

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.

两次秸秆焚烧污染过程的气象条件对比分析^{*}

毛宇清 李 聪 沈 澄 刘冬晴 王永平

南京市气象局, 南京 210009

提 要: 利用常规气象资料、卫星遥感监测资料、污染物浓度资料和 NECP/NCAR 再分析资料, 结合气流后向轨迹模拟, 对比分析了南京地区 2011 年 6 月 10 和 13 日两次由于秸秆焚烧而引起的严重空气污染事件的天气条件、大气边界层特征以及污染物的来源和输送路径等。结果表明: 两次污染过程中 $PM_{2.5}$ 浓度均出现陡升陡降, 由秸秆焚烧而产生的细粒子贡献显著。13 日高污染的持续时间和强度都高于 10 日, 10 日的高低空形势配置和物理量场有利于降水的产生, 对污染物有一定的冲刷作用, 而 13 日的高低空形势配置和物理量场则有利于污染物在边界层堆积。两次污染过程的边界层逆温均不明显。气流后向轨迹模拟表明, 两次过程都是由区域污染输送造成的, 都主要来源于苏中、苏北地区, 13 日的污染源可能还有苏南和安徽地区。

关键词: 秸秆焚烧, 污染, 气象条件, 气流轨迹

中图分类号: P404

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.011

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Two Air Pollution Events from Crop Residue Burning

MAO Yuqing LI Cong SHEN Cheng LIU Dongqing WANG Yongping

Nanjing Meteorological Bureau of Jiangsu, Nanjing 210009

Abstract: Based on the conventional observational data, satellite remote sensing data, main pollutants monitoring data and NCEP/NCAR reanalysis data, together with the airflow backward trajectory simulation method, comparative analysis is conducted on the atmospheric conditions, planetary boundary layer features, air pollutant sources and transport paths of the two serious air pollution events which respectively took place on 10 and 13 June 2011. The results show that the concentrations of $PM_{2.5}$ display a more significant peak-valley variation during the two air pollution events, which result from crop residue burning. The event seen on 13 June has a longer duration and a stronger intensity than the event on 10 June. The weather situation and the physical quantity field of the event on 10 June are favourable for the rainfall, which plays a role in flushing the pollutants. However, the weather conditions on 13 June are conducive to accumulation of pollutants. Both of the boundary inversion layers are not obvious. Air mass backward trajectory simulation show that two air pollution events are caused by the transport of regional pollution due to crop residue burning in the central and north parts of Jiangsu Province. Moreover, the pollution sources for the event on 13 June probably include the south part of Jiangsu Province and part of Anhui Province additional as well.

Key words: crop residue burning, air pollution, weather condition, air mass trajectory

* 南京市科技计划项目(201001070)、南京市气象业务技术团队建设项目(NJ201003)和江苏省气象科研基金(KZ201208)共同资助
2012 年 9 月 18 日收稿; 2013 年 5 月 20 日收修定稿
第一作者: 毛宇清, 主要研究方向为城市气象和短期天气预测. Email: maoyq1021@99.com

引 言

近年来,伴随着高速的城市化和工业化,我国已成为世界上大气污染比较严重的国家之一,区域能见度恶化态势明显,霾天气急剧增多(高歌,2008;吴兑,2012;范引琪等,2008;童尧青等,2007;吴兑等,2006;张恩红等,2012),引起了政府和公众的广泛关注。长江三角洲地区是我国四大霾天气频发和危害较严重的地区之一,其中由于秸秆焚烧引起的霾天气和空气污染事件占有重要比例,具有季节高发性。秸秆焚烧会导致空气中细颗粒物数量的增加,从而增加霾天气的发生几率,严重时会造成大气能见度的急剧下降,威胁城市交通安全,焚烧排放的大量颗粒物 CO、VOC、SO₂、NO₂ 以及 PAHs 等有毒有害物质,还会对大气环境造成严重污染(Li et al, 2008),危害人们身体健康。

国内外学者通过采样观测对秸秆焚烧后的污染物浓度变化及化学组分进行了分析研究(Mittal et al, 2009; Zhang et al, 2008),并利用数值模式模拟污染物的输送轨迹(Evangelista et al, 2007; 郑飞等, 2007; 姜金华等, 2002)。国内学者还利用卫星遥感“火点”监测数据,结合气象资料,分析秸秆焚烧对环境空气质量的影响(厉青等, 2009; 尹聪等, 2011)。在相同的空气污染事件下,不同的气象条件对空气质量产生决定性影响。目前国内关于秸秆焚烧导致的空气污染事件的个例分析相对单一,且气象条件的对比研究很少。孙燕等(2010)和朱佳雷等(2011)分别对 2008 年 10 月江苏沿江一次严重烟霾天气进行了成因分析。张红等(2008)分析了 2007 年 6 月郑州一次由秸秆焚烧引起的霾天气产生的机理。

