

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.

2013 年 1 月江苏雾霾天气持续和增强机制分析^{*}

刘 梅 严文莲 张 备 俞剑蔚 金小霞

江苏省气象台, 南京 210008

提 要: 利用江苏省能见度监测资料、自动站气象要素资料、探空资料、NCEP(1°×1°)和 CFSV2(0.5°×0.5°)再分析资料, 对 2013 年 1 月江苏雾霾持续性和 13—14 日大雾形成机制展开分析, 结果表明: (1) 中高纬平直的纬向环流, 江苏位于地面高压底部偏东气流中, 冷高压主体偏北, 是 1 月发生持续雾霾天气的大背景。较弱的偏北经向风导致冷空气势力较弱, 为 1 月江苏雾霾天气持续发生提供了近地层有利的稳定形势。 (2) 近地面相对湿度 85% 以上, 风速小于 3 m·s⁻¹, 风向以偏东风为主, 凌晨与夜间温度露点差小于 3℃。这些条件的稳定为持续雾霾发生提供了良好的气象因子。 (3) 地面辐射降温 and 弱冷平流共同作用引起的温度快速下降以及日出后潮湿地面蒸发增强对雾的加强起到一定的触发作用。近地面冷平流和混合层以上暖平流为本次雾增强提供了稳定的大气层结条件。近地面弱上升运动、中高层弱的下沉运动是 14 日凌晨雾快速加强的动力机制。

关键词: 雾霾天气, 环流形势, 温度平流, 层结稳定度

中图分类号: P458, P49

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2014.07.007

Analysis on Persistence and Intensification Mechanism of Fog and Haze in Jiangsu in January 2013

LIU Mei YAN Wenlian ZHANG Bei YU Jianwei JIN Xiaoxia

Jinagsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

Abstract: By analyzing the monitoring data of visibility and environment, reanalysis data of NCEP 1°×1° and CFSV2 (0.5°×0.5°), sounding data, and meteorological elements from automatic weather stations, the paper discusses the persistence of fog and haze in Jiangsu Province in January 2013 and the intensifying burst of fog in 13—14 January 2013. The findings are as follows: Firstly, the zonal circulation in the middle-high latitude is straight; Jiangsu then lies in the easterly flow at the base of high pressure; the cold high is more northward. This is the weather situation of the persistent fog and haze in January. The weak cold air caused by the weak northward meridional wind provides the favorable conditions. Secondly, the near-surface relative humidity is above 85%, wind is eastward and the speed is under 3 m·s⁻¹, and dew-point difference is smaller than 3℃. Thirdly, the intensification of the fog is partly triggered by the drastic fall in temperature caused jointly by temperature drop from ground radiation and cold advection. Cold advection near the ground and the warm advection above the mixing layer provide stable atmospheric stratification conditions. The weak upward motion near surface and weak downward motion in middle-high level are the dynamic mechanism of the rapid intensification of fog in the early morning of 14 January.

Key words: fog and haze, circulation pattern, temperature advection, stratification stability

^{*} 江苏省科技厅自然科学基金(BS2010046)和江苏省科技支撑计划社会发展重大研究(BE2012771)共同资助
2013 年 6 月 20 日收稿; 2014 年 3 月 12 日收修定稿
第一作者: 刘梅, 主要从事中短期天气预报研究. Email: lmkerry@163.com

引言

随着社会城市化和工业化迅速发展,大气中气溶胶粒子浓度增加,低能见度日随之增加(Malm et al, 1994),我国的雾霾天气也逐渐增多,特别是我国中东部地区雾霾更加严重,对交通运输、人体健康、供电、军事活动等均造成严重影响。2012年6月3日,沈海高速公路盐城段,因雾的突发,双向车道相继发生7起共约60辆追尾,造成11人死亡,30多人受伤。2013年1月我国东部地区严重的雾霾事件引起社会的广泛关注。特别是在中国逐渐国际化的今天,降低大气污染和实现蓝天工程是我们面临的艰巨任务。因此,积极开展雾霾天气的成因分析及预报研究对国民经济发展和保护人民生命财产有重要意义。

近年来,不少专家学者在雾霾的气候特征、天气学特点、生消物理机制和数值模拟等方面做了大量研究工作,并获得一系列有意义的研究成果。如王丽萍等(2005)分析了我国雾的地理分布,讨论了不同区域雾的月、年变化特征。吴兑等(2010)利用1951—2005年资料分析了中国大陆霾的时空变化特征。另外,针对不同区域雾霾的气候特征也有不少分析研究(王继志等, 2002; 伍红雨等, 2011; 靳利梅等, 2008; 周贺玲等, 2011)。针对雾霾天气学分析和生消物理机制方面的研究是雾霾研究的重点, 吴兑等(2006; 2007; 2008)、Wu等(2006)、邓雪娇等(2006)在这方面做了大量工作, 针对珠江三角洲地区雾霾天气的形成条件、边界层结构和大气颗粒物浓度给予了分析, 李子华等(1994; 1999; 2011a; 2011b)、濮梅娟等(2008a; 2008b)、严文莲等(2009; 2010)、刘端阳等(2009)分别针对华东区雾的形成爆发和物理化学特征做了大量研究工作。曹伟华等(2013)、蔡子颖等(2012)和吴彬贵等(2009)分别对华北雾霾天气过程的影响因子、边界层特征和水汽输送特征展开相关研究。大量研究中关于持续性雾霾的分析较少, 2013年1月我国东部地区发生大范围持续性雾霾天气, 给交通和人体健康造成严重危害。本文即针对该次持续性雾霾天气从环流背景、生消机制方面给予分析, 以期从环流形势和大气边界层特征方面探究持续性雾霾形成和增强条件, 为雾霾预报提供一定思路和参考。

