

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.

# 2013 年初江苏连续性雾-霾天气 的特征分析<sup>\*</sup>

于庚康<sup>1</sup> 王博妮<sup>1</sup> 陈鹏<sup>2</sup> 黄亮<sup>1</sup> 谢小萍<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 江苏省气象服务中心, 南京 210008

<sup>2</sup> 江苏省气象信息中心, 南京 210008

**提 要:** 利用 FNL 资料、污染物颗粒浓度资料以及常规气象资料对 2013 年 1 月 12—16 日江苏地区的连续性雾-霾天气过程的环流形势、地面气象要素特征、大气边界层结构及大气污染状况等进行了分析。结果表明:高空形势变化平稳、中低层的暖平流配合稳定少动的地面气压场为雾-霾天气的发生提供了有利的环流形势;持续变化较小的气压梯度和较低的风速以及相对湿度的增大和  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  的浓度的变化为雾-霾形成和发展提供了条件;雾-霾期间低层都存在不同程度的逆温现象,混合层高度与  $AQI$  呈反相关关系,当混合层高度越低,  $AQI$  就越高,污染就越严重,能见度就越差;相对湿度的升高和  $PM_{2.5}$  在污染物颗粒中的富集,是导致能见度下降和持续污染的首要原因,而强冷空气带来的大风降温是污染物颗粒被快速清除的重要动力机制;影响南京的污染物来源为:黄海、安徽地区、北方污染物的输送和本地的局地污染。

**关键词:** 雾-霾, 能见度, 污染物颗粒, 后向轨迹

**中图分类号:** P458

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.05.010

## Analysis of Characteristics of a Long-Lasting Fog-Haze Event in Jiangsu 2013

YU Gengkang<sup>1</sup> WANG Boni<sup>1</sup> CHEN Peng<sup>2</sup> HUANG Liang<sup>1</sup> XIE Xiaoping<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008

<sup>2</sup> Jiangsu Meteorological Information Service Centre, Nanjing 210008

**Abstract:** Circulation situation, characteristics of surface meteorological elements, structure of atmospheric boundary layer and air pollution status of the long-lasting fog-haze event in Jiangsu Province during 12—16 January 2013 are analyzed by using the FNL analysis data, data on pollutant particle concentration and conventional meteorological data. The results indicate that steady upper air circulation situation, warm advection of middle-low layers and stable distribution of surface pressure field are favorable for haze to occur in terms of circulation features. Continuous and slight changes of pressure gradient, slow wind speed, increase of relative humidity as well as the  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentrations are beneficial to the formation and development of haze. Temperature inversion is observed in low layers during the haze event. The height of mixed layer is inversely correlated to  $AQI$ . Lower mixed layer height corresponds with higher  $AQI$ , more serious pollution and lower visibility. The increase of relative humidity and enrichment of  $PM_{2.5}$  concentration in contaminant particles lead to the decrease of visibility and continuous pollution while strong wind and low temperature caused by severe cold air is responsible for the important dynamic mechanism of quick erasion of particulate matter. The pollution of Nanjing mainly originates from the Yellow Sea, Anhui

\* 中国气象局关键技术集成与应用重点项目(CMAGJ2014Z02)、江苏省气象局预报员专项(JSYBY201305)和江苏省气象服务中心自立课题“沿海高速公路(江苏段)雾的特征分析及其预报方法研究”共同资助

2014 年 4 月 10 日收稿; 2015 年 2 月 10 日收修定稿

第一作者:于庚康,主要从事公共气象服务研究工作. Email:yugengkang@126.com

Province, and the pollution from the north and local atmospheric pollution.

**Key words:** fog-haze, visibility, particulate matter, backward trajectory

## 引言

近年来,雾-霾天气的频发,对交通的影响和危害以及造成的灾难达到了空前的程度,成为严重影响高速公路、航空和水运安全的重要因素。此外,连续的雾-霾天气,对人民群众身体健康、生产生活和生态环境带来严重破坏。2011年“雾霾天气频繁,预警不断”主题入选“中国十大天气气候事件”,雾-霾天气不断地成为公众最关心的话题之一,对雾-霾的研究日益引起国内外气象部门、科研人员及民众的关注(Chen et al, 2012; Watson, 2002)。以吴兑为代表的研究人员率先对珠江三角洲地区的灰霾天气做了大量研究,认为灰霾天气的气溶胶成分和结构主要与当地人类活动排放的污染物、气流停滞区、强平流输送等有关(吴兑等, 2001; 2006; 2008)。此外,吴兑(2005; 2006; 2008)深入探讨了国内各地区对霾观测标准不统一的情况,认为相对湿度 $< 80\%$ 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾造成的;相对湿度 $> 90\%$ 时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的;相对湿度在 $80\% \sim 90\%$ 之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的,但其主要成分是霾。近些年上海、北京、南京和天津等大城市都逐步开展雾-霾天气的研究,分析了雾-霾过程中气溶胶粒子的光学特性和微物理特性(龚识懿等, 2012; 于兴娜等, 2012; 杨军等, 2010; 过宇飞等, 2013; 姚青等, 2012a; 蔡子颖等, 2014; 熊亚军等, 2015)。但对雾-霾形成机理、扩散模式等方面的研究尚未深入开展(张恩红等, 2012; 王博妮等, 2014),同时,引起雾-霾产生的因素多且复杂,与各地大气污染物成分(Deng et al, 2008; Liu et al, 2009; )、地理环境、污染物源地多寡、季节、天气系统位置等诸多因素均有密切联系,关于雾-霾成因和机制的研究任重道远。

