

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 [J]. 大气科学, 37 (1): 124–136, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12010. Bao Yunxuan, Ding Qiuji, Yuan Chengsong, et al. 2013. Numerical simulations of a highly complex fog event on Shanghai–Nanjing Expressway [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 124–136.

沪宁高速公路一次复杂性大雾过程的数值模拟试验

包云轩^{1,2} 丁秋冀^{1,2} 袁成松^{2,3} 严明良^{1,3}

1 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044

2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044

3 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

摘要 为探明高速公路大雾天气的成因和演变规律, 揭示雾影响交通能见度的机理, 本文根据布设于我国沪宁高速公路沿线的环境气象自动监测系统(AWMS)实测资料和覆盖公路周边地区的常规气象台站观测资料, 篩选出2009年11月7日发生在沪宁高速公路上的一次典型复杂性大雾天气过程。在分析天气实况的基础上, 应用高时空分辨率的非静力中尺度数值预报模式WRF3.1, 结合NCEP 0.5°×0.5°气象再分析资料, 对该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。研究表明: (1) 本次大雾前后的天气形势相对稳定, 江苏地区主要受入海反气旋西南侧东南气流影响, 整个大雾过程中地面风力始终微弱, 为大雾形成提供了有利的动力条件; (2) 模式模拟的由大气液态含水量条件判别的成雾区分布与实测雾区范围基本吻合; (3) 模式模拟的能见度与AWMS实测能见度十分接近; (4) 本次大雾过程最初是团雾雏形, 在夜间辐射冷却作用下, 转为辐射雾, 之后, 来自东南海上的暖湿空气平流进入江苏陆地后, 所产生的平流雾雾体与原有辐射雾雾体结合发展为范围更大的辐射平流混合雾; (5) 日出后短波辐射增温是此次复杂性大雾雾体得以快速消散的主要原因。

关键词 沪宁高速公路 复杂性大雾 WRF模式 能见度 数值模拟

文章编号 1006-9895(2013)01-0124-13

中图分类号 P426.4

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12010

Numerical Simulations of a Highly Complex Fog Event on Shanghai–Nanjing Expressway

BAO Yunxuan^{1,2}, DING Qiuji^{1,2}, YUAN Chengsong^{2,3}, and YAN Mingliang^{1,3}

1 Jiangsu Key Lab of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Jiangsu Meteorological Institute, Nanjing 210008

Abstract The objective of this study is to ascertain the engendering causes and evolving patterns of dense fog weather processes on expressways and to reveal their mechanisms of influencing visibility during transportation. Observed fog data from the automatic weather monitoring system (AWMS) along the Shanghai–Nanjing Expressway in China and that from conventional meteorological stations covering areas near the same region were collected and analyzed for a typical complex fog event that occurred over the expressway on November 7, 2009. Based on analysis of actual weather conditions during the fog event, the Weather Research and Forecasting Model for Version 3.1 (WRF3.1), a non-hydrostatic mesoscale numerical forecasting model with high spatial and temporal resolutions, was used in

收稿日期 2012-01-16, 2012-07-30 收修定稿

基金资助 国家公益性行业(气象)科研专项 GYHY200906037-27, 江苏省科技支撑计划 BE2010750, 江苏省高校优势学科建设工程

作者简介 包云轩, 男, 1963年出生, 教授, 主要从事应用气象、气象灾害、农业病虫害测报、资源遥感与环境信息系统研究。E-mail: baoyx@nuist.edu.cn

conjunction with National Centers for Environmental Prediction (NCEP) $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ meteorological reanalysis data to simulate a typical fog event. Numerical simulations of several physical variables were verified from the observed data of the fog event data of AWMS. The dynamic and thermodynamic conditions engendering this complex fog event in addition to moisture levels were analyzed. The following were the main conclusions: (1) The atmospheric circulation conditions in Jiangsu Province and its contiguous regions were stable before and during the heavy fog event. These regions were affected by the southeastern stream at the southwestern side of an anti-cyclone system over the Yellow Sea. Moreover, a weak surface wind present during the entire fog process provided favorable dynamic conditions for engendering heavy fog. (2) The simulated distribution areas of the fog masses depicted by the liquid water content (LWC) agreed with observation data. (3) The simulated visibilities were very close to the observed AWMS visibility data. (4) The mixed fog event occurred during 18:00 (BST) November 7 to 08:00 (BST) November 8, 2009. The embryo of this heavy fog event was a local patchy fog that was converted into radiation fog under the influence of radiation cooling. Then, a warm and humid air advection mass from the surface of the East Sea moved southeast and entered into the southern part of Jiangsu Province to create an advection fog mass. This mass combined with the earlier radiation fog to form a complex fog mass from the dual effects of radiation cooling and advection cooling, enabling large-scale expansion. (5) The warming of the surface caused by short-wave radiation after sunrise was the main reason for the rapid dissipation of the fog body.

Keywords Shanghai–Nanjing Expressway, Complex fog event, Weather research and forecast model (WRF), Visibility, Numerical simulation

1 引言

大雾是一种发生在近地气层灾害性的天气现象, 严重的视程障碍威胁着城市道路系统、高速公路、航道的安全和飞机的起飞、着陆。有资料表明(袁成松等, 2003), 在我国, 大雾是造成高速公路交通事故最严重的灾害性天气之一。因此, 加强雾的发生特征和成因机理研究, 完善雾的监测、预警和预报, 已成为十分紧迫的任务。

早期雾的数值模拟主要是对辐射雾成因和维持机制进行了多方面的研究。具有代表性的是 Fisher and Caplan (1963) 所建立的一维雾模式, 他们阐述了建立雾预报模式的可行性, 后来许多学者纷纷开始对雾的一维数值模式进行完善和研究。随后 Roach and Brown (1976) 利用二维模式对辐射雾进行了研究, 发现前人忽略的重力沉降对雾水含量的重要影响。Ballard et al. (1991) 利用了三维数值预报模式对海雾进行了模拟和分析, 并指出数值模式的初始场和垂直分辨率对雾的精确模拟的重要性。国内对雾的数值模拟研究始于 20 世纪 80 年代, 周斌斌 (1987) 建立了一维辐射雾模式, 该模式较详细地考虑了湍流交换、长波辐射传输、重力沉降等过程。钱敏伟和雷孝恩 (1990) 设计了二维辐射雾数值模式, 对长江上空辐射雾的形成和发展及与长江两岸复杂地形的关系进行了研究, 解释了长江水面及长江两岸地形对大雾形成和发展的影

响。孙旭东等 (1991) 采用二维非定常雾模式, 模拟了大气边界层内辐射雾、辐射平流雾和在海陆交界处的辐射平流雾的形成、演变规律, 建立了二维边界层雾及低层云模式。张利民 (1993) 等利用该二维雾模式研究了重庆一次雾的形成和发展过程。黄建平等 (1993) 也采用此雾模式成功地对西双版纳地区的雾进行了数值模拟研究。初期的数值模式研究, 一方面在理论上揭示了大雾形成的因素、维持的宏观和微观特征以及局地环境对大雾形成和发展的影响等; 另一方面在技术上不断建立和完善雾模式, 使得数值模式飞速的发展, 对雾的模拟预报能力日益提高。

然而雾模式模拟雾的设计只针对雾本身的特征, 无法考虑到大、中尺度环境场变化对雾生消的影响, 同时又依赖于反应大气层结信息的探空资料, 所以具有一定的局限性。随着中尺度数值模式发展的日趋成熟和完善, 人们逐步开始利用中尺度数值模式进行雾的模拟研究。最先开始用中尺度模式对雾进行数值模拟的是英国的 Ballard et al. (1991)。Pagowski et al. (2004) 利用 MM5 数值模式, 对安大略省南部的一次引起重大交通事故的团雾进行了模拟和分析, 研究表明湖岸风所导致的局地性水汽辐合是该团雾形成的主要因素。Van der Velde et al. (2010) 利用多模式对一次冷雾进行了一系列的模拟和比较, 研究表明中尺度模式对冷雾的模拟能力还存在一定的欠缺。

在国内,樊琦等(2004)利用三维中尺度数值模式MM5对发生在广州地区的辐射雾进行了数值模拟研究,并利用敏感性数值试验探讨了长波辐射、短波辐射以及模式的垂直分辨率和不同下垫面类型对辐射雾形成和发展的影响。董剑希等(2006)利用MM5模式对发生在北京的一次辐射雾进行了数值模拟研究,分析了雾形成和维持的机制,讨论了雾发生、发展阶段的物理过程。李元平等(2007)利用中尺度数值预报模式WRF对北京地区的一次平流雾进行了数值模拟研究,分析了平流雾发生、发展和消散的机制。齐琳琳等(2010)针对不同地域的冬季辐射雾,利用三维辐射雾模式单向耦合MM5中尺度模式开展了数值模拟试验,通过耦合显著地提高了中尺度模式对复杂地域局地雾的模拟能力。

