

吴晓京, 朱江, 王曦, 等. 2017. 风云三号微波观测资料的海雾同化模拟 [J]. 大气科学, 41 (3): 421–436. Wu Xiaojing, Zhu Jiang, Wang Xi, et al. 2017. Sea fog simulation with assimilation of FY-3A microwave data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 421–436, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16105.

风云三号微波观测资料的海雾同化模拟

吴晓京¹ 朱江² 王曦¹ 杨冰韵¹

¹ 国家卫星气象中心中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

² 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 数值模式边界层物理过程和初值场条件的欠缺是海雾模拟准确率偏低的主要原因。本文为改进模式初始场, 开展针对海雾模拟的卫星观测资料同化试验, 将质量控制和偏差订正后的 FY-3A 卫星微波湿度计 (MWHS) 和微波温度计 (MWTS) 的优选通道数据, 经 3DVar (Three-dimensional variational data assimilation) 进入 WRF 模式以试验其对黄、渤海海雾模拟的影响。通过分析静止气象卫星检测到的海雾区模拟大气温、湿场同化分析增量, 发现代表环境场条件的海雾类型及模式对其模拟能力的差异, 显著影响了同化效果, 表现为同化对模式模拟能力较强的平流冷型海雾改进明显, 对模拟效果不甚理想的非典型混合过程中的暖型海雾阶段则基本没有改进效果。为寻找原因, 对包括海雾区低层大气模拟场逆温结构在内的温湿度场与邻近探空观测进行了对比, 分析了随时间演变的海雾格点温、湿场同化分析增量, 发现冷型海雾区格点同化分析增量能弥补观测—模拟差异, 使气温调减, 相对湿度调增, 同时水汽和液态水也出现负相关的变化, 边界层相关热力动力场同化分析增量在垂直方向也有配合迹象, 相比而言, 主体是暖型海雾的非典型过程则未见此类现象和其他的有益调整迹象。

关键词 卫星资料 数据同化 海雾模拟 微波湿度计 (MWHS) 微波温度计 (MWTS) 边界层

文章编号 1006-9895(2017)03-0421-16

中图分类号 P413

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1610.16105

Sea Fog Simulation with Assimilation of FY-3A Microwave Data

WU Xiaojing¹, ZHU Jiang², WANG Xi¹, and YANG Bingyun¹

¹ Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

² International Center for Climate and Environment Science, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Inappropriate description of physical processes within the boundary layer and errors in the initial condition are two primary reasons for the low accuracy of sea fog simulation. In order to obtain more satellite data assimilation and simulation experience for improving the initial condition, the present paper investigates the impact of assimilation of FY-3A MicroWave Humidity Sounding (MWHS) and MicroWave Temperature Sounding (MWTS) data derived from optimal channels. The WRF-3DVar (Weather Research and Forecasting–Three-dimensional variational data assimilation) is applied to assimilate these data that have been quality controlled and bias corrected in simulation and prediction experiments of sea fog over the Yellow Sea and Bohai. Analysis of the increments of temperature and relative humidity from the assimilation system over the sea fog region detected by Geo-satellite indicates that differences in the model capability for sea fog simulation and various types of sea fog that are related to the environmental condition have

收稿日期 2016-01-07; 网络预出版日期 2016-11-10

作者简介 吴晓京, 男, 1968 年出生, 理学博士、正研级高工, 主要从事气象卫星资料天气应用研究。E-mail: wuxj8@cma.gov.cn

通讯作者 朱江, E-mail: jzhu@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41075057、41675110

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41075057 and 41675110)

significant influences on the assimilation effects, i.e. the model performance is greatly improved by assimilation for the simulation of cold-type advection sea fog, which the model already has a strong simulation ability. However, for warm-type sea fog that involves non-typical mixing processes, data assimilation results in little changes in the simulation. In order to determine the reasons, direct comparisons between the simulated temperature and relative humidity at a sea fog covered grid and standard rawinsonde observations nearby, and analysis of the evolution of the temperature and relative humidity and their increments from assimilation at all sea fog covered grids, are carried out. The results show that the increments from assimilation at the cold-type sea fog covered grids can make up the deviations between observations and simulation by reducing temperature and increasing relative humidity; meanwhile, the atmospheric water vapor and liquid water contents also appear to be adjusted by assimilation. Possible increments and adjustment in the boundary layer by assimilation are also found in the vertical direction. However, similar phenomena and other beneficial signs of adjustment are not found during the warm-type sea fog period.

Keywords Satellite data, Data assimilation, Sea fog simulation, MicroWave Humidity Sounding (MWHs), MicroWave Temperature Sounding (MWTS), Boundary layer

1 引言

雾是因大气中水汽饱和凝结而影响视程的物理现象,在中高纬海洋、水汽丰富的近海以及邻近河湖的陆地多发,海洋上的雾称为海雾。据统计,全世界 40% 的海上事故与海雾有关,雾造成的人员财产损失可与龙卷风、甚至飓风的灾害相比 (Gultepe et al., 2007),而对(海)雾的形成发展机理的研究、认识和预报水平的提高速度却远落后于台风暴雨等强天气。因缺乏可靠观测,数值模式模拟是海雾研究的主要方式。回顾模式发展,首次三维模式的雾模拟成功,是使用当时的高空间分辨率与复杂物理方案的 UKMO 中尺度区域模式,依靠其输出云水诊断变量的便利条件,在对大西洋平流到北苏格兰的海雾模拟中取得的 (Ballard et al., 1991)。此后雾的中尺度模式模拟研究渐入轨道,国内则发展出二维 (胡瑞金和周发琇, 1997) 和三维 (傅刚等, 2002) 的海雾模式,他们曾成功地模拟出黄海的平流雾过程,其中三维模式具有部分海雾空间结构模拟表现能力,曾揭示出低云下沉为雾和延续其后的向上空蔓延现象。近年来,雾模式的发展更加注重汲取观测经验而改进模拟,分别开展了针对欧洲地形辐射雾 (Jacobs et al., 2007)、高纬度沿海冰雾 (Gultepe et al., 2006, 2015) 的 COST22、FRAM 等多项雾的综合研究计划,以新型地基、卫星遥感等观测为资料源,提高了对雾发生发展机理的认识和模式模拟预报能力。

模拟预报雾的难点在于模式普遍在雾的物理过程描述和初始场条件方面存在欠缺 (Gultepe et al., 2007)。前者涉及边界层湍流、云微物理、辐射和陆面过程方案以及相匹配的高分辨率模式;后者与

观测数据同化方案有关。国内外相关研究多聚焦此类方向。为发展模式能力,在改进机场雾单点预报研究中,前人研发了 COBEL (Bergot and Guedalia, 1994) 和 PAFOG (Bott and Trautmann, 2002) 等一维雾模型,提高了模式的边界层分辨率和对大气与下垫面间交换的描述能力,但仍无法模拟大气平流或大范围下沉运动等雾形成中的重要动力过程以及非均匀地表通量的影响。由此发展起的由中尺度模式提供初值,边界条件来驱动一维雾模式的 3D+1D 方法 (Bergot et al., 2005) 部分弥补了此类缺陷,且这种模拟方法不增加过多计算量就能得到包含精细化物理方案的结果,如在使用 PAFOG 和 WRF 耦合模拟黄海海雾中,揭示出了辐射、平流、湍流作用在冷洋面海雾形成中发生作用的细节 (Kim and Yum, 2012)。为增强对海气相互作用的描述能力,有研究采用耦合海洋模式 COAMPS 和大气模式 ROMS 的方法,提升了对海雾期间边界层大气稳定性、垂直混合、湍流和凝结过程的模拟,改善了平流雾的模拟效果,但对海气温差小的暖洋面蒸汽雾则作用甚微 (Heo and Ha, 2010)。面对雾形成、演变的各种复杂物理过程,发展集合预报技术是提升预报能力的手段和未来方向之一, NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 应用集合预报技术以弥补单模式缺陷,分别用 ARW (Advanced Research version of WRF) 和 NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model) 版 WRF 为成员发展起短期集合预报系统 (SREF), 改进了雾的预报业务 (Zhou et al., 2007)。在改善初始条件方面,前期研究发现作为大气中弱信号的雾易受混沌非确定性影响,对相对湿度、混合层高度等初始量的变化有敏感性差异 (Bergot and Guedalia, 1994)。为

寻求有效资料选择土壤、大气垂直温、湿度单点观测廓线进行同化试验,以改善中尺度模式 ALADIN 和 COBEL 耦合后的能见度和云底的模拟效果 (Bergot et al., 2005),探索了其优化雾模拟初值场的可能。更多研究是同化包含探空、地面、SATOB、TOVS、SATEM、AIREP 等观测的数据集合包,这种粗放的资料同化处理方式在中尺度模式雾模拟研究中占有相当比例,常用来提高模拟效果,以揭示机理、评估模式性能,如,CMC 同化业务系统的多资料观测数据集资料,以揭示湖岸风环流在五大湖区岸边的安大略团雾形成中的作用 (Pagowski et al., 2004);同化 ECMWF 档案和反演系统 (MARS) 内的多种数据,以评估多模式参数和分辨率对荷兰沿岸雾爆发和持续的模拟效果 (van der Velde et al., 2010);同化 GTS 多资料集合,以对比研究 WRF 和 RAMS 模式模拟黄海冷型海雾的能力 (高山红等, 2010a, 2010b)。在这些研究中,都使用了三维变分同化方法。因较低的计算资源需求,三维变分在目前的海雾模拟研究中仍是最常用方法。此外,集合预报技术的多初始场、多物理过程、多数值计算方案的思想也应用到雾的同化模拟研究中,为更多的同化地基微波探空观测数据,并且减少因模式调整时间过短而产生的边界层观测与背景场的较大误差协方差,采用了不同起报点初始场再加之 PAFOG 和 COBEL-NOAH 分模式双倍的集合初始场,以提高同化效果 (Müller et al., 2007),也是集合同化运用于雾模拟初始场改进的探索。

尽管海雾模拟同化不断有新的研究成果,但模拟海雾的效果仍不甚理想。表现为对强雾事件 (van der Velde et al., 2010) 和机理清楚的海雾 (Pagowski et al., 2004; Fu et al., 2006) 个例模拟相对成功,但对数十个过程的多事例成功率偏低 (Bartok et al., 2012),即使是集合预报的雾产品也对浅薄雾类型无表现能力 (Zhou et al., 2007)。这些结果除缺乏理想的雾物理方案外,都与初始条件有关。同时同化多种资料的研究方式因缺乏对各资料作用效果和原因的分析,而对初值的提高作用非常有限,表现为对冰冻条件下的雾模拟改进效果不明显 (van der Velde et al., 2010);对雾的爆发时段有效果,但无法改进雾持续阶段的预报 (Pagowski et al., 2004);多初始值集合同化后的模拟效果也不甚理想 (Müller et al., 2007)。总之,当前数据同化在多数

