

江苏秋冬季重度霾的分型研究^{* 1}

戴竹君¹ 刘端阳² 王宏斌³ 魏建苏² 姜有山¹

DAI Zhujun¹ LIU Duanyang² WANG Hongbin³ WEI Jiansu² JIANG Youshan¹

1. 南京市气象局, 南京, 210019

2. 江苏省气象台, 南京, 210008

3. 江苏省气象科学研究所, 南京, 210009

1. *Nanjing Meteorological Bureau, Nanjing 210019, China*

2. *Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008, China*

3. *Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009, China*

2015-07-17 收稿, 2015-11-20 改回.

戴竹君, 刘端阳, 王宏斌, 魏建苏, 姜有山. 2016. 江苏秋冬季重度霾的分型研究. 气象学报, 74(1):133-148

Dai Zhujun, Liu Duanyang, Wang Hongbin, Wei Jiansu, Jiang Youshan. 2016. The classification study of the heavy haze during autumn and winter of Jiangsu. *Acta Meteorologica Sinica*, 74(1):133-148

Abstract By analyzing the conventional observation data, sounding data and reanalysis data of NCEP/NCAR, the circulation background, boundary layer characteristics, dynamic conditions, thermal conditions and the airflow trajectory of the heavy haze in Jiangsu Province during autumn and winter of 2014 are discussed. The results show that zonal circulation at 500 hPa was of more straightly west or northwest airflow. The airflow at 500 hPa changed to the northwest can be an indicator that heavy haze will disappear in 6 to 12 hours later. The main surface situations were uniform pattern of pressure, cold front and inverted trough with low pressure. The surface situation changed when heavy haze occurs. Just before cold front coming, the haze was heaviest. The east path of cold air was more effective for eliminating haze than the middle or western path. In most of the heavy haze days, the bottom of the temperature inversion was near the ground. Lower wind speed of less than 4 m/s was shown to be favorable for the development of haze. The daily variation was obvious with the haze mitigated in the afternoon. As the intensity and duration of temperature inversion are concerned, the inverted trough type was stronger than the cold front west path type, both of them were stronger than the uniform pressure type. But the three types were almost the same in terms of the thickness of inversion.

Different types show different inversion intensity, which may be related to the prefrontal temperature enhancement and wind speed on 925 hPa and near ground, as well as air sources. The height of inversion layer is mostly under 300 m, with the intensity of temperature inversion for every hundred meters between 1 to 5°C, and higher relative humidity of greater than 40% and less than 90% were shown to be favorable for the development of haze. Underlying sink motion provided a favorable dynamic condition for haze, and, weak upward motion at 850 hPa was conducive to the upward development of haze. By using backward trajectory simulation, it is shown that the pollution for the uniform pressure type was mainly from the local emissions, cold front pollutants were from the northwestern or north China and transmitted over a long distance, and, the pollution for the type of inverted trough with low pressure mainly from the southern China. By studying the characteristics of heavy haze during autumn and winter of Jiangsu, meaningful results are obtained, which can provide more references for the future forecast.

^{*} 资助课题: 江苏省自然科学基金(BK20130111)、江苏省气象局重点项目(KZ201405)、江苏省省级环保科研课题(2014021)、国家科技支撑计划项目(2014BAC22B04)、江苏省气象局预报员专项(JSYBY201604)、南京市气象科研开发项目(NJ201503)、江苏省科技支撑计划项目(BE2014734)。

作者简介: 戴竹君, 主要从事天气分析及数值模拟研究. E-mail: daizhujun99@163.com

通讯作者: 刘端阳, 主要从事大气物理与大气环境研究. E-mail: liuduanyang2001@126.com

Key words Heavy haze, Boundary layer, Inverted trough with low pressure, Dynamic and thermal conditions

摘要 利用常规观测资料、探空资料和 NCEP 再分析资料对江苏秋冬季重度霾的环流背景、边界层特征、热力条件、动力条件及气流轨迹进行了分析,探讨重度霾的形成机制。结果表明,2014 年秋冬季纬向环流较常年显著增强,500 hPa 转西北气流对重度霾缓解有 6—12 h 的提前指示意义。重度霾发生时的地面形势可分为 3 类:均压区型、冷锋前部型和低压倒槽型。东路冷空气驱霾效果优于西路冷空气。重度霾发生时主要是贴地逆温,风速在 4 m/s 以下,霾消散前一致转北风,日变化明显,下午霾常有所减轻。逆温强度方面,低压倒槽型强于西路冷锋前部型,强于均压区型;逆温持续时间方面,低压倒槽型长于西路冷锋前部型,长于均压区型;逆温厚度方面,3 种类型基本相当;东路冷空气影响时逆温消失。不同类型逆温强度不同可能与 925 hPa 和近地面的风向风速、锋前升温及气团源地有关。逆温层多在 300 m 以下,逆温强度为 1—5 °C/(100 m),近地层有浅薄湿区,相对湿度为 40%—90%。动力条件方面,低层辐合下沉区域霾常加重,并伴有明显气流停滞区,区域过程累积风矢量和很小,在 100—500 m/s 范围内,不利于污染物的水平扩散。冷锋前部型气流输送的气溶胶主要来源于西北—华北地区,低压倒槽型则主要来自华南,均压区型主要来源于本地。通过研究江苏秋冬季重度霾的天气特征得到了一些有意义的结果,可为今后预报提供更多参考依据。

关键词 重度霾, 边界层, 低压倒槽, 动力与热力条件

中图法分类号 P458

1 引言

随着城市化进程的加快和经济的迅速发展,能见度恶化事件频发,霾日发生频率呈现增多趋势(丁一汇等, 2014),都市霾成为一种常见的现象(吴兑, 2006)。国际上有学者从 20 世纪便开始关注霾,并且进行了很多研究探讨(Elridge, 1966; Miller, et al, 1972; Weiss, et al, 1977; Husar, et al, 1981, 1993; Ferman, et al, 1981; Wolff, et al, 1982; Sloane, 1982, 1983, 1984; Baik, et al, 1996; Radojevic, et al, 1999)。中国专家在 21 世纪初开始关注霾并对中国城市霾进行了许多深入探讨(张立多等, 2007; 廖玉芳等, 2007; 陈训来等, 2008; 高歌, 2008; 蒋珍姣等, 2009; 吴兑, 2012; 刘端阳等, 2014a; 傅瑜等, 2015)。霾已经成为中国东部城市群区域的一种灾害性天气现象(吴兑等, 2010; 宋连春等, 2013)。江苏省位于中国东部,也是中国经济最发达的地区之一,近年来重度霾天气频繁发生。霾的危害有很多,如使空气质量下降、能见度恶化、诱使呼吸道疾病、影响气候变化等(吴兑, 2008)。在不考虑轻微霾的情况下,中国气象局(2010)根据霾日的能见度将霾分为 3 个等级,3—5 km 为轻度霾,2—3 km 为中度霾,2 km 以下为重度霾。霾的等级越高,对于交通及健康的影响就越大。

霾的发生受天气影响很大,风速、风向、温度、大气稳定度、混合层厚度等边界层特征和区域气候及天气背景等大尺度天气特征,均对能见度恶化产生

显著影响(吴蒙等, 2014)。吴兑等(2010)分析了中国 1951—2005 年霾的时空变化特征,发现中国东部霾日具有逐年增多的趋势。张蓬勃等(2012)从年代际角度分析了江苏秋季霾的变化特征,发现近 50 年来大气净化次数显著减少。周宁芳等(2008)探讨中国 2006 年冬半年霾发生的环流特征时指出,霾主要发生在纬向型、南支槽和中阻塞 3 种形势下。任阵海等(2008)通过对夏秋季节边界层大气污染的研究指出,高压均压场有利于污染物累积。陈丽芳(2012)对比分析了杭州市霾天气和清洁过程,结果表明大陆高压控制易产生霾,而副热带高压控制易出现清洁天气。刘梅等(2014)在研究 2013 年 1 月江苏雾、霾天气时发现中高纬度平直的纬向环流、冷高压主体偏北是发生的环流背景。饶晓琴等(2008)对中国中东部一次大范围霾的研究表明,逆温层结和前倾槽结构为霾的形成提供了有利气象条件。陈训来等(2007)、吴兑等(2008)以及陈欢欢等(2010)指出,珠江三角洲的灰霾过程与气流停滞区密切相关,污染物易积聚在边界层内,从而造成霾天气。童尧青等(2007)认为,较高相对湿度和静小风有利于南京地区霾的出现。

大气边界层作为重度霾发生的直接外因,具有复杂多变性。关于霾发生时边界层特征的研究近年来也颇多。Peng 等(2016)研究了 1980—2012 年淮河以南区域性连续霾和重度霾的边界层气候特征。吴振玲等(2009)研究表明,边界层热力变化和垂直动力影响污染物的浓度变化。张鑫等(2006)、俞剑

蔚等(2009)、张浩等(2010)、张雪玲等(2011)、朱佳雷等(2011)、刘端阳等(2014b)研究霾发生时的边界层特征后认为,微弱的低空风、较弱的大气湍流、稳定的大气逆温结构等是有利霾发生、发展的气象条件。如果说气象条件是霾产生的外因,那么污染物排放则是内因。Wu等(2006,2009)指出,灰霾的本质就是细粒子气溶胶的污染。刘梅等(2014)发现当出现严重霾时,污染物的浓度也会明显增大。杨卫芬等(2010)、魏玉香等(2009a,2009b)分析了南京地区灰霾天气下的污染物特征及污染物来源。

上述研究或侧重于气候学方法,或侧重于霾个例的天气特征分析,对于重度霾进行分型示范的研究尚少,对于不同类型重度霾的天气形势、边界层特征及其量化指标的研究则更为少见。2014年秋冬季江苏多次出现重度霾天气,给人体健康和交通均造成严重影响。本研究首先对2014年秋冬季发生的重度霾过程及其环流背景进行综合分析,再根据地面形势进行分型示范,并分别讨论各类型下的天气特征,以期为今后重度霾预报提供依据。

