

2018年2月琼州海峡持续性海雾过程的数值模拟分析

王慧¹ 林建¹ 马占山^{2*} 刘达¹

1 国家气象中心, 北京 100081

2 中国气象局地球系统数值预报中心, 北京 100081

摘要 2018年2月春节期间琼州海峡发生持续性大雾天气, 造成大量船舶停航。本文结合葵花8号卫星反演海雾产品、琼州海峡沿岸站点能见度观测数据及美国国家环境预报中心NCEP提供的FNL客观分析资料, 对2月18-20日的大雾过程进行了天气学成因分析, 并进一步利用CMA-MESO (Global and Regional Assimilation and Prediction System) 高分辨率数值模式从边界层方案、模式垂直分层以及海雾能见度算法三个方面进行敏感性试验, 以找出模拟效果更好的模式设置方案。研究结果表明: 大雾期间华南近海海温较常年平均偏低, 受地面冷高压南下补充的弱冷空气影响, 偏东暖湿气流流经冷海面并快速凝结。而数值模拟对比试验显示, 采用YSU (Yonsei University) 边界层方案、边界层垂直层次加密及美国国家海洋大气局预报系统实验室(FSL/NOAA)的海雾诊断方案(简称FSL)对改进能见度预报效果显著: YSU边界层方案比MRF (Medium Range Forecast Model) 边界层方案对该次大雾过程的分布范围和最低能见度出现的时间模拟效果更优; 模式低层分层加密可更好体现出低能见度的演变过程; 而基于模式预报性能较好的湿度和温度预报而来的FSL算法, 其能见度预报与站点实况最为接近。

关键词: 琼州海峡 大雾 能见度 数值模拟 边界层方案

作者简介 王慧, 女, 主要从事海洋天气预报和研究工作。Email: wangh1@cma.gov.cn

通讯作者 马占山, Email: mazes@cma.gov.cn

资助项目 国家重点研发计划 2021YFC3090205, 国家重点研发计划 2019YFC1510104

Numerical Simulation and Analysis of the Persistent Sea Fog in the Qiongzhou Strait in February 2018

WANG Hui¹ LIN Jian¹ MA Zhanshan^{2*} LIU Da¹

1 National Meteorological Center, Beijing 100081

2 CMA Earth System Modeling and Prediction Centre, Beijing 100081

Abstract During the Spring Festival in February 2018, the persistent heavy fog occurred in the Qiongzhou Strait, causing a large number of ships to stop sailing. Synoptic causes for heavy fog occurred from February 18 to 20 in 2018 are analyzed by using Himawari-8-derived sea fog products, observed visibility data gathered from coastal stations over Qiongzhou Strait and Final Operational Global Analysis (FNL) from National Centers for Environment Prediction (NCEP). Based on the high-resolution numerical model Global and Regional Assimilation and Prediction System (CMA-MESO), sensitive experiments are conducted from

the perspective of comparing multiple boundary layer schemes, vertical resolutions of model and algorithms related with visibility of sea fog. It was found that the offshore sea temperature in South China during the heavy fog is lower than average. Affected by the supplemented weak cold air by the cold high pressure southward, the warm and humid air in the east flows through the cold sea surface and condenses quickly. The results of contrast experiments demonstrated that the prediction skills of visibility could be significantly improved by employing the Yonsei University (YSU) boundary layer scheme and sea fog diagnosis scheme of National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Forecast Systems Laboratory (FSL) along with increasing vertical levels of boundary layer. Compared to the MRF (Medium Range Forecast Model) boundary layer scheme, the simulations of both spatial distribution of heavy fog and the occurring time of minimum visibility are much better by using the YSU boundary layer scheme. Meanwhile, expanding the levels of lower layer of numerical model will be conducive to promote the simulations about the evolutions of low visibility. Based on the well predicted moisture and temperature, the predictions of visibility using FSL method are much more accurate.

Keywords Qiongzhou strait, Heavy fog, Visibility, Numerical simulation, Planetary boundary layer

1. 引言

海雾是指发生在海上、岸边和岛屿上空低层大气中, 由于水汽凝结而产生的大量水滴或冰晶使得水平能见度低于 1 km 的一种重要天气现象 (王彬华, 1983)。海雾导致的低能见度现象往往造成航行的客轮、商船和舰艇等看不见航标, 极易发生偏航、触礁、搁浅, 甚至相撞引发海难事故。但是由于海雾成因复杂, 其形成的物理机制尚不清楚, 对海雾的数值预报也存在诸多不足, 因此, 海雾预报已成为目前海上气象预报的难点之一。

众多学者通过诊断分析结合数值模式模拟, 研究海雾过程中海温、气温、风、湿度等不同气象和海洋要素对海雾生成的影响 (胡瑞金等, 1997; 傅刚等, 2002; 程相坤等, 2013)。随着数值模式的不断发展, 用于海雾模拟的数值模式不断更新换代。傅刚等 (2002) 首次利用三维海雾模式 (大气边界层模式) 成功模拟了黄海海雾生消过程以及物理量的三维变化, 之后研究者们逐步利用 RAMS (Regional Atmospheric Modeling System)、MM5 (Mesoscale Model 5)、WRF (Weather Research and Forecast Model) 等多种数值模式针对海雾过程进行深入模拟, 进一步探讨复杂的物理过程 (傅刚等, 2004; Fu et al., 2006, 2008; Gao et al., 2007; 黄翊和彭新东, 2017)。例如以 YSU (Yonsei University) 边界层方案为主, 应用 WRF 模式研究海雾 (张苏平等, 2008, 2010; 高山红等, 2010a, 2014)。陆雪等 (2014) 基于 WRF 模式通过多个黄海海雾个例开展参数化方案敏感性研究, 发现边界层方案对 WRF 模式雾区模拟起决定性作用, 且在大多数海雾个例中 YSU 方案效果最优。近年来, 随着我国自主研发的中尺度数值模式 CMA-MESO (原 GRAPES-MESO, Global and

Regional Assimilation and Prediction System) 的不断发展, 很多学者利用该模式对降水(陈静等, 2022; 聂皓浩等, 2016)、台风(戴光丰和陈子通, 2013)、强对流天气(万子为等, 2018)等进行数值模拟分析。Huang 等(2019)利用 CMA-MESO 数值模式, 采用 YSU 边界层方案, 针对华南沿海海雾个例进行模拟, 并发现 CMA-MESO 能够大体上预报出典型海雾过程的形成、演变和消散过程。

学者们也通过数值试验发现海雾落区的分布与模式垂直分辨率, 尤其是边界层内的垂直分辨率关系密切。提高分辨率能够较好地描述垂直方向上的中尺度特征(鞠永茂等, 2006), 造成边界层内热通量和低层水汽通量增大以及高低层的垂直运动加强(李靖等, 2013), 利于触发空间点上的凝结和蒸发(Zhang et al., 2003)。Gao 等(2007)用 MM5 模式模拟黄海海雾过程发现粗分辨率模拟出的雾区严重偏小, 但是加密后能够真实的再现观测雾区。杨悦和高山红(2016)利用 WRF 模式探讨了不同垂直分辨率下模式对黄海海雾过程的模拟表现, 得出垂直分辨率提高能显著改进水平雾区的模拟效果的结论。Yang 等(2019)发现模式第一层高度的设置也非常重要, 当 Z_1 为 8 m 时对海雾发生时间和海雾范围模拟效果最好, 低于(高于) 8 m 时海雾发生时间偏早(偏晚), 海雾范围也有不确定性。黄辉军等(2015)基于 WRF 模拟了 2011 年 3 月一次华南平流冷却雾过程, 发现大气边界层的加密, 在一定程度上可以改善海雾垂直结构的模拟效果。

与此同时, 海雾及能见度预报的准确性除了取决于数值模式对影响海雾生消的气象和海洋要素的预报准确性, 还取决于基于相关要素的能见度算法。目前, 最常用的算法是基于液态水含量计算得到的能见度公式(Kunkel, 1984; Stoelinga and Warner, 1999; Gultepe et al., 2001)。此外, 还有基于相对湿度(Smirnova et al., 2000)或者相对湿度与温度露点差(Doran et al., 1999)等计算能见度。高荣珍等(2018)基于 WRF 模式采用三种能见度算法对青岛近海站点的能见度进行比较, 发现不同的站点能见度算法其预报准确率不同。

