

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

王 璟¹ 伏晴艳¹ 王汉峥¹ 陆 涛¹ 林陈渊¹ 冯 静²

1 上海市环境监测中心, 上海 200030

2 深圳市气象服务中心, 深圳 518001

摘 要 2005年11月22日~12月2日上海市环境空气质量罕见地出现连续11天轻度污染, 作者从天气形势和气象因子变化着手, 初步分析了此次污染事件的成因。结果表明: 轻度污染期间, 上海市主要受高压脊控制, 天气晴朗, 气温回升, 昼夜温差大, 地面风速很小, 早晚易出现逆温和轻雾, 这种停滞的气象条件不利于大气污染物扩散, 易造成轻度空气污染。后向轨迹和PM₁₀与PM_{2.5}浓度变化分析阐明, 如果气旋移动在北方引起沙尘天气, 冷空气南下途中没有显著降水, 伴随锋面移动的大风天气极有可能长距离输送高空浮尘, 造成下游地区PM₁₀浓度显著上升, 出现典型的颗粒物污染。

关键词 空气污染 天气形势 气象条件 长距离输送

文章编号 1006-9585 (2008) 01-0053-08 **中图分类号** X16 **文献标识码** A

Study on An Infrequent Multi-day Air Pollution Episode in Shanghai

WANG Jing¹, FU Qing-Yan¹, WANG Han-Zhen¹, LU Tao¹, LIN Chen-Yuan¹, and FENG Jing²

1 *Shanghai Environmental Monitoring Center, Shanghai* 200030

2 *Shenzhen Meteorological Service Center, Shenzhen* 518001

Abstract An uncommon multi-day air pollution episode in Shanghai was investigated, which lasted from 22 November to 2 December, 2005. The synoptic process and temporal change of meteorological variables and pollutants were analyzed in detail to reveal how and why this episode occurred. The high pressure dominated Shanghai, producing clear skies, subsidence inversions, and weak surface wind, which was associated with this multi-day air pollution episode. With the backward trajectories and comparison of PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations, we studied on the long-distance transport of particulate matter. The results show that the cold front could cause the remarkable increase of PM₁₀ here when it passed by Shanghai if the duststorm occurred when the cold air moved from north to south.

Key words air pollution, synoptic pattern, meteorological conditions, long-distance transport

1 引言

环境空气中污染物的时空变化特征与气象条件密切相关, 影响大气污染物扩散、迁移、转变

的气象因子主要有: 风、温度、湿度、降水、大气稳定性和混合层厚度等。局地气象条件变化受天气系统演变支配和控制, 研究区域和城市空气污染过程天气形势转变和气象因子, 有助于认识空气污染形成机制, 为环境空气质量预报提供方

收稿日期 2006-08-09 收到, 2007-09-26 收到修定稿

资助项目 上海市环境保护科学技术发展基金资助项目 05102

作者简介 王璟, 女, 1979年出生, 硕士, 工程师, 主要从事城市空气质量预报和污染成因分析。E-mail: wangjing@semc.gov.cn

法和积累经验。

刘兴中等^[1]对南京大气高浓度污染与气象条件的关系研究中指出,天气形势和大气污染程度有密切的关系,造成南京冬季高浓度污染的地面天气形势为:1)从河套到长江中下游维持稳定的L型高压;2)主体位于蒙古的高压分裂出小高压到长江中下游地区。这两种形势下,多有逆温、小风等特点,易造成污染物堆积。杨德保等^[2]分析了兰州市区大气边界层监测试验和污染物浓度资料,研究结果表明不同的天气系统和气压系统对空气中污染物浓度的影响是很明显的。冷锋过境前,污染物浓度逐渐增高,并达到峰值;冷锋过境后,污染物浓度迅速降低,而且冷锋强度不同对污染物的影响也不同。刘小红等^[3]利用北京325 m气象塔污染物和气象要素的同步观测分析得到,强天气过程如冷锋过境,可造成NO_x、CO体积分数的急剧降低。任阵海等^[4]提出大气汇聚带是造成地区较重污染的一类环境过程,它主要限于在大气边界层内的大气污染物的汇聚过程,影响沙尘天气的冷锋也是一种深厚的汇聚带,在其侵入北京时往往出现先污染后沙尘的现象。苏福庆等^[5]指出污染边界层中污染物呈气团型输送,北京地区冬季输送层高度多数为500 m左右。楼丽银等^[6]分析了2002年温州出现高浓度空气污染日的地面天气类型,主要有高压底部型、冷锋前部型、入海高压后部型、大陆高压型和均压场型。任阵海等^[7]分析了2002年12月9~16日我国北方区域性严重污染过程,其主要特征是初始阶段为持续的晴天和高压均压场,随后均压场后部的西南气流使重污染区上空暖空气盖增强,边界层逆温厚度增大。王喜全^[8]利用北京空气质量监测资料和NCEP再分析资料,分析确定了二类北京PM₁₀重污染的典型天气形势,即高压南下东移阻滞型和与北上台风(或热带低压)相关联的弱高压控制型。