海雾模拟中只是作为机理研究、模式测试过程中的辅助资料处理步骤,缺乏专注于对同化数据源的试验和详细分析,不利于寻找偏差原因和理想观测资料,难以积累同化对雾模拟的作用条件、程度等信息以及资料质量控制、同化相关的模式参数选取等方面的经验。

此外,观测资料不足也是海雾初始场改进面临的瓶颈。卫星数据是目前唯一能够以较高时空分辨率覆盖大洋的观测资料,其中的星载微波仪器具有三维大气观测能力,该类观测被多个国家的业务预报中心作为常规同化数据源使用,NOAA-18、NOAA-19、MetOp-A 和 MetOp-B 等当前运行的极轨气象卫星都包括有 AMSU-A、AMSU-B 微波大气温、湿度观测仪器。近年来,风云三号气象卫星 (FY-3A) 光学、微波等仪器观测数据在多个领域的应用取得了长足的进步 (Dong et al., 2009),在评估风云三号微波仪器数值同化性能 (Lu et al., 2011b) 和天气、气候模拟应用潜力 (Zou et al., 2011) 的基础上,进行了大量的同化试验,且已经应用到 ECMWF 的模式中 (Lu et al., 2011a),但对 (海) 雾的模拟同化试验尚未开展。因此,本文在目前业务模式分辨率和物理方案的条件下,对 FY-3A 卫星的 MWHS (微波湿度计) 和 MWTS (微波温度计) 数据进行质量控制和偏差订正,在此基础上分别同化这两个仪器的选优通道数据,分析其对黄、渤海海雾相关量模拟场的改善能力和条件。

2 资料和方法

2.1 仪器和数据背景

本文使用的是国家卫星气象中心存档的 FY-3A 卫星 MWHS 和 MWTS 数据。MWHS 共有 5 个探测通道 (表 1),其中 3~5 通道位于 183 GHz 频率附近的水汽吸收区,具有云区水汽探测能力 (张升伟等, 2008),可探测 400 hPa、600 hPa 和 800 hPa 附近的大气水汽信息,1、2 通道位于大气窗区辅助探测频点,能有效探测地表发射信息。MWTS 共有 4 个通道 (表 2),其中 2~4 通道位于氧气吸收谱区,可分别探测来自 700 hPa、300 hPa 和 70 hPa 附近的大气温度,通道 1 位于 50.30 GHz,主要用于探测地表发射率。

FY-3A 卫星的 MWHS 资料和 MWTS 资料与 NOAA、MetOp 卫星的 AMSU-B (或 MHS) 和 AMSU-A 的对应通道观测技术指标非常近似,可采

用与二者对比分析的方法评价 FY-3A 卫星微波探空数据质量。对此,国内外已有充分研究,交叉对比 FY-3A/MWHS 资料和 NOAA17/AMSU-B 证明在 2008~2012 年期间二者的测量结果很接近,其中, MWHS 通道 4 的定标偏差为其各通道中最小,通道 3 观测场与背景场亮温差 (O - B) 为 1.08 K (Gu et al., 2012)。对比长时间全球 FY-3A/MWHS 资料与 NOAA18/MHS 的 O - B 的结果也表明二者偏差和标准差在量级上可比,但 MWHS 资料偏差略大 (Guan et al., 2011)。对 FY-3A/MWTS 通道 2~4 的研究发现其存在中心频率漂移现象 (Lu et al., 2011a), 在业务预处理系统中,已经订正该漂移导致的亮温偏差 (Zou et al., 2011), 经过频点测量误差和仪器非线性辐射偏差订正处理后的均方根误差约为 0.2 K, 与 MetOp/AMSU 可比 (许健民等, 2014)。

表 1 MWHS 仪器通道特征

Table 1 Channel characteristics of MWHS (MicroWave Humidity Sounding)

通道号	中心频率/GHz	带宽/MHz	星下点分辨率/km	噪声等效温差/K	权重峰值高度
1	150 (V)	1000×2	15	0.90	地表
2	150 (H)	1000×2	15	0.90	地表
3	183±1(V)	500×2	15	1.10	400 hPa
4	183±3(V)	1000×2	15	0.90	600 hPa
5	183±7(V)	2000×2	15	0.90	800 hPa

注: H 表示水平极化, V 表示垂直极化。

表 2 MWTS 仪器通道特征

Table 2 Channel characteristics of MWTS (MicroWave Temperature Sounding)

通道号	中心频率/GHz	带宽/MHz	星下点分辨率/km	噪声等效温差/K	权重峰值高度
1	50.30	180	62	0.50	地表
2	53.596±0.115	2×170	62	0.40	700 hPa
3	54.94	400	62	0.40	300 hPa
4	57.29	330	62	0.40	70 hPa

2.2 数据偏差分析和订正

使用预处理后的 2011 年 MWHS 和 MWTS 全球观测数据以及 FNL (Final Analysis Data of GFS) $1^\circ \times 1^\circ$ 数据, 以快速大气辐射传输模式 (RTTOV V10.1) 为观测算子, 计算 MWHS 资料和 MWTS 资料各通道原始扫描点在 $60^\circ\text{N} \sim 60^\circ\text{S}$ 范围内 10° 间隔纬度带的 O - B (吴晓京, 2014), 其结果 (图略) 显示 MWHS 资料的 1、2 通道在南半球有分布特征相似的 2~7 K 负偏差, 5 通道在北半球存在 1、

2 扫描点相关的偏差, 幅度在 2 K 左右; MWTS 的 1 和 4 通道偏差也较大, 部分扫描点偏差有 2~4 K, 其中 4 通道在北半球中纬度的偏差依赖于扫描点的特征明显。与上述通道相比, 两个仪器四个探测权重较高的通道偏差较小, 在北半球 MWHS 的 3、4 通道偏差小于 0.5 K, MWTS 的 2、3 通道偏差小于 0.1 K, 且偏差没有明显随扫描点变化。其他相关研究分析 (Lu et al., 2011a, 2011b) 也有近似结论。

为使辐射量偏差中仅保留单一的随机特征, 同化中需要订正系统性偏差。卫星微波观测辐射偏差订正从偏差的扫描点空间变化和气团依赖性着手 (Eyre, 1992), 对此已经有较为成熟的订正方案 (Harris and Kelly, 2001; 刘志权等, 2007; Lu et al., 2012)。本文使用的数据经过整体质量检验和偏差订正, 流程为: (1) 分析下垫面类型, 舍弃陆地点以及其他混合类型, 只保留海洋点; (2) 进行粗检验, 包括舍弃任何通道更新向量 (O - B) 偏差超过 20 K 和大于 3 倍观测误差的扫描点等; (3) 对粗检后的数据按顺序进行扫描偏差订正和气团偏差订正, 其中气团偏差订正系数基于选择的气团预报因子经多元线性回归 (Harris and Kelly, 2001)。

对所有通道进行偏差订正后, 依然是 MWTS 通道 2、3 数据和 MWHS 通道 3、4 的 O - B 残差直方图更趋于高斯分布, 合理程度与经同样方法订正的 NOAA18 的 AMSU-A 和 MHS 对应通道的结果相当 (吴晓京, 2014)。综合考虑质检阶段和偏差订正后的数据质量, 选择上述四个通道按仪器名称分为两组 (以下同化模拟中, 分别以 MWHS 和 MWTS 代表), 作为数据源同化进入模式。

2.3 涉及模拟分析方法的部分考量因素

雾在中高纬海域广泛分布, 成因各异, 分类方法多样 (Gultepe et al., 2007)。地基观测的海气温差是海雾研究中最常用的分类依据 (Koraćin et al., 2014), 按海表面温度 (SST) 与沿岸气温 (AT) 差海雾分为冷型和暖型两类 (Kim and Yum, 2010; 黄健等, 2010; Heo and Ha, 2010)。SST - AT < 0 为冷型海雾, 此类型海雾成因较明确, 多因偏南暖湿气流平流到相对冷的海面后降温饱和和凝结形成 (Zhang et al., 2009); 反之, SST - AT > 0 为暖型海雾, 此类海雾形成主因是近饱和空气团受湍流和辐射等综合作用而降温饱和和凝结 (Pilić et al., 1979), 对黄海此类海雾的研究认为雾顶长波冷却压倒海面使气团变暖的作用, 加速雾层不稳定导致

湍流输送热量和水汽而成雾 (Kim and Yum, 2010)。暖型海雾在海岸带多发, 因此也有研究认为陆上弱冷空气入海及在浮力作用下形成的湍流是气团饱和的主要原因 (Koračin et al., 2005), 夜间陆地的长波冷却和海陆风作用会使这种海雾在凌晨后增长明显 (Koračin et al., 2014)。在黄海, 冷型海雾发生频繁, 频次是暖型的三倍 (Kim and Yum, 2010), 且持续时间长、范围广 (Zhang et al., 2009)。

雾的模拟效果受代表雾的模式输出变量选择的影响很大。由模式量直接计算得到的能见度与实况相比存在很大误差, 难以表现雾及其强度 (Gultepe et al., 2006, 2009), 如以接近雾物理含义的量——大气液态水含量 (LWC 或 Q_v) 划界雾, 虽能建立与能见度间的统计关系 (Kunkel, 1984), 但与模式设计此量——模拟降水和相关云的初衷相悖, 且效果对模拟分辨率敏感, 当水平分辨率 15 km 时, 模拟会严重低估雾 (Zhou and Du, 2010), 而在水平分辨率 1 km 和大气低层垂直分辨率 100 m 时, LWC 诊断雾的效果则较好 (Hu et al., 2014)。预报员在业务中一般以模式输出的 RH (相对湿度) 和风速组合标准预报雾。这种界定雾的方法也较为普遍地应用在研究领域, 对比 15 km 水平分辨率的 3 组模拟输出量的结果, 模式场 2 m 高度处相对湿度 (RH_{2m}) 和 10 m 高度处风速 ($Wind_{10m}$) 结果与实测雾符合度明显高于 LWC, 其中又以 RH_{2m} 90% 和 $Wind_{10m} = 2 \text{ m s}^{-1}$ 为最佳 (Zhou and Du, 2010)。在受计算资源局限而无法达到高分辨率和使用复杂物理方案的 NCEP/MEPS 业务产品中, 就使用了 RH_{2m} 、 $Wind_{10m}$ 标准界定雾 (Zhou et al., 2007) (www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/wd20bz/SREF_aviation/web_site/html_212/fog.html [2016-10-10])。因此, RH_{2m} 、 $Wind_{10m}$ 标准较为适合在现有业务条件的模式输出中代表雾。海雾平流性强, 雾时风力约 3~5 级, 甚至 6 级 (王彬华, 1980), 风速范围较宽, 不宜用于划界, 所以本文模拟中以 RH_{2m} 值为标准, 采用其与卫星海雾检测结果 (图 1、2 中黄色区域) 对比的方法分别得到同化 MWHS 资料、MWTS 资料后的雾区 RH_{2m} 分析增量, 以判断改进效果, 从同化前后海雾区其他模拟场相关要素的变化分析 RH_{2m} 改变的原因。