文中实况分析资料来自江苏省能见度、风、湿

度、温度及露点的实时监测和基准站高空探测资料。持续性和机制分析资料来自NCEP($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)再分析资料 and CFSV2($0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$)37层分析资料。研究过程主要利用要素对比、实况分析和物理量诊断等方法。

1 1月雾霾实况

2013年1月影响江苏的冷空气势力很弱, 大气层结持续稳定, 江苏出现了连续雾霾天气。根据霾的定义和判别标准“能见度 <10.0 km, 排除降水、沙尘暴、扬沙、浮尘、烟幕、吹雪和雪暴等天气现象造成的视程障碍, 相对湿度 $<80\%$, 判识为霾; 当能见度 <10.0 km, 相对湿度 $80\% \sim 90\%$ 时, 按照大气成分指标进一步判识”(2013年中国气象局综合观测司规定), 2013年1月江苏省霾日为17 d(泰州)~25 d(宿迁), 平均21.8 d, 为1961年以来同期最多, 比次多的2012年多3.2 d。从2013年1月南京能见度变化(图1a)可看出, 1月6—12日以霾天为主, 而夜间到早上为中度霾(能见度在3~6 km), 部分地区出现能见度小于2 km重度霾。13—16日夜间至早晨时间段为雾, 白天转为霾, 出现了霾—雾—霾的循环转化过程。其中14和15日雾霾天气最强, 全省全天大部能见度均低于0.5 km。14日早晨, 江苏出现大范围的大雾天气, 徐州、宿迁、淮安、扬州、泰州和南京等部分地区能见度小于50 m(图1b), 徐州14日02:31最小能见度仅为10 m。15日早晨江苏淮河以南大部分地区能见度也在500 m以下。16日后期, 受北方较强冷空气南下影响, 全省风力逐渐加大, 稳定层结被破坏, 大气扩散加强, 持续多日的雾霾天气逐渐减弱。但1月20日之后全省大部分地区能见度再次降低, 并出现持续雾霾天气。在1月雾霾天气持续过程中, 大气污染程度也相当严重, 1月南京市PM_{2.5}质量浓度和空气污染指数(API)的演变(图1c)显示, 1月初两者均呈上升趋势, 仅在17—18日两指数出现明显下降, 然后再次上升。6—16和22—31日PM_{2.5}和API指数都相对较大, 南京API超过100点, 日平均PM_{2.5}也超过100 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。13日污染指数最强, PM_{2.5}达到250 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。对应能见度分析, 污染指数较高的时段(如8、13、16和29—30日)雾霾天气也较

严重。据环保局监测,17—19 日,全省多个空气质量监测点空气质量指数出现较为明显的下降,降幅在 9%~62%, $\text{PM}_{2.5}$ 小时浓度的降幅最高达 83%,全省能见度有所好转。从近几年雾霾预报中发现当出现严重持续雾霾时,污染物浓度均明显增大。很多专家学者研究也证明雾霾和污染物浓度有一定相关(杨卫芬等,2010;童尧青等,2007;李丽珍等,2007),可见,大气中较强的污染浓度是雾霾天气伴有的特征之一。

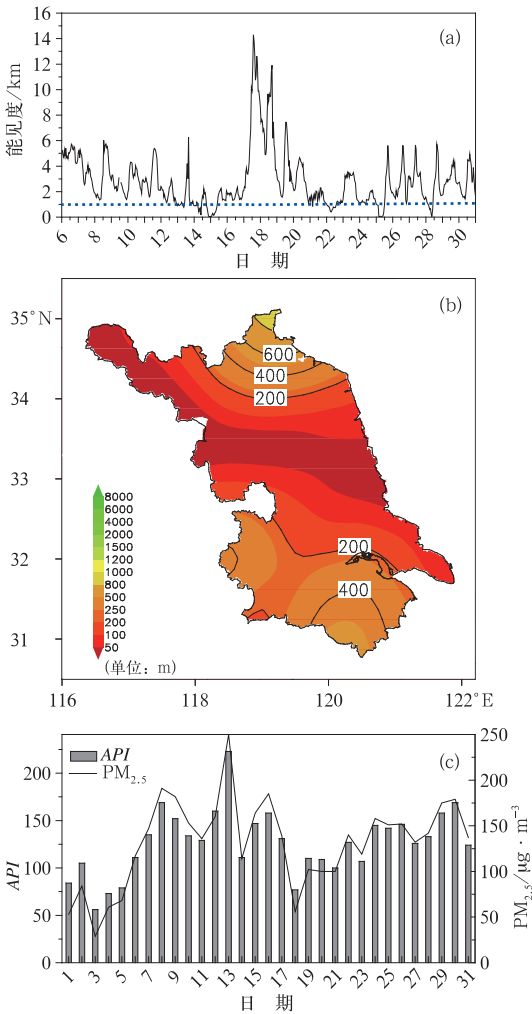


图 1 2013 年 1 月江苏能见度和大气质量实况
(a)南京站能见度演变,(b)14 日 08:52 全省
能见度分布,(c)南京 $\text{PM}_{2.5}$ 和
空气污染指数(API)变化

Fig. 1 Visibility in Jiangsu in January 2013
(a) change of visibility at Nanjing Station,
(b) visibility distribution in Jiangsu at 08:52 BT
14 January, (c) change of $\text{PM}_{2.5}$ and
air pollution index

