

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.

# 徐州持续性霾过程的季节特征分析<sup>\* 1</sup>

吕 翔<sup>1</sup> 刘端阳<sup>2</sup> 李冰峰<sup>1</sup> 田 园<sup>1</sup> 段培法<sup>1</sup> 孙建印<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 徐州市气象局, 徐州 221002

<sup>2</sup> 江苏省气象局, 南京 210008

**提 要:** 利用常规气象观测资料、NCEP 再分析资料及污染物浓度小时资料, 从天气形势、地面气象要素特征、污染物浓度变化、霾形成及维持的机制等方面, 分析了徐州 2013 年持续性霾过程的季节特征。结果表明: 秋、冬季中高层为西到西北气流, 低层暖脊, 地面为高压后部或鞍型场; 春、夏季在中高层西南风、低层高压后部偏南气流、地面风场不是很弱的情况下出现持续性霾。秋、冬季霾日夜间风速接近静风, 白天风速较夜间略大, 风向以偏北和偏东居多; 春、夏风向、风速相对稳定, 风速维持  $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 风向多为东到东南。秋、冬季出现霾时层结稳定, 具有明显的贴地层逆温结构, 逆温层顶较低, 春季逆温层顶略高于秋、冬季, 而夏季出现霾时可以是不稳定的层结, 低层也不具备明显逆温特征。冬、夏季霾区上空多为微弱的上升运动, 高度不高, 其上为下沉气流; 春、秋季夜间到早晨霾区上空多为下沉气流。

**关键词:** 霾, 季节特征, 污染, 气象条件

**中图分类号:** P466, x16

**文献标志码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2015. 08. 011

## Seasonal Characteristics of Consecutive Haze Events in Xuzhou

LÜ Xiang<sup>1</sup> LIU Duanyang<sup>2</sup> LI Bingfeng<sup>1</sup> TIAN Yuan<sup>1</sup>

DUAN Peifa<sup>1</sup> SUN Jianyin<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Xuzhou Meteorological Office of Jiangsu Province, Xuzhou 221002

<sup>2</sup> Jiangsu Meteorological Bureau, Nanjing 210008

**Abstract:** Based on conventional meteorological observation data and NCEP reanalysis data as well as hourly pollutant concentration data, seasonal characteristics of consecutive haze events in Xuzhou in 2013 are analyzed, including circulation background, surface meteorological characteristics, pollution forming and maintaining mechanism. The findings are as follows. Consecutive haze events are prone to occur when the cold advection at high level, warm high ridge at low level, and back of surface high or saddle pattern occur in autumn and winter, and southwest wind at high and low level, south airflow in the back of high pressure and the surface wind are not very weak in spring and summer. Wind speed in autumn and winter is very slow at night, slightly increasing during the day, but in spring and summer wind speed is stable relatively, being  $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Wind direction is northerly and easterly mainly in autumn and winter, but easterly to southeasterly in spring and summer. Temperature stratifications are stable with obvious surface-layer thermal inversion during the consecutive haze events in autumn and winter. In contrast, inversion layers are higher in spring than in autumn and the summer stratification is unstable without obvious inversion. Shallow upward motion exists at low level, and downdraft at the upper level in winter and summer while it is downdraft in most cases during the spring and autumn nights.

\* 国家自然科学基金项目(41340042)、江苏省自然科学基金项目(BK20130111)、江苏省科技支撑计划社会发展重大研究(BE2012771)、江苏省气象局环境气象科技创新团队项目和徐州市科技计划项目(XM13B100)共同资助

2014 年 8 月 27 日收稿; 2014 年 12 月 29 日收修定稿

第一作者: 吕翔, 主要从事天气预报工作. Email: amy0516lx@126. com

**Key words:** haze, seasonal characteristics, pollution, synoptic condition

## 引言

随着我国社会经济飞速发展及城市化进程的持续加速,城市大气污染问题日趋严重,低能见度日数随之增多,大范围持续雾-霾天气的出现频率也呈逐年上升趋势。特别是在我国中东部,频繁出现的雾-霾不仅对交通运输、军事、电力造成严重影响,对人体健康也产生严重危害。近年来,很多学者从雾-霾的概念及预警标准(吴兑,2005;2006;2008)、气候特征(吴兑等,2010;伍红雨等,2011;齐冰等,2012;过宇飞等,2013;刘端阳等,2014b)、成因分析(吴兑等,2006;2008;吴兑,2011;李菲等,2012;姚青等,2012;曹伟华等,2013;夏冬等,2013;刘端阳等,2013;2014c;于庚康等,2015)、边界层特征与微物理结构(刘端阳等,2009;陆春松等,2010;蔡子颖等,2012;张礼春等,2013;马翠平等,2014;Liu et al, 2010;2011;2012;Niu et al,2012)及生消物理机制(严文莲等,2009;杨军等,2010)等方面对雾和霾做了大量的研究工作,取得了一系列有意义的成果。针对秋冬季雾和霾的研究相对较多,何立富等(2006)、张恒德等(2011)分别对华北和华东地区冬季持续大雾过程的热力和动力成因进行了深入分析;高健等(2012)认为北京2011年10月的一次连续霾过程是频繁出现的鞍型场静稳天气及北京周边较大的细颗粒排放源所致;贾兴灿等(2012)探讨了人为污染物对华北和华东地区冬季的一次浓雾天气过程的影响机理;包云轩等(2013)对发生在沪宁高速公路上的一次大雾过程进行了数值模拟,利用实测资料对模拟结果进行了验证,并剖析了此次复杂性大雾过程形成的动力、水汽和热力条件。许多学者也相继研究了夏收期的雾-霾过程,刘端阳等(2014c)分析了淮安及周边地区的一次严重雾-霾过程中污染物的变化特征、影响因素及来源;严文莲等(2014)研究了2012年6月中上旬江苏的持续雾-霾过程,认为秸秆焚烧所致的大量气溶胶粒子悬浮是造成持续霾天气的主要原因。2013年1月,全国出现大范围持续性雾-霾天气,京津冀、黄淮海平原及长江三角洲都是影响相对严重的区域,最长的持续达20 d,陈瑞敏等(2014)、韩霄等(2014)、刘梅等(2014)、王跃思等(2014)、吴兑等(2014)、杨欣等

