

王博妮,张雪蓉,濮梅娟,等,2019.一次平流雾的形成和传播特征研究[J].气象,45(3):395-406. Wang B N, Zhang X R, Pu M J, et al, 2019. Characteristics of the formation and spread of an advection fog[J]. Meteor Mon, 45(3):395-406(in Chinese).

一次平流雾的形成和传播特征研究^{*}

王博妮^{1,2} 张雪蓉^{1,4} 濮梅娟³ 王宏斌⁴ 陈玉石²

1 中国气象局交通气象重点开放实验室,南京 210008

2 江苏省气象服务中心,南京 210008

3 江苏省气象台,南京 210008

4 江苏省气象科学研究所,南京 210008

提 要: 2013年3月18—19日,江苏出现了一次罕见的平流雾过程,雾区先在长江北岸形成,继而向苏北传播。本文对这次平流雾的形成机理及特征进行了分析,并对雾区的传播机制进行了研究。结果表明:此次平流雾的形成主要受冷空气控制后暖湿平流的影响,冷锋过境后的影响是平流雾形成的基础,东海变性冷高压北抬是其形成的必要条件;地面东南风和低空东南水汽输送共同推动雾区向北传播;长江、洪泽湖、高邮湖等水域对平流雾增强起着重要作用;强浓雾呈渐进式发展,爆发性增强不明显以及云雾共存结构等是本次平流雾的主要特征。本论文的研究结果对平流雾的预报具有重要的实用价值。

关键词: 平流雾,特征,传播机制

中图分类号: P426.4, P458

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.009

Characteristics of the Formation and Spread of an Advection Fog

WANG Boni^{1,2} ZHANG Xuerong^{1,4} PU Meijuan³ WANG Hongbin⁴ CHEN Yushi²

1 Key Laboratory of Transportation Meteorology, CMA, Nanjing 210008

2 Jiangsu Meteorological Service Centre, Nanjing 210008

3 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008

4 Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

Abstract: The event of an advection fog occurred in Jiangsu Province during 18—19 March 2013. It firstly formed in the north bank of Yangtze River and then spread to northern Jiangsu Province. In this study, the formation mechanism and characteristics of this fog event are analyzed, and the transmission mechanism of the fog is particularly emphasized. The results indicate that this advection fog event was formed by the influence of warm and humid advection after being controlled by cold air. The cold front transit was the basic condition for the formation of advection fog. The north lift of the denatured cold high pressure from East China Sea was helpful for the formation of this advection fog event. The fog area moved northward as the result of the promoting role of southeast wind from the ground and water-vapor transfer toward southeast at low altitude. The waters of Yangtze River, Hongze Lake and Gaoyou Lake played significant roles in enhancing the development of the advection fog. The heavy fog developed gradually with insignificant

^{*} 国家自然科学基金项目(41575135, 40975085, 41340042)、江苏省自然科学基金(BK20161073)、江苏省气象局面上项目(KM201807)和江苏省气象服务中心自立课题共同资助

2017年11月8日收稿; 2019年1月16日收修定稿

第一作者:王博妮,主要从事气象预报服务与大气环境研究. Email: bnsmile@163.com

通信作者:濮梅娟,主要从事天气动力学与大气物理研究. Email: pumeijuan@126.com

explosive increase and coexistence of cloud and fog as the main characteristics. These findings have practical values to the forecasting of advection fog.

Key words: advection fog, characteristic, transmission mechanism

引 言

大雾是我国中东部地区深秋、晚冬和春季最为常见的灾害性天气之一,给人民群众的身体健康、交通出行和生态环境等带来严重影响。江苏地区浓雾类型主要有辐射雾、平流雾和锋面雾等,由于其东临黄海,受海上暖湿气流影响,春、冬季易发生平流雾,而平流雾往往具有突发性强、持续时间长、强度大和影响范围广等特点,对交通出行有相当大的影响(李子华, 2001)。

国外学者如美国气象学会把海雾直接定义为平流(冷却)雾,是指空气团从暖洋面平流到冷洋面时,低层的空气冷却至露点而形成的水滴悬浮于近地层而使水平能见度小于 1 km 的天气现象(Leipper, 1994)。因此最初对平流雾的研究主要是通过对大西洋、太平洋的滨海、岛屿或海雾的研究来了解平流雾的天气学成因、气象要素变化(Pilié et al, 1979; Gultepe et al, 2007)、边界层条件(Kim and Yum, 2012a; 2012b)、湍流和辐射机制(Lewis et al, 2004)等宏观特征以及微物理结构(Koračin et al, 2001; 2005; 2014)。中国黄海是海雾的高发区域且多以平流冷却雾为主(王彬华, 1983; 张苏平和鲍献文, 2008)。黄彬等(2014)发现入海高压后部和低压倒槽前部有利于黄海平流雾的发生,并与风向、风速、相对湿度、气水温差等要素有关。周福等(2015)发现宁波海雾的强度与暖平流有较大关系。许爱华等(2016)统计分析出江西区域性平流雾多发生于 2—3 月。袁娴和陈志豪(2013)发现上海机场的平流雾会受到局地地形的影响。

随着计算机能力的提升,不少学者通过优化中小尺度数值模式,将数值预报产品与天气学方法相结合,以提高平流雾的预报能力。梁爱民等(2009)利用 MM5 模式模拟北京平流雾,发现雾区边缘有明显的水平温度梯度。目前 WRF 模式作为主流模式被广泛应用到平流雾预报中,张苏平和任兆鹏(2010)利用 WRF 模式对黄海春季典型平流雾过程

进行分析,结果表明平流雾雾区内气海温差明显小于雾区外。袁金南和黄健(2011)将 WRF 模式与边界层资料相结合来探讨海雾的成因,发现海雾的形成和发展与冷的下垫面和暖湿空气的影响有关。此外,通过提高 WRF 模式的垂直分辨率优化模式性能,达到改进水平雾区的模拟效果(Wang et al, 2014; 杨悦和高山红, 2016),也有不少学者不断改进边界层参数化方案等方式(黄政等, 2016; 王益柏等, 2014),以提高对平流雾中风向风速、液态水含量等要素的模拟能力。

湍流输送机制是平流雾形成的主要作用机制(王彬华, 1983)。Duynderke(1999)和 Nishikawa et al(2004)研究发现在平流雾的形成和消散过程中湍流输送的作用显著。吴彬贵等(2010)和马翠平等(2014)利用铁塔观测资料分析,发现天津地区平流雾生消过程中大气稳定度多呈现出弱不稳定状态。平流雾边界层的研究离不开外场观测,濮梅娟等(2008)、陆春松等(2010)利用外场综合观测资料,研究发现南京冬季一次平流辐射雾具有雾顶高、雾水酸、爆发性强等特征,并认为暖湿气流的不断补充和系统性下沉运动对其生成起关键作用。Liu et al(2016)运用外场观测资料研究发现在 2009 年南京冬季一次平流雾过程中,雾顶高度维持在 0.6 km 以上。郭丽君和郭学良(2015; 2016)通过对比雾过程中微波辐射计和系留气艇观测的温度与相对湿度数据,表明两种探测方式具有很好的一致性以及北京地区持续性平流雾平均雾顶高度不超过 1 km。