2 1 月雾霾持续性分析

2.1 持续性雾霾环流形势分析

本次大范围持续性雾霾天气过程产生在特定的环流形势背景下。图 2 是 1 月 500 hPa 和地面平均环流场,500 hPa(图 2a)欧亚中高纬环流平直,江苏一带有一平浅小槽,而西风带主槽位于华北地区并逐日东移,南下势力较弱;孟加拉湾南支槽更为平浅,锋区在 28°N 以南地区,对应的西南偏西风位于长江下游以南地区,由此,弱天气系统不能形成降水使大气中污染物沉降。地面图上(图 2b)伴随高空主槽的地面冷高压脊位于华北到东北地区,位置偏北,江苏处在冷高压底部的均压场中,低层盛行一支偏东气流。而从地面气压场的变化分析,1 月江苏先后处于冷高压底部均压场、高压后部均压场两种形势,均是有利于江苏雾霾天气发生的地面形势。因此,1 月高空平直环流和地面均压场形势为持续性雾霾的发生提供了适宜的背景。

进一步分析持续雾霾期间 500 hPa 平均经向风分布(图 3a~3c),6—13 日江苏平均处于偏南经向风和偏北经向风的交界处,大部分地区经向风 $<2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,经向零风速线位于 33°~34°N 之间的江淮一带。13—17 日经向风分布发生明显转变,原来较强的偏南经向风分布区被偏北经向风取代,江苏处于偏北经向风的控制下,500 hPa 经向风的分布和转变表明前期中高纬冷空气向江淮一带输送偏弱,中高纬冷空气入侵较弱是有利于雾形成的高空形势。由于前期冷空气势力较弱,暖湿气流强盛,后期经向风的加大,在冷空气主体南下之前,利于雾的形成。22—31 和 14—17 日 500 hPa 偏北经向风存在类似情况,虽存在一定的偏北风影响,但北风分量仍较小,江苏大部分地区在 $3 \sim 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冷空气的势力仍较弱,不足以改变整个大气稳定层结。同时,从沿 119°E 500 hPa 温度纬向-时间剖面图(图略)中可知,13 日之前中高纬度 500 hPa 温度变化平稳,冷暖空气处于对峙状态,而在 13 日暖空气有所增强,14 日有弱冷空气南下,而 14 日后期到 15 日暖气团再一次增强,16—17 日有一股较强冷空气南下,前期稳定的高空温度变化和后期冷暖气团的更替为这次持续雾霾天气提供了大的环流背景,直到 16 日后期才彻底改变前期的雾霾形势。22—31 日高空温

度的时间演变更加呈现平稳的变化趋势,期间没有明显冷空气南侵,在 40°N 以北的区域冷空气势力都较弱。在此背景下一方面有利于暖湿气团的北上,为雾霾形成提供一定的水汽条件,另一方面也利

于近地层形成稳定的大气层结条件。因此,冬季明显的回暖和较弱的冷空气势力为 2013 年 1 月江苏雾霾持续发生提供了有利的稳定层结和水汽条件。

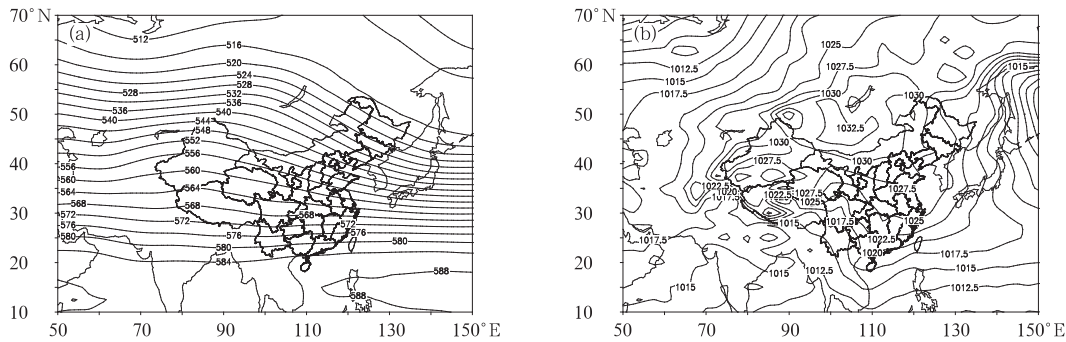


图 2 2013 年 1 月 500 hPa 平均高度场(a, 单位: dagpm)和平均海平面气压(b, 单位: hPa)
Fig. 2 Mean height field at 500 hPa (unit: dagpm) and mean sea level pressure (unit: hPa) in January 2013

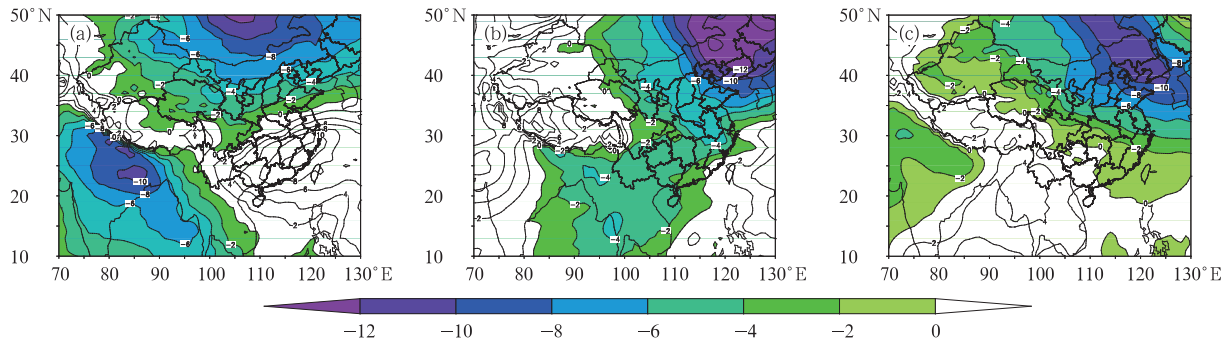


图 3 2013 年 1 月江苏省不同时间段 500 hPa 平均经向风速
(a)6 日 08 时至 13 日 08 时, (b)13 日 20 时至 17 日 20 时, (c)22 日 08 时至 31 日 08 时
(南风为正值,北风为负值;单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 3 Mean meridional wind at 500 hPa in Jiangsu in January 2013 periods
(a) 08:00 BT 6–08:00 BT 13, (b) 20:00 BT 13–20:00 BT 17, (c) 08:00 BT 22–08:00 BT 31
(South wind is positive and north wind is negative; unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