(2014)、张人禾等(2014)和刘勇洪(2014)都分别针对京津冀及长三角地区出现的典型雾-霾过程做了细致深入的分析,但对于黄淮海地区的研究分析相对较少。同时,以往研究大多针对一次雾或霾过程,或是相同季节的几次过程,缺少对同一地区不同季节雾-霾天气过程的对比研究。

淮北地区位于黄淮海平原,属于淮海经济区,一年四季均有霾发生,出现频率极高,造成城市出现“灰锅盖”现象,严重影响了城市环境和居民身体健康。以该地区中心城市徐州为例,全市1962—2013年年平均霾日数21 d,其中近5年年平均霾日数高达85.2 d,霾污染日数近年来有显著增多的趋势(段培法等,2013)。本文将结合污染物浓度,分析徐州2013年不同季节下的持续性霾天气过程,从天气形势、地面气象要素、污染物浓度变化、霾形成及维持的热力和动力条件等方面对比几次过程的季节性差异,为淮北地区霾天气的预测、防治及其影响评估提供科学参考依据。

## 1 资料与方法

分析所用资料包括常规观测资料、NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$ 资料及徐州市环境监测站提供的空气质量指数(air quality index, AQI)及小时污染物浓度资料。

为了排除主观因素对观测的影响,采用客观的标准来统一判断,根据刘端阳等(2014b)提出的每天08、14和20时3个时次的能见度(VIS)和相对湿度进行判断:当满足任一时次能见度 $<10$  km,且相对湿度 $<90\%$ ,并且排除降水、吹雪、雪暴、扬沙、沙尘暴、浮尘和烟幕等其他导致低能见度天气现象的情况为一个霾日。根据能见度将霾划分为4个等级,当 $5 \text{ km} \leq \text{VIS} < 10 \text{ km}$ 定义为轻微霾,当 $3 \text{ km} \leq \text{VIS} < 5 \text{ km}$ 为轻度霾,当 $2 \text{ km} \leq \text{VIS} < 3 \text{ km}$ 为中度霾,当 $\text{VIS} < 2 \text{ km}$ 为重度霾。

根据上述标准统计来看,2013年徐州市全年共出现霾日195 d(图1),其中冬季(1、2和12月)最多,达到70 d,占全年霾日总数近一半;秋季(9—11月)次之,出现51 d;春季(3—5月)、夏季(6—8月)相对较少,各出现33和41 d。在195个霾日中,分别出现重度霾、中度霾、轻度霾和轻微霾的日数为11、15、59和110 d。绝大多数中度以上的霾出现在

冬季,占69.2%。持续3 d及以上的连续霾天气过程多达28次,且各个季节均有分布,冬季最多,共出现9次,秋季出现8次,春、夏季分别出现5和6次。选取2013年徐州市区单站持续天数达到3 d及以上的霾日作为持续性霾过程,对各季节典型的持续性霾过程进行对比分析,找出不同季节下出现霾天气条件的差异。

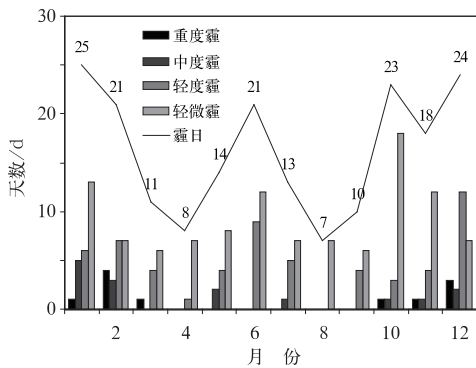


图1 2013年徐州市霾日分布

Fig. 1 Haze distribution in Xuzhou in 2013

## 2 过程概况

2013年冬季,淮北地区出现大范围持续性霾天气,徐州1和2月霾日均超过20 d。1月从5日开始几乎连续出现了4段持续性霾,上中旬以轻微-轻度霾为主;下旬霾强度有所加强,持续时间也更长。2月的持续性霾也分为两个高峰阶段:10—18日正值春节假日,持续的低能见度天气和空气污染给人们户外活动带来了明显不利的影响;月底能见度持续偏低,霾更为严重。春季由于风大干燥,霾天气明显减少,且强度偏弱。夏季霾天气集中在6月中下旬,其他月份出现的霾相对较弱,持续时间也不长。秋季持续性的霾强度不强,主要为轻微-轻度霾,其中持续时间较长、强度较强的是10月20—24日。

在各季节选取共6次持续性霾过程,分别为:冬季1月22—24、26—31日和2月21—28日、春季5月22—25日、夏季6月14—16日、秋季10月20—24日。

## 3 天气形势分析

1和2月的平均环流形势场比较接近,500 hPa(图2a)为宽广的高压脊,徐州受脊前西北气流控制。低层850 hPa(图3a)也处在高压脊前,并有暖

温度脊配合,存在弱的暖平流。低层暖平流的存在有利于地面弱冷气团变性减弱,使系统内风速减小,而且也有利于低层逆温层的形成(何立富等,2006)。地面图上(图略),位于北方扩散南下的冷高压后部,有利于夜间辐射冷却,且其西侧的东到东南风带来了必要的水汽条件。冬季霾过程的平均环流形势与冬季典型的持续雾-霾形势相似(何立富等,2006;张恒德等,2011)。