在江苏,由秸秆焚烧引起的霾天气和空气污染事件每年均有发生,2011 年的秸秆焚烧污染尤为突出,仅 6 月南京就出现了 3 次。其中,6 月 10 和 13 日,南京 4 天内连续发生了两次由于秸秆焚烧造成的严重空气污染事件,最低能见度不足 80 m。本文针对这两次污染过程,从环流形势、气象要素、污染物浓度、卫星遥感监测、边界层特征、物理量诊断、气流后向轨迹等方面进行对比分析,研究不同气象条件对污染物扩散的影响,为开展空气污染气象条件预报提供参考依据。

1 资料和方法

常规气象资料来自于南京国家气候基准站的逐时气象要素观测资料;温度垂直分布和物理量诊断分析采用 NECP/NCAR 1°×1°再分析资料;PM_{2.5} 浓度资料来自于 TEOM1405-DF 环境颗粒监测仪,监测地点分别位于昆仑路(南京中心城区)和南京国家气候基准站(江宁)。SO₂、NO₂ 和 PM₁₀ 浓度资料来自于南京市环境监测站草场门站点(城区)。热源点监测资料来自美国 NOAA-18 极轨遥感卫星。

用于轨迹计算的气象场资料为美国国家海洋和大气管理局(NOAA)的全球同化系统(GADS)数据。轨迹计算采用美国 NOAA 研制的轨迹模式 HYSPLIT4,用来分析大气输送情况,它是一种欧拉和拉格朗日型混合型的计算模式,具有多种物理过程和不同类型排放源,并能够处理多种气象输入场,被广泛应用于大气污染物输送研究(Beverland et al, 1998)。

2 污染过程概述

2.1 卫星遥感和污染物浓度监测

2011 年 6 月 10 和 13 日,南京整个城市被烟幕所笼罩,空气中弥漫着浓密的焦糊味。10 日,由于江苏境内大部分地区有云干扰,气象卫星并未监测到热源点;而 13 日 10 时 39 分,江苏境内无云覆盖区卫星监测到 16 个热源点,14 时 31 分监测到 9 个热源点,主要分布在苏北、苏中地区。其中盐城共有 9 个热源点,泰州有 7 个热源点;沿江苏南的大部分地区被云覆盖,未能监测到热源点。13 日的卫星遥感“火点”分布示意图如图 1。

南京城区和江宁两个监测点的 PM_{2.5} 浓度资料变化显示(图 2),在 10 日的 11—12 时和 13 日的 13—14 时,两站的 PM_{2.5} 浓度均出现陡升陡降现象,且异常偏高,最高时均超过 500 μg·m⁻³,峰值出现的时间江宁比城区滞后 1 h。相比而言,10 日 PM_{2.5} 浓度的最大值江宁高于城区,而 13 日则相反。总体来看,13 日高污染的持续时间和强度都高于 10 日,大部分时间 PM_{2.5} 浓度都维持在 150 μg·m⁻³ 以

上。南京市环保局发布的空气质量日报也显示,13 日的污染指数高于 10 日。另外,根据南京市环境监测站草场门站点(位于城区)的数据(如图 3),这两

次过程的 SO₂ 和 NO₂ 浓度均未见异常,但 PM₁₀ 浓度呈现突升突降,与上述分析的 PM_{2.5} 浓度变化相同,可见由秸秆焚烧而产生的细粒子对这两次污染过程贡献显著。

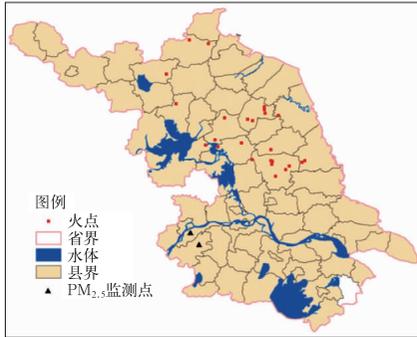


图 1 2011 年 6 月 13 日江苏省卫星遥感“火点”分布示意图 (▲为两个 PM_{2.5} 监测点的位置)

Fig. 1 Satellite remote sensing image of fire points over Jiangsu Province on 13 June 2011 (▲: position of the two PM_{2.5} monitoring stations)