2013年1月中国东部地区出现了多次严重的雾-霾天气,并伴有严重的空气污染。张人禾等(2014)从大气环流背景和雾-霾演变天气演变两个方面,分析了气象条件在这次雾-霾天气中的作用。陈瑞敏等(2014)从污染物浓度与地面气象要素的关系及中低层环流形势的角度进行分析,2013年1月

12—16日,江苏省出现了一次范围大、持续时间长、强度大、污染重的雾-霾天气过程(刘梅等, 2014)。1月13—14日全省大部分地区能见度低于 $0.5 \text{ km}$ ,持续的雾-霾天气对高速公路、航空、水上交通等运输造成较大影响。1月14日凌晨,江苏大部分高速公路封闭,90多趟长途班车晚点,158班车次被迫停开;京杭运河苏北段封航,中山码头、板桥汽渡实施交通管制,停止摆渡,500余艘船舶滞留;禄口机场航班大面积延误。同时对民众健康也造成严重影响,很多老慢支、咽炎、过敏性鼻炎、哮喘等病人在雾-霾天气中感到不适。据新华社记者统计,1月13—14日儿童咳嗽、哮喘的就诊量是过去同期的2倍,呼吸道门诊人数比平时多 $10\% \sim 20\%$ ,呼吸科的病人也增加了 $3 \sim 5$ 成。鉴于此次连续性雾-霾天气过程社会影响很严重,因此,选取2013年1月12—16日江苏地区连续性雾-霾天气过程为研究对象,利用FNL资料、NOAA的GDAS资料结合空气污染资料、常规气象资料等,分析本次雾-霾过程中的高低空环流形势、气象条件、层结结构和边界层特征、污染演化过程及气流的后向轨迹等,以期深入认识雾-霾的形成和维持机制,为预报预测提供科学依据。在本次研究中,雾和霾具有交替存在、混合转换等特点,在凌晨相对湿度较高时,能见度低于 $1 \text{ km}$ 为雾天气,日出后气温上升,相对湿度减小,雾转换成霾,能见度上升到 $1 \sim 10 \text{ km}$ ,雾和霾均能造成能见度不同程度的下降。因此,为便于表述,将雾和霾统称为雾-霾。

## 1 雾-霾天气过程概述

江苏省1月常年平均雾日为 $2.7 \text{ d}$ 、霾日为 $1.6 \text{ d}$ ,2013年1月出现了 $24 \text{ d}$ 雾-霾天气,其中1月12—16日出现的大范围连续性雾-霾天气尤为严重,17日受南下冷空气的影响,能见度上升,雾-霾区域范围缩小并逐渐消散。

根据中国气象局《地面气象观测规范》及《霾的观测和预报等级》将相对湿度大于 $95\%$ ,能见度低于 $1 \text{ km}$ 作为雾的判断标准;相对湿度小于 $80\%$ ,能见度低于 $10 \text{ km}$ 作为霾的判定标准;能见度小于 $10 \text{ km}$ ,相对湿度为 $80\% \sim 90\%$ 时,如果 $\text{PM}_{2.5}$ 质量

浓度大于  $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 则是为霾, 若  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度小于  $75 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 则定义为雾。

这次雾-霾天气是一次大范围的污染天气过程, 图1为江苏2013年1月11—17日江苏省主要城市AQI指数序列图。11—17日全省的AQI值均 $>100$ ,

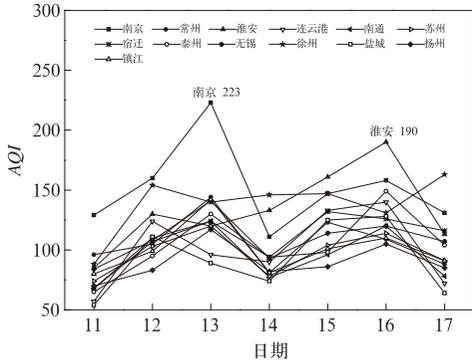


图1 2013年1月11—17日江苏省主要城市的AQI变化

Fig. 1 AQI variation in the major cities of Jiangsu during 11—17 January 2013

首要污染物主要是可吸入颗粒物。其中13日南京市的AQI值为223, 达到了重度污染级别, 淮安市在16日AQI值为190, 达到了中度污染级别, 至此全省均被长达5 d的高浓度污染雾-霾天气所笼罩。17日随着冷空气的东移南下, 偏北大风对污染颗粒有清除作用, 全省空气质量指数明显减小。