在5月22—25日500 hPa平均场(图2b)上,河套为一支高空槽,徐州受槽前西南气流影响,具体的看23和25日分别有低槽东移过境。850 hPa(图3b)处在沿海高压后部的偏南气流中。地面图上(图略),23日位于入海高压后部,24—25日低压倒槽北抬,降水区偏北,徐州处于低压前部,偏南风加大,雾-霾区的范围和强度相比较前期减小。

6月中旬的霾出现在夏收尾声阶段。严文莲等(2014)认为2012年6月中上旬江苏及周边地区秸秆焚烧造成的大量悬浮气溶胶粒子是造成江苏持续出现不同程度霾天气的主要原因。与2012年同期相比,此次霾从持续时间和强度上均有所减弱,且2013年霾出现期间的平均环流形势与2012年也存在明显差别。2012年6月中上旬500 hPa中高纬冷涡维持,徐州处于冷涡底部偏西气流中,期间不断有短波槽引导冷空气南下,层结不稳定,弱降水偏多;低层气压场弱,涡后冷平流不明显,低空层结相对稳定。而2013年6月14—16日期间(图2c和图3c),副热带高压偏强偏北,徐州中低层都处于副热带高压边缘的偏南气流中,有暖平流;地面上位于入海高压后部的东南风场中,风场不是很弱。在这种形势下出现比较明显的雾-霾,与秋、冬季常见雾-霾形势有所不同。值得注意的是,在2012和2013年6月中旬前后、明显不同的天气形势背景下都出现了持续性霾,由此看来,天气条件应该不是其形成的首要原因。

在10月20—24日500 hPa(图2d)上,蒙古东部存在一个冷涡,徐州处于冷涡底部的偏西气流中,存在冷平流影响。逐日来看,21日之前冷涡位置偏北,中纬度是纬向型环流,有短波槽活动,22日起贝加尔湖冷涡逐渐东移南掉,引导冷空气南下,24—25日维持在东北地区。850 hPa(图3d)低涡配合冷空气在23日之前以偏北东移为主,徐州上空受暖脊控制,地面处于鞍型场的均压区之中。23日之后冷空气沿东路快速南下,受较强锋区影响,偏北风加大,

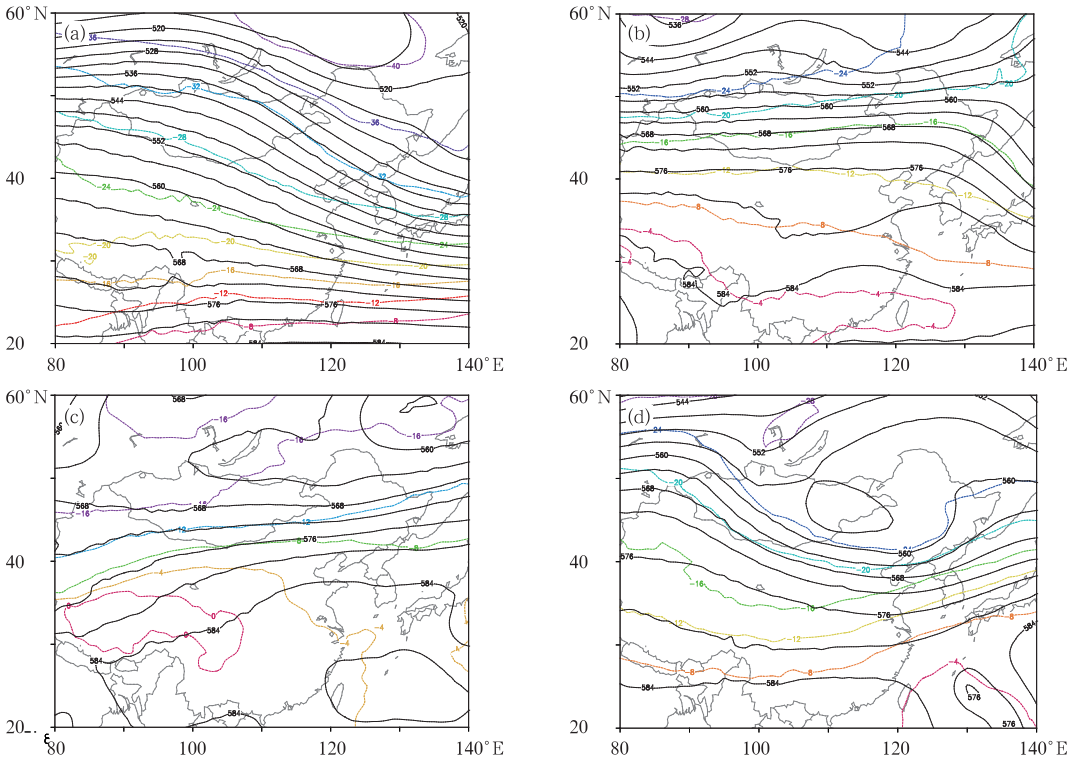


图 2 2013 年(a)1月 22—31 日、(b)5月 22—25 日、(c)6月 14—16 日和(d)10月 20—24 日 500 hPa 平均高度场(单位: dagpm)和温度场(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 2 Average geopotential height (unit: dagpm) and temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) in (a) 22—31 January, (b) 22—25 May, (c) 14—16 June, (d) 20—24 October 2013

