

严文莲,朱承瑛,朱毓颖,等,2018.江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究[J].气象,44(7):892-901.

江苏一次大范围的爆发性强浓雾过程研究^{*}

严文莲^{1,2} 朱承瑛^{1,3} 朱毓颖^{1,3} 刘端阳² 濮梅娟⁴

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210009

2 江苏省气象台,南京 210008

3 江苏省气象科学研究所,南京 210009

4 江苏省气象局,南京 210008

提 要: 利用江苏省70个自动观测站和365个交通气象观测站资料,对2016年2月11日夜间至12日上午出现在江苏的一次大范围强浓雾天气过程进行分析。结果表明:这次强浓雾过程具有爆发性形成和加强的特征,大部分站点从1000 m以上快速下降形成强浓雾,且部分站点存在多次爆发增强现象;夜间天空打开,长波辐射降温作用加强,是大范围强浓雾形成和爆发性发展的一个重要原因;同时,雾前降雨为本次强浓雾的形成创造了基础条件,也是日出后部分站点由于水汽蒸发增强而导致雾爆发性增强的直接原因;另外,雾前和雾期间近地层强逆温的存在为雾的爆发性发展提供了稳定的大气层结条件,而逆温顶附近低空急流的形成,也一定程度上促进了逆温的维持和加强,利于雾的爆发性发展。

关键词: 强浓雾,爆发性发展,水汽蒸发,低空急流

中图分类号: P458,P427

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.07.004

Study on a Wide Range of Explosive Heavy Fog in Jiangsu

YAN Wenlian^{1,2} ZHU Chengying^{1,3} ZHU Yuying^{1,3} LIU Duanyang² PU Meijuan⁴

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210009

2 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210009

4 Jiangsu Meteorological Service, Nanjing 210008

Abstract: Based on meteorological data from 70 automatic weather stations and 365 traffic meteorological observation stations of Jiangsu Province, a heavy fog process that occurred in Jiangsu in 11–12 February 2016 is investigated. The results show this fog process features that the fog formed and intensified explosively. At most stations, the dense fog formed rapidly with the visibility dropping directly from 1000 m above, and there was multiple burst enhancement phenomena in some areas. Along with the opened sky at night, the long-wave radiation cooling also strengthened, which was an important cause for the formation and explosive development of the wide range of heavy fog. Meanwhile, the prophase rainfall provided basic conditions for the formation of the heavy fog, and also was the direct cause of the enhanced evaporation and explosive increase of heavy fog at some sites after sunrise. In addition, strong inversion temperature provided stable atmospheric conditions for the explosive development of fog. The low-level jet near the top of inversion temperature promoted the maintenance and enhancing of the strong inversion, which played an important role in the explosive development of heavy fog.

Key words: heavy fog, explosive development, water evaporation, low-level jet

^{*} 国家重点研发计划(2016YFC0201901和2016YFC0203303)及国家自然科学基金项目(41575135)共同资助

2017年5月19日收稿; 2018年4月28日收修定稿

第一作者:严文莲,主要从事雾和霾等灾害性天气预报方法研究. Email: yike-112@163.com

引言

雾是指悬浮在近地层大气中的大量微细乳白色水滴或冰晶的可见集合体,根据能见度距离可将雾分为4个等级:500 m \leq 能见度 $<$ 1 km为大雾,200 m \leq 能见度 $<$ 500 m为浓雾,50 m \leq 能见度 $<$ 200 m为强浓雾,能见度 $<$ 50 m为特强浓雾(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准管理委员会,2012)。雾是一种灾害性天气,尤其是低能见度的强浓雾天气,对海陆空交通运输和人体健康等的影响愈来愈突出。

国内外从物理化学特征、天气学成因、卫星遥感、数值模拟等方面对强浓雾展开了研究,揭示强浓雾的生消机制和宏观微观结构特征(Roach et al, 1976; Klemm et al, 2005; 李子华等,1999a; 李子华,2001; 濮梅娟等,2001; 2008b; 吴兑等,2007; 邓雪娇等,2007; 何立富等,2006; 赵玉广等,2015; 于庚康等,2015; 焦圣明等,2016; 周斌斌,1987)。

近年来,在一些地区雾的研究中发现强浓雾的形成具有爆发性特征,即雾在短时间内(30 min左右)快速加强为强浓雾或特强浓雾(濮梅娟等,2008a)。这种能见度快速下降现象极易导致汽车追尾和船舶相撞等重大交通事故的出现,往往给人民生命财产带来巨大的损失,如2006年12月25日的浓雾爆发性增强时,宁靖盐高速公路兴泰段上8辆车发生严重追尾翻车事故,造成7人死亡、5人受伤,同时,两艘4000 t船在长江南京段相撞,造成宣城货3859号轮船沉没,4人落水。因此,研究雾的这种爆发性增强特征有着非常重要的实际意义。美国波河河谷试验发现了因雾层平流导致的雾层垂直方向的突然发展特征(Fuzzi et al,1992);李子华等(1999b)对沪宁高速公路雾的观测研究中发现逆温的分层结构、日出后贴地层的增温以及湍流混合引起的热量、动量及水汽垂直输送是触发雾爆发性发展的动力条件、热力条件和水汽条件;在南京雾的外场观测中,濮梅娟等(2008b)进一步指出了雾爆发性增强的三种物理原因,一是夜晚长波辐射增强,二是近地层出现冷平流,三则是地表水分蒸发或湿平流及湍流混合。陆春松等(2010)、刘端阳等(2009)和刘霖蔚等(2012)相继对南京地区2006—