### 1.1 雾-霾期间环流形势

大范围雾-霾天气总是发生在极为有利的天气形势下。在500 hPa高度场上(图略), 从雾-霾开始到结束, 在贝加尔湖附近始终存在一高压脊, 在鄂霍次克海附近有一低涡, 低槽与温度槽大致平行, 没有特别明显的冷平流。平均场受西北偏西气流控制, 有利于夜间辐射降温 and 下沉增温, 使得近地层的污染物颗粒聚集, 同时可阻挡高纬度地区冷空气的大规模渗透, 高空形势极为平稳。

图2是1月12—16日5 d平均环流形势场。在925 hPa上(图2a), 江苏处在反气旋环流东部, 有暖温度脊经过, 并始终位于 $0^{\circ}\text{C}$ 线以内, 存在暖区当中。中低层暖性结构的长期维持, 是雾-霾持续存在的一个主要原因。

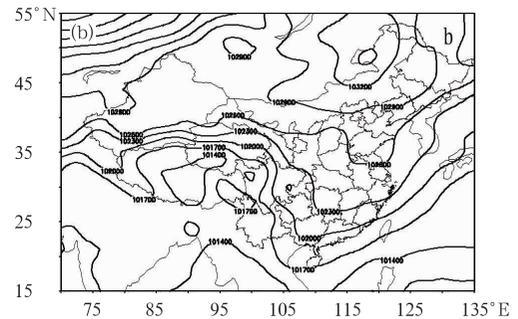
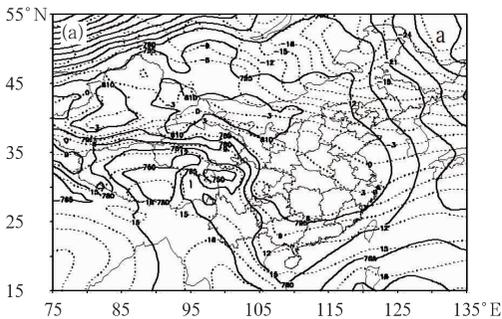


图2 2013年1月12—16日平均环流场分布

(a) 925 hPa, (b) 海平面气压场

Fig. 2 Distribution of mean circulation situation during 12—16 January 2013

(a) 925 hPa mean geopotential height, (b) sea surface level pressure field

从平均海平面气压场来看(图2b), 单一冷性高压控制华北华东地区, 而随着多日无明显冷空气的补充, 位置少动, 同时等压线较稀疏, 地面基本呈静小风状态, 不利于水汽和污染物颗粒的扩散。此外在高压的控制下, 有利于夜间地表辐射降温, 为雾的形成提供触发机制。17日受较强冷空气影响, 冷高压逐渐变性, 持续雾-霾天气结束。

总之, 高空环流形势平稳的变化、中低层的暖平流、持续稳定少动的地面高压场分布为本次雾-霾天

气的持续发生发展提供有利的环流形势。

### 1.2 能见度的演变特征

1月12日至16日夜間, 江苏地区的能见度一直维持在2 km以下, 整个雾-霾持续了约6 d, 尤其在13日夜間到15日早晨, 1 km以下的低能见度浓雾天气累计持续时间约为50 h。从全省典型时次的能见度分布演变(图3), 12日20时雾从南通和盐城南部开始发展, 13日08时雾区扩展到沿江苏南

及淮北地区,午后能见度逐步上升到 1 km 左右;13 日 23 时全省处在雾区中,低于 0.2 km 的浓雾呈区域性分布;14 日 08 时雾强度加强,全省大范围出现了能见度低于 0.1 km 的浓雾天气,直到 12 时浓雾自东南—西北向减弱,减弱后的东南部地区能见度维持在 1 km 左右,西北部地区能见度逐渐上升到 0.5 km,这一时段是雾-霾过程发展的鼎盛阶段;14 日 20 时左右,西北部地区能见度又下降到 0.1 km,浓雾区域逐渐向西扩展,其他地区能见度低于

1 km;15 日 08 时能见度逐渐上升,全省大部分地区能见度维持在 1 km 左右;15 日 20 时江苏东部地区能见度低于 1 km,其他地区能见度低于 1.2 km,16 日 08 时淮北被雾气笼罩;其他地区能见度维持在 2 km,16 日 20 时雾区逐渐消散,能见度逐步回升,17 日 08 时,徐州局部地区能见度仍低于 1 km 以下,其他地区能见度都显著上升,本次连续性雾-霾天气过程消散。