卫星海雾检测结果由分别适用于白天的动态阈值法 (Cermak and Bendix, 2008) 和夜间的双通道法 (Eyre et al., 1984) 的改进型检测算法获得,

且经过人工检验确认, 可认为是真值。需要指出的是卫星检测结果中不含云下海雾。日照条件突变的晨昏时刻 (23:00、00:00 和 09:00、10:00; 协调世界时, 下同), 目前尚无算法可检测雾 (Lee et al., 2011), 因此这时使用此前 1~2 小时的检测结果。

下文在第四部分中采用卫星检测到的海雾区同化前后模拟量, 按海雾分型分析、研究 RH_{2m} 同化分析增量演变及原因。

3 WRF 模式参数和试验设计方案

本文模拟采用 WRF 模式 ARW 版 3.3.1 (简称 ARW-WRF), 同化采用其内置的 3DVar (Three-dimensional variational data assimilation) 模块 (Barker et al., 2012)。模式设置从底到顶共 28 层, 其中大气 21 层。虽然多数研究认为增加垂直分辨率有助于提高海雾模拟效果 (Pagowski et al., 2004; van der Velde et al., 2010), 但垂直分辨率要与水平分辨率与物理参数化方案相协调, 否则会带来相反结果 (Bergot et al., 2007)。本文为匹配 ARW-WRF 模式物理方案和现设置的较粗水平分辨率, 选择了适当细化低层大气网格距, 设置 1000 hPa、975 hPa、950 hPa、925 hPa、900 hPa 共 5 个模式层。

有关对比研究发现, 雾区的气温 (T)、相对湿度 (RH)、风和入射长波辐射模拟效果与模式微物理—边界层—陆面过程方案的设置相关, WSM3-YSU-Noah 方案优于 WSM5-YSU-Noah、Ferrier-YSU-Noah、WSM3-MYJ-Noah 等方案 (van der Velde et al., 2010)。在使用多种配置评估模式对黄海海雾模拟性能的结果中, 证明 PLIN-YSU-Noah 是效果最佳的组合方案 (Wang et al., 2014)。除微物理方案略有差异外, 其他 WRF 模式模拟海雾 (Yi et al., 2014) 或雾 (Zhou and Du, 2010; Hu et al., 2014) 的研究, 都认可 YSU-Noah 方案。因此本文采用了 WSM3-YSU-Noah 方案, 设置详见表 3。其他模拟相关的重要背景信息还包括: 非线性算子使用 RTTOV V10.1 非散射辐射传输模式, 海温采用气候值, 模拟时间为 48 h, 分别为 2011 年 2 月 20 日 12:00 到 22 日 12:00 和 3 月 11 日 12:00 到 13 日 12:00, 同化时间为模拟起报时间。分析增量采用同化 FNL + GTS + MWTS 资料或 MWHS 资料与 FNL + GTS 资料对比的方法形成。3DVar 背景误差场源自 NMC 方法。

表 3 同化模拟试验使用的 WRF 模式设置

Table 3 WRF model configurations of assimilation and forecast experiments

模式选项	设置方案
区域	中心点纬度 30°N, 经度 125°E; 东西方向 141 个格点, 南北方向 121 个格点
分辨率	水平分辨率 45 km
时间步长	180 s
边界层方案	YSU 方案
积云方案	Kain-Fritsch 方案
微物理方案	WSM 3 简单冰方案
辐射方案	长波: RRTM 方案; 短波: Dudhia 方案
陆面过程	NOAH 陆面过程方案
近地面层	Monin-Obukhov 方案

选择的两次过程同化起始时间在 2 月 20 日 12:00 和 3 月 11 日 12:00, 分别在海雾发生过程中和海雾发生前 10 h。卫星观测数据进入同化的范围由时间选项控制。经 6 h 模拟以去除 spin-up 噪声后, 同化起始, 此时刻正负 3 h 时间段为同化窗区, 当时 FY3A 卫星观测对应的空间范围涵盖了 85°E ~ 165°E 的经度带, 这个范围覆盖了本模拟全部选定的研究区域。经过前述偏差分析和订正后的海洋范围 MWTS 和 MWSH 观测数据都有机会同化进入模式。

4 海雾过程模拟和同化增量分析

4.1 非典型混合海雾过程

2011 年 2 月 20 日, 环绕山东半岛的近岸海域出现雾, 此时半岛南侧海温 (参考 TERRA/MODIS 资料的 SST 产品, 图略) 为 4~5°C, 渤海南部 2~3°C, 黄海南部 6~7°C。过程中的绝大部分时间, 沿岸测站气温 (表 4) 低于附近海温。21 日 12:00, 风向转变, 此后偏南、偏东风使气温升高, 海气温差变小, 22 日 06:00 位于江苏启东境内紧邻黄海的吕泗站气温高于海温, 成为暖型到冷型海雾的转折点。本过程是一次中前期具有暖型海雾特征, 后期逐渐趋于冷型海雾标准的非典型混合海雾过程。

以风向转变时间点将过程划分为两个阶段, 第一阶段 (21 日 12:00 之前), 雾从高压前部弱离岸风中的近岸海域 (图 1, 黄色部分), 缓慢向南、向东增长, 符合陆上弱冷空气入海后混合冷却而在近岸水域形成的暖型海雾形态特征。第二阶段 (21 日 12:00 之后) 暖型特征开始消退, 冷型特征逐渐显现, 雾区随风向转变逐渐离岸向北、向东发展, 弥漫黄海东北部。22 日 00:00 之后, 因云系移入遮挡, 卫星无法检

测到黄海西南部海雾。

表 4 2011 年 2 月 20~22 日地面观测风速、风向及气温统计
Table 4 Surface observations of wind speed, direction, and temperature from 20 to 22 February 2011

时间	山东省成山头站 (站号 54776)			江苏省吕泗站 (站号 58265)		
	风速/m s ⁻¹	风向	气温/°C	风速/m s ⁻¹	风向	气温/°C
2月20日 12:00	4	北	-1	2	北	4
2月20日 18:00	4	北	-4	2	北	3
2月21日 00:00	3	北	-3	2	西	1
2月21日 06:00	3	北	1	2	北	5
2月21日 12:00	0	静	-3	1	西	4
2月21日 18:00	3	南	-3	1	北	3
2月21日 00:00	4	南	-2	2	东	2
2月22日 06:00	5	南	2	5	东	10
2月22日 12:00	5	南	0	3	东	7

同化 MWSH 资料和 MWTS 资料后, RH_{2m} 场绝大多数格点值发生了小于 0.4% 的变化, 以同化 MWSH 资料后 RH_{2m} 的增量为例 (图 1 中格点), 经过 8 h 调整后, 格点值间变化趋于稳定、连续。在 22 日 02:00~06:00, 南风下的江苏沿海雾区格点 RH_{2m} 出现有规律的连续超过 1.6% 的增量 (图 1 中红圈处), 此增量位于海陆雾相联结地区。此时的江苏省沿海海气温差已经达到冷型海雾标准。

4.2 冷型海雾过程

2011 年 3 月 12 日 05:00 有海雾自东海生成向北发展, 进入黄海后爆发, 至 16:00 弥漫黄海大部 (图 2 中黄色区域)。此过程中黄海从北到南的洋面温度 (SST) 在 4~7°C, 沿岸气温 (表 5) 高于海温, 近洋面风向持续偏南。卫星观测到雾区主体自西南向东北发展, 形成带状雾区分布, 13 日 08:00 后因江苏沿海有云系移入遮挡了卫星观测海雾的

表 5 2011 年 3 月 11~13 日地面观测风速、风向及气温统计
Table 5 Surface observations of wind speed, direction, and temperature from 11 to 13 March 2011

时间	山东省成山头站 (站号 54776)			江苏省吕泗站 (站号 58265)		
	风速/m s ⁻¹	风向	气温/°C	风速/m s ⁻¹	风向	气温/°C
3月11日 12:00	5	南	3	3	南	9
3月11日 18:00	5	南	6	4	南	8
3月12日 00:00	5	南	4	5	南	10
3月12日 06:00	10	南	4	3	南	18
3月12日 12:00	9	南	3	5	南	10
3月12日 18:00	8	南	6	3	南	9
3月13日 00:00	8	南	6	4	南	9
3月13日 06:00	6	南	3	6	南	18
3月13日 12:00	6	南	2	4	东	11

视野，致使黄海中南部卫星检测到的雾区逐渐破碎化（图 2）。此过程至 15 日南风平流减弱后结束。本例海雾呈现出初期爆发性增长，覆盖海域广阔的特点，是一次典型的冷型海雾过程。

12 日 06:00 海雾发生，以同化 MWTS 资料后 RH_{2m} 的增量为例（图 2 中格点），12 日 22:00 开始在黄海北部海雾覆盖区域出现了 RH_{2m} 增量 2% 以上高值点（图 2 中浅绿色十字），该增量幅度维持 8