2007年冬季观测到的几次地面雾爆发性增强过程进行了分析,极大地丰富了雾爆发性增强的理论研究。尽管对雾爆发性增强研究取得了丰硕的成果,但以往的研究仅是针对一个观测点,雾的爆发性增强特征有无区域性特征?区域性爆发性增强的强浓雾又有哪些特征?许多疑问还需要进一步的研究解决。

随着常规资料观测的精细化,爆发性增强的区域性强浓雾过程易被发现。2016年2月11日夜间至12日早晨江苏省出现一次大范围的强浓雾天气过程,除徐州外,全省大部分地区均出现能见度 $<$ 200 m的强浓雾,长江以北大部分地区出现能见度 $<$ 50 m的特强浓雾,2016年2月13日扬子晚报以大字标题“猴年第一雾”详细报道了这次雾过程。江苏省气象台及镇江、扬州、淮安、连云港和宿迁等气象台发布大雾橙色预警信号。受大雾影响,全省范围高速公路关闭,这在过去春节长假中也是绝无仅有的。这次雾过程,区域性雾爆发性增强特征明显。本文将对这次雾过程进行研究,揭示本次大范围强浓雾爆发性增强的特征和成因,为强浓雾预报方法研究提供科学依据。

1 强浓雾过程特征

1.1 天气背景

2016年2月11日08时500 hPa上欧亚中高纬为两槽一脊的形势,河套以东地区有一西风槽东移,江苏上空处于槽前西南气流控制,700和850 hPa为一致的西南风,最大风速均达到 $18\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,西南急流将水汽不断输送到苏皖交界处,江苏处于风速辐合区中,致使雾前期(10日至11日上午)出现全省性的小雨天气,地表潮湿;11日20时至12日08时,中低纬多短波槽活动,江苏上空500 hPa逐渐由浅槽前转为弱脊控制,而850 hPa在西南暖湿气流的持续影响下,维持较强的暖脊且稳定少动;同样,在925 hPa上江苏处于入海高压的后部,吹西南风,温度场上可以看到江苏中南部有暖脊配合,暖平流发展明显,也利于低空逆温的形成和维持。

从地面天气图上看,11日20时至12日08时,冷空气主体位于河套以北地区,西南地区维持一个大低压,江苏处于低压倒槽前部均压场中,以偏东风

为主且风力较小,有利于雾的形成。

综上所述,高空 500 hPa 在弱槽脊控制下,中低层西南暖湿气流持续作用且有暖脊配合,地面处于低压倒槽前部均压场中,上下层配置促使夜间低层逆温层的建立和维持,在这种天气背景下,区域雾产生并维持。这次雾过程在 12 日中午前后随着太阳辐射的进一步加强,逐渐消散。

1.2 强浓雾范围广

如图 1 所示,2016 年 2 月 11 日 20 时左右,江苏省中东部部分地区开始起雾,并迅速向周边蔓延且强度加强。11 日 22 时后,部分地区开始出现能见度低于 200 m 的强浓雾;中东部多数站出现在 00 时前后,12 日 03—04 时前后,扬州、泰州、淮安西部和宿迁南部等出现强浓雾,06 时前后,西南部地区雾加强,同时东部部分城市雾再一次加强。总体来说,强浓雾先后在中东部地区出现,再往西南和西北部扩展。多数站点强浓雾持续时长 6 h 以上,最多的超过 11 h;整个雾过程中,除了江苏西北部和西南部 12 日起雾晚且强度较弱外,其他大部分地区都出现了能见度 < 200 m 的强浓雾,其中在沿江以北部分地区还出现能见度 < 50 m 的特强浓雾,多数站点在 03—05 时加强为特强浓雾,个别站点在 07 时加强为特强浓雾,特强浓雾维持时间 10 min 至 8 h 不等,其中扬州高邮站能见度最低降至 18 m。07—09 时区域性强浓雾一直维持,10—12 时才逐渐开始减弱消散。可见本次雾过程属于全省性强浓雾过程。

1.3 大范围爆发性增强特征

值得注意的是,本次雾过程中,大部分站点强浓雾的形成都具有爆发性的特征。图 2 给出了 8 个交通气象站和 2 个基本站的能见度变化曲线,由图可见,这些站强浓雾形成时速度极快,仅用 10~30 min,个别站仅几分钟。多数站爆发增强的起点是从 1000 m 以上的能见度开始的,就是说未经过大雾、浓雾阶段,而直接快速形成强浓雾。作者统计了 66 个站的强浓雾,其中 58 个站都是雾刚一形成即开始爆发增强的,这在我们对强浓雾的观测中,是从未出现过的。有的站出现了多次爆发增强过程,如六洞服务区站在 2 月 11 日 22—24 时,就经历了 4 次爆发增强过程;有的站(加潼河大桥站)雾消 5 h 后,再次爆发为强浓雾。

2 爆发性增强成因分析

2.1 夜间辐射降温作用

图 3 给出了 11 日夜间至 12 日早晨卫星云图的演变情况,可以看到,受高空浅槽东移影响,江苏上空入夜后云系较多且变化快。对照雾区(图 1)和云图(图 3)分析发现,雾区的发展与晴空和少云区变化有较好的一致性。其中 19—22 时中部地区伴随较厚的云团东移,同时在安徽上空仍有云系东移进入江苏上空,期间江苏中东部的一些地区在短暂的晴空或少云时率先起雾;随着云团东移,22—23 时,扬州—泰州—盐城南部—南通区域上空云层打开,同时伴随着该地区的雾产生并快速加强,此时段强浓雾出现的位置与云打开位置基本一致。12 日 01 时前后全省云系再次增多,03 时后随着 500 hPa 转为槽后偏西北气流控制,江苏上空的云量明显减少,与雾区对比发现,12 日 04—06 时伴随着晴空或少云区范围加大,对应着雾区外扩并加强,即强浓雾也扩展至全省大部分地区,同时东南部地区雾也明显加强;但在西部边缘,尤其是江苏省西北角和西南角上空始终有较明显的云层,未出现明显的雾。

