

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. 气象, 42(2): 203-212.

# 上海地区一次典型连续颗粒物污染过程分析<sup>\*1</sup>

陈 镭<sup>1,2</sup> 马井会<sup>1,2</sup> 耿福海<sup>1,2</sup> 许建明<sup>1,2</sup>

1 上海市气象局, 上海市城市环境气象中心, 上海 200030

2 上海市健康重点实验室, 上海 200135

**提 要:** 2013 年 3 月 4—9 日上海地区出现了一次连续 6 d 的污染过程, 本文利用 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 的小时监测资料、常规气象资料、激光雷达资料、FY-3A 卫星监测资料及 NCEP 再分析资料, 综合探讨了此次连续污染过程的气象特征, 发现此次连续污染与天气形势的高低空配置有密切关系, 槽后被西北气流控制, 稳定的垂直层结及地面较弱的气压场, 有利于污染物的积聚和污染天气的维持。文章还对此次连续污染过程中的重污染过程进行了深入的诊断分析, 研究发现 850 hPa 及以上中低空西北气流将上游污染物输送至上海, 再配合下沉运动沉降到地面, 是造成此次重度污染过程的主因; 同时, 本地风力小、近地层垂直温度层结稳定等均不利于污染物在水平和垂直方向上的扩散, 为污染物的积聚创造了条件。

**关键词:** 空气污染, 气象要素, 沙尘, PM<sub>2.5</sub>

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.2.008

## Analysis of a Typical Air Pollution Event in Shanghai

CHEN Lei<sup>1,2</sup> MA Jinghui<sup>1,2</sup> GENG Fuhai<sup>1,2</sup> XU Jianming<sup>1,2</sup>

1 Shanghai Centre for Urban Environment Meteorology, Shanghai Meteorological Service, Shanghai 200030

2 Shanghai Key Laboratory of Health, Shanghai 200135

**Abstract:** A continuous air pollution event which occurred in Shanghai during 4—9 March 2013 was investigated. The main features of air pollution transportation and formation were preliminary discussed by using the hourly observation data of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>, conventional weather data, data from the ground-based Micro Pulse Lidar (MPL\_4B), data from FY-3A satellite and NCEP (1°×1°) reanalysis data. The results show that the pollution event was mainly influenced by the weather condition in upper and lower levels. The northwest wind after the trough, the stable stratification and the weak pressure field made air pollutants difficult to disperse. The northwest wind at 850 hPa could transport the dust to Shanghai, and then the dust subsided to the ground surface. The faint wind and the stable temperature stratification near the surface provided favorable conditions for the formation and maintenance of the heavy pollution event.

**Key words:** air pollution, meteorological factor, dust, PM<sub>2.5</sub>

## 引 言

近年来,随着经济和城市化的快速发展,机动车拥有量、建筑工地烟尘排放量、工业耗煤量等都在不断增加,因此空气质量的优良越来越受到人们的关

注。空气污染在全球范围内对人类健康构成了严重威胁,尤其是城市气溶胶污染带来的直接和间接危害已严重影响人们的生存环境(程兴宏等,2007)。有关学者(陈秉衡等,2003;阚海东等,2002)曾就大气污染与健康进行深入研究,对中国现有的颗粒物暴露和死亡率关系的剂量-反应关系的资料进行“元

\* 中国气象局预报员专项(CMAYBY2014-022)、上海市科研项目(14DZ1202904)及上海市气象局科技开发项目(MS201212)共同资助  
2014 年 12 月 4 日收稿; 2015 年 11 月 24 日收修定稿  
第一作者:陈镭,主要从事环境气象预报业务和技术研究. Email:yuhuashi19840414@163.com

分析”表明,PM<sub>10</sub>每增加 10 μg · m<sup>-3</sup>,急性死亡率增加 0.38%。丁一汇等(2009)从空气污染和气候变化方面,论述了两者的密切关系,两者都是由矿物燃料燃烧排放造成的,一方面排放的气溶胶不但造成空气污染,而且具有明显的气候效应和改变水圈循环的作用;另一方面,由温室气体的增加引起的气候变化也能影响空气污染问题,加重和放大空气污染对人体健康、农业生产和生态系统的影响。靳军莉等(2014)在对比华南和青藏高原降水资料时发现空气污染对小雨有抑制现象,而李雄等(2014)研究环北京地区空气污染指数与降水的关系时也发现空气污染指数(API)与小雨频率的周变化特征显著,两者呈反位相分布。徐祥德等(2005)研究城市群落大气污染源影响的特征发现,冬、夏季不同污染排放源对大气污染成分特征的贡献率具有显著差异,冬季大气污染成分以 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 影响为主,而夏季则以 CO 和 NO<sub>x</sub> 影响为主。而 Li 等(2012)利用区域空气质量模式(RAQMS)分析了 2006 年东亚地区大气气溶胶空间分布和季节变化特征,研究发现东亚地区 PM<sub>10</sub> 的浓度春季最高,夏季最低,且有三个最集中的区域:分别为中国的塔克拉玛干沙漠、戈壁沙漠和华北平原。魏秀文(2010)在研究河北省霾的时空分布特征时发现,霾在冬天出现最多,夏季最少;山麓地区霾出现的频数要大于山麓两侧的山地和平原。对于城市污染天气特征方面,国内外许多学者(徐敬等,2007;任雅斌等,2012;黄青等,2011;于娜等,2009;Cheng et al,2007;Chen et al,2007;杨德保等,1994;邓涛等,2012;邓雪娇等,2011;耿建生等,2006;Carrol et al,2002;饶晓琴等,2008;侯灵等,2012;夏冬等,2013;刘梅等,2014;于庚康等,2015)从气象条件、污染物来源、污染物成分、区域污染影响及污染特征等方面进行了深入的研究,发现空气污染物浓度变化与气象条件有着显著的相关关系,平稳的高空环流形势、暖平流、地面高压场、均压场和弱低压为污染天气的发生、发展和维持提供了有利的气象条件,同时还发现大部分城市污染物来源均来自于本地积累和上游的输送。在重霾污染天气的污染源研究方面,有学者(朱佳雷等,2011;毛宇清等,2013)发现在夏收和秋收期间,其污染源除与工业、机动车等污染排放有关外,还与大范围秸秆集中燃烧有着密切关系。段献忠等(2008)研究发现珠三角地区的空气质量除与天气条件有关外,还与本地的热岛环流、山谷风的关系非常显著。