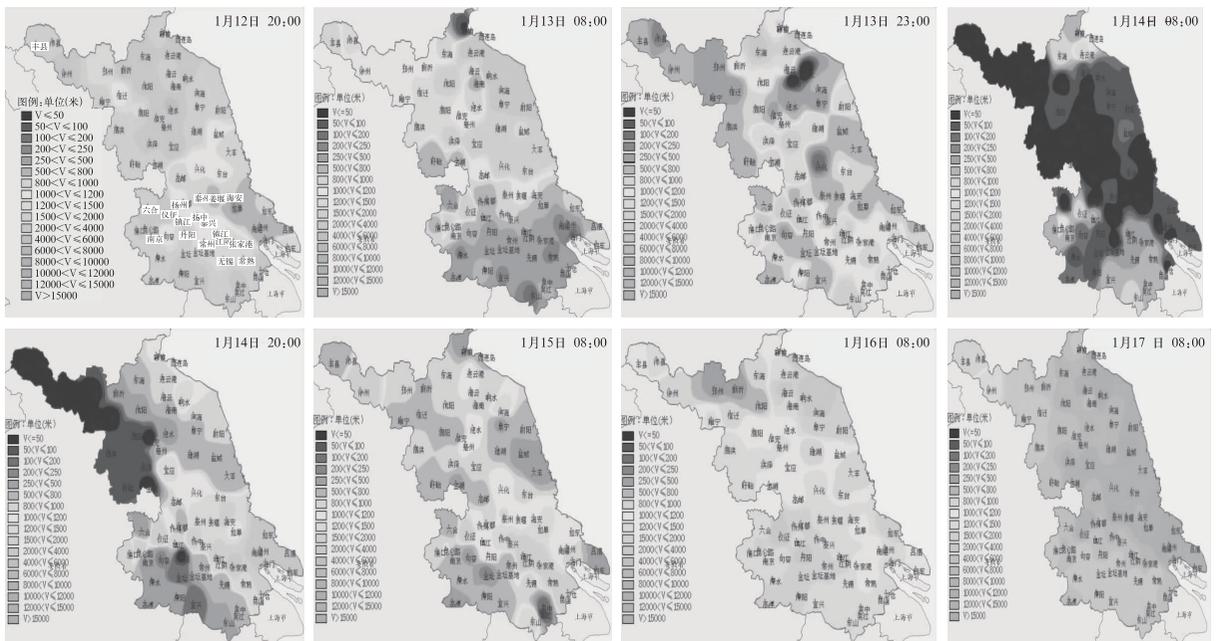


图 3 2013 年 1 月 12—17 日江苏雾-霾过程典型时次能见度空间演变  
Fig. 3 Spatial evolution of visibility in Jiangsu at the typical times during the fog-haze process in 12—17 January 2013

### 1.3 地面气象要素特征分析

南京是本次雾-霾天气过程重点影响地区之一。图 4 是本次过程中南京站能见度与相对湿度、气压、温度、风速、PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度的逐时平均变化序列。能见度的变化受气象条件和污染物颗粒的共同影响。由图 4 分析可知,在本次过程中,气压整体呈升高的趋势,16 日傍晚随着冷空气东移南下到江苏后,气压升高到 1030 hPa,但整个过程中气压梯度变化较小,在 14 日早晨和夜间能见度下降到 0.2 km 以下,气压值略有升高,有助于辐射降温,水汽凝结对雾的形成有利。相对湿度与能见度和气温呈一致的反相位变化关系,能见度降到最低时,相对湿度最高,气温最低。风速与能见度关系复杂,对于

辐射雾阶段,风速和能见度呈正相位关系;对于平流雾阶段,偏东风风速在 6 m · s<sup>-1</sup> 左右都能产生雾,此次过程平均风速稳定维持在 3 m · s<sup>-1</sup> 以下,风速的变化形成微弱的扰动为雾-霾的持续形成提供一定的条件。PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度变化趋势基本一致,并维持在 150 μg · m<sup>-3</sup> 以上,13 日前期两者浓度达到了此次过程的峰值分别为 334 和 426 μg · m<sup>-3</sup>,16 日后期随着冷空气东移南下,雾-霾消散,能见度上升,PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度减小。

根据能见度、相对湿度和 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 浓度的变化表明,此次过程中,雾-霾阶段性特征较明显。1 月 13、14、15 日凌晨时段,相对湿度在 95% 以上,温度较低,能见度低于 0.5 km 局部不足 0.2 km,为典型的雾天气特征;中午雾消后至晚间 20:00 左右,这

一时段气温升高,相对湿度减小,PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度增大,能见度维持在2 km左右,为霾天气特征,16日08:00至17日02:00也为霾天气。

综合各气象要素的变化特征,持续变化较小的

气压梯度和较低的风速以及相对湿度的增大和PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>的浓度的变化是此次雾-霾天气产生和维持的主要原因。