上海市2000~2004年的环境大气监测数据表明,5年间上海市环境空气质量连续轻度及以上污染天数最长为7天,2005年11月22日~12月2日连续11天出现轻度污染,这种情况为近几年罕见。因此,研究分析这次典型空气污染事件的形成机制,了解影响上海大气污染物浓度变化的天气过程,有助于认识上海市大气污染气象条件,

并为发展和建立空气质量预报方法提供有效途径。本文通过分析此过程期间天气形势、气象要素变化对环境大气中污染物浓度的影响,初步探讨了上海市此次污染过程的形成原因。

2 环境空气质量的变化

2.1 SO₂、NO₂和PM₁₀空气污染指数的变化

中国城市和区域使用空气污染指数(Air pollution index即API)报告每日空气质量,根据我国空气污染的特点和污染防治重点,目前计入空气污染指数的项目定为:SO₂、NO₂和PM₁₀。API的范围为0~500,其中50和100分别为环境空气质量一级和二级(即优良)标准限值,100以上表示出现空气污染。污染物日平均浓度的计算时段定为前一日12时到当日11时(北京时间,下同)24 h的平均浓度,3种污染物的污染指数计算出后,取最大者为该区域或城市的API,该项污染物即为该区域或城市空气中的首要污染物。

图1显示了研究期间上海主要污染物的API变化。11月22日~12月2日上海市环境空气持续11天出现轻度污染,首要污染物均为PM₁₀。3种污染物的API都从11月21日开始上升,11月23~27日维持在较高水平,PM₁₀和NO₂的API值分别在150和100左右摆动,SO₂的API指数在75~101之间波动;28日3种污染物的API均

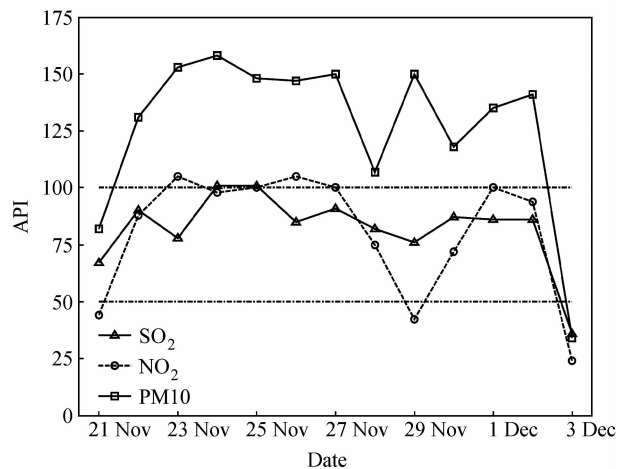


图1 2005年11月21日~12月3日上海市SO₂、NO₂和PM₁₀空气污染指数的变化

Fig. 1 Evolution of SO₂, NO₂ and PM₁₀ APIs from 21 Nov to 3 Dec 2005

较之前有所下降；值得注意的是，29 日 PM10 的 API 从 28 日 107 反弹上升到 150，SO₂ 和 NO₂ 继续下降，而 30 日 PM10 有所下降，SO₂ 和 NO₂ 表现为上升趋势；12 月 1 和 2 日 3 种污染物 API 再次达到较高值；3 日空气质量转为优等级。

特别需要指出的是，11 月 29 和 30 日，SO₂ 和 NO₂ 的变化趋势与 PM10 的完全相反说明此次连续高浓度空气污染过程成因具有一定的复杂性，必须考虑本地和外来污染源对 3 种大气污染物的不同影响。

2.2 SO₂、NO₂和 PM10 浓度的逐小时变化

为了更细致地研究这次连续污染事件，图 2 给出 SO₂、NO₂ 和 PM10 平均小时浓度的变化状况。可以看到，11 月 28 日午后 SO₂ 和 NO₂ 的小时浓度整体呈现下降趋势而 PM10 一直飙升，其他时间 3 种污染物浓度变化趋势基本一致，同时各自具有显著特点。具体来讲：1) PM10 小时平均浓度变化存在峰值区间，基本上都出现在傍晚到上午 9 点左右，中午前后其浓度最低；2) NO₂ 小时均值的早晚峰值突出，这与上下班交通高峰有关，其日变化的谷值也出现在中午；3) 相对于 NO₂ 和 PM10，SO₂ 的变化较复杂，一天中其最大值也多出现在早晚，但傍晚的峰值有时不明显，通常凌晨和午后其浓度较低。