2 资料和方法

所用资料共6个部分:(1)常规观测资料,主要为江苏70个市(县)气象站2014年9月—2015年2月器测能见度、相对湿度和日天气现象资料(图2、8)。(2)江苏省环境保护局提供的空气质量指数(Air Quality Index,AQI)、 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 等环境监测指标数据(图2、4)。(3)中国国家气候中心气候系统诊断预测室的环流指数数据(图1)。(4)徐州、南京、射阳这3个江苏探空站的温度和湿度数据(图6)。(5)用来进行物理量诊断的再分析资料,一是NCEP/NCAR每日1次的NC资料,空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ (图3);二是NCEP每日4次的FNL资料,空间分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ (图5、7)。(6)采用美国国家海洋及大气管理局(NOAA)开发的后向轨迹模式HYSPLIT4.8及NOAA的GDAS全球同化数据分析其后向轨迹特征(图9)。

对于霾的定义,采用与吴兑等(2008)提出方法相似的标准(不考虑轻微霾),在1d内,当连续出现6个时次满足能见度 <5.0 km,相对湿度 $<90\%$,排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘等天气现象,可认定为霾日。以20时(北京时,下同)为日界,如果有4h或

以上在20时以后,则判定为20时以后作为霾日,如果有不少于3h在20时以前,则判定20时以前作为霾日。如果同一日有紧连的不少于3个城市都出现了(重度)霾,则记为江苏省范围内出现了(重度)霾。

采用吴兑等(2008)提出的方法,对近地层风求一定范围一段时间内的矢量和,以便更清晰地了解江苏近地层空气流动的总合效果,从而更直观地分析近地层风对重度霾的影响。近地层风的矢量和分布是一定范围内过程小时累积的风矢量和分布,其具体方法是,首先分别对自动气象站逐时风资料进行客观分析,即先把逐时 u 、 v 分量的原始资料经Cressman逐步订正法插值到网格点上,分析范围为 $(30.8^{\circ}—35.15^{\circ}N, 116.35^{\circ}—122.0^{\circ}E)$,网格分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,分析过程中风场资料经过基本资料预处理,去除野点后再分别对每个网格点上的逐时 u 、 v 资料按照吴兑的方案做5点求和作为每个格点上周围小区域内的水平空间矢量和,最后将每个网格点上小时累积的水平空间矢量和再进行求和,成为风的小时累积时数内水平空间矢量和。矢量和分布中的每一个风矢代表累积时数内江苏地区空气流动的总合效果。

3 2014年秋冬季霾概况

以70个自动站数据计算各月平均霾日:9月4.7 d,10月4.5 d,11月13.1 d,12月12.4 d,1月19.4 d,2月12.2 d。表1为2014年9月—2015年2月江苏省13个市月霾日分布,可见2015年1月最为严重,而2014年9、10月霾日较少,总体来看沿海城市少于内陆城市,冬季霾日多于秋季。

此期间江苏省范围内的重度霾过程共发生了10次,均出现在冬季11月—次年2月。其中,11月出现2次,12月2次,1月4次,2月2次,10次过程中有4次是纯霾,5次是雾和霾交替出现。霾持续时间最长的过程出现在1月,连续5d出现霾,期间有60h出现了全省范围的重度霾;重度霾维持时间最短的过程出现在11月和2月,仅2h。范围最大的过程发生在1月,同一天江苏省13个市均出现重度霾,并且西部地区更为严重;范围最小的过程发生在11、12月,1d中仅3个市出现重度霾。能见度与

相对湿度的演变呈现显著负相关,以徐州站为例,两者相关系数高达 -0.77 。重度霾频繁发生,研究其

天气学特征有非常重要的意义。那么发生重度霾的环流背景是怎样的呢?

表1 江苏13个市霾日(单位:d)
Table 1 The haze days distribution for the 13 cities in Jiangsu Province (unit: d)

城市	2014年9月	2014年10月	2014年11月	2014年12月	2015年1月	2015年2月
南京	7	6	14	8	23	13
徐州	8	10	21	17	22	15
连云港	3	5	14	19	19	13
宿迁	1	2	12	9	14	7
淮安	4	3	10	19	19	16
盐城	1	3	9	12	14	11
扬州	8	5	11	12	20	17
泰州	3	3	12	15	17	12
南通	0	2	12	7	19	8
镇江	10	6	18	11	20	16
常州	10	7	20	17	22	17
无锡	11	7	18	18	24	15
苏州	9	9	18	20	24	19

4 重度霾发生的环流背景

4.1 大尺度环流背景

大尺度环流背景影响到气压场和流场,从而对重度霾的形成、维持产生重要影响。吴兑等(2008)研究表明,在纬向环流不显著的年份,气流南北交换较显著,冷空气活跃,伴随冷空气而来的大风有利于污染物扩散;反之,在纬向环流显著的年份,气流南北交换较弱,污染物易堆积。图1为2014年9月—2015年2月亚洲纬(经)向环流指数序列,可见除2014年12月外,其他时段的纬向环流均为与常年显著增强,而亚洲环流指数经向度则与常年持平或有所减弱,可见冷空气南下到达江苏的机会较少,重度霾易于形成。

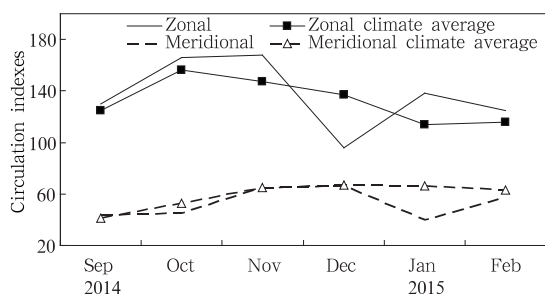


图1 亚洲纬向和经向环流指数序列
及纬向、经向气候平均

Fig. 1 Series of zonal and meridional circulation indexes for Asia, as well as the zonal and meridional climate average from September 2014 to February 2015

4.2 500 hPa 高空形势

在10次重度霾过程发生时,500 hPa上均为平直的偏西或西北气流,并且都在霾消散前6—12 h内出现了风向转变,转为西北风。例如,2014年12月28日500 hPa维持偏西气流,29日02时500 hPa转为西北风,29日10时江苏省内重度霾减轻为轻—中度霾;2014年12月30日14时,500 hPa为偏西气流,中纬度地区环流较平直,冷空气势力较弱,易形成均压场,处于静风稳定条件,有利于重度霾维持,而至12月31日02时,500 hPa转为西北气流,31日10时能见度开始转好(图2),霾天气得以缓解。可见500 hPa转西北气流,高空动量将下传,加剧湍流,近地面风力随之增大,对重度霾缓解有一定指示意义,提前时效为6—12 h,因此,对重度霾日高空形势的分析应关注重度霾出现前一日高空形势场的演变特征。

4.3 地面形势

通过对2014年秋冬季出现的10次重度霾过程的地面形势分析,发现江苏出现重度霾的地面形势场主要可分为3类:均压区型、冷锋前部型和低压倒槽型(图3)。这与彭华青等(2014)针对苏南地区的研究结果基本一致。(1)均压区型,该型大多是由于冷空气较弱,气压梯度和风速均较小;(2)冷锋前部型,由于北方冷空气的强势推进,江苏处于冷锋前部;(3)低压倒槽型,该型是由于前期受弱高压影响,后期随着弱高压逐渐减弱,江苏处于地面倒槽的顶部。其中,均压区型和冷锋前部型是冬季重度霾

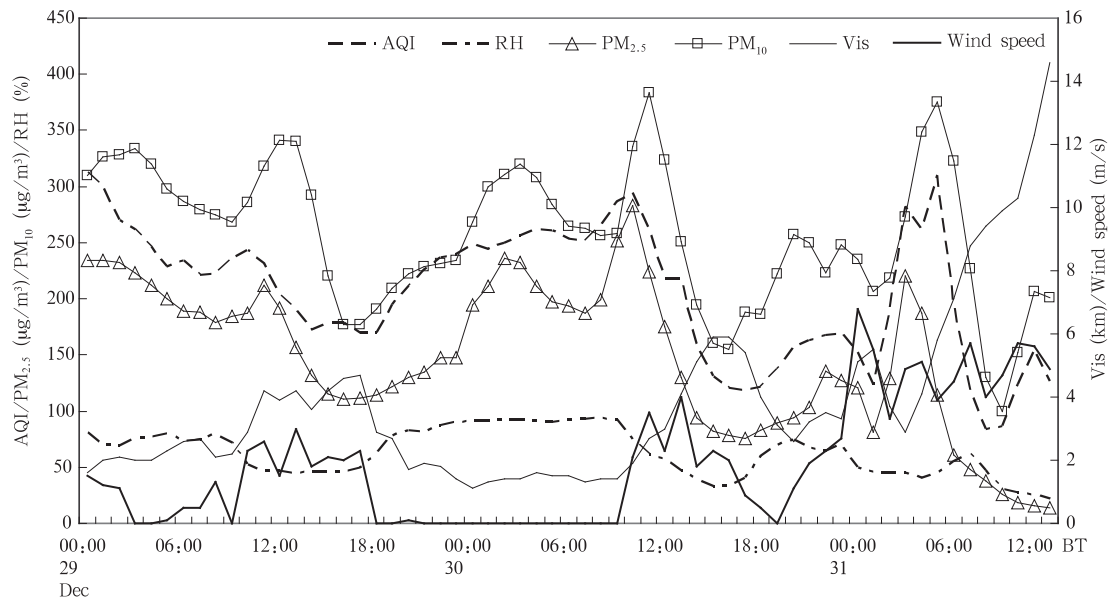


图2 2014年12月29日00时—31日12时徐州站逐时能见度、相对湿度、空气质量指数(AQI)、风速、PM_{2.5}及PM₁₀浓度

Fig. 2 Visibility, relative humidity, AQI, wind speed, PM_{2.5} and PM₁₀ per hour from 12:00 BT 29 December to 12:00 BT 31 December 2014 for the Xuzhou station

的主要地面形势,而低压倒槽型仅出现2次,并且维持时间较短,为1—2 d。此外,重度霾出现的地面形势不是一成不变的,大多是两种以上类型的转变,前期主要为均压区型,后期转为冷锋前部型或者低压倒槽型。

以霾程度和地面形势场作为参考指标选取典型个例,并加以对比分析。从满足这3类地面形势的过程中挑选出霾最严重的个例,分别为2014年12月27—31日、2015年1月3—4日、7—11日,这3次过程均满足在同一日有不少于9个城市出现重度霾,日均能见度为2.3—8.5 km,最小能见度为200 m,最大能见度11.7 km。研究这3次过程有助于对比分析3种类型下的天气特征。