2018 年 2 月 15-25 日春节期间, 琼州海峡出现罕见的连续多日的大雾天气, 导致琼州海峡多次大面积停航, 出岛车辆严重滞留, 10 余万人被堵在海南岛, 影响已经上升到公共安全事件, 其中 18-20 日海雾出现时间最长。相对于南部海雾, 北部海雾尤其是黄海海雾发生频次高、持续时间长, 因而在实况分析、可预报性及数值模拟等方面的研究也比较多。为了更清晰地了解 CMA-MESO 高分辨率数值模式对南部海域的海雾是否有更好的模拟能力, 本文基于该模式对 18-20 日琼州海峡海雾过程进行数值模拟, 主要针对边界层方案、边界层垂直层次加密及能见度诊断方案三个方面进行对比分析, 以便为海雾数值模式预报的改进提供理论支撑和依据。

2. 数据和模式设置

2.1 数据

本文所用数据包括由美国国家环境预报中心 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 提供的水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 、31 层等压面、6 h 间隔的 FNL (Final Analysis) 客观分析资料, 3 h 和 1 h 间隔的琼

州海峡南北两岸的海口站和徐闻站实况观测，以及日本葵花 8 号卫星反演海雾数据。本文描述所用时间均为北京时。

2.2 数值模式设置

本研究所采用的中尺度数值模式为中国气象局地球系统数值预报中心全国区 CMA-MESO 高分辨率区域业务模式 4.3 版本，关于 CMA-MESO 区域模式主要特征已有较多介绍（黄丽萍，等，2017；马占山，等，2021），不再赘述。试验模拟范围选择覆盖海南岛琼州海峡及周边区域，东西方向为 1501 个格点、南北方向为 1401 个格点，模拟中心点坐标为(112.5° E, 21.0° N)。模式起报时间为 2018 年 2 月 18 日 08 时，模式积分 48 小时，时间步长为 30s，每 3 小时输出一次积分结果。CMA-MESO 所有试验均用 NCEP/GFS 的预报场作为模式的初值，采用松弛边界方案做侧边界的处理，不考虑针对雷达资料的云分析和常规资料的同化分析。CMA-MESO 控制试验模式层数为 50 层，为研究模式低层加密分层对海雾预报的影响，在模式低层 1000 米范围内增加了 8 层，共 58 层，模式顶高度均为 10hPa。除边界层方案分辨选用 MRF 和 YSU 外，其他物理过程选项均与业务保持一致，即辐射方案采用 RRTM 方案，云微物理方案选用 WSM6 方案，陆面方案选用 NOAH 方案，不采用对流方案。

2.3 数值模拟试验设计

2.3.1 模式低层垂直加密试验设计

由于大雾属于边界层内的天气现象，前人研究已经发现数值模式低层加密对海雾的生成时间和海雾范围均有较大影响，因此本研究针对 CMA-MESO 模式 1000m 以下的垂直分层进行加密，总层数由原来的 50 层加密到 58 层（图 1a）。图 1（b）是加密后模式 2 km 以下的垂直分层放大，可以看到 1 km 以下增加了 8 层。模式低层加密有利于对比分析加密后对海雾预报效果是否有改进。

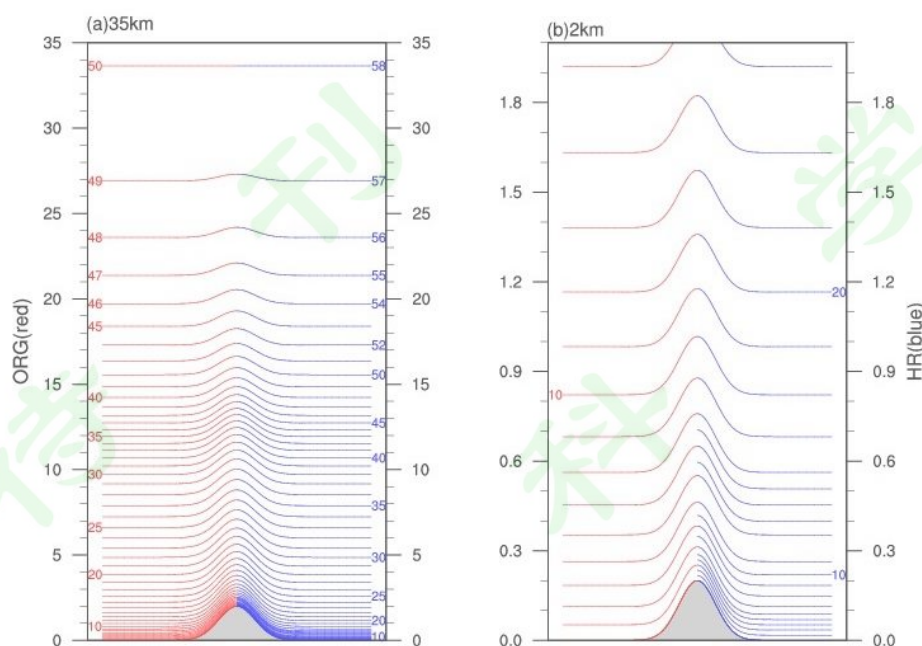


图1 CMA-MESO 模式垂直分层加密前（红色线条）后（蓝色线条）高度对比图，（a）为加密前后所有层次对比，（b）为加密后 2km 以下垂直分层放大。黑色纵坐标为垂直高度（单位：km），红色纵坐标为原始模式垂直层次，蓝色纵坐标为加密后模式垂直层次

Figure 1 The height of vertical levels in CMA-MESO, red line represents the initial layers of model and the blue line represents the increased model layers, (a) comparison of all levels before and after increased model layers, (b) vertical stratification amplification below 2km after increased model layers. The black vertical is the vertical height (unit: m), the red vertical is the original mode vertical level, and the blue vertical is the increased mode vertical level.

2.3.2 模式的边界层参数化方案对比试验设计

目前业务中的 CMA-MESO 模式的边界层参数化方案是 MRF（Medium Range Forecast Model）方案，为了分析边界层方案对海雾预报影响的敏感性，选取 YSU 边界层方案与 MRF 方案进行对比。YSU 方案是一种修正过的边界层中非局地湍流混合的垂直分布项，通过影响地面热量和水汽通量而生成更接近真实的边界层。同 MRF 边界层方案相比，YSU 边界层方案增加了热力诱发自由对流边界层内的混合，减少了动力诱发的强迫对流边界内的混合，这缓解了 MRF 方案中众所周知的问题(Hong et al., 2006)。本文 CMA-MESO 原始方案采用的是 MRF 方案，加密后分别采用 MRF 方案和 YSU 方案。文中将几种方案分别简称为 MESO_MRF、MESO_MRF_HR 和 MESO_YSU_HR。国家气象中心海雾数值预报系统是基于 CMA-TYM 模式，边界层方案是 MRF 方案，简称 TYM。后面的对比分析结果主要针对这两个模式共四种方案进行（表 1）。

表 1 数值模拟方案对比

Label 1 Comparison of the numerical simulation scheme			
方案	数值模式	边界层方案	垂直分层
TYM	CMA-TYM	MRF	50
MESO_MRF	CMA-MESO	MRF	50

MESO_MRF_HR	CMA-MESO	MRF	58
MESO_YSU_HR	CMA-MESO	YSU	58

2.3.3 能见度算法对比试验设计

为了对比不同能见度算法的可用性，本文中采用了三种能见度算法，包括：SW99、FSL、CVIS。具体能见度算法如下。

(1) Steolinga and Warner (SW99) 算法

SW99 算法(Stoelinga and Warner, 1999)是基于液态水含量计算得出，综合考虑了多种水凝物质对消光系数的影响，公式如下：

$$VIS_{SW99} \text{ (km)} = \min(28, -\ln(0.02)/\beta) \quad (1)$$

$$\beta = \beta_{cw} + \beta_{rw} + \beta_{ci} + \beta_{sn} = 144.7C_{cw}^{0.88} + 1.1C_{rw}^{0.75} + 163.9C_{ci}^{1.00} + 10.4C_{sn}^{0.78}$$

其中， β 是水凝物的消光系数，包括云水 (cw)、雨水 (rw)、云冰 (ci)、雪水 (sn)。SW99 算法定义了当能见度大于 28 km 时，设定能见度取值为 28，是为了区分 CMA-TYM 业务模式中定义的当计算能见度大于 30km 时，设定能见度取值为 30，后文图 8 中为了区分三种方案，MRF-SW99 方案能见度取值设定为 29。

(2) Forecast Systems Laboratory (FSL) 算法

FSL 算法是由美国 NOAA (National Oceanic & Atmospheric Administration) 预报系统实验室 (FSL) 研发的 (Doran et al., 1999)，公式如下：

$$VIS_{FSL} \text{ (km)} = 1.609 \times 6000 \times (T - T_d)/RH^{1.75} \quad (2)$$