3 天气形势和气象要素变化对污染物浓度的影响

3.1 天气形势变化分析

图 3 显示了这次高污染过程的典型天气形势。11 月 22 日蒙古冷高压脊从西北经河套伸向长江中下游，上海市受其控制天气晴好，直至 26 日蒙古有一冷锋形成，其前部高压不断向东南分裂推进，长江中下游地区仍受高压脊控制；27 日上午控制上海的分裂高压开始东移入海，上海地区主要受高压后部的东风系统影响，地面以东到东南风为主，此时北方冷空气也逐渐向南推进；28 日午前冷锋在上海过境，冷锋移动非常迅速，29 日下午上海市又转受高压脊控制，30 日位于高压中心附近；12 月 1 日又有一股冷空气向上海方向推进，2 日 0 时左右冷空气影响上海，冷暖空气交汇，上海位于冷锋北侧东北西南向雨带北缘；3 日受西南地区高空槽东移影响，上海市转为阴雨天气。

3.2 主要气象因子的变化特征

在分析天气形势演变基础上，讨论局地气象因子变化对大气污染物的影响，进一步探讨此次空气污染过程的成因。

图 4 为此次轻度空气污染期间上海宝山气象观测站云量、相对湿度、温度日较差和地面风速

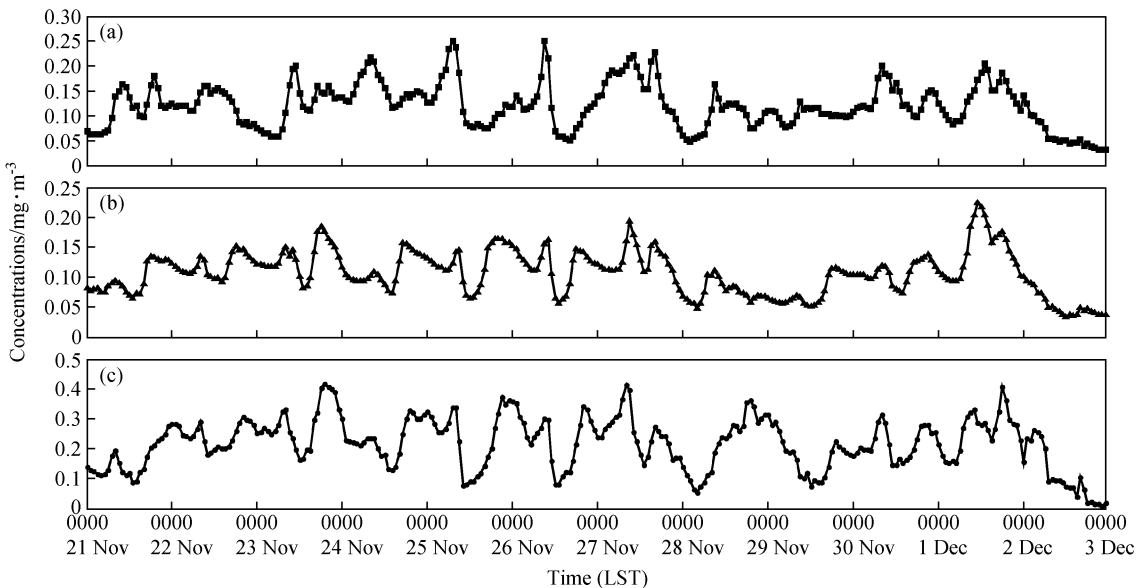


图 2 2005 年 11 月 21 日~12 月 2 日 (a) SO₂、(b) NO₂和 (c) PM10 浓度的逐小时变化

Fig. 2 Evolvement of the hourly SO₂, NO₂ and PM10 concentrations from 21 Nov to 2 Dec 2005