总体看来对平流雾的研究多集中在天气学成因、边界层特征,以及典型个例的数值模拟等方面,对平流雾雾区传播机制的研究甚为少见。而这个问题对于交通气象预报服务非常重要,雾区的预报有利于及时发布交通气象预警预报,以便高速管理部门有针对性地采取逐段、逐时封路及分流等措施,从而预防交通事故的发生。2013 年 3 月 18—19 日,江苏出现了一次平流雾过程,由沿江向北移动,直至山东境内(王博妮等, 2015; 2016)。本文重点分析此次平流雾的成因、特征和传播机制,为此类雾的预报

提供科学依据。

1 观测资料来源及处理

本研究主要采用地面常规资料、NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 格点资料、L 波段探空雷达数据和逐分钟的交通气象监测资料。地面常规资料,主要为江苏 72 套基本气象观测站和 1779 套高密度加密站器测温度、相对湿度等基本要素资料。格点数据为 NCEP 每日四次的观测 FNL 资料,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。交通气象监测资料来自省内 23 条高速公路和长江航道的 362 套自动站,数据包括能见度、温度、相对湿度、风向、风速、降水、路面温度等,时间分辨率为 1 min,空间分辨率为 10 km。射阳站提供 L 波段探空雷达数据,数据为 1 s 每组的温度、相对湿度、风速和风向等气象要素,每日早晚观测两次(07 和 19 时)。本次研究中所用自动站仪器经过标定,数据经过质量控制,数据翔实、可靠。图 1 给出了各观测站点的空间分布。

2 雾过程概述

2013 年 3 月 18—19 日早晨江苏沿江及其以北地区出现了大范围能见度低于 0.5 km 的浓雾天气。图 2 为雾发生的时间,图 3 给出了雾区生、消演变过程。从图 2、3 中可以看出,18 日 23 时(北京时间,下同)左右雾在如皋、海安、兴化、盱眙等地率先生成。起初雾区分布较零散,到了 19 日 00 时紧靠长江北部一带,有成片的雾区生成,02—03 时雾区向北扩展到江淮之间北部的射阳、阜宁、淮安、睢宁。

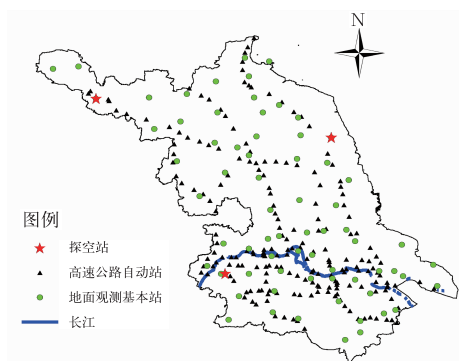


图 1 江苏各观测站点地理分布

Fig. 1 Distribution of observation stations in Jiangsu

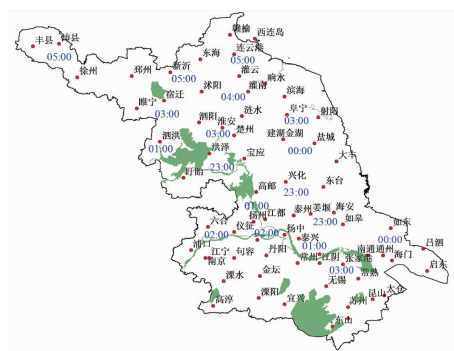


图 2 2013 年 3 月 18—19 日
大雾过程江苏各地起雾时间

Fig. 2 Fogging time in different areas
of Jiangsu during 18—19 March 2013

之后雾区继续向北移动,直至位于淮北的徐州和连云港地区。06—07 时是雾发展最强盛的时段,沿江以北大部分地区能见度普遍低于 0.5 km,在启东、镇江和仪征等地出现了能见度低于 0.05 km 的特强浓雾。08 时开始随着地面温度上升和风向转为南风,雾强度逐渐减弱、浓雾区域缩小,能见度开始上升。11 时左右雾逐渐消散。可见这次平流雾具有影响范围广、持续时间长的特点,给交通带来了极大影响。江苏省内的宁靖盐高速、宁宿徐高速、沿海高速、宁通高速、宁连高速、宿淮盐高速、京沪高速等 7 条高速公路先后封闭。长江水运航道在 19 日 01 时左右被迫封航。

3 环流形势分析

3 月 18 日白天,受高空槽过境影响,江苏大部分地区出现小雨天气。18 日 20 时 500 hPa 江苏处在东北冷涡底部的西北偏西气流中,孟加拉湾地区的南支槽有加深北抬东移的趋势。850 和 925 hPa (图 4a) 在鲁东地区有东西向的等温线密集带,对应地面冷锋的位置。随着锋区向南移动,850 hPa 上射阳站温度露点差仅为 2°C , 12 h 降温 5°C , 低层锋后表现为强劲的东北风,使地表温度下降,空气易达到饱和凝结和逆温形成,这有利于地表温度下降,空气易达到饱和凝结以及逆温的形成。

3 月 19 日 08 时 850 hPa 在 $33^\circ \sim 37^\circ\text{N}$ 、 $108^\circ \sim 122^\circ\text{E}$ 有一条狭长西南急流带存在,江苏沿江以北地区处在急流带右侧的下沉气流中。在 115°E 附近有明显暖舌北抬到 35°N 以北(图 4b),暖舌(粗实