其中， RH 是相对湿度， $T-T_d$ 是温度露点差。

(3) Combined Visibility (CVIS) 算法

CVIS算法是基于SW99 算法和FSL 算法的混合算法 (Bang et al., 2009)。计算两种能见度，选择最低能见度。公式如下：

$$VIS_{CVIS} \text{ (km)} = \min(VIS_{SW99}, VIS_{FSL}) \quad (3)$$

3. 2月18-20日海雾实况及环流形势

2018年2月15-25日，琼州海峡出现了持续性大雾天气，这次海雾过程持续时间长、雾日比较集中，大雾出现的时间主要集中在夜间至上午。其中，18-20日出现了阶段性低能见度的大雾。从卫星反演海雾（图略）可以看到，广东近海、琼州海峡和北部湾一带均出现了大雾天气。由于琼州海峡实况观测资料缺乏，文中采用海峡南北两岸的海口站和徐闻站作为琼州海峡实况观测的代表站。由图2中站点能见度观测可见，17日夜能见度开始降低，以轻雾为主，而能见度低于1 km的大雾主要出现在两个时间段：19日00-09时和19日23时-20日09时，最低能见度仅为200 m，20日11时能见度从0.1 km快速升高到17 km，能见度转好。大雾期间存在贴地逆温，大气层结稳定。近地层风向以弱偏东风为主，风速多为1-3m/s（图3）。此次华南沿海大范围的大雾伴随明显的海气温差，具有平流雾的特征，而沿岸站点的大雾还有明显的日变化特征（图2），为平流雾和辐射雾的混合雾。

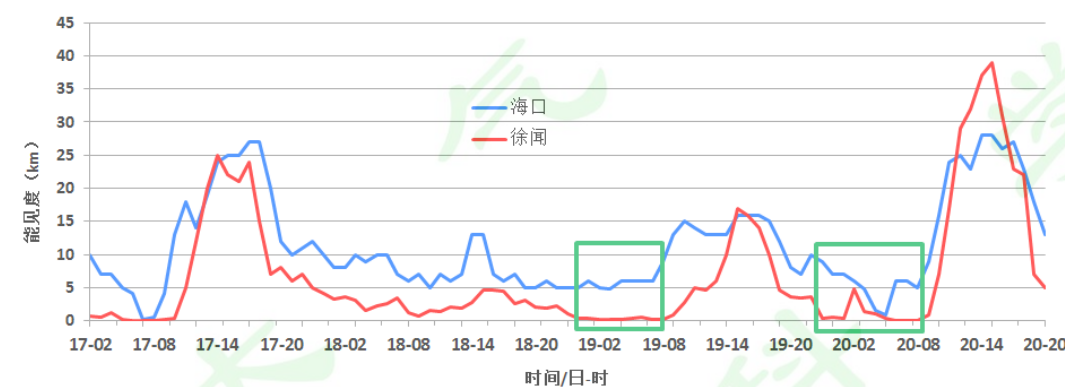


图2 2018年2月17日02时-20日20时徐闻站（蓝色实线）和海口站（红色实线）能见度（单位：km）观测，图中绿色方框表示能见度低于1km的大雾时段

Figure 2 Visibility observations of Xuwen station (red line) and Haikou station (blue line) from 02 on 17th to 20 on 20th February in 2018 (unit: km), the occurring period of dense fog with visibility less than 1km is highlighted by the green box

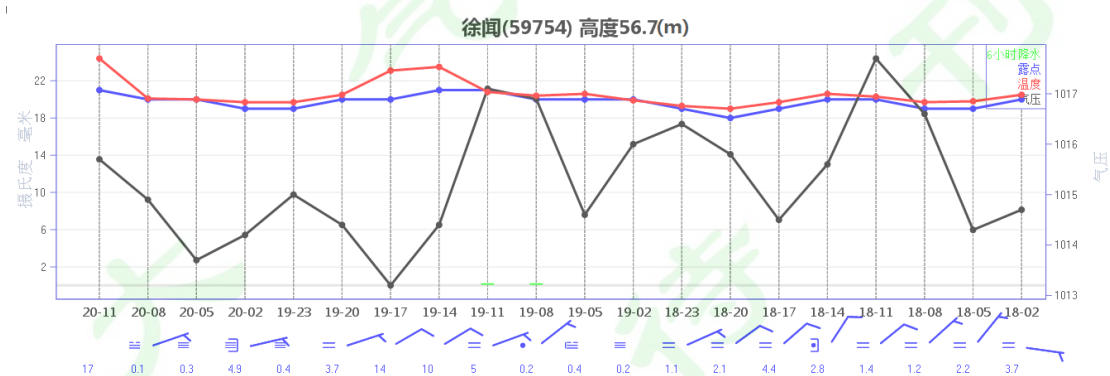


图3 2018年2月18日02时-20日11时徐闻站（59754）观测的气压（黑色实线，单位：hPa）、2米温度（红色实线，单位：℃）、2米露点温度（蓝色实线，单位：℃）、10米风（蓝色风向杆）、能见度（蓝色数字，单位：km）以及天气现象（蓝色天气符号）

Figure 3 The observed pressure (black line, unit: hPa), 2m temperature (red line, unit: °C), 2m dew-point temperature (blue line, unit: °C), 10m wind (blue

wind barb, unit: m/s), visibility (blue numbers, unit: km) and weather phenomena (blue symbols) of Xuwen station (No. 59754) from 02 on 18th to 11 on 20th February in 2018

2月18日-20日, 500hPa 西太平洋副高西伸北抬, 控制北部湾至华南沿海一带。18日, 江南大部(湖南、江西一带)受地面低压控制, 地面冷高压中心位于黄海附近, 琼州海峡附近海域处于冷高压东侧补充下来的弱冷空气影响。19-20日地面低压东移进入东海, 弱冷空气从我国东南沿海南下持续影响华南沿海, 琼州海峡附近海域处于偏东到东南风的影响, 利于东部海域水汽输送(图4a)。

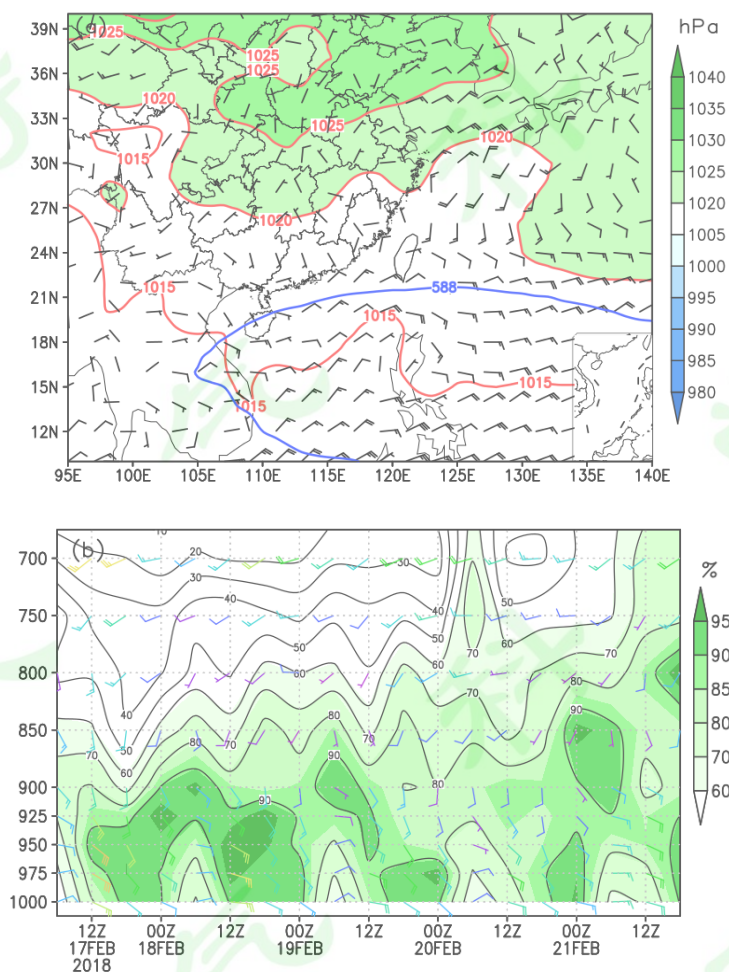


图4 2月19日08时海平面气压场(红色等值线,单位:hPa)、10米风场(风向杆,单位:m/s)及500hPa高度场588hPa等高线(蓝色等值线)(图a); 琼州海峡单点(20°N, 110°E)相对湿度(等值线和阴影,单位:%)和风场(风向杆)时间-垂直剖面图(图b)

