

周文君, 平海波, 刘端阳, 等. 2016. 江苏盐城地区一次持续雾-霾天气过程的综合分析. 气象, 42(7): 838-846.

江苏盐城地区一次持续雾-霾天气过程的综合分析^{* 1}

周文君¹ 平海波¹ 刘端阳² 魏建苏² 韦莹莹¹ 王 群¹

¹ 江苏省盐城市气象局, 盐城 224000

² 江苏省气象台, 南京 210008

提 要: 2013 年 12 月上旬江苏盐城地区出现了一次历史罕见的持续重度雾-霾天气, 利用盐城市常规气象观测资料、NCEP 再分析资料($1^\circ \times 1^\circ$)及环境监测中心站的污染物浓度资料等, 对此次过程的环流背景、气象要素、大气层结特征以及动力条件、污染情况等进行了综合性分析。结果发现: 12 月上旬中高层冷空气势力弱, 以纬向环流为主; 低层弱的水平风场为雾-霾的发生发展提供了有利的环流背景; 稳定的层结特征, 近地面高强度的贴地逆温和持续较低的混合层高度是此次雾-霾天气长时间维持的重要因素; 边界层内弱正散度及负涡度是此次雾-霾天气得以维持发展的动力因子; 通过后向轨迹分型和火点监测资料分析发现: 污染物的长距离输送在此次重污染天气的形成过程中起到了一定作用。最后, 文中建立了能见度和 $PM_{2.5}$ 浓度、相对湿度的非线性回归方程, 对能见度的预报效果较好, 为实际业务应用中雾-霾的预报提供了有利的依据。

关键词: 持续雾-霾, 污染物浓度, 气象条件, 后向轨迹分型

中图分类号: P458

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2016.07.007

Analysis of the Sustained Fog-Haze Event in Yancheng

ZHOU Wenjun¹ PING Haibo¹ LIU Duanyang² WEI Jiansu² WEI Yingying¹ WANG Qun¹

¹ Yancheng Meteorological Office of Jiangsu Province, Yancheng 224000

² Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: A sustained fog-haze event that occurred in early December 2013 in Yancheng was analyzed based on surface meteorological parameters, NCEP reanalysis data ($1^\circ \times 1^\circ$), and air pollutants concentration. The study focus lies in circulation background, surface meteorological elements and atmospheric stratification feature, as well as thermodynamic condition and pollution. The results show that there were weak cold air forces in middle-high level in early December with zonal circulation at 500 hPa. The breezed surface layer was the favorable circulation background for the formation of fog-haze. The maintenance of stable stratification characteristics, high inversion intensity and continuous lower mixed layer were responsible for the sustained fog-haze briefly. In addition, the weak sinking motion, positive divergence and negative vorticity were the dynamic factors for the sustain development of fog-haze. The long-distance transport of pollutants played a certain role in the concentration increase of pollutant particulates according to the backward trajectory types and the monitored fire spots. Finally, the non-linear regression formula of visibility, humidity and $PM_{2.5}$ concentration was established, which is better for visibility forecasting and provides a favorable basis for the operation of fog-haze forecasting.

Key words: sustained fog-haze, pollutant concentration, meteorological conditions, backward trajectory types

* 江苏省自然科学基金项目(BK20130111)、江苏省气象局重点项目(KZ201405)、江苏省科技支撑计划社会发展重大研究(BE2012771)、江苏省省级环保科研课题(2014021)、国家科技支撑计划项目(2014BAC22B04)、江苏省预报员专项(JSYBY201315)和江苏省气象局环境创新团队共同资助

2015 年 7 月 2 日收稿; 2016 年 1 月 15 日收修定稿

第一作者: 周文君, 主要从事中短期预报和环境气象方面的研究. Email: zwj.5122@163.com

引言

随着我国经济规模的扩张、城市化进程的加快,大气气溶胶污染日趋严重,由气溶胶粒子所造成的重污染天气也逐年增多。近年来人们对环境和健康问题高度关注,霾的相关研究也成为了一个热点(刘爱君等,2004;童尧青等,2007;孙霞等,2012)。国外学者对霾的研究起步较早,最早对灰霾天气进行预报较多采用统计方法,如 Schichtel 等(2001)利用气象观测资料,统计分析了 1980—1995 年灰霾的时间和空间变化特征,继而研究者们发现灰霾天气的发生和颗粒物密切相关;Senaratne 等(2004)研究了乌克兰 2001 年霾天气与非霾天气时颗粒物的分布特征,鉴别不同源中的富集因子,并讨论了霾天气可能存在的污染源。国内对霾的系统性研究较早是从 2003 年吴兑(2003;2005;2012)在文章中提及“灰霾”天气,分析珠江三角洲城市群区域灰霾天气的形成机制、气溶胶粒子的物理化学特性,以及霾与雾的区分等。其后,对霾的研究越来越多,从早期的定义、识别方法、气候特征等逐步发展到细颗粒物粒子的光化学特征、有机成分、来源解析等多科学交叉的深入研究(樊曙先等,2005;杨卫芬等,2010;贾星灿等,2012;靳军莉等,2014;赵玉广等,2015)。