5 3次典型重度霾过程气象成因和维持机制

5.1 气象要素分析

3次典型过程中,2014年12月27—31日和2015年1月7—11日霾程度较重、持续时间较长(均超过3 d,表2),给交通和人体健康造成非常大的影响,而2015年1月3—4日的这次过程虽然持续时间不长,但在短时间内就达到了重度霾,研究这3次过程对于今后进行重度霾的预报有指导意义。

3次重度霾过程在不同的阶段都有不同的地面形势,2014年12月27—31日为均压区型转为冷锋前部型(西路),2015年1月3—4日为均压区型转为低压倒槽型,2015年1月7—11日则为前后经历了3次冷空气过程,但是前两次冷空气并未使得霾消散,反而加重了霾,直到第3次东路冷空气南下,持续4 d的重度霾才得以缓解。

对比3次过程的气象要素(表2),发现有如下特征:(1)地面形势,前期主要均为均压区型,后期转为冷锋前型或者低压倒槽型。(2)根据冷高压中心的气压值及24 h内的降温幅度,可见2015年1月7日冷空气弱于1月11日的东路冷空气,弱于2014年12月27—31日的西路冷空气,弱于2015年1月10日的西路冷空气,后面将详细对比东、西路冷空气对重度霾的影响。(3)500 hPa 风向,3次过程的前期均为一致偏西风,在后期均转为西北风。(4)雾、霾混合时段多出现在20时至第二天09时,霾减轻时段在午后,下午由于太阳辐射,午后湍流发展旺盛,混合层高度升高,霾程度有所减轻。(5)霾维持时间上,除了低压倒槽型维持时间较短外,其他两次过程都持续3 d以上。(6)重度霾发生时出现频率最多的风向,均压区型常出现静风或者风向不稳定,冷

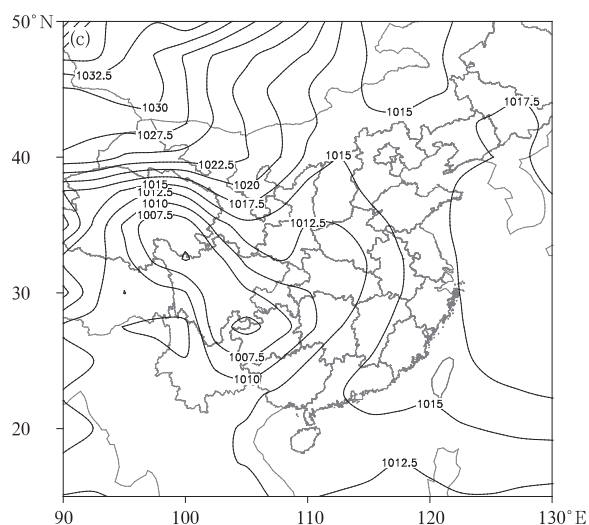
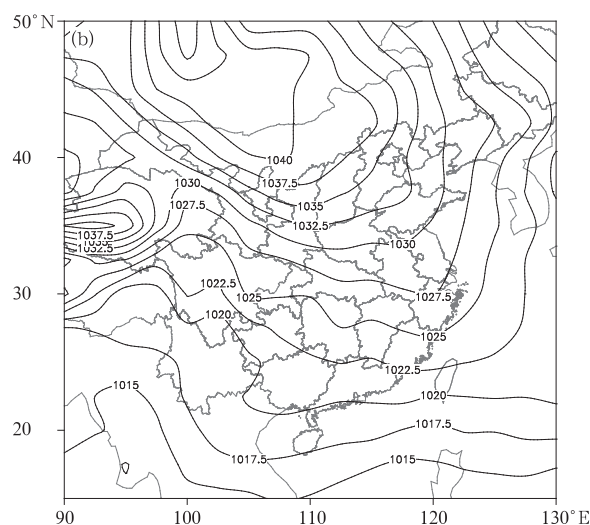
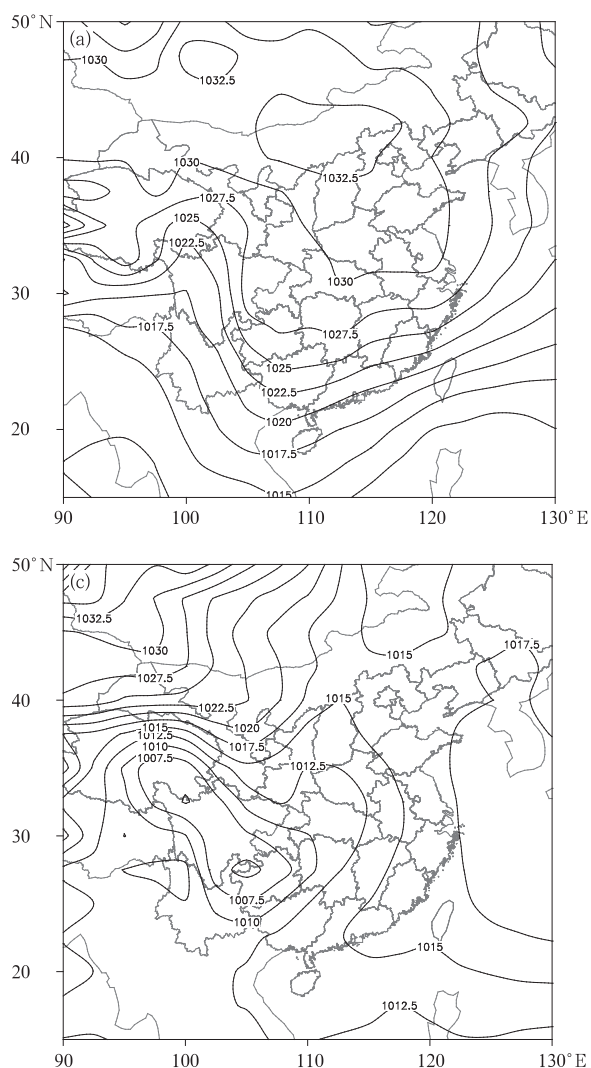


图3 重度霾发生时的3类地面形势(单位:hPa)

(a. 2014年11月17日均压区型,
b. 2014年12月24日冷锋前部型,
c. 2015年1月4日低压倒槽型)

Fig. 3 Three type of surface situations when heavy haze occurred (unit: hPa) (a. uniform pressure on 17 November 2014, b. cold front on 24 December, 2014, c. inverted trough with low pressure on 4 January 2015)

锋前型为西南风,低压倒槽型为东风。(7)霾维持时风速过大会破坏稳定层结,不易发生重度霾,因此,霾最严重时的3 h 变压很小,风速也很小,为0—4 m/s,一直到霾消散前才有所增大,可见小风有利于霾维持。(8)霾消散前风向一致转为北风。(9)霾消散前3 h 变压绝对值也有所增大,低压倒槽型是负变压,冷锋前型为正变压;(10)霾消散前风速明显增大。(11)污染方面,这3次过程都达到了重度污染,由于天气形势不同,污染清除的原因也不同,第1次主要是由于西路冷空气北风驱散,第2次是东北风结合雨雪湿沉降,第3次是东路冷空气东风驱散。对比这3次过程污染的清除效果和清除时间,不难发现,东路冷空气的驱散效果略胜一筹,很多站点空气质量达到了优,并且污染清除时间只需2 h,而其他两次过程污染的清除都需要半天以上。

以上分别讨论了霾和污染,那么重度霾和重度污染的变化是同步的吗?以2014年12月27—31日的均压区转冷锋前型过程为例来探讨,由图2可知,能见度与 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 的变化基本一致,并且都有日变化,下午霾和污染都有所减轻,这可能由于气温升高,相对湿度降低,此外,午后湍流发展旺盛,混合层高度升高,能见度亦有所好转。当受中路或西路冷空气影响时,霾和污染的一致性将被打破。受31日00时冷空气影响,西北风增大,能见度随之好转,霾逐步消散;但西北风增大却使得 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 不降反升,污染反而加重,5—6 h后,才逐步缓解,出现这种现象可能有2种原因:一是北方冷空气往往比较干燥,此时,即使 $PM_{2.5}$ 浓度较高,能见度也不会很低;二是,从北方输送来的颗粒物尺度较大, PM_{10} 浓度上升,空气质量指数上升,但能见度不一

定下降。无论哪种情况,在中路或者西路冷空气到来之前都有颗粒物输送,因此,污染往往较重。此外,相对湿度与能见度成显著反相关(相关系数

-0.79),可见湿度对于重度霾非常重要,主要是由于气溶胶粒子吸湿增长(李菲等,2012),导致消光系数增加,致使能见度恶化,霾加重。

表2 3次典型重度霾过程要素对比
Table 2 The elements' comparison among the three typical heavy haze events

	2014年12月27—31日	2015年1月3—4日	2015年1月7—11日
地面形势	均压区+冷锋前型	均压区+低压倒槽型	均压区+冷锋前型 (三次:7日弱冷空气渗透,10日西路冷空气,11日后东路冷空气)
最低能见度(m)/出现时间 城市/对应湿度(%)	200/30日17时 宿迁/51%	500/4日9时 南通/78%	400/11日19时 南通/82%
冷高压中心气压值(hPa)	1050	/	7日1032.5,10日1050 11日1040
24h内降温幅度	9—10℃	7—8℃	7日7—8℃,10日11—13℃, 11日9—10℃
500hPa风向		前期偏西风,霾消散前6—12h转为西北风	
雾和霾交替出现时间段	29日20时—30日08时	4日上午 午后	10、11日00—09时
霾减轻时段			
霾持续时间(h)	80—90	10—12	90—100
重度霾发生时出现频率最多的风向	C/SW	E	C/SW
霾最严重时3h变压(hPa)		-1—1	
霾消散时风向	N	EN	ENE
霾消散时3h变压(hPa)	+3—5	-3—4	+3—5
风速范围(m/s)	前期0—4.3,霾消散前9.8	前期0.6—4.2,霾消散前6.8	前期0.6—4.4,霾消散前7.3
污染强度		重度污染	
污染清除原因	西路冷空气北风吹	东北风+雨雪湿沉降	东路冷空气东风吹
污染清除效果	良	良	优—良
污染清除时间(h)	6	8—12	2

从风速的变化曲线(图2)可以看出,30日20时之前,近地面风速较小,有利于霾发展;30日20时之后,由于500hPa转为西北风,近地面风速也随之明显加大,能见度好转,缓解霾。进一步对比30日20时之后,PM₁₀、PM_{2.5}浓度和风力的关系,发现存在两点滞后性:

(1)西路冷空气影响时(30日20时),污染物浓度的下降和风速增大存在滞后性。风速增大后,PM₁₀和PM_{2.5}浓度不降反升,颗粒物的下降较风速增大滞后3—6h;但当东路冷空气影响时,PM₁₀和PM_{2.5}浓度伴随风速的增大而同步下降(图略)。

(2)西路冷空气影响时(30日20时),PM₁₀浓度的下降比PM_{2.5}滞后2—3h,这可能是由于北方输送过来的主要是大颗粒物;但当东路冷空气影响时,风速增大后,PM₁₀和PM_{2.5}浓度基本是同步下降,这可能是由于东路冷空气相对洁净。

2015年1月7—11日这次重度霾过程也是均

压区型和冷锋前型交替出现,但不同于2014年12月27—31日,期间受到3次冷空气影响,分别是1月7日北方弱冷空气渗透,10日西路冷空气以及11日夜里的东路冷空气。虽然期间多次受冷空气影响,但是7日和10日的冷空气都没能缓解霾天气,7日的弱冷空气渗透反而导致8日出现霾,并且,8日苏南地区较江苏省内其他城市污染更重(图4a),10日的西路冷空气亦使得霾加重,污染也随之加重(图4b),直到11日夜里的东路冷空气南下,持续4d的重度霾才得以缓解,空气质量同时转为优—良(图4c)。那么,为何7日冷空气渗透和10日西路冷空气都没能缓解霾天气?为何8日苏南地区较江苏省内其他地区污染更重?11日后期的东路冷空气优势在哪里?