夜间长波辐射的变化与上空云系的变化关系密切,为进一步讨论长波辐射降温作用对雾的形成和加强的影响,绘制了高邮、东山、南京和盱眙地区的各要素变化和小时净辐射演变情况图(图 4)。由图可以看到,2 月 11 日 18 时至 12 日 07 时,各地净辐射为负值或 0,即以地面长波辐射为主;同时夜间由于各地上空云系差异,导致不同地区净辐射差异也较大,从而对近地层气温影响不同。如高邮 11 日 21 时后上空云系减少,小时净辐射加大,22 时达到 $-0.11 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,对应的气温下降幅度较前期加大,降温率为 $1.1 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^{-1}$,促使空气达到饱和成雾,并于 22:20 快速发展为强浓雾;同样,南京地区在 12 日 05—07 时天空打开,负的小时净辐射最大至 $-0.13 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,随着长波辐射增强,气温也由前期的增温趋势转为下降,07 时前后降温近 $1.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$,促使了雾的快速形成。可见,随着夜间地面长波辐射加强,辐射降温加大,空气达到饱和,能见度快速下降。在东山和盱眙等地区在起雾和雾加强阶段也有类似的特征。加上此次雾过程中,夜间偏东风为主,风力不大,多为 $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,更有利



图 1 2016 年 2 月 11 日 19 时至 12 日 12 时江苏省能见度分布(单位:m)

Fig.1 The distribution of visibility (unit: m) during the fog event in Jiangsu Province from 19:00 BT 11 to 12:00 BT 12 February 2016