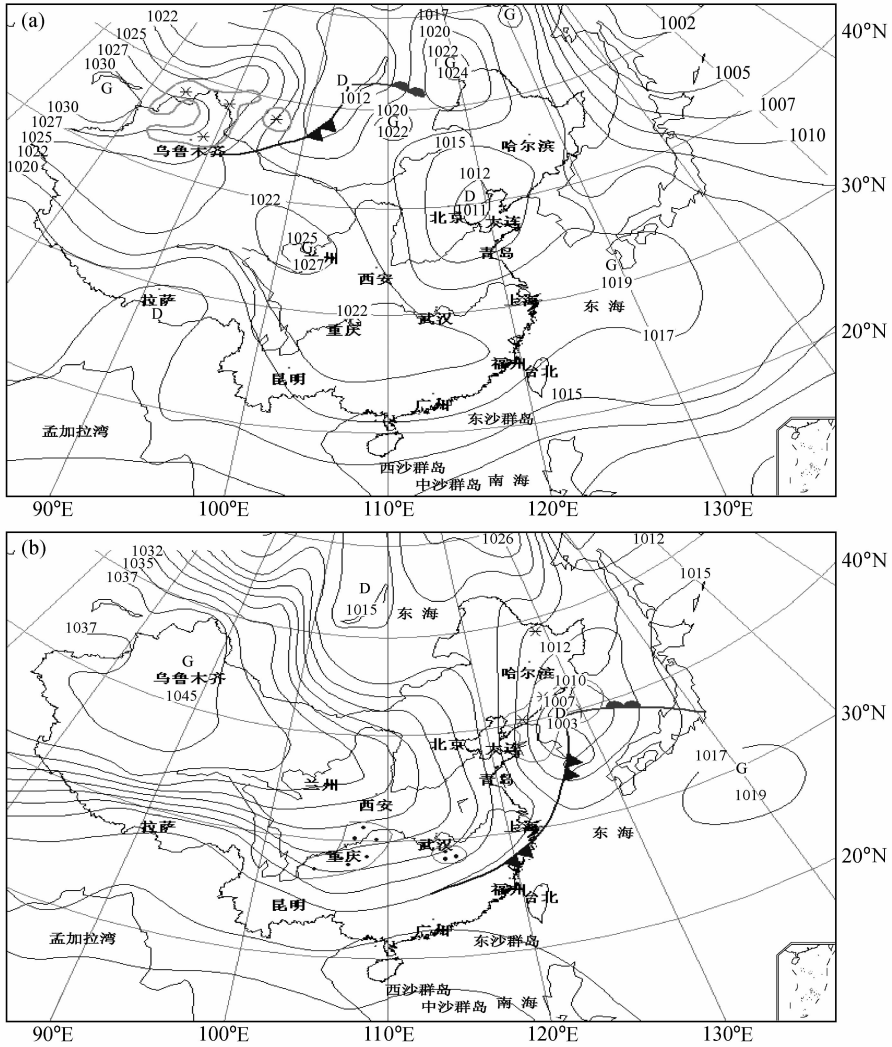


图3 空气污染过程典型地面天气形势(单位: hPa): (a) 2005年11月26日2时; (b) 2005年11月28日14时
Fig. 3 Typical surface synoptic patterns during this air pollution episode (units: hPa): (a) 0200 LST on 26 Nov 2005; (b) 1400 LST on 28 Nov 2005

风向的变化。表1根据该站常规气象探空观测资料,利用温度对数压力图,统计了每天8和20时接地逆温或等温层厚度和强度。结合图2污染物浓度逐时变化,以下重点分析气象条件对SO₂、NO₂和PM₁₀的影响。

11月21~27日上海市受高压脊控制,基本上都是晴空,天气晴朗,辐射降温显著,早晚出现了较强的接地逆温层,26日8时逆温强度高达12.2℃·(100m)⁻¹;且根据宝山气象站的天气观测,11月22~27日,上海市夜间到清晨大部分地区出现轻雾和霜;21~24日地面以西到西北风为主,25~27日以西到西南风为主,早晚风速只

有1~2m·s⁻¹,而且夜晚时静风,这种停滞的气象条件引起近地层大气污染物不断累积,是22~27日连续轻度空气污染发生的主要原因。

27日下午高压出海后,上海宝山气象站相对湿度变化有所减小,地面风向转为东到东南风,风速也较之前增大,而且东风系统湍流发展旺盛,这些条件有利于大气污染物的稀释扩散,SO₂、NO₂和PM₁₀浓度出现一致下降趋势。

28日上午冷空气开始影响上海,相对湿度减小,西北风最大风速达到7m·s⁻¹,特别应该注意的是:这时SO₂和NO₂浓度开始下降,而PM₁₀浓度持续攀升,在28日19时达到峰值0.361mg·m⁻³后