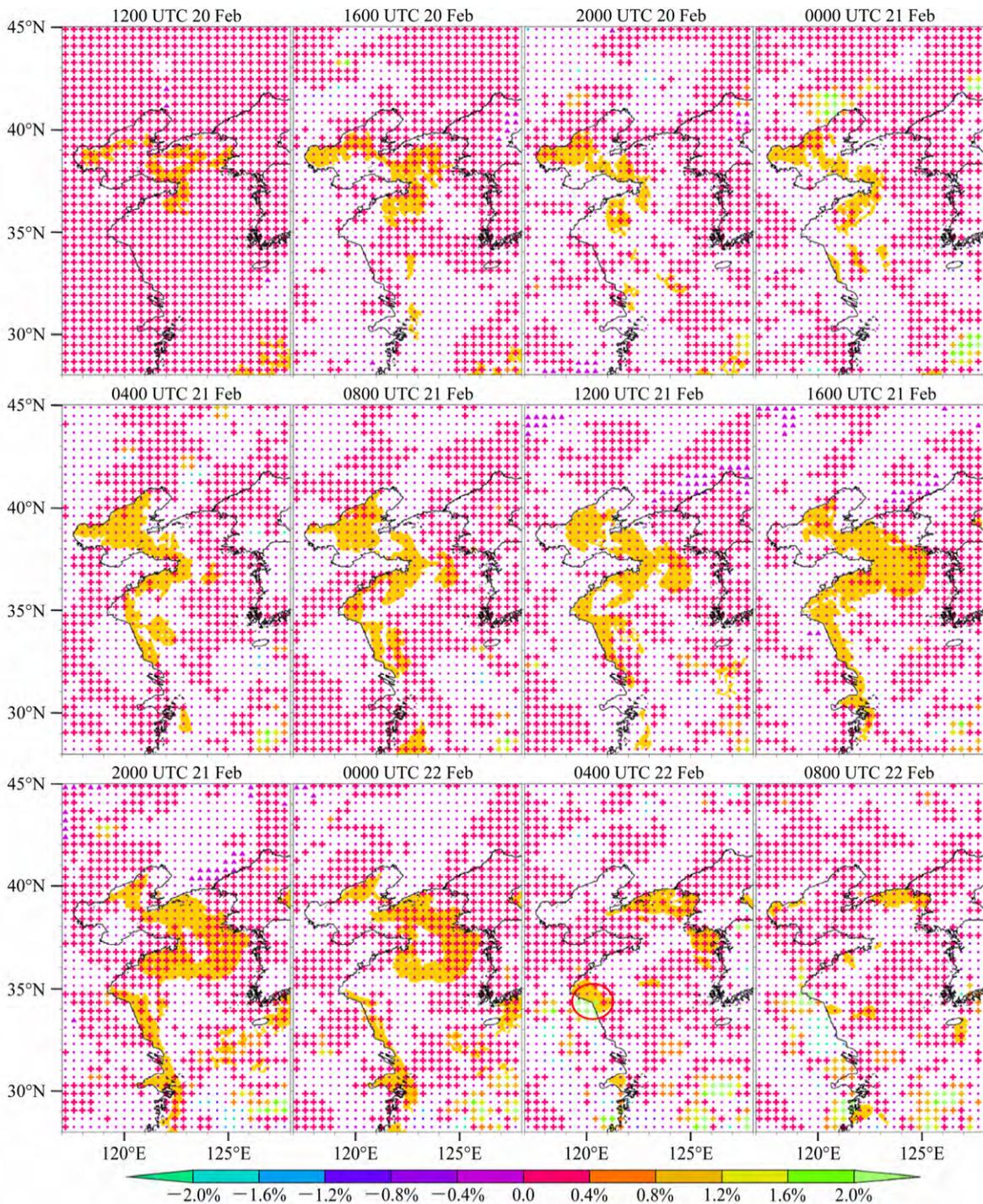


图 1 2011 年 2 月 20 日 12:00 到 22 日 08:00 每间隔 4 小时的同化 MWHS 资料后 RH_{2m} 分析增量与卫星检测的海雾区（黄色区域）叠加图。图中“+”、“.”和“Δ”符号分别表示 RH_{2m} 增加、减少和不变，增减变化幅度如色标所示；红圈为同化分析增量显著的海雾区

Fig. 1 Evolution of RH_{2m} (relative humidity at 2-m height) increments by the MWHS radiance data assimilation overlapped with the sea fog area (yellow regions) detected by satellite at 4-hour interval from 1200 UTC 20 to 1200 UTC 22 February 2011. “+”, “.”, and “Δ” denote increases, decreases, and unchanged; red circle represents obvious increments of the sea fog area

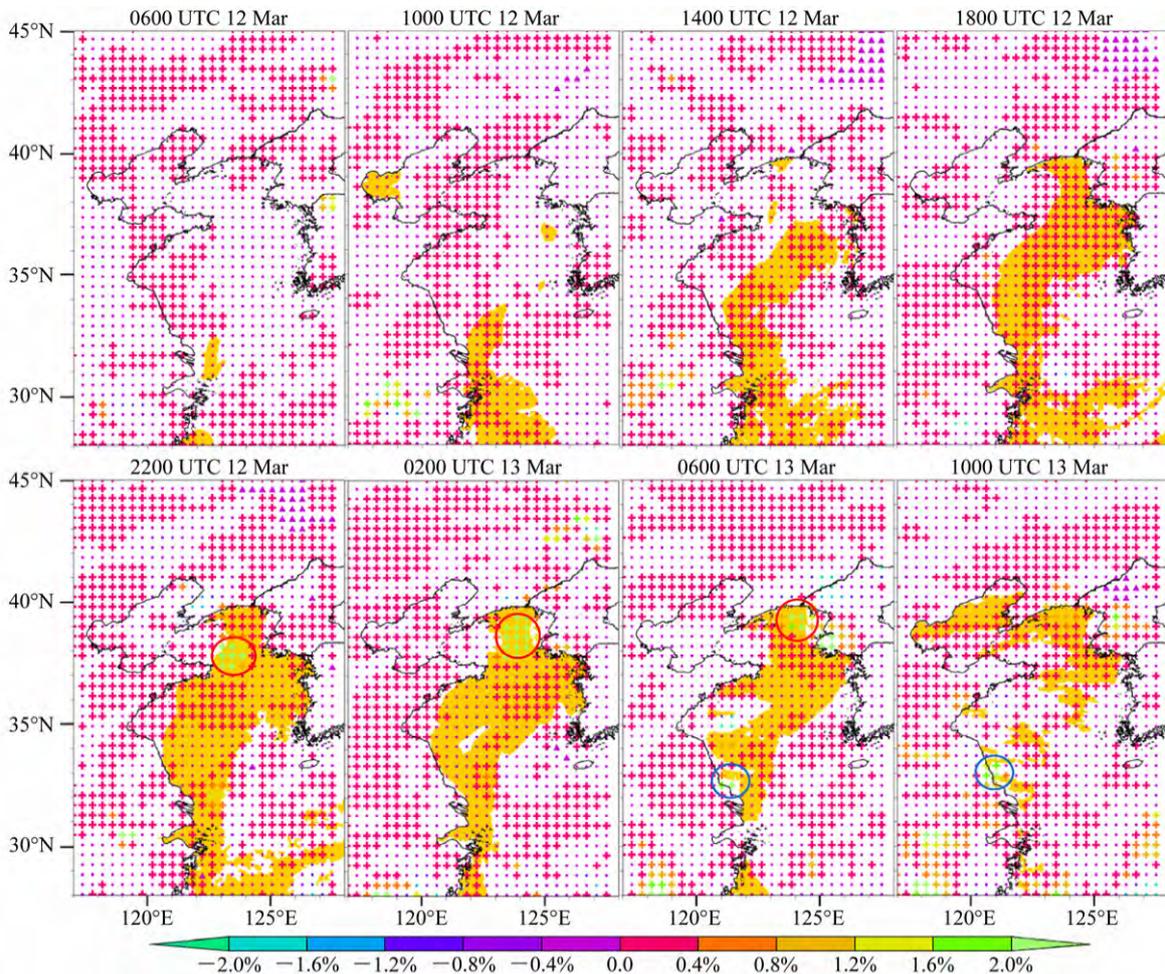


图 2 同图 1，但为同化 MWTS 资料后的结果，时间为 2011 年 3 月 12 日 06:00 至 13 日 10:00。红圈和蓝圈分别为黄海北部、江苏中部沿海同化分析增量显著的海雾区

Fig. 2 As in Fig.1, but for the RH_{2m} increments by MWTS data assimilation for the period from 0600 UTC 12 to 1000 UTC 13 March 2011. Red circles and blue circles represent obvious increments of the sea fog area in northern Yellow Sea and along the coast of central Jiangsu Province, respectively

个时次以上，到 13 日 08:00 依然明显，位置移动到海雾区北部和紧邻的朝鲜西海岸陆地区域，至 13 日 12:00 模拟结束时，该海岸位置仍有 1.2% 增量。这些 2% 以上高增量格点区域（图 2 中红圈处）正位于同化前模拟场 80% ~ 90% 的 RH_{2m} 相对低值位置（图 3 中白圈处）。在江苏省中部沿海的海雾区域 13 日 06:00 ~ 10:00 原 RH_{2m} 模拟场在卫星检测的雾区出现小于 95% 的低值缺口（图 3 中黄圈处），同化 MWTS 资料后也出现了 2% 以上高值增量（图 2 蓝圈处）。整个过程海雾区 RH_{2m} 没有出现明显减量。

同化 MWTS 资料后，海雾格点的部分底层模式场物理量累计增量的逐时次统计（图 4）显示：对此次过程四种与水汽凝结相关的模式变量出现

了规律性变化，表现为 RH_{2m} 出现峰值为 280% 的增量，同步于此峰值的 2 m 高度气温 (T_{2m}) 降低了 40 K（图 4a）。之前曾有研究在对荷兰沿岸雾的模拟中发现，WRF 模式模拟的雾区气温存在偏高现象， T_{2m} 偏高幅度达 5°C (van der Velde et al., 2010)。本模拟中也存在雾区气温比真实值偏高的可能，这种偏高会造成 RH_{2m} 偏低而欠饱和。此外，相同时段 1000 hPa 的云中液态水含量 (Q_c) 和水汽含量 (Q_v) 也出现了近似的负相关调整， Q_c 增加和 Q_v 减少的累计变化峰值分别为 0.007 kg kg⁻¹ 和 0.009 kg kg⁻¹（图 4b），这可以理解为模式内转换机制的作用将水汽转换为与能见度相关的液态水，而同时出现 RH_{2m} 增量，因此 RH_{2m} 的调整也应是触发 Q_c 、 Q_v 变化的因素。