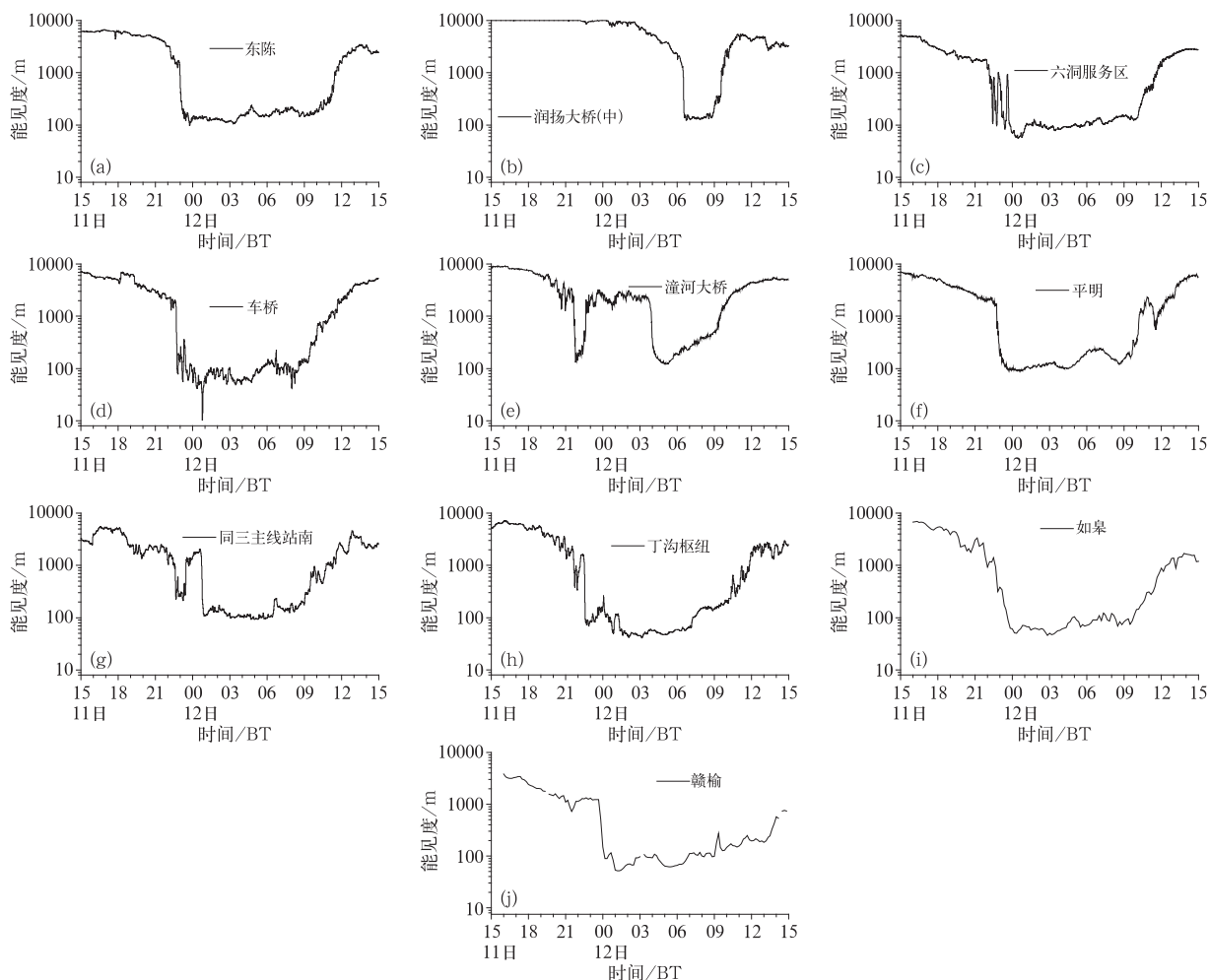


图2 2016年2月11日15时至12日15时江苏10个站点能见度演变情况

Fig. 2 The evolution of visibility at 10 stations in Jiangsu Province

from 15:00 BT 11 to 15:00 BT 12 February 2016

于雾滴核化和凝结增长。另外,高邮和盱眙在成雾初期,都有一个气温小幅回升的过程,这是雾凝结潜热释放造成的,这种现象在许多站成雾时均存在。

综上所述,这次雾的形成并爆发性发展的一个重要原因是夜间天空云散,辐射降温增强。

2.2 地面雨水蒸发作用

本次雾爆发性加强还有一个重要的原因,那就是水汽蒸发作用。雾前,受地面倒槽和高空短波槽影响,2月11日,全省大部分地区都出现了小雨天气(图5a),沿江西部雨量较明显(1~10 mm),其他地区降水量均低于1 mm,降水在11日10时左右才结束。前期降水为这次雾的形成和加强提供了丰富的水汽条件。一方面,降水结束后,整个近地层维持较高的相对湿度,11日19时,全省大部分地区相对

湿度都在85%以上,苏中和东部地区多在90%以上(图略),这也是中东部先成雾的一个原因,而西北部和西南部地区湿度条件略差,加上夜间天空云移出较晚,成雾时间也较晚;另一方面,日出后,地表吸收太阳辐射增温,地面气温开始回升,而此时地表水汽蒸发,相应的露点温度也上升;图5b给出了12日06—08时的露点变化,可以看到,日出前后2 h,江苏大部分地区露点温度增加0.1~2.0℃,与前期降水区域也较为一致。露点上升,空气仍维持饱和状态,部分站点甚至出现二次加强现象,这种现象在前期降水较为明显的西南部地区普遍存在,如句容站能见度在12日06:30前后由1021 m快速下降至374 m,镇江站在06:20前后由雾进一步增强为能见度<50 m的超强浓雾。这与前期降水导致的地面湿度较大,从而出现蒸发现象有关。蒸发作用为近

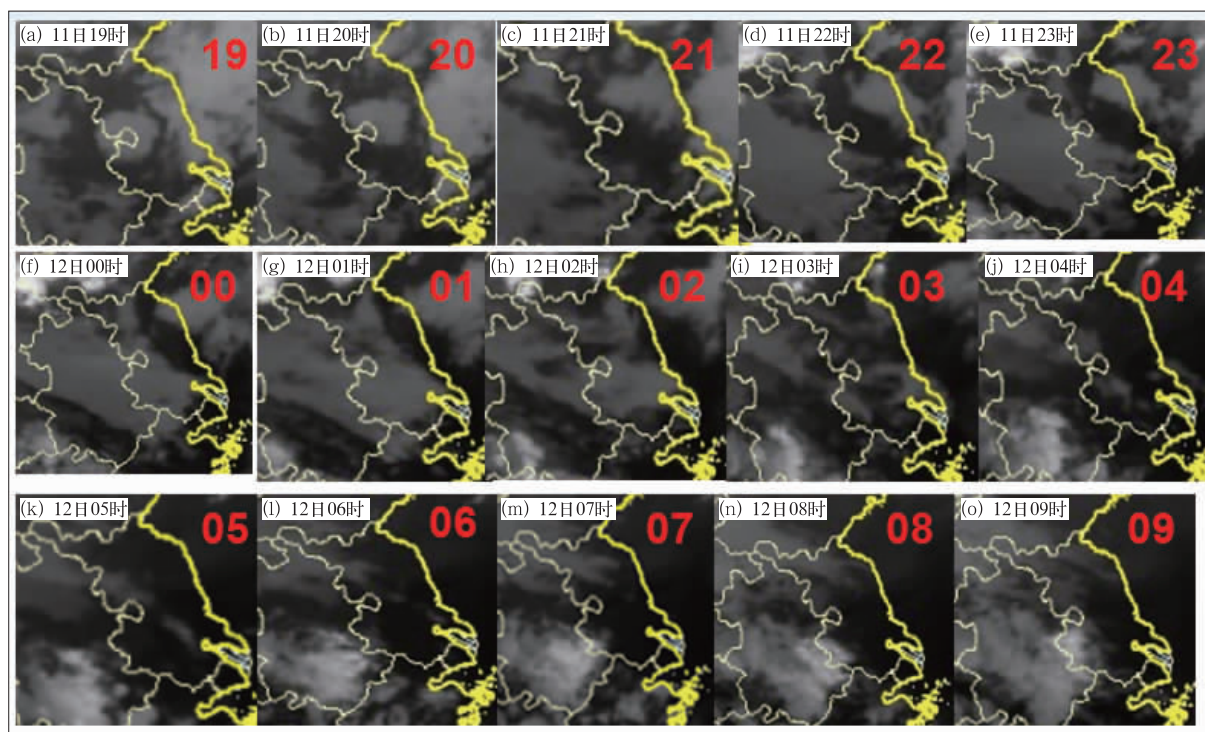


图 3 2016 年 2 月 11 日 19 时至 12 日 09 时雾过程中红外云图逐时演变情况

Fig. 3 Evolution of infrared cloud images during the fog process from
19:00 BT 11 to 09:00 BT 12 February 2016