Figure 4 (a) Sea level pressure (red contour, unit: hPa) and 10m wind (wind barb, unit: m/s) and 500hPa geopotential height 588hPa contour line (blue contour, unit: dagpm) at 08 on 19th February (a); (c) vertical profiles of relative humidity (contour and shaded, unit: %) and wind (wind bard, unit: m/s) of one point (20°N, 110°E) in Qiongzhou Strait

从图4b可以看到, 琼州海峡17-21日近地层相对湿度有明显的日变化。同17日夜间相比, 18日夜间开始湿层进一步加厚, 925hPa以下相对湿度均在90%以上, 最大超过95%, 随着湿层加厚并接地, 地面能见度降低, 并达到大雾强度。19日白天, 随气温升高, 近地层相对湿度降低。出雾期间, 湿层主要集中在850hPa以下边界层内; 850hPa以上均为干层, 为典型的上干下湿的大气层结, 这为海雾的形成、发展和维

持提供有利条件。由低层（975-1000hPa）风场变化（图 4c）可以看出，琼州海峡白天风向以东北到偏东风为主，夜间风向转为东南风，风向的转变也使得夜间能够从南海带来更多的水汽，有利于水汽的积累和发展，因此，风向的变化也同大雾的发展和减弱相一致。

海气温差对海雾的生成及维持均有较大影响。2018 年 2 月上半月（1-14 日）华南近海受两次冷空气过程影响，气温较低，平均气温在 14-17℃左右（图略）。冷空气过后，15-25 日受南海偏东暖湿气流影响，气温迅速回升到 20-21℃左右（图略）。2018 年 2 月华南近海（包括琼州海峡）的海温较常年异常偏低 1-2℃，这种情况非常有利于大雾的生成和维持（周发琇等, 2004）。近海岸海温低于 20℃（图 5a），使得低层大气边界层稳定度增强，垂直混合减弱，而且近岸附近海温梯度比较大，气温高于海温 0.5-1℃（图 5b），导致暖湿气流流经冷海面，与海面相互作用失去热量而降温，迅速凝结成雾。

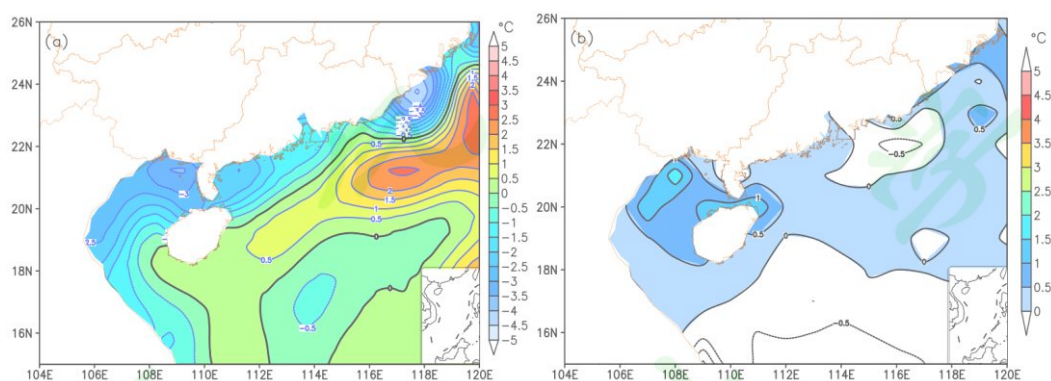


图 5 2018 年 2 月 19 日海表温度距平（图 a，单位：℃）和 2 月 19 日 02 时气海温差（图 b，单位：℃）

Figure 5 (a) Sea surface temperature anomalies on 19th February in 2018 (unit: °C), (b) air-sea temperature differences at 02 on 19th February (unit: °C)

由上可见，大雾期间华南沿海海温偏低，受地面冷高压南下补充的弱冷空气影响，偏东风带来的暖湿气流流经冷海面快速冷却凝结成雾。

4. 海雾模拟的敏感性试验结果对比与分析

本文是针对 2018 年 2 月 18 日到 20 日（18 日夜間至 19 日早晨）的大雾过程进行数值模拟，主要从模式、边界层方案、能见度算法及垂直高度加密等几个方面进行对比分析。所有模拟分析均针对 2018 年 2 月 18 日 08 时（北京时）起报的模式模拟回报结果。

4.1 海雾空间分布对比

目前中国气象局地球系统数值预报中心的海雾（能见度）数值预报系统，是基于 CMA-TYM 模式输出的物理量，能见度算法是 SW99 方法。因此，为了对比不同模式和边界层方案对海雾预报的能力，图 6 中各个模式输出的能见度预报均采用 SW99 方法计算。CMA-MESO 的三种对比方案均为模式第一层的结果。

结合沿岸实况观测（图 2）和葵花 8 号卫星反演产品（图 6a-c）看到，18 日 20 时（图 6 第一列）华南近海有大雾出现，琼州海峡、北部湾均是能见度 2-3km 的轻雾。对比几个模式能见度预报结果，TYM 预报

华南近岸海域有轻雾，琼州海峡东部和海南东北部近岸海域有大雾。MESO_MRF 模式几乎没有预报出有雾，MESO_MRF_HR 仅预报北部湾西北部近岸有小范围大雾，MESO_YSU_HR 除预报北部湾小范围大雾外，在海南东部近岸预报有大雾。所有的模式对琼州海峡的轻雾都没有预报能力。

19 日 02 时（图 6 第二列），由卫星反演产品可以看到，除琼州海峡外，北部湾的大雾范围明显增大，同时从实况观测也可以看到，琼州海峡此时已经出现能见度低于 1km 的大雾。TYM 此时预报雷州半岛东部和北部湾中部小范围海域有大雾，MESO_MRF 仅在海南东北部近岸海域预报有大雾；MESO_MRF_HR 的大雾预报范围较 20 时有所增大，包括琼州海峡东部和海南东北部近岸、北部湾部分海域；MESO_YSU_HR 的大雾预报范围则明显增大，雷州半岛东南部、琼州海峡东部、至海南东部和南部近岸均有大雾，北部湾的大雾更明显。通过对比分析发现，YSU 方案对大雾的预报更敏感、更接近实况。

19 日 08 时（图 6 第三列），广东西南部近岸海域、琼州海峡大雾持续，北部湾也有雾（卫星反演产品缺测，实际上有雾）。TYM 此时预报雷州半岛东部大雾完全消散，北部湾仅有零星的雾。MESO_MRF 预报琼州海峡东部和北部湾中部南北向狭长的大雾，MESO_MRF_HR 预报雷州半岛东南部至海南东南部一带有大雾，北部湾中部有较大范围的大雾，MESO_YSU_HR 能够预报琼州海峡北岸东西向狭长带状的大雾，也是唯一对海峡内部大雾有预报能力的边界层方案，主要是因为该方案能够预报出琼州海峡北岸狭长带状的低层云水含量分布（图略）。