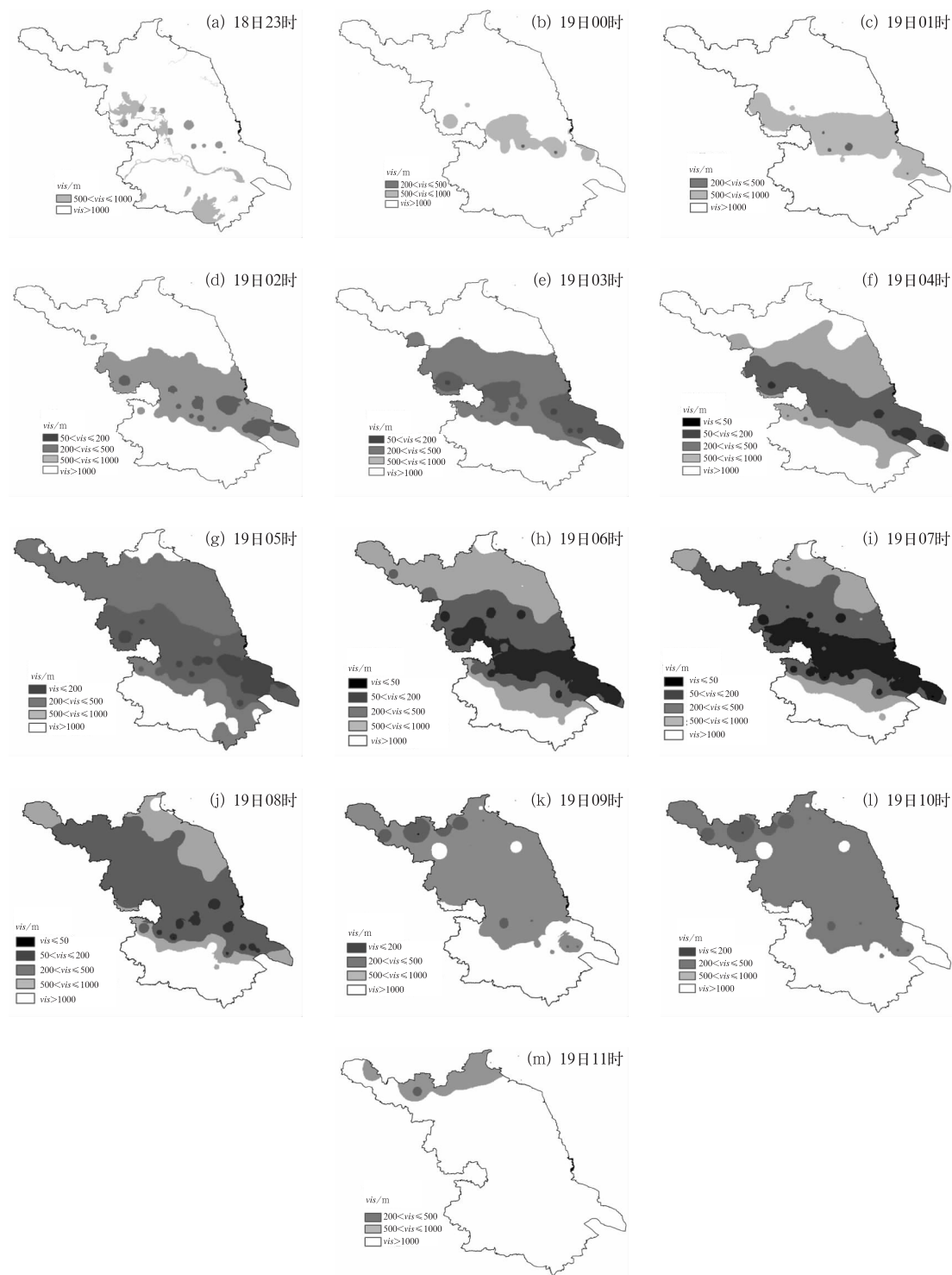


图 3 2013 年 3 月 18—19 日江苏能见度(vis)空间演变过程

Fig. 3 Spatial evolution of visibility in Jiangsu during 18–19 March 2013

线)对低空逆温层的存在起着关键作用,同时加强水汽堆积,使其不易向上扩散,雾进一步得到发展维持。925 hPa 雾区上空为 $12 \sim 16 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的西南风,徐州站 12 h 增温幅度达 7°C ,射阳站增幅为 4°C ,增

温可有效抑制上升运动的发展,使得大气层结更加稳定,有利于雾在江苏沿江以北地区发生、发展。

江苏地区平流雾发生时最常见的地面形势为冷锋锋面在山东北部—河南北部或陕西中部—湖南北

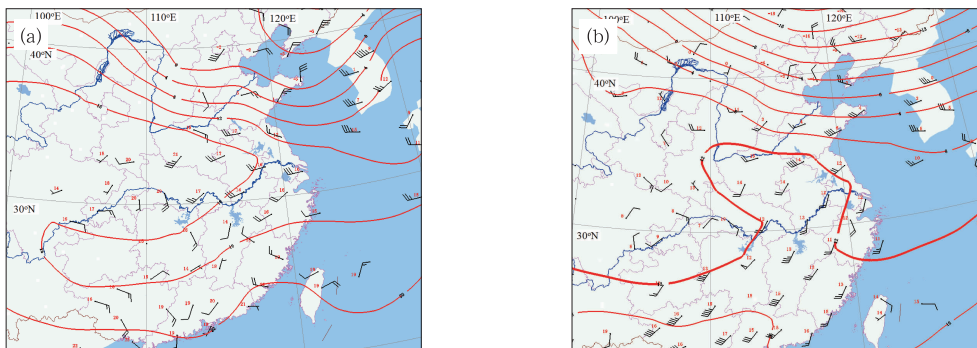


图4 2013年3月18日20时925 hPa(a)和19日08时850 hPa(b)的风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)和温度场(实线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 4 Wind (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) and temperature (solid line, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 925 hPa at 20:00 BT 18 (a) and at 850 hPa at 08:00 BT 19 (b) March 2013

部一线,江苏处在弱低压区(倒槽)东部或入海高压后部,地面吹偏东风或东南风,偏东南气流将海上的暖湿水汽输送到江苏,暖湿气流经过比较冷的下垫面时,如果大气层结稳定,就易产生平流雾。18日20时(图5a),在地面图上可以看出在山东东部地区有冷高压脊南伸,表现为地面有冷锋从江苏东北部向南移动,冷锋后部为 $2 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北风且气温迅速下降,变冷的下垫面为平流雾的产生提供有利的冷却条件。低压前部与入海高压后部的强偏东风为雾区输送水汽促使雾的发生和发展。19日02时(图5b),东海变性冷高压增强北抬,江苏处在其后部,沿江以北地区转为 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 东南风,有利于海上水汽输送到江苏,暖湿气流流经先前变冷的下垫面上,使得平流雾发生、维持。沿江地区风向辐合明显,辐合线有利于饱和湿空气在其附近聚集(宋润田等,1999),这也是长江北岸浓雾长时间维持的

原因之一。

配合图3雾区生消空间演变可以看出,雾消散也是自南向北逐渐消散的,这也与东海变性高压加强北抬有关。由3月19日08时地面图可以看出(图5c),长江北岸大部分地区风向已转为南到西南风,切断了黄海湿空气向雾区的输送,因而雾已开始减弱,而沿江地区仍维持东南风,海上水汽继续输送,所以雾不仅没有减弱,反而有增强之势。地面辐合线北抬到淮北地区,该地区仍维持东南风,直至11时,江苏淮北地区平流雾依然维持。

由以上分析可见此次平流雾产生的天气背景是前期江苏省大部分地区有降水,空气湿度大;雾形成前地面有冷锋过境,冷锋过后地面转为强盛的东北风,地表降温明显;冷锋经过长江后减弱消失,东海变性冷高压增强北抬,江苏北部转为一致的东南风,湿度明显上升。

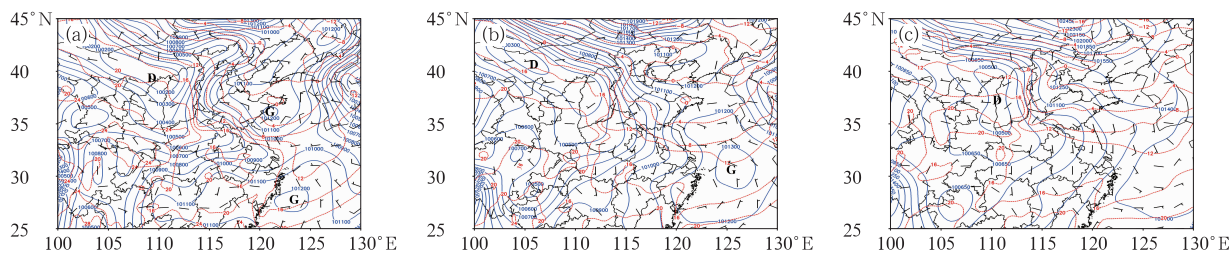


图5 2013年3月18日20时(a)、19日02时(b)和08时(c)的海平面气压场(蓝色线,单位:Pa)和温度场(红色线,单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 The sea level pressure (blue line, unit: Pa) and temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) at 20:00 BT 18 (a), 02:00 BT 19 (b) and 08:00 BT 19 (c) March 2013

4 平流雾的形成

平流雾通常是暖湿空气流到冷的地面而形成。本次平流雾受到冷暖平流先后影响,先是地面受冷

锋的影响。如图 6 所示,从 18 日 17 时左右在江苏东北部就有冷锋南下,锋后为 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北风,冷锋过后下垫面气温明显下降,到了 19 日 02 时冷锋抵达江苏西南边界,长江以北地区降温都在 10°C 以上(图 7),最大降温近 18°C 。冷锋过后,随着