近年来,我国大范围持续性的重度霾天气越来越多,很多研究者着力于分析研究持续性雾-霾过程的综合性特征(刘端阳等,2013;吕翔等,2015),为雾-霾预报提供了有利依据。饶晓琴等(2008)对 2007 年 2 月我国中东部地区一次大范围霾天气进行了分析,总结了此次霾天气形成的环流特征和气象要素特征。俞剑蔚等(2009)对 2008 年 10 月 28 日发生在江苏沿江一带的霾天气进行了分析,并指出大规模秸秆焚烧排放的烟尘、近地面偏东风的水汽输送和风向辐合是造成此次霾的主要原因。刘端阳等(2014)研究了 2012 年 6 月中上旬淮河下游一次连续多日大范围雾-霾天气的雾-霾相互转换过程及成因。严文莲等(2014)对 2012 年 6 月中上旬持续雾-霾天气从环流背景、污染来源、动力和热力特征等多个方面进行了综合分析,发现秸秆焚烧是造成此次江苏出现持续雾-霾的主要原因。刘梅等(2014)、于庚康等(2015)通过 NCEP 再分析资料、污染物浓度以及常规气象观测资料等对 2013 年 1 月江苏连续性雾-霾天气进行了综合分析。张小曳

等(2013)通过分析 2013 年 1 月中东部地区持续性雾-霾天气的气溶胶特征、污染物成分构成、形成维持机制等,指出当今我国雾-霾主因是严重的气溶胶污染,但气象条件对其形成、分布、变化作用显著。

2013 年 12 月上旬,华东地区连续数日出现大范围的雾-霾天气,持续时间之长、能见度之低实属历史罕见,引起了社会各界的广泛关注,其中江苏盐城地区污染尤为严重(刘璇等,2015;吕梦瑶等,2014)。本文以盐城为例,从环流背景、气象要素特征、大气层结特征、物理量变化等多方面进行综合分析,探讨此次持续雾-霾天气的成因。同时利用 2013 年全年盐城的污染物浓度资料、能见度和相对湿度建立了能见度的非线性预报方程,为今后业务中雾、霾的预报提供一定的思路和参考。

1 资料来源

文中气象要素和物理量来源于盐都站(33.3°N、120.10°E)的常规气象观测资料和 NCEP 再分析资料,污染物浓度数据来源于江苏省盐城市环境监测中心站,火点资料来源于美国气象卫星 NOAA-18 遥感火点监测资料,探空资料来源于盐城市国家基本站射阳站(33.46°N、120.15°E)的 L 波段探空雷达。根据以上资料分别从污染情况、环流背景、地面气象要素、大气层结特征以及动力条件等多个方面对 2013 年 12 月上旬的持续重度雾-霾天气进行综合分析。用于轨迹分型的气象场资料为 NOAA 的全球同化系统(GDAS)数据(<ftp://arlftp.arlhq.noaa.gov/pub/archives/gdas1/>),利用 HYSPLIT4.9 来分析 12 月上旬低层气团输送的轨迹分型。文中对于雾、霾的判定采用能见度仪的观测值,并根据雾、霾的气象行业标准(中国气象局,2010;中华人民共和国质量监督检验检疫总局等,2011)对两者的转换过程进行详细分析。

2 讨论和结果

2013 年 12 月上旬江苏盐城地区出现了持续的雾-霾天气,4 和 5 日早晨最低能见度不足 20 m,白天最高能见度不足 2000 m,污染物浓度持高不下,其中盐城环境监测站 PM_{2.5} 和 PM₁₀ 小时浓度最高值分别达到 931 和 935 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,是一次典型的大范围长时间重度污染天气过程。

2.1 天气过程概述

从能见度和相对湿度的实况监测中可以看出(图 1),1—9 日江苏盐城地区能见度几乎均在 5000 m 以下,自 12 月 1 日起,盐城及周边地区就已出现能见度低于 2000 m 的重度霾天气;2—3 日重度霾的持续时间逐渐加长,午后受湍流增强的影响能见度稍有好转;3 日夜间至 4 日上午,随着相对湿度增加,能见度急剧下降,出现了由霾向雾的转换过程,午后相对湿度减小,又出现了由雾向霾的转换;4—5 日由于相对湿度较大,能见度持续偏低,能见度小于 100 m 的持续时间长达 10 h,期间同样出现

了由霾—雾—霾—雾的转换;6 日后期北方有弱冷空气南下,能见度稍有好转,但由于冷空气势力较弱,7 日后期再次出现了雾—霾天气,图 1 中描述了 1—9 日雾—霾相互转换的具体时段。

根据盐城环境监测中心站的数据显示,12 月 1—9 日的首要污染物均为可吸入颗粒物 $PM_{2.5}$,1—6 日空气质量指数(AQI)均达重度到严重污染。其中 1 日的 $PM_{2.5}$ 日平均浓度($173 \mu g \cdot m^{-3}$)已远超二级标准值($75 \mu g \cdot m^{-3}$),2 日 $PM_{2.5}$ 日均值异常偏高($370 \mu g \cdot m^{-3}$),其中市监测站最大小时浓度为 $931 \mu g \cdot m^{-3}$,属严重污染。3—5 日污染物浓度持高不下,直至 6 日弱冷空气南下,才轻微缓解。