雾从其发生天气背景、物理成因、形态结构、地理环境和出现范围等方面综合考虑可以分成:辐射雾、平流雾、锋面雾、蒸发雾、上坡雾和地方性雾六种(徐玉貌,2000)。辐射雾是地面辐射冷却使贴地层变冷而形成的雾,主要发生在晴朗的夜间或清晨,有强烈的地面有效辐射,近地层水汽含量充沛,尤其是当空气被雨和潮湿的地面增湿后,低层有微风和一定强度的湍流,有稳定的温度层结,可见辐射雾一般出现在晴好天气时。辐射雾的特点是范围小,从几百米到几十公里不等,雾层较薄,雾体的物理结构不均匀,雾中能见度变化大。平流雾是由暖湿空气平流到冷的下垫面上,经冷却而形成的雾,平流雾出现在海上或大陆上,暖海面上的空气或大陆上的暖湿空气流到海面上,或者海上的暖湿空气流到冷的陆面上,均可形成平流雾,且移来的空气与下垫面之间存在较大的温度差别,平流雾形成时一般风速适中这样可源源不断地输送水汽,而且能发展一定强度的湍流,使雾达到一定的厚度。平流雾的特点是持续时间较长,范围大,雾区面积的等效直径达几百公里到上千公里,雾的结构和物理特征相对均匀,雾层较厚。锋面雾一般发生在冷、暖锋交界的锋面附近,以暖锋附近居多,通常与微风,或者与微弱的降水同时出现,或者在锋面降水停止之后出现,锋面雾分为锋前雾和锋后雾。锋前雾是锋面上暖空气云层中雨滴落入冷空气中,经蒸发,使空气过饱和而凝结形成,锋后雾则由暖湿空气移至原来被暖锋前冷空气占据过的地区,经冷却过饱和而形成。长江中下游地区梅雨季

节的暖锋前后常形成锋面雾。蒸发雾是冷空气流经暖水面上,由于暖水面的蒸发,使冷空气达到饱和,产生凝结而形成的雾,蒸发雾又可分为海洋雾和河湖上的秋季雾两种,河湖上的雾常出现在内陆湖滨地区,秋、冬季节,冷空气南下,天晴风小的早晨也常形成。上坡雾也称斜坡雾,是空气沿山坡上升,由于绝热冷却而形成的雾,形成上坡雾时,气层必须是对流性稳定层结,雾出现在迎风坡上。地方性雾的特点是受局地条件的影响特别明显,可以分为都市烟雾和混合雾,都市雾在城市工业中心以及工厂附近,由于大量的活性凝结核存在,常形成都市烟雾,这种雾的持续时间较长,对交通非常不利,并造成严重的空气污染。混合雾是由温度差别较大、接近饱和的两种气块混合而形成的雾,常出现在海岸和水体附近,并且多出现于弱风情况下。上坡雾和地方性雾合称为团雾,其特点是形成突然、范围小(最大直径一般小于100 km)、浓度大、能见度低。实际上,自然界中,除了单一的辐射雾、平流雾、锋面雾、蒸发雾、团雾以外,常有复杂性成雾过程发生。且纵观国内外有关雾过程的研究发现:迄今为止还没有学者对复杂性大雾过程作过系统的研究。

本文利用美国新一代非静力中尺度数值预报模式WRF3.1对2009年11月7~8日发生在我国沪宁高速公路江苏段的一次典型复杂成雾过程进行了数值模拟。通过分析这次复杂性大雾事件的生消特征、大气背景、物理成因,以阐释沪宁高速公路复杂性大雾天气形成的机理,为交通气象预警系统的完善提供一个参考依据。

2 资料与方法

2.1 资料

沪宁高速公路实测气象资料由江苏省气象局交通气象研究所自主研制的AWMS(Automatic Weather Monitoring System)提供,包括2006年系统建立以来的各站逐分钟水平能见度、气压、温度、湿度、降水、风向、风速等气象要素观测数据。

天气形势分析所用资料是美国环境预测中心(NCEP) $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格距每隔6小时一次的气象再分析资料。

沪宁高速公路周边地区的常规气象观测资料和全自动气象观测资料由江苏省气象局提供,包括成雾期每10分钟一次的各站水平能见度、气压、

温度、湿度、降水、风向、风速等气象要素自动观测数据。

2.2 方法

2.2.1 数据处理与分析

首先, 从 AWMS 中调取沪宁高速公路各监测站逐分钟水平能见度、相对湿度、风向、风速等气象要素观测数据制成时间变化曲线, 从中筛选出成雾天气过程; 然后用 NCEP 气象再分析资料在 Grads 气象专用绘图软件中绘制这些成雾过程中各要素的空间分布图(包括每 6 小时一次的等值线图和风矢量图), 以判断这些雾过程是团雾、辐射雾、平流雾, 还是两两混合或三者混合的雾, 确定一个典型的三者混合雾过程为 2009 年 11 月 7~8 日的大雾大气过程; 最后结合沪宁高速公路周边地区的常规气象观测资料和全自动气象观测资料对该雾过程的环境气象要素场的时空变化进行细致的分析, 以了解该雾过程的生消演变特征。

2.2.2 模式及运行方案介绍

WRF 模式系统是由美国环境预测中心(NCEP)、美国国家大气研究中心(NCAR)等美国科研机构开发的新一代中尺度预报模式。该模式为完全可压缩及非静力平衡模式, 采用 F90 语言编写。控制方程组都为通量形式, 水平方向采用 Arakawa C(荒川 C)网格点, 垂直方向则采用地形跟随质量坐标, 在时间积分方面采用三阶或者四阶的 Runge-Kutta 算法。

本文采用 WRF(ARW) 3.1 版本, 模拟区域中心经纬度为 120°E, 33°N, 采用三重双向嵌套, d01~

d03 区域位置和大小如图 1 所示, 其中水平格点数为 65×65 、 131×131 和 266×181 , 格距为 30 km、6 km 和 1.2 km。

随着城市的不断发展, 沪宁高速公路沿线的下垫面类型与 1991 年之前发生了明显的变化。我们利用 2007 年 MODIS 遥感卫星影像进行土地利用分类, 并将之替代 WRF 模式原有的 USGS 1991 年土地利用分类。通过对比(图略)可以发现, MODIS 分类中苏南地区城市的面积相比 USGS 分类有所扩大了许多, 而相应的城市周边植被的面积则有所缩小。由于雾是发生在近地气层的天气现象, 一方面与一定的天气背景有关, 另一方面又与其所发生区域的下垫面类型有很大的关系。所以 WRF 前处理的过程中进行土地利用分类的替换可以更精确地描述大雾以及团雾所形成的下垫面环境。

研究表明, 适当增加模式的垂直层数可以提高对雾的模拟效果, 因此, 我们在近地面增加了 9 层垂直层。模式运行以 2009 年 11 月 6 日 14:00(北京时间, 下同)为初始时刻, 每隔 6 h 输入一次侧边界值, 积分时间为 48 h, 半小时输出一次结果。d01~d03 的积分步长分别为 180 s、36 s 和 7.2 s。在物理方案中, 微物理过程使用较新的 WDM5 方案, 该方案提供了包括云滴数浓度等对大气水分收支有重要影响的输出物理量。长波辐射方案使用 RRTM 长波辐射方案, 短波辐射方案使用 Dudhia 短波辐射方案, 边界层方案使用 MYJ 方案, 陆面过程方案使用 Noah 方案, 积云对流参数化使用 Kain–Fritsch 方案。

WRF 模式运行所需的初始场气象资料是从美

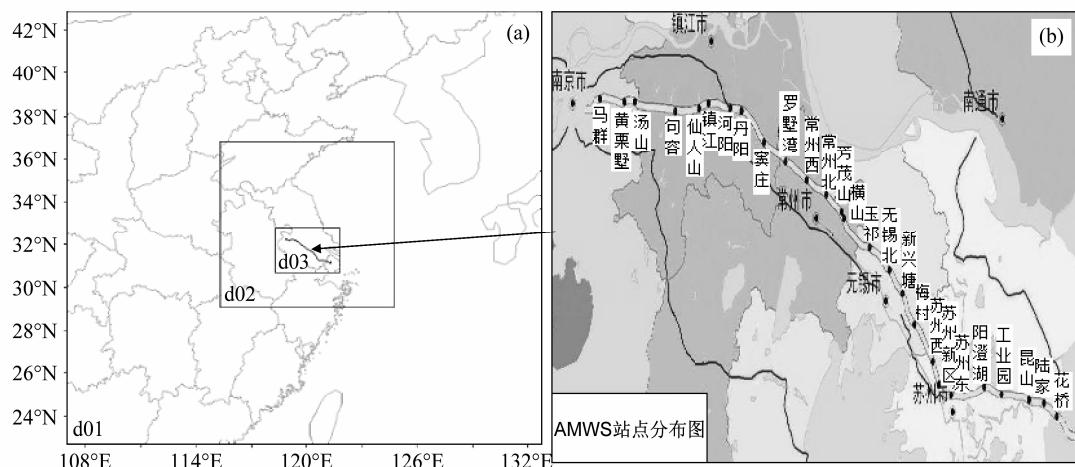


图 1 WRF 模式的模拟区域设置(a)(图中 d03 区域内的曲线为沪宁高速公路江苏段)和沪宁高速公路自动气象监测站分布图(b)