地层雾体提供水汽,促使部分站点出现爆发性发展或二次加强,也使得全省浓雾维持不消,并持续至中午前后。

因此,雾前降水、水汽充沛是这次爆发性强浓雾过程产生的基础条件。

2.3 强逆温为雾的爆发性发展提供稳定层结条件

分析江苏三个探空站(南京、徐州和射阳)发现(图 6),尽管各地起雾时间不一样,且雾的强度不一,但在起雾前,11 日 20 时,各地均存在较强的贴地逆温,且逆温层很薄,厚度仅 100~150 m,强度很大。如徐州和南京贴地逆温强度达 $3.4\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$ 左右,射阳存在双层逆温,强度约为 $1.0\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$;贴地逆温薄而强,极有利于水汽在贴地层累积。雾期间,从 12 日 08 时探空可以看到,各站逆温抬升,贴地逆温底抬升至 200 m 左右,即雾顶所在高度,从地面到雾顶,气温大体呈湿绝热分布,其上为雾顶逆温层,逆温强度在 $1.85\sim 3.38\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,整个逆温集中在 400 m 以下,雾层厚度 150~200 m。可见,雾前和雾期间,江苏近地层均维持较强的逆温,有利于水汽聚集在近地层,为雾的爆发性发展提供极稳

定的大气层结条件。雾生成后,雾顶辐射冷却增强,逆温层升至雾顶之上。

另外,从风速的廓线看,12 日 08 时,各站在强逆温中心附近,均存在一个风速大值区,该高度段风速相比 11 日 20 时有明显增大。Andreas et al (2000)定义低层风速极大值超出上方和下方风速极小值 $2\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上时即为低空急流。此次过程中,在风速大值区,徐州和南京均超过 $7\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,射阳站达到 $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,均明显高于上下层风速,即达到低空急流标准。这主要是在逆温层顶部动量向下输送受阻,并在此不断堆积起来,从而导致在强逆温顶附近风速逐渐加大,进而出现大风速区(赵德山和洪钟祥,1981;黄建平等,1998;陆春松等,2010)。结合风向廓线分析发现,到强逆温所在高度以东南风或偏东风为主,即在强逆温顶附近维持一个较强的东南或偏东风急流。赵德山和洪钟祥(1981)指出,在辐射逆温层内风场和温度场之间具有相互作用的关系:一方面,逆温的存在使得逆温层顶出现风速极大区(超低空急流);另一方面,随着逆温层顶风速不断加大,引起该处上下风速切变不稳定,湍流发展,导致动量和热量爆发性向下发展,逆温层中心强

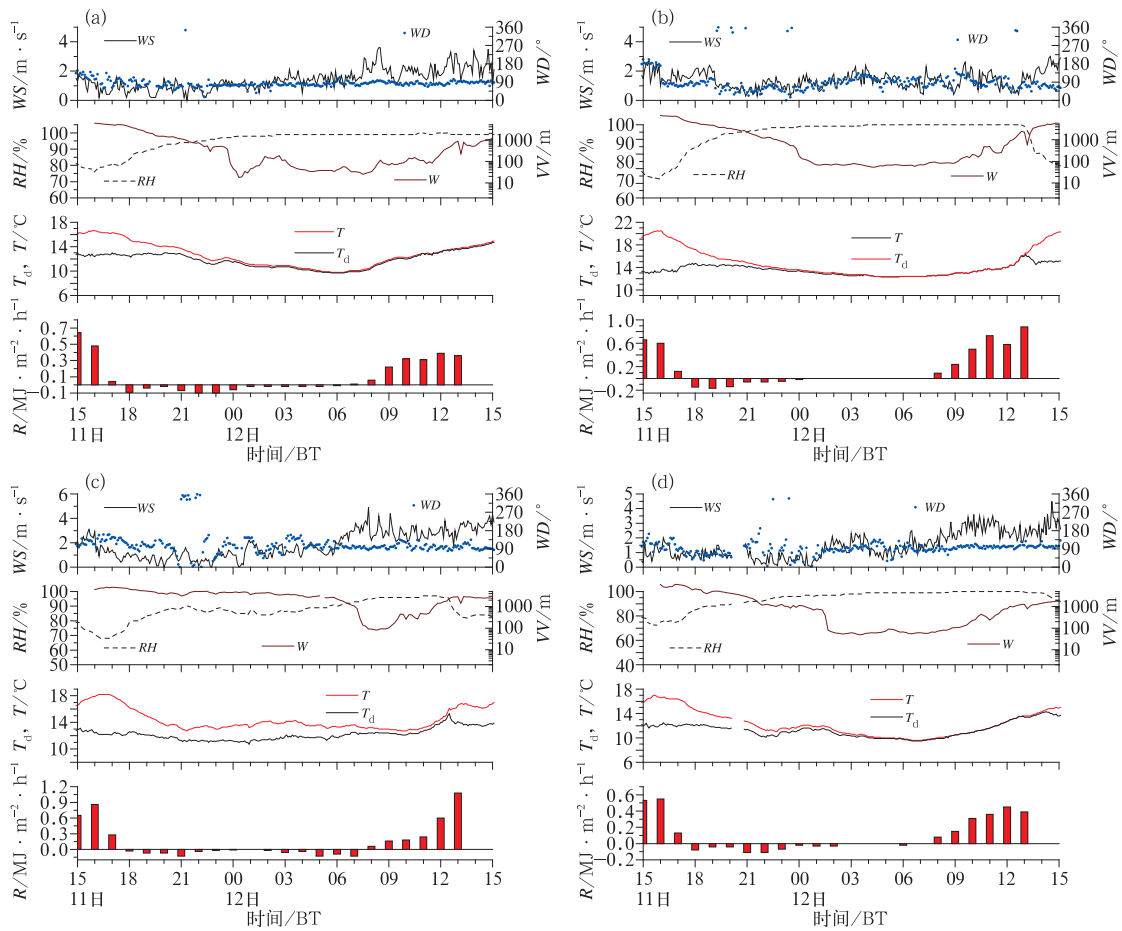


图4 2016年2月11日15时至12日15时高邮(a), 东山(b), 南京(c)和盱眙(d)各气象要素
和小时净辐射随时间的变化

(WS: 风速, WD: 风向, RH: 相对湿度, VV: 能见度, T: 温度, T_d : 露点温度, R: 小时净辐射)