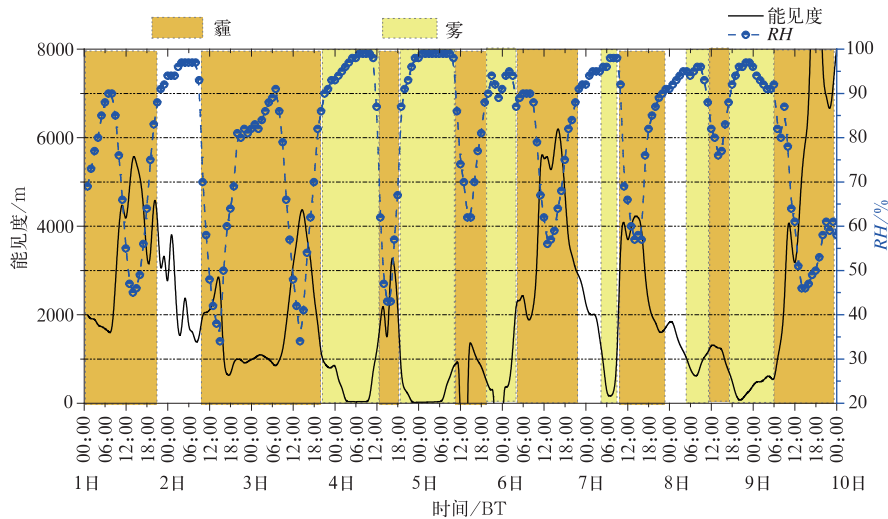


图 1 2013 年 12 月 1—9 日盐城能见度和相对湿度的分布

Fig. 1 The visibility and humidity during 1—9 on December 2013

2.2 持续雾-霾的形成和维持机制

2.2.1 环流背景

极不利于污染物扩散的环流背景和气象条件是 2013 年 12 月上旬盐城地区大面积雾-霾天气形成和长期维持的客观因素。12 月上旬冷空气活动少,平均气温偏高,中层 500 hPa 以纬向环流为主(图 2),平均径向风速弱,低层 850 hPa 受暖脊控制,中低层大气增温明显,有利于近地面逆温形成;而地面气压场上整个中东部地区受均压场控制,气压梯度小、水平风速弱;高低空环流形势的配置均有利于边界层内污染物堆积,是形成长时间持续雾-霾天气的典型天气形势。具体而言,12 月 1—6 日均为弱气压场控制,静稳天气持续,阻碍大气的水平流

动和垂直交换;6 日后期虽有弱冷空气影响,但冷空气势力太弱,整个区域仍是弱气压场控制,空气质量没有得到明显改善;直到 9 日强冷空气南下,才使此

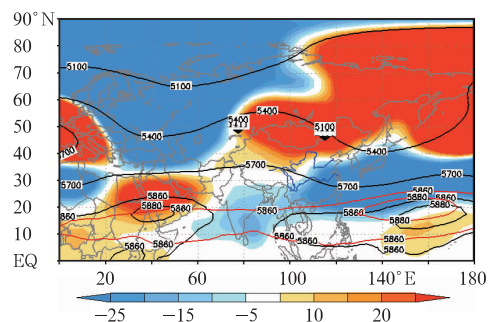


图 2 2013 年 12 月上旬 500 hPa 平均高度场

Fig. 2 Average geopotential height at 500 hPa in early December 2013

次雾-霾天气得到有效缓解。由此可见,这种大尺度稳定少变的天气形势是大范围持续雾-霾发生的重要天气背景。

2.2.2 地面气象要素

此次过程可以简单分为两个子过程,前期为 12 月 1—6 日,后期为 12 月 7—9 日。图 3 给出了各气象要素的时间序列,从图中可以看出海平面气压变化平稳,在雾-霾累积持续时段气压变幅很小或逐步下降。弱的气压梯度决定了地面风速较小,从 10 m 风速时间序列来看,雾-霾持续期间白天的最大平均风速仅为 $3.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而夜间风速均在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,浓雾期间多为静风。弱的水平风场决定了大气水平扩散能力差,不利于污染物稀释扩散,污染物在本地不断积聚而使空气质量恶化。在浓雾发生期间,风向多为东北风、偏东风或东南风,不断有海上的水汽输送,为浓雾的发生提供了有利的水汽条件。从气温和露点的变化趋势来看,露点的变化较为平稳,夜间到早晨温度露点差减小,相对湿度迅速增

大,空气达到饱和,有利于气溶胶粒子吸湿增长,霾粒子转换为雾滴,而当白天气温升高,温度露点差增大,相对湿度减小,雾滴脱水后悬浮在大气中又成为霾,完成雾-霾的相互转化过程。另外,高浓度的气溶胶粒子对气温也有一定影响,它对短波辐射的吸收和散射特性,减少了地面所能接收到的太阳短波辐射,从而使地表气温下降,而对应边界层上部气温偏高,又形成了近地面逆温(Zhang et al, 2014)图 3。

在这段时间内,颗粒物浓度有两次“爆发性”增长(图 3 中阴影区域),分别为 2 日后期和 4 日后期。从各气象要素上分析发现:这两段过程均伴有气压的小幅下降,偏东风,有一定的水汽输送。其中,4—5 日的雾-霾天气更严重,期间风速很弱,维持在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,露点温度差接近于 0,水汽饱和,从而形成了能见度不足百米的浓雾天气。而浓雾天气对气溶胶粒子具有一定的湿清除作用(杨军等, 2010; 康汉青等, 2009),颗粒物浓度在达到峰值后又出现了浓度下降。