Fig. 1 (a) Simulation domains of WRF model (The black broken line in the d03 domain denotes the part of Jiangsu Province in the Shanghai–Nanjing Expressway) and (b) the distribution of AWMS (Automatic Weather Monitoring System) in the Shanghai–Nanjing Expressway

国NOAA相关网站下载的NCEP $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 格距6小时一次的气象再分析资料。

3 结果与分析

3.1 大雾发生实况

2009年11月7~8日,沪宁高速公路沿线的AWMS自动气象监测站记录了一次大雾天气过程。11月7日18:00,地处公路西段宁镇丘陵东端、太湖西北岸地形西升坡地的河阳站($32.0420^{\circ}\text{N}, 119.5352^{\circ}\text{E}$)首先出现能见度在1km以下的团雾天气,此时其风向东南,地面风速稳定于 1 m s^{-1} 下,相对湿度变化于80%~95%之间,雾区直径不到20km,紧接着,团雾区范围迅速向四周扩展。与此同时,地形相对平坦的常州西站($31.8694^{\circ}\text{N}, 119.9092^{\circ}\text{E}$)以东路段随着入夜时间的变长,辐射冷却加剧,能见度低于10km,出现轻雾,辐射雾逐渐生成并发展。18:30以后,全线能见度低于5km。19:00以后,受入海高压后部(西南侧)东南暖湿气流(来自东海海面)的影响,整个苏南地区的空气比湿逐渐加大,能见度下降(图略)。21:00后平流雾体从东南方与原有的辐射雾体汇合,随后,雾体浓度继续加大,能见度继续降低。经3~4h的暖平流输送和雾体混合发展,一个庞大的辐射平流混合雾体生成,8日01:00开始,从无锡北站($31.6489^{\circ}\text{N}, 120.3138^{\circ}\text{E}$)到镇江站($32.0557^{\circ}\text{N}, 119.4333^{\circ}\text{E}$)的高速公路路段,首先出现大范围的低能见度天气,其能见度降至200m以内,相对湿度都达到了95%以上,并在8日05:00时降至50m以内。而花桥($121.1192^{\circ}\text{N}, 31.2946^{\circ}\text{E}$)至苏州西($120.4982^{\circ}\text{N}, 31.4507^{\circ}\text{E}$)路段的能见度在本次大雾持续过程中则一直维持在1~5km之间,其相对湿度也保持在90%以上。日出后2~3h,短波辐射增温逐渐增强,雾体慢慢变薄,到了11:00,沪宁高速公路全线能见度恢复到了5km以上,其相对湿度也下降到了60%以下,此次复杂性大雾过程结束。本次混合雾天气过程持续约17小时,沪宁全线AWMS降水量记录为零,地面风向始终以东南为主,风速基本维持在 1 m s^{-1} 以下。吴兑等认为,一般在没有降水时,相对湿度大于95%时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是雾造成的。相对湿度介于80%~95%之间时的大气混浊视野模糊导致的能见度恶化是霾和雾的混合物共同造成的(吴兑,2005,2006,2008)。由此可知,影响无锡北站

至镇江站路段能见度的天气现象主要是浓雾,而其中河阳站的中低能见度最先(8日01:00时以前)是由雾霾混合物造成的,随后(8日01:00时)才转变成雾(这与团雾形成条件吻合);影响花桥至苏州西路段的天气现象则是轻雾,对地面能见度的影响相对较小。

3.2 大气环流形势

在7日14:00时500hPa和700hPa天气图(图2a、b)上,江苏处于一弱槽前,受弱西南气流影响。由于槽前辐合气流有利于云的形成,会抑制大范围辐射雾出现。从850hPa天气形势图上可以看到,江苏地区处于海上高压的后部(图2c)。但是风场配置图显示,海上高压系统西侧的东南潮湿气流影响着江苏大部分地区(图2d)。AWMS资料显示,7日08:00时~20:00时,花桥站($31.2946^{\circ}\text{N}, 121.1192^{\circ}\text{E}$)到横山站($31.7762^{\circ}\text{N}, 120.0870^{\circ}\text{E}$)由于靠海近,受东南气流影响,地面风速基本保持在 2 m s^{-1} 左右,7日20:00时后风速下降至 1 m s^{-1} 左右,而其余站点在成雾前则一直保持在 1 m s^{-1} 左右。这说明海上的东南气流进入内陆后风力开始逐渐减弱,暖湿空气在江苏南部地区缓速流动。雾区西南侧地面有弱的西南暖湿气流向雾区辐合,两股气流在苏南地区汇合,良好的水汽条件有利于大雾的形成。而地面微风则有利于辐射冷却作用扩散到适当的高度,使水汽垂直输送到一定高度,有利于形成一定厚度的雾。

3.3 数值模拟效果检验

气象业务观测中对雾的定义为:悬浮在贴近地面大气中的大量细微水滴(或冰晶)的可见集合体,能见度小于1000m。一般认为(邹进上等,1982;Cotton and Anthes, 1993),雾的液态水含量范围为 $0.05\sim 0.5\text{ g kg}^{-1}$,但根据各地的地域特点和雾形成条件的不同,雾中液态含水量范围也各有不同,本文取液态水含量 0.05 g kg^{-1} 为长江中下游地区雾区的临界下限值。

沪宁高速公路沿线出现的团雾一般水平能见度低于1000m,垂直厚度在几米至几十米,水平尺度在100km以内(万小雁等,2010)。根据上述实况资料,2009年11月7日18:00,河阳站单站出现了由雾霾混合现象造成的低能见度,但此时该站液态含水量极小(见图3a),随后在来自太湖水面的水汽输送的作用下不断增湿,逐渐转变为团雾。由于WRF模式本身缺乏对气溶胶粒子的模拟,所以

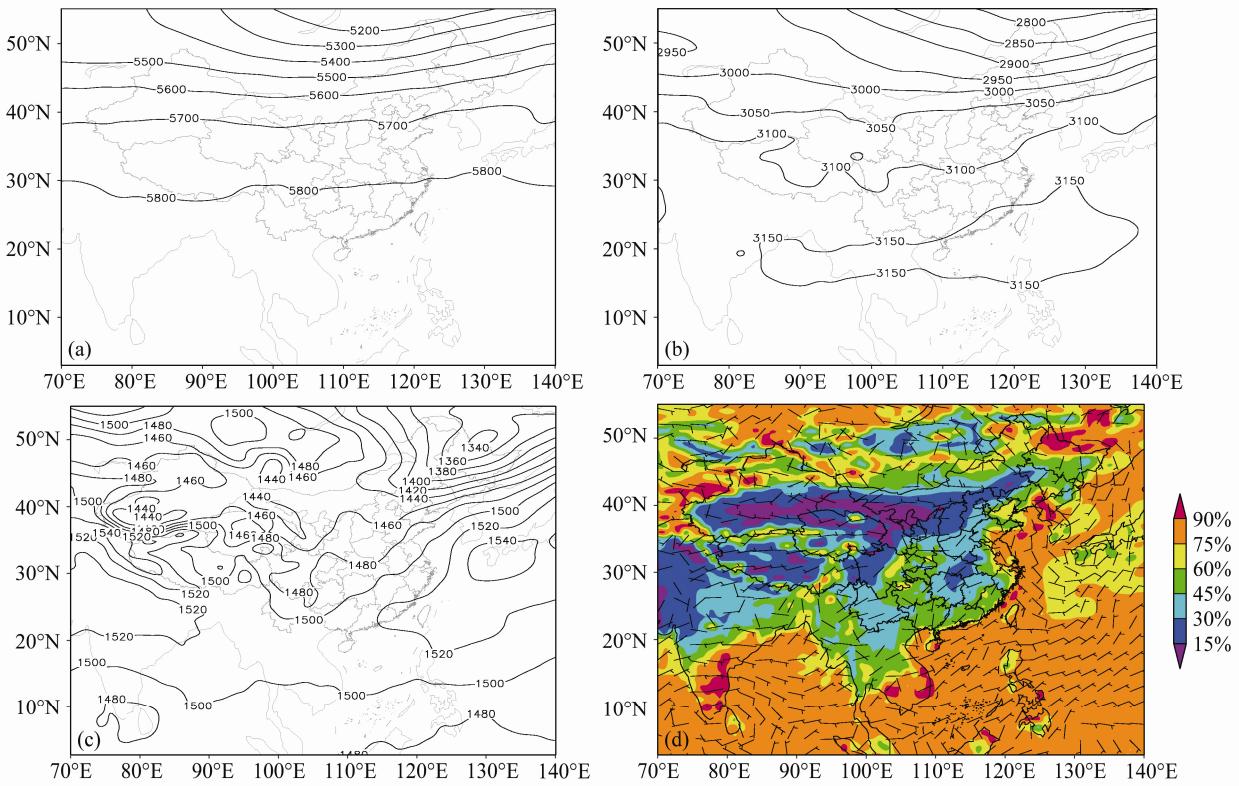


图 2 2009 年 11 月 7 日 14:00 时 500 hPa (a)、700 hPa (b)、850 hPa (c) 位势高度场 (gpm) 和地面相对湿度与风场 (单位: $m s^{-1}$) 配置 (d)