上海市作为一个经济发达的超大城市,空气污染问题一向备受关注。国内不少学者对于上海市的空气污染情况有过多深入的研究(王璟等,2008;张国珺等,2010;甄新蓉等,2012;陈敏等,2013),分析表明容易引起上海市空气污染的天气类型有 L 型高压、高压、高压前和均压场四种地面天气类型,地面风向、风速等气象条件对上海市空气污染物的扩散起着决定性的作用。2013 年上海地区空气污染日为 124 d,其中由颗粒物引起的污染达 98 d,占到全年污染日的 79%,可见颗粒物污染是造成上海地区空气污染的重要原因。本文利用常规气象资料、物理量场资料、激光雷达资料及 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度数据就 2013 年春季上海地区一次连续 6 d 的污染过程进行了深入分析,综合探讨了此次污染过程的形成机理和可能来源,以期对空气污染的预报和控制提供参考。

## 1 污染过程概述

2013 年 3 月 4—9 日上海地区出现了一次连续 6 d 的污染过程(图 1a),此次污染过程的首要污染物均为 PM<sub>2.5</sub>,达到中度及以上污染的天数有 5 d,其中 7 和 8 日为重度污染。

图 1a 中空气质量分指数(IAQI)是指单项污染物的空气质量指数,是定量描述空气质量状况的无量纲指数,污染物项目 P 的空气质量分指数按式(1)计算:

$$IAQI_P = \frac{IAQI_{Hi} - IAQI_{Lo}}{BP_{Hi} - BP_{Lo}}(C_P - BP_{Lo}) + IAQI_{Lo} \quad (1)$$

式中,IAQI<sub>P</sub> 为污染物项目 P 的空气质量分指数(无量纲量);C<sub>P</sub> 为污染物项目 P 的质量浓度,单位:μg · m<sup>-3</sup>;BP<sub>Hi</sub>和 BP<sub>Lo</sub>分别为与 C<sub>P</sub> 相近的污染物浓度限值的高位值和低位值,单位:μg · m<sup>-3</sup>;IAQI<sub>Hi</sub>和 IAQI<sub>Lo</sub>分别为与 BP<sub>Hi</sub>对应的空气质量分指数(无量纲量)。计算公式中所用参数均参照《环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)》(环境保护部,2012)中的空气质量分指数及对应的污染物项目浓度限值中取得(表略)。

图 1b 为 3 月 3—10 日颗粒物浓度的时序变化图,3 日开始颗粒物浓度出现了第一个上升过程,4 日颗粒物浓度维持在较高的水平,其中 PM<sub>2.5</sub> 的浓度一直维持在 75 μg · m<sup>-3</sup> 以上;5 日中午开始颗粒

物浓度有一个振荡回落,第一次过程结束;5 日后期至 6 日颗粒物浓度虽然下降,但仍维持在污染水平。7 日颗粒物浓度出现了第二次明显的上升过程,7 日傍晚到夜里  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  先后达到了此次污染过程的最大值,分别为  $248.3$  和  $397.1 \mu g \cdot m^{-3}$ ,之后颗粒物浓度出现了明显的下降,8 日傍晚又出现了短时的上升,但 8 日颗粒物浓度整体呈现下降趋势。9 日出现了第三次上升过程,颗粒物浓度上升和下降过程非常迅速,出现了尖锐的峰值,其中  $PM_{10}$  浓度上升的更为明显,10 日颗粒物浓度基本维持一个下降的过程,持续 6 d 的污染过程结束。

## 2 天气形势分析

### 2.1 高空形势概述

从 2013 年 3 月 4—9 日低空到高空的平均高度场可以看到(图 2a~2c),上海地区主要受槽后西北气流控制,850 hPa 的平均温度场显示(图 2d),上海地区主要受到暖脊控制,为大气产生稳定层结创造了良好的条件,不利于污染物在垂直方向上的扩散。表 1 为污染期间的逆温层顶高和逆温强度,逆温强度(ITI)定义为逆温层内大气温度垂直递增率,越大表示逆温越强,越不利于逆温层内大气污染扩散

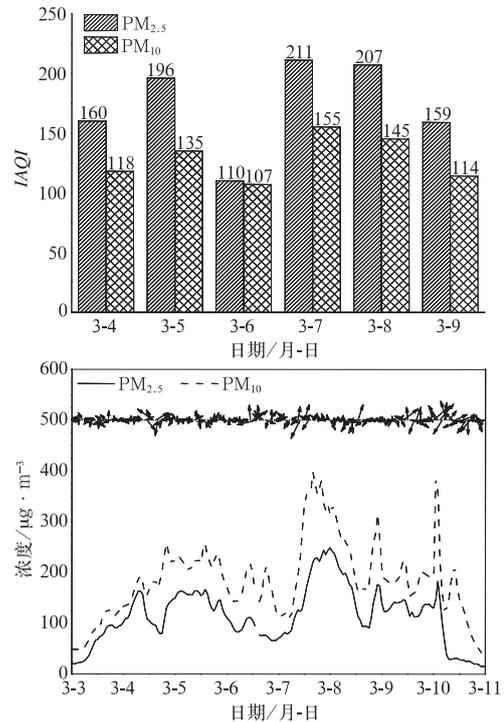


图 1 2013 年 3 月 3—10 日上海地区  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  IAQI (a) 和浓度的时间序列(b) (箭头为上海徐家汇观测站整点 2 min 风)

Fig. 1 Time series of the IAQI (a) and concentration (b) of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in Shanghai during 3—10 March 2013 (Arrow is 2 min wind per hour from Xujiahui Station in Shanghai)