2.2 利于持续性雾霾形成的气象要素分析

2013 年 1 月南京站能见度自动监测资料与不同气象要素之间的变化关系(图 4)显示,除 17—20 日能见度较好外,其他时段均出现了 5 km 以下能见度。持续性事件的发生在一些气象要素上是否具有一定的共性,首先,从与雾霾形成关系最密切的湿度条件分析,12 日前湿度条件较差,大部分时段湿度在 80% 以下,即便在早晨湿度较大时,空气中的饱和度仍不够,难以形成雾,这也是全省大部分地区 6—12 日多为霾的主要原因。13—15 日近地面相对

湿度明显增大且持续时间较长,于 13 日夜间至 14 日上午、14 日夜间至 15 日早上江苏大部分地区出现“霾—雾—霾”的转换。后期 21—31 日同样出现湿度持续较大时段,特别是早晨近地面相对湿度 85% 以上,再次为持续性雾霾发生提供了较好水汽条件。1 月江苏出现持续的偏东风,风速在 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下,特别是发生大雾时风速仅 $1 \sim 2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。风向风速都利于出现雾霾天气。温度与露点的分布也呈现较好的水汽凝结条件,9—15 和 21—31 日 $T - T_d$ 都相对较小,凌晨至上午 $T - T_d$ 接近于 0,利于近地面大气中水汽达到饱和而凝结,致使大气能

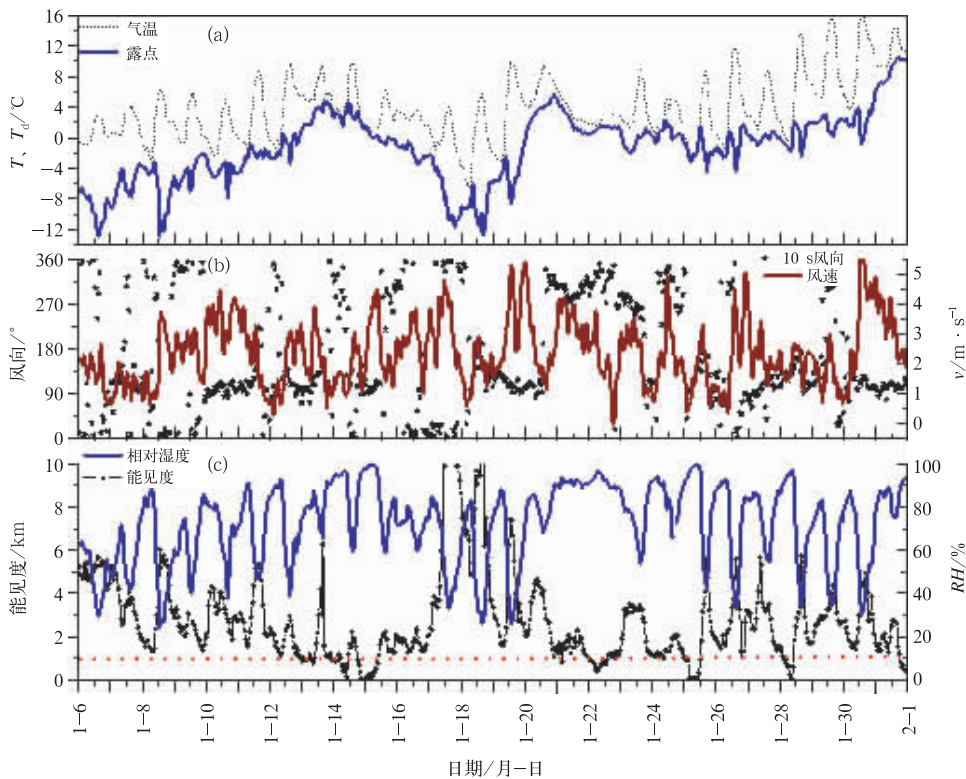


图 4 2013 年 1 月南京站气温、露点(a), 风向、风速(b)和相对湿度、能见度(c)的变化
Fig. 4 Change in temperature and dew-point (a), wind speed and direction (b), relative humidity and visibility (c) in Nanjing in January 2013

能见度降低。可见,持续较好的湿度条件、较小的温度露点差、高频率偏东风且风力较小等条件为 1 月江苏持续性雾霾的发生提供了有利的气象要素条件。

3 13—14 日大雾形成机制分析

1 月持续雾霾期间,13 日夜间至 14 日全省出现较强的大雾天气。本次雾开始于 13 日 20 时左右,14 日 02 时左右江苏北部雾加强,能见度降至 100 m 以下(图 5a),且持续到 14 日 13 时左右,14—20 时大部分地区为霾。14 日出现两次能见度明显降低时段,分别在 02—13 和 18—21 时。从起雾时间、维持时间和区域分布特点分析,本次雾呈现平流雾和辐射雾的共同特点,首先,起雾时间自北向南逐渐开始,淮北地区在 14 日 02 时左右开始加强,沿江苏南一带在 05 时之后加强。其次,本次雾持续时间较长,特别是徐州到淮安一带从凌晨到 13 时左右能见度均在 100 m 以下,南部地区 11 时之前能见度在 500 m 左右,中午能见度有短暂好转,18 时之后全省大部分地区能见度再次出现下降。针对本次雾的特点,从环流、气象因子、动力、大气稳定度等方面展