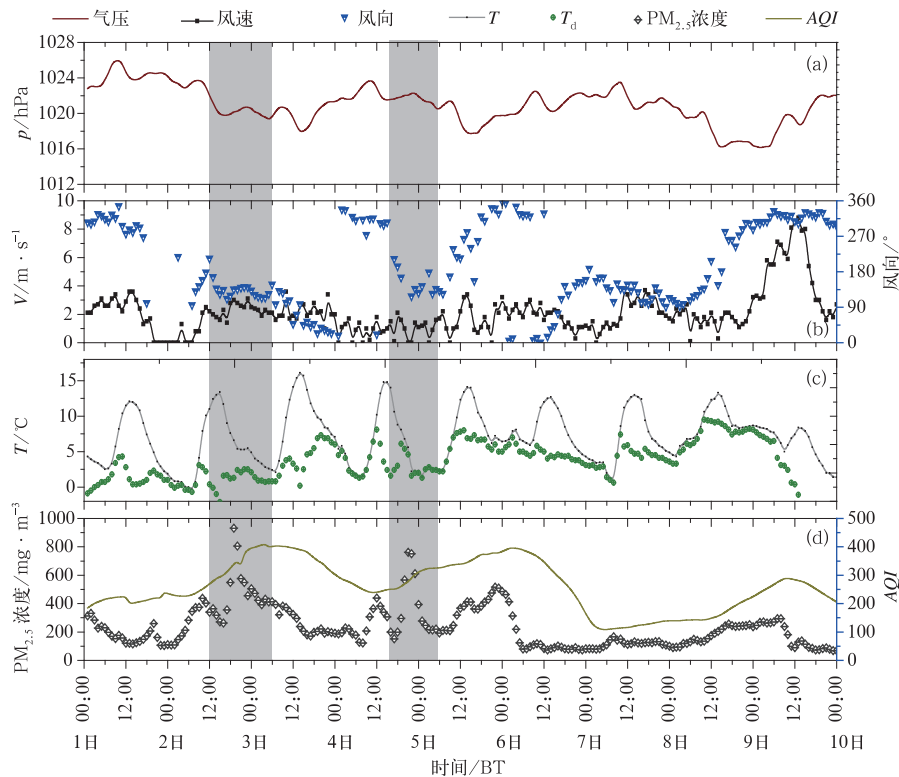


图 3 2013 年 12 月上旬盐城气象要素特征(a,b,c)、 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 AQI 指数(d)的变化

Fig. 3 The distribution of surface meteorological elements (a,b,c), $\text{PM}_{2.5}$ concentration and AQI index (d) at Yancheng Station during the early December 2013

6 日受弱冷空气影响,风向转为偏北风,平均风速略增强,同时在高空槽过境过程中,局部地区出现

了 3 mm 以下的弱降水(加密自动站),风力的增强和局部弱降水对气溶胶粒子有一定的清除作用。但

由于冷空气势力较弱,降水不明显,颗粒物浓度仍远超出二级标准值。8—9日也同样出现了浓雾和重度霾天气,但主要影响因素已发生变化,华东地区位于冷锋前部,高层冷空气渗透,形成中低空逆温,同时冷空气来临前,暖湿气流较强,受锋前增温影响,温度露点差减小,水汽饱和,形成低能见度天气。9日高层横槽南甩,北方强冷空气南下,带来地面的大风、降温。9—10日24h变压达8hPa以上,瞬时最大风力达 $13.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,同时北方干冷空气南下后相对湿度也明显降低,逆温层被破坏,混合层高度上升。随着气压升高、气温下降、湿度减小以及风力的增强,长时间的雾-霾天气终得以消散。由此可见,近地面层弱的水平风速、相对湿度的增加并持续高湿是长时间重度雾-霾天气发展、维持并形成大面积空气污染的重要气象因子,当风速增大、湿度减小时,雾-霾也相应减弱。

2.2.3 大气层结特征

2.2.3.1 逆温层

杜荣光等(2011)、龙时磊等(2013)在研究逆温层与污染物浓度的关系时指出:污染物浓度与逆温层底高呈明显的负相关,而与逆温强度呈正相关。花丛等(2015)通过对典型雾、霾天气的边界层要素特征分析指出逆温强度与能见度呈负相关关系,对雾、霾的发生有一定的指示意义。

根据射阳站探空资料显示,从11月29日开始

近地面层就一直存在明显的贴地逆温,逆温层顶较低,最大逆温层顶位于925hPa,且逆温强度较强,非常有利于近地面层污染物堆积。这段时间持续的逆温层通过“锅盖”效应抑制颗粒物的垂直扩散,使颗粒物浓度迅速增加且维持。表1给出了11月29日至12月8日每日08时由射阳站探空资料计算得出的近地面逆温强度和湿层厚度,可以看出:2、4和5日的逆温强度均较大,而对应图3中颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度也是在2、4和5日的后期分别出现三个峰值,逆温强度和污染物浓度的变化有较好的一致性。由此可见,这段时间内高强度的逆温为颗粒物的积聚提供了良好的环境,导致颗粒物浓度迅速上升;较低的逆温层底高使空间容量减小,污染物浓度不断积聚增长;同时逆温现象的持续,促进了雾-霾天气的长时间维持并发展。

表1同时给出了射阳站每日08时近地面层相对湿度大于80%的湿层厚度,可以看出:自12月1日起,近地面一直持续维持较薄的湿层,为气溶胶粒子的吸湿增长提供了一定的水汽条件。盐城作为江苏海岸线最长的沿海城市,冬季经常出现近地面逆温层,大气层结稳定,使颗粒物不易扩散,而近地面层偏东风场为气溶胶粒子的吸湿增长提供了一定的水汽条件,导致气溶胶粒子质量浓度迅速增加,促进雾-霾的形成。