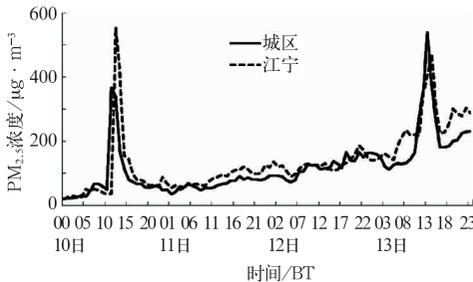


图 2 2011 年 6 月 10 日 00 时至 13 日 23 时城区和江宁逐小时 PM_{2.5} 浓度变化图

Fig. 2 Hourly change of the PM_{2.5} concentration in urban area and Jiangning District from 00:00 BT 10 to 23:00 BT 13 June 2011

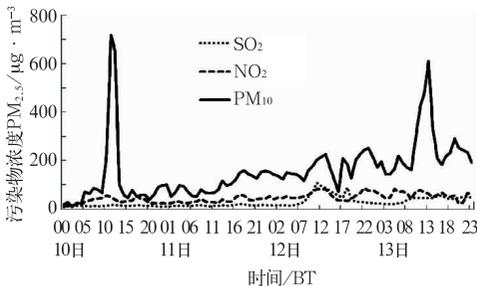


图 3 2011 年 6 月 10 日 00 时至 13 日 23 时南京市环境监测站(草场门站)逐小时 SO₂、NO₂、PM₁₀ 浓度变化图

Fig. 3 Hourly change of the concentrations of SO₂, NO₂ and PM₁₀ in Caochangmen Station from 00:00 BT 10 to 23:00 BT 13 June 2011

2.2 能见度和相对湿度变化

从图 4 中南京站逐小时的能见度变化来看,6 月 10 日凌晨起能见度呈逐渐下降趋势,至 12 时能见度从 11 时的 7 km 骤降至 0.3 km,之后保持在 3 km 以下,能见度骤降的时间与图 3 中污染物浓度的陡升有较好的对应。而 6 月 13 日的能见度一直维持较低,基本在 3 km 以下,07—08 时能见度低于 1 km,同时相对湿度较大,有雾发生,在污染物浓度陡升的 13 时,能见度相比前一时次下降得并不明显。

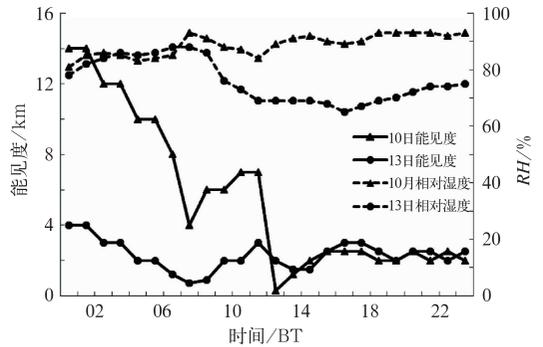


图 4 2011 年 6 月 10 和 13 日 00—23 时南京站逐小时能见度和相对湿度变化图

Fig. 4 Hourly change of relative humidity and visibility from 00:00 to 23:00 BT respectively on 10 and 13 June 2011

此外,南京各区(县)能见度仪监测资料显示(图 5),10 日各站最低能见度出现的时间有自北向南延迟的现象,最北部的六合出现在 09 时(74 m),最南端的高淳出现在 18 时(141 m),结合污染物的变化可以推断,10 日的污染过程是自北向南影响南京的,以南北向输送为主。而 13 日在污染物浓度陡升期间,北部六合和南部高淳的能见度反而是上升的,且之后一直维持在 3 km 以上,而其余地区是下降的,由此可以推断 13 日的污染过程主要影响的是南京的中部地区,以东西向输送为主。

图 4 中这两次过程的相对湿度也表现出不同的变化特征。由于有降水,10 日全天南京的相对湿度都比较大,在 80% 以上;而 13 日的相对湿度则有明显的日变化,在 08 时之前较高,之后明显下降到

80%以下,夜间又有小幅上升。在高污染时段,10日相对湿度略有上升,13日无明显变化。南京站每3h一次的人工观测显示,10日的天气现象以阵雨为主,由于相对湿度高,霾天气不明显,而13日02和05时为轻雾,08时为雾,11时为霾,14和17时为烟幕,20和23时又转为霾天气,可见13日由秸秆焚烧产生的烟、霾天气更为明显,而10日由于有降水,对细颗粒污染物有一定的冲刷作用,情况更为复杂。