开分析讨论,探究造成两次能见度降低和雾维持的气象条件。

3.1 13—14 日天气形势分析

从高空环流形势分析,雾发生前 12 日 20 时南支槽略有加强,暖湿气流增强,同时中高纬度河套地区存在弱的高空浅槽东移南下,受其影响,13 日白天江苏地面以偏东风为主,且沿江苏南出现小雨天气,下午到夜间天空状况转好,江苏在 14 日早上处于晴空区;13 日夜间到 14 日早上地面有弱冷空气南下,但冷空气主体位置位于内蒙古一带,且江苏地面风速较小。受前一天弱降水影响,江苏近地层湿度条件较好,同时,晴空辐射降温 and 近地层扩散南下的弱冷空气有利于低层逆温形成和维持,且冷平流作用也加剧了雾滴的形成。即晴空辐射和平流作用促使了 13 日夜间到 14 日前期雾的增强。从 2013 年 1 月前期雾霾和 13—14 日雾霾加重的形势对比分析发现,一是湿度条件的差异,前期虽有南支系统发展,但江苏中低层一直处于弱的沿海槽形势下,水汽的输送位置偏南,湿度条件较差,而后期 12—13 日南支系统有所北抬且造成沿江苏南的降水,说明

整个湿度条件比前期更利于雾的形成。二是云系的差异,前期虽没有降水但云系较多不利于辐射降温,而13日夜间接受东移西风槽后西北气流控制天空状况较好,利于辐射降温。可见,前期暖湿气流的增强以及浅槽快速东移造成的13日夜间接到14日早上天空状况转好为雾的增强提供了水汽和天气背景,地面弱冷空气的南侵促使水汽快速凝结也是雾增强的因素之一。

3.2 雾增强气象要素分析

13日20时后江苏北部地区能见度明显下降,从淮安站逐10 min能见度变化分析(图5b)来看,13日20时后能见度降至500 m以下,14日01:30再次下降,出现了能见度仅50~100 m的大雾,且持续到14日13时左右。结合雾增强的相关气象因子分析,淮安(图5a),湿度条件在雾发生期间都较好,近地面相对湿度达到90%并维持时间较长,仅在14日14—17时期间湿度下降,对应该时段能见度也有所上升。温度、风速的变化和能见度变化有很好的一致性,在14日01:30前后温度、风速均出现了下降,特别是在02—04时左右地面温度下降了近4℃,对应着这段时间前后能见度骤降至100 m以下;另外,在雾迅速加强和维持时段,近地面风速都维持在 $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以下。近地面较小风速以及温度的快速下降可在短时间内使雾体增强,这与濮梅娟等(2008a;2008b)研究的雾爆发性成因一致。可见,辐射冷却和平流降温是雾增强的一个重要原因。这次过程中南部地区大雾开始相对较晚,以南京站能见度和相关气象要素变化为例(图略),14日06:50能见度明显下降,上午09:30再次下降至500 m以下,10:20—19:00之前能见度相对较好。南京大雾严重时段出现在14日20时之后。14日凌晨南京温度并没有表现出明显的下降,09:30能见度的明显下降,主要是由于地面蒸发增强,近地面层空气水汽增加造成。13日沿江苏南地区出现小雨,地面比较潮湿,日出后地表蒸发增强,加上温度较低促使雾体增强,同时09时风速也有减弱。而南京14日20时之后雾加强时温度出现明显下降,风速也降到了 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,此时温度冷平流起到一定作用。可见,本次雾过程中较大相对湿度和较小风速的维持对大雾的持续具有一定的作用,而地面辐射降温 and 弱冷平流共同作用引起的温度快速下降以及日出后潮湿地面蒸发对雾的加强起到一定的触发作用。

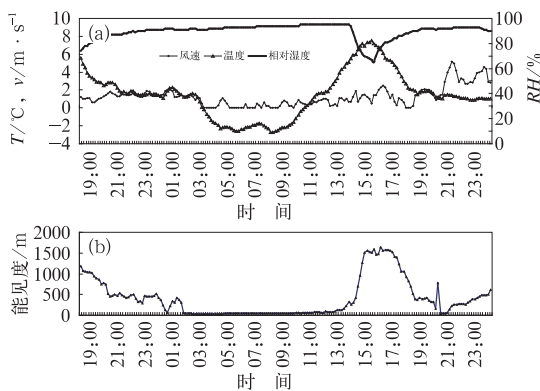


图5 淮安站2013年1月13日18时至14日24时每10 min各因子变化
(a)温度、湿度和风速, (b)能见度
Fig. 5 Changes of every factor every ten min from 18:00 BT 13 to 24:00 BT 14 of January 2013 at Huaian Station
(a) temperature, humidity and wind speed, (b) visibility