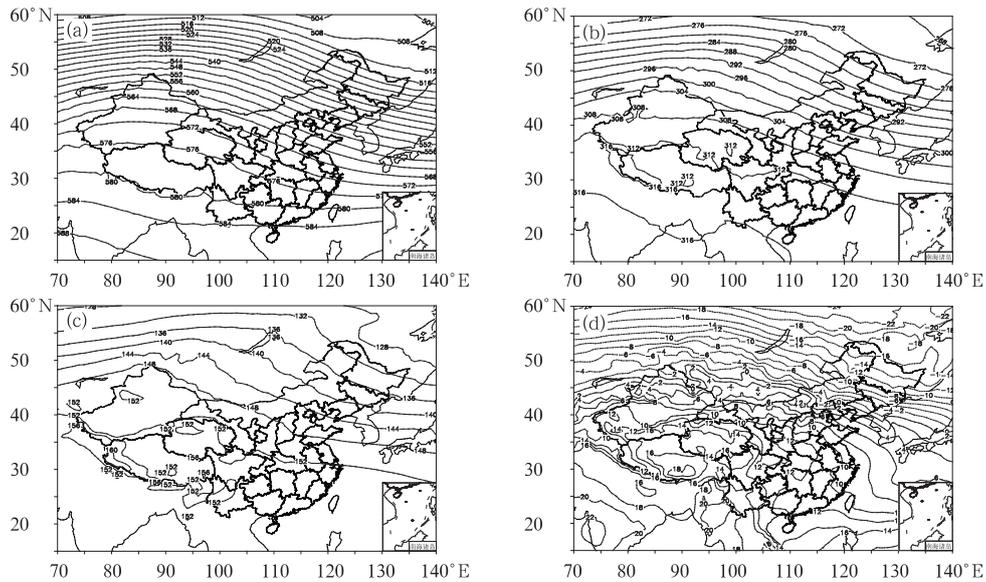


图 2 2013 年 3 月 4—9 日 500 hPa (a)、700 hPa(b)、850 hPa (c) 平均高度场(单位: dagpm) 和 850 hPa 平均温度场(d, 单位:  $^{\circ}C$ )

Fig. 2 The average geopotential height field (unit: dagpm) at 500 hPa (a), 700 hPa (b), 850 hPa (c) and 850 hPa average temperature field (d, unit:  $^{\circ}C$ ) during 4—9 March 2013

( $ITI = \frac{\nabla T}{h_i}$ ,  $\nabla T$  为逆温层顶温度减去逆温层底温度, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ ;  $h_i$  为逆温层厚度, 单位: 100 m), 由表 1 可以看到污染期间低层大气均存在逆温, 且逆温层顶均在 350 m 以下, 同时逆温强度也较强, 大部分时间均在  $2^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$  及以上, 这种底层逆温非常有利于污染物积聚, 容易造成高浓度的污染。总体来说, 3 月 4—9 日的高空形势为污染天气的发生、发展提供了十分有利的气象条件。

## 2.2 地面形势概述

根据张国珺等(2010)对于上海地区污染天气的分型讨论, 结合此次连续污染过程的具体天气形势, 可以将此次污染过程的地面形势分为高压类和冷空气型。在此次连续污染过程中, 前 5 d 均属于高压类, 在高压控制的形势下, 近地层为下沉气流, 大气层结比较稳定, 污染物在垂直方向上得不到扩散, 同时地面气压场也较弱, 污染物在水平方向上的扩散

条件也较差(图 3a)。如果高压长期存在, 那么污染物会不易扩散, 就容易造成连续污染。9 日属于冷空气型(图 3b), 冷锋引导冷空气南下影响上海, 在冷锋前部为暖气团控制, 垂直方向上不利于污染物的扩散, 同时地面气压场较弱, 也不利于污染物在水平方向上的扩散, 而当冷锋到达上海后, 扩散南下的冷空气会将上游污染物输送至上海, 因此冷锋前和冷锋刚过境时是污染物浓度最高的时候, 之后随着冷空气主体到达本地, 地面风力加大明显, 污染物被迅速扩散出去, 冷空气型虽然会造成污染, 但不利于污染物的长期维持, 因此 9 日冷空气过程结束了上海地区维持 6 d 的污染天气。由图 1b 徐家汇观测站的整点 2 min 风也可以看出此次连续 6 d 的污染天气形势, 3—9 日傍晚风力都非常小, 风向以偏西风或西南风为主, 不利于污染物的扩散, 而 9 日以后风力增大明显, 风向也转为以东北风为主, 扩散条件明显转好, 有利于污染的扩散, 风向、风速的变化与颗粒物浓度的上升和下降有很好的对应关系。

表 1 2013 年 3 月 4—9 日上海宝山观测站逆温层顶高和逆温强度

|  | 3 月 4 日 | 3 月 5 日 | 3 月 6 日 | 3 月 7 日 | 3 月 8 日 | 3 月 9 日 |
|--|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 逆温层顶高/m  | 290     | 209     | 218     | 254     | 344     | 317     |
| 逆温层强度/ $^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ | 3       | 2       | 4       | 2       | 2       | 1       |

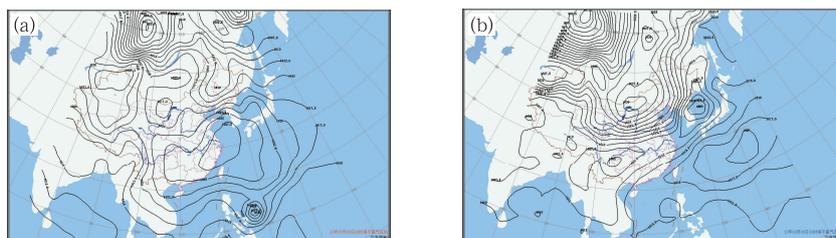


图 3 2013 年 3 月 5 日(a)和 9 日(b)海平面气压场(单位: hPa)

Fig. 3 The sea-level pressure field on 5 (a) and 9 (b) March 2013 (unit: hPa)

## 3 重污染过程机理分析

1.1 节提到从颗粒物浓度的时序变化(图 1b)上可以将此次连续 6 d 的污染过程分为三个阶段, 其中 3 月 7—8 日是此次连续污染过程中最严重的阶段, 因此本文将重点探讨造成此次重度污染过程的可能原因。