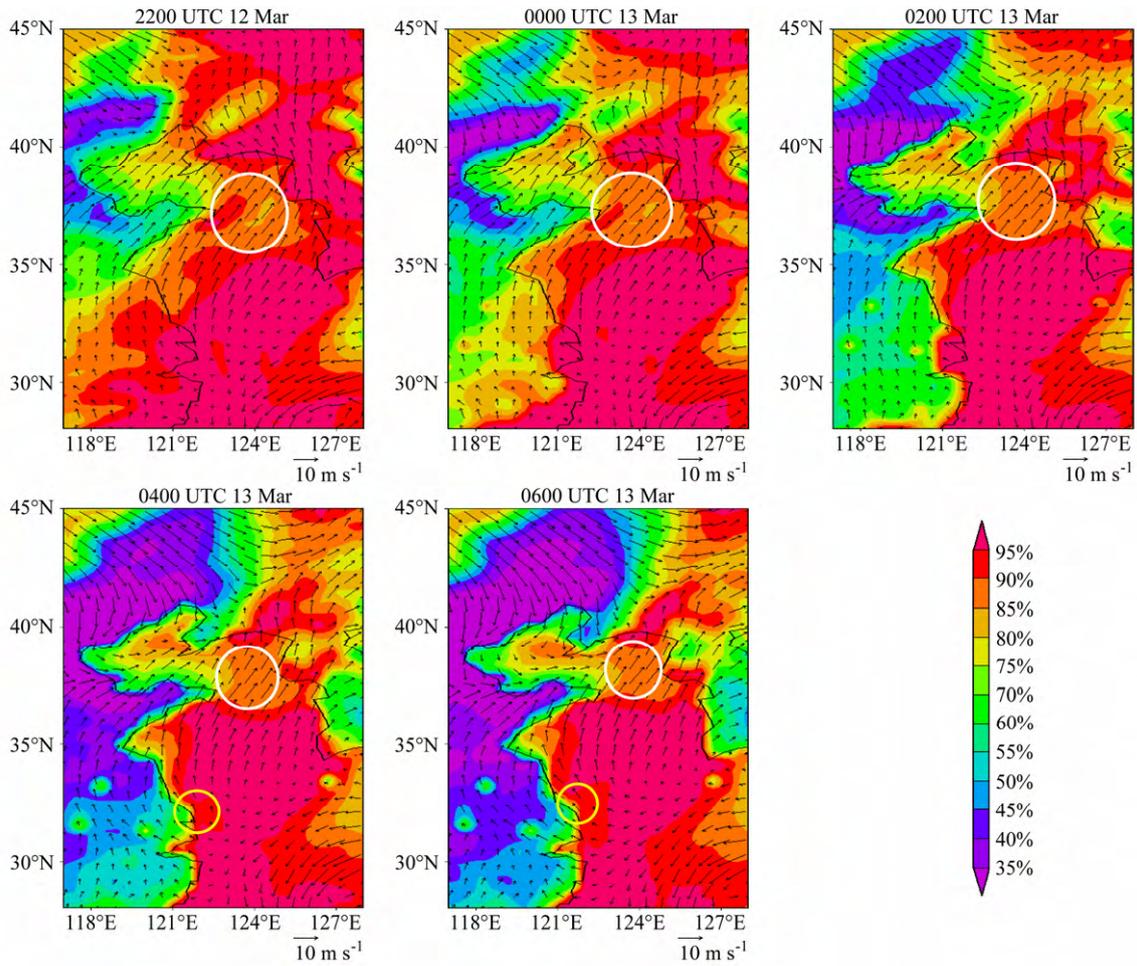


图 3 2011 年 3 月 12 日 22:00 到 13 日 06:00 同化前模拟的 RH_{2m} 和 $Wind_{10m}$ 。填色区表示相对湿度 RH_{2m} 。白圈为黄海北部 RH_{2m} 相对低值区；黄圈为江苏中部沿海 RH_{2m} 相对低值区

Fig. 3 Simulations of RH_{2m} and $Wind_{10m}$ (wind at 10-m height) without assimilation for the period of 2200 UTC 12 to 0600 UTC 13 March 2011. Shaded areas denotes RH_{2m} . White and yellow circles represent low RH_{2m} in northern Yellow Sea and low RH_{2m} along the coast of central Jiangsu Province, respectively

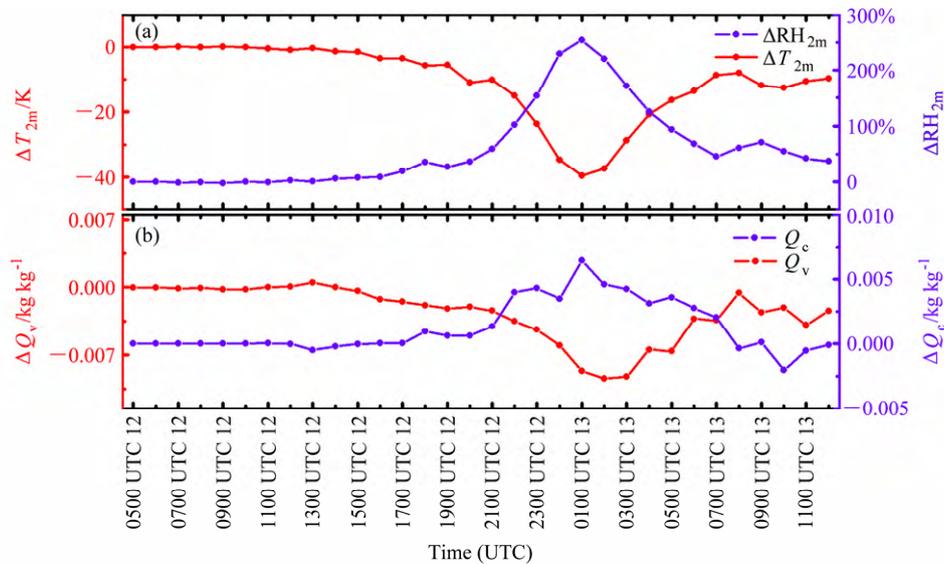


图 4 2011 年 3 月 12 日 05:00 至 13 日 12:00 模式输出海雾格点的 (a) RH_{2m} 、 T_{2m} 和 (b) 1000 hPa Q_v 、 Q_c 同化累计分析增量演变
Fig. 4 Temporal evolutions of cumulative incremental values at sea fog grids for the period from 0500 UTC 12 to 1200 UTC 13 March 2011: (a) RH_{2m} and temperature at 2-m height (T_{2m}); (b) 1000-hPa water vapor content (Q_v) and cloud liquid water content (Q_c)

4.3 同化对两次过程海雾模拟影响的对比分析

采用距海雾区最近的山东省荣成站(54778)探空观测,分别选取代表典型暖、冷型海雾时刻的2月21日00:00和3月13日00:00中低层大气海雾格点模拟和邻近观测,以及同化MWTS资料和MWSH资料后的 T 和RH同化增量(图5),发现以下模拟偏差特征值得注意:(1)在冷型海雾时间点,边界层模拟与观测温度和其垂直分布结构的符合度较好,表现在逆温层高度和强度更接近实况(图5c、d),而在暖型时间点仅在1017~998 hPa的很薄层次观测到逆温,而在模拟中则没有清楚地表现出该逆温。(2)地面层在两个时间点中都表现出 T 值高于实况、RH值低于实况的现象,这证实了前文中模拟可能存在雾区 T 偏高的猜测。同化调整最为明显和有效的出现在冷型海雾时间点同化MWTS资料后,其模拟 T_{2m} 值调整到276.28 K与地面观测的276.15 K几乎一致,RH_{2m}也相应调整到95.38%接近实况的100%。而同化MWTS资料或MWSH资料都对暖型海雾时间点的 T_{2m} 和RH_{2m}产生非常小增量,且同化MWTS资料后没有出现 T_{2m} 和RH_{2m}反向调整的规律(图5a、b)。

分析出现此同化结果的原因可能在于:(1)两个时间段海雾模拟结果表现出模式能力的明显差异,模拟冷型海雾时段的逆温层高度和强度更接近于实况,在暖型时段除逆温高度、强度与观测差异较大外,观测到的很薄逆温层高度,也是对模式性能的考验,同时这也会增加同化模拟调整的难度。(2)在冷型时段,地面层 T 和RH观测值与模拟值的偏差幅度相近,而对暖型时段,此层观测与模拟 T 值的差距远大于二者RH值的差距,同化难以使二者同步协调调整。从观测模拟比对角度,以上两点或许部分解释了仅在冷型海雾过程同化出现了有效的 T 校正,进而同步校正RH_{2m}的原因。

对于海雾这类静稳型天气,多时段模拟场数据的平均值能保留过程的主体特征信息,这是宏观了解模式表现能力的途径。分过程将卫星检测到的全部海雾格点同化前模式模拟的温度场和垂直风场数据累加后平均,其结果表现出在冷型海雾过程(图6a,红线)中,WRF-ARW模式模拟出了从地面到975 hPa的逆温,与单点观测(图5d)的逆温层高度基本相符。而在以暖型为主的非典型混合过

程则没有低层大气逆温特征(图6a,黑线),因此模式模拟能力可能存在缺陷。

湍流混合是海雾形成的必要条件(Lewis et al., 2004),由于普遍缺乏对雾的湍流测量,对于其在雾维持和发展中的作用理解并不透彻(Nakanishi, 2000)。中尺度模式通常不具备表现湍流的能力,也无法输出雾模拟需要的湍流强度(Koraćin et al., 2005)。因此本文尝试分析湍流相关量——垂直速度(w),它能反映气流垂直运动的方向和层次,或许能折射出部分湍流的信息。两次过程的海雾格点 w 都很小(图6b),符合静稳天气的特征。在近洋面层都有弱垂直向下分量,低层大气的弱下沉有利于平流型海雾的生成和维持(Koraćin et al., 2001)。湍流对雾的作用还受湿层厚度影响,如果湿层薄,则垂直湍流混合对雾形成不利,反之有利(Justo and Lala, 1980)。对比观测(图5),暖型的边界层湿层很薄、冷型则较厚,而2月过程的低层大气的下沉方向垂直运动强于3月过程,因此在暖型为主体的非典型混合过程中模式的这种表现不利于海雾的成功模拟。另一个可能影响模拟和同化结果的因素是本文使用的WRF版本。ARW-WRF模式模拟浮力不稳定造成的湍流混合的能力不足,而非静力平衡对中尺度系统模拟很重要,特别是其中的上升和下降气流因素(Xue et al., 2000)。此外,ARW和NMM除动力内核不同外,两个模式在对流、行星边界层、表面边界层、长波/短波辐射、云微物理和陆面方案也存在不同点。分别有5个成员的NMM与ARW模拟结果表明NMM模拟雾能力强于ARW(Zhou and Du, 2010)。

如果模拟成功,气象卫星监测到海雾区格点RH应接近或者达到100%。用连续时次卫星检测到的海雾格点同化前模拟RH_{2m}数据和同化后增量对比的结果表明:同化前(图7中柱状),模式对冷型海雾的模拟较好,除12日07:00~12:00时段,因海雾格点数很少而容易产生统计偏差外,该过程其余的大部分时段,卫星检测雾区的模拟场RH_{2m} 85%,在海雾发展成熟、面积最大的18:00~23:00达到90%。12日23:00至13日09:00,雾区整体均值降到80%~85%,这与黄海北部雾区的RH_{2m}低值缺口有关(图3中红圈区);而对非典型过程中的暖型海雾阶段模拟效果相对较差,21日12:00之前同化前模拟RH_{2m}不足80%,此时正处于比较典型的暖型海雾阶段。之后的12:00~23:00 RH_{2m}整体超过