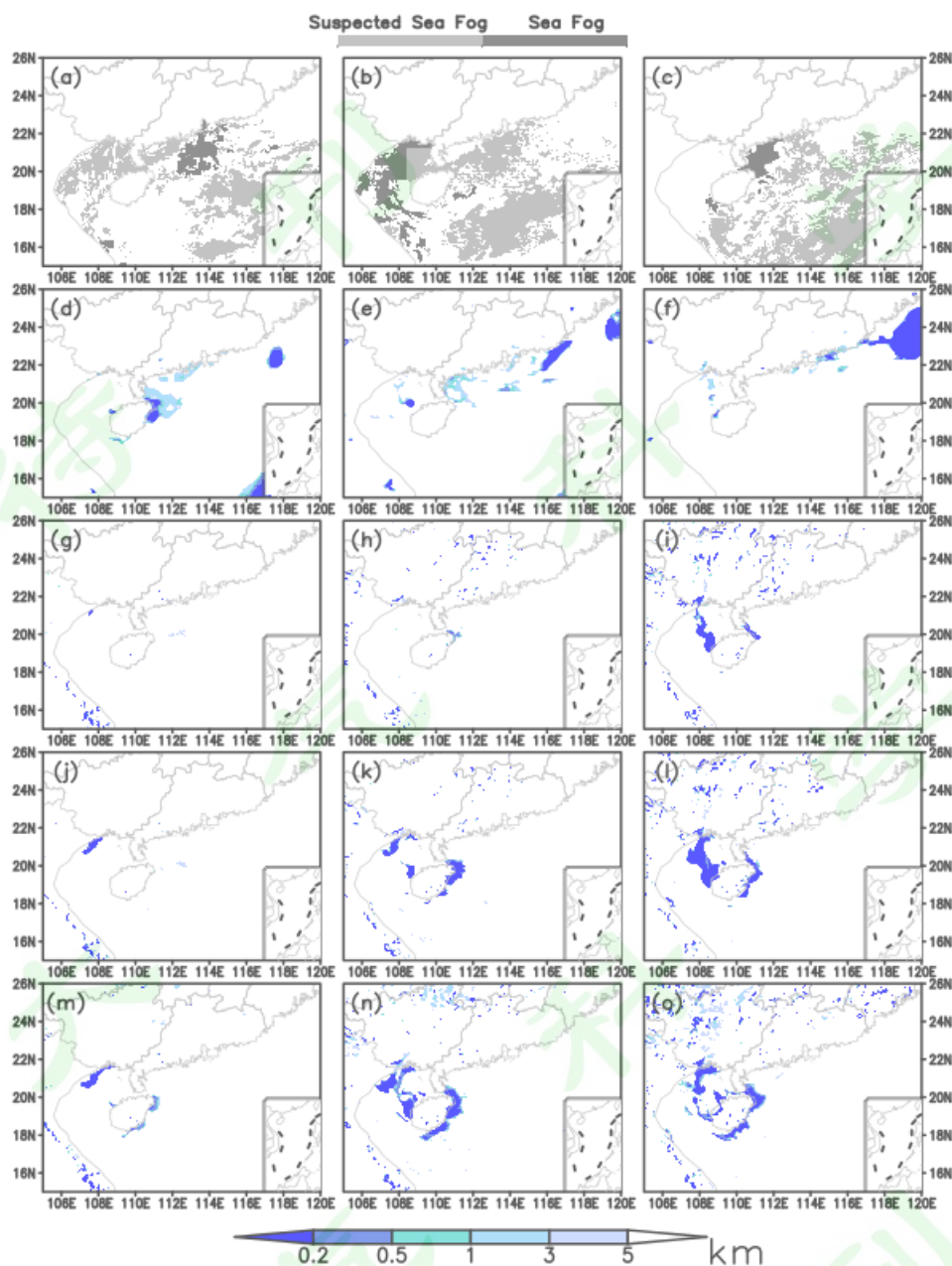


图6 2018年2月18日20时(左列),19日02时(中列),19日08时(右列)的各模式能见度预报对比。第一行为HW8卫星反演海雾(深灰色为海雾,灰色为疑似海雾),第二行为TYM能见度预报(单位:km),第三行为MESO_MRF能见度预报(单位:km),第四行为MESO_MRF_HR能见度预报(单位:km),第五行为MESO_YSU_HR能见度预报(单位:km)

Figure 6 The predictions of visibility (left column) at 20 on 18th, (middle column) 02 on 19th and (right column) 08 on 19th February in 2018. The first row is for the derived sea fog of Himawari-8 (dark grey is for sea fog, grey is for suspected sea fog), the second to fifth rows are for visibility predictions of TYM, MESO_MRF, MESO_MRF_HR and MESO_YSU_HR respectively (unit: km)

卫星反演产品显示,在19日凌晨5-6时左右大雾最强、范围最广,雷州半岛东部近岸、琼州海峡和北部湾都出现大雾,各个模式、不同边界层方案预报有所不同。TYM模式在18日20时之前预报大雾,但是到了夜间,大雾趋于减弱,同反演产品偏差较大。MESO_MRF对该过程的生消趋势预报同反演产品相似,但是大雾范围明显偏小,预报大雾最浓时间是19日08时左右,比实况偏晚。MESO_MRF_HR和

MESO_YSU_HR 均对该次过程的预报效果较好，提高垂直分辨率后改进了水平雾区的模拟效果。但是两个方案略有些不同，MESO_MRF_HR 预报大雾最浓的时间大概在 19 日 08 时左右，MESO_YSU_HR 预报最浓时间是 19 日 05 时左右，同实况比较接近，而且对琼州海峡内的大雾预报更准确。垂直分辨率提高能更好地模拟近海面层的云水含量，YSU 边界层方案也对近海面的云水含量有更好的模拟，MESO_YSU_HR 云水含量的水平分布和垂直分布效果均较好（图略），因而雾（能见度）预报效果也更好。

4.2 海雾预报因子模拟结果对比

为深入了解不同模式、不同边界层方案对海雾预报的影响，进一步对比 10 米风、2 米温度和温度露点、相对湿度等对海雾预报影响较大的几个预报因子，图 7 给出了四种方案对徐闻站的预报和实况对比情况。从风速对比（图 7a）来看，实况风速较小，甚至在雾最浓时为静风。四种方案对风速预报的整体趋势与实况比较一致，但是风速均比实况观测偏大 3-5m/s，白天风速加大，夜间风速减小，但是预报的波峰、波谷略滞后于实况，TYM 预报风速同实况风速最接近，均方根误差（RMSE, Root Mean Square Error）为 3.63m/s，区域模式均在 4m/s 以上（表 2）。站点实况以东偏北风为主，各个预报多为偏东到东南风（图 7b），风向偏差是 MESO_YSU_HR 最小（均方根误差为 60.52° ），TYM 风向偏差最大（均方根误差为 73.19° ）。相对湿度和气温均存在明显的日变化，白天气温升高，空气饱和度增大，相对湿度降低，能见度转好。从相对湿度的演变（图 7c）可以看到，MESO_YSU_HR 相对湿度的变化趋势及减弱的时间同实况最接近，均方根误差为 5.0%，预报效果最好，这同图 6 中大雾趋势预报的结论是相符的。19 日凌晨，TYM 和 MESO_MRF 两种方案的相对湿度降低的时间偏早，从而导致整个琼州海峡大雾消散时间偏早。与风速预报类似，四种方案均能预报出气温的日变化趋势，但整体预报明显高于实况。19 日早晨，TYM 的气温升高太快，相比 MESO_MRF 模式系列方案误差明显偏大，MESO_YSU_HR 预报的气温同实况最接近，均方根误差为 1.23°C ，效果最优。气温日变化非常明显，露点无明显的日变化，因此温度露点差具有明显的日变化，即水汽饱和度变化大，这也说明海口的大雾具有辐射雾的特征。露点温度和温度露点差的预报基本上也都高于实况，但 MESO_YSU_HR 预报与实况最接近，露点温度和温度露点差的均方根误差分别为 0.92°C 和 0.9°C 。综合来看，各模式、各方案风速的预报均比实况偏大，风向预报与实况也有一定偏差，预报多为东南风，但实况以东偏北为主，湿度的预报又略低于实况，在早晨温度升高后湿度减小的时间偏早，这也导致大雾浓度降低的时间偏早。相比较而言，MESO_YSU_HR 方案的预报效果更优。海口站的结论同徐闻站相近（图略）。