进一步分析形势场、风场以及垂直扩散条件,发现7日冷空气强度弱,冷空气强度未能完全破坏底层相对稳定的层结,而且,由于7日位于江苏西北部

的山东、河北、河南等地是轻—中度污染,部分地区甚至达到重度污染(图略),因此弱的西北风反而将西北部的污染物输送至江苏,并且由于风速只有0—3 m/s,污染物在江苏滞留,导致8日出现霾。而苏南地区污染较省内其他地区更重的原因有两个:一是近地层有 $1.5^{\circ}\text{C}/(100\text{ m})$ 的弱逆温;二是有弱西北风在苏南辐合。8日08时,江苏省内大部分地区转为偏西风或偏南风,虽风力很弱,但由于江苏西南部的空气质量好,相对洁净,污染得以缓解;而苏南依然是弱西北风辐合处,此时江苏西北部地区污染更重,西北风继续将上游污染物输送至苏南,污染持续累积。因此,当冷空气势力较弱,风速较小时,需关注风向和上游污染情况,污染较重常出现在风向、风速辐合处和逆温区。

1月10日的西路冷空气使得霾进一步加重的原因有两点,一是污染输送,受前期本地污染累积和西路冷空气扩散过程中区域污染输送共同影响,污

染物累积;二是10日西路冷锋前部有一个低值系统,这个低值系统对西路冷空气有抵消作用,使得冷空气南下时近地面风速增强不明显。

1月11日后期冷空气优势在于其是一支东路冷空气,虽然只有中等强度,近地面风速略有增大,下午位于江苏西北角的连云港市的东—东北风风速增至7—8 m/s,但是东路冷空气会带来洋面清洁空气,持续4 d的污染在2 h内就得以清除,霾很快消散(图4c)。将2015年1月11日后期东路冷空气与2014年12月27—31日以及2015年1月10日的西路冷空气对比,由于东路冷空气带来的是洋面上清洁的空气,即使冷空气不强,但清除效果仍优于同等强度的西路冷空气。

因此,冷空气的路径对于重度霾的缓解影响很大,冷空气的源地非常关键,在今后进行霾预报过程中不仅要关注冷空气强度,还需关注冷空气路径、冷空气影响时的风向,以及是否有低值系统影响。

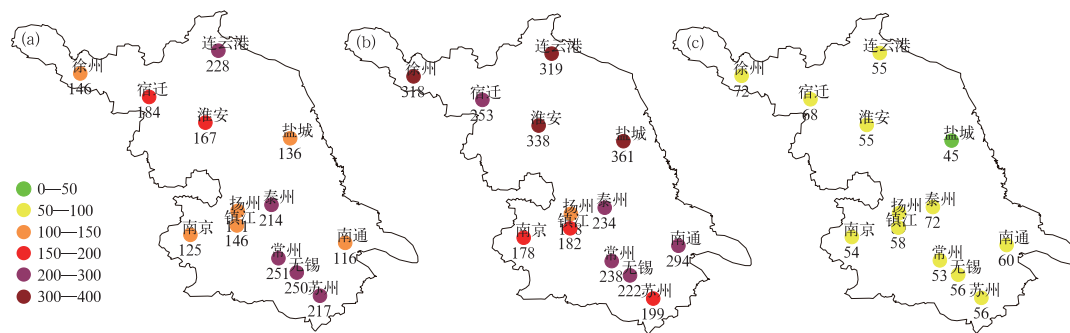


图4 2015年1月8日08时(a)、10日08时(b)及12日08时(c)空气质量指数分布

Fig. 4 AQI distribution at (a) 08:00 BT 8 January 2015, (b) 08:00 BT 10 January 2015 and (c) 08:00 BT 12 January 2015

5.2 热力条件

逆温层对对流有强烈的抑制作用,逆温的存在阻挡了动量下传(陆春松等,2010),造成大量水汽和气溶胶粒子聚集在逆温层下面,颗粒物吸湿增长膨大,降低地面能见度,有利于形成霾。为对比分析3次重度霾天气的层结状况,采用逐日4次的FNL资料($1^{\circ}\times 1^{\circ}$)绘制了温度层结时序图(图5)。图5a为第1次过程,均压区型转冷锋前型,12月27—29日江苏处在均压区控制下,逆温层位于925 hPa以下,逆温强度不大,逆温层浅薄,30日开始江苏转为处在冷锋前部,逆温层升至900 hPa以下,较均压区型的逆温更强、更厚。图5b为第2次低压倒槽型重度

霾过程,逆温顶高位于925 hPa(南京站和苏州站)或900 hPa(徐州站)以下,逆温层厚度与均压区型和冷锋前型相当,但逆温强度明显强于冷锋前型,且逆温维持的时间更长。图5c为第3次重度霾过程,1月9日位于均压区控制,逆温不明显,10日后期转为位于西路冷锋前部,此时南京和徐州站在900 hPa以下都出现了明显的锋前逆温,11日后期转受东路冷空气影响,逆温消失。以徐州站为例,对比逆温(图5a)与能见度(图2)的时间变化特征,发现当逆温维持时能见度偏低,逆温消失后能见度明显好转,对比另外两次过程也有类似的现象,可见逆温对于霾的维持有重要意义。

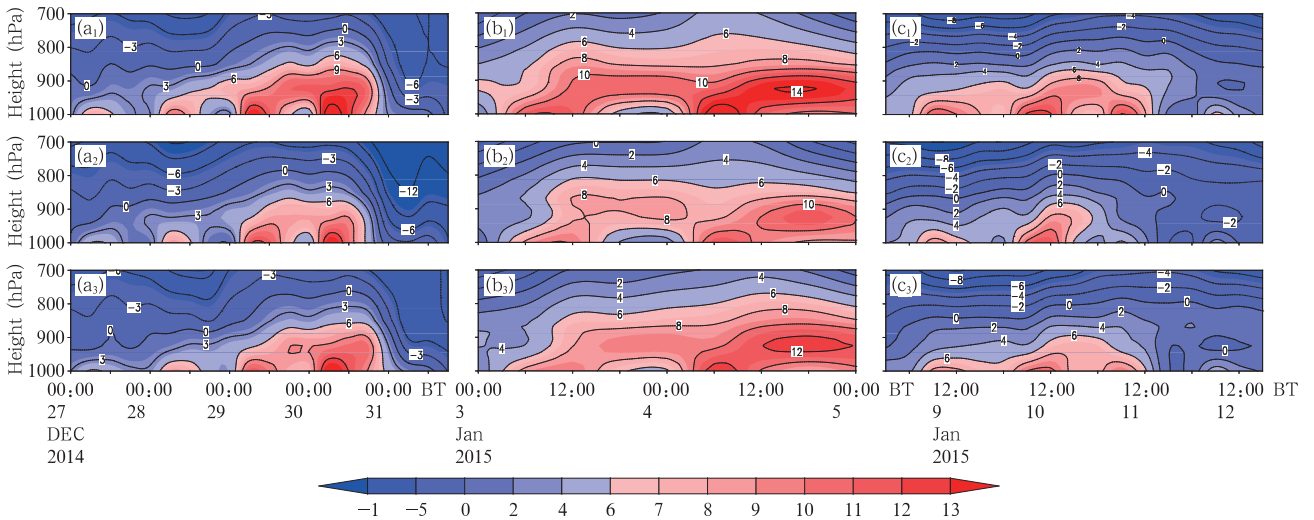


图5 2014年12月27日08时—2015年1月1日02时(a),3日08时—5日08时(b),9日02时—13日02时(c)3次重度霾过程的气温-时间-高度剖面(单位:℃)(a₁—c₁. 南京, a₂—c₂. 徐州, a₃—c₃. 苏州)

Fig. 5 Height-temporal cross sections of temperature for the 3 cities from the three haze events;

(a) from 08:00 BT 27 to 02:00 BT 1 January 2015, (b) from 08:00 BT 3 to 08:00 BT 5 January 2015 and (c) from 02:00 BT 9 to 02:00 BT 13 January 2015 (a₁—c₁. Nanjing, a₂—c₂. Xuzhou, a₃—c₃. Suzhou)

为了定量、细致地分析3种类型的逆温和湿度情况,采用了时空分辨率更高的探空资料,分别选取3次过程霾最严重的时间点来详细分析近地层逆温、湿度、风场。图6a、e、i为2014年12月29日08时西路冷锋前型对应的温、湿廓线,图6b、f、j为2015年1月4日08时低压倒槽型,图6c、g、k为1月8日08时均压区型。对比发现3种类型的共同点是:均为贴地逆温,逆温层顶在300 m以下,逆温强度为1—5℃/(100 m),并且近地层有浅薄湿区,湿度范围为40%—90%,近地层风速小,并在逆温层顶附近风速达到极小值。3种类型的不同点主要在逆温强度上,低压倒槽型(4.5℃/(100 m))强于西路冷锋前部型(3.5℃/(100 m))强于均压区型(2℃/(100 m)),与图5结论一致。因此,今后在霾的预报业务工作中需更多地关注近地面等温线,逆温常伴随霾的加重。图6d、h、l为1月11日20时东路冷空气渗透,可见整层均为一致偏东风,并且近地面风力明显增大,逆温被破坏,可见东路冷空气影响时逆温很快消失。