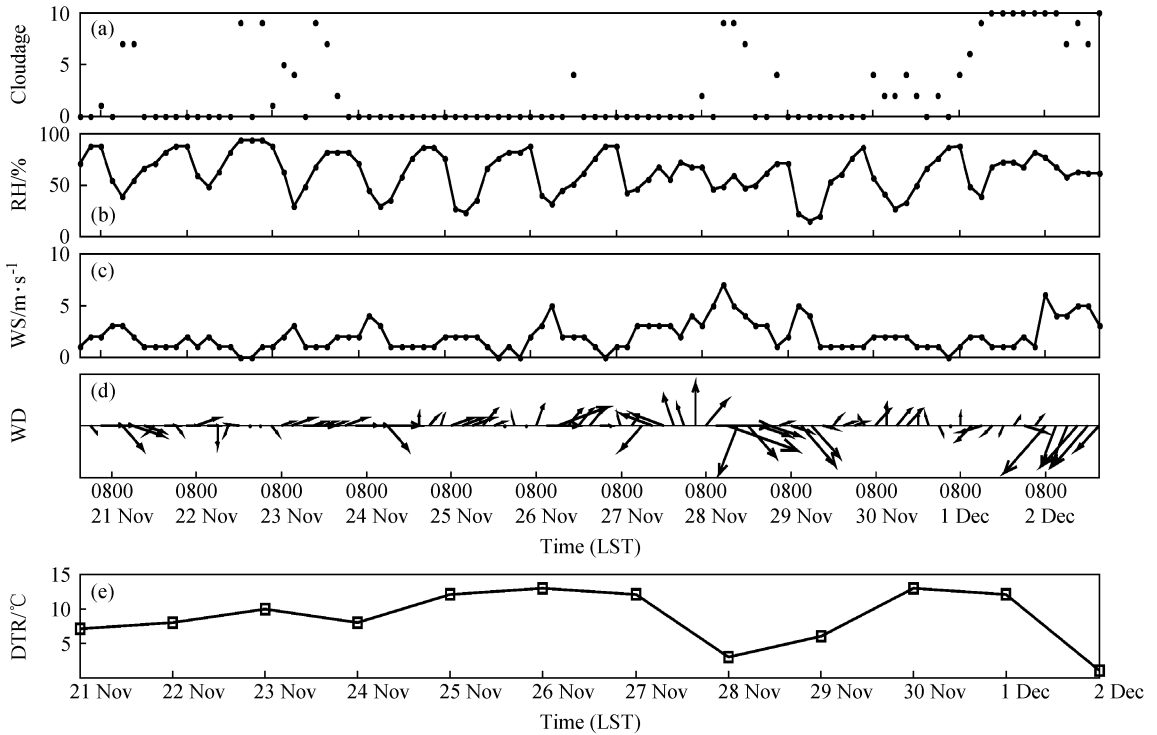


图 4 2005 年 11 月 21 日~12 月 2 日上海宝山气象观测站 (a) 云量、(b) 相对湿度 (RH)、(c) 地面风速 (WS) 和 (d) 风向 (WD) 及 (e) 温度日较差 (DTR) 的变化

Fig. 4 The change of the cloudage, relative humidity (RH), surface wind (WS) and diurnal (WD) temperature range (DTR) at Baoshan weather station from 21 Nov to 2 Dec 2005

表 1 2005 年 11 月 21 日~12 月 2 日接地逆温或等温层厚度和强度

Table 1 The statistics of grounded inversion and isothermal layer during this air pollution episode

| 日期 | 08 时 | | 20 时 | |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------------------|
| | 厚度/ °C · (100 m) ⁻¹ | 强度/ °C · (100 m) ⁻¹ | 厚度/ m | 强度/ °C · (100 m) ⁻¹ |
| 11 月 21 日 | 121 | 1.6 | 165 | 0.6 |
| 11 月 22 日 | 81 | 3.7 | 82 | 1.2 |
| 11 月 23 日 | | | 248* | |
| 11 月 24 日 | 328 | 0.6 | 125 | 1.6 |
| 11 月 25 日 | 228 | 2.2 | 166 | 2.4 |
| 11 月 26 日 | 65 | 12.2 | 151 | 2.0 |
| 11 月 27 日 | 165 | 4.2 | 253 | 1.2 |
| 11 月 28 日 | 559 | 0.2 | 248* | |
| 11 月 29 日 | 121 | 1.7 | | |
| 11 月 30 日 | 113 | 4.4 | 83 | 3.6 |
| 12 月 1 日 | | | 167* | |
| 12 月 2 日 | | | | |

* 表示接地等温层

开始减小。由于冷锋移动很快, 29 日锋后高压系统东伸逐渐控制长三角地区, 上午接地逆温层再次形成, 下午地面风向由西北转为西南, 风速明显减小, SO₂、NO₂和 PM₁₀ 浓度迅速上升。这种不利于大气污染物扩散的气象条件一直维持, 3 种污染物浓度整体保持在较高水平, 直至 12 月 2 日 0 时又一次冷空气天气过程影响上海, 上午地面风向转为东北风, 风速最大达 6 m · s⁻¹, 冷暖空气交汇带来少量降水, 此时 SO₂、NO₂和 PM₁₀ 浓度都出现大幅下降。