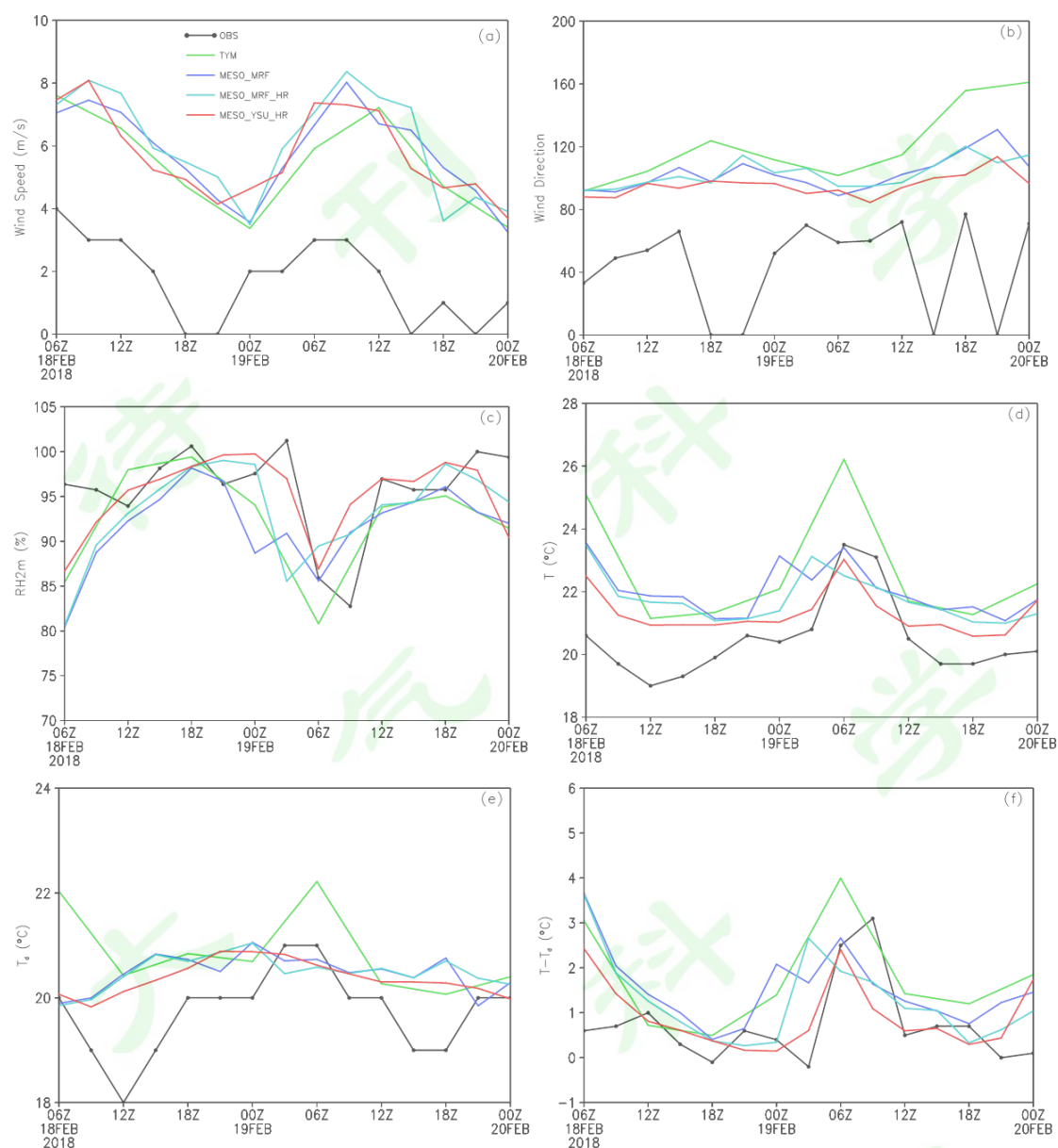


图7 2018年2月18日14时-20日08时徐闻站各模式预报因子对比: (a) 10米风速(单位: m/s), (b) 10米风向(单位: °), (c) 2米相对湿度(单位: %), (d) 2米温度(单位: °C), (e) 2米露点温度(单位: °C), (f) 温度露点差(单位: °C)

Figure 7 Comparison for predicting factors of models from 14 on 18th to 08 on 20th February in 2018, (a) 10m wind speed (unit: m/s), (b) 10m wind direction (unit: °), (c) 2m relative humidity (unit: %), (d) 2m temperature (unit: °C), (e) 2m dew-point temperature (unit: °C) and (f) dew-point depression (unit: °C)

表2 各模式预报因子均方根误差对比

Table2 Comparison for the RSME of models

预报因子 方案	风速 (单位: m/s)	风向 (单位: °)	2米相对湿度 (单位: %)	2米温度 (单位: °C)	2米露点温度 (单位: °C)	2米温度露点 差 (单位: °C)
TYM	3.63	73.19	5.59	2.39	1.33	1.32
MESO_MRF	4.24	67.52	6.81	1.89	1.10	1.28
MESO_MRF_HR	4.54	66.16	6.75	1.71	1.11	1.26
MESO_YSU_HR	4.11	60.52	5.00	1.23	0.92	0.90

4.3 能见度算法结果对比

2.3.3 节中我们提到了三种能见度算法，经过对海口和徐闻两个站点进行对比分析发现，由于 CVIS 方法是选取 SW99 和 FSL 算法的最小值，但是 SW99 算法对站点能见度没有预报能力（见图 8），CVIS 等于 FSL 的算法，因此，图 8 中略去 CVIS 算法的能见度等值线。基于 4.1 节中的结论，加密后的 MRF 和 YSU 方案对海雾预报效果更优，因此图 8 中只对比分析了 TYM 和加密后的两种方案。

从图 8 可以看出，无论是 TYM 还是加密后的 MRF 和 YSU 方案，基于 SW99 算法（为了区别 YSU-SW99 和 MRF-SW99，把能见度输出值分别定为 28 和 29）对低能见度全部漏报，但是 FSL 算法的能见度预报效果非常好，对能见度的增大和减小的趋势预报比较准确。18 日夜间至 19 日早晨徐闻站大雾期间能见度在 0.2-0.5 km 之间（图 8a），基于 MRF 方案的 FSL 算法(简称 MRF_FSL)能见度预报为 2 km 左右，YSU 方案 FSL 算法(简称 YSU_FSL)能见度预报为 1 km 左右，同实况观测更接近，能见度降低的时间也比较一致。19 日 11 时徐闻的能见度达到 5 km，但此时相对湿度(大于 80%)还在继续减小中，MESO_MRF_HR 模式预报的相对湿度已经降低到 75%以下，MRF_FSL 算法预报的能见度大于 10 km，而 MESO_YSU_HR 模式预报的相对湿度 85%以上，YSU_FSL 算法预报的能见度小于 5 km。可以看出，能见度的变化与相对湿度的变化几乎是同步的，这反过来也说明依赖于地面相对湿度的 FSL 算法是合理的。针对 19 日夜间徐闻的大雾，两种方案的 FSL 算法能见度预报均在 2-4 km 之间，比前一天预报值更高，同相对湿度的预报比较一致，水汽含量减小，在温度露点差比前一天大的情况下，凝结成雾的条件更差，导致能见度预报误差更大。MRF_FSL 算法的 RMSE 为 4.79，YSU_FSL 的 RMSE 为 3.56，对于徐闻站，YSU 方案预报更优，而基于云水含量计算的 SW99 算法完全漏报，这也可能跟目前数值模式普遍对温度湿度的预报效果优于云水等要素有关

（Gultepe et al., 2006）。由此得出，边界层方案对海雾预报有明显影响，而后期的能见度诊断公式也决定了预报的准确性。海口站的结论同徐闻站相似，基于 YSU 边界层方案的 FSL 算法更优（图 8b）。