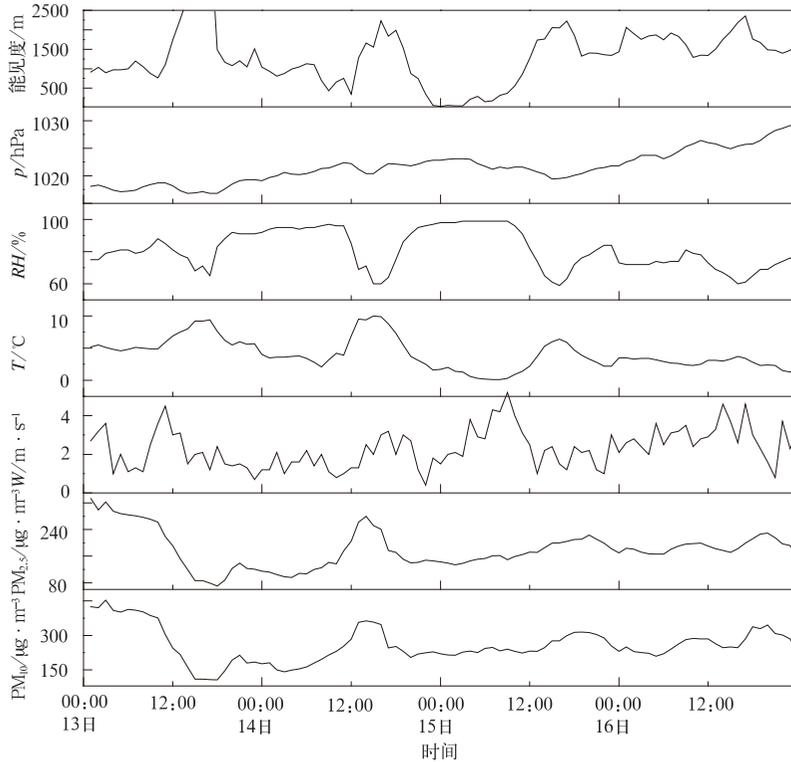


图4 2013年1月13—16日南京站主要气象要素PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度逐时变化

Fig. 4 Hourly variation of major meteorological elements, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations at Nanjing Station during 13–16 January 2013

#### 1.4 层结构和混合层高度

从1月13日08时至17日08时南京站探空资料时间剖面图分析(图5),13日边界层为西南风,风速为1~4 m·s<sup>-1</sup>,中高空为偏北风,这种高低空配置形成的逆温为雾-霾的形成提供稳定的大气层结,同时低空微弱的西南气流向雾-霾区输送一定的水汽,13日夜间雾-霾区范围扩展到全省,但随着弱冷空气补充南下,14日早晨中低空转为一致的西北风,露点锋区从850 hPa下降到925 hPa以下,下沉气流在925 hPa附近形成下沉逆温层,像一个干暖盖子一样阻止上下层水汽和动量的垂直交换,将水汽和污染物颗粒聚集在低层,大气层结更加稳定,辐射降温明显有利于辐射雾的形成和维持,此外低层较小的风速形成的微弱的扰动使水汽饱和逆温层扩展到一定的高度,在低层形成强度很大的浓雾(彭双

姿等,2012)。14日夜间到15日早晨低层为4~6 m·s<sup>-1</sup>偏东气流,将东海的水汽源源不断地输送到内陆,使得近地层水汽饱和,并在925 hPa附近形成露点锋区中心,为大雾的形成提供高湿条件,中高空转为10~12 m·s<sup>-1</sup>的西南暖湿气流,低空扰动随着风速增大而加大,使得低层能量和水汽交换加强,逆温层高度被抬升,混合层高度较前几日有所提高,雾层增厚,全省大部分地区能见度低于0.1 km。15日上午随着气温升高,相对湿度减小,逆温层减弱,能见度有所好转。16日高空有冷空气渗透,中高空为一致的西北风,但前期天空云系较多,仍以阴天和雾-霾天气为主。17日随着冷空气高压的东移南压,中高层北风加强,逆温层被破坏,能见度升高,雾-霾消散。

混合层高度是影响污染物在垂直方向扩散的主要气象要素,代表污染物在垂直方向上被扩散的范

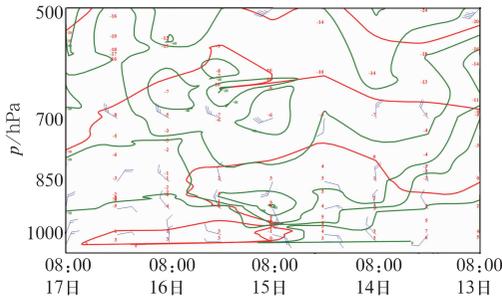


图 5 2013 年 1 月 13 日 08 时至 17 日 08 时南京站探空资料时间剖面图

(红色实线为温度,绿色实线为露点温度)

Fig. 5 Time cross section of sounding data at Nanjing Station from 08:00 BT 13 to 08:00 BT 17 January 2013

(red, green solids represent temperature, temperature-dew point)

围(徐芙蓉等,2003)。当混合层高度较低时,污染物在垂直方向得不到很好的扩散,污染物浓度就越大,空气质量指数(AQI)就越高,能见度就越低,在混合层高度长时间维持较低时,就会出现连续的高浓度污染天气。图 6 是利用 Nozaki 法(马金等,2011)计算的 1 月 12—17 日的混合层高度与 AQI 的变化曲线。由图可见,雾-霾期间,日最大混合层高度低于 1 km,13 日最大混合层高度不足 0.6 km,对应的 AQI 达到了峰值。混合层高度与 AQI 呈反相位变化,混合层高度越高,相应的 AQI 值越低,有利于大气污染物的扩散;混合层高度越低,AQI 值越高,污染物颗粒被聚集在低层不易扩散,空气污染严重,能见度相应的就越低。