值得注意的是, 11 月 28 日下午伴随冷锋过境的大风降温天气并没有减轻上海市前一阶段的颗粒物污染状况, 反而造成 PM₁₀ 浓度大幅反弹上升。

4 冷空气天气过程对空气质量影响的初步分析

通常情况下, 冷锋过境, 伴随冷空气的大风

降温雨雪天气往往有利于当地大气污染物的清除，而此次连续污染事件中 11 月 28 日下午的冷空气天气过程却加重了上海市 PM₁₀ 污染。以下利用上海市长宁和崇明环境空气质量自动监测站 PM₁₀、PM_{2.5} 数据和后向轨迹模型进行探讨分析。

4.1 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 的浓度变化

图 5 对比分析了此次连续空气污染期间上海市长宁和崇明环境空气质量自动监测站 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 小时平均浓度的变化，两个监测站分别位于市区和崇明岛。长宁站 PM₁₀ 和 PM_{2.5} 浓度均比崇明站略高，这说明市区污染比郊区严重；两站颗粒物浓度变化趋势基本一致，特别注意到 28 日下午受冷空气影响，PM₁₀ 浓度持续上升，而 PM_{2.5} 浓度下降显著；11 月 21~28 日中午两个监测站 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的比值基本都在 60% 以上，冷空气影响时，迅速减小到 20%~30% 甚至更低，说明 PM₁₀ 中大颗粒数量增加而小粒子减小，29 日下午这一比值又开始增大。12 月 2 日零点又有一股冷空气影响上海，两个监测站 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 浓度均减小，它们的比值也降低到 30%

~45%。

11 月 28 日下午和 12 月 2 日零点两次冷空气天气影响上海，都导致 PM_{2.5} 浓度显著减小，不同的是，PM₁₀ 浓度在第一次过程中增大，而在第二次过程中呈现下降趋势，这表明第一次冷空气天气过程中强劲的西北风极有可能长距离输送了颗粒物，导致上海市 PM₁₀ 浓度不减小，反而不断升高。

4.2 气团轨迹分析

利用 NCEP 再分析资料，通过 NOAA HYSPLIT 模式模拟此次轻度空气污染期间两次冷空气天气过程前后 500 m 高空到达上海的气团轨迹(图 6)。

分析图 6a 得到，11 月 27 日上海受冷空气影响之前，高空 500 m 气团主要来自河南和安徽，风速很小；冷空气影响时气团来自中蒙边境和内蒙古自治区，根据中国气象局甘肃省气象局讯，受蒙古冷空气影响，11 月 27 日下午，内蒙古自治区拐子湖、海力泰、吉兰泰等站出现扬沙天气，其中海力泰站 17 时出现沙尘暴，由于气团移动迅速，强劲的西北风极有可能长距离输送高空中的