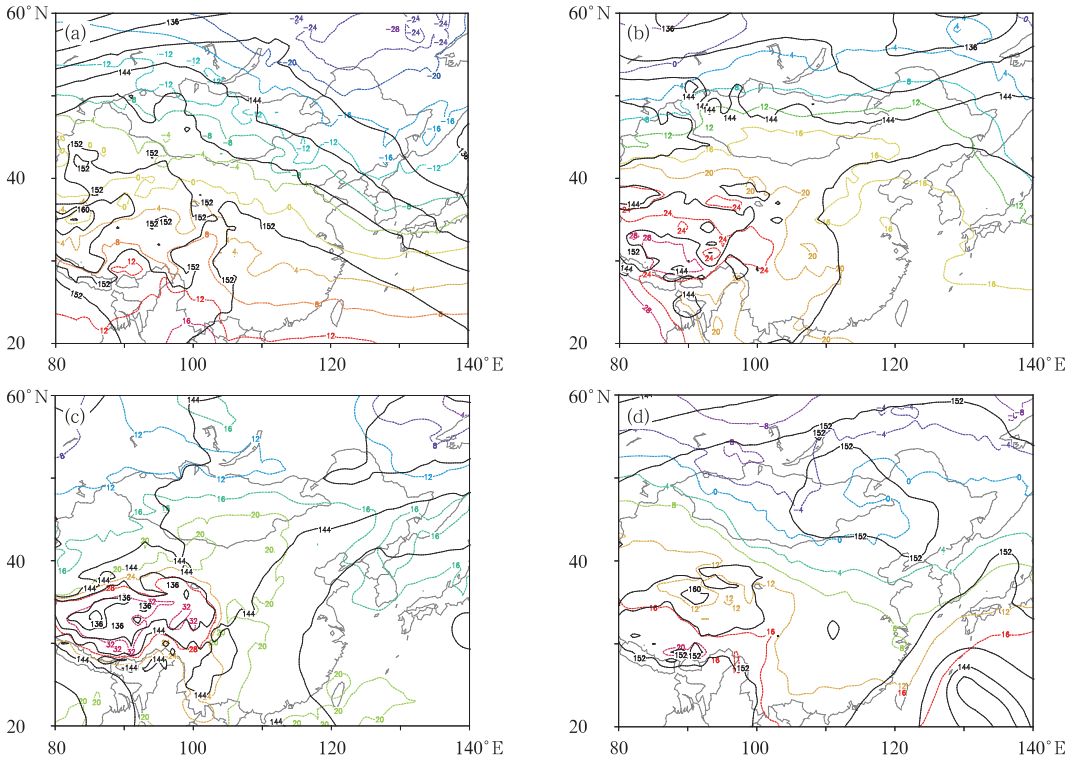


图 3 同图 2, 但为 850 hPa

Fig. 3 The same as Fig. 2, but for 850 hPa

冷平流加强,24日霾较之前明显减弱。

从各季节环流形势的特点来看,秋冬季出现持续性霾天气时,中高层为西到西北气流,存在冷平流影响,低层被暖脊控制,地面一般为高压后部或鞍型场,这种形势配置易形成近地层逆温及静小风的有利环境;春、夏季霾天气的形势不太稳定,同时也不十分典型,如2013年5和6月两次持续性霾过程的中高层都吹西南风,低层处于高压后部的偏南气流,地面位于入海高压后部,但地面风场不是很弱。而在2012和2013年6月中旬前后,在明显不同的天气形势背景下都出现了持续性的霾天气。

## 4 气象要素分析

为了进一步分析持续性霾过程中地面要素随时间的变化特征,利用徐州站逐小时实测资料,计算了各时段能见度、相对湿度、气温、露点及风向风速随时间的演变。

图4给出了各个过程期间能见度与不同气象要素之间的变化关系。2013年1月出现的4段持续性霾过程中,上中旬能见度基本在3 km以上,主要为轻微-轻度霾;到了下旬能见度进一步下降,强度

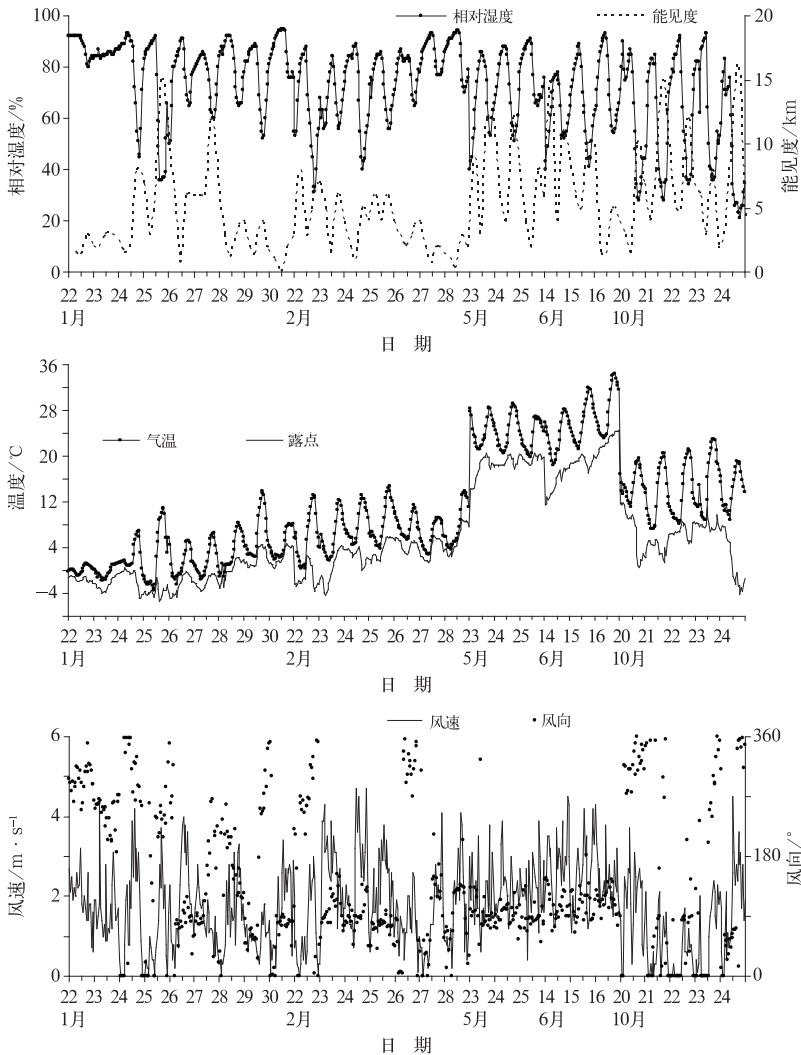


图4 2013年持续性霾过程期间气象要素随时间的变化

(a)能见度和相对湿度,(b)气温和露点,(c)风向和风速

Fig. 4 Changes of meteorological elements with time during the consecutive haze events in 2013 (a) visibility and relative humidity, (b) temperature and dew-point temperature, (c) wind speed and direction