Fig. 2 Geopotential height (gpm) fields at (a) 500 hPa, (b) 700 hPa, (c) 850 hPa and (d) the configuration of the surface relative humidity and wind field ($m s^{-1}$) at 1400 BT (Beijing time) 7 Nov 2009

在模拟结果中, 23:00 时之前河阳站近地气层 (10 m 高度) 的液态含水量小, 在成雾下限值以下。到了 23:00 时之后, 河阳站与镇江站出现了小范围的团雾现象 (如图 3b)。到了 8 日 02:00, 大雾迅速发展, 雾区范围覆盖了镇江站 ($32.0557^{\circ}N, 119.4333^{\circ}E$) 到横山站 ($31.7762^{\circ}N, 120.0870^{\circ}E$) 路段 (如图 3c)。在 8 日 05:00 时, 雾区范围进一步延伸至无锡北 ($31.6489^{\circ}N, 120.3138^{\circ}E$) (如图 3d), 并稳定下来。8 日 08:30 时, 大雾范围开始减小, 无锡北 ($31.6489^{\circ}N, 120.3138^{\circ}E$)、玉祁站 ($31.7078^{\circ}N, 120.2113^{\circ}E$) 路段能见度已经恢复至 1 km 以上 (如图 4e)。模式所模拟的地面液态含水量分布结果表明, 团雾出现的区域和时间, 大雾的形成和消散的时间以及各个时次的空间分布与实况基本一致, 处在大雾雾体边缘的站点, 如句容站、梅村站等会在个别时次出现漏报和错报的情况 (如图 3c、d)。

3.4 能见度模拟

从图 4 中可以看出, 液态含水量虽然可以很好地反映出雾区分布的状况, 但是却很难用来和能见度直接比较。完善能见度模拟技术对交通气象研究

以及业务有着极其重要的意义, 因此为了反映出大雾强度随时间的变化的特征及其对能见度的影响, 我们需要用经验公式来计算地面能见度。在以往的研究中采用的多是用液态含水量直接计算能见度的经验公式, 后来 Gultepe and Isaac (2004), Gultepe et al. (2006) 同时考虑液态含水量 C 和雾滴数浓度 N_d , 提出了新的能见度经验公式:

$$V_f = 1.002 / [(C \times N_d)^{0.6473}], \quad (1)$$

其中, V_f 为雾体中能见度, 单位为 km; C 为液态含水量, 单位为 $g m^{-3}$; N_d 为雾滴数浓度, 单位为 cm^{-3} 。

随后学者指出在暖雾的数值模拟研究中, 新的公式较以往的经验公式有明显的改进 (Pang and Liu, 2010)。不过该公式仍然局限于雾期内的能见度计算, 对于模式输出结果而言, 它的适用条件是 $C > 0$, $N_d > 0$, 即有雾体 (或雾滴) 存在。因此, 本研究针对交通气象研究及业务中的精细化需求, 在液态含水量与雾滴数浓度为零的时间段中 ($C=0$ 或 $N_d=0$), 引用以相对湿度为主的能见度经验公式 (林艳等, 2010):

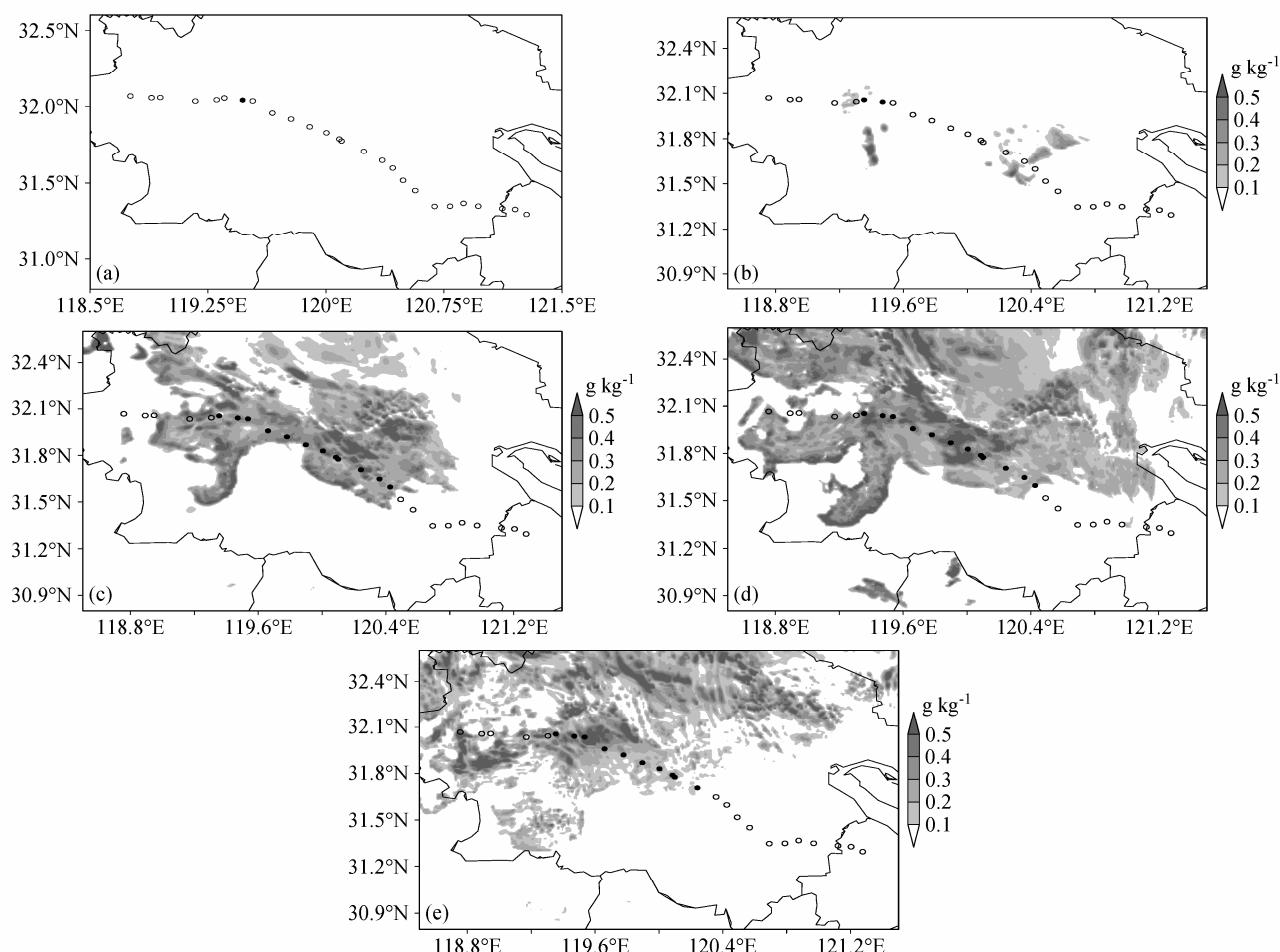


图3 2009年11月7~8日10 m高处的液态水含量大于 0.05 g kg^{-1} 的模拟值与AWMS站点实测数据比较: (a) 7日18:00; (b) 7日23:00; (c) 8日02:00; (d) 8日05:00; (e) 8日08:30。灰色区域代表液态含水量的模拟值; 黑色实心点代表该时次能见度小于等于1 km的AWMS站点; 空心点代表能见度大于1 km的站点

Fig. 3 Comparison between the simulated liquid water content at 10-m level above the surface which is greater than 0.05 g kg^{-1} and the distribution of the AWMS stations at which the observed visibilities were less than 1 km: (a) 1800 BT 7 Nov 2009; (b) 2300 BT 7 Nov 2009; (c) 0200 BT 8 Nov 2009; (d) 0500 BT 8 Nov 2009; (e) 0830 BT 8 Nov 2009. The grey areas denote simulated liquid water content; the black solid (hollow) dots denote the stations of AWMS with visibility less than or equal to (greater than) 1 km

$$V_m = 26.12263 \times \exp(-0.03052 \times R) \quad (2)$$

来反映轻雾和霾的能见度 (V_m 为轻雾和霾的能见度, 单位为 km; R 为相对湿度), 而在有雾体(或雾滴)存在(即 $C>0$, $N_d>0$)时引用以液态含水量(C)和雾滴数浓度(N_d)为主的能见度经验公式[式(1)]。