温度露点差也是大气湿度的反映,可以用来界定饱和空气和干空气,通常以温度露点差 $\geq 6^\circ\text{C}$ 的空气定义为干空气或未饱和的湿空气,当温度露点差越小越容易发生水汽凝结,当空气中有大量颗粒物时,很容易形成雾滴。图6给出了淮安(图6a)和南京(图6b)温度露点差时间垂直剖面分布情况,在整个雾霾发生期间(6—16日)温度露点差的特征对雾的产生加强具有很好的体现。前期轻雾和霾发生期间近地面也存在一定的饱和湿空气, $T - T_d < 6^\circ\text{C}$,但整个饱和湿层厚度较低,且持续时间短,中高层湿度也较大,不利于夜间的晴空辐射降温,这也是前期没有产生强雾的原因之一。而从13日开始上下层温度露点差的分布发生了明显变化,先是低层饱和湿空气的增强加厚,且在13—17日前期地面到900 hPa一直维持 $T - T_d < 6^\circ\text{C}$ 的饱和湿度层,更值得关注的是13日夜间接到15日中高层出现了一定强度的干空气活动,温度露点差达到 20°C 以上。对流层中上层干层的存在对雾的发生和维持起到重要的作用,因为对流层中高层相对较干有利于夜间辐射降温,低层空气容易达到饱和,若湿层太厚或对流层整层均为湿层则容易出现阴天或降水,反而不利于雾的发生和维持。干空气最强盛阶段和两地浓雾持续阶段对应也较好。可见,在雾的形成中近地面层饱和湿度层固然重要,中高层干空气的作用也是雾加强的一个重要因子。

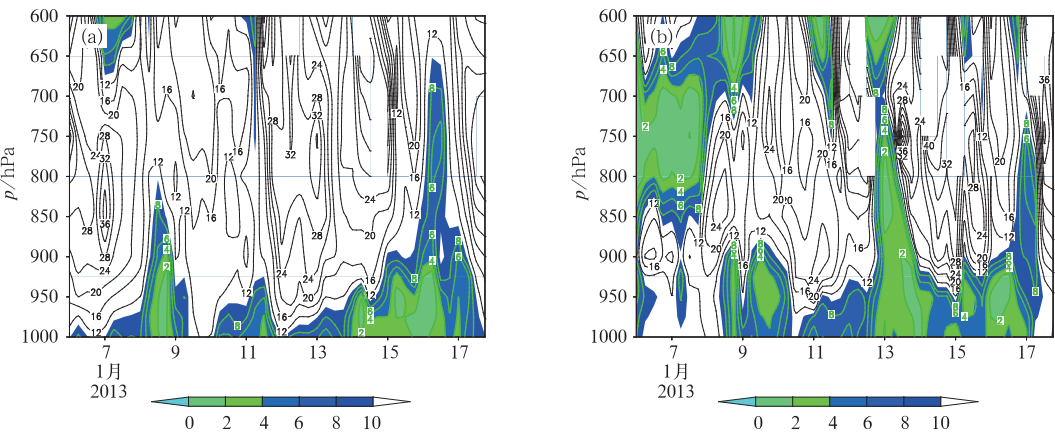


图 6 2013 年 1 月 6—17 日(a)淮安和(b)南京温度露点差垂直时间剖面(单位: $^{\circ}\text{C}$)
Fig. 6 Huaian (a) and Nanjing (b) Temporal-vertical profile of $T - T_d$ (unit: $^{\circ}\text{C}$) from 6 to 17 January 2013

3.3 温度平流分析

13 日夜间至 14 日从雾的发生、加强、减弱到再次加强阶段,温度变化起到重要作用。13 日夜间冷空气侵入江苏,天空转晴,冷空气降温和辐射降温一起有利于大雾形成。图 7 是 13 日 20 时至 14 日 20 时温度平流沿 119°E 纬度-垂直剖面。在雾发生前的 13 日 20 时(图 7a) $32^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$ 区域内地面到 850 hPa 高度是弱的暖平流,中高层冷平流也较弱,

上下层均处于相对稳定的状态,14 日 02 时(图 7b) 900~700 hPa 高度层的暖平流增强,近地面还存在弱的冷平流,这样一种冷暖平流结构有利于近地层逆温层结的形成,从而有利于地面大雾的形成。14 日 08 时(图 7c)是江苏大面积雾加强时段,对应的近地层也出现了较明显的冷平流,其厚度达到 950 hPa 高度以上,冷平流的作用不仅加强了低层的稳定层结,而且加速了近地面水汽的饱和速度,使雾体快速发展。在冷平流作用下形成的雾和单纯辐