Fig. 4 Temporal evolution of different meteorological factors and hourly net radiation in Gaoyou (a),
Dongshan (b), Nanjing (c) and Xuyi (d) from 15:00 BT 11 to 15:00 BT 12 February 2016

(WS: wind speed, WD: wind direction, RH: relative humidity, VV: visibility, T: temperature,
 T_d : dew point temperature, R: hourly net radiation)

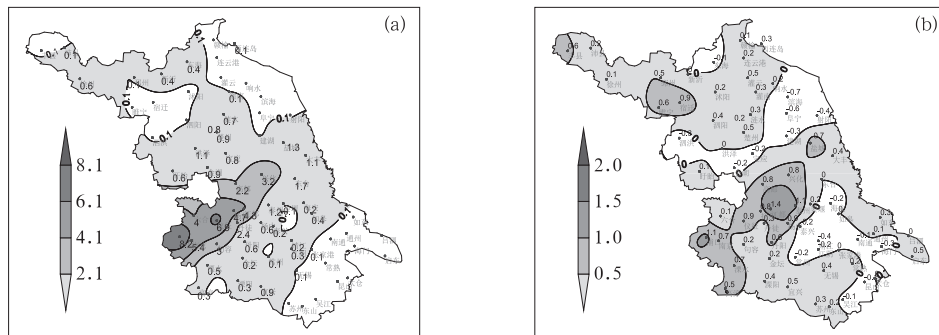


图5 2016年2月11日08时至12日08时总降水量(a, 单位: mm)和12日露点
温度变化($T_{d08} - T_{d06}$, 单位: $^{\circ}\text{C}$)(b)

Fig. 5 Distribution of total precipitation (a, unit: mm) from 08:00 BT 11
to 08:00 BT 12 and dew temperature difference (b, unit: $^{\circ}\text{C}$) from
06:00 BT to 08:00 BT 12 February 2016