我们选取了受到本次大雾影响的梅村、横山、罗墅湾、河阳和马群等5个站点, 进行能见度模拟值与实际观测值的对比分析(见图4)。可以看出, 处在本次大雾(能见度 $<1 \text{ km}$)边缘的两个站点梅村站(图4a)和马群站(图4e)模拟的低能见度区间(能见度 $<1 \text{ km}$)出现的时次以及能见度随时间变化的趋势与实际情况相比有较大偏差, 根据图中

的模拟效果检验可知, 这些偏差主要是由于模式对雾体边缘地区的模拟效果欠佳所造成的。而横山站(图4b)、罗墅湾站(图4c)在8日00:00之前, 大雾处在形成初期, 观测值出现了明显的能见度震荡现象, 但模拟值的变化中则没有出现这一特征, 在此期间的模拟值远低于观测值, 在随后大雾维持和消散的时间段里, 模拟值和观测值的变化趋势基本一致。河阳站(图4d)处在本次大雾雾体中心, 能见度模拟有相对较好的效果。

值得注意的是, 造成能见度模拟值和观测值演变曲线差别的原因主要有:(1)模式对液态含水量、雾滴数浓度、相对湿度、气压以及温度等参数的模拟值与观测值之间有误差;(2)上述经验公式本身

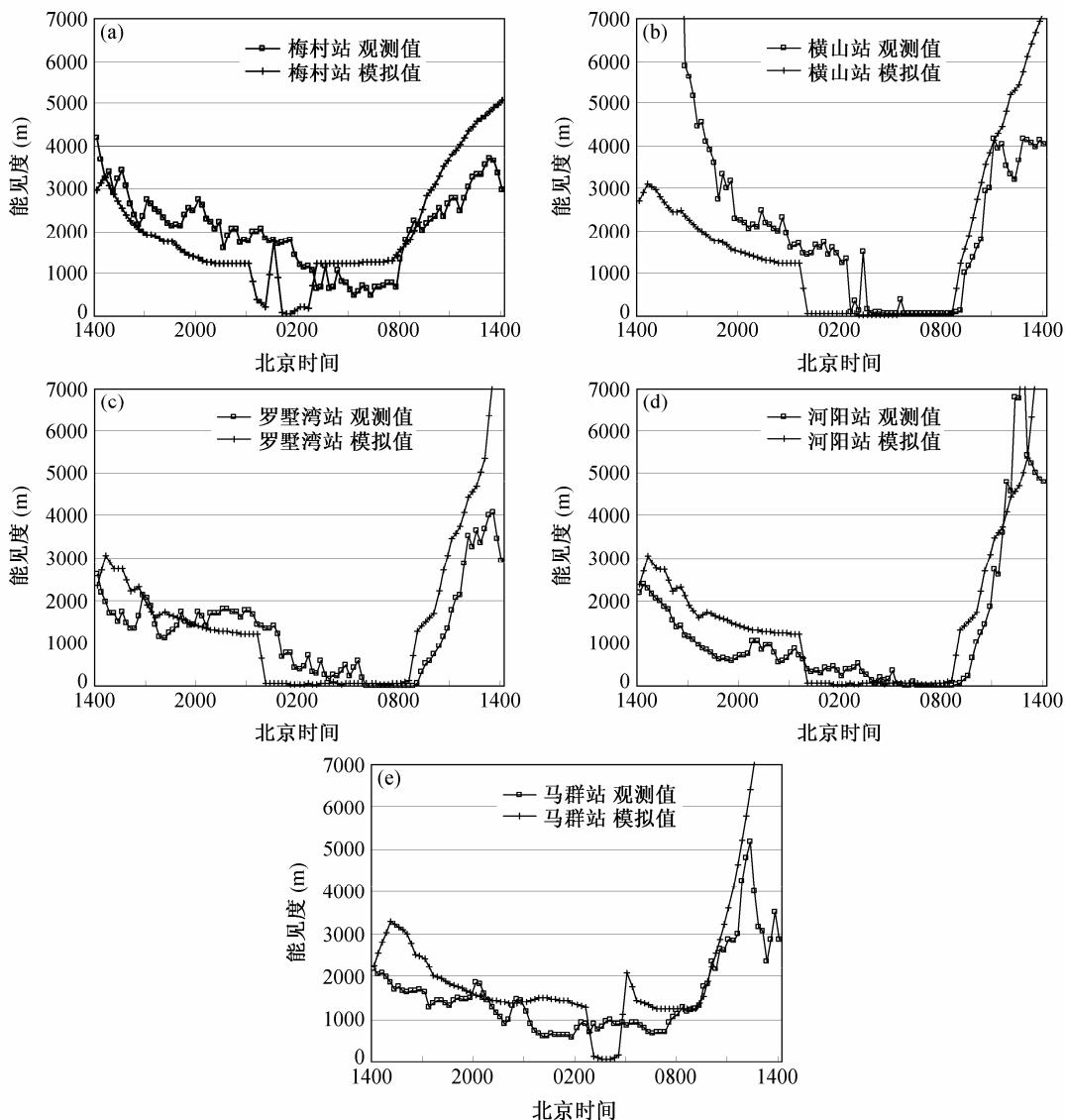


图 4 2009 年 11 月 7 日 14:00 至 8 日 14:00 水平能见度 (单位: m) 随时间变化曲线对比: (a) 梅村; (b) 横山; (c) 罗墅湾; (d) 河阳; (e) 马群
Fig. 4 Comparison of horizontal visibility (m) from 1400 BT 7 Nov 2009 to 1400 BT 8 Nov in 2009: (a) Meicun; (b) Hengshan; (c) Luoshawan; (d) Heyang; (e) Maqun

存在一定的误差, 除此之外, 在没有大量观测实验和对其拟合系数本地化之前, 直接的应用会带来一定的偏差; (3) 能见度观测仪器也存在一定的误差。就能见度模拟效果而言, 在上述大雾模拟效果好的站点, 其能见度的模拟也十分接近观测值, 说明能见度分段计算公式, 有较好的拟合效果。因此, 我们的后续研究将从以下三个方面展开: (1) 利用 WRF-CHEM 对气溶胶粒子和水汽状态物理量进行综合模拟以改进模拟精确度; (2) 对模式模拟的初始场进行数据同化, 提高模拟液态含水量、雾滴数浓度、相对湿度、气压以及温度等参数的准确性; (3) 在沪宁高速公路沿线站点, 实施区域大雾观测实验, 获取苏南高速公路网 (特别是覆盖沪宁高

速公路不同路段的区域) 的能见度和微物理参数的模拟验证资料, 以寻找拟合度高的相关经验参数, 确定适用于本地的能见度计算公式。

3.5 大雾形成机制分析

3.5.1 水汽和动力条件分析

雾的形成过程, 要求近地面的水汽达到过饱和并产生凝结, 而空气中的水汽达到过饱和有两种基本过程: 一种是增湿, 另一种是冷却。近地面水汽充沛时, 气温稍有下降就会使水汽凝结。湿度越大、湿层越厚, 越有利于雾的形成。此次大雾过程最初是团雾雏形, 11 月 7 日 23:00 出现, 是由前一时段的雾霾混合物发展而来的。由于常州西站以西的沪宁高速公路西段处于平均海拔高度为 60 m 左右的

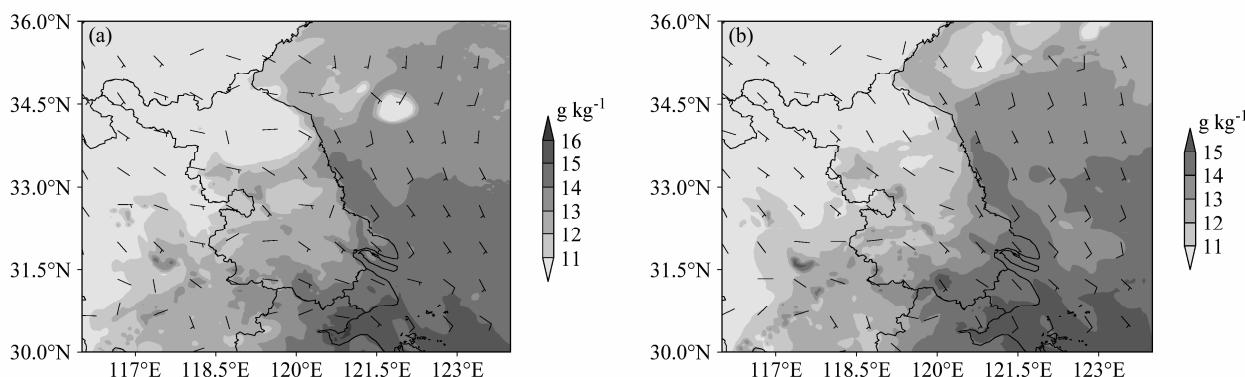


图 5 2009 年 11 月 7 日近地层大气比湿 (单位: g kg^{-1}) 和风场 (单位: m s^{-1}) 模拟结果: (a) 2009 年 11 月 7 日 19:00; (b) 2009 年 11 月 7 日 21:00
Fig. 5 The simulated specific humidity (g kg^{-1}) and wind field (m s^{-1}) at ground: (a) 1900 BT 7 Nov 2009; (b) 2100 BT Nov 2009