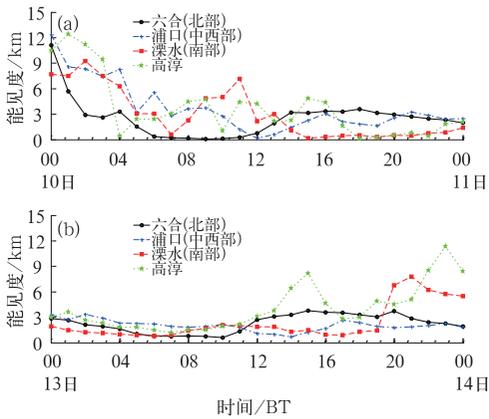


图5 2011年6月10日(a)和13日(b)各区(县)自动监测能见度变化图

Fig. 5 Hourly change of visibility in each district (country) from 00:00 to 00:00 BT respectively on 10 (a) and 13 (b) June 2011

3 气象条件对比分析

气象条件是影响大气污染物分布的主要因素之一,不同的输送和扩散条件会造成空气中污染物浓度的差异以及污染的持续时间。本文将从以下几个方面对这两次污染过程进行对比分析。

3.1 混合层厚度

混合层厚度是污染物在垂直方向上扩散的上限,是污染物扩散的重要参数。在混合层厚度较低时,污染物垂直方向得不到很好的扩散,易造成局地的高浓度污染。本文用罗氏法(马金等,2011)分别计算了南京站两次过程的混合层厚度变化,计算公式如下:

$$H = \frac{121}{6}(6 - P)(T - T_e) + \frac{0.169P(u_z + 0.257)}{12f \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad (1)$$

式中, H 为混合层厚度(单位:m); $T - T_e$ 为混合露点差(单位:°C); P 为帕斯奎尔稳定度级别; u_z 为 Z 高度处所观测的平均风速(单位: $m \cdot s^{-1}$), Z 为高度,本文中取 $Z = 10$ m; Z_0 为地面粗糙度,根据观测台站位置及其周围地理环境和下垫面状况取值,南京站的 Z_0 取值为0.5 m; f 为地转参数, $f = 2\Omega \sin\psi$, Ω 为地转角速度,取值为 $0.0000729 s^{-1}$, ψ 为观测点地理纬度。

如图6,10日南京的混合层厚度基本维持在1 km以下,这样低的混合层高度易使污染物被压制在边界层低层得不到扩散。而13日的混合层厚度则存在明显的日变化,早晚低,中午前后高。在13—14时的烟、霾突发时段,混合层厚度反而最高,达2 km左右,使得污染物在垂直方向上得到混合稀释,否则污染可能更加严重。这主要是由于13日08时中低层700 hPa为西北气流,850 hPa为反气旋环流控制,且温度露点差小,虽然南京上空云系较多,但均为透光性高积云(Ac tra),中午前后太阳辐射使得地面加热增温,湍流和对流活动加强,有效抬升了混合层厚度。

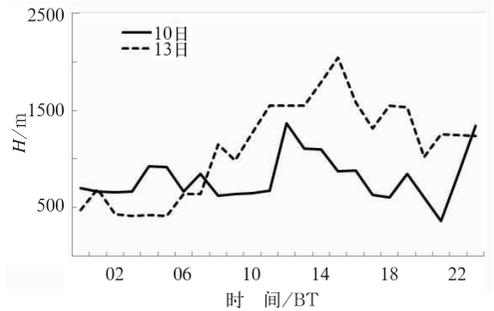


图6 2011年6月10和13日00—23时南京站混合层厚度变化曲线

Fig. 6 Hourly change of mixed layer thickness in Nanjing from 00:00 to 23:00 BT respectively on 10 and 13 June 2011

3.2 温度层结

一般认为,近地层出现逆温将不利于污染物的扩散,逆温层持续的时间、强度和逆温层厚度与污染物扩散有直接的关系。利用NECP/NCAR再分析资料,分别计算了南京站10和13日02、08、14和20时的温度垂直分布。如图7a,10日02、08、14和20时南京站温度均随高度上升递减,没有出现逆温,这可能是由于当日出现降水,但975 hPa以下气层的

温度层结接近中性,上、下温差小,大气湍流交换能力和热力对流均较弱,不利于污染物的扩散。13 日 02 时在近地层 975 hPa 以下有弱的逆温层存在,接地逆温层结构通常对空气对流有一定的抑制作用,另外由