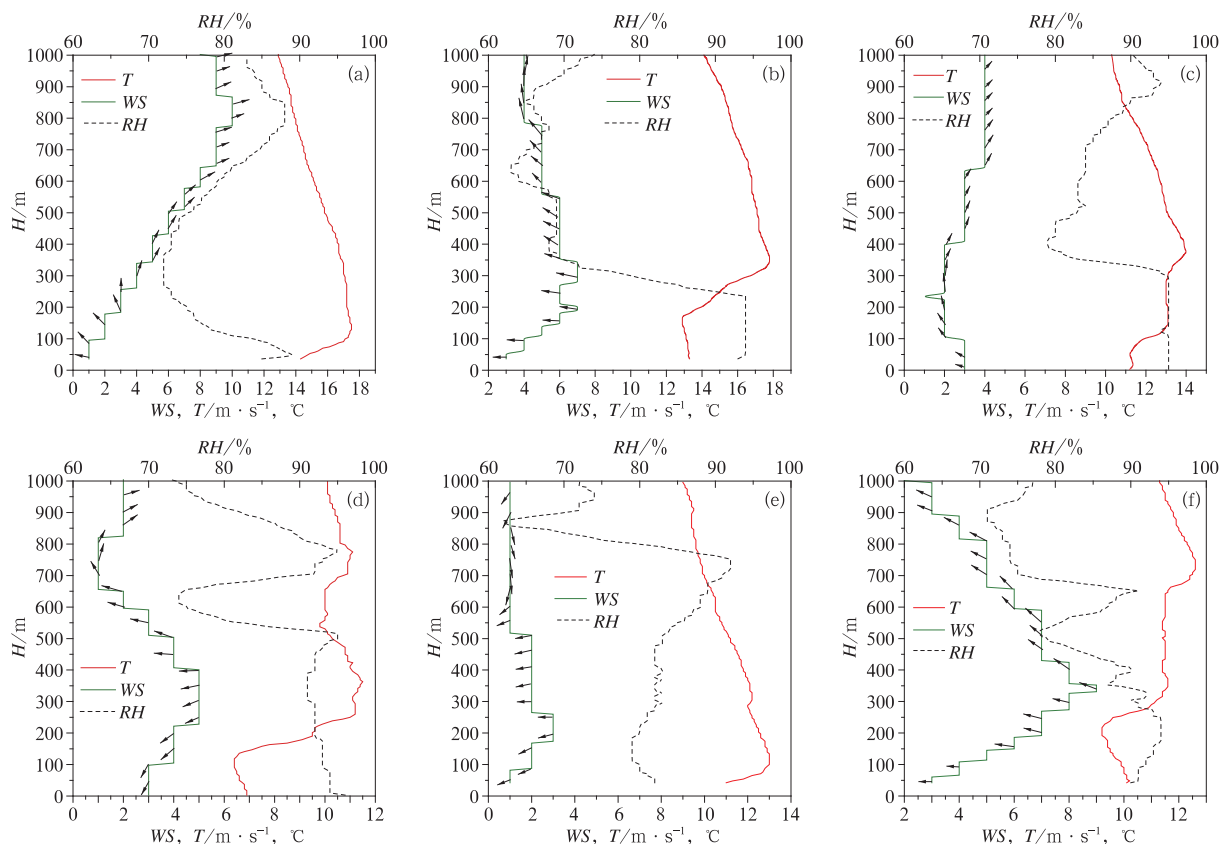


图6 2016年2月江苏三站探空温度(T)、风速(WS)、风向(箭头)和相对湿度(RH)廓线

(a)南京11日20时,(b)南京12日08时,(c)射阳11日20时,(d)射阳12日08时,

(e)徐州11日20时,(f)徐州12日08时

Fig. 6 Profiles of temperature (T), wind speed (WS), wind direction (arrow) and relative humidity (RH) from three sounding stations in Jiangsu Province on February 2016

(a) Nanjing, 20:00 BT 11; (b) Nanjing, 08:00 BT 12; (c) Sheyang, 20:00 BT 11;

(d) Sheyang, 08:00 BT 12; (e) Xuzhou, 20:00 BT 11; (f) Xuzhou, 08:00 BT 12

度削弱,厚度加厚。

为探讨本次雾前强逆温的形成和这种超低空急流存在的作用,进一步分析11日20时和12日08时地面和925 hPa温度平流和风场分布(图7),可以看到,11日20时,950 hPa及以上,江苏南部地区(文中给出的是925 hPa)以偏南风为主,维持一个较强的暖平流,而对应的地面以偏东风为主,并维持冷平流或弱的暖平流,这种上层暖平流和底层浅薄的冷平流或弱暖平流的温度平流结构,对近地层强逆温的形成和维持产生重要的作用,这也是在11日20时成雾前江苏三站探空近地层存在强逆温的一个重要原因。12日02时,江苏北部地区也维持这种上暖下冷的平流结构(图略),一直持续到12日08时。持续的冷暖平流结构,促使强逆温维持。在近地层冷平流作用下,加上夜间辐射降温的共同作

用下,11日20时至12日08时,徐州和南京300 m以下明显降温,150~200 m附近最大降幅将近4℃;而边界层上层(南京300 m以上,徐州450 m以上)受暖平流影响出现增温,在700 m附近增温幅度最大有3℃,逆温顶附近低空急流的出现,也使得温度平流加强,对强逆温的形成和维持具有明显的作用。与徐州和南京站略有不同,射阳站处于江苏省东部沿海,对应的近地层较强的冷平流,在700 m以下均表现为温度下降,特别是在150 m附近最大降温幅度近7℃。这种冷暖平流的作用使得雾前在辐射冷却作用产生的贴地逆温逐渐加强,而在逆温层顶东南急流的形成,进一步加强了上层暖平流,对逆温的维持起到了促进作用,致使近地层水汽不断聚集,雾爆发性发展和维持。