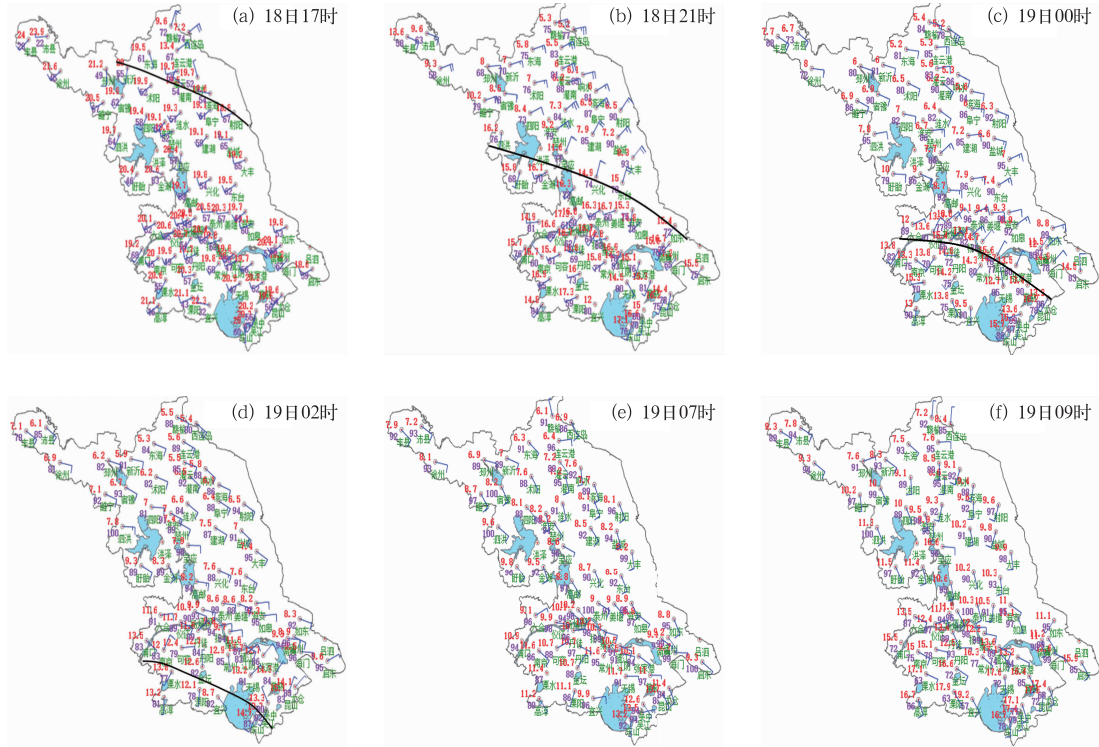


图 6 2013 年 3 月 18—19 日江苏省典型时次的风速(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)、风向(单位: $^\circ$)、温度(单位: $^\circ\text{C}$)和相对湿度(单位: $\%$)的空间演变
(黑色实线: 锋面位置)

Fig. 6 Spatial evolution of wind speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), wind direction (unit: $^\circ$), temperature (unit: $^\circ\text{C}$) and relative humidity (unit: $\%$) in Jiangsu at typical time in 18—19 March 2013
(black solid line: front position)

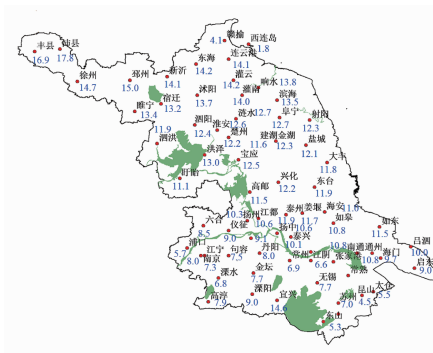


图 7 2013 年 3 月 18 日 17 时与
19 日 02 时温差(单位: $^\circ\text{C}$)

Fig. 7 Temperature difference (unit: $^\circ\text{C}$) between
17:00 BT 18 and 02:00 BT 19 March 2013

东海变性冷高压北抬,江苏北部地区风向逐渐顺时针右旋,由原来的东北风,逐渐转为东北偏东风—东风—东南风,平均风速为 $4 \sim 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6b)。在偏东气流影响下,沿江及苏北地区地表增湿明显,尤其在沿江和江苏西部洪泽湖周围相对湿度明显增大,最大增幅达 33% 。18 日 23 时之后,雾逐渐形成。可见,这次平流雾是在冷空气控制后,又在暖湿平流影响下形成的。先是冷锋南下,较强的冷平流使苏北地区气温大幅度下降,而后在偏东气流作用下,将海上暖湿空气输送到冷的下垫面,从而在近地面产生平流雾。平流雾发生区域均在锋后温差较大、相对湿度上升明显以及逆温强度较强的地区。

此次过程长江以南地区无雾,主要是因为冷锋

经过长江后就减弱消失,未使得苏南地区明显降温,从图7可以看出,冷锋过后降温仅几度,最小降温幅度为 4.5°C 。此外苏南地区始终吹西南风,从图5b海平面气压场上分析也无海上暖湿空气输送。所以苏南地区水平能见度较好,仅有轻雾发生。

以盐城站为例来具体说明平流雾的形成。图8为盐城站气象要素的时间变化曲线,由图可见,18日18时冷锋经过盐城之后,风向转为东北风,气温急速下降。18日18—22时,气温下降了 12°C 左右,此后,风向顺时针旋转。19日00时转为东风,继而转为东南风,与此同时,相对湿度持续上升,能见度下降。19日00时能见度为1 km,之后继续下降,直至日出后,气温和能见度同步上升,相对湿度下降,约09时雾消散。

以上分析表明,本次平流雾是在冷暖平流先后影响下形成的。先是冷锋后的冷平流使江苏地面大幅度降温,而后由于东海变性冷高压北抬,长江以北转为东南风,进而黄海的暖湿空气输送至冷的下垫面导致此次平流雾的形成。

5 平流雾过程中的若干特征分析

5.1 平流雾的传播

雾的传播是研究雾在一个点(或几个点)形成后,它是如何向四周蔓延,或是如何向下游传播、扩展的。搞清楚这个问题,对雾的预报特别重要。由

图3可以清楚地看出,本次平流雾在沿江一带生成后,逐渐形成了一条东南—西北向的浓雾带,而后又向北传播扩展。雾消散时,也是自南向北逐渐消散。

平流雾向北传播是本文需要研究的一个关键问题。由于本次平流雾是东南海域暖湿空气输送到苏北冷的下垫面形成的,所以雾区向北扩展与水汽向北输送有关。图9为大雾发展过程中975 hPa相对湿度和风矢量分布变化。从大雾前期3月18日20时(图9a),可以看到江苏沿江以北地区存在明显的风向辐合,加上西南暖湿气流向雾区输送水汽,共同促使沿江以北地区大雾的形成。到了3月19日02时(图9b),有两支明显的水汽输送带向雾区源源不断的输送水汽,其中来自海上的东南暖湿水汽输送带作为主输送带与西南暖湿气流输送带在苏北汇合、叠加,双重水汽输送作用为雾区提供充沛水汽,地面相对湿度达到了90%以上,促使雾大面积的向北传播、扩展。到了3月19日08时(图9c)大雾开始减弱,两支水汽输送带合并后,偏南风量增大,东南风和大湿度区向北推进至苏北北部和山东,与此同时地面雾区自南向北减弱。