于近地层湿度大,有利于雾的形成。13 日 08 时以后,南京上空的逆温层消失。总的来说,这两次污染过程的逆温层的结构都不明显,这与尹聪等(2011)总结的污染事件日均有逆温层的出现有所不同。

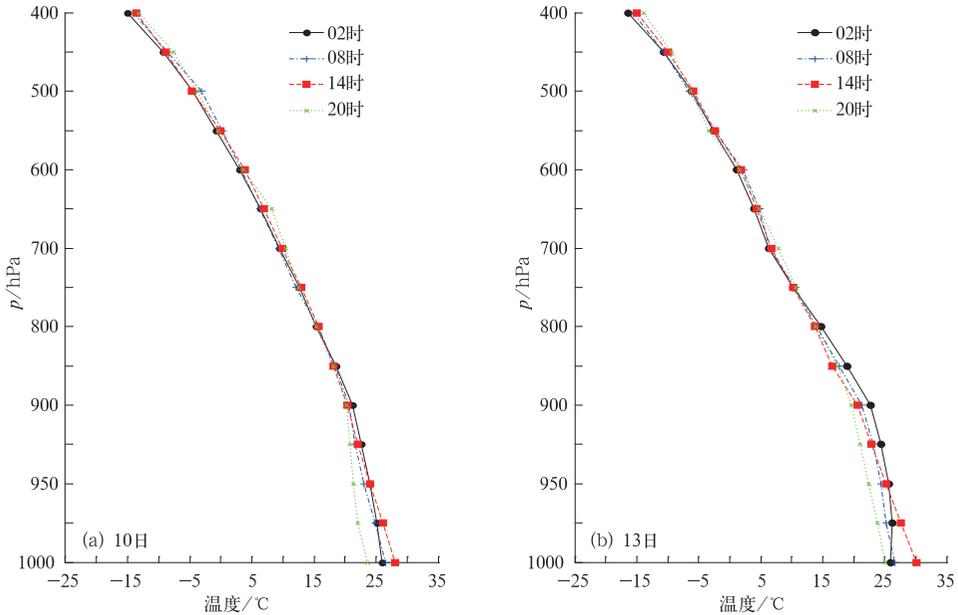


图 7 2011 年 6 月 10 日(a)和 13 日(b)南京站 4 个时次的垂直温度廓线
Fig. 7 Temperature profiles at 02:00, 08:00, 14:00, 20:00 BT respectively on 10 (a) and 13 (b) June 2011

3.3 风场

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。从地面形势图上可以看出,10 日江苏为弱的带状低压控制,13 日江苏处于两个低压之间的弱高压内,这两次污染过程的

地面气压场都较弱,气压梯度小。统计 6 月 10 和 13 日的日平均风速,分别为 2.5 和 3.2 $m \cdot s^{-1}$,风速较小,均不利于污染物的水平输送。

用 NECP/NCAR 再分析资料计算了南京站垂直风场变化(如图 8),10 日 08 时南京上空为一致的西南气流,14 时以后 800 hPa 以下风向突变,转为偏北风,表明低层有冷空气渗透。从地面加密风场

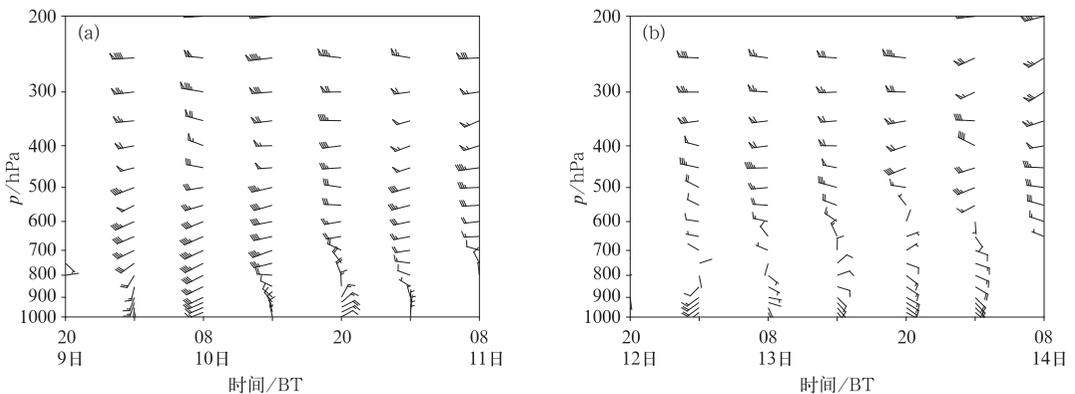


图 8 2011 年 6 月 10 日(a)和 13 日(b)南京站垂直风场变化图
Fig. 8 The vertical wind profile in Nanjing respectively on 10 (a) and 13 (b) June 2011