由上可知,上层暖平流和底层浅薄的冷平流或

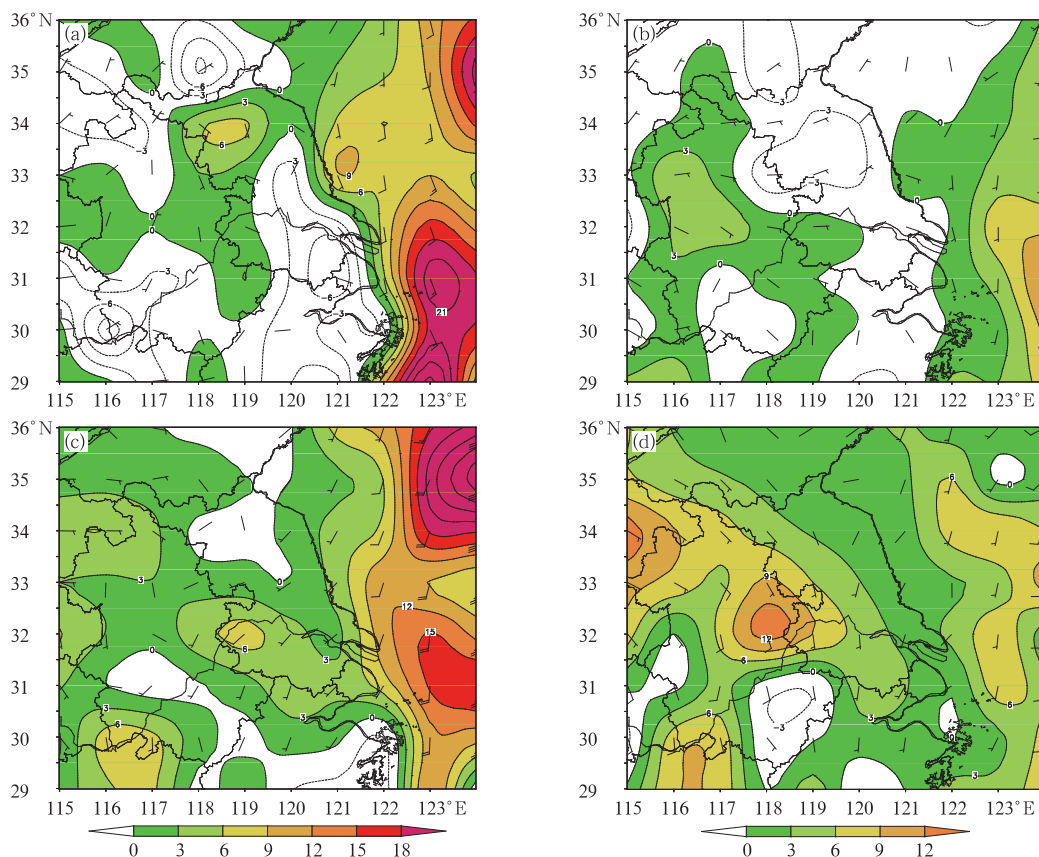


图7 2016年2月11日20时(a,c)和12日08时(b,d)地面(a,b)、925 hPa(c,d)的温度平流和风场分布(填色部分为暖平流,单位: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 7 Distribution of the surface (a, b) and 925 hPa (c, d) temperature advection and wind field at 20:00 BT 11 (a, c) and 08:00 BT 12 (b, d) February 2016

(The shaded parts show warm advection, unit: $^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)

弱暖平流的温度平流结构,是近地层强逆温形成和维持的一个重要原因,而逆温顶附近东南风低空急流的形成,一定程度上促使暖平流作用的加强,进而促进逆温的维持和加强,利于雾爆发性发展。

3 结 论

通过对2016年2月11日夜间至12日上午江苏省出现的一次大范围强浓雾天气过程分析,可以得出以下结论:

(1) 本次强浓雾过程是高空500 hPa在弱槽脊控制,中低层西南持续暖湿气流作用并配有暖脊,地面处于低压倒槽前部均压场中的天气背景下产生的。

(2) 这次强浓雾影响范围广,且具有爆发性形成特征,形成时仅用时10~30 min,个别站仅几分

钟,且大部分强浓雾站点能见度直接从1000 m以上快速下降;另外,部分站点存在多次爆发增强现象。

(3) 夜间天空云散,长波辐射降温作用加强,是大范围强浓雾形成和爆发性发展的一个重要原因。雾前的全省性降雨过程为本次强浓雾的形成创造了基础条件,也是日出后部分站点蒸发增强而导致雾爆发性增强的直接原因。

(4) 雾前和雾期间,江苏近地层(400 m以下)维持较强的逆温,最强达到 $3.4^{\circ}\text{C} \cdot (100\text{ m})^{-1}$,而强逆温层的形成与雾层上层的暖平流和地面冷平流(或弱暖平流)、辐射冷却作用有关;同时,动量下传导致强逆温顶附近存在的东南低空急流,加强了雾体上层的暖平流作用,进一步促使强逆温的维持和加强,有利于水汽聚集在近地层,为雾的爆发性发展提供极稳定的大气层结条件。

参考文献

- 邓雪娇,吴兑,唐浩华,等,2007.南岭山地一次锋面浓雾过程的边界层结构分析[J].高原气象,26(4):881-889.
- 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[J].应用气象学报,17(2):160-168.
- 黄建平,朱诗武,朱彬,1998.辐射雾的大气边界层特征[J].南京气象学院学报,21(2):258-265.
- 焦圣明,朱承瑛,朱毓颖,等,2016.江苏地区一次罕见持续性强浓雾过程的成因分析[J].气象学报,74(2):200-212.
- 李子华,2001.中国近40年来雾的研究[J].气象学报,59(5):616-624.
- 李子华,黄建平,孙博阳,等,1999a.辐射雾发展的爆发性特征[J].大气科学,23(5):623-631.
- 李子华,黄建平,周毓荃,等,1999b.1996年南京连续5天浓雾的物理结构特征[J].气象学报,57(5):622-631.
- 刘端阳,濮梅娟,杨军,等,2009.2006年12月南京连续4天浓雾的微物理结构及演变特征[J].气象学报,67(1):147-157.
- 刘霖蔚,牛生杰,刘端阳,等,2012.南京冬季浓雾的演变特征及爆发性增强研究[J].大气科学学报,35(1):103-112.
- 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[J].大气科学,34(4):681-690.
- 濮梅娟,李良福,李子华,等,2001.西双版纳地区雾的物理过程研究[J].气象科学,21(4):425-432.
- 濮梅娟,严文莲,商兆堂,等,2008a.南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究[J].高原气象,27(5):1111-1118.
- 濮梅娟,张国正,严文莲,等,2008b.一次罕见的平流辐射雾过程的特征[J].中国科学:地球科学,38(6):776-783.
- 吴兑,邓雪娇,毛节泰,等,2007.南岭大瑶山高速公路浓雾的宏观结构与能见度研究[J].气象学报,65(3):406-415.
- 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[J].气象,41(5):622-629.
- 赵德山,洪钟祥,1981.典型辐射逆温生消过程中的爆发性特征[J].大气科学,5(4):407-415.
- 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[J].气象,41(4):427-437.
- 周斌斌,1987.辐射雾的数值模拟[J].气象学报,45(1):21-29.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局和中国国家标准管理委员会,2012.GB/T 27964—2011:雾的预报等级[S].北京:中国标准出版社.
- Fuzzi S, Facchini M C, Orsi G, et al, 1992. The Po Valley fog experiment 1989[J]. Tellus B, 44(5):448-468.
- Andreas E L, Claffy K J, Makshtas A P, 2000. Low level atmospheric jets and inversions over the western Weddell Sea[J]. Bound Layer Meteor, 97(3):459-486.
- Klemm O, Wrzesinsky T, Scheer C, 2005. Fog water flux at a canopy top: direct measurement versus one dimensional model[J]. Atmos Environ, 39(29):5375-5386.
- Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al, 1976. The physics of radiation fog: I—a field study[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 102(432):313-333.