水汽通量散度的变化可以反映雾区向北传播的特征。图10a为3月19日02时江苏1000 hPa水汽通量散度分布,可以看出雾开始增强时,在江苏有一条西北—东南向的水汽通量散度辐合带状区,它与雾区走向一致,这是在东南风作用下黄海水汽输送的结果。图中还显示,长江北部存在两个较强的水汽通量散度辐合大值区,强度为 $-3 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

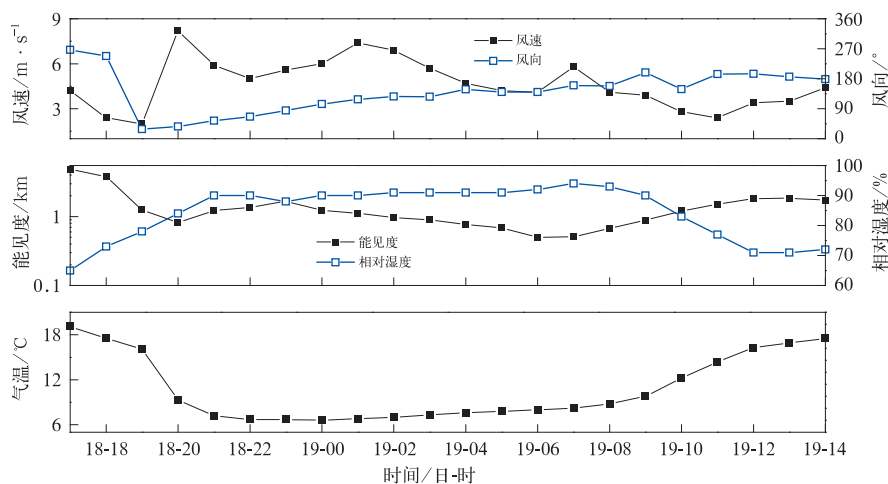


图8 2013年3月18—19日盐城站气象要素随时间的变化
Fig. 8 Variation of meteorological elements at Yancheng Station
in 18–19 March 2013

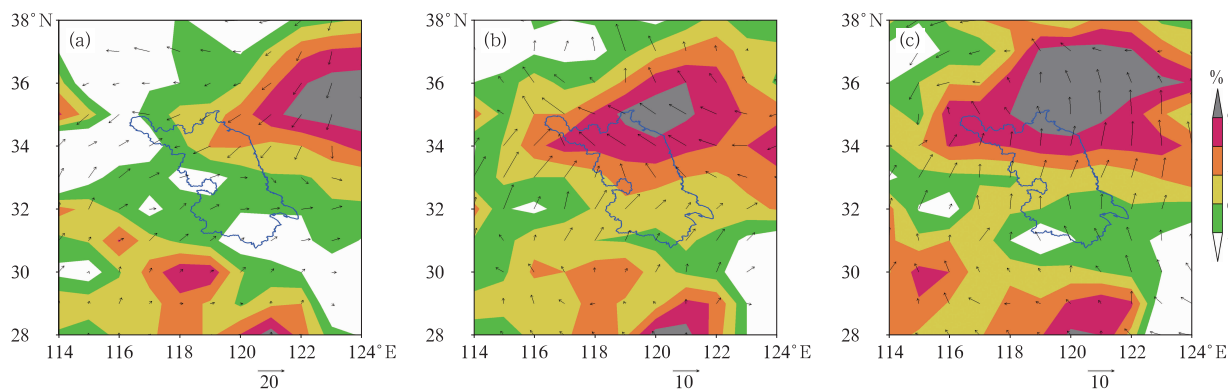


图9 2013年3月18日20时(a)、19日02时(b)和08时(c)的975 hPa相对湿度(阴影)和风矢量分布变化

Fig. 9 Relative humidity (shaded) and wind vector at 975 hPa at 20:00 BT 18 (a), 02:00 BT 19 (b) and 08:00 BT 19 (c) March 2013

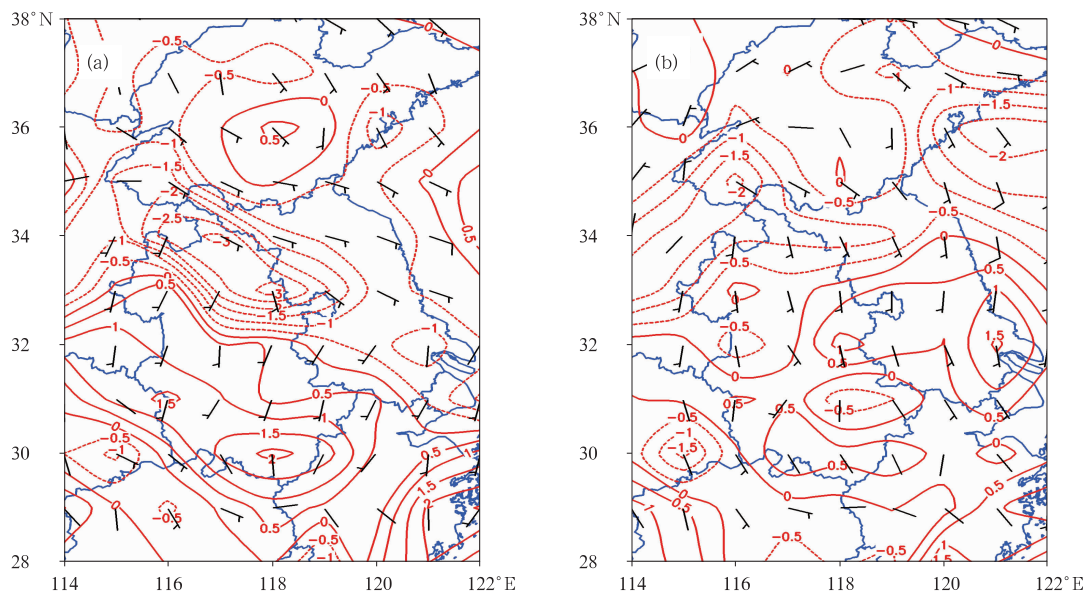


图10 2013年3月19日02时(a)和08时(b)的1000 hPa水汽通量散度(单位: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 10 Vapor flux divergence at 1000 hPa at 02:00 BT (a) and 08:00 BT (b) 19 March 2013 (unit: $10^{-8} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

的辐合中心区位于洪泽湖附近,主要是在东南风作用下遇到海上湿空气,并叠加了洪泽湖水面丰富的水汽,导致金湖站和盱眙站能见度迅速下降到0.1 km以下。另一个辐合中心大值区位于长江入海口,是由海上偏东风直接造成的,致使启东、南通一带起雾。这两个水汽通量散度辐合大值区还是雾最先形成的区域,并且最早形成强浓雾。在08时图上(图10b),水汽通量辐合带已移至沿淮和淮北地区,对应的地面浓雾区也移到沿淮和淮北地区,沿江以北地区雾逐渐减弱、消散。可见平流雾雾区的传播与水汽输送带北移有直接关系。

水汽输送带北移与东海变性冷高压北抬有关。由图5和图6可见,3月19日00时前后,长江口吹偏东风,以后转为东南风,由于变性冷高压北抬,02时东南风扩展至整个苏北地区,从而使长江北岸的雾区明显北抬。之后随着变性冷高压进一步北抬,长江口一带东南风转为西南风,并向北传播,从而雾区自南向北消散。3月19日08时,东南风仅存在于江苏北边界和山东境内,故而江苏雾区由南向北消散,11时雾区仅存在于苏北边境。