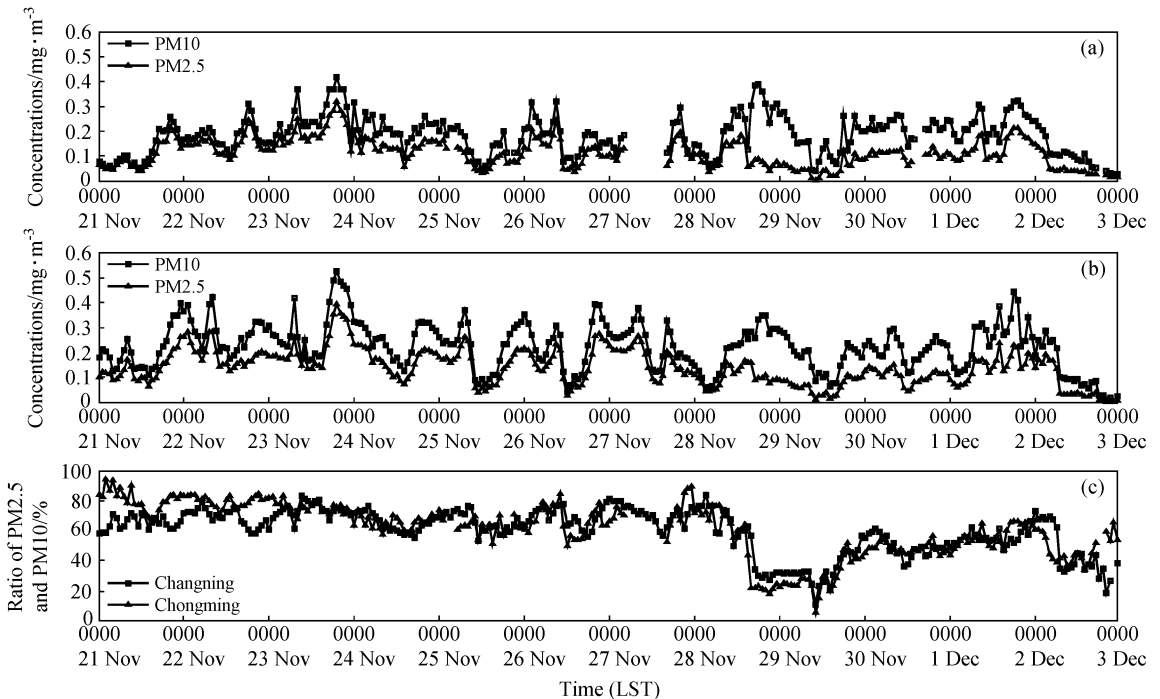


图 5 2005 年 11 月 21 日~12 月 2 日 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 浓度及其比值的逐小时变化：(a) 崇明站；(b) 长宁站；(c) PM_{2.5} 与 PM₁₀ 的比值
Fig. 5 The change of the hourly concentrations of PM_{2.5} and PM₁₀ from Nov 21 to Dec 2 2005: (a) Chongming; (b) Changning; (c) Ratio of PM_{2.5} and PM₁₀

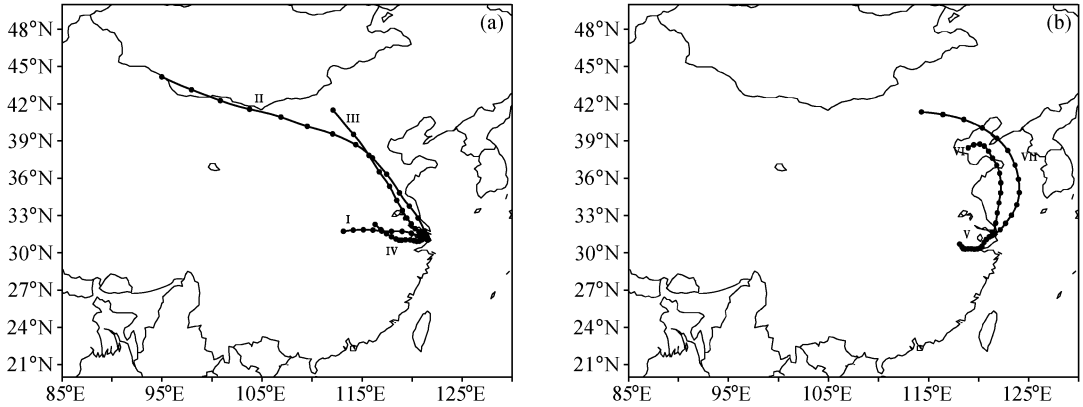


图 6 500 m 高空到达上海的气团 48 h 后向轨迹 (• 表示气团每 3 h 的位置): (a) 11 月 27 时~30 日 20 时 I~IV 轨迹; (b) 12 月 1 日 8 时~3 日 8 时 V~VII 轨迹

Fig. 6 The 48 h backward trajectories to Shanghai at 500 m height. The dots on the trajectory lines indicate locations at 3h intervals; (a) I-IV; 2000 LST 27 Nov-2000 LST 30 Nov; (b) V-VII; 0800 LST 1 Dec-0800 LST 3 Dec

浮尘颗粒。冷空气过后，上海受高压控制，风力减弱，气团来自安徽。

由图 6b 可见，12 月 2 日冷空气天气过程气团主要来自内蒙古东部和河北地区。根据中国气象局甘肃省气象局发布的沙尘实况，该地区没有发生大规模沙尘天气，气团经渤海和黄海到达上海，大风降雨天气缓解了当地连续数日的空气污染。

上海市秋冬季空气污染的发生与冷空气天气过程密切相关，冷空气前后停滞的大陆高压系统容易引起大气污染物的聚积，通常来讲，冷空气影响过程对沿途污染物有一定的清除作用，但是，如果气旋移动在北方引起沙尘天气，南下途中没有显著降水，旺盛的上升气流不断将沙尘带到高空，伴随锋面移动的大风天气极有可能长距离输送高空浮尘。

5 结论

通过分析 2005 年 11 月 21 日~12 月 2 日上海市连续轻度空气污染过程中 SO_2 、 NO_2 、 PM_{10} 、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和气象条件变化，讨论了污染物变化规律，探讨了此次污染事件的成因。