宁镇丘陵山区, 起伏地形易造成大量含有气溶胶粒子的霾粒(主要来自周边工业区)在公路所在的低凹地区上空汇聚滞留, 白天当空气中相对湿度较小时(小于 80%), 易形成霾。日落后, 一方面近地层气温下降, 蒸发速率变小, 空气中相对湿度增大; 另一方面受来自东南方太湖西岸的湖风(东南风)和来自北侧长江南岸的江风(偏北风)的双重影响, 两股有较大水汽含量的气流遇地形抬升引起绝热冷却, 冷却后的高湿气流与原来含霾粒的低湿气流混合, 变成雾霾混合物, 随着夜幕的降临、气温的逐渐下降和空气湿度的逐渐增大, 雾霾转成团雾。而在 8 日 02:00 后, 常州西站以东路段的潮湿空气, 则是由于夜间辐射冷却不断降温逐渐达到饱和, 原有的团雾区域不断扩大转变为较大范围的辐射雾。

图 5 是团雾形成(11月7日 23:00)前两个时次(19:00、21:00)的地面比湿和风场的配置图, 可以看出江苏地区主要受到入海反气旋西南侧东南气流的影响。海上的潮湿空气在东南气流的输送下向西北陆地入侵, 成为本次辐射雾过程的主要水汽来源。在 7 日 19:00, 苏南地区最先受其影响, 地面比湿已经超过 11 g kg^{-1} (见图 5a)。到 7 日 21:00, 东南气流深入内陆后风速逐渐减小, 其携带的水汽在大雾形成前基本停滞或徘徊于江苏淮河以南地区, 此时这些地区的地面比湿已经达到 11 g kg^{-1} 以上(图 5b), 充沛的水汽为该地区大雾的形成提供了有利的条件。此外, 环太湖地区空气中水汽含量高于其它地区, 原因是在近地层湍流混合的作用下, 湖面水汽容易被带到空中并向周边地区弥漫, 因此, 太湖水体也是本次大雾的水汽来源之一。

从模拟输出的地面上 10 m 高度水汽通量散

度场与垂直速度场上可以看出, 11月7日 20:00 河阳至镇江路段处在一个微弱的水汽辐合区之中(见图 6a), 这正好对应着团雾即将形成的区域。由于之前从东部海上进入内陆的暖湿空气, 经过太湖时水汽得到了补充, 其后在向西北方向运动时遇太湖西面宁镇丘陵东部的喇叭口地形产生较为明显的辐合抬升运动(见图 6b), 潮湿气流在爬坡抬升过程中逐渐趋于饱和或过饱和, 加上绝热冷却作用容易凝结成雾。

团雾爆发所对应的微弱的水汽辐合区表明远离太湖的周边地区对雾区的水汽输送并不是很强。分析其因有二: 一是由于风力较弱, 周围环境的水汽不容易被输送到水汽发生凝结的区域; 二是由于雾区的水汽本来就很充沛, 在大雾形成之前, 苏南大部分地区的地面比湿基本都在 13 g kg^{-1} 以上, 足够一次大雾的生成和维持。

3.5.2 冷却条件分析

在辐射雾的形成中冷却作用至关重要, 温度的局地变化主要是由温度平流、垂直运动和非绝热作用引起的。对于平原地区, 如无强对流天气出现, 一般近地层的垂直速度很小, 可以忽略不计。因此, 温度的局地变化主要取决于温度平流和非绝热项。而温度平流和非绝热项则通过辐射收支、水汽凝结与蒸发、地气感热交换等产生作用。夜晚因无短波辐射收入, 地面以长波辐射支出为主, 在晴空的夜晚, 这种长波辐射向上支出更大, 因而导致失热更明显, 冷却降温幅度更大; 如遇风力微弱或静风则辐射冷却更显著, 如果水汽条件合适, 则有利于辐射雾的形成。

所谓地面有效辐射通量是指地面向上的长波辐射通量与大气向下的长波逆辐射通量的差值, 它

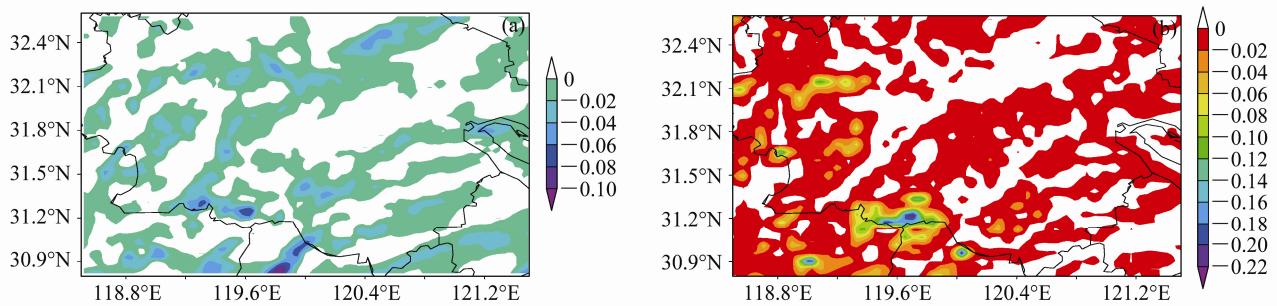


图6 2009年11月7日20:00离地面10 m高度(a)水汽通量散度场(单位: $10^{-7} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$)和(b)垂直速度(单位: m s^{-1})模拟结果

Fig. 6 The distributions of simulated (a) moisture flux divergence (units: $10^{-7} \text{ g cm}^{-2} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-1}$) and (b) vertical velocity (units: m s^{-1}) at 10 m above the ground at 2000 BT 7 Nov 2009

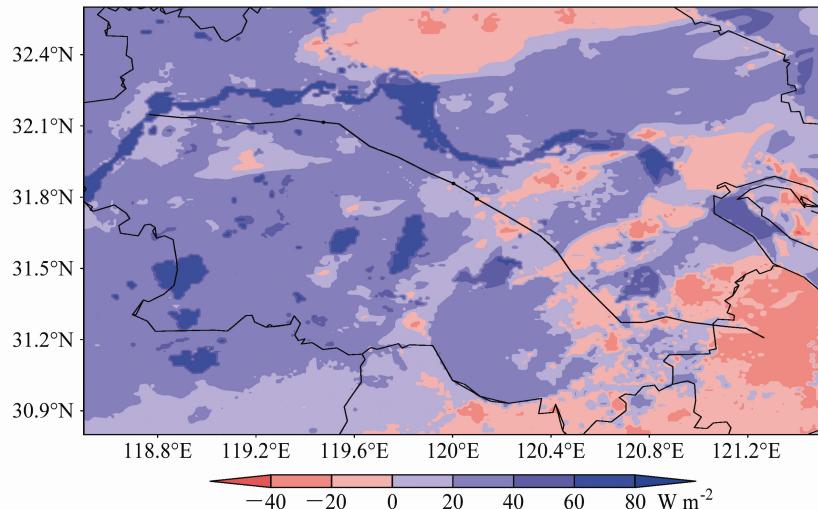


图7 2009年11月7日20:00地面有效辐射通量分布(单位: W m^{-2})

Fig. 7 Distribution of the effective terrestrial radiation flux in the engendering process of the mixed fog at 20:00 BT 7 Nov 2009

与地面温度与上层空气温度之间的差值成正比, 当地面温度高于上层气温时, 地面有效辐射通量为正值, 方向上向; 反之, 当地面温度低于上层气温时, 地面有效辐射通量为负值, 方向向下。图7所示的是2009年11月7日20:00的地面有效辐射通量, 图中地面长波辐射通量正值区(蓝色区)表示地面通过长波辐射热交换而向上失热, 地面会冷却降温; 负值区(红色区)则表示地面长波辐射通量向下, 是获热增温过程, 由于净辐射收入大于支出而引起。从图中可以看出, 在团雾形成前, 江苏省的西南部地面有效辐射通量都是正值, 大部分都在 20 W m^{-2} 以上, 而江苏省的东部由于夜空有层云(图略)的遮挡, 地面接受的大气逆辐射要比其发射的长波辐射多, 地面冷却降温作用并不明显, 这也意味着公路西段成雾比东段容易。从河阳站所模拟的几个时次的单站探空图(见图8)中, 我们可以看出在7日20:00该站近地面逆温层较弱, 温度露点差相对较大, 此时该站还处于雾霾阶段, 虽然团雾生成的水