来看(图略),10日05时在江苏沿江及以北地区基本为东北风,长江以南为东南风,风向在沿江的西部有明显辐合,有利于污染物向该地区输送,南京北部的六合率先出现烟、雾天气,之后南京自北向南转为北风,10时左右,北风南压至沿江,城区开始自北向南出现烟幕,能见度骤降,12时压过江宁地区,至16时全市已基本转为一致东北风,污染过程影响逐渐减弱。可见,10日的污染过程中偏北风对引导污染物扩散输送起重要作用。13日中高层500 hPa的风场变化表现为有两次明显的小槽波动,但850 hPa以下始终为东—东南风,说明污染物是从南京东边输送而来的。偏东风也有利于南京地区霾天气的产生,13日后期南京出现了中度霾(能见度<3 km)。

3.4 物理量诊断

用 NECP/NCAR 再分析资料计算了这两次污染过程的物理量特征。如图 9,10 日白天高污染时段,对流层中下层 700 hPa 以下大气有明显的辐合,中心值为 $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,700~500 hPa 之间大气存在辐散,中心值为 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,表明对流层中低层存在一支上升气流,这和 850 hPa 低空切变线相对应。垂直速度方面,该时段从地面到 500 hPa 大气有较强的上升运动,中心位于 700 hPa,达 $-1 \times 10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。低层辐合、高层辐散的配置以及较强的上升运动,有利于降水的产生,也有利于污染物在垂直方向上的扩散稀释,使其不能长时间维持。

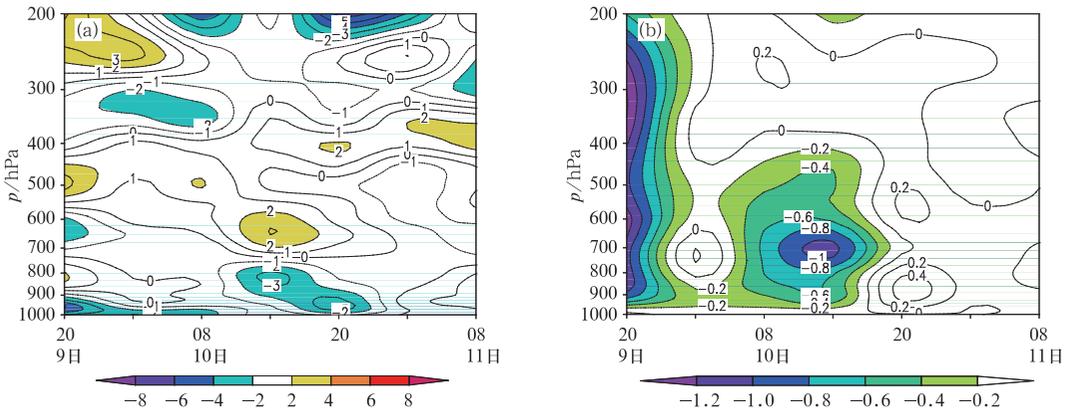


图 9 2011 年 6 月 9 日 20 时至 11 日 08 时南京站散度剖面图(a, 单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直速度剖面图(b, 单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 9 Cross sections of divergence (a, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (b, unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) in Nanjing from 20:00 BT 9 to 08:00 BT 11 June 2011

