析. 科技通报, 28(7): 31-35.

陈敏, 马雷鸣, 施虹, 等. 2011. 天气形势对上海世博会期间空气质量的影响分析. 第 28 届中国气象学会年会——S8 大气成分与天气气候变化的联系.

陈永林, 邵玲玲, 漆梁波. 2010. 2008 年初上海冰雪天气与冷空气路径的相关性研究. 气象科学, 30(3): 414-419.

董全, 张涛. 2014. 2014 年 3 月大气环流和天气分析. 气象, 40(6): 769-776.

范绍佳, 王安宇, 樊琦, 等. 2006. 珠江三角洲大气边界层特征及其概念模型. 中国环境科学, 26(suppl): 4-6.

过宇飞, 刘端阳, 周彬, 等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象, 39(10): 1314-1324.

胡晏玲, 陈思萍. 2005. 乌鲁木齐市冬季近地面逆温特点及其可吸入颗粒物浓度的相关关系分析. 干旱环境监测, 18(2): 88-90.



- 贺千山, 2006. 微脉冲激光雷达研究对流层气溶胶光学属性和分布特征. 北京: 北京大学, 55-77.
- 贺千山, 毛节泰, 2005. 北京城市大气混合层与气溶胶垂直分布观测研究. 气象学报, 63(3): 374-384.
- 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. 环境科学研究, 22(9): 1013-1020.
- 赖芬芬, 马学款. 2014. 2014 年 1 月大气环流和天气分析. 气象, 40(4): 515-520.
- 刘梅, 严文莲, 张备, 等. 2014. 2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析. 气象, 40(7): 835-843.
- 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. 气象, 39(11): 1473-1480.
- 梅鹏蔚. 2006. 稳定气象条件对天津市环境空气质量的影响. 城市环境与城市生态, 19(4): 37-39.
- 齐冰, 刘寿东, 杜荣光, 等. 2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析. 气象, 38(10): 1225-1231.
- 宋娟, 程婷, 谢志清, 等. 2012. 江苏省快速城市化进程对雾霾日时空变化的影响. 气象科学, 32(3): 275-281.
- 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. 气象与环境学报, 29(5): 12-19.
- 王宏, 林长城, 蔡义勇, 等. 2008. 福州市 PM<sub>10</sub> 突变特征与气象条件的关系研究. 热带气象学报, 24(5): 564-568.
- 王学远, 蒋维楣, 刘红年, 等. 2007. 南京市重点工业源对城市空气质量影响的数值模拟. 环境科学研究, 20(3): 33-43.
- 王跃思, 姚利, 王莉莉, 等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. 中国科学 地球科学, 44(1): 15-26.
- 杨柳, 吴焯, 宋少洁, 等. 2012. 不同交通状况下道路边大气颗粒物数浓度粒径分布特征. 环境科学, 33(3): 694-700.
- 杨书申, 邵龙义, 肖正辉, 等. 2005. 中国典型城市 2004 年大气质量及颗粒物浓度与气象条件关系分析. 中原工学院学报, 16(5): 5-9.
- 张保安, 钱公望. 2007. 中国灰霾历史溯源和现状分析. 环境与可持续发展, (1): 56-58.
- 张国琏, 甄新蓉, 谈建国, 等. 2010. 影响上海市空气质量的地面天气类型及气象要素分析. 热带气象学报, 26(1): 124-128.
- 张浩, 石春娥, 邱明燕, 等. 2010. 合肥市霾天气变化特征及其影响因素. 环境科学学报, 30(4): 714-721.
- 张蕾, 赵淑艳, 金永利. 2002. 北京地区低空风、温度层结对大气污染物垂直分布影响初探. 应用气象学报, 13(Z1): 153-159.
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013 年 1 月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. 中国科学 地球科学, 44(1): 27-36.
- 张亚妮, 张碧辉, 宗志平, 等. 2013. 影响北京的一例沙尘天气过程的起沙沉降及输送路径分析. 气象, 39(7): 911-922.
- 张英娟, 张培群, 王冀, 等. 2015. 1981—2013 年京津冀持续性霾天气的气候特征. 气象, 41(3): 311-318.
- 周伟东, 梁萍. 2013. 风的气候变化对上海地区秋季空气质量的可能影响. 资源科学, 35(5): 1044-1050.
- Hyslop N P. 2009. Impaired visibility: the air pollution people see. Atmos Environ, 43(1): 182-195.
- Quinnp K, Bates T S. 2003. North American, Asian, and Indian haze similar regional impacts on climate. Geophys Res Lett, 30(11): 1555-1559.
- Streets D G, Fu J S, Jang C J, et al. 2007. Air quality during the 2008 Beijing Olympic games. Atmos Environ, 41(3): 480-492.