表1 2013年11月29日至12月8日每日08时射阳站逆温层逆温强度和近地面湿层厚度
Table 1 The inversion intensity and humidity thickness on surface layer at Sheyang Station at 08:00 during 29 November to 8 December 2013

08:00	29日	30日	1日	2日	3日	4日	5日	6日	7日	8日
逆温强度 / $^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$	2.21	2.05	2.90	4.21	1.38	4.66	6.56	1.96	3.04	0.53
近地面湿层厚度 (相对湿度>80%)/m	0	0	351	114	71	160	621	1164	652	700

2.2.3.2 混合层高度

混合层高度表征污染物在垂直方向被热力和动力湍流输送所能达到的高度,是影响污染物扩散的重要参数。当混合层高度较低时,污染物在垂直方向的混合受到限制,容易造成较高的污染浓度。因此,本文采用Nozaki(1973)提出的利用地面气象资料估算混合层高度的方法,称之为罗氏法。公式如下:

$$h = \frac{121}{6}(6-P)(T-T_d) + \frac{0.169P(U_z + 0.257)}{12f \ln(Z/Z_0)} \quad (1)$$

式中, h 为混合层高度,单位:m; $T-T_d$ 为露点温度差,单位: $^{\circ}\text{C}$; P 为稳定度级别,根据太阳高度角、风速以及云量进行判定,分为A~F六个级别, P 值依次取值1~6; U_z 表示 z 高度层上的平均风速,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; f 为地转参数; Z_0 表示地表粗糙度,单位:m;该方法考虑到大气混合层的热力和动力因子,边界层上部大气运动常与地面气象要素存在相互联系,不需要高空探测资料,即可估算混合层高度,计算结果也能满足一定的精度要求(马福建,1992;程水源等,1997;史宝忠等,1997;饶晓琴等,2008;杨静等,2011)。

图4给出了2013年12月1—10日混合层高度的变化趋势,2—6日期间混合层高度基本都在1.5 km以下,最低的混合层高度只有54 m,出现在5日08时,此时对应能见度不足100 m。混合层高度越低,越不利于污染物的垂直扩散,同时有助于近地面层的水汽积聚,促进气溶胶粒子的凝结增长,污染物浓度迅速增大。一般情况下,混合层高度有明显的日变化特征,白天受大气湍流作用高度不断增大,夜间混合层高度较低。对比混合层高度和能见度的变化,可以发现:能见度的升高与下降与混合层高度的变化有一个滞后时间的对应,能见度随着混

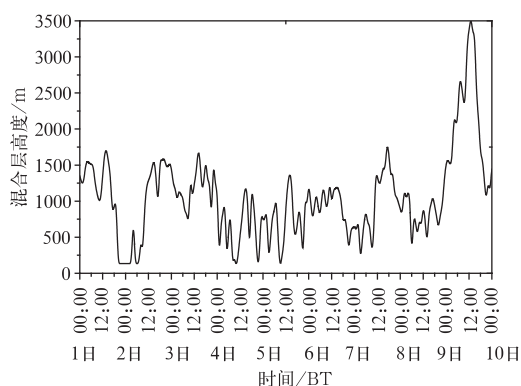


图4 2013年12月1—10日盐城混合层高度
Fig. 4 Mixed layer height at Yancheng Station during 1—10 December 2013

合层高度降低之后会出现较为明显的下降。在污染源条件不变的情况下,混合层高度越低,大气的扩散能力越差,污染物浓度升高,霾加重。由此可见,混合层高度的变化对霾的等级预报有很好的指示作用,而持续较低的混合层高度也是此次雾-霾长时间维持的原因之一。

2.2.4 物理量分析

利用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料分析盐城地区的垂直速度、涡度和散度的变化情况(图5),结果发现:在这段时间内,850 hPa以下的涡度、散度和垂直速度有正有负,但绝对值都较小。康志明等(2005)的研究结果表明大雾产生时的垂直速度、涡度和散度都较弱,说明大气湍流能力弱,有利于雾-霾的维持。其中,12月5日前期盐城地区800 hPa以下为弱下沉运动,配合有弱正散度以及负涡度区,这样的环流形势促进了下沉运动的发展,进一步阻碍了污染物垂直向上扩散,导致近地面污染物浓度

升高,雾-霾加强。在弱的水平风场作用下,使污染物缓慢向四周扩散,霾区的范围不断扩大,造成了大范围的重度雾-霾天气。由此说明,较弱的物理量场表明大气湍流能力弱,有利于雾-霾天气的持续发展。

2.3 污染来源分析

本文选取盐城盐都站(33.3°N 、 120.10°E),利用后向轨迹模式HYSPLIT 4.9对本次个例期间气流输送的轨迹进行计算,并对计算得到的后向轨迹进行聚类分析,得到这段时间影响盐城地区的主要气流输送类型(图6)。可以发现:在本次个例期间盐城地区主要受到来自北部、西部以及西南部气流输送的影响,其中偏西到西南方向的长距离输送(轨迹1、2、3、6和7),占总体的69%,来自北部的长距离输送类型4和5占31%。由此说明,长距离输送在这次重度污染的形成过程中起到了一定的作用;而轨迹经过的山东、安徽等地则是本地污染形成的可能源区。