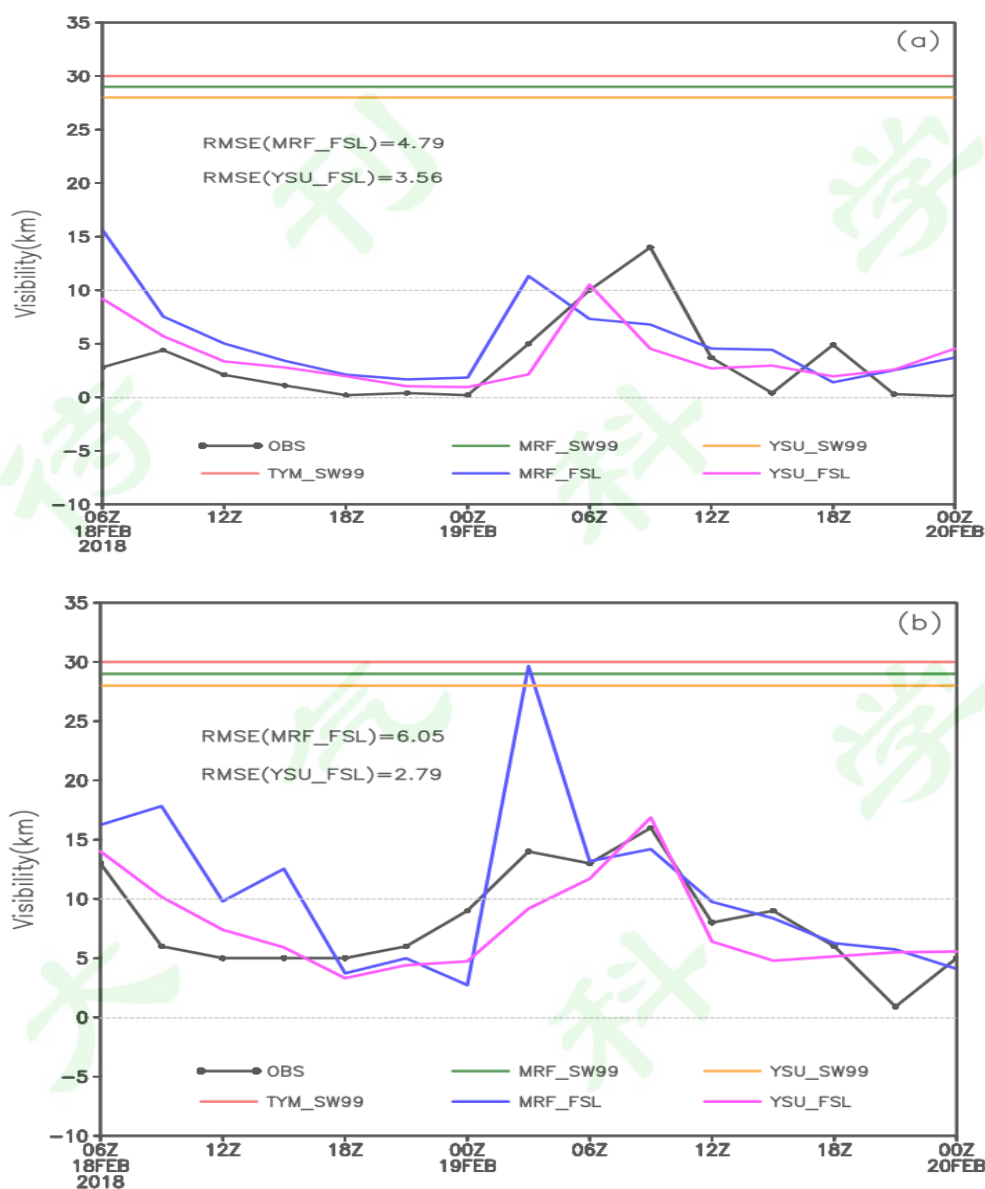


图8 基于 TYM 和加密模式的徐闻站 (a) 和海口站 (b) 的能见度算法对比图, 图中标值为均方根误差 (单位: km)

Figure 8 Comparison for visibility of (a) Xuwen station and (b) Haikou station by using multiple algorithms of visibility based on TYM and increased model of vertical levels (unit: km), the values in the figure are RMSE

通过前文的分析发现, 对于站点预报 FSL 算法最优。图 9 给出了 FSL 算法计算的能见度空间分布对比图, 与 SW99 算法的能见度 (图 6) 对比可以看到, FSL 算法预报雾的范围比 SW99 算法更大, 能见度的值相对更高, 最低能见度基本上在 0.5-1.0 km 之间。FSL 算法对能见度的预报有一定的预报梯度, 能见度的跨度更大, SW99 算法对能见度的预报几乎没有梯度, 基本上都在 0.5 km 以下。对于琼州海峡的大雾, 基于 SW99 算法, 仅有 YSU 方案预报出一条东西向狭长的雾区, 而 FSL 算法, 尤其是 YSU 方案的 FSL 算法对琼州海峡的大雾落区预报效果非常好, 并且在 19 日 02 时和 08 时, 对北部湾和广东西部沿岸附近雾的落区也有较好的预报。通过对比分析发现, 对于同一海雾数值模式, 不同的能见度算法其预报结果有较大差别,

因此，在对数值模式产品释用时可以参考不同的方案。

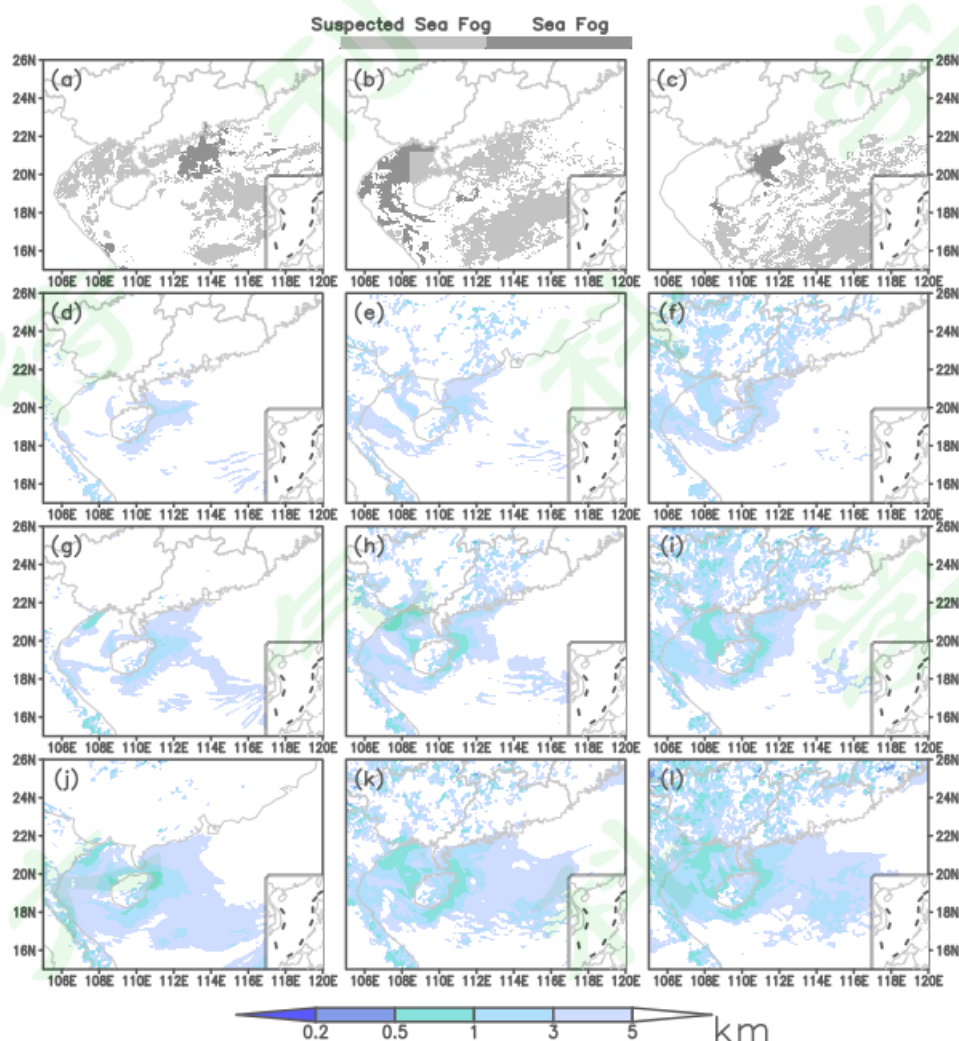


图9 同图6，但为FSL算法的能见度预报（单位：km），去掉了TYM模式预报（第二行）

Figure 9 Same as Figure 6, but for predictions of visibility (Unit: km) using FSL method except for the results of TYM (the second row in Figure 6)

5. 结论与讨论

针对 2018 年春节期间发生在琼州海峡的一次持续性大雾个例，在天气学成因分析基础上，基于 CMA-MESO 区域高分辨率数值模式，从边界层方案、模式垂直分层以及海雾能见度算法三个方面进行数值模式敏感性试验，得到如下结论：

（1）2018 年 2 月 18-20 日大雾期间华南沿海海温偏低，地面冷高压南下补充的弱冷空气为大雾的生成和维持提供了大尺度背景条件。来自南海的偏东暖湿气流流经冷海面快速凝结形成平流冷却雾，沿岸站点有明显的日变化特征，为平流和辐射雾的混合雾。持续不断的暖湿气流带来充足的水汽，为海雾的生成和维持提供了重要的物理基础。

(2) 对比不同边界层方案的数值模拟结果发现, 基于 CMA-MESO 模式低层垂直层次加密的 YSU 方案的模拟效果最优, 对于 10 米风、2 米温度和温度露点差、相对湿度等对海雾预报影响较大的预报因子的模拟效果更好, 因此无论是大雾的预报范围, 还是大雾最浓的时间预报均是最好。

(3) 相同的模式、不同的能见度算法对大雾的预报会产生较大的影响。依赖云水含量的 SW99 算法虽然对北部湾和雷州半岛东部的大雾预报有体现, 但是对琼州海峡内的大雾过程出现漏报现象, 而 FSL 算法对大雾的范围以及琼州海峡内的大雾过程均有更好的效果。这也说明模式对低层云的预报仍存在不足, 而对相对湿度和温度场的预报效果较好。

上述敏感性试验的结论仅是对本次海雾过程的模拟分析结果, 今后还需要利用多个例海雾试验来获得更为普遍性的结论。另外, 目前国际上通用的能见度算法非常多, 每种算法均有自己的优势和特点, 需要在以后的工作中继续研究, 找到适合业务模式和我国近海海域的计算方法。

参考文献 (References)