### 3.1 气象要素分析

#### 3.1.1 风速

李小飞等(2012)研究指出污染物在水平方向上的扩散由风速决定, 风速越大, 污染物越容易扩散, 风速小甚至静风时, 污染物难以扩散, 容易形成污染物局地积累。由徐家汇观测站的整点 2 min 风玫瑰图可见(图 4), 7—8 日徐家汇风速很小, 均在

$3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,其中  $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以下的风速占到这两天所有时段的 94%,静风时段占到了 10%,小的风速使得污染物在水平方向上不易扩散出去,为污染物的积聚创造了十分有利的条件。

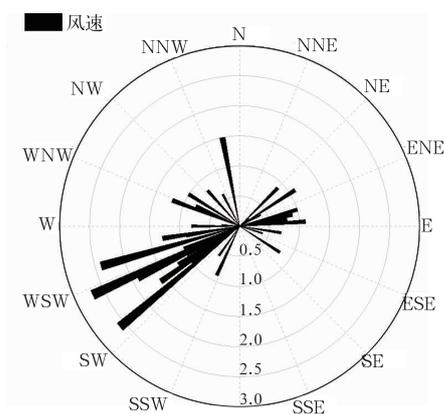


图 4 2013 年 3 月 7 日 00 时至 9 日 00 时上海徐家汇观测站整点 2 min 风玫瑰图(单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 The wind rose diagram of 2 min wind per hour from Xujiashui Station in Shanghai from 00:00 BT 7 to 00:00 BT 9 March 2013 (unit:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

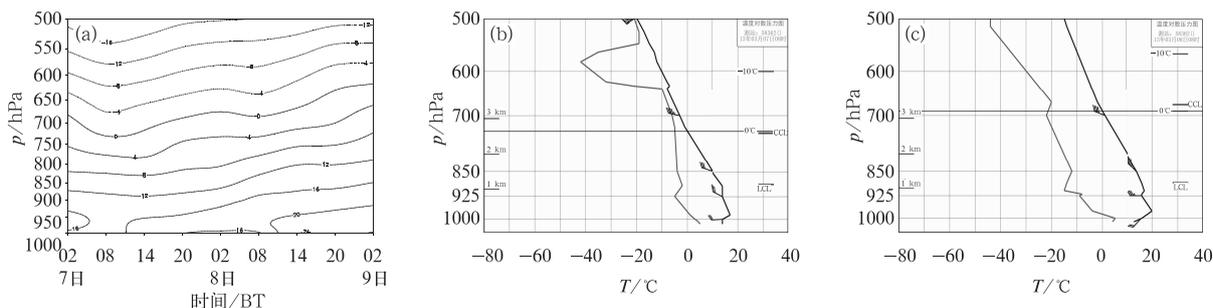


图 5 2013 年 3 月 7—8 日上海地区平均温度垂直剖面图(a)及 7 日(b)和 8 日(c)08 时的探空曲线

Fig. 5 The vertical cross section of average temperature (a) and stratification curve at 08:00 BT 7 (b) and 08:00 BT 8 (c) March 2013 in Shanghai

### 3.2 物理量分析

利用 3 月 7—8 日 NCEP 的每 6 h 1 次的 FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料对上海地区 ( $31^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ ,  $121^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ ) 做区域平均的速度和散度的垂直剖面图,从垂直速度图(图 6a)上可以看到 7 日 08 时至 8 日 20 时 600 hPa 以下,垂直速度的绝对值基本在  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,700 hPa 以下垂直速度绝对值均在  $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以下,说明这两天上下层垂直交换较弱,不利于污染物在垂直方向上的扩散,且 8 日前从地面

### 3.1.2 温度层结

大量研究结果表明(耿建生等,2006; Carrol et al,2002),污染物在垂直方向上的扩散,受到垂直方向上温度分布状况控制,当出现逆温时,大气状况变得稳定,污染物的垂直扩散受到抑制,地面污染物容易积累。利用 3 月 7—8 日 NCEP 的每 6 h 1 次的 FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料对上海地区 ( $31^\circ \sim 32^\circ \text{N}$ ,  $121^\circ \sim 122^\circ \text{E}$ ) 做区域平均的温度垂直剖面图(图 5a)显示,7 日 08 时后上海地区中低空主要位于暖脊附近,这种温度的垂直结构使得大气层结比较稳定,不利于污染物在垂直方向上的扩散,此外由 7 日 08 时和 8 日 08 时上海地区的探空曲线可以看到(图 5b 和 5c),这两日夜间到早晨在垂直方向上均出现了辐射逆温,辐射逆温是由于夜间地面有效辐射减弱,近地层气温迅速下降,而高处大气降温较少,从而出现上暖下冷现象。在出现辐射逆温的情况下,近地层大气垂直层结均比较稳定,会减弱大气湍流交换和热力对流,阻碍污染物的向上扩散稀释,导致在低空污染物不断积聚,造成污染物浓度的持续升高。这两日的温度垂直分布特征有利于污染物的积聚,不易向上扩散,容易造成高浓度的空气污染。

到近地层均为正的垂直速度,为下沉气流,抑制颗粒物垂直扩散,而 8 日开始 700 hPa 以下开始出现弱的上升运动,有利于颗粒物的扩散。从散度垂直剖面图(图 6b)上也可以看到,7—8 日上海地区辐合辐散都较弱,8 日前近地层基本为辐散,8 日后转为辐合,进一步验证了上述结论。

### 3.3 垂直环流分析

由前文分析已知,按照地面形势此次过程可归为高压类,弱的气压场为颗粒物的积聚创造了条件,

但造成 7 日颗粒物浓度上升明显的原因是什么? 本文在这里将进行重点分析。由前期的地面天气图可以知道(图略), 上海地区主要位于高压顶部或前部, 地面主导风向为偏西风或西南风, 而由四个城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的时序变化图(图 7)可以看到位于上海西部和西南部的武汉、杭州及衢州三地前期  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度值基本低于上海, 且在 7 日上海  $\text{PM}_{2.5}$  的浓度值出现明显上升的过程前, 其余三个城市均未出现明显峰值, 因此上海地区 7 日颗粒物浓度的上升

并不是由地面的西南风将其上游城市群落的污染物输送所致。但是, 反观上海的西北部和北部地区, 可以看到 5—7 日甘肃及内蒙古西部和蒙古国均出现了扬沙、沙尘暴和浮尘天气由此可见这一片区域一直有污染源存在。因此, 如果有输送通道存在, 就能够将上述地区的污染物输送至上海地区。由前文分析所知, 地面上并不存在这样的输送, 那么低空到高空是否存在这样的通道呢?