同时本文通过美国气象卫星NOAA-18火点监测资料分析发现:在12月上旬盐城周边有多个火点,火点位置接近于农田附近(图6中黄色圆点代表火点位置),另外在安徽和湖北中南部、江西北部以及山东部分地区也遍布大片火点,这与后向轨迹所经区域高度吻合(图6),说明秸秆焚烧可能是此次重度霾天气形成的原因之一(朱彬等,2010),但此处还需要进一步确认。

2.4 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度、相对湿度和能见度之间的关系

污染物浓度的升高是重度雾-霾天气形成的内部因子,而环流背景和不利于污染物扩散的局地气象条件是重度雾-霾天气发展和维持的外部条件。为了进一步分析盐城地区雾-霾和边界层内气象因子的关系,利用2013年全年的污染物浓度资料和常规气象观测资料,通过统计分析总结能见度与各因子的相关关系,并实现对盐城地区雾-霾的预报。

本文筛选了2013年1—12月逐时的 $\text{PM}_{2.5}$ (单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)浓度、相对湿度(单位:%)、逐时气温(单位: $^\circ\text{C}$)、气压(单位:hPa)、降水量(单位:mm)、风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)以及能见度(单位:km)的有效数据,利用SPSS统计软件分析各因子与能见度的相关性。表2给出了以上六个因子与能见度

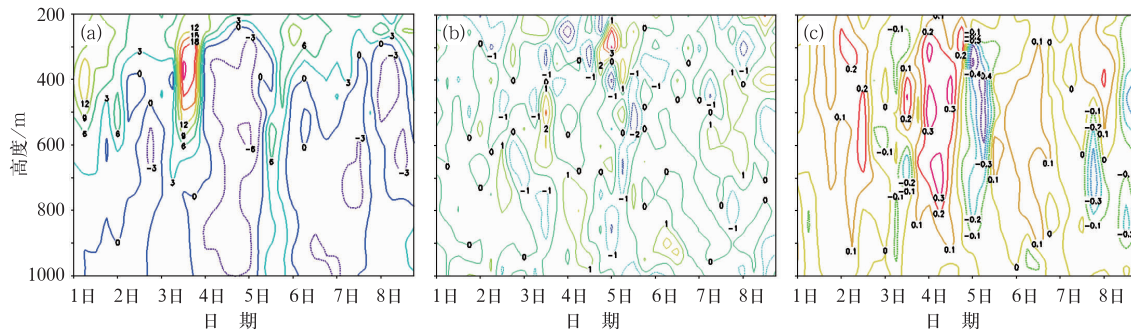


图 5 2013 年 12 月 1—8 日盐城涡度(a)、散度(b)和垂直速度(c)的时间-高度剖面图
 Fig. 5 The time-height profiles of vorticity (a), divergence (b) and vertical velocity (c) at Yancheng Station during 1—10 2013

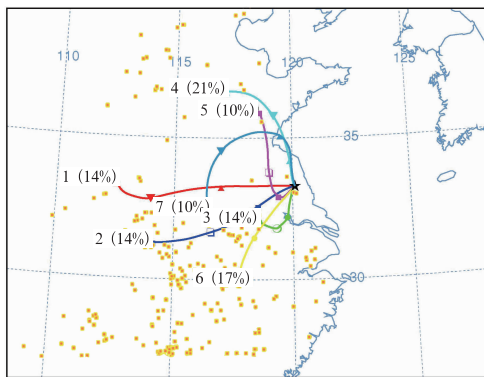


图 6 2013 年 12 月盐城雾-霾过程后向轨迹分型和火点监测
 Fig. 6 The backward trajectory types and the monitored fire spots of the fog-haze process at Yancheng Station in December 2013

的皮尔森(Pearson)相关系数以及显著性检验(双侧),可以看出:相对湿度和 PM_{2.5} 浓度与能见度的相关性最好,其次为风速;逐时降水量与能见度呈反相关,但相关系数较小;气压和气温与能见度呈正相关,但没有通过显著性 0.01 检验。对能见度的影响因子很多,但各因子的影响程度、影响过程并不相同,即对能见度的影响分析是一个较为复杂的多方面交叉问题,需要综合考虑各项因子,在此不做更细致的深入讨论,本文仅对与能见度关系最为紧密的 PM_{2.5} 浓度和相对湿度进行初步分析。当污染物浓度升高时,相对湿度的增加对能见度的影响较大,气溶胶粒子在水汽条件下吸湿凝结增长,增强了对大气消光作用,促使能见度下降而形成雾-霾。根据数据统计发现:能见度随着 PM_{2.5} 浓度的增加呈指数下降趋势,但不同的相对湿度,能见度与 PM_{2.5} 浓度的关系有一定差异。刘晓慧等(2013)指出能见度与

污染物浓度呈明显负相关,且相关性随着相对湿度的大小而变化,较高的相对湿度对应较高的相关性。因此,对不同档次的相对湿度分别进行能见度与 PM_{2.5} 浓度的分析:在不同的相对湿度下,能见度随着 PM_{2.5} 浓度的升高均成指数下降关系,即:

$$V = ae^{bn} + c \quad (2)$$

式中, a, b, c 为拟合方程的参数, n 表示 PM_{2.5} 浓度(单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), V 表示能见度(单位: km)。表 3 中给出了不同档次相对湿度下拟合方程的参数以及拟合系数。从表中可以看出:参数 b 均为负值,表示能见度随着 PM_{2.5} 浓度的增加呈指数递减;当相对湿度在 70%~80% 时,方程拟合关系最好;当相