以上讨论表明,雾区向北传播是由于水汽输送带向北移动,从地面图上(图略)看,这是东海变性高

压北抬,黄海上来的东南风向北扩展的结果。

冷暖平流先后作用导致了本次平流雾的发生。3月18日20时温度平流剖面图显示(图略),800 hPa以下江苏大部分地区为明显的暖平流。19日02时(图11a),在975 hPa,33°N附近有一 $-0.06 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 冷平流中心,范围可达33°~34°N,与沿江以北的浓雾区域相吻合。到了08时(图略),贴地层的弱冷平流区域移到了34.5°~35°N,对应淮北地区的浓雾,其他地区低层为弱的暖平流,暖平流区域延伸到700 hPa左右,其中925 hPa附近的暖平流强度最强。图11b为19日08时925 hPa散度

场,雾区内的散度为 $-1 \times 10^{-5} \sim 0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,低层的弱辐合有利于水汽的聚集,同时低层的弱辐合上升与高层的辐散下沉有利于逆温层的形成(濮梅娟等,2008)。

根据分析可知雾区贴地层内有暖平流,也有局部的弱冷平流存在,这与平流雾形成条件相符合(许爱华等,2016)。这种弱冷平流与其上部的暖平流形成逆温,使得近地层大气层结更加稳定,同时弱冷平流加速了近地面水汽的饱和速度,使雾体迅速发展,且冷平流区域与浓雾范围有很好的对应关系。

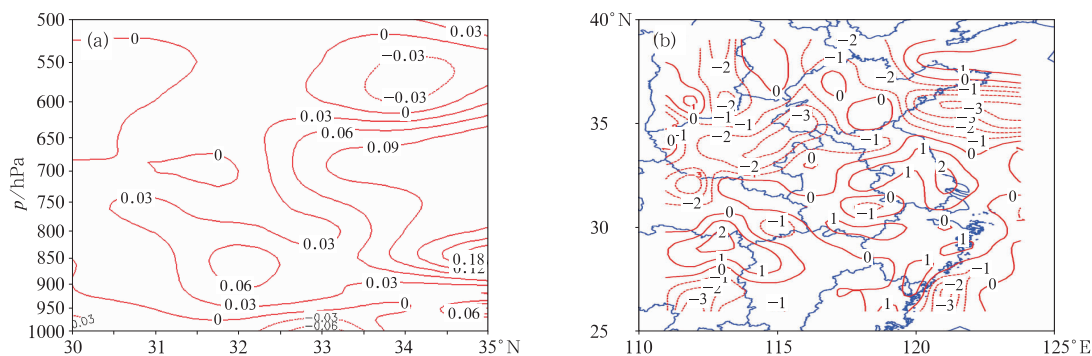


图11 2013年3月19日(a)02时温度平流沿120°E剖面(单位: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$)
和(b)08时925 hPa散度(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 11 Profile of temperature advection along 120°E (unit: $10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$) at 02:00 BT (a),
divergence at 925 hPa (unit: 10^{-5} s^{-1}) at 08:00 BT (b) 19 March 2013

5.2 长江水域的影响

雾常受到局地地形的影响。特别是水体附近的雾,当水面湿空气流向雾区时常使雾浓度增强。本次平流雾就受到了长江水域明显的影响。由图3可以清楚看到,04时强浓雾连成东南—西北一条带后,其东南段强浓雾区边缘的形状与长江的走向十分相似,一直持续到08时左右强浓雾带消散。这表明长江北岸雾受到了长江水面的影响。长江江苏段水面宽度从几千米扩展到一、二十千米,在夜晚水面温度高于陆面温度,故其饱和水汽压大于陆面,也就是说江面上水汽密度大于北岸陆面上的水汽密度,而这期间风向以东南风为主,它将长江水面的湿空气源源不断输向雾区,从而形成长江北岸的强浓雾带。同样,湖面(如洪泽湖、高邮湖)对其周边雾亦有增强作用。

此外应该指出,长江水面向雾区输送水汽使雾增强为强浓雾的过程是渐进式的,它没有辐射雾爆

发性增强的特征。图12为4个站点能见度时间变化曲线,从图中可以看出平流雾中能见度的变化虽有起伏,但总体下降趋势是平缓的,与辐射雾爆发性增强、能见度陡降是不同的(李子华,2001)。当然这仅是一个个例,在后续的研究中还需要进一步的观测研究。

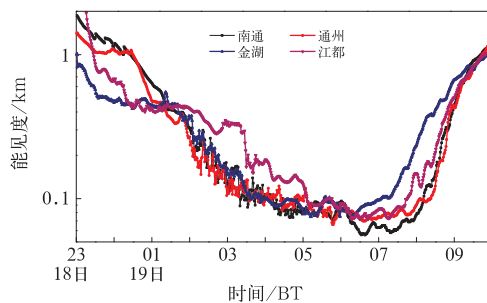


图12 2013年3月18—19日江苏
代表站点能见度变化曲线

Fig. 12 Visibility variation at representative
stations in Jiangsu during 18–19 March 2013

5.3 平流雾的宏观特征

图 13 给出了射阳站 3 月 18 日 19 时和 19 日 07 时温度、相对湿度以及风廓线。18 日 19 时(图 13a)冷锋刚过射阳,300 m 以上的逆温层是冷锋面上界的暖空气层结,而 300 m 以下则是冷空气层结,吹 $6 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的东北风,其上为偏西风。冷锋过后稳定气层中乱流很弱加上逆温的阻挡使得低层强风得以维持并同锋面系统一起移动,在逆温层顶附近,风向发生变化。

3 月 19 日 07 时的温、湿分布(图 13b)是典型的平流雾层的层结,此时正是平流雾发展最强时刻,探空站位于浓雾之中,由图可见,250~600 m 为深厚

的逆温层,逆温强度达到了 $3.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$,雾顶高度在 400~500 m,在逆温层中,雾区吹东南风,雾层之上为西南风。图中还可以看到,雾顶之上相对湿度随高度升高急剧下降,600 m 以上相对湿度仅有 25%,可见平流雾的湿空气集中在 600 m 以下的近地层。逆温层内的深厚湿空气为雾的发生、维持提供了充足的水汽环境,另一方面大量湿空气被集聚在逆温层内,不易通过湍流输送形成垂直交换。