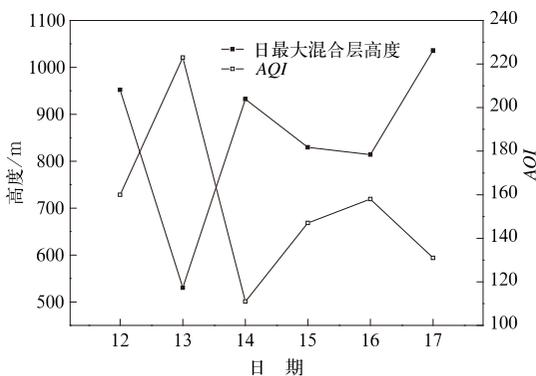


图 6 2013 年 1 月 12—17 日南京站日最大混合层高度与 AQI 变化曲线

Fig. 6 Variation curves of the maximum height of mixing layer and AQI at Nanjing Station during 12-17 January 2013

## 2 雾-霾过程中的大气污染状况

能见度下降和持续性污染与  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度增长有关(姚青等,2012b)。图 7 是南京市 1 月 13—17 日雾-霾过程中能见度与  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度的变化曲线图。 $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度的增长时段与能见度降低时段基本一致。受前期冷空气势力偏弱、持续无降水、空气污染扩散气象条件差等影响,南京已有 10 余天的雾-霾天气,尤其在 1 月 13 日前期  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  质量浓度分别维持在  $300 \mu g \cdot m^{-3}$  左右和  $400 \mu g \cdot m^{-3}$  以上,这也是 13 日早晨沿江苏南地区出现浓雾的原因之一,13 日午后随着雾-霾的消弱,能见度上升, $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度下降;13 日夜间至 14 日早晨,除南京等地区外,全省都被强浓雾笼罩, $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度未超过  $200 \mu g \cdot m^{-3}$ ;1 月 14 日夜间至 15 日早晨,包括南京在内的江苏西南部,出现了强浓雾,相对湿度达到了 98%,这一时段  $PM_{2.5}$  浓度在  $150 \mu g \cdot m^{-3}$  左右, $PM_{10}$  浓度约为  $220 \mu g \cdot m^{-3}$ ,两者浓度较 14 日白天明显下降;15 日白天至 17 日前期,南京站的能见度基本稳定 2 km 以下,随着能见度的小幅变化,相应的  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度也有所变化;17 日随着冷空气南下,冷锋过境带来的流动性强的干冷大风将低层的污染物快速清除,能见度转好, $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度迅速下降。

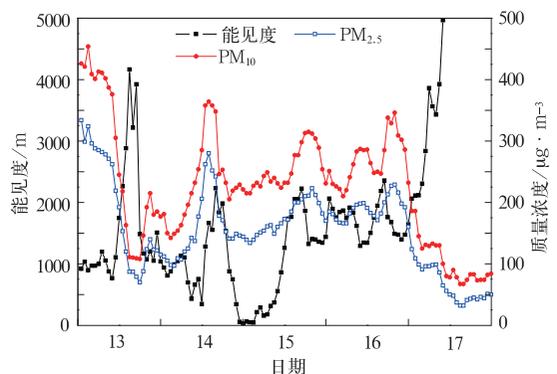


图 7 2013 年 1 月 13—17 日南京雾-霾过程期间能见度与  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of visibility,  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentrations in Nanjing during the fog-haze period from 13 to 17 January 2013

$PM_{2.5}/PM_{10}$  用来作为颗粒物富集程度的表征手段,与能见度呈反相位变化(图略)。本次过程中, $PM_{2.5}/PM_{10}$  变化在 0.60 以上,当能见度连续低于 0.2 km 时, $PM_{2.5}/PM_{10}$  比值低于 0.65,随着能见度

的上升,对应的  $PM_{2.5}/PM_{10}$  比值增大,最大时可接近 0.80。1月17日当冷空气影响江苏后,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  快速下降,这表明空气中的  $PM_{2.5}$  浓度减小,进而导致贡献给气溶胶的数浓度和表面积减少,从而影响到大气中可见光的投射,这是能见度转好的主要原因之一。

综合来看,相对湿度和  $PM_{2.5}$  在污染物颗粒中的富集,是能见度下降和持续性污染的首要原因。当相对湿度低于 90% 时,  $PM_{2.5}$  的浓度是影响能见度的主要因素;当能见度低于 1 km 时,  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  的浓度减小,相对湿度成为影响能见度的主要因子,强冷空气带来的大风降温是污染物颗粒被快速清除的重要动力机制。