汽条件已经建立, 但是由于刚刚入夜不久地面辐射冷却降温还在开始阶段。7日23:00河阳站的近地层逆温开始发展, 近地面暖湿空气在冷却作用下接近饱和, 雾霾逐渐转变为局地性的团雾。到了8日02:00河阳站的逆温层进一步加深, 团雾水平范围扩大形成大范围的辐射雾, 近地层的空气达到饱和。

图9是成雾前后四个时次气温与液态含水量沿 31.8299°N (即经过常州北站)的高度—经度剖面图。可以从图9a中看到, 在成雾前的7日20:00, 随着地面辐射冷却作用的增强, 逆温层刚刚开始建立, 近地层的空气尚未饱和。在23:00, 西段云图(图略)上显示此时晴空无云, 辐射冷却作用加剧, 原先的团雾体由于辐射雾体的结合而变厚、面积扩展(见图9b); 东段则由于层云(图略)的影响, 辐射冷却作用并不明显, 但由于海上暖气团存在对东部路段地区的暖平流作用, 所以该地区仍有平流轻雾体。大雾形成(约8日01:00前后)后, 逆温层进一步加强; 雾体形成后, 雾顶同样也会有向上的

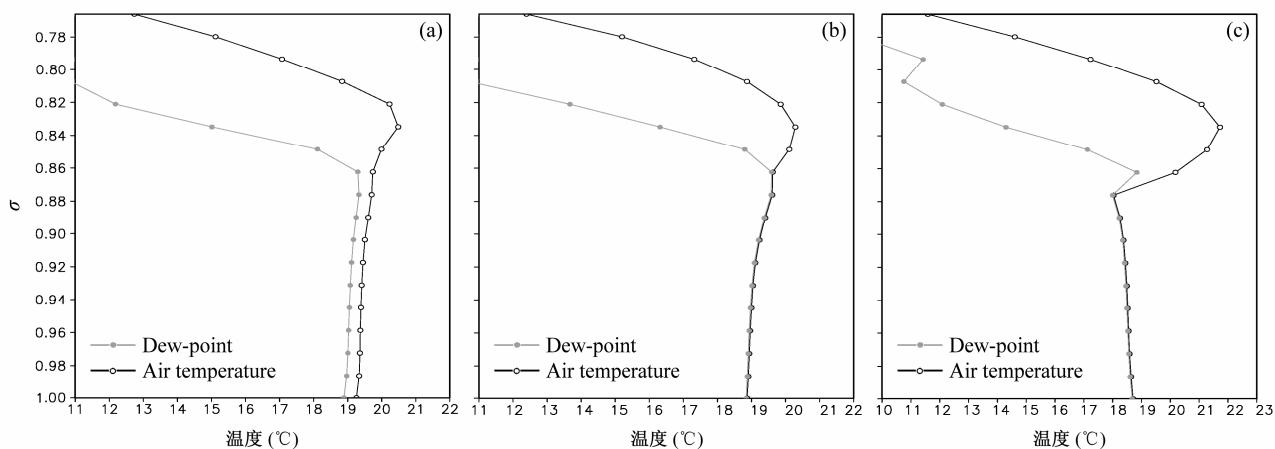
图8 河阳站模拟探空图: (a) 2009年11月7日20:00; (b) 2009年11月7日23:00; (c) 2009年11月8日02:00。纵坐标 σ 为地形追随坐标

Fig. 8 The simulated sounding charts at Heyang staion: (a)2000 BT 7 Nov 2009; (b) 2300 BT 7 Nov 2009; (c) 0200 BT 7 Nov 2009

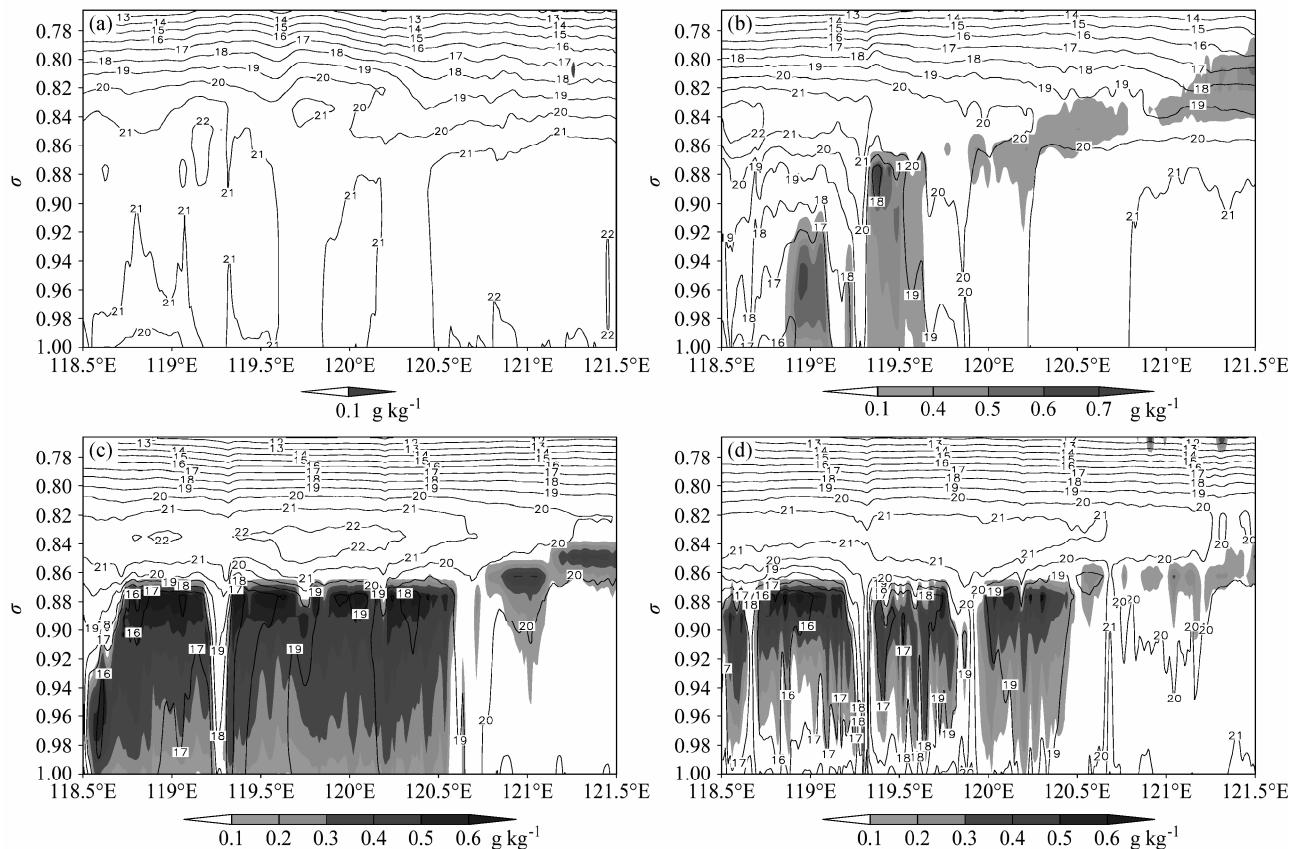


图9 沿31.8299°N的气温和液态含水量高度—经度剖面: (a) 2009年11月7日20:00; (b) 2009年11月7日23:00; (c) 2009年11月8日04:00; (d) 2009年11月8日09:30。实线表示气温(单位: °C); 阴影表示液态含水量(单位: g kg⁻¹)

Fig. 9 Longitude-height cross sections of the temperature (solid line, units: °C) and the liquid water content (shaded area): (a) 2000 BT 7 Nov 2009; (b) 2300 BT 7 Nov 2009; (c) 0400 BT 8 Nov 2009; (d) 0930 BT 8 Nov 2009

长波有效辐射通量，使得雾体向垂直方向发展(Dunynkerke, 1991)。到了8日04:00，来自东南和西南方向的平流作用减弱、影响区域东移（西界从中段的窦庄站东移至苏州西站以东），东段无云（图略）且辐射冷却明显增强；至此，高速公路绝大多数

数路段（除个别极短的路段外）辐射冷却都很明显，辐射雾体与平流雾体、团雾体混合一体，浓度达最大、雾层达最厚、面积达最广（见图9c），此后一直稳定维持达5 h以上。日出后09:30，由于短波辐射增温加剧、低层大气中水汽蒸发增强，有效辐射

通量逐渐由负转正, 转变快的是公路东、西两段, 中段(河阳站以东、无锡北站以西)由于下垫面水体分布密集且以大水体(北有长江, 南有太湖)为主, 日出后地表蒸发会将水体表面的水汽输送到低层大气中, 因此, 雾体消散得慢(见图9d)。

4 结论

本文利用 WRF3.1 模式对 2009 年 11 月 7~8 日发生在沪宁高速公路上的一次复杂性大雾天气过程进行了精细化的数值模拟, 在了解天气实况的基础上, 分析了大雾发生的大气环流背景, 从大气水汽、动力和冷却条件等方面剖析了雾的成因和不同阶段雾体的生消机制, 研究表明:

(1) 本次大雾前后的天气形势相对稳定, 江苏地区主要受入海反气旋西南侧东南气流影响, 整个大雾过程中地面风力始终微弱, 为大雾形成提供了有利的动力条件。

(2) 模式模拟的由大气液态含水量条件判别的成雾区分布与实测雾区范围基本吻合。

(3) 模式模拟的能见度与 AWMS 实测能见度十分接近。

(4) 本次大雾过程最初是团雾雏形, 在夜间辐射冷却作用下, 转为辐射雾, 之后, 来自东南海上的暖湿空气平流进入江苏陆地后, 所产生的平流雾雾体与原有辐射雾雾体结合发展为范围更大的辐射平流混合雾。

(5) 日出后短波辐射增温是此次雾体得以快速消散的主要原因。

在模式调试和运行过程中, 为提高模式对雾的模拟能力, 使用了高分辨率的初始场 NCEP $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 气象再分析资料, 同时修改下垫面分类为 MODIS 精细化分类, 增加了近地层垂直层数。为了检验模拟效果, 我们根据模拟的液态水含量、相对湿度、雾滴数浓度, 结合分段能见度计算经验公式, 得到了模拟能见度, 比较模拟能见度与 AWMS 能见度实测值, 发现模拟效果较好, 但存在一定的偏差。针对偏差讨论了该方法所存在的问题, 并提出了改进思路。此次混合雾天气过程是在特殊的大气背景下发生的, 稳定的大气环流形势是其成雾的基本前提, 高空合适的流场和地面微弱的风场是其有利的动力条件, 水平方向的水汽辐合和来自下垫面的水汽向上输送是其良好的水汽环境, 而不同时段、不同区域强弱交替的辐射冷却和暖平流是其混

合性、复杂性热力条件的具体体现。

通过本个例的研究可以发现: 水汽条件、动力条件和冷却条件是大雾形成的重要物理基础, 调整 WRF 模式中的相关参数可以成功地模拟高速公路上的大雾天气过程; 结合已掌握的成雾规律和实时监测的各种数据, 可以较好地预报高速公路雾害出现、维持和消散的时间、范围和强度, 为交通部门提供较好的气象保障服务。

参考文献 (References)

- Ballard S P, Golding B W, Smith R N B. 1991. Mesoscale model experimental forecasts of the haze of northeast Scotland [J]. Mon. Wea. Rev., 119: 2107–2123.
- Cotton W R, Anthes R A. 1993. 风暴和云动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 331–342. Cotton W R, Anthes R A. 1993. Storm and Cloud Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 331–342.
- 董剑希, 雷恒池, 胡朝霞, 等. 2006. 北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (2): 175–184. Dong Jianxi, Lei Hengchi, Hu Zhaoxia, et al. 2006. Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (2): 175–184
- Duynkerke P G. 1991. Radiation fog: a comparison of model simulation with detailed observations [J]. Mon. Wea. Rev., 119 (2): 234–341.
- 樊琦, 王安宇, 范绍佳, 等. 2004. 珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究 [J]. 气象科学, 24 (1): 1–8. Fan Qi, Wang Anyu, Fan Shaojia, et al. 2004. Numerical simulation study of a radiation fog in Pearl River Delta regions [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 24 (1): 1–8.
- Fisher E L, Caplan P. 1963. An experiment in numerical prediction of fog and stratus [J]. J. Atmos. Sci., 20 (5): 425–437.
- Gultepe I, Isaac G A. 2004. Aircraft observations of cloud droplet number concentration: Implications for climate studies [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 130A: 2377–2390.
- Gultepe I, Müller M D, Boybeyi Z. 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [J]. J. Appl. Meteor., 45: 1469–1480.
- 黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 1993. 西双版纳地区雾的数值模拟研究 [J]. 大气科学, 24 (6): 821–834. Huang Jianping, Li Zihua, Huang Yuren, et al. 2000. A three-dimensional model study of complex terrain fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmosferica Sinica) (in Chinese), 24 (6): 821–834.
- 李元平, 梁爱民, 张中锋, 等. 2007. 北京地区一次冬季平流雾过程数值模拟分析 [J]. 云南大学学报(自然科学版), 29 (2): 167–172. Li Yuanping, Liang Aimin, Zhang Zhongfeng, et al. 2007. Simulation and analysis of a winter advection fog in Beijing area [J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 29 (2): 167–172.
- 林艳, 杨军, 鲍艳松, 等. 2010. 山西省冬季雾中能见度的数值模拟研究 [J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2 (5): 436–444. Lin Yan, Yang Jun, Bao Yansong, et al. 2010. The numerical simulation of visibility during the fog in Shanxi Province in winter [J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology (Natural

- Science Edition) (in Chinese), 2 (5): 436–444.
- Pagowski M, Gultepe I, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43: 3–16.
- Pang C, Liu J. 2010. Simulation of regional fog event with WRF in North China and evaluation of visibility equations [C]// 5th International Conference on Fog, Fog Collection and Dew, FOGDEW2010-132
- 齐琳琳, 王晓丹, 宁应惠, 等. 2010. 耦合模式在局地辐射雾三维数值模拟研究中的应用 [J]. 气候与环境研究, 15 (1): 53–63. Qi Linlin, Wang Xiaodan, Ning Yinghui, et al. 2010. Application of a coupled model in numerical simulation of local radiative fogs [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (1): 53–63.
- 钱敏伟, 雷孝恩. 1990. 长江上空辐射雾的数值研究 [J]. 大气科学, 14 (4): 483–489. Qian Minwei, Lei Xiaoen. 1990. Numerical simulation of radiation fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmosferica Sinica)* (in Chinese), 14 (4): 483–489.
- Roach W T, Brown R. 1976. The physics of radiation fog: 2-D numerical study [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 102 (432): 335–354.
- 孙旭东, 徐华英, 李桂忱, 等. 1991. 二维平流辐射雾的数值模拟 [J]. 大气科学, 15 (6): 99–109. Sun Xudong, Xu Huaying, Li Guichen, et al. 1991. Two-dimension numerical model of advection-radiation Fogs [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmosferica Sinica)* (in Chinese), 15 (6): 99–109.
- Van der Velde I R, Steeneveld G J, Wijchers Schreur B G J, et al. 2010. Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 4237–4253.
- 万小雁, 包云轩, 严明良, 等. 2010. 不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟 [J]. 气象科学, 30 (4): 487–494. Wan Xiaoyan, Bao Yunxuan, Yan Mingliang, et al. 2010. Simulation of the dumpling fog on the Nanjing-Shanghai Expressway based on different land-surface schemes [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (4): 487–494.
- 吴兑. 2005. 关于霾与雾的区别和灰霾天气预警的讨论 [J]. 气象, 31 (4): 3–7. Wu Dui. 2005. A discussion on difference between haze and fog and warning of ash haze weather [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 31 (4): 3–7.
- 吴兑. 2006. 再论相对湿度对区别都市霾与雾(轻雾)的意义 [J]. 广东气象, (1): 9–13. Wu Dui. 2006. More discussions on the differences between haze and fog in city [J]. *Guangdong Meteorology* (in Chinese), (1): 9–13.
- 吴兑. 2008. 霾与雾的识别和资料分析处理 [J]. 环境化学, 27 (3): 327–330. Wu Dui. 2008. Discussion on the distinction between haze and fog and analysis and processing of data [J]. *Environmental Chemistry* (in Chinese), 27 (3): 327–330.
- 徐玉貌, 刘红年, 徐桂玉, 等. 2000. 大气科学概论 [M]. 南京: 南京大学出版社. Xu Yumao, Liu Hongnian, Xu Guiyu, et al. 2000. An Introduction to Atmospheric Science (in Chinese) [M]. Nanjing: Nanjing University Press.
- 袁成松, 卞光辉, 冯民学, 等. 2003. 高速公路上低能见度的监测与预报 [J]. 气象, 29 (11): 36–40. Yuan Chengsong, Bian Guanghui, Feng Minxue, et al. 2003. Monitoring and forecasting of low visibility on highway [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 29 (11): 36–40.
- 张利民. 1993. 重庆雾的二维非定常数值模拟 [J]. 大气科学, 17 (6): 750–755. Zhang Limin. 1993. A two-dimensional time-integral numerical model of Chongqing fog [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmosferica Sinica)* (in Chinese), 17 (6): 750–755.
- 周斌斌. 1987. 辐射雾的数值模拟 [J]. 气象学报, 45 (1): 21–29. Zhou Binbin. 1987. The numerical modeling of radiation fog [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 45 (1): 21–29.
- 邹进上, 刘长盛, 刘文保, 等. 1982. 大气物理基础 [M]. 北京: 气象出版社. Zhou Jinshang, Liu Changsheng, Liu Wenbao, et al. 1982. The Basis of Atmospheric Physics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.