综上所述,逆温强度上,低压倒槽型强于西路冷锋前型,强于均压区型;逆温持续时间上,低压倒槽型长于西路冷锋前型,长于均压区型;逆温厚度上,3种类型基本相当;东路冷空气影响时逆温消失。出现这一现象的可能原因是,西路冷锋前伴有锋前增

温,配合暖气团爬升,因此,逆温强度强于较稳定的均压区型,例如2014年12月29日08时(图6a、e),近地层为有利于变暖的西南或偏西风;2015年1月10日20时(图略),西路冷空气渗透,925 hPa转为西北风,12 h降温1℃,而海平面上转为北风,12 h降温5℃,逆温形成,但冷锋过境后逆温层结即被打破,所以逆温维持时间较短。11日20时(图6d、h、l)转受东路冷空气影响,925 hPa和海平面场上偏东风加大,逆温消失。对比西、东路冷空气,发现近地层的风向、风速对于逆温维持起重要作用。低压倒槽型逆温较强的原因在于925 hPa多为有利于升温的偏南风(图6b),12 h升温2℃,而海平面上为偏东风,12 h降温3℃,造成近地层温差增大,逆温较强。

5.3 动力条件

对比3次重度霾过程的能见度(图略),发现均为东北部能见度明显低于其他地区,各层风向基本一致,那么为何3次过程东北部霾更为严重呢?除了本地排放、外源输送的影响外,垂直运动也是影响霾发展变化的重要因子之一,因此考虑在垂直方向上寻找原因。

图7为3次过程中霾最严重时段的低层散度、垂直速度和风场,由图可知,江苏的散度变化较小,不论是上升还是下沉速度都较小,有利于维持稳定层结和污染物的聚集。1000 hPa上(图7d—f),东

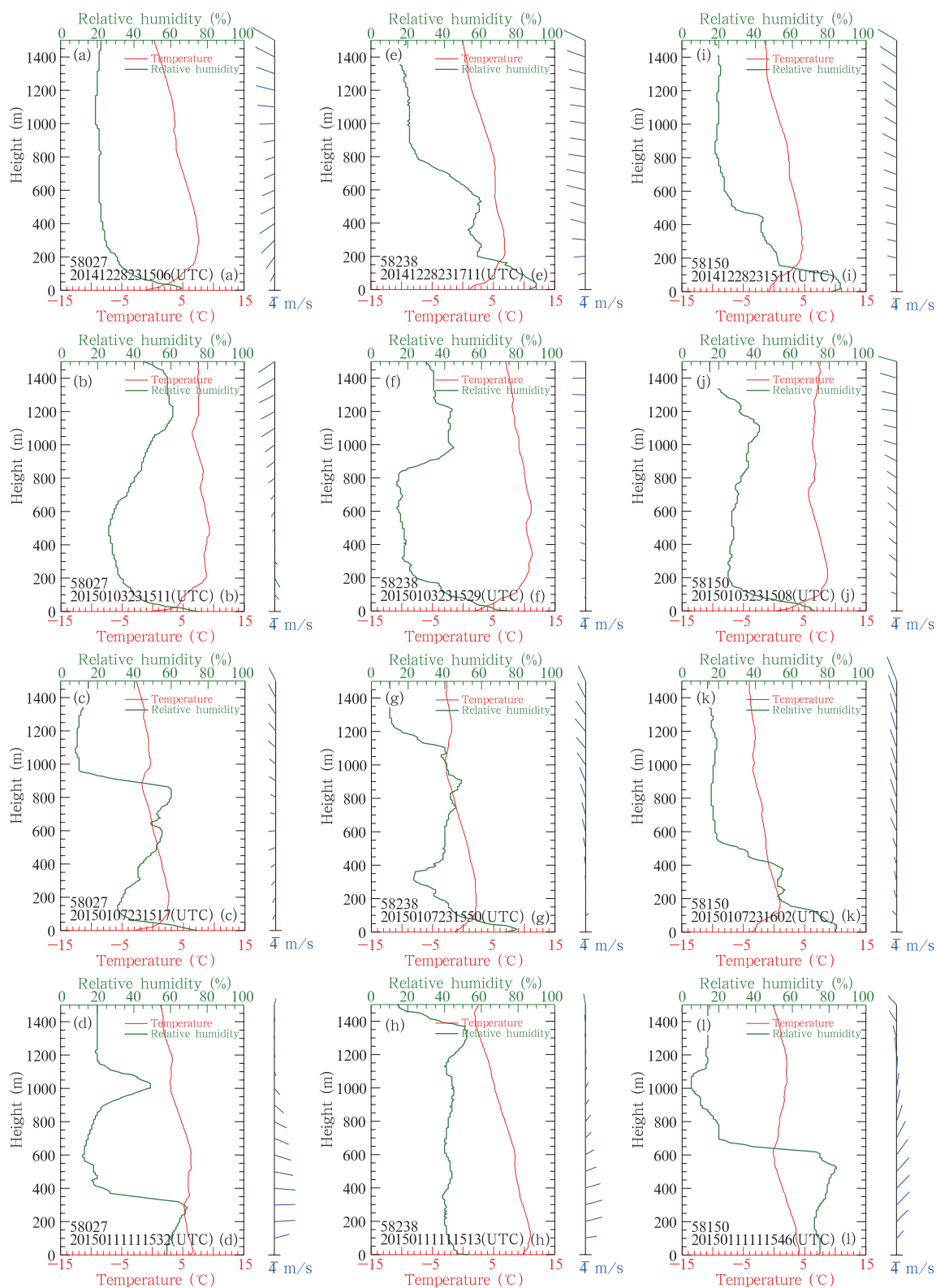


图6 2014年12月29日08时(a,e,i)、2015年1月4日08时(b,f,j)、8日08时(c,g,k)、11日20时(d,h,l)温度与相对湿度廓线(a-d.徐州,e-h.南京,i-l.盐城)

Fig. 6 Temperature (unit: $^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (unit: %) profiles for the 3 cities

(a) (e) (i) 08:00 BT 29 December 2014, (b) (f) (j) 08:00 BT 4 January 2015, (c) (g) (k) 08:00 BT 8 January 2015, and (d) (h) (l) 20:00 BT 11 January 2015 (a-d. Xuzhou, e-h. Nanjing, i-l. Yancheng)

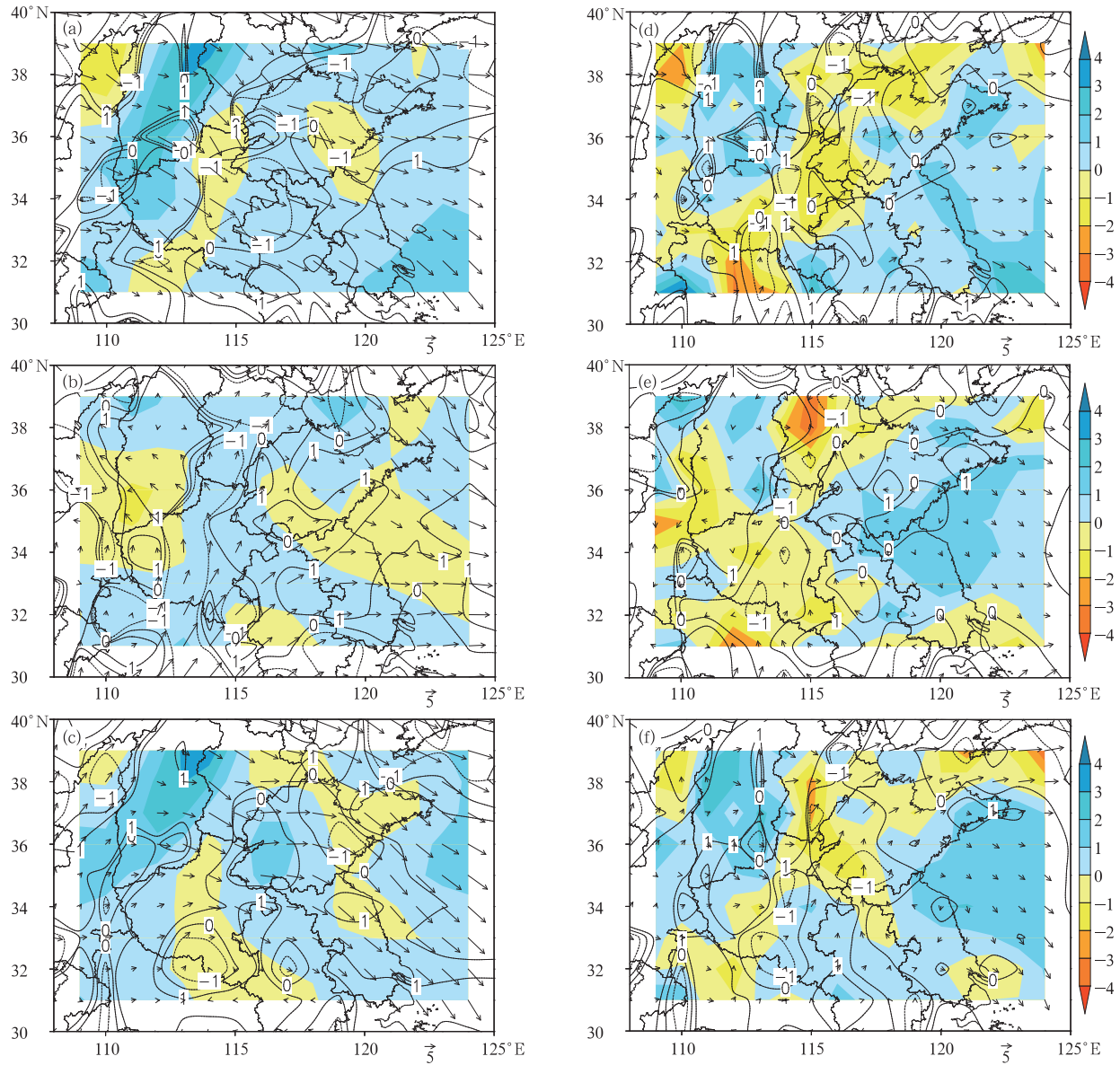


图7 霾最重时段的物理量分布

(a,d. 2014年12月29日08时, b,e. 2015年1月4日08时, c,f. 10日08时; a—c. 850 hPa, d—f. 1000 hPa; 阴影: 散度, 负值表示辐合, 正值表示辐散, 单位: 10^{-5} m/s^2 ; 矢量: 风, 单位: m/s ; 等值线: 垂直速度, 负值表示上升, 正值表示下沉, 单位: 10^{-1} Pa/s)