此次轻度污染期间，在没有颗粒物外来输送的情况下，上海市 SO_2 、 NO_2 和 PM_{10} 浓度变化趋势大体一致，最大值基本都出现在傍晚和清晨，中午左右浓度最低，这与研究期间早晚大气扩散能力更差和交通高峰密切相关； PM_{10} 小时浓度

变化存在峰值区间，一定程度上说明其来源比较复杂。

此段时间上海市受高压脊控制，天气晴朗，地面风速小，夜间辐射降温显著，日夜温差和相对湿度变化都很大，早晚易出现逆温和轻雾，这种停滞的气象条件不利于大气污染物扩散，因而造成环境空气质量出现轻度污染。

冷空气天气过程对上海市环境空气质量影响显著，其强弱、性质和移动路径不同，影响效果不同。在适当的天气条件下，冷空气南下极有可能长距离输送北方沙尘，引起下游地区 PM_{10} 中大颗粒浓度剧增，而伴随冷锋移动的大风降温天气对其他污染物有明显的清除作用，出现典型的颗粒物污染。

本文主要从天气过程、气象条件变化等宏观要素分析了上海市此次连续 11 天轻度污染的形成机制，有必要利用数值模式进一步探求其物理和化学过程。此外，当前的环境问题已凸现为区域特征，上海市此次连续污染期间长江三角洲各城市都出现了不同程度的连续污染，研究整个区域性污染过程和城市间污染物的输送，是进行大气环境同步治理的首要工作。

致谢 感谢中国科学院大气物理研究所李杰博士对后向轨迹分析部分提供的建议和帮助。本文天气系统分析得到了海南省气象局郭冬艳预报员的协助，在此深表感谢。

参考文献 (References)

- [1] 刘兴中, 严从路, 牛玉琴, 等. 南京大气高浓度污染的特征及与气象条件的关系. 气象科学, 1992, **12** (1): 107~112
Liu Xingzhong, Yan Conglu, Niu Yuqin, et al. The characteristics of high density air pollution and the relation with weather condition in Nanjing. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 1992, **12** (1): 107~112
- [2] 杨德保, 王式功, 黄建国. 兰州市区大气污染与气象条件的关系. 兰州大学学报 (自然版), 1994, **30** (1): 132~136
Yang Debao, Wang Shigong, Huang Jianguo. The relations between the meteorological conditions and the air pollution over the city of Lanzhou. *Journal of Lanzhou University* (Natural Sciences) (in Chinese), 1994, **30** (1): 132~136
- [3] 刘小红, 洪钟祥, 李家伦, 等. 北京地区严重大气污染的气象和化学因子. 气候与环境研究, 1999, **4** (3): 231~236
Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang, Li Jialun, et al. Meteorological and chemical parameters determining the photochemical air pollution in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, **4** (3): 231~236
- [4] 任阵海, 高庆先, 苏福庆, 等. 北京大气环境的区域特征与沙尘影响. 中国工程科学, 2003, **5** (2): 49~56
Ren Zhenhai, Gao Qingxian, Su Fuqing, et al. The regional characteristics of the atmospheric environment and the impact of dust-storm in Beijing. *Engineering Science* (in Chinese), 2003, **5** (2): 49~56
- [5] 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. 环境科学研究, 2004, **17** (1): 21~25
Su Fuqing, Ren Zhenhai, Gao Qingxian, et al. Convergence system of air contamination in boundary layer above Beijing and north China: Transportation convergence in boundary layer. *Research of Environmental Sciences* (in Chinese), 2004, **17** (1): 21~25
- [6] 楼丽银, 吴正可. 高浓度污染气象条件分析和预报. 科技通报, 2004, **20** (2): 156~163
Lou Liyin, Wu Zhengke. Meteorological condition analysis and prediction of high air pollution. *Bulletin of Science and Technology* (in Chinese), 2004, **20** (2): 156~163
- [7] 任阵海, 苏福庆, 高庆先, 等. 边界层内大气排放物形成重污染背景解析. 大气科学, 2005, **29** (1): 57~63
Ren Zhenhai, Su Fuqing, Gao Qingxian, et al. Analysis of the serious atmospheric pollution event caused by emissions in boundary layer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (1): 57~63
- [8] 王喜全, 齐彦斌, 王自发, 等. 造成北京 PM10 重污染的二类典型天气形势. 气候与环境研究, 2007, **12** (1): 81~86
Wang Xiquan, Qi Yanbin, Wang Zifa, et al. The influence of synoptic pattern on PM10 heavy air pollution in Beijing. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (1): 81~86