5.4 云雾共存

平流雾的上空有云层存在,这是与辐射雾不同的。从 3 月 18 日夜间至 19 日早晨连续卫星云图(图 14)发现,3 月 18 日晚上江苏西边有一块云团

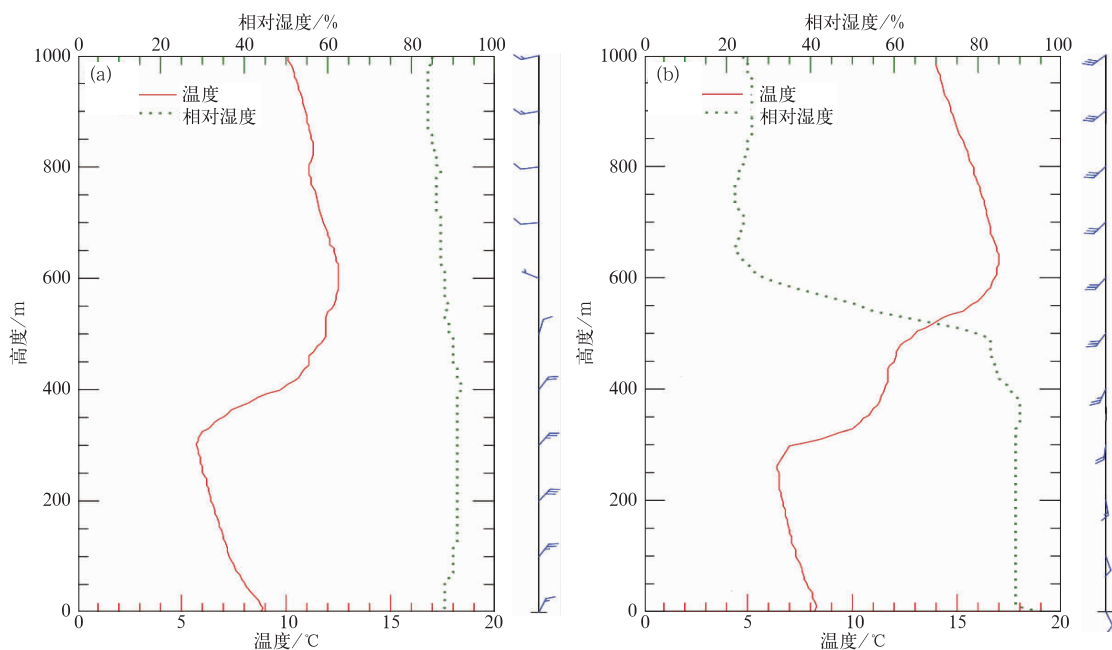


图 13 2013 年 3 月 18 日 19 时(a)和 19 日 07 时(b)射阳探空站温度、相对湿度和风廓线
Fig. 13 Temperature, relative humidity and wind speed profiles at Sheyang Station
at 19:00 BT 18 (a) and 07:00 BT 19 (b) March 2013

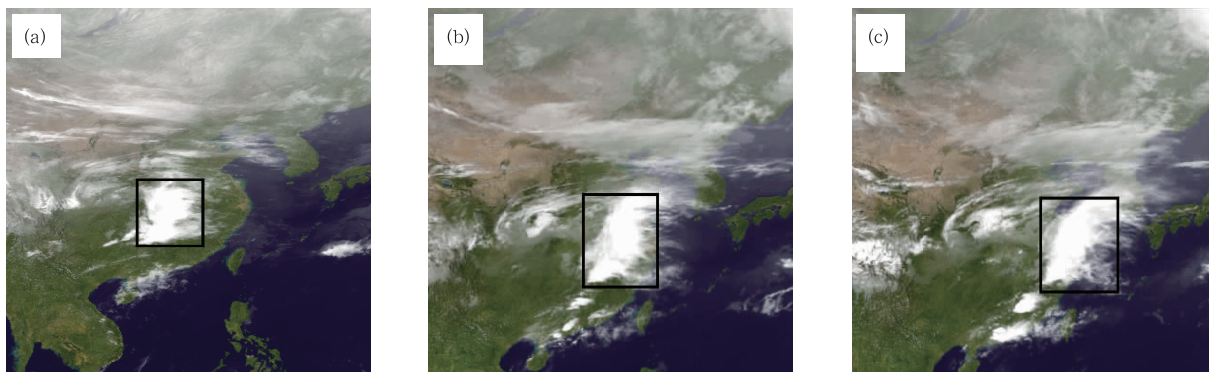


图 14 2013 年 3 月 18 日 23 时(a)、19 日 04 时(b)和 07 时(c)FY-2E 卫星彩色云图
Fig. 14 FY-2E satellite images at 23:00 BT 18 (a), 04:00 BT 19 (b), and 07:00 BT 19 (C) March 2013

(黑色方框)覆盖全安徽省,之后云团自西向东移动,23时已进入江苏西部,此时平流雾在长江以北部分站点开始生成(图14a)。19日02时云团已覆盖江苏大部分地区,而江苏平流雾却继续发展,洪泽湖以及长江北岸一线,多个站点雾增强为强浓雾。04时(图14b),云团覆盖江苏省,而地面平流雾却发展成一条东南—西北向的强浓雾带。07时(图14c),云团主体已覆盖江苏全省,而此时正是平流雾发展最强之时。可见平流雾从生成到发展,均不受上空云系的影响,云会影响地面辐射降温,而本次平流雾主要依赖于黄海水汽向江苏输送。此外,根据3月19日08时探空曲线(图略)分析得知,南京站云团厚度为500~420 hPa,射阳站为400~250 hPa,云厚分别约为1.5和4 km。云雾共存结构是此次平流雾天气的重要垂直结构特征之一,是由云和边界层内的雾共同构成的。

6 结 论

通过对2013年3月18—19日在江苏地区一次平流雾的形成、传播和特征等分析,可以得出以下结论:

(1) 雾发展过程中500 hPa高度场上,中东部地区均处在槽前西南气流中,850和925 hPa江苏为强盛的西南风,并有暖区存在,为雾的形成提供稳定的天气条件。冷锋过境和东海变性冷高压北抬是平流雾生成的必要条件。

(2) 地面冷锋过境后,地面转为东北风,致使下垫面大幅度降温,江苏沿江以北地区降温幅度达10℃以上;而后江苏受东海变性冷高压北抬影响,地面又转为东南风,东南风将黄海上空的湿空气输送到冷的下垫面,从而在近地面层产生平流雾,说明本次平流雾是在冷空气控制后,又在暖湿平流影响下形成的。平流雾发生在锋后温差较大、相对湿度上升明显以及逆温强度较强的区域。

(3) 东海变性冷高压增强北抬,东南风将黄海水汽由长江口逐渐向北输送,加上低空两支水汽输送带,促使雾区由南向北传播,之后随着水汽输送带的合并,偏南分量的增大,湿度北抬,雾区自南向北逐渐消散。

(4) 紧靠长江北岸和湖泊附近的平流雾区中有强浓雾和特强浓雾,这是长江水面和湖面上湿空气向雾区补充的结果。强浓雾呈渐进式的发展,它没

有辐射雾爆发性增强的特征。

(5) 天上云存在不影响平流雾的发生和发展,云雾共存结构是本次平流雾天气的重要垂直结构特征。本次平流雾过程中湿空气集中在0.6 km以下,近地层雾顶高度0.4 km,位于深厚的逆温层中。

参考文献

- 郭丽君,郭学良,2015.利用地基多通道微波辐射计遥感反演华北持续性大雾天气温、湿度廓线的检验研究[J].气象学报,73(2):368-381. Guo L J, Guo X L, 2015. Verification study of the atmospheric temperature and humidity profiles retrieved from the ground-based multi-channels microwave radiometer for persistent foggy weather events in northern China[J]. Acta Meteor Sin, 73(2):368-381(in Chinese).
- 郭丽君,郭学良,2016.北京2009~2013年期间持续性大雾的类型、垂直结构及物理成因[J].大气科学,40(2):296-310. Guo L J, Guo X L, 2016. The type, vertical structure and physical formation mechanism of persistent heavy fog events during 2009—2013 in the Beijing Region[J]. Chin J Atmos Sci, 40(2):296-310(in Chinese).
- 黄彬,王靖,陆雪,等,2014.黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征及生消机理分析[J].气象,40(11):1324-1337. Huang B, Wang Q, Lu X, et al, 2014. Mechanism of a sea fog event over Yellow Sea and Bohai Sea[J]. Meteor Mon, 40(11):1324-1337(in Chinese).
- 黄政,袁成松,包云轩,等,2016.基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验[J].气象,42(8):944-953. Huang Z, Yuan C S, Bao Y X, et al, 2016. Numerical simulations of heavy fog processes on expressways based on different parameterization schemes[J]. Meteor Mon, 42(8):944-953(in Chinese).
- 李子华,2001.中国近40年来雾的研究[J].气象学报,59(5):616-624. Li Z H, 2001. Studies of fog in China over past 40 years[J]. Acta Meteor Sin, 59(5):616-624(in Chinese).
- 梁爱民,张庆红,申红喜,等,2009.北京地区一次平流雾过程的分析及数值模拟[J].应用气象学报,20(5):612-621. Liang A M, Zhang Q H, Shen H X, et al, 2009. The analysis and simulation of an advection fog event in Beijing[J]. Appl Meteor Sci, 20(5):612-621(in Chinese).
- 陆春松,牛生杰,杨军,等,2010.南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J].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[J]. Chin J Atmos Sci, 34(4):681-690(in Chinese).
- 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[J].气象,40(6):715-722. Ma C P, Wu B G, Li J B, et al, 2014. Boundary layer structure features and diagnostic analysis of one successive heavy fog event[J]. Meteor Mon, 40(6):715-722(in Chinese).