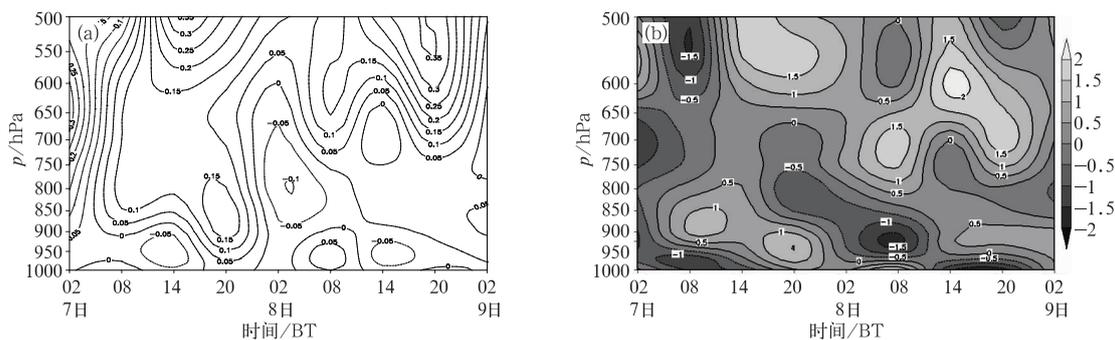


图 6 2013 年 3 月 7—8 日上海地区平均垂直速度(a, 单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )和散度垂直剖面(b, 单位:  $10^{-6} \text{s}^{-1}$ )

Fig. 6 The vertical cross sections of average vertical velocity (a, unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and divergence (b, unit:  $10^{-6} \text{s}^{-1}$ ) in Shanghai during 7—8 March 2013

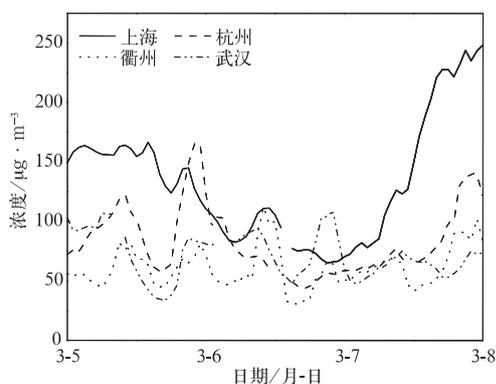


图 7 2013 年 3 月 5—7 日上海、杭州、衢州和武汉  $\text{PM}_{2.5}$  浓度时间序列图

Fig. 7 Time series of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration in Shanghai, Hangzhou, Quzhou and Wuhan during 5—7 March 2013

利用 3 月 7—8 日的 NCEP 的每 6 h 1 次的 FNL  $1^\circ \times 1^\circ$  的再分析资料, 从内蒙古西部至上海做西北—东南向的垂直剖面图(图 8a)(该图中制作垂直环流时将垂直速度扩大了  $10^2$  倍), 可以看到, 内

蒙古西部( $102^\circ\text{E}$  附近)800 hPa 以下均为上升气流(该处为沙尘天气发生区), 从内蒙古至上海为西北气流, 而上海 925 hPa 以上存在非常明显的下沉气流, 这种垂直环流的配置为上游污染物的输送提供了一个输送通道, 可以先将上游的污染物输送至高空, 再由一致的西北气流输送至上海上空, 然后随着下沉气流输送至近地面, 这样就造成了 7 日开始出现非常明显的颗粒物的上升过程。到 20 时(图 8b)内蒙古到上海仍维持与 08 时一致的垂直环流的配置, 因此在这种环流配置下, 7 日颗粒物浓度不仅上升迅速, 且一直维持在高浓度水平, 出现了 6 d 中最严重的污染, 达到了重度污染的等级。此外, 由于激光雷达是探测大气气溶胶物理及光学特性时空分布的有效手段(邱金桓等, 1994; 白宇波等, 2000; 贺千山等, 2005), 因此本文给出了 7 日激光雷达距离订正信号强度的时空分布(图 9), 在某一距离  $r$  处激光雷达返回信号是每微秒的光子数, 经过噪音订正与距离订正的信号(该信号为无量纲量)以不同的颜色显示, 反映了大气中颗粒物在垂直方向上的分布状况, 某处颜色数值越大, 说明颗粒物含量越多。由图 9 可以看到 7 日早晨有逆温层存在, 在逆温层的

上部一直到 3 km 处均有颗粒物存在,说明 7 日中低空确实有颗粒物输送过来,之后随着逆温层被破坏,上部的颗粒物向下混合,1 km 处距离订正信号

强度越来越强,这也证实了此次颗粒物浓度的迅速上升是由中低空输送至地面所致。

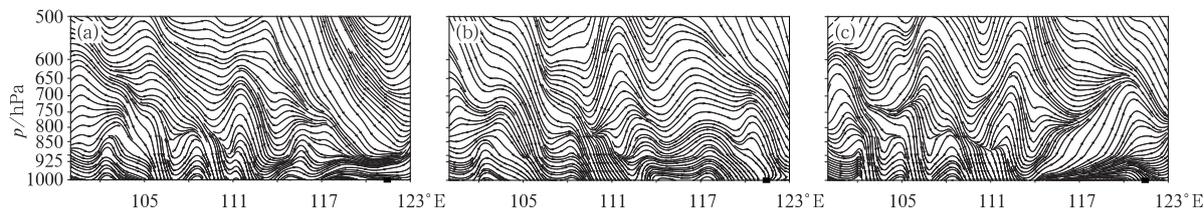


图 8 2013 年 3 月 7 日 08 时(a),20 时(b)和 8 日(08 时)(c)内蒙古—上海垂直环流剖面图

(■:上海位置)