### 3 气流轨迹分析

此次雾-霾过程给人们的交通出行和身体健康带了严重危害,其污染物来源值得人们重视。利用

美国 NOAA 研发的 HYSPLIT-4 模型来分析此次雾-霾天气中污染物的输送过程。以南京(32.00°N、119.00°E)为参考点,考虑到混合层高度和区域尺度,选取 0.1、0.5、1 km 作为高度层,分别计算 2013 年 1 月 14、15、16 和 17 日 20:00 后向 72 h 的气流轨迹,以追踪到达南京的气团过去 72 h 的输送轨迹,用于分析不同高度上污染物的气团来源。1月14日20时中低层吹偏东风,南京污染物的来源并非只有本地污染造成的,0.1和0.5 km 污染物主要来自山东胶州一带,经黄海被偏东风输送途经江苏盐城、淮安到达南京,1 km 的高空轨迹来源于安徽东部及江苏淮北地区(图 8a)。图 8b 表明 15 日 20 时 1 km 的高空轨迹污染物来源于安徽西南部,气流在输送途中受黄山和大别山脉的阻挡发生转折,由于低层偏东风强劲,0.5 km 轨迹源于海上到苏北中部经偏南气流到苏南后到达南京,0.1 km 轨迹也源于黄海上,在移动中携带大量水汽向东南方向移动,进入上海、浙江,转而向北到安徽后到达南

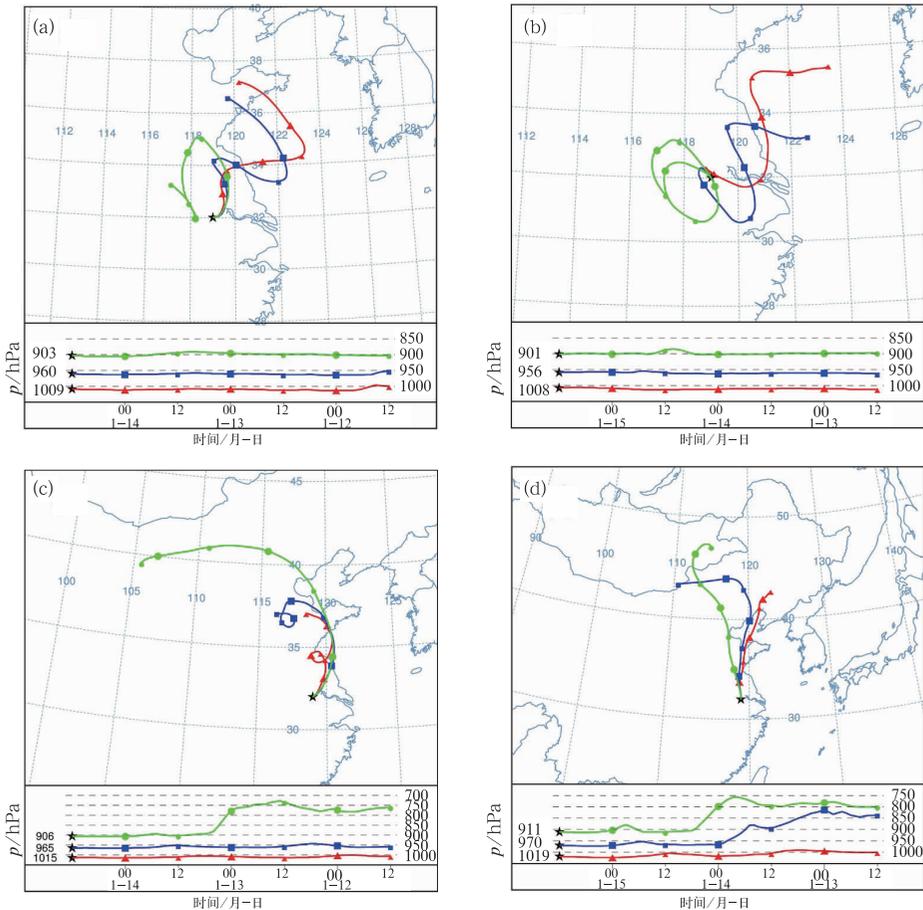


图 8 2013 年 1 月 14 日(a)、15 日(b)、16 日(c)和 17 日(d) 20 时南京市后向轨迹模拟图 (绿色: 1 km, 蓝色: 0.5 km, 红色: 0.1 km)

Fig. 8 Simulation diagrams of back trajectories in Nanjing at 20:00 BT of (a) 14, (b) 15, (c) 16, and (d) 17 January 2013 (green line: 1 km, blue line: 0.5 km, red line: 0.1 km)

京。16日20时受冷空气的渗透,污染源主要来自山东北部地区(图8c)。17日20时强冷空气南下影响江苏,低层来自蒙古地区的干冷空气经吉林、辽宁、渤海湾、山东半岛到达南京(图8d),强降温作用将逆温层打破,高低空一致的偏北风带来的冷平流快速发展,混合层高度增大,清除了污染物颗粒所需的高湿静稳环境,本次雾-霾过程在18日14时彻底消散。