- 濮梅娟,张国正,严文莲,等,2008.一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. Pu M J, Zhang G Z, Yan W L, et al, 2008. Characteristics of a rare radiation-advection fog[J]. Sci China: Earth Sci, 38(6): 776-783 (in Chinese).
- 宋润田,王伟民,郁亚宁,1999.一次持续稳定的平流雾天气[J].气象,25(6):19-22. Song R T, Wang W M, Yu Y N, 1999. A constantly maintained advection fog[J]. Meteor Mon, 25(6): 19-22 (in Chinese).
- 王彬华,1983.海雾[M].北京:海洋出版社:18-34. Wang B H, 1983. Sea Fog[M]. Beijing: China Maritime Press: 18-34 (in Chinese).
- 王博妮,濮梅娟,田力,等,2016.江苏沿海高速公路低能见度浓雾的气候特征和影响因子研究[J].气象,42(2):192-202. Wang B N, Pu M J, Tian L, et al, 2016. Climate characteristics and impact factors of low visibility heavy fog on Jiangsu coast expressway[J]. Meteor Mon, 42(2): 192-202 (in Chinese).
- 王博妮,袁成松,陈鹏,等,2015.2013年初春一次平流雾过程对江苏交通的影响分析[J].气象与环境科学,38(1):46-53. Wang B N, Yuan C S, Chen P, et al, 2015. Influence analysis of an advection fog process on Jiangsu transport in the early spring of the year 2013[J]. Meteor Environ Sci, 38(1): 46-53 (in Chinese).
- 王益柏,梅娜,范磊,等,2014.WRF模式对2013年1月华北一次大雾的数值对比试验[J].气象,40(12):1522-1529. Wang Y B, Mei N, Fan L, et al, 2014. Comparative experiments of WRF simulation on a fog event of January 2013 in North China[J]. Meteor Mon, 40(12): 1522-1529 (in Chinese).
- 吴彬贵,张宏升,张长春,等,2010.华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征[J].大气科学,34(2):440-448. Wu B G, Zhang H S, Zhang C C, et al, 2010. Characteristics of turbulent transfer and its temporal evolution during an advection fog period in North China[J]. Chin J Atmos Sci, 34(2): 440-448 (in Chinese).
- 许爱华,陈翔翔,肖安,等,2016.江西省区域性平流雾气象要素特征分析及预报思路[J].气象,42(3):372-381. Xu A H, Chen X X, Xiao A, et al, 2016. Analysis on the characteristics of meteorological factors and forecast ideas for regional advection fog in Jiangxi[J]. Meteor Mon, 42(3): 372-381 (in Chinese).
- 杨悦,高山红,2016.黄海海雾 WRF 数值模拟中垂直分辨率的敏感性研究[J].气象学报,74(6):974-988. Yang Y, Gao S H, 2016. Sensitivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over the Yellow Sea[J]. Acta Meteor Sin, 74(6): 974-988 (in Chinese).
- 袁金南,黄健,2011.珠江口附近春季一次海雾的观测分析及三维数值模拟[J].气象学报,69(5):847-859. Yuan J N, Huang J, 2011. An observational analysis and 3-dimensional numerical simulation of a sea fog event near the Pearl River Mouth in boreal spring[J]. Acta Meteor Sin, 69(5): 847-859 (in Chinese).
- 袁娴,陈志豪,2013.上海浦东机场平流雾的统计和监测分析[J].气象科学,33(1):95-101. Yuan X, Chen Z H, 2013. Statistics and monitoring analysis of advection fog at Shanghai Pudong Airport [J]. Sci Meteor Sin, 33(1): 95-101 (in Chinese).
- 张苏平,鲍献文,2008.近十年中国海雾研究进展[J].中国海洋大学学报,38(3):359-366. Zhang S P, Bao X W, 2008. The main advances in sea fog research in China[J]. J Ocean Univ China, 38(3): 359-366 (in Chinese).
- 张苏平,任兆鹏,2010.下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响——观测与数值试验[J].气象学报,68(4):439-449. Zhang S P, Ren Z P, 2010. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: observations and numerical simulations[J]. Acta Meteor Sin, 68(4): 439-449 (in Chinese).
- 周福,钱燕珍,金靓,等,2015.宁波海雾特征和预报着眼点[J].气象,41(4):438-446. Zhou F, Qian Y Z, Jin L, et al, 2015. Characteristics and forecasting focus of sea fog in Ningbo[J]. Meteor Mon, 41(4): 438-446 (in Chinese).
- Duynkerke P G, 1999. Turbulence, radiation and fog in Dutch stable boundary layers[J]. Bound-Lay Meteor, 90(3): 447-477.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al, 2007. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure Appl Geophys, 164(6-7): 1121-1159.
- Kim C K, Yum S S, 2012a. Marine boundary layer structure for the sea fog formation off the west coast of the Korean Peninsula [J]. Pure Appl Geophys, 169(5/6): 1121-1135.
- Kim C K, Yum S S, 2012b. A numerical study of sea-fog formation over cold sea surface using a one-dimensional turbulence model coupled with the weather research and forecasting model[J]. Bound-Lay Meteor, 143(3): 481-505.
- Koraćin D, Businger J A, Dorman C E, et al, 2005. Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog[J]. Bound-Lay Meteor, 117(3): 447-478.
- Koraćin D, Dorman C E, Lewis J M, et al, 2014. Marine fog: a review [J]. Atmos Res, 143: 142-175.
- Koraćin D, Lewis J, Thompson W T, et al, 2001. Transition of stratus into fog along the California coast: observations and modeling [J]. J Atmos Sci, 58(13): 1714-1731.
- Leipper D F, 1994. Fog on the U. S. west coast: a review[J]. Bull Am Meteor Soc, 75(2): 229-240.
- Lewis J M, Koraćin D, Redmond K T, 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States: a historical essay including outlook[J]. Bull Am Meteor Soc, 85(3): 395-408.
- Liu D Y, Yan W L, Yang J, et al, 2016. A study of the physical processes of an advection fog boundary layer [J]. Bound-Lay Meteor, 158(1): 125-138.
- Nishikawa T, Maruyama S, Sakai S, 2004. Radiative heat transfer and hydrostatic stability in nocturnal fog[J]. Bound-Lay Meteor, 113(2): 273-286.
- Pilié R J, Mack E J, Rogers C W, et al, 1979. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California coast[J]. J Appl Meteor, 18(10): 1275-1286.
- Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al, 2014. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Wea Forecasting, 29(2): 205-225.