也比1月上中旬的两次过程有所加强,其中22—23和28—29日都出现了中度霾,29日能见度进一步恶化,08时能见度仅有1.5 km,达到了重度霾标准。这段时间还呈现出雾-霾频繁转化的特点,大部分天数里夜间为轻雾,白天随着相对湿度逐渐减小,又转化为霾,26和30日的后半夜到早晨出现了较明显的大雾,30日08时的能见度不足100 m。2月的持续性霾过程中,10—17日以轻微-轻度霾为主,22日开始日均能见度降至3~6 km,23—24日早晨能见度均低于2 km,出现了重度霾,到了27—28日,由于相对湿度显著增加,能见度持续下降,雾-霾加重,两天早晨都出现了大雾,白天随着相对湿度的下降,又转为重度霾。5月22—25日的过程强度较弱,几天分别是在夜间到早晨为轻雾,白天转为轻微-轻度霾,25日出现了重度霾。夏季在6月中下旬出现了连续雾-霾,14—15日由于相对湿度较小,主要为霾,16日早晨湿度增大,转为轻雾,白天又转为霾,出现霾-雾-霾的转化过程。秋季10月20—24日这几天相对湿度较小,空气干燥,因此在白天尤其是下午时段,能见度有所好转,达到10 km以上,夜间能见度减小,霾又重新出现。

总体来看,雾-霾发生期大部分时段能见度都在5 km以下,露点温度(图4b)变化不大,夜间气温下降,温度露点差减小,相对湿度增大到90%上下,导致近地层水汽饱和凝结,这段时间大多数为雾;白天气温上升,湿度降至80%以下,雾转化为霾。从各个季节来看,冬季由于气温低,空气相对容易达到饱和,因此相对湿度也较大,能见度偏低,雾-霾容易较长时间维持;夏季气温高,过程前期露点低,相对湿度较小,能见度也相应好些,在4~5 km左右,后期随着露点和相对湿度的增大,能见度急剧恶化,下降至1 km左右;春、秋季气温日变化大,相对湿度的日变化也较大,夜间强烈的辐射降温导致温度露点差显著减小,相对湿度迅速增大,能见度明显降低,白天气温上升,相对湿度下降,能见度也有所好转。

从风速(图4c)来看,雾-霾发生期间,风速较小,多在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,风向以偏东或东南居多,为雾-霾的发展加强提供了一定的水汽条件。春、夏季风向、风速相对稳定,风速维持 $2 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,风向为东到东南,有利于近地面增湿。而秋、冬季风向、风速均不稳定,夜间风速较小,接近静风,白天风速有所增大,在 $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,风向也不完全一致,以偏北、偏东居多。

## 5 污染物条件差异

据环保部门监测,除10月21日的主要污染物为 $\text{NO}_2$ 外,其余过程的主要污染物均为可吸入颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 。其中,有11 d AQI达到200以上,属于重度污染级别,多日达到中度及以上污染;日均细颗粒物质量浓度除了5月24日,其他均超过二级标准( $0.075 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),在霾最严重的几个时段(图5),如1月28—30日、2月26—28日和6月16日,全市的污染也同样严重,细颗粒物浓度均处于峰值,平均浓度在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 上下。最严重的污染出现在6月16日,细颗粒物浓度最高达到 $0.604 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,远高于其他天。高浓度细颗粒物的强消光作用大大降低了能见度,造成霾加重。春、秋季霾强度不强,从 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度来看,污染程度也不超过中度级别。

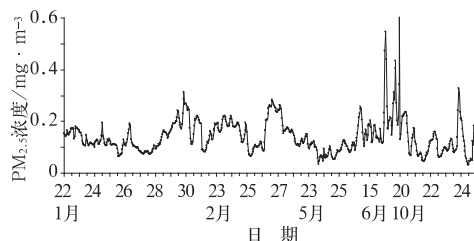


图5 2013年持续性霾过程期间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度逐小时变化

Fig. 5 Evolution of hourly variation of  $\text{PM}_{2.5}$  concentration during the consecutive haze events in 2013

## 6 形成及维持机制分析

大气垂直分布特征是霾天气形成、加强和维持的重要因素。从热力条件和动力条件两方面来看,无论是温度层结分布还是垂直运动条件都在霾形成和发展的过程中起关键性作用。

### 6.1 热力条件

图6为霾过程期间逐日的温度层结时序图。冬季过程层结稳定(图6a和6b),夜间到早晨低层大多出现了逆温或接近等温的结构,但逆温层顶的高度较低,一般在900 hPa以下。具体看,1月22—23日近地层出现逆温,其上有接近等温层存在,24日

温度递减率加大,但仍存在近地层逆温的现象,逆温层在 950 hPa。2 月的温度层结变化更为规律,每天夜间到早晨都出现不同程度的贴地层逆温。相比较而言,1 月的过程逆温不明显、不规律,前期基本为较弱的逆温或接近于等温,层次分布也有变化,到了 28 日以后,由于暖平流作用,低层增温明显,900 hPa 附近开始出现明显逆温。而 2 月的过程中逆温更为明显、规律,26 日之前逆温层高度较低,都在 950 hPa 以下,26 日以后,逆温层高度逐渐升高,尤