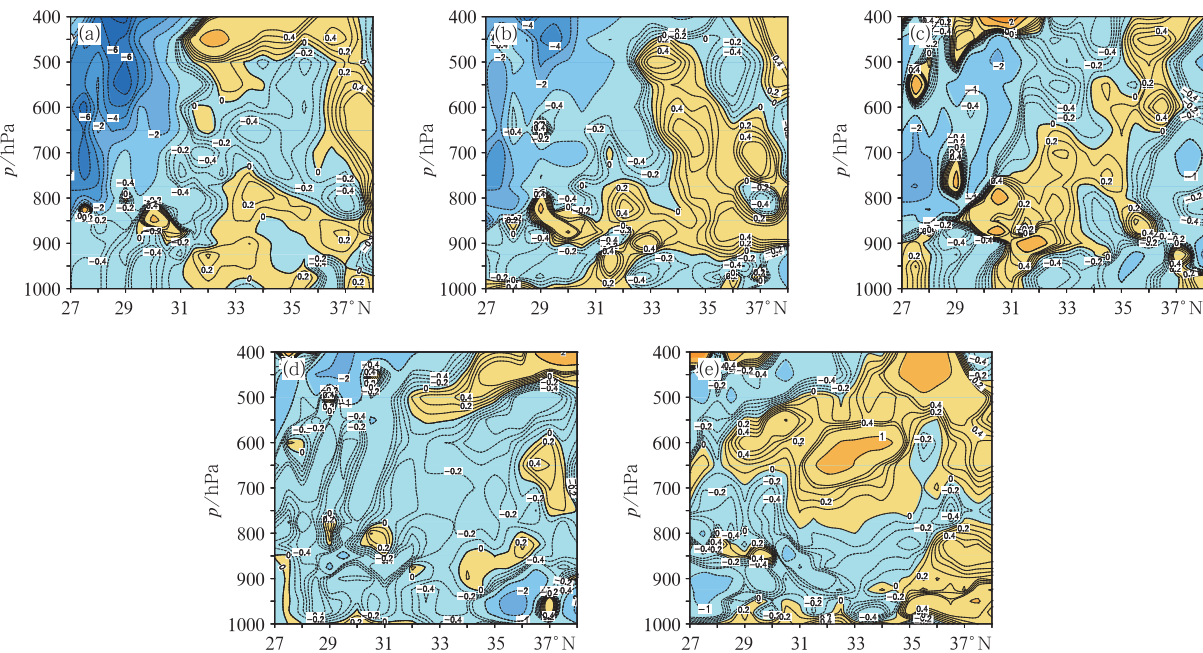


图 7 2013 年 1 月 13 日 20 时至 14 日 20 时不同时段温度平流沿 119°E 的剖面图(单位: $10^{-4}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a)13 日 20 时, (b)14 日 02 时, (c)14 日 08 时, (d)14 日 14 时, (e)14 日 20 时
Fig. 7 Profile of temperature advection along 119°E at different times from 20:00 BT 13 to 20:00 BT 14 January 2013 (unit: $10^{-4}^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)
(a) 20:00 BT 13, (b) 02:00 BT 14, (c) 08:00 BT 14, (d) 14:00 BT 14, (e) 20:00 BT 14

射雾消散时间有着明显不同,冷平流作用下整个逆温层结稳定较难打破,这也是雾持续时间较长的原因之一。直到 14 时大部分地区能见度才略有改善,进一步从 14 时(图 7d)温度平流分析发现,原来 900~700 hPa 高度层的暖平流转为冷平流,稳定的层结结构由于冷空气的侵入发生一定的改变,同时中午前后地面温度也会有所上升,大气的饱和程度也发生了改变,使得雾减弱。但 20 时(图 7e)温度平流再次发生变化,900 hPa 以下冷平流增强,900~700 hPa 高度层的冷平流减弱,暖平流明显增强,此时说明暖湿气团再次活跃增强,暖平流在冷的下垫面上,也有利于平流雾的形成。可见,低层弱冷平流和上层暖平流作用促使稳定层结的长时间维持和近地层水汽凝结的加强,为雾的加强和维持起到了重要的作用。

3.4 大气层结稳定度分析

近地层逆温层结的存在是雾形成的判据之一。从徐州站 13 日 20 时至 14 日 20 时的温度层结分析(图 8),13 日 20 时(图 8a)地面到 150 m 左右是一段明显逆温,150~700 m 左右是一段等温层,近地

面温度层结非常稳定,为徐州后期雾的加强起到很好的基础。随着夜间辐射降温和平流降温共同作用,13 日 23 时徐州站已由轻雾加强为雾,能见度逐渐降低,02 时左右能见度仅几十米。由于探空资料的限制,夜间温度变化并不清楚,但这点可以从 14 日 08 时温度层结曲线推测分析(图 8b),14 日 08 时地面到 850 hPa 高度都存在很强的逆温,和 13 日 20 时相比逆温厚度增大,强度加强,近地面温度下降 4℃,温度露点差减小,这些变化也是 14 日凌晨徐州大雾加强的原因。14 日 20 时(图 8c)近地面逆温层结依旧很强,近地面湿度比前期更加深厚,为 14 日夜间雾的加强维持提供了较好条件。南京站在大雾形成前后温度层结也存在类似特征(图略)。可见,近地面温度明显下降和逆温层结形成对大雾天气的形成极为有利,并有可能造成能见度的急剧下降,逆温层结的维持为大雾天气的持续提供了有利条件。

3.5 动力条件分析

雾的发生虽是在稳定大气层结状况下发展产生,但近地面弱的上升运动和中高层弱的下沉更利于雾的增强形成。图 9 为 13—14 日大雾产生前后

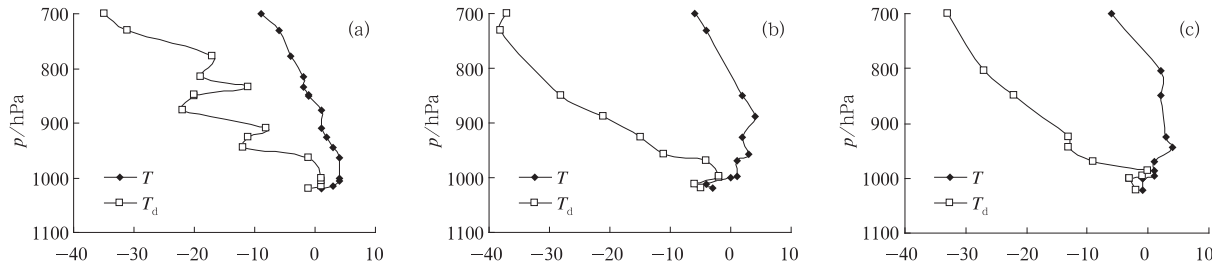


图 8 徐州 1 月 13—14 日不同时次温度层结曲线(单位:℃)
(a)13 日 20 时, (b)14 日 08 时, (c)14 日 20 时

Fig. 8 Temperature stratification curve at Xuzhou Station at different times in 13—14 January (unit:℃)
(a) 13:20 BT, (b) 14:08 BT, (c) 14:20 BT