Fig. 8 The vertical cross sections of vertical circulation from Inner Mongolia to Shanghai at 08:00 BT 7 (a), 20:00 BT 7 (b) and 08:00 BT 8 (c) March 2013

(■: Shanghai)

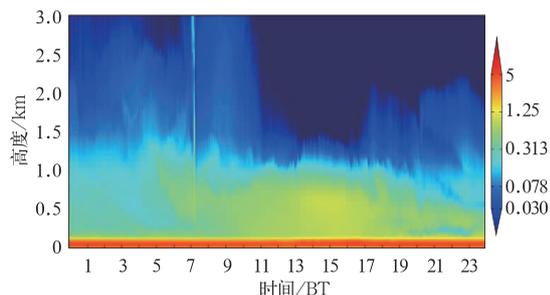


图 9 2013 年 3 月 7 日上海世博观测站激光雷达距离订正信号强度(无量纲量)分布

Fig. 9 The vertical profiles retrieved (dimensionless number) from the ground-based Micro Pulse Lidar (MPL\_4B) from Shibo Station in Shanghai on 7 March 2013

从 8 日 08 时的垂直环流(图 8c)可以看到,此时上海上空 925 hPa 以上已由下沉气流转为上升气流,而内蒙古西部(102°E 附近)上空 600 hPa 以下已转为下沉气流,虽然内蒙古到上海一线上空水平方向上仍被西北气流控制,但由于垂直方向上气流方向的变化导致了此种形势不再有利于将上游的污染物输送至下游,因此从 8 日开始颗粒物浓度出现了下降过程。

此次输送过程与传统颗粒物输送过程(中低空至地面一致的气流)不同,虽然地面没有明显的西北气流,但中低空的西北气流仍然可以将上游的污染物输送至上海,并由下沉气流输送至近地面,此类过程由于地面实况及环流场很难提前判别,因此在预报中容易失败。

### 3.4 颗粒物成分分析

图 10 给出了 3 月 5 和 7 日  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的比

值时序图,对比发现 5 日  $PM_{2.5}/PM_{10}$  均在 0.5 以上,说明 5 日颗粒物成分以  $PM_{2.5}$  为主;而 7 日从 06 时开始  $PM_{2.5}/PM_{10}$  出现了明显的下降过程,到 11 时两者的比值已经降至 0.5 以下,说明此时颗粒物中  $PM_{10}$  的成分要高于  $PM_{2.5}$ ,之后比值开始回升。由图 3a 可知,3 月 5 日地面形势是典型的高压控制,上海地区位于高压中心附近,气压场很弱,利用本地污染物的积累,没有明显的沙尘输送,因此 5 日的颗粒物成分以细颗粒为主;而 7 日出现了短时的  $PM_{10}$  占主要成分的现象,且  $PM_{2.5}/PM_{10}$  有迅速减小的过程,这也在一定程度上说明 7 日有沙尘输送到本地,与前文内蒙古地区有沙尘向上海输送的结论一致。

### 3.5 FY-3A 卫星沙尘监测图和 HYSPLIT 后向轨迹分析

为了进一步验证污染物的来源,本文选取上海地区作为后向轨迹的终点,同时结合 FY-3A 卫星沙尘监测图来研究此次污染过程中污染物的来源。HYSPLIT-4 是由美国 NOAA 研制的具有处理多种气象输入场,多种物理过程和不同类型排放源的较完整的输送、扩散和沉降的综合模式系统,此轨迹模式是一种欧拉和拉格朗日混合型的计算模式,已被广泛应用于大气污染物输送研究(张红等,2008)。

图 11 是由 FY-3A 卫星数据反演得到的沙尘监测产品,由图 11a 可以看到,在 3 月 5 日 10:15 内蒙古地区有大片沙尘存在,而华东中北部地区则没有沙尘,结合图 12 可以看到,在 5 日 1500 m 的气团正好经过此地;到 6 日 10 时(图 11b)沙尘区已经到达

河南和陕西的交界处,这也与图 12 给出的气团走向相吻合,而华东地区仍没有沙尘区;由图 12a 可以看

到,7日 08 时来自内蒙古地区的 1500 m 的气团已经到达上海地区,结合图 11c 可以看到,到 7 日 09:40

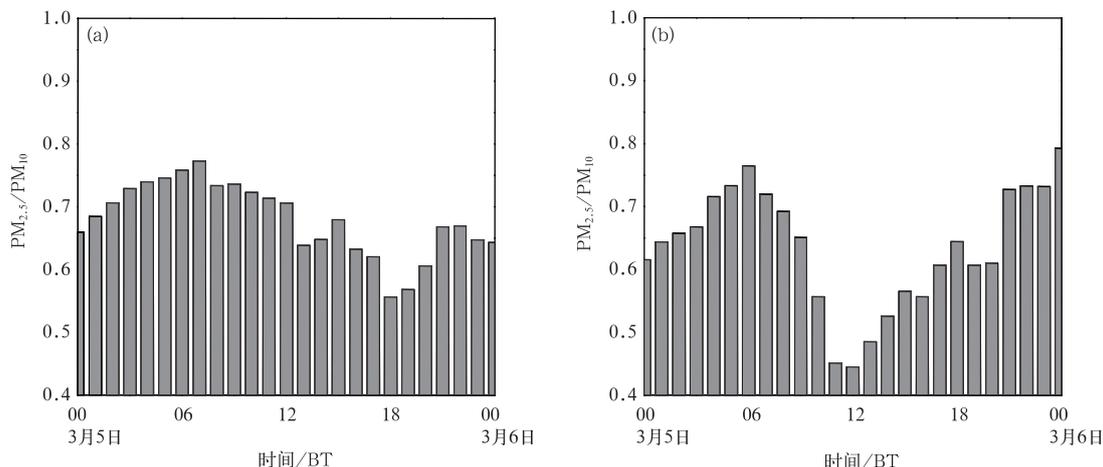


图 10 2013 年 3 月 5 日(a)和 7 日(b)上海地区  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  浓度比值(无量纲量)时间序列图