其是在 27—28 日,逆温层顶接近 850 hPa。春季过程同样出现了逆温层和近等温层(图 6c),高度比冬季出现的逆温层高度略高,接近 950 hPa。夏季过程中(图 6d),夜间到早晨低层并没有出现明显的逆温,仅在 950 hPa 附近存在近等温层,整个温度层结显示出弱不稳定,这与其他季节有明显差别。秋季过程(图略)的夜间到早晨近地层也多伴有逆温和等温层的出现,高度多在 950 hPa 以下。

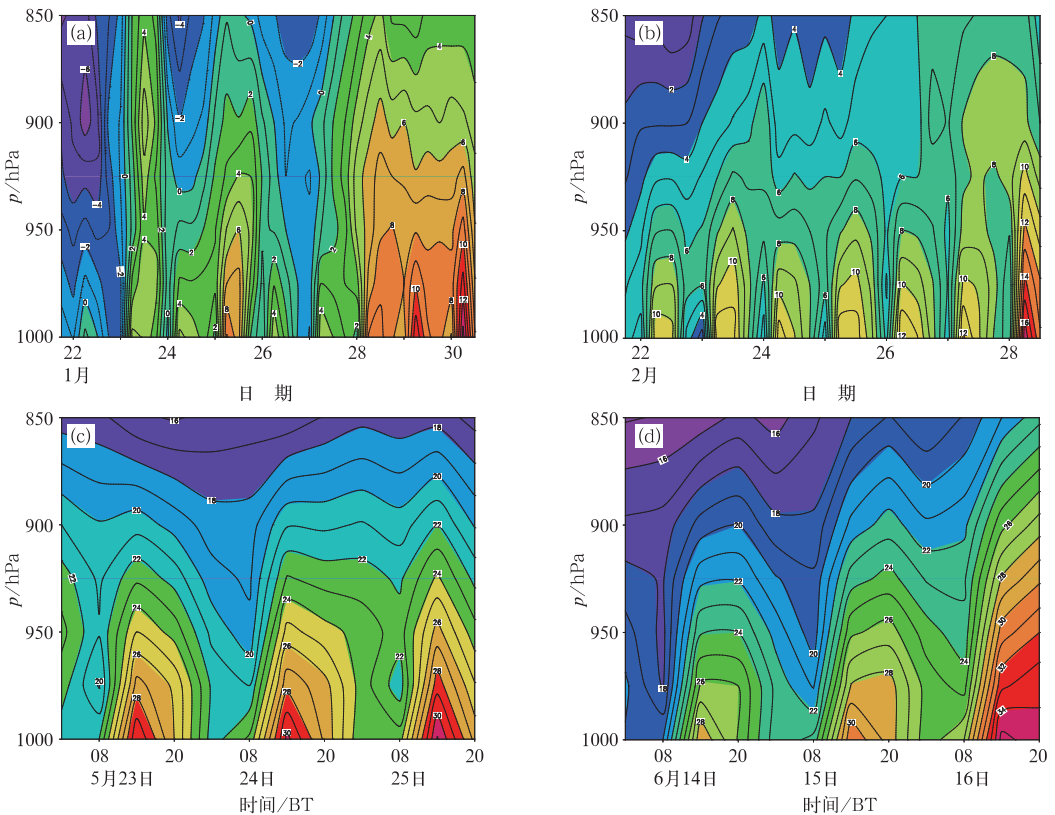


图 6 2013 年(a)1月 22—31 日、(b)2月 22—28 日、(c)5月 22—25 日和 (d)6月 14—16 日温度层结(单位:℃)

Fig. 6 Temperature stratification in (a) 22—31 January, (b) 22—28 February, (c) 22—25 May, (d) 14—16 June 2013

总的来看,秋、冬季出现霾时层结稳定,具有明显的贴地层逆温结构,逆温层顶一般较低,春季逆温层顶要略高于秋、冬季,而夏季出现霾时可以是不稳定层结,低层也不具备明显逆温特征。

从出现逆温的成因分析,主要分为辐射和平流两种。辐射产生的逆温多出现在近地层,形成霾的厚度较小,持续时间也短,一般出现在后半夜到早晨,白天随着地表加热破坏了近地层逆温,霾会有明显减弱,能见度也有所好转。如 1 月过程的中期、2

月过程前期以及春、秋季的霾多是由于近地层辐射冷却形成逆温所致。而平流逆温的形成是低层暖平流的作用,此时即使辐射条件较差,但明显的暖平流可促进低层出现逆温,建立低层稳定层结,形成“暖干盖”,有利于积聚近地层的水汽和污染物,促使霾发展维持。这种平流作用产生的霾较厚,持续时间也较长。如 1 月的 23 日前后、28—30 日和 2 月 27—28 日,这期间 850 hPa 都有暖平流影响,低层出现平流逆温,逆温层厚度也明显增大,而近地面的

辐射冷却又进一步加大了逆温强度,使得前期霾显著加重,达到重度霾标准,并且不会很快消散,导致能见度持续偏低,这说明平流过程对秋、冬季霾天气的加强和维持具有非常重要的作用。

### 6.2 动力条件

垂直速度剖面能够显示霾区上空气流的结构特征(图 7)。在霾过程中,垂直速度呈现出上升和下沉频繁交替的过程,但上升和下沉速度总体不大,这有利于稳定层结的维持及污染颗粒物的积聚。冬季过程期间多为微弱的上升运动(图 7a 和 7b),垂直速度不超过  $-0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,高度也不高,大都在 900 hPa 以下,其上多为下沉气流。这种微弱的上升运动引起的边界层浅层抬升容易使空气中的水汽凝结成雾并使雾层能够进一步向上发展。而边界层以上的下沉气流则有利于霾区上空稳定层结的建立和维持。另外,在 1 月的 23 日前后、28—30 日及 2 月 27—28 日平流作用占主导期间,由于低层暖平流的