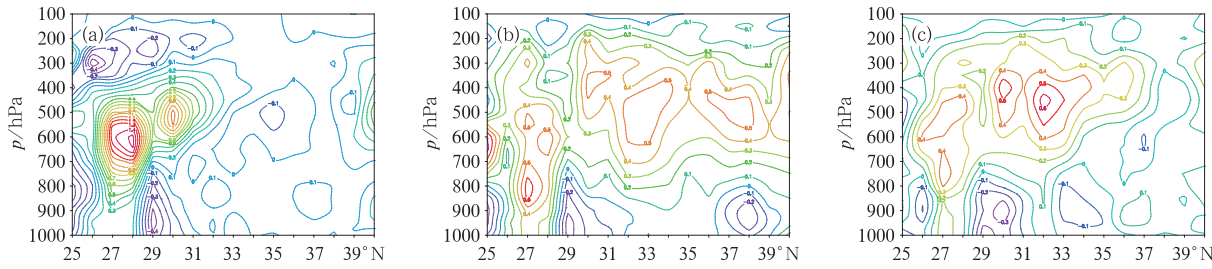


图 9 2013 年 1 月 13—14 日沿 119°E 垂直速度剖面图(单位:10⁻³ hPa·s⁻¹)
(a)13 日 20 时, (b)14 日 08 时, (c)14 日 14 时

Fig. 9 Profile of vertical speed along 119°E (unit: 10⁻³ hPa·s⁻¹)
(a) 20:00 BT 13, (b) 08:00 BT 14, (c) 14:00 BT 14, January 2013

沿119°E垂直速度的剖面分布,13日20时(图9a)大雾产生前江苏上空无明显的上升和下沉运动。但在14日08时(图9b)近地面800 hPa的高度以下垂直速度基本为负值,江苏上空存在弱的上升运动,同时在850 hPa以上垂直速度为正值,中高层存在弱的下沉运动,这种垂直速度的分布持续到14日14时(图9c),促进了雾体的加强和维持。可见,这种近地面上升、中层下沉的垂直速度分布为本次雾加强维持提供了较好的动力条件。

4 结 论

通过对2013年1月江苏雾霾持续性和大雾天气形成机制分析,在雾霾预报的认识上得出以下几条结论。

(1) 500 hPa高度场中高纬较为平直的纬向环流,地面上江苏处于高压底部偏东气流中,冷高压主体偏北,为1月发生持续雾霾天气提供了有利的环流背景。冬季,明显的回暖和较弱的偏北经向风导致的冷空气势力较弱为雾霾的持续发生提供了近地面有利的稳定层结、水汽和饱和凝结条件。

(2) 近地面相对湿度在85%以上,风速 $<3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,风向以偏东风为主,温度露点差较小($<3^{\circ}\text{C}$),空气中水汽易达到饱和,这些条件的长时间维持为持续雾霾发生提供了良好的气象因子条件。

(3) 地面辐射降温 and 弱冷平流共同作用引起的温度快速下降以及日出后潮湿地面蒸发增强对雾的加强起到一定的触发作用;另外,中高层干空气的作用也是雾加强的一个重要因子。

(4) 近地面冷平流和混合层以上暖平流为本次雾增强和维持提供了稳定的大气层结条件。近地面弱上升运动、中高层弱的下沉运动是14日凌晨雾快速加强的动力机制。

参考文献

- 曹伟华,梁旭东,李青春.2013.背景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.
- 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.
- 邓雪娇,黄健,吴兑,等.2006.深圳地区典型大气污染过程分析.中国环境科学,26(增刊):7-11.
- 靳利梅,史军.2008.上海雾和霾日数的气候特征及变化规律.高原气

- 象,27(增刊):138-143.
- 李子华,黄建平,孙博阳,等.1999.辐射雾发展的爆发性特征.大气科学,23(5):623-631.
- 李子华,刘端阳,杨军,等.2011a.南京市冬季雾的物理化学特征.气象学报,69(4):706-718.
- 李子华,刘端阳,杨军.2011b.辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件.大气科学,35(1):41-54.
- 李子华,彭中贵.1994.重庆市冬季雾的物理化学特性.气象学报,52(4):477-483.
- 李丽珍,沈振兴,杜娜,等.2007.霾和正常天气下西安大气颗粒物中水溶性离子特征.中国科学院研究生院学报,24(5):674-679.
- 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.气象学报,67(1):147-157.
- 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.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.中国科学(D辑),38(6):776-783.
- 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.
- 王丽萍,陈少勇,董安祥.2005.中国雾区的分布及其季节变化.地理学报,60(4):689-697.
- 王继志,徐祥德,杨元琴.2002.北京城市能见度及雾特征分析.应用气象学报,13(特刊):160-169.
- 吴彬贵,张宏升,汪靖,等.2009.一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析.高原气象,28(2):258-267.
- 吴兑,毕雪岩,邓雪娇,等.2006.珠江三角洲气溶胶云造成严重灰霾天气.自然灾害学报,15(6):77-83.
- 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将度研究.气象学报,65(3):406-415.
- 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,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.
- 严文莲,刘端阳,濮梅娟,等.2010.南京地区雨雾的形成及其结构特征.气象,36(10):29-36.
- 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.
- 周贺玲,李丽平,乐章燕,等.2011.河北省雾的气候特征及趋势研究.气象,37(4):462-467.
- Malm W C, Gebhart K A, Molenar J, et al. 1994. Examining the relationship between atmospheric aerosols and light extinction at Mount Rainier and North Cascades National Parks. Atmos Environ, 28(2):347-360.
- Wu D, Tie X, Deng X. 2006. Chemical characterizations of soluble aerosols in Southern China. Chemosphere, 64:749-757.