Fig. 7 Distribution of divergence (shaded, negative means convergence, positive means divergence, unit: m/s^2), wind (vectors, unit: m/s) and vertical speed (contours, negative means rising, positive means sinking, unit: 10^{-1} Pa/s) at (a) (d) 08:00 BT 29 December 2014, (b) (e) 08:00 BT 4 January 2015 and (c) (f) 08:00 BT 10 January 2015 (a—c. 850 hPa, d—f. 1000 hPa)

北部辐散强于南部地区, 配合有下沉运动; 而在 850 hPa 上(图 7a—c), 东北部有弱辐合, 依然对应应有微弱的下沉运动。由图 6 可知, 位于江苏东北部的盐城站不同于徐州、南京站, 在 1500 m (约 850 hPa) 以下均为一致西北风(图 6i、j、k、l), 这有利于层结稳

定, 进一步稳定霾层, 形成辐合下沉运动, 而下沉气流也使得混合层被挤压变薄, 能见度恶化, 霾加剧, 因此, 在今后进行霾落区预报时, 除了关注近地面有无辐散下沉外, 还需关注 850 hPa 上的弱辐合下沉, 出现弱辐合的区域霾可能会加重。

5.4 近地层风矢量和

风的累积时数水平空间矢量和分布表示了小区域某段时间内空气流动的累积效应(吴兑等, 2008, 2014)。图 8a、c 为风的 120 h 矢量和, 图 8b 为风的 48 h 矢量和, 反映了出现重度霾时江苏地区空气流动的总合效果。可见 3 次过程风的累积时数矢量和都很小, 均在 100—500 m/s 范围内, 污染物的水平

扩散条件较差, 形成明显的气流停滞区, 造成污染堆积。从强度上来看, 2014 年 12 月 27—31 日略强于 2015 年 1 月 7—11 日, 图 8a、c 是均压区转冷锋前型, 风矢量和呈现较一致的西北偏西方向, 图 9b 是均压区转低压倒槽型, 呈现一致的东南风, 这与地面形势场的配置相吻合。

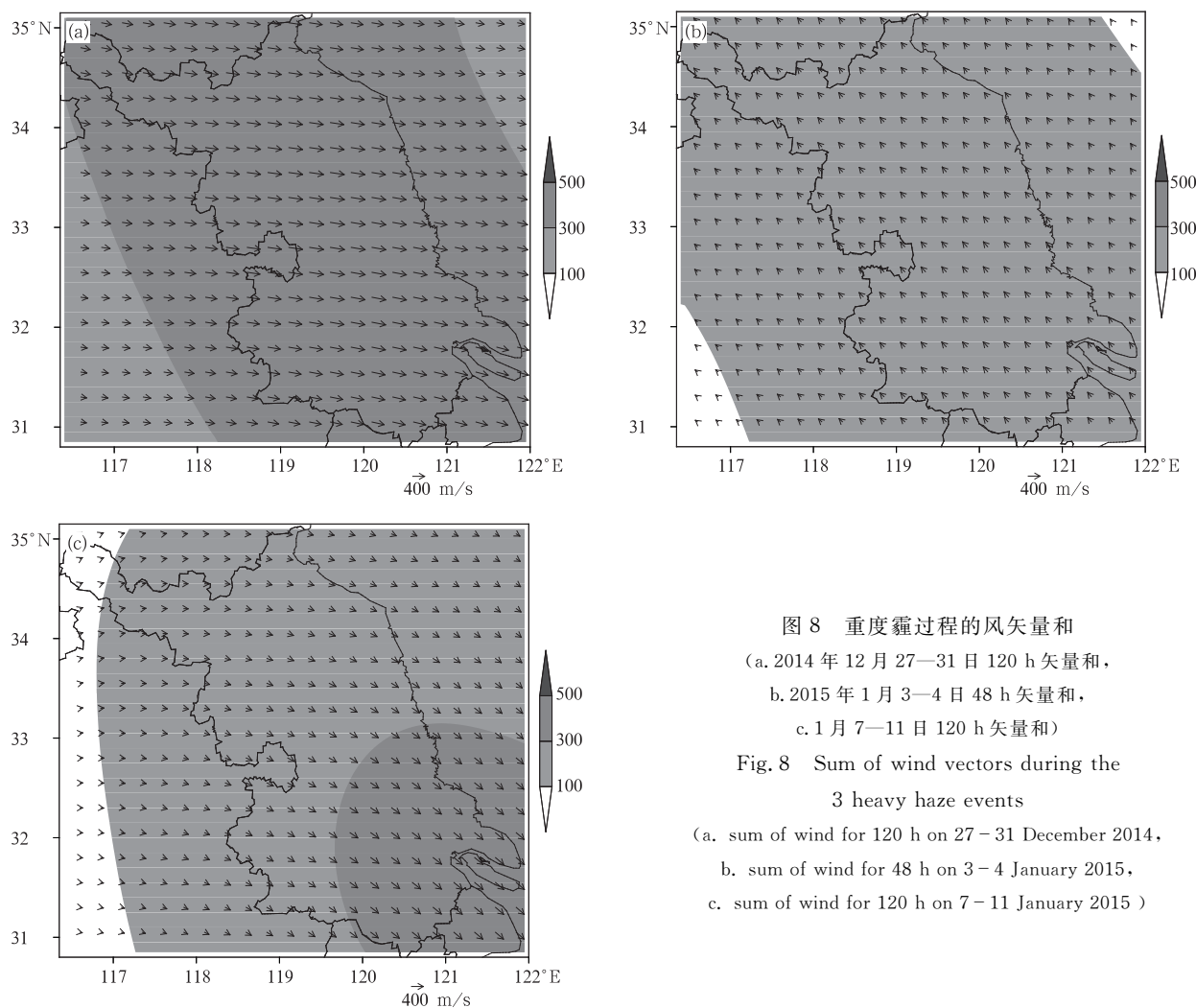


图 8 重度霾过程的风矢量和

(a. 2014 年 12 月 27—31 日 120 h 矢量和,

b. 2015 年 1 月 3—4 日 48 h 矢量和,

c. 1 月 7—11 日 120 h 矢量和)

Fig. 8 Sum of wind vectors during the 3 heavy haze events

(a. sum of wind for 120 h on 27–31 December 2014,

b. sum of wind for 48 h on 3–4 January 2015,

c. sum of wind for 120 h on 7–11 January 2015)

6 重度霾的后向轨迹特征

霾的本质为空气中悬浮的灰尘颗粒, 称之为气溶胶颗粒(Peng, et al, 2016), 为了解重度霾发生时边界层内部由气流输送的气溶胶来源, 应用模式 HYSPLIT 4.8 来分析 3 次重度霾过程的后向轨迹。轨迹终点设在南京。高度 1000 m 对应江苏地区的边界层中上部(石春娥等, 2008), 因此, 垂直方向上

选取 100、500 和 1000 m 这 3 个高度层作为模拟的初始高度。由于 3 个高度输出轨迹较多, 为了更直观清晰地看出各条轨迹路径, 采用了簇分析方法对大量轨迹进行聚类, 基本思想是按照轨迹最接近的原则进行多条轨迹之间的合并分组得到不同的轨迹组, 聚类原则是实现组内各轨迹路径间差异极小, 而组间差异极大(江志红等, 2011; 戴竹君等, 2015), 聚类结果如图 9 所示, 上半部分为水平分量, 下半部分

为垂直分量,根据轨迹水平分量的长短可以判断气团移动速度,长轨迹表示快速移动的气团,短轨迹对应移动缓慢的气团。冷锋前部型重度霾气流输送的气溶胶主要来源于西北方向(图 9a、c),低压倒槽型则主要来自南方(图 9b),而这 3 次过程的前期都是

均压区型,因此均压区型主要来源于本地。此外,低压倒槽型气流主要来自江苏南部,并且上层气团源地较低层气团更偏南,有利于上层升温,并较长时间维持,这也使得低压倒槽型的逆温更强、更深厚。