输送,上升运动高度都明显增大到 850 hPa 以上,霾层发展较厚。同时在霾最严重的时段,上层的下沉运动也明显加强,如 1 月 29 日和 2 月 27 日的夜间,下沉速度中心都达到  $0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以上。强的下沉增温也易于形成稳定层结,阻止低层水汽和污染物向上扩散,霾容易维持。在夏季过程中(图 7c),近地层为非常浅薄的上升运动区,其上为下沉运动,但总体看,上升和下沉运动都十分微弱。春(图略)、秋季(图 7d)过程中,夜间到早晨霾区上空多为下沉气流,这与前面分析的形成原因多是由于辐射冷却导致逆温的结论也是一致的。

因此,低层的上升运动往往与边界层的浅层抬升和低层暖平流的输入相联系,两者会导致温度层结发生变化,对应霾天气的出现及向上发展。下沉运动导致的增温有利于低层形成相对稳定层结从而有利于霾的维持。在几次过程的消散阶段,整层都对应着一致的上升运动,这时往往预示着霾的减弱或消散。

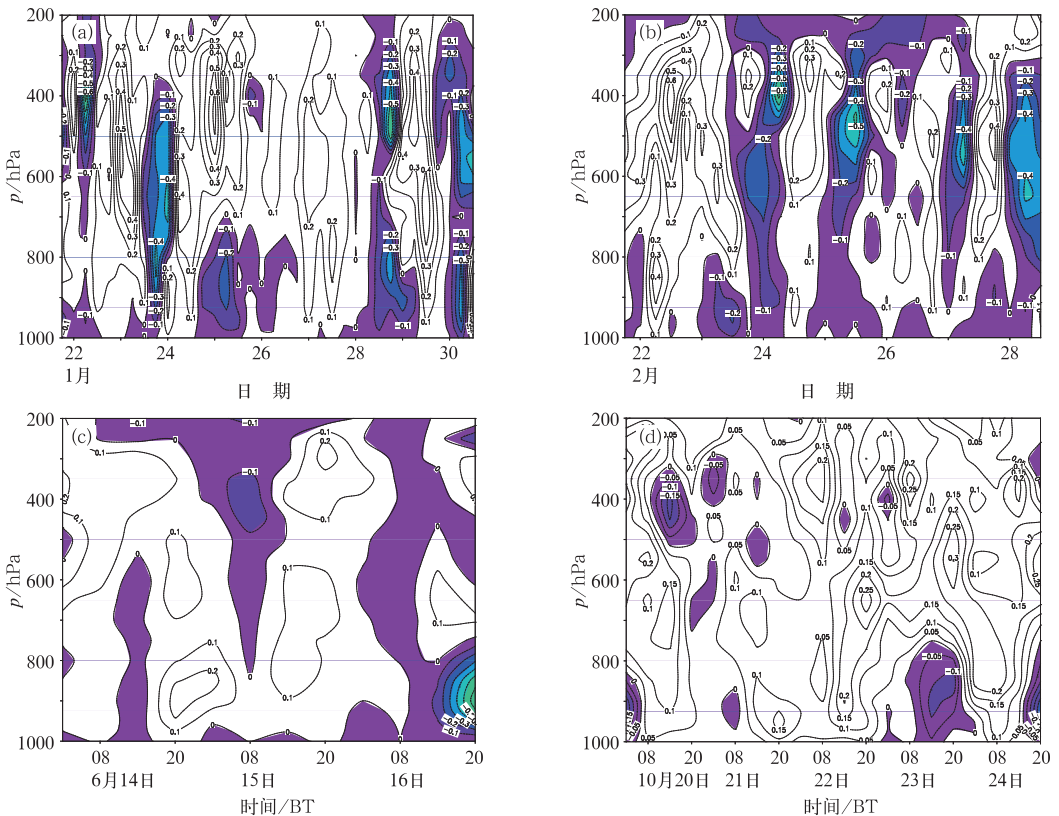


图 7 2013 年(a)1月 22—31 日、(b)2月 22—28 日、(c)6月 14—16 日和 (d)10月 20—24 日垂直速度的时间-高度剖面(阴影区为负值,单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 The time-height profiles of vertical velocity in (a) 22—31 January, (b) 22—28 February, (c) 14—16 June, (d) 20—24 October 2013 (Shadow area is negative values, unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )



## 7 结 论

本文对 2013 年徐州持续性霾过程进行了观测研究,通过对环流形势、气象要素、污染物浓度以及动力和热力条件等方面的深入分析,揭示了持续性霾天气的季节性特征及差异,结论如下:

(1) 秋、冬季的持续性霾过程,其环流形势符合秋、冬季霾天气的典型特征;而春、夏季霾天气的环流形势不稳定,在整层偏南气流、地面风场不是很弱的情况下也可以出现,这与秋、冬季常见霾天气的形势有所不同。

(2) 霾过程期间,夜间到早晨这段时间大多为雾;白天转化为霾。从各个季节来看,冬季雾-霾更容易较长时间维持;春、秋季能见度日变化较大,夜里到早晨能见度明显降低,白天能见度好转。春、夏季过程中风向、风速相对稳定,风速维持  $2\sim 3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风向为东到东南风,有利于近地面增湿;而秋、冬季,风向、风速都不太稳定,表现为夜间风小,接近静风,白天风速稍有增大,在  $3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  左右,风向也以偏北、偏东居多。

(3) 霾最严重时段,细颗粒物浓度处于峰值;春、秋季霾的强度不强,其污染程度也不超过中度级别。

(4) 秋、冬季出现霾时的层结稳定,具有明显的贴地层逆温结构,逆温层顶一般较低,春季逆温层顶要略高于秋、冬季,而夏季出现霾时可以是不稳定的层结,低层也不具备明显的逆温特征。