表 2 2013 年 12 月盐城雾-霾过程各因子与能见度相关系数

Table 2 The correlation coefficient between factors and visibility of the fog-haze process at Yancheng Station in December 2013

	相对湿度	PM _{2.5} 浓度	风速	降水量	气压	气温
相关系数	-0.543	-0.48	0.306	-0.079	0.015	0.013
显著性(双侧)	0.01	0.01	0.01	0.01	0.153	0.164

表 3 不同相对湿度下拟合方程的参数及拟合系数
 Table 3 The parameter and fitting coefficient in equations at different humidity

相对湿度	a	b	c	拟合系数
0 ≤ RH < 60%	15.506	-2.462	-5.929	0.678
60% ≤ RH < 70%	9.316	-9.234	1.154	0.768
70% ≤ RH < 80%	9.622	-11.576	0.901	0.803
80% ≤ RH < 90%	8.826	-19.286	1.268	0.775
90% ≤ RH < 100%	5.367	-19.232	0.729	0.605

对湿度达90%以上时,虽然两者仍呈指数关系,但拟合系数较小。

从能见度与相对湿度的数据分析中发现:能见度随着相对湿度的增加而减小,以线性拟合效果较好,拟合系数为0.57。相对湿度对能见度的贡献也非常显著,在高湿度条件下,气溶胶粒子不断吸湿凝结增长,不仅使其质量浓度迅速提高,而且粒子尺度也不断增大,增强了对大气的消光作用,使能见度快速下降。两者对能见度均有较大影响,根据以上分析,筛选出2013年1—11月盐城市环境监测站逐时的颗粒物 $PM_{2.5}$ 浓度,盐都站逐时的相对湿度和能见度的有效数据,以能见度为应变量, $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度为自变量,取信度为0.05,建立非线性回归方程,利用SPSS软件求取回归系数,得到能见度与 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度的回归方程[式(3)],回归系数均通过了0.05的显著性水平检验,拟合系数 R 为0.786,拟合效果较好。

$$V = 8.413e^{-12.212n} - 9.620RH + 8.371 \quad (3)$$

为了验证回归方程效果,选取盐城2013年12月1—10日的盐城逐时资料进行能见度试报,并将预测值与观测值进行对比(图7)。就此次过程而言:能见度在1~5 km的预测值与观测值较为接近,预报误差较小;而能见度低于500 m时,预测值与观测值误差较大,预测值较观测值偏低,少量预测值为负值,主要是由于对应时间点的相对湿度和 $PM_{2.5}$ 浓度值均较高;当能见度高于5 km时,预测值略高于观测值,也有一定的误差。虽然能见度的

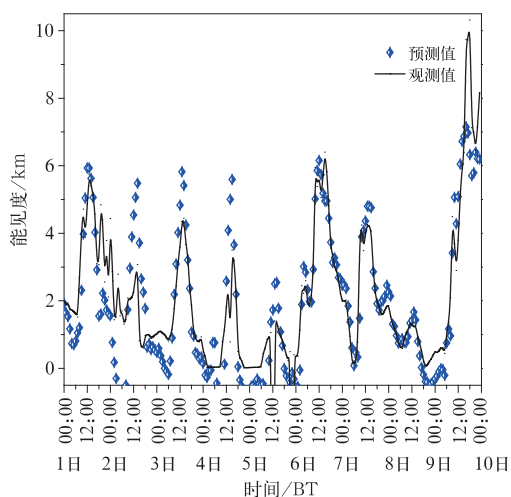


图7 2013年12月上旬盐城能见度预测值和观测值的对比

Fig. 7 Comparison of predicted and observed visibility at Yancheng Station in early December 2013

拟合方程还有一定的误差,后期还需要进一步完善,但是可以根据 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度的预报值来初步预测能见度、判定雾、霾的等级,为实际业务应用中霾的等级预报提供了有利的依据。

3 结论

本文对2013年12月上旬盐城地区长时间重度污染天气过程进行了综合分析,得到了以下结论:

(1) 此次过程,高层环流平直,没有明显的冷空气影响,地面处于均压场控制,气压梯度小,水平风场偏弱,不利于污染物在水平方向上的稀释、扩散。

(2) 近地面层持续的强逆温层覆盖,“锅盖”效应使污染物在近地面堆积,同时混合层高度偏低,抑制了污染物在垂直方向上的输送。

(3) 低层较高的相对湿度为气溶胶粒子的吸湿凝结增长提供了有利的水汽条件。总之,大气环流、局地气象要素特征与边界层特征叠加作用,极其不利于污染物扩散,是造成此次重度雾-霾天气长时间维持的重要原因。

本文同时研究了能见度与相对湿度和污染物浓度的变化关系,发现能见度随着污染物浓度的升高呈指数下降,随着相对湿度的升高呈线性下降,并建立了能见度与相对湿度和污染物浓度的非线性回归方程,并对12月上旬的过程进行能见度预测。与实况值对比发现:能见度在1~5 km的预测值与观测值较为接近,预报误差较小;当能见度低于500 m或高于5 km时,预测值仍有一定的偏差,还需要进一步的分析和改进。虽然拟合方程有一定的误差,但是可以根据 $PM_{2.5}$ 浓度和相对湿度的预报值来预测能见度、判定霾的等级,为实际业务应用中霾的等级预报提供了有利的依据。