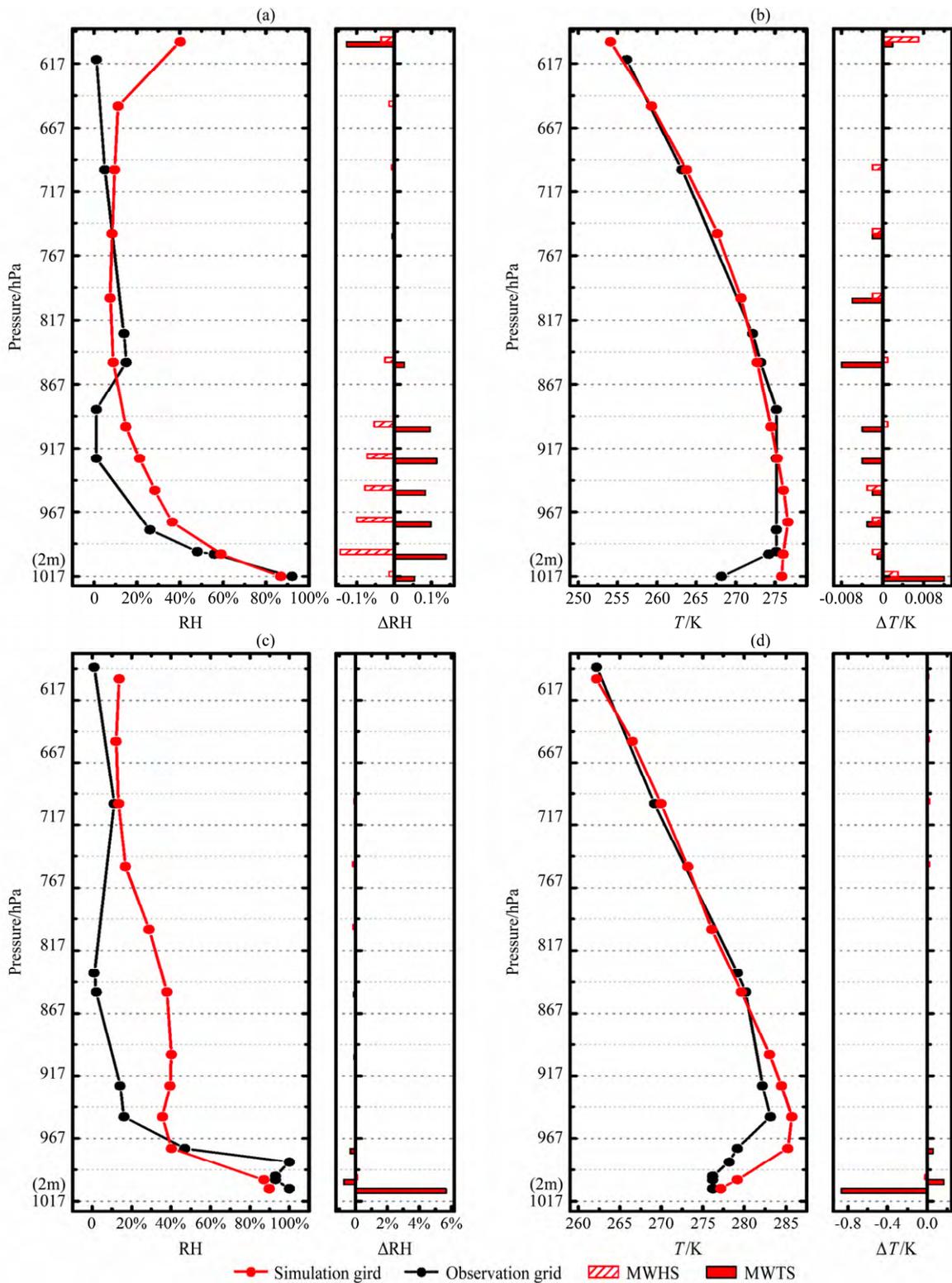


图 5 山东省荣成站 2 月 21 日 00:00 观测点 (37.1°N, 122.29°E) 的 RH、 T 和邻近海雾格点 (36.667°N, 122.983°E) 的同化前 RH、 T 模拟值以及同化增量在 600 hPa 以下的垂直分布：(a) 观测点 RH、邻近海雾格点同化前 RH (a 图左) 同化增量 (ΔRH , a 图右)；(b) 观测点 T 、同化前 T 模拟值 (b 图左) 同化增量 (ΔT , b 图右)。(c) (d) 同 (a) (b)，但为 3 月 13 日 00:00，邻近海雾格点 (37.167°N, 123.483°E) 的值
Fig. 5 Vertical distributions below 600 hPa of relative humidity (RH), temperature (T) at observation point (37.1°N, 122.29°E) and RH, T , RH increments, T increments at sea fog grid point (36.667°N, 122.983°E) at 0000 UTC 21 February: RH at observation point (left of Fig. a), RH without assimilation at sea fog grid point (left of Fig. a), RH increments (ΔRH) with assimilation (right of Fig. a); T at observation point (left of Fig. b), T without assimilation at sea fog grid point (left of Fig. b), T increments (ΔT) with assimilation (right of Fig. b). (c, d) As in (a, b), but for 0000 UTC 13 March, sea fog grid point is (37.167°N, 123.483°E)

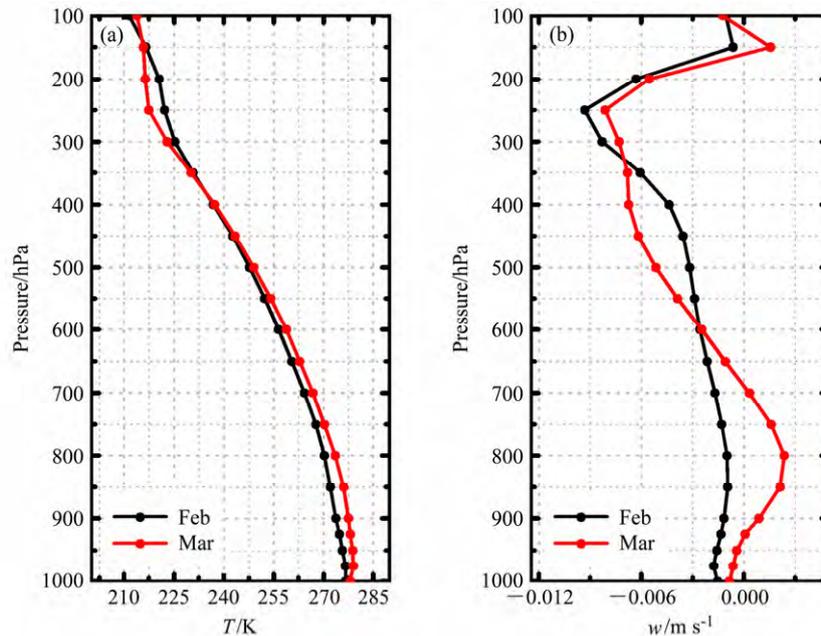


图 6 模拟的(同化前)全部海雾格点上的 2 月(黑线)、3 月(红线)过程平均的(a)温度和(b)垂直速度(w)随高度的变化曲线。2 月过程平均值计算时段: 20 日 12:00 至 22 日 12:00; 3 月过程平均值计算时段: 12 日 05:00 至 13 日 12:00

Fig. 6 Vertical distributions of simulated (without assimilation) (a) temperature and (b) vertical velocity (w) averaged over all the sea fog grid points during the periods of fog processes of February (black lines) and March (red lines). Statistical average period for February is from 1200 UTC 20 to 1200 UTC 22 February and that for March is from 0500 UTC 12 to 1200 UTC 13 March

80%, 而 12 时, 成山头观测风向已经转为静风, 海气温差也逐渐接近并最终达到冷型海雾标准。22 日 02:00 以后 RH_{2m} 出现了起伏, 这与黄海中南部云系遮挡, 参与统计的海雾模式点偏少有关。同化后, 2 月过程中, 同化 MWTS 资料对过程海雾区的模拟基本没有影响(图 7a 中蓝线); 而同化 MWHS 资料(图 7a 中红线)则使 22 日 04:00 ~ 05:00 的 RH_{2m} 出现了明显增量, 这与江苏省中部近岸海雾区出现的 RH_{2m} 同化增量(图 3 中黄圈处)有关, 此时邻近的吕泗站刚由西风转为东风。3 月过程同化 MWTS 资料后, 在冷型海雾成熟阶段 RH_{2m} 改进明显, 与前述两个模拟失误区域, 特别是黄湖北部的 RH_{2m} 增量有关。13 日 06:00 后, 因云系遮挡卫星检测到的海雾样本少, 无法全部统计真实海雾范围的模拟改善情况, RH_{2m} 平均增量幅度减小。同化 MWHS 资料后, 统计平均的 RH_{2m} 增量(图 7b 中红线)则没有明显变化。

为探究同化对低层大气海雾相关量的影响, 分仪器、分过程统计 900 hPa 以下垂直方向的气温(T)相对湿度(RH) Q_v 、 Q_c 和垂直速度(w)的海雾格点同化增量累加后的平均值, 这些廓线分布变化(图 8)显示在改善最明显的 MWTS 资料同

化后的 3 月过程(图 8 中红线)中, 2 m 和 1000 hPa 层的温度与其他层相比降低明显, RH 也有相应增加; 975 hPa 层出现 RH 减量下降, 可增强雾顶的长波辐射冷却作用, 有利于其下各层出现降温增湿调整; 950 hPa 以上层的 w 轻微负变化位置靠近海雾顶部, 而邻近雾顶以上大气层的轻微下沉改变可以克服太阳短波辐射加热作用的抬升, 且利于该层以下的层云下沉变厚而增强海雾(Koraćin et al., 2014)。此外, 垂直廓线在 1000 hPa 和 975 hPa 表现出 Q_v 和 Q_c 的负相关调整, 975 hPa 相比 1000 hPa 小, 说明水汽—液态水转换在近地层是渐变的, 越靠近地面变化越大, Q_c 随 Q_v 的变化幅度更微弱, 这种上下层调整差异, 为前文对 Q_c 和 Q_v 的调整顺序的推测提供了线索。同化 MWHS 数据后的 2 月海雾(图 8 中绿线)模拟是另一个调整改善的仪器—过程, 其 RH 和 T 以及 Q_c 和 Q_v 的调整与 3 月过程同化 MWTS 数据有相同的方向(距离红线最近), 只是幅度更小, 这也与调整幅度、时间和像元点数相符。此现象显示出两次正效应影响过程或存在类似的调整机制。另一特征是垂直速度 w 在 900 hPa 以下各层都出现正调整, 减弱了模拟平均场的负垂直速度。