(5) 冬、夏季霾区上空多为微弱的上升运动,高度不高,其上为下沉气流;春、秋季夜间到早晨霾区上空多为下沉气流。

(6) 持续性霾过程中,空气上下层交换弱,有利于维持相对稳定的层结及污染颗粒物的积聚。低层弱上升运动与边界层的浅层抬升和暖平流相联系,易使霾天气出现并发展;边界层上的下沉运动有利于霾区上空稳定层结的建立和维持。在霾最严重的时段,上层的下沉运动也明显加强。一致的上升运动往往预示着霾的减弱或消散。

## 参 考 文 献

包云轩,丁秋冀,袁成松,等. 2013. 沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验. 大气科学, 37(1): 124-136.  
蔡子颖,韩素芹,吴彬贵,等. 2012. 天津一次雾过程的边界层特征研

究. 气象, 38(9): 1103-1109.  
曹伟华,梁旭东,李青春. 2013. 北京一次持续性雾霾过程的阶段性特征及影响因子分析. 气象学报, 71(5): 940-951.  
陈瑞敏,吴雁,康文英,等. 2014. 连续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.  
段培法,吴世明,李现锋. 2013. 徐州市霾的气候特征及气象条件分析. 环境科学与技术, 36(12): 113-126.  
高健,张岳翀,王淑兰,等. 2012. 北京 2011 年 10 月连续灰霾过程的特征与成因初探. 环境科学研究, 25(11): 1201-1207.  
过宇飞,刘端阳,周彬,等. 2013. 无锡市霾天气特征及影响因子研究. 气象, 39(10): 1314-1324.  
韩霄,张美根. 2014. 2013 年 1 月华北平原重霾成因模拟分析. 气候与环境研究, 19(2): 127-139.  
何立富,李峰,李泽椿. 2006. 华北平原一次持续性大雾过程的动力和热力特征. 应用气象学报, 22(4): 340-350.  
贾兴灿,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.  
李菲,吴兑,谭浩波,等. 2012. 广州地区旱季一次典型灰霾过程的特征及成因分析. 热带气象学报, 28(1): 113-122.  
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,杨军,等. 2009. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微生物结构及演变特征. 气象学报, 67(1): 147-157.  
刘端阳,濮梅娟,严文莲,等. 2014a. 淮河下游连续雾-霾及转换成因分析. 中国环境科学, 34(7): 1622-1632.  
刘端阳,魏建苏,严文莲,等. 2014b. 江苏省城市霾日的时空分布及成因分析. 环境科学, 35(9): 9-17.  
刘端阳,张靖,吴序鹏,等. 2014c. 淮安一次雾霾过程的污染物变化特征及来源分析. 大气科学学报, 37(4): 484-492.  
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.  
刘勇洪. 2014. 基于 NOAA/AVHRR 卫星资料的北京地 IK 霾识别研究. 气象, 40(5): 619-627.  
陆春松,牛生杰,杨军,等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏观结构的突变特征及成因分析. 大气科学, 34(4): 681-690.  
马翠平,吴彬贵,李江波,等. 2014. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象, 40(6): 715-722.  
齐冰,刘寿东,杜荣光,等. 2012. 杭州地区气候环境要素对霾天气影响特征分析. 气象, 38(10): 1225-1231.  
王跃思,姚利,王莉莉,等. 2014. 2013 年元月我国中东部地区强霾污染成因分析. 中国科学 地球科学, 44(1): 15-26.  
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. 2006. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 32(4): 9-15.  
吴兑. 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理. 环境化学, 27(3): 327-330.  
吴兑. 2011. 灰霾天气的形成与演化. 环境科学与技术, 34(3): 157-161.  
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的研究. 气象学报, 64(4): 510-517.  
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):1-9.
- 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙, 等. 2014. 环首都圈雾和霾的长期变化特征与典型个例的近地层输送条件. 环境科学学报, 34(1):1-11.
- 吴兑, 吴晓京, 李菲, 等. 2010. 1951—2005年中国大陆霾的时空变化. 气象学报, 68(5):680-688.
- 伍红雨, 杜尧东, 何健, 等. 2011. 华南霾日和雾日的气候特征及变化. 气象, 37(5):607-614.
- 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.
- 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.
- 严文莲, 濮梅娟, 王巍巍, 等. 2009. 一次罕见的辐射-平流雾研究(I)——生消物理过程分析. 气象科学, 29(1):9-16.
- 杨军, 王蕾, 刘端阳, 等. 2010. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 68(6):998-1006.
- 杨欣, 陈义珍, 刘厚凤, 等. 2014. 北京2013年1月连续强霾过程的污染特征及成因分析. 中国环境科学, 34(2):282-288.
- 姚青, 韩素芹, 蔡子颖. 2012. 天津一次持续低能见度事件的影响因素分析. 气象, 38(6):688-694.
- 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.
- 张恒德, 饶晓琴, 乔林. 2011. 一次华东地区大范围持续雾过程的诊断分析. 高原气象, 30(5):1255-1260.
- 张礼春, 朱彬, 耿慧, 等. 2013. 南京一次持续性浓雾天气过程的边界层特征及水汽来源分析. 气象, 39(10):1284-1292.
- 张人禾, 李强, 张若楠. 2014. 2013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.
- Liu D Y, Niu S J, Yang J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing, Part 1: Fog boundary layer. Pure Appl Geophys, 169(5):809-819.
- Liu D Y, Pu M J, Yang J, et al. 2010. Microphysical structure and evolution of four-day resistant fog event in Nanjing in December 2006. Acta Meteor Sin, 24(1):104-115.
- Liu D Y, Yang J, Niu S J, et al. 2011. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing. Adv Atmos Sci, 28(1):223-237.
- Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing, Part 2: Fog Microphysics. Pure Appl Geophys, 169(5):1137-1155.