Fig. 10 Time series of  $PM_{2.5}/PM_{10}$  (dimensionless number) in Shanghai on 5 March (a) and 7 March (b) 2013

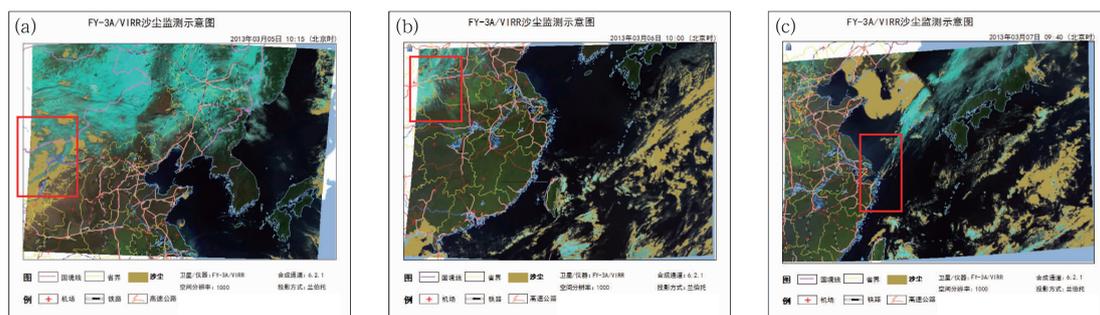


图 11 2013 年 3 月 5—7 日 FY-3A 卫星沙尘监测图(图中红框:沙尘区)  
(a)5 日 10:15,(b)6 日 10:00,(c)7 日 09:40  
(引自国家卫星气象中心)

Fig. 11 The dust retrieval from FY-3A satellite during 5—7 March 2013  
(a) 10:15 BT 5 March, (b) 10:00 BT 6 March, (c) 09:40 BT 7 March  
(from National Satellite Meteorological Centre)

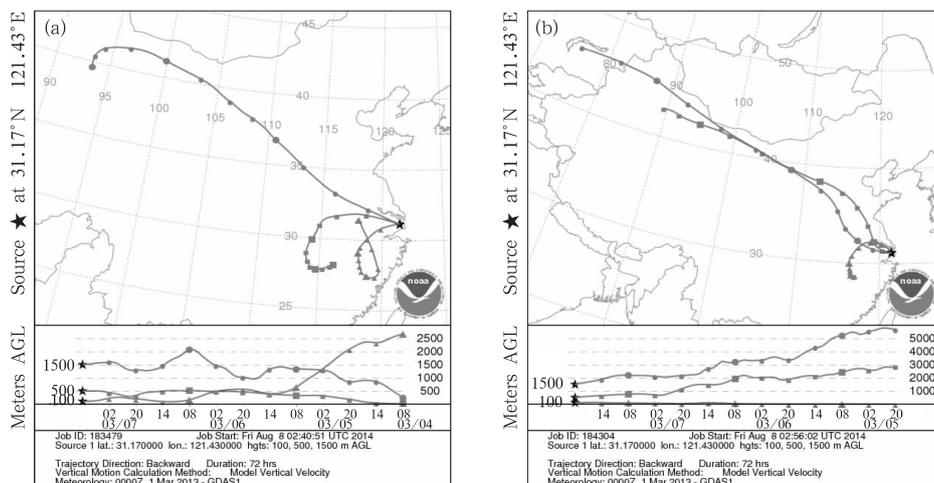


图 12 2013 年 3 月 7 日 08 时(a)和 20 时(b)到达上海地区的后向轨迹图

Fig. 12 The backward trajectories ending at 08 BT (a) and 20 BT (b) 7 March 2013

沙尘区已经经过上海地区,到达其东部沿海,这也进一步证明了内蒙古地区的沙尘确实经过长距离的输送到达了上海地区。同时,在经过长距离的输送后,上海沿海地区的沙尘区较小,也较分散,说明粗颗粒在传输过程中沉降比较明显。此外,图12还可以看到,7日08时1500 m上到达上海的气团主要来自上海西北部的内蒙古地区,而500和100 m的气团却来自上海的西南部;之后到20时500 m上的气团来向也转为上海西北部的内蒙古地区,但100 m的气团仍来自上海西南部;同时还可以看到在7日,不同高度上的气流均出现下沉现象,图12说明7日500 m及以上到达上海的气团主要来自上海西北部的内蒙古地区。因此由FY-3A卫星沙尘监测图和到达上海地区的后向轨迹可以看到,此次重度污染过程的污染源主要是来自上海西北部几千千米之外的内蒙古西部,且主要是由500 m及以上的气流输送,与常态化的近地面输送不同,这与3.3节的结论一致。

## 4 结论与讨论

2013年3月4—9日上海地区连续颗粒物污染过程具有区别于以往过程的特殊性。通过对这次过程的常规气象资料、激光雷达资料、物理量场资料、 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 浓度数据以及后向轨迹的分析,得出以下结论:

(1)2013年3月4—9日的连续污染过程与天气形势的高低空配置有密切关系,槽后西北气流控制,稳定的垂直层结及地面较弱的气压场,有利于颗粒物的积聚和维持,容易出现长时间较严重的连续颗粒物污染过程。

(2)从颗粒物浓度变化来看,3月7—8日均达到了重度污染的级别,主要是850 hPa及以上中低空西北气流输送导致,同时,本地风力小、大气层结稳定,近地层的下沉运动等均不利于污染物在水平和垂直方向上的扩散,为污染物的积聚创造了条件。

(3)此次重度污染过程的污染源主要是来自上海西北部几千千米之外的内蒙古西部,虽然内蒙古西部是沙尘发生区,颗粒物以粗颗粒为主,但在输送过程中粗颗粒会出现较明显的沉降,而细颗粒相对来说沉降较少,因此颗粒物到达上海地区时其粗颗粒的含量相对于污染源区必然减少较多,同时由于上海地区前期颗粒物积累时间较长(3月3—6日),