致谢:感谢盐城市环境保护局提供监测资料。

参考文献

- 程水源,席德立,张宝宁,等.1997.大气混合层高度的确定与计算方法研究.中国环境科学,17(6):512-516.
- 杜荣光,齐冰,郭惠惠,等.2011.杭州市大气逆温特征及对空气污染物浓度的影响.气象与环境学报,27(4):49-53.
- 樊曙先,徐建强,郑有飞,等.2005.南京市气溶胶 $PM_{2.5}$ 一次来源解析.气象科学,25(6):587-593.
- 花丛,张碧辉,张恒德.2015.2013年1—2月华北雾、霾天气边界层特征对比分析.气象,41(9):1144-1151.
- 贾星灿,郭学良.2012.人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的

- 影响研究. 大气科学, 36(5):995-1008.
- 靳军莉, 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.
- 康汉青, 朱彬, 樊曙先. 2009. 南京北郊冬季大气气溶胶及其湿清除特征研究. 气候与环境研究, 14(5):523-530.
- 康志明, 尤红, 郭文华, 等. 2005. 2004 年冬季华北平原持续性大雾天气的诊断分析. 气象, 31(12):51-56.
- 刘爱君, 杜尧东, 王惠英, 等. 2004. 广州灰霾天气的气候特征分析. 气象, 30(12):68-71.
- 刘端阳, 曹登峰, 陈纾杨, 等. 2013. 沙尘天气过程对太湖北岸城市空气质量的影响. 自然灾害学报, 22(4):135-144.
- 刘端阳, 濮梅娟, 严文莲, 等. 2014. 淮河下游连续雾-霾及转换成因分析. 中国环境科学, 34(7):1673-1683.
- 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.
- 刘晓慧, 朱彬, 王红磊, 等. 2013. 长江三角洲地区 1980—2009 年灰霾分布特征及影响因子. 中国环境科学, 33(11):1929-1936.
- 刘璇, 朱彬, 侯雪伟, 等. 2015. 基于卫星遥感和地面观测资料的霾过程分析——以长江三角洲地区一次严重霾污染过程为例. 中国环境科学, 35(3):641-651.
- 龙时磊, 曾建荣, 刘可, 等. 2013. 逆温层在上海市空气颗粒物积聚过程中的作用. 环境科学与技术, 36(6):104-109.
- 吕梦瑶, 何立富. 2014. 2013 年 12 月大气环流和天气分析. 气象, 40(3):381-388.
- 吕翔, 刘端阳, 李冰峰, 等. 2015. 徐州持续性霾过程的季节特征分析. 气象, 41(9):1134-1143.
- 马福建. 1992. 用常规地面气象资料估算大气混合层高度的一种方法. 环境科学, 5(1):11-14.
- 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.
- 史宝忠, 郑方成, 曹国良. 1997. 对大气混合层高度确定方法的比较分析. 西安建筑科技大学学报, 29(2):138-141.
- 孙霞, 银燕, 韩洋, 等. 2012. 石家庄地区雾-霾天气下云滴和云凝结核的分布特征. 中国环境科学, 32(7):1165-1170.
- 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. 2003. 珠江三角洲城市群区域大气灰霾形成机制及其预测预报, 控制方法研究//第二届粤港澳可持续发展研讨会论文集. 香港:香港工程师学会, 61-62.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论. 气象, 31(4):3-7.
- 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.
- 严文莲, 刘端阳, 孙燕, 等. 2014. 秸秆焚烧导致的江苏持续雾-霾天气过程分析. 气候与环境研究, 19(2):237-247.
- 杨静, 李霞, 李秦, 等. 2011. 乌鲁木齐近 30a 大气稳定性和混合层高度变化特征及与空气污染的关系. 干旱区地理, 34(5):747-752.
- 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.
- 杨卫芬, 银燕, 魏玉香, 等. 2010. 霾天气下南京 $PM_{2.5}$ 中金属元素污染特征及来源分析. 中国环境科学, 30(1):12-17.
- 俞剑蔚, 孙燕, 张备, 等. 2009. 江苏沿江一次重霾天气成因分析. 气象科学, 29(5):664-669.
- 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.
- 张小曳, 孙俊英, 王亚强, 等. 2013. 我国雾-霾成因及其治理的思考. 科学通报, 58:1178-1187.
- 赵玉广, 李江波, 李青春. 2015. 华北平原 3 次持续性大雾过程的特征及成因分析. 气象, 41(4):427-437.
- 中国气象局. 2010. 霾的观测和预报等级. QX/T 113-2010.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2011. 雾的预报等级. GB/T 27964-2011.
- 朱彬, 苏继峰, 韩志伟, 等. 2010. 秸秆焚烧导致南京及周边地区一次严重空气污染过程的分析. 中国环境科学, 30(5):585-592.
- Nozaki K Y. 1973. Mixing Depth Model Using Hourly Surface observations. Report 7053, USAF Environment Technical Applications Center.
- Schichtel B A, Husar R B, Fallke S R, et al. 2001. Haze trends over the United States, 1980—1995. Atmos Environ, 35(30):5205-5210.
- Senaratne I, Shooter D. 2004. Elemental composition in source identification of brown haze in Auckland, New Zealand. Atmos Environ, 38(19):3049-3059.
- Zhang R H, Li Q, Zhang R N. 2014. Meteorological conditions for the persistent severe fog and haze event over eastern China in January 2013. Sci China: Earth Sci, 57(1):26-35.