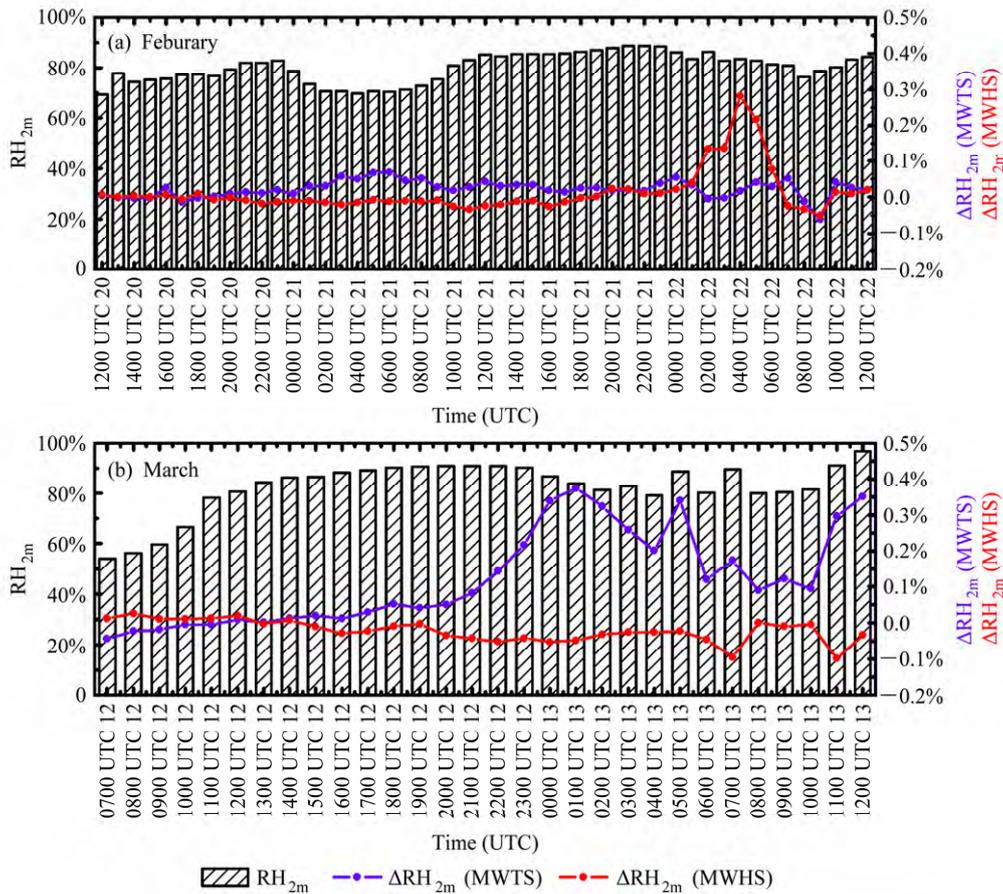


图 7 (a) 2 月过程和 (b) 3 月过程海雾格点模拟 (同化前) 和同化后 RH_{2m} 值随时间的演变。柱状代表同化前的 RH_{2m} , 红色线代表同化 MWHS 资料后 RH_{2m} 的分析增量, 蓝色线代表同化 MWTS 资料后 RH_{2m} 的分析增量

Fig. 7 Temporal evolutions of RH_{2m} averaged over all the sea fog grid points from simulations without and with assimilation for the (a) February process and (b) March process. Red lines represent analysis increment of RH_{2m} with assimilation of MWHS data, blue lines represent analysis increment of RH_{2m} with assimilation of MWTS data

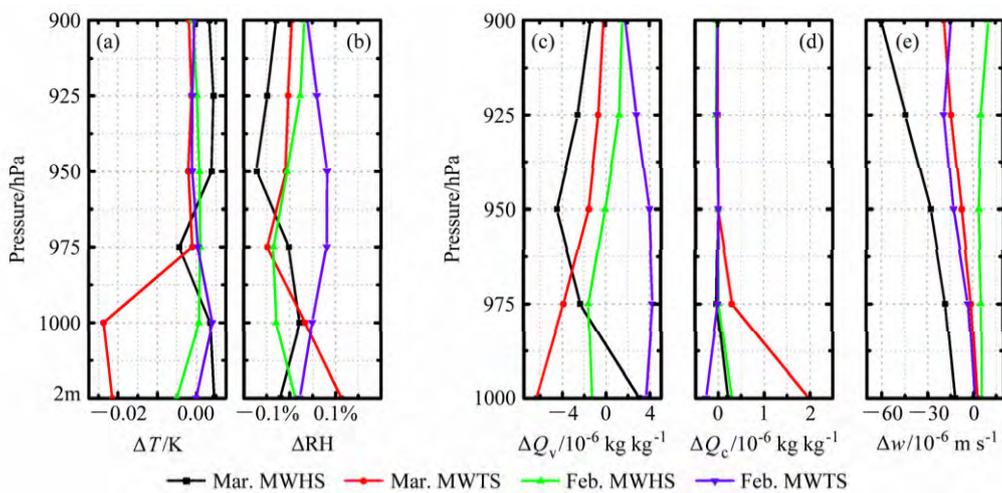


图 8 同化 MWHS 资料和 MWTS 资料后 2 月过程和 3 月过程海雾的 (a) T 、(b) RH 、(c) Q_c 、(d) Q_v 、(e) w 的 900 hPa 以下垂直增量廓线。统计时间段：2 月 20 日 12:00 至 22 日 12:00；3 月 12 日 05:00 至 13 日 12:00

Fig. 8 Vertical distributions of increments of (a) temperature (T), (b) relative humidity (RH), (c) Q_c , (d) Q_v , and (e) vertical wind speed (w) below 900 hPa after assimilation of MWHS data and MWTS data for the February process and March process. Statistical period for February is from 1200 UTC 20 to 1200 UTC 22 February and that for March is from 0500 UTC 12 to 1200 UTC 13 March

5 结论与讨论

本文通过分析同化 FY3A 卫星微波大气垂直观测数据对两次海雾过程模拟的影响,得到如下初步结果:同化经过适当质控、偏差订正方法处理的 FY3A 卫星微波温湿度计数据能够对黄渤海海雾的模拟有改进效果。在冷型海雾过程或趋冷型海雾阶段,同化改进了雾区的模拟,表现为雾区近海面层大气温度与湿度、水汽与液态水等模式场变量出现了一系列更贴近海雾特征的变化;而对于非典型混合过程中具有明显暖型海雾特征的阶段,同化同样数据后这些量则没有产生明显改变。究其原因,与以下两点相关:

(1) 同化改进结果与模式对此类海雾的模拟能力有关。在当前模拟雾研究总体偏少和效果不甚理想的背景下,对大范围平流型海雾的模拟研究相对较多,对其发生、发展机理已比较清楚,模拟方案较为成熟,因此 WRF 模式等对平流冷型海雾的模拟效果较好。通过模拟与观测的对比,本工作证实 WRF 模式能够较好地表达出冷型海雾 975 hPa 以下的逆温层,但海雾区 T 值偏高,这使本应凝结的大气出现欠饱和,应是 WRF 模式冷型海雾模拟中 RH 偏差的原因之一,但 T 和 RH 两个相关量的偏差程度相近,为调整提供了可能。最明显的正效应也正是发生在同化 MWTS 资料后的冷型海雾模拟中。同化 MWTS 资料起到降低雾区气温,增加相对湿度值的作用,同时也促使水汽向液态水的转换。暖型海雾的成因较为复杂,甚至海气模式耦合后的复杂物理方案也未能取得理想效果。本文中的同化工作对 WRF 模式暖型海雾阶段模拟未见改善,原因与模式对海雾区 RH 模拟能力偏差,无法表现出暖型海雾期间的边界层逆温,且 T 和 RH 偏差程度不成比例等模式背景因素有关。这些说明同化调整都是在模拟海雾能力的大模式框架内起作用。

(2) 同化调整是合理模式机制下的热力和动力场的共同作用。除前述温、湿度和水汽、液态水变量规律性调整外,近地层动力场垂直运动也影响同化效果。近海面大气垂直平均风场和其调整与同化效果有很大关系,同化正效果与 w 上升背景或正调整有关,而在 900 hPa 以下 w 整层下沉或向下的负调整后则对应同化后海雾模拟没有正效果出现。如非典型混合过程中,在同化前模式场雾区大气 w 为下沉运动的背景下,同化 MWHS 资料后 900 hPa

以下出现了四种(时间—仪器)方案中最明显的平均 w 正增量,同化后在江苏省近海雾区出现连续时段 RH_{2m} 超过 1.6% 正增量,而在背景场下沉运动中 w 几乎无调整的情况下,同化 MWTS 资料则没有带来任何改善;在冷型海雾过程,同化 MWHS 资料后对应的下沉调整在所有仪器过程中最为明显,而这可能是同化没有带来改善效果的原因之一。这其中许多问题还有待深入分析。

通过本工作还有一个与经验判断不同的发现:同化 FY3A 卫星微波温、湿度计的中、高层大气探测通道,能改善远低于其探测权重的模式场边界层模拟,而且同化温度计资料对大气边界层水汽饱和和模拟产生了大于同化湿度计资料的正贡献。

以上结论只是针对能匹配现有业务 NWP 空间分辨率和物理方案条件的初步结果。为了确定风云三号等卫星微波仪器对海雾同化模拟的作用,下一步还需要随星载仪器发展更新同化数据源,选取更多不同海域和类型的海雾个例,进一步开展更细分辨率、更多物理方案的海雾同化模拟实验和分析研究。

参考文献 (References)

- Ballard S P, Golding B W, Smith R N B. 1991. Mesoscale model experimental forecasts of the Haar of Northeast Scotland [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119 (9): 2107–2123, doi:10.1175/1520-0493(1991)119<2107:MMEFOT>2.0.CO;2.
- Barker D, Huang X Y, Liu Z Q, et al. 2012. The weather research and forecasting model's community variational/ensemble data assimilation system: WRFDA [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93 (6): 831–843, doi:10.1175/BAMS-D-11-00167.1.
- Bartok J, Bott A, Gera M. 2012. Fog prediction for road traffic safety in a coastal desert region [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 145 (3): 485–506, doi:10.1007/s10546-012-9750-5.
- Bergot T, Guedalia D. 1994. Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (6): 1218–1230, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1218:NFORFP>2.0.CO;2.
- Bergot T, Carrer D, Noilhan J, et al. 2005. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study [J]. *Wea. Forecasting*, 20 (4): 627–646, doi:10.1175/WAF873.1.
- Bergot T, Terradellas E, Cuxart J, et al. 2007. Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog [J]. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 46 (4): 504–521, doi:10.1175/JAM2475.1.
- Bott A, Trautmann T. 2002. PAFOG—A new efficient forecast model of radiation fog and low level stratiform clouds [J]. *Atmos. Res.*, 64 (1–4): 191–203, doi:10.1016/S0169-8095(02)00091-1.
- Cermak J, Bendix J. 2008. A novel approach to fog/low stratus detection using Meteosat 8 data [J]. *Atmospheric Research* 87 (3): 279–292, doi:10.