浓度较高,且积累的颗粒物成分主要为 $PM_{2.5}$ ,因此上游输送到上海地区的颗粒物只造成了短时成分以 $PM_{10}$ 为主的现象,而日平均的首要污染物仍然是 $PM_{2.5}$ 。

(4)本文区别于以往外源输送性重污染天气的特点:中低空西北气流将污染物输送至上海,再配合下沉运动沉降到地面,近地层垂直温度层结稳定,抑制边界层颗粒物的垂直扩散,预报中关注此类天气过程,探讨类似过程污染天气的形成机理,为今后的空气质量预报预警提供新的思路。

**致谢:**感谢国家卫星气象中心给本文提供了FY-3A反演的沙尘监测图。

## 参考文献

- 白宇波,石广玉,田村耕一,等.2000.拉萨上空大气气溶胶光学特性的雷达探测.大气科学,24(4):559-567.
- 陈秉衡,阚海东.2003.大气污染与健康——中国的经验和挑战.环境与健康展望,111(1c):3-7.
- 陈敏,马雷鸣,魏海萍,等.2013.气象条件对上海世博会期间空气质量影响.应用气象学报,24(2):140-150.
- 程兴宏,徐祥德,陈尊裕,等.2007.北京地区 $PM_{10}$ 浓度空间分布特征的综合变分分析.应用气象学报,18(2):165-172.
- 邓涛,吴兑,邓雪娇,等.2012.珠江三角洲一次典型复合型污染过程的模拟研究.中国环境科学,32(2):193-199.
- 邓雪娇,李菲,吴兑,等.2011.广州地区典型清洁与污染过程的大气湍流与物质交换特征.中国环境科学,31(9):1424-1430.
- 丁一汇,李巧萍,柳艳菊,等.2009.空气污染与气候变化.气象,35(3):3-14.
- 段献忠,陈欢欢.2008.珠江三角洲空气污染时空分布特征及一次区域性污染过程气象特征数值模拟.中山大学研究生学刊(自然科学与医学版),29(3):42-49.
- 耿建生,丁爱萍,陈佩君.2006.南通市一次连续空气污染过程的气象特征分析.广州环境科学,21(3):18-21.
- 贺千山,毛节奏.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):373-384.
- 环境保护部.2012.HJ633—2012环境空气质量指数(AQI)技术规范.北京:中国环境科学出版社,1-2.
- 黄青,程水源,苏福庆,等.2011.北京市一次 $PM_{10}$ 污染过程模拟与气象诊断分析.北京工业大学学报,37(11):1743-1748.
- 侯灵,姚展予.2012.环北京地区空气污染指数与降水的周循环特征及其影响机制分析.大气科学,36(4):686-696.
- 靳茉莉,颜鹏,马志强,等.2014.北京及周边地区2013年1—3月 $PM_{2.5}$ 变化特征.应用气象学报,25(6):690-700.
- 李鹏飞,张明军,王圣杰,等.2012.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析.环境科学,33(6):1936-1943.
- 李雄,苏志.2014.空气污染抑制小雨:华南与青藏高原对比分析.气象学报,72(3):596-605.
- 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.
- 阚海东,陈秉衡. 2002. 我国大气颗粒物暴露与人群健康效应的关系分析. 环境与健康杂志, 19(6):422-424.
- 邱金桓,孙金辉. 1994. 沙尘暴的光学遥感及分析. 大气科学, 18(1): 1-10.
- 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. 气象, 34(6):89-96.
- 任雅斌,苏继锋,朱彬,等. 2012. 南京市一次连续空气污染过程的气象条件分析. 环境监控与预警, 4(1):6-10.
- 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. 气候与环境研究, 13(1):53-60.
- 魏文秀. 2010. 河北省霾时空分布特征分析. 气象, 36(3):77-82.
- 夏冬,吴志权,莫伟强,等. 2013. 一次热带气旋外围下沉气流造成的珠三角地区连续灰霾天气过程分析. 气象, 39(6):759-767.
- 徐敬,丁国安,颜鹏,等. 2007. 北京地区 PM<sub>2.5</sub> 的成分特征及来源分析. 应用气象学报, 18(5):645-654.
- 徐祥德,周秀骥,施晓晖. 2005. 城市群落大气污染影响的空间结构及尺度特征. 中国科学 地球科学, 35(S1):1-19.
- 杨德保,王式功,黄建国等. 1994. 兰州市区大气污染与气象条件的关系. 兰州大学学报(自然科学版), 30(1):132-136.
- 于庚康,王博妮,陈鹏,等. 2015. 2013 年初江苏连续性雾-霾天气的特征分析. 气象, 41(5):622-629.
- 于娜,魏永杰,胡敏,等. 2009. 北京城区和郊区大气细粒子有机物污染特征及来源解析. 环境科学学报, 29(2):243-251.
- 张国珺,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.
- 张红,邱明燕,黄勇,等. 2008. 一次由秸秆焚烧引起的霾天气分析. 气象, 34(11):96-100.
- 甄新蓉,陈镭,毛卓成,等. 2012. 2011 年上海地区空气污染气象条件分析. 大气科学研究与应用, (1):51-60.
- 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. 中国环境科学, 31(12):1943-1950.
- Carrol J J, Dixon A J. 2002. Regional scale transport over complex terrain. A case study: Tracing the Sacramento plume in the Sierra Nevada of California. Atmos Environ, 36(23): 3745-3758.
- Chen D S, Cheng S Y, Liu L, et al. 2007. An integrated MM5-CMAQ modeling approach for assessing trans-boundary PM<sub>10</sub> contribution to the host city of 2008 Olympic Summer Games-Beijing, China. Atmos Environ, 41(6):1237-1250.
- Cheng S Y, Chen D S, Li J B, et al. 2007. 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. Environ Model Softw, 22(11): 1601-1616.
- Li Jiawei, Han Zhiwei. 2012. A modeling study of seasonal variation of atmospheric aerosols over East Asia. Adv Atmos Sci, 29(1): 101-117.