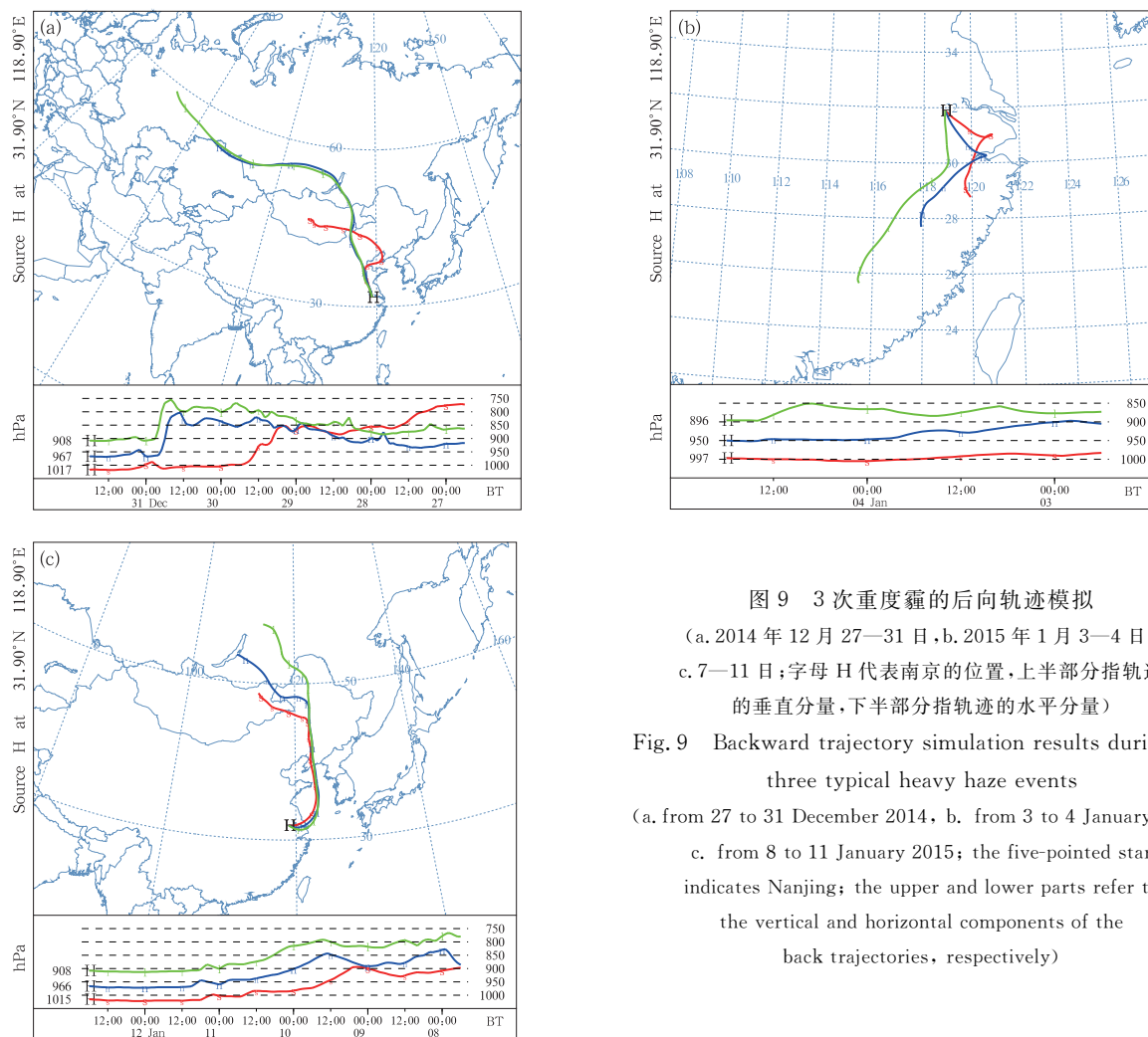


图 9 3 次重度霾的后向轨迹模拟

(a. 2014 年 12 月 27—31 日, b. 2015 年 1 月 3—4 日, c. 7—11 日; 字母 H 代表南京的位置, 上半部分指轨迹的垂直分量, 下半部分指轨迹的水平分量)

Fig. 9 Backward trajectory simulation results during the three typical heavy haze events
(a. from 27 to 31 December 2014, b. from 3 to 4 January 2015, c. from 8 to 11 January 2015; the five-pointed star indicates Nanjing; the upper and lower parts refer to the vertical and horizontal components of the back trajectories, respectively)

7 结 论

通过上述分析得出以下主要结论:

(1) 重度霾的地面形势场主要可分为 3 类: 均压区型、冷锋前部型和低压倒槽型。重度霾出现的地面形势不是一成不变的, 而是多种类型间的转变, 主要是由均压区型转为冷锋前型或低压倒槽型。冷锋到来前霾较重, 冷空气路径不同, 对重度霾的清除效果不同, 东路冷空气驱霾效果优于西路冷空气。西路冷空气影响时, 污染物浓度的下降较风速增大滞

后 3—6 h, PM_{10} 浓度的下降比 $PM_{2.5}$ 滞后 2—3 h, 这可能是由于自北方输送的颗粒物尺度较大; 东路冷空气影响时, PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 浓度伴随风速的增大同步下降。

(2) 重度霾发生时, 500 hPa 上是平直偏西气流, 500 hPa 转西北气流对重度霾缓解有 6—12 h 的提前指示意义。重度霾发生时, 近地面风速小, 均在 4 m/s 以下, 3 h 变压弱; 霾消散时, 近地面转为北风, 风速明显增大; 日变化明显, 上午霾较重, 下午霾常有所减轻, 可能是由于湿度降低, 此外, 午后湍流

发展旺盛,混合层高度升高。

(3)重度霾发生时大多是贴地逆温,逆温强度上,低压倒槽型强于西路冷锋前型,强于均压区型;逆温持续时间上,低压倒槽型长于西路冷锋前型,长于均压区型;逆温厚度上,3种类型基本相当;东路冷锋影响时逆温消失。不同类型逆温强度不同可能与925 hPa和近地面的风向风速、锋前增温及气团源地有关。逆温层顶在300 m以下,逆温强度为1—5 °C/(100 m),并且近地层有浅薄湿区,相对湿度在40%—90%。动力条件方面,低层辐合下沉有利于霾加重,并伴有明显的气流停滞,区域过程风矢量和很小,为100—500 m/s,不利于污染物的水平扩散。冷锋前部型风矢量和呈现较一致的西北偏西方向,低压倒槽型则为东南风。冷锋前部型重度霾气流输送的气溶胶主要来源于西北—华北方向,低压倒槽型则主要来自南方,均压区型主要来源于本地。

在今后进行重度霾的预报时,需注意以下4点:(1)当冷空气影响时,关注风向和上游污染情况;(2)不仅需要关注冷空气强度,更要关注冷空气路径、冷空气影响时的风向,以及是否有低值系统影响;(3)有逆温时霾常会加重;(4)进行霾落区预报时,出现微弱辐合的区域霾可能会更重。

致 谢:感谢江苏省环境保护局提供空气质量指数、PM_{2.5}、PM₁₀等环境监测数据。

参考文献

- 陈欢欢, 吴兑, 谭浩波等. 2010. 珠江三角洲2001—2008年灰霾天气过程特征分析. 热带气象学报, 26(2): 147-155. Chen H H, Wu D, Tan H B, et al. 2010. Study on the character of haze weather process from the year 2001 to 2008 over the Pearl River Delta. J Trop Meteor, 26(2): 147-155 (in Chinese)
- 陈丽芳. 2012. 杭州市灰霾气候特征及与清洁过程的对比分析. 科技通报, 28(7): 31-35. Chen L F. 2012. Climatic characteristics of haze in Hangzhou and intercomparison between haze process and cleaning process. Bull Sci Technol, 28(7): 31-35 (in Chinese)
- 陈训来, 冯业荣, 王安宇等. 2007. 珠江三角洲城市群灰霾天气主要污染物的数值研究. 中山大学学报(自然科学版), 46(4): 103-107. Chen X L, Feng Y R, Wang A Y, et al. 2007. Numerical experiment research on air pollutants during atmospheric haze over the multi-cities of Pearl River Delta region. Acta Scientia Natur Univ Suny, 46(4): 103-107 (in Chinese)
- 陈训来, 冯业荣, 范绍佳等. 2008. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响. 大气科学, 32(3): 530-542. Chen X L, Feng Y R, Fan S J, et al. 2008. Effect of the off-shore background flow and sea-land breezes on haze weather over the Pearl River Delta region. Chinese J Atmos Sci, 32(3): 530-542 (in Chinese)
- 戴竹君, 王黎娟, 管兆勇等. 2015. 热带风暴“Bilis”(0604)暴雨增幅前后的水汽输送轨迹路径模拟. 大气科学, 39(2): 422-432. Dai Z J, Wang L J, Guan Z Y, et al. 2015. Simulation of water vapor transport paths before and after increased rainstorms from tropical storm Bilis (0604). Chinese J Atmos Sci, 39(2): 422-432 (in Chinese)
- 丁一汇, 柳艳菊. 2014. 近50年我国雾和霾的长期变化特征及其与大气湿度的关系. 中国科学: 地球科学, 44(1): 37-48. Ding Y H, Liu Y J. 2014. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity. Sci China: Earth Sci, 57(1): 36-46
- 傅瑜, 王体健, 黄晓娴等. 2015. 南京地区典型霾天气个例特征的比较分析. 环境科学学报, 35(6): 1620-1628. Fu Y, Wang T J, Huang X X, et al. 2015. Comparative analysis on four typical haze cases in Nanjing. Acta Scientiae Circumst, 35(6): 1620-1628 (in Chinese)
- 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. Gao G. 2008. The climatic characteristics and change of haze days over China during 1961—2005. Acta Geogr Sinica, 63(7): 761-768 (in Chinese)
- 蒋珍姣, 龙凤翔, 李艳玉等. 2009. 桂林市近10年霾的变化分析. 气象研究与应用, 30(1): 68-79. Jiang Z J, Long F X, Li Y Y, et al. 2009. Haze variation characteristics of Guilin city in recent 10 years. J Meteor Res Appl, 30(1): 68-79 (in Chinese)
- 江志红, 梁卓然, 刘征宇等. 2011. 2007年淮河流域强降水过程的水汽输送特征分析. 大气科学, 35(2): 361-372. Jiang Z H, Liang Z R, Liu Z Y, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007. Chinese J Atmos Sci, 35(2): 361-372 (in Chinese)
- 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. Li F, Wu D, Tan H B, et al. 2012. The characteristics and causes analysis of a typical haze process during the day season over Guangzhou area: A case study. J Trop Meteor, 28(1): 113-122 (in Chinese)
- 廖玉芳, 吴贤云, 潘志祥等. 2007. 1961—2006年湖南省霾现象的变化特征. 气候变化研究进展, 3(5): 260-265. Liao Y F, Wu X Y, Pan Z X, et al. 2007. Climatic characteristics of haze in Hunan province during 1961—2006. Adv Climate Change Res, 3(5): 260-265 (in Chinese)
- 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): 1673-1683. Liu D Y, Pu M J, Yan W L, et al. 2014a. Study on the formation and the cause of the fog-haze transformation in the lower reaches of Huaihe River. China Environ Sci, 34(7): 1673-1683 (in Chinese)