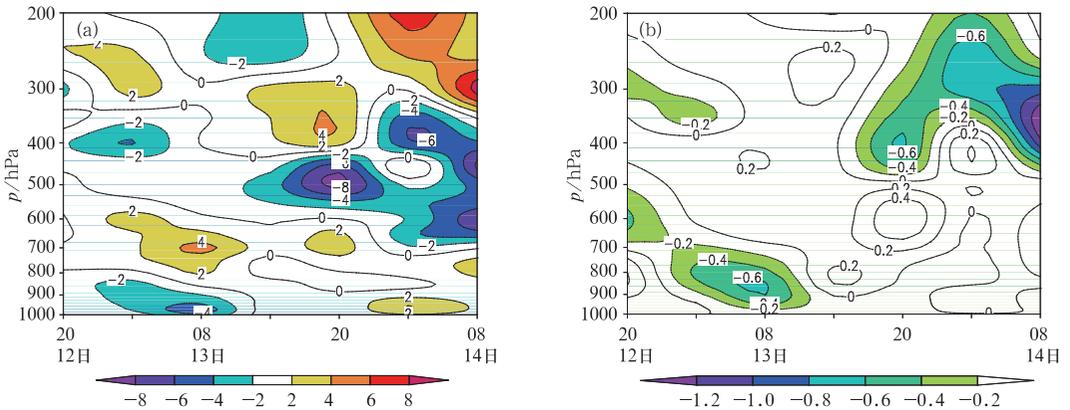


图 10 2011 年 6 月 12 日 20 时至 14 日 08 时南京站散度剖面图(a, 单位: 10^{-5} s^{-1})和垂直速度剖面图(b, 单位: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Cross sections of divergence (a, unit: 10^{-5} s^{-1}) and vertical velocity (b, unit: $10^{-2} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$) in Nanjing from 20:00 BT 12 to 08:00 BT 14 June 2011

如图 10,13 日 08 时南京站上空有弱的辐合上升运动,对应散度场有低层辐合、高层辐散的形势,而在 14 时以后的高污染时段,600 hPa 以下则转为辐散区,散度场较弱,垂直速度场也表现为弱的下沉气流,这使得大气上下层之间的交换作用很微弱,污染物易于在边界层堆积。

4 气流后向轨迹分析

在一定的天气条件下,秸秆焚烧排放的大气污染物可以长距离输送,影响范围较大,不仅南京近郊,江苏北部,甚至浙江、安徽的秸秆焚烧都有可能影响南京(尹聪等,2011)。在有云覆盖导致卫星遥感不能监测出热源点时,后向轨迹模拟能较好地反映出污染物的输送情况。本文采用美国 NOAA 研制的轨迹模式 HYSPLIT4 模拟这两次污染过程的气流 48 h 后向轨迹,结果如图 11。

可以看出,这两次秸秆焚烧污染过程污染源都不是来自于南京本地,是由区域污染输送造成的,且污染物基本都在边界层内输送。其中 10 日 1000 m 高空轨迹源于江苏淮北地区,500 和 100 m 高度轨迹源于海上,经由苏中的盐城、泰州、扬州、镇江输送到南京,江苏省环境监测中心的数据也表明 10 日扬州、镇江的 PM_{10} 浓度有陡升的现象。13 日 1000 m 高度轨迹源于盐城,与卫星遥感监测的“火点”对应,之后向东南方向输送,在浙江东北部又转折向西北方向,最后到达南京,而 500 m 高度轨迹则源于安徽境内,100 m 高度轨迹源于江浙交界处的苏州附近,这表明在上述两个地区可能也有污染源出现,但因云系较多,未能被卫星遥感监测到。13 日后向轨迹的转折可能与地形因素有关,南京南面是浙闽丘陵和黄山,西南面是大别山山脉,气流在北向南移动的过程中遇到地形阻挡,被迫向西输送。

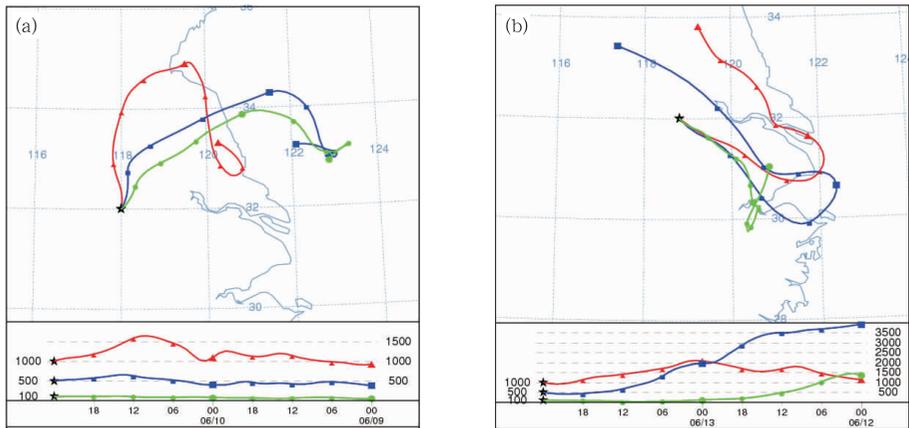


图 11 2011 年 6 月 11 日(a)和 14 日(b)08 时到达南京的 48 h 后向轨迹模拟图

Fig. 11 The simulation of backward trajectories arriving in Nanjing respectively from 00:00 BT 9 to 00:00 BT 11 (a) and from 00:00 BT 12 to 00:00 BT 14 (b) June 2011