- 1016/j.atmosres.2007.11.009.
- Dong C H, Yang J, Yang Z D, et al. 2009. An overview of a new Chinese weather satellite FY-3A [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (10): 1531–1544, doi:10.1175/2009BAMS2798.1.
- Eyre, J. R., 1992. A bias correction scheme for simulated TOVS brightness temperatures [J]. *Technical Memorandum*, 176, 81–109.
- Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. 1984. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery [J]. *Meteor. Mag.*, 113 (1346): 266–271.
- 傅刚, 张涛, 周发琇. 2002. 一次黄前海雾的三维数值模拟研究 [J]. *青岛海洋大学学报*, 32 (6): 859–867. Fu Gang, Zhang Tao, Zhou Faxiu. 2002. Three-dimensional numerical simulation of real sea fog event over the Yellow Sea [J]. *J. Ocean Univ. Qingdao (in Chinese)*, 32 (6): 859–867, doi:10.3969/j.issn.1672-5174.2002.06.002.
- Fu G, Guo J T, Xie S-P, et al. 2006. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea [J]. *Atmos. Res.*, 81 (4): 293–303, doi:10.1016/j.atmosres.2006.01.005.
- 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 2010a. 利用循环 3DVAR 改进黄前海雾数值模拟初始场 I: WRF 数值试验 [J]. *中国海洋大学学报*, 40 (10): 1–9. Gao Shanhong, Qi Yiling, Zhang Shoubao, et al. 2010a. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR. Part I: WRF numerical experiments [J]. *Period. Ocean Univ. China (in Chinese)*, 40 (10): 1–9, doi:10.3969/j.issn.1672-5174.2010.10.001.
- 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 2010b. 利用循环 3DVAR 改进黄前海雾数值模拟初始场 II: RAMS 数值试验 [J]. *中国海洋大学学报*, 40 (11): 1–10. Gao Shanhong, Zhang Shoubao, Qi Yiling, et al. 2010b. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR. Part II: RAMS numerical experiments [J]. *Period. Ocean Univ. China (in Chinese)*, 40 (11): 1–10, doi:10.3969/j.issn.1672-5174.2010.11.001.
- Gu S Y, Guo Y, Wang Z Z, et al. 2012. Calibration analyses for sounding channels of MWHS onboard FY-3A [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 50 (12): 4885–4891, doi:10.1109/TGRS.2012.2214391.
- Guan L, Zou X, Weng F, et al. 2011. Assessments of FY-3A microwave humidity sounder measurements using NOAA-18 microwave humidity sounder [J]. *J. Geophys. Res.*, 116 (D10), doi:10.1029/2010JD015412.
- Gultepe I, Cober S G, King P, et al. 2006. The fog remote sensing and modeling (FRAM) field project and preliminary results [C]// *AMS 12th Cloud Physics Conference*. Madison, Wisconsin, USA: AMS, 9–14.
- Gultepe I, Tardif R, Michaelibes S C, et al. 2007. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 164(6–7): 1121–1159, doi:10.1007/s00024-007-0211-x.
- Gultepe I, Hansen B, Cober S G, et al. 2009. The fog remote sensing and modeling field project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 90 (3): 341–359, doi:10.1175/2008BAMS2354.1.
- Gultepe I, Zhou B, Milbrandt J, et al. 2015. A review on ice fog measurements and modeling [J]. *Atmos. Res.*, 151: 2–19, doi:10.1016/j.atmosres.2014.04.014.
- Harris B A, Kelly G. 2001. A satellite radiance bias correction scheme for data assimilation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 127 (574): 1453–1468, doi:10.1002/qj.49712757418.
- Heo K Y, Ha K J. 2010. A coupled model study on the formation and dissipation of sea fogs [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138 (4): 1186–1205, doi:10.1175/2009MWR3100.1.
- 胡瑞金, 周发琇. 1997. 海雾过程中海洋气象条件影响数值研究 [J]. *青岛海洋大学学报*, 27 (3): 282–290. Hu R J, Zhou F X. 1997. A numerical study on the effects of air sea conditions on the process of sea fog [J]. *J. Ocean Univ. Qingdao (in Chinese)*, 27 (3): 282–290.
- Hu H Q, Zhang Q H, Xie B G, et al. 2014. Predictability of an advection fog event over North China. Part I: Sensitivity to initial condition differences [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 142 (5): 1803–1822, doi:10.1175/MWR-D-13-00004.1.
- 黄健, 王斌, 周发琇, 等. 2010. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征 [J]. *大气科学*, 34 (4): 715–725. Huang Jian, Wang Bin, Zhou Faxiu, et al. 2010. Turbulent heat exchange in a warm sea fog event on the coast of South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (4): 715–725, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.05.
- Jacobs W, Nietosvaara V, Karaca D, et al. 2007. Short range forecasting methods of fog, visibility and low clouds [R]. *Earth System Science and Environmental Management COST Action 722*.
- Jiusto J E, Lala G G. 1980. Thermodynamics of radiation for formation and dissipation: A case study [C]// *Proceedings of the 8th International Cloud Physics Conference*. Clermont-Ferrand, France, 333–335.
- Kim C K, Yum S S. 2010. Local meteorological and synoptic characteristics of fogs formed over Incheon international airport in the west coast of Korea [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (4): 761–776, doi:10.1007/s00376-009-9090-7.
- Kim C K, Yum S S. 2012. 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.-Layer Meteor.*, 143 (3): 481–505, doi:10.1007/s10546-012-9706-9.
- Koračin 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, doi:10.1175/1520-0469(2001)058<1714:TOSIFA>2.0.CO;2.
- Koračin D, Businger J A, Dorman C E, et al. 2005. Formation, evolution, and dissipation of coastal sea fog [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 117 (3): 447–478, doi:10.1007/s10546-005-2772-5.
- Koračin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. 2014. Marine fog: A review [J]. *Atmos. Res.*, 143: 142–175, doi:10.1016/j.atmosres.2013.12.012.
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. *J. Climate Appl. Meteor.*, 23 (1): 34–41, doi:10.1175/1520-0450(1984)023<0034:PODTVA>2.0.CO;2.
- Lee J R, Chung C Y, Ou M L. 2011. Fog detection using geostationary satellite data: Temporally continuous algorithm [J]. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 47 (2): 113–122, doi:10.1007/s13143-011-0002-2.
- Lewis J M, Koračin D, Redmond K T. 2004. Sea fog research in the United Kingdom and United States: A historical essay including outlook [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 85 (3): 395–408, doi:10.1175/BAMS-85-3-395.
- 刘志权, 张凤英, 吴雪宝, 等. 2007. 区域极轨卫星 ATOVS 辐射偏差订正方法研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 113–123. Liu Z Q, Zhang F Y, Wu X B, et al. 2007. A regional ATOVS radiance-bias correction scheme for radiance assimilation [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 65 (1): 113–123, doi:10.11676/qxxb2007.011.

- Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. 2011a. Characterizing the FY-3A microwave temperature sounder using the ECMWF model [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28 (11): 1373–1389, doi:10.1175/JTECH-D-10-05008.1.
- Lu Q F, Bell W, Bauer P, et al. 2011b. An evaluation of FY-3A satellite data for numerical weather prediction [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137 (658): 1298–1311, doi:10.1002/qj.834.
- Lu Q F, Bell W, Bormann N, et al. 2012. Improved assimilation of data from China's FY-3A microwave temperature sounder [J]. *Atmos. Sci. Lett.*, 13 (1): 9–15, doi:10.1002/asl.354.
- Müller M D, Schmutz C, Parlow E. 2007. A one-dimensional ensemble forecast and assimilation system for fog prediction [J]. *Pure Appl. Geophys.*, 164 (6–7): 1241–1264, doi:10.1007/s00024-007-0217-4.
- Nakanishi M. 2000. Large-eddy simulation of radiation fog [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 94 (3): 461–493, doi:10.1023/A:1002490423389.
- Pagowski M, Gulpepe I, King P. 2004. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario [J]. *J. Appl. Meteor.*, 43 (1): 3–16, doi:10.1175/1520-0450(2004)043<0003:AAMOAE>2.0.CO;2.
- 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, doi:10.1175/1520-0450(1979)018<1275:TFOMFA>2.0.CO;2.
- van der Velde I R, Steeneveld G J, Wichers 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 (11): 4237–4253, doi:10.1175/2010MWR3427.1.
- 王彬华. 1980. 中国近海海雾的几个特征 [J]. *海洋湖沼通报*, (3): 9–20.
- Wang Binhua. 1980. Some characteristics of sea fog along China coast and its vicinity [J]. *Trans. Oceanol. Limnol.* (in Chinese), (3): 9–20, doi:10.13984/j.cnki.cn37-1141.1980.03.002.
- 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, doi:10.1175/WAF-D-12-00123.1.
- 吴晓京. 2014. 卫星资料在海雾模拟、检测与气候应用中的方法研究 [D]. 中国科学院大学博士学位论文, 151pp.
- Wu Xiaojing. 2014. Research in sea fog simulation and detection and climate applications using satellite data [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), University of Chinese Academy of Sciences, 151pp.
- 许健民, 郭强, 陆其峰, 等. 2014. 风云气象卫星数据处理算法的若干创新 [J]. *气象学报*, 72 (5): 1023–1038.
- Xu Jianmin, Guo Qiang, Lu Qifeng, et al. 2014. Innovations in the data processing algorithm for Chinese FY meteorological satellites [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 72 (5): 1023–1038, doi:10.11676/qxxb2014.086.
- Xue M, Drogemeier K K, Wong V. 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 75 (3–4): 161–193, doi:10.1007/s007030070003.
- Yi L, Zhang S P, Thies B, et al. 2014. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top heights over the Yellow Sea with geostationary satellite data as a precondition for ground fog detection—A feasibility study [J]. *Atmos. Res.*, 151: 212–223, doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.020.
- 张升伟, 李靖, 姜景山, 等. 2008. 风云3号卫星微波湿度计的系统设计与研制 [J]. *遥感学报*, 12 (2): 199–207.
- Zhang Shengwei, Li Jing, Jiang Jingshan, et al. 2008. Design and development of microwave humidity sounder for FY-3 meteorological satellite [J]. *J. Remote Sens.* (in Chinese), 12 (2): 199–207, doi:10.11834/jrs.20080226.
- Zhang S-P, Xie S-P, Liu Q-Y, et al. 2009. Seasonal variations of Yellow Sea fog: Observations and mechanisms [J]. *J. Climate*, 22 (24): 6758–6772, doi:10.1175/2009JCLI2806.1.
- Zhou Binbin, Du Jun, Ferrier B, et al. 2007. Numerical forecast of fog—Central solutions [C]//18th Conference on Numerical Weather Prediction. Park City, UT: AMS, 1–13.
- Zhou B B, Du J. 2010. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system [J]. *Wea. Forecasting*, 25 (1): 303–322, doi:10.1175/2009WAF2222289.1.
- Zou X, Wang X, Weng F, et al. 2011. Assessments of Chinese Fengyun Microwave Temperature Sounder (MWTS) measurements for weather and climate applications [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 28 (10): 1206–1227, doi:10.1175/JTECH-D-11-00023.1.