- Bang C H, Lee J W, and Hong S Y. 2009. Predictability experiments of fog and visibility in local airports over Korea using the WRF model [J]. J. Korean Soc. Atmos. Environ., 24: 92-101.
- 陈静, 庞波, 吴政秋, 等. 2022. 华南复杂地形下 GRAPES_Meso 3 km 对流尺度模式前汛期精细化降水预报评估 [J]. 大气科学学报. 45(1):99-111. Chen J, Pang B, Wu Z Q, et al. 2022. Evaluation of fine-scale precipitation forecast of GRAPES_Meso 3 km convection-scale model in early summer rainy season in South China under complex topographical conditions. Trans Atmos. Sci., (in Chinese), 45(1):99-111.
- 程相坤, 程航, 徐杰, 等. 2013. 一次黄前海雾成因分析及数值模拟试验 [J]. 气象与环境学报, 29 (6): 15 - 23. Cheng X K, Cheng H, Xu J, et al. 2013. Forming reason of a sea fog event and its numerical simulation over the Yellow Sea [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 29(6): 15-23. doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.06.003.
- 戴光丰, 陈子通. 2013. GRAPES 模式中地面通量在一次台风数值模拟中的敏感性试验研究 [J]. 热带气象学报, 29(3):403-410. Dai G F, Chen Z T. 2013. Sensitive experiments of the surface flux on a simulated typhoon in GRAPES.
- Doran, J A, Roehr P J, Beberwyk D J, et al. 1999. The MM5 at the air force weather agency-new products to support military operations. The 8th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, NOAA/NWS, Dallas, Texas.
- 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: 293-303.
- Fu G, Guo J T, Angeline P, et al. 2008. An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas [J]. J. Ocean Univ. Chin., 7(1):27-34.
- 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 2004. 一次黄前海雾事件的观测与数值模拟研究--以 2004 年 4 月 11 日为例 [J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 34(5): 720-726. Fu G, Wang J Q, Zhang Me G, et al. 2004. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow sea on 11 April, 2004 [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 34(5): 720-726.
- 傅刚, 张涛, 周发瑛. 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(自然科学版), 32(6): 859-867. Fu G, Zhang T, Zhou F X. 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.
- 高荣珍, 李欣, 时晓曦, 等. 2018. 基于 WRF 模式的青岛近海能见度算法比较研究 [J]. 海洋气象学报, 38(2): 28-35. Gao R Z, Li X, Shi X M, et al. 2018. Comparative study on three algorithms of the visibility in Qingdao

- offshore areas based on WRF model [J]. J. Mar. Meteor. (in Chinese), 38(2): 28-35.
doi: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599. 2018.02.004.
- Gao S H, H Lin, B Shen, et al. 2007. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling [J]. Adv Atmos Sci, 24(1): 65-81.
- 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 2010a. 利用循环 3DVAR 改进黄淮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 S H, Qi Y L, Zhang S B, 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]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 40(10): 1-9.
- 高山红, 王永明, 傅刚. 2014. 一次黄淮海雾的集合预报试验 [J]. 中国海洋大学学报, 44(12): 1-11. Gao S H, Wang Y M, Fu G. 2014. Ensemble forecast of a sea fog over the Yellow Sea [J], Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 44(12): 1-11.
- Gultepe I, Isaac G A, Strawbridge K. 2001. Variability of cloud microphysical and optical parameters obtained from aircraft and satellite remote sensing during RACE [J]. Int. J. Climatol., 21(4): 507-525.
- Gultepe I, Muller M D, Boybeyi Z. 2006. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models [J]. J Appl Meteor climatol, 45(11):1469-1480.
- Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon Wea Rev, 134(9): 2318-2341.
- 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):282-289. 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):282-289.
- Huang H J, Huang B, Yi L, et al. 2019. Evaluation of the global and regional assimilation and prediction system for predicting sea fog over the South China Sea [J]. Adv. Atmos. Sci., 36: 623-642.
- 黄辉军, 詹国伟, 刘春霞, 等. 2015. 一次华南沿海海雾个例的数值模拟研究 [J]. 热带气象学报. 31(5):643-654. Huang H J, Zhan G W, Liu C X, et al. 2015. A case study of numerical simulation of sea fog on the southern China coast [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 31(5):643-654.
- 黄丽萍, 陈德辉, 邓莲堂, 等. 2017. GRAPES_Meso V4.0 主要技术改进和预报效果检验 [J]. 应用气象学报, 28(1): 25-37. Huang L P, Chen D H, Deng L T, et al, 2017. Main Technical Improvement of GRAPES_Meso V4.0 and Verification [J]. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 28(1): 25-37.
- 黄翊, 彭新东. 2017. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响 [J]. 大气科学, 41(3): 533-543. Huang Y, Peng X D. 2017. The impact of an improved planetary boundary layer parameterization scheme on the simulation of fog [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 41(3):533-543, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16152.
- 鞠永茂, 钟中, 卢伟. 2006. 模式垂直分辨率对梅雨锋暴雨数值模拟的影响 [J]. 气象科学, 26(1):10-16. Ju Y M, Zhong Z, Lu W. 2006. The effects of model vertical resolution on the simulation of torrential storm over mei-yu front. Scientia Meteor. Sinica (in Chinese), 26(1):10-16.
- Kunkel B A. 1984. Parameterization of droplet terminal velocity and extinction coefficient in fog models [J]. J. Climate. Appl. Meteor., 23(1): 34-41.
- 李靖, 马卫民, 马占宏, 等. 2013. 台风数值模拟中模式垂直分辨率的影响分析 [J]. 海洋技术, 32(2):76-81. Li J, Ma W M, Ma Z H, et al. 2013. Impacts of wrf model vertical grid resolution on typhoon numerical simulation [J]. Ocean Technol. (in Chinese), 32(2):76-81.
- 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 2014. 春季黄淮海雾 WRF 参数化方案敏感性研究 [J]. 应用气象学报, 25(3): 312-320. Lu X, Gao S H, Rao L J, et al. 2014. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 25(3): 312-320, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2014.03.008.
- 马占山, 刘奇俊, 孙健, 等. 2021. WSM6 云微物理方案对华北地区一次降雪预报偏强的原因分析 [J]. 气象, 47(9): 1029-1046. Ma Z S, Liu Q J, Sun J, et al. 2021. Study on the reason for overestimation of a snowfall case by WSM6 cloud microphysical scheme over North China [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 47(9): 1029-1046.
- 聂皓浩, 刘奇俊, 马占山. 2016. 高分辨率 GRAPES 模式中云微物理方案对强降水的模拟和诊断研究 [J]. 气象, 42(12):1431-1444. Nie H H, Liu Q J, Ma Z S. 2016. Simulation and analysis of heavy precipitation using cloud microphysical scheme coupled with high-resolution GRAPES model. Meteor. Mon. (in Chinese), 42(12):1431-1444.

- Smirnova T G, Benjamin S G, Brown J M. 2000. Case study verification of RUC/MAPS fog and visibility forecasts [C] //AMS: The 9th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Florida. Boston: AMS,31-36.
- Stoelinga M T, and Warner T T. 1999. Nonhydrostatic,mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibilityfor an East Coast winter precipitation event [J]. J.Appl. Meteor., 38, 385-404.
- 王彬华. 1985.海雾 [M]. 北京: 海洋出版社: 2-4. Wang B H. 1983. Sea Fog (in Chinese) [M]. Beijing: China Ocean Press: 2-4
- 万子为, 刘鑫华. 2018. 华东地区弱天气背景下强对流过程的 GRAPES-Meso 模式模拟分析 [J]. 气象科技.46(02): 282-291. Wan Z W, Liu X H. 2018. Simulation analysis of sever convection weather in weakly forced system in East China with GRAPES-Meso [J]. Meteor. Sci. Technol. (in Chinese), 46(02): 282-291.
- 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. Sentivity study of vertical resolution in WRF numerical simulation for sea fog over Yellow Sea [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 74(6):974-988. Doi:10.11676/qxxb2016.062
- Yang Y, Hu X M, Gao S H, et al. 2019. Sensitivity of WRF simulations with the YSU PBL scheme to the lowest model level height for a sea fog event over the Yellow Sea [J]. Atmos. Res., 215:253-267.
- Zhang D L, Wang X X. 2003. Dependence of hurricane intensity and structures on vertical resolution and time-step size. Adv. Atmo. Sci. , 20(5):711-725
- 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]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 38(3):359-366.
- 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. The influence of the thermal effect of underlaying surface on the spring sea fog over the Yellow sea: observation and numerical simulations [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(4): 439-449.
- 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 2004. 黄海春季海雾形成的气候特征 [J]. 海洋学报. 26(3):28-37. Zhou F X, Wang X, Bao X W. 2004. Climatic characteristics of sea fog formation of the Huanghai Sea in spring [J]. Haiyang Xuebao, 26(3):28-37.