- 刘端阳, 魏建苏, 严文莲等. 2014b. 1980~2012年江苏省城市霾日的时空分布及成因分析. 环境科学, 35(9): 3247-3255. Liu D Y, Wei J S, Yan W L, et al. 2014b. Trends of urban haze in Jiangsu province China over the past 33 years. Environ Sci, 2014, 35(9): 3247-3255 (in Chinese)
- 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. Liu M, Yan W L, Zhang B, et al. 2014. Analysis on persistence and intensification mechanism of fog and haze in Jiangsu in January 2013. Meteor Mon, 40(7): 835-843 (in Chinese)
- 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. Lu C S, Niu S J, Yang J, et al. 2010. Jump features and causes of macro and microphysical structures of a winter fog in Nanjing. Chinese J Atmos Sci, 34(4): 681-690 (in Chinese)
- 彭华青, 钱映月, 刘端阳等. 2014. 苏南地区连续霾及重度霾的边界层气候特征. 长江流域资源与环境, 23(12): 1783-1793. Peng H Q, Qian Y Y, Liu D Y, et al. 2014. Boundary layer climate characteristic of the consecutive haze and the heavy haze on south of Jiangsu area. Resour Environ Yangtze Basin, 23(12): 1783-1793 (in Chinese)
- 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. Rao X Q, Li F, Zhou N F, et al. 2008. Analysis of a large-scale haze over middle and eastern China. Meteor Mon, 34(6): 89-96 (in Chinese)
- 任阵海, 苏福庆, 陈朝晖等. 2008. 夏秋季节天气系统对边界层内大气中PM₁₀浓度分布和演变过程的影响. 大气科学, 32(4): 741-751. Ren Z H, Su F Q, Chen Z H, et al. 2008. Influence of synoptic systems on the distribution and evolution process of PM₁₀ concentration in the boundary layer in summer and autumn. Chinese J Atmos Sci, 32(4): 741-751 (in Chinese)
- 石春娥, 翟武全, 杨军等. 2008. 长江三角洲地区四省会城市PM₁₀污染特征. 高原气象, 27(2): 408-414. Shi C E, Zhai W Q, Yang J, et al. 2008. Characteristics of PM₁₀ pollution at four provincial cities in Yangtze River Delta district. Plateau Meteor, 27(2): 408-414 (in Chinese)
- 宋连春, 高荣, 李莹等. 2013. 1961—2012年中国冬半年霾日数的变化特征及气候成因分析. 气候变化研究进展, 9(5): 313-318. Song L C, Gao R, Li Y, et al. 2013. Analysis of China's haze days in winter half year and climatic background during 1961—2012. Progr Inquisit Mutat Climatis, 9(5): 313-318 (in Chinese)
- 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. Tong Y Q, Yin Y, Qian L, et al. 2007. Analysis of the characteristics of hazy phenomena in Nanjing area. China Environ Sci, 27(5): 584-588 (in Chinese)
- 魏玉香, 童尧青, 银燕等. 2009a. 南京SO₂、NO₂和PM₁₀变化特征及其与气象条件的关系. 大气科学学报, 32(3): 451-457. Wei Y X, Tong Y Q, Yin Y, et al. 2009a. The variety of main air pollutants concentration and its relationship with meteorological condition in Nanjing city. Trans Atmos Sci, 32(3): 451-457 (in Chinese)
- 魏玉香, 杨卫芬, 银燕等. 2009b. 霾天气南京市大气PM_{2.5}中水溶性离子污染特征. 环境科学与技术, 32(11): 66-71. Wei Y X, Yang W F, Yin Y, et al. 2009b. Pollution characteristics of Nanjing water-soluble ions in air fine particles under haze days. Environ Sci Technol, 32(11): 66-71 (in Chinese)
- 吴兑. 2006. 再论都市霾与雾的区别. 气象, 32(4): 9-15. Wu D. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city. Meteor Mon, 32(4): 9-15 (in Chinese)
- 吴兑. 2008. 一种新的灾害性天气——灰霾. 环境, (7): 38-39. Wu D. 2008. A new severe weather-haze. Environment, (7): 38-39 (in Chinese)
- 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. Wu D, Liao G L, Deng X J, et al. 2008. Transport condition of surface layer under haze weather over the Pearl River Delta. J Appl Meteor Sci, 2008, 19(1): 1-9 (in Chinese)
- 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, 2010, 68(5): 680-688. Wu D, Wu X J, Li F, et al. 2010. Temporal and spatial variation of haze during 1951—2005 in Chinese mainland. Acta Meteor Sinica, 68(5): 680-688 (in Chinese)
- 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. Wu D. 2012. Hazy weather research in China in the last decade: A review. Acta Scientiae Circumst, 32(2): 257-269 (in Chinese)
- 吴兑, 廖碧婷, 吴蒙等. 2014. 环首都圈霾和雾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. Wu D, Liao B T, Wu M, et al. 2014. The long-term trend of haze and fog days and the surface layer transport conditions under haze weather in North China. Acta Scientiae Circumst, 34(1): 1-11 (in Chinese)
- 吴蒙, 吴兑, 范绍佳等. 2014. 珠江三角洲城市群大气污染与边界层特征研究进展. 气象科技进展, 4(1): 22-28. Wu M, Wu D, Fan S J, et al. 2014. Research progress in the study of air pollution and atmospheric boundary layer over the Pearl River Delta city cluster. Adv Meteor Sci Technol, 4(1): 22-28 (in Chinese)
- 吴振玲, 刘爱霞, 张长春等. 2009. 天津大气PM_{2.5}垂直特征及边界层影响. 城市环境与城市生态, 22(4): 24-29. Wu Z L, Liu A X, Zhang C C, et al. 2009. Vertical distribution feature of PM_{2.5} and effect of boundary layer in Tianjin. Urban Environ Urban Ecol, 22(4): 24-29 (in Chinese)
- 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. Yang W F, Yin Y, Wei Y X, et al. 2010. Characteristics and sources of metal elements in PM_{2.5} during hazy days in Nanjing. China Environ Sci, 30(1): 12-17 (in Chinese)
- 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. Yu J W, Sun Y, Zhang B, et al. 2009. Analysis of one heavy haze case happened in the region around Yangtze River in Jiangsu province. *Scientia Meteor Sinica*, 29(5): 664-669 (in Chinese)
- 张浩, 石春娥, 邱明燕等. 2010. 合肥市霾天气变化特征及其影响因素. *环境科学学报*, 30(4): 714-721. Zhang H, Shi C E, Qiu M Y, et al. 2010. Long-term variation of haze phenomena in Heifei and its impact factors. *Acta Scientiae Circumst*, 30(4): 714-721 (in Chinese)
- 张立多, 叶文健, 陈德花等. 2007. 灰霾天气对厦门市城市能见度影响问题初探. *气象研究与应用*, 28(S2): 149-150. Zhang L D, Ye W J, Chen D H, et al. 2007. Discuss the haze weather impaction on the visibility of Xiamen city. *J Meteor Res Appl*, 28(S2): 149-150 (in Chinese)
- 张蓬勃, 姜爱军, 孙佳丽等. 2012. 江苏秋季霾的年代际变化特征及其影响要素分析. *气候变化研究进展*, 8(3): 205-212. Zhang P B, Jiang A J, Sun J L, et al. 2012. Decadal change characteristics of autumn haze days in Jiangsu Province and its influential factors. *Progr Inquisit Mutat Climatis*, 8(3): 205-212 (in Chinese)
- 张鑫, 蔡旭晖, 柴发合. 2006. 北京市秋季大气边界层结构与特征分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 42(2): 220-225. Zhang X, Cai X H, Chai F H. 2006. Structures and characteristics of the atmospheric boundary layer over Beijing area in autumn. *Acta Scienti Natur Univ Pekin*, 42(2): 220-225 (in Chinese)
- 张雪玲, 陈润浩. 2011. 南阳边界层逆温特征分析. *气象与环境科学*, 34(S): 116-119. Zhang X L, Chen R H. 2011. Inversion characteristic analysis of Nanyang boundary layer. *Meteor Environ Sci*, 34(S): 116-119 (in Chinese)
- 中国气象局. 2010. QX/T 113-2010 霾的观测和预报等级. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administiation. 2010. QX/T 113-2010 Observation and Forecasting Levels of Haze. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese)
- 周宁芳, 李峰, 饶晓琴等. 2008. 2006 年冬半年我国霾天气特征分析. *气象*, 34(6): 81-88. Zhou N F, Li F, Rao X Q, et al. 2008. Study on haze weather in China during winter-time of 2006. *Meteor Mon*, 34(6): 81-88 (in Chinese)
- 朱佳雷, 王体健, 邢莉等. 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. Zhu J L, Wang T J, Xing L, et al. 2011. Analysis on the characteristics and mechanism of a heavy haze episode in Jiangsu Province. *China Environ Sci*, 31(12): 1943-1950. (in Chinese)
- Baik N J, Kim Y P, Moon K C. 1996. Visibility study in Seoul, 1993. *Atmos Environ*, 30(13): 2319-2328
- Elridge R G. 1966. Climatic visibilities of the United States. *J Appl Meteor*, 5(3): 227-282
- Ferman M A, Wolff G T, Kelly N A. 1981. The nature and sources of haze in the Shenandoah Valley/Blue Ridge Mountains area. *J Air Pollut Control Assoc*, 31(10): 1074-1082
- Husar R B, Holloway J M, Patterson D E, et al. 1981. Spatial and temporal pattern of eastern U. S. haziness: A summary. *Atmos Environ*, 15(10-11): 1919-1928
- Husar R B, Wilson W E. 1993. Haze and sulfur emission trends in the eastern United States. *Environ Sci Technol*, 27(1): 12-16
- Miller M E, Canfield N L, Ritter T A, et al. 1972. Visibility changes in Ohio, Kentucky, and Tennessee from 1962 to 1969. *Mon Wea Rev*, 100(1): 67-71
- Peng H Q, Liu D Y, Zhou B, et al. 2016. Boundary-layer characteristics of persistent regional haze events and heavy haze days in Eastern China. *Adv Meteor* (in press)
- Radojevic M, Hassan H. 1999. Air quality in Brunei Darussalam during the 1998 haze episode. *Atmos Environ*, 33(22): 3651-3658
- Sloane C S. 1982. Visibility trends I: Methods of analysis. *Atmos Environ*, 16(1): 41-51
- Sloane C S. 1983. Summertime visibility declines: Meteorological influences. *Atmos Environ*, 17(4): 763-774
- Sloane C S. 1984. Meteorologically adjusted air quality trends: Visibility. *Atmos Environ*, 18(6): 1217-1229
- Weiss R E, Waggoner A P, Charlson R J, et al. 1977. Sulfate aerosol: Its geographical extent in the midwestern and southern United States. *Science*, 195(4282): 979-981
- Wolff G T, Kelly N A, Ferman M A. 1982. Source regions of summertime ozone and haze episodes in the eastern United States. *Water, Air Soil Pollut*, 18(1-3): 65-81
- Wu D, Tie X X, Deng X J. 2006. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China. *Chemosphere*, 64(5): 749-757
- Wu D, Mao J T, Deng X J, et al. 2009. Black carbon aerosols and their radiative properties in the Pearl River Delta region. *Sci China Ser D: Earth Sci*, 52(8): 1152-1163