从图8可以看出,根据不同高度的输送通道和地形的影响,本次雾-霾过程中污染源输送可以分为四类:①来源于黄海上;②来源于本地的局地污染(苏南和苏北);③来自北方(东北、华北和山东);④最后一类来源于安徽地区,这一结论与任雅斌等(2012)的研究结果一致。空气质量的好坏源头是污染物的排放,当不利于污染物扩散的天气形势出现时,需及时关闭影响空气质量的污染排放单位。

## 4 结 论

对2013年1月12—16日江苏地区连续性雾-霾天气过程的高低空环流形势、气象条件、层结结构、污染演化过程、气流的后向轨迹等方面进行了分析,研究表明:

(1) 高空环流形势平稳的变化、中低层的暖平流、地面高压场分布为雾-霾天气的发生提供有利的气象条件。

(2) 持续变化较小的气压梯度、较低的风速、相对湿度的增大,以及 $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的浓度的变化为雾-霾形成和发展提供有利条件;雾-霾发生期间,低层都存在不同程度的逆温现象;混合层高低直接影响能见度变化,当混合层高度越低时,AQI就越高,污染就越严重,能见度越小。

(3) 相对湿度增大和 $PM_{2.5}$ 在污染物颗粒中的富集,是能见度下降和持续性污染的首要原因,当相对湿度低于90%时, $PM_{2.5}$ 的浓度是影响能见度的主要因素; $PM_{2.5}$ 和 $PM_{10}$ 的浓度及相对湿度成为影响能见度的主要因子,强冷空气带来的大风降温是污染物颗粒被快速清除的重要动力机制。

(4) 根据HYSPLIT-4模型分析南京污染物来源的主要可分为4类:①来源于黄海上;②来源于本地的局地污染(苏南和苏北);③来自北方(东北、华北和山东)污染物的输送;④来源于安徽地区。

## 参考文献

蔡子颖,刘爱霞,韩素芹,等.2014.天津低能见度特征初探.气象,40(1):114-118.

- 陈瑞敏,吴雁,康文英,等.2014.连续性雾霾天气污染物浓度变化及天气形势特征分析.气候与环境研究,19(2):209-218.
- 龚识懿,冯加良.2012.上海地区大气相对湿度与 $PM_{10}$ 浓度和大气能见度的相关性分析.环境科学研究,25(6):628-632.
- 过宇飞,刘端阳,周斌,等.2013.无锡市霾天气特征及影响因子研究.气象,39(10):1314-1324.
- 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.
- 马金,郑向东.2011.混合层厚度的经验计算及探空观测对比分析.应用气象学报,22(5):567-576.
- 彭双姿,刘从省,屈右铭,等.2012.一次大范围辐射雾天气过程的观测和数值模拟分析.气象,38(6):679-687.
- 任雅斌,苏继峰,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.
- 王博妮,徐芬,田小毅,等.2014.我国近年雾研究方法及其研究热点综述.气象科技,42(1):23-30.
- 吴兑.2005.关于雾与霾的区别和灰霾天气预警的讨论.气象,31(4):3-7.
- 吴兑.2006.再论都市雾与霾的区别.气象,32(4):9-15.
- 吴兑.2008.大城市区域霾与雾的区别和灰霾天气预警信号发布.环境科学与技术,31(9):1-7.
- 吴兑,邓雪娇.2001.环境气象学与特种气象预报.北京:气象出版社,25-31.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.2006.珠江三角洲气溶胶云造成的严重灰霾天气.自然灾害学报,15(6):77-82.
- 吴兑,廖国莲,邓雪娇,等.2008.珠江三角洲霾天气的近地层输送条件研究.应用气象学报,19(1):1-8.
- 熊亚军,廖晓农,李梓铭,等.2015.KNN数据挖掘算法在北京地区霾等级预报中的应用.气象,41(1):98-104.
- 徐芙蓉,施介宽.2003.混合层高度变化趋势及其代表值的探讨.东华大学学报,29(4):99-102.
- 杨军,牛忠清,石春娥,等.2010.南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征.环境科学,31(7):1425-1431.
- 姚青,蔡子颖,韩素芹,等.2012a.2009年秋冬季天津低能见度天气下气溶胶污染特征.气象,38(9):1096-1102.
- 姚青,韩素芹,蔡子颖.2012b.天津一次持续性能能见度事件的影响要素分析.气象,38(6):688-694.
- 于兴娜,李新妹,登增然登,等.2012.北京雾霾天气期间气溶胶光学特性.环境科学,33(4):1057-1062.
- 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.
- 张人禾,李强,张若楠.2014.2014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.
- Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. 2012. A parameterization of low visibility for haze days in the North China Plain. Atmos Chem Phys, 12(11):4935-4950.
- Deng X J, Tie X X, Wu D, et al. 2008. Long-term trend of visibility and its characterization in the Pearl River Delta (PRD) region, China. Atmos Environ, 42(7):1424-1435.
- Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al. 2009. Microphysical structure and evolution of a four-day persistent fog event in Nanjing in December 2006. Acta Meteor Sin, 24(1):104-115.
- Watson J G. 2002. Visibility: Science and regulation. J Air & Waste Manage Assoc, 52(6):628-713.