5 结 论

本文利用常规气象资料、卫星遥感监测资料、污染物浓度资料、NECP/NCAR 再分析资料,结合气流后向轨迹模拟,对比分析了南京地区 2011 年 6 月 10 和 13 日两次由于秸秆焚烧而引起的严重空气污染事件的天气条件、大气边界层特征以及污染物的来源和输送路径等。得到以下结论:

(1) 这两次污染过程中城区和江宁两站的 $PM_{2.5}$ 浓度均出现陡升陡降,由秸秆焚烧而产生的细

粒子贡献显著。13 日高污染的持续时间和强度都高于 10 日,霾天气也更明显。10 日污染天气影响时全市最低能见度自北向南逐渐延迟。

(2) 10 日高空槽、低空切变线以及充足的水汽条件配置有利于出现降水,对污染物有一定的冲刷作用,但小风速、低的混合层厚度不利于污染物的扩散;13 日低层被反气旋环流控制,地面弱高压控制,地面弱的偏东风场,为烟、霾天气的维持提供了有利的环流和风场条件。两次过程的边界层逆温均不明显。

(3) 10 日低层辐合、高层辐散的配置以及较强

的上升运动,有利于降水的产生,也有利于污染物在垂直方向上的扩散稀释;13日高污染时段中低层弱的辐散场以及弱的下沉气流使得大气上下层之间的交换作用很微弱,污染物易于在边界层堆积。

(4) 两次秸秆焚烧污染过程都是由区域污染输送造成的。10日主要来源于苏中、苏北地区;13日的污染源除了卫星遥感监测到的苏北、苏中地区外,可能还有苏南和安徽地区。另外,13日的气流后向轨迹还与地形因素有关。

参考文献

- 范引琪,李春强. 2008. 1980—2003年京、津、冀地区大气能见度变化趋势研究. 高原气象, 27(6):1392-1400.
- 高歌. 2008. 1961—2005年中国霾日气候特征及变化分析. 地理学报, 63(7):761-768.
- 姜金华,彭新东. 2002. 复杂地形上城市冬季大气污染的模拟研究. 高原气象, 21(1):1-7.
- 厉青,张丽娟,吴传庆,等. 2009. 基于卫星遥感的秸秆焚烧监测及对空气质量影响分析. 生态与农村环境学报, 25(1):32-37.
- 马金,郑向东. 2011. 混合层厚度的经验计算及与探空观测对比分析. 应用气象学报, 22(5):567-576.
- 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. 高原气象, 29(3):794-800.
- 童尧青,银燕,钱凌,等. 2007. 南京地区霾天气特征分析. 中国环境科学, 27(5):584-588.
- 吴兑. 2012. 近十年中国灰霾天气研究综述. 环境科学学报, 32(2):257-269.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等. 2006. 珠江三角洲大气灰霾导致能见度下降问题研究. 气象学报, 64(4):510-517.
- 尹聪,朱彬,曹云昌,等. 2011. 秸秆焚烧影响南京空气质量的成因探讨. 中国环境科学, 31(2):207-213.
- 张恩红,朱彬,曹云昌,等. 2012. 长江三角洲地区近30年非雾天能见度特征分析. 气象, 38(8):943-949.
- 张红,邱明燕,黄勇. 2008. 一次由秸秆焚烧引起的霾天气分析. 气象, 34(11):96-100.
- 郑飞,张镭,朱江,等. 2007. 复杂地形城市冬季边界层气溶胶扩散和分布模拟. 高原气象, 26(3):532-540.
- 朱佳雷,王体健,刑莉,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.
- Beverland I J, Crowther J M, Srinivas M S N, et al. 1998. The influence of meteorology and atmospheric transport pattern on the chemical composition of rainfall in south-east England. Atmos Environ, 32(6):1039-1048.
- Evangelista H, Maldonado J, Godoi R H M, et al. 2007. Source and transport of urban and biomass burning aerosol black carbon at the South-West Atlantic Coast. J Atmos Chem, 56(3):225-238.
- Li Lingjun, Wang Ying, Zhang Qiang, et al. 2008. Wheat straw burning and its associated impacts on Beijing air quality. Sci China Ser D (Earth Sciences), 51(3):403-414.
- Mittal S K, Singh N, Agarwal R, et al. 2009. Ambient air quality during wheat and rice crop stubble burning episodes in Patiala. Atmos Environ, 43(2):238-244.
- Zhang T, Claeys M, Caahier H, et al. 2008. Identification and estimation of the biomass burning contribution to Beijing aerosol using levoglucosan as a molecular marker. Atmos Environ, 42(29):7013-7021.