

中国第一代再分析产品CRA对琼州海峡海雾模拟的影响研究

杨薇^{1,2}, 冯箫^{1,2*}, 冯文^{1,2}, 李勋^{1,2}, 张涛³

(1. 海南省气象台, 海南海口 570203; 2. 海南省南海气象防灾减灾重点实验室, 海南海口 570203; 3. 国家气象信息中心, 北京 100081)

摘要: 为研究中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)研发的中国第一代全球再分析产品CRA(CMA Global Reanalysis)对海雾模拟的适用性, 将CRA与欧洲中心再分析产品ERA5(the 5th Generation of ECMWF Reanalysis)以及美国国家环境预报中心的再分析产品FNL(Final Reanalysis Data)分别作为WRF(Weather Research and Forecast)模式驱动的初边界条件, 对发生在琼州海峡的一次持续性海雾过程进行数值模拟。结果表明: 将3种再分析产品作为初始场均能模拟出琼州海峡海雾发展过程。CRA和ERA5模拟的海雾在偏东风下开始发展, 风向转为东北风后消散。CRA模拟的海雾强度最强且维持时间最长, FNL模拟的底层风场较早转为东北风, 海雾消散早。在垂直方向上, ERA5和CRA模拟的海雾发展高度与实况接近, FNL则明显偏低。CRA中较低的逆温层以及近地层温度将水汽聚集在低层, 使得海雾可以持续发展并长时间维持。在加入实时更新的高分辨率海温后, 模拟的气海温差场更精细, 可反映出琼州海峡中部及东部气海温差小于0.5℃的区域, 模拟海雾发展的能力更强。

关键词: 中国第一代全球再分析产品; 海雾; 琼州海峡; 数值模拟

中图分类号: P732.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2023)02-0098-12

0 引言

海雾是受海洋影响并发生在海上或沿海地区的雾^[1]。海雾可导致海上及沿海地区水平和垂直能见度降低, 并危害近海渔业生产、海上和港口航行船舶等安全、阻碍沿海高速公路交通运输。研究表明, 海雾对人民生命财产安全的危害程度与台风和龙卷风等不相上下^[2]。在2018年2月15—25日“春运”期间, 琼州海峡出现历史罕见的持续性大雾, 海峡被迫停航28次, 累计停航超197 h, 高峰期滞留港口车辆超过2万辆, 港口附近交通大面积瘫痪, 从而引发社会高度关注, 并成为2018年“中国十大天气

气候事件”之一。

当前, 数值模式已成为研究和预报海雾的重要方法。然而与雾过程密切相关的边界层过程和微物理过程等参数化的不确定、初始场与海表面温度(Sea Surface Temperature, SST)场误差等因素的存在, 使得海雾预报至今仍是困扰我们的难题^[3-7]。随着天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)、中尺度模式系统(Mesoscale Model 5, MM5)、区域大气模拟系统(Regional Atmospheric Modeling System, RAMS)等三维高分辨率区域模式的发展, 边界层参数化方案和微物理参数化方案逐步得到完善。学者们在参数化方案对海雾模拟的

收稿日期: 2022-06-04; 修回日期: 2022-06-27。

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U21A6001); 海南省自然科学基金青年基金项目(422QN425); 海南省重点研发项目(ZDYF2023 SHFZ125)。

作者简介: 杨薇(1986-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事中小尺度数值模拟工作。E-mail: ywvirl@126.com

*通信作者: 冯箫(1988-), 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事海南省天气气候方面的研究。E-mail: fxloran@foxmail.com

适用性方面做了大量研究,也取得了一系列成果^[18-12]。中尺度数值模拟中一般采用大尺度全球模式再分析资料作为初边界条件,不同的初始条件会对模式局地预报的精确度产生较大影响^[13-14]。目前,绝大多数再分析资料由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)和日本气象厅(Japan Meteorological Agency, JMA)提供。由于不同机构使用的模式、观测数据、质量控制方法及同化方案等均存在差异,因此所导出的再分析资料也存在差别。学者们对不同来源初始场的降水和强对流的模拟能力进行评估,并得出相关的适用性结果^[15-17],而对不同资料的海雾模拟能力的评估工作则开展较少。杨薇等^[18]利用NCEP的再分析产品(NCEP Final Reanalysis Data, NCEP-FNL)数据集作为初始场对两次琼州海雾事件进行模拟,模拟出的低能见度区域与雾区吻合较好。WILSON等^[19]分别选取ECMWF再分析数据ERA-Interim和NCEP的北美区域中心再分析数据集(North American Regional Reanalysis, NARR)对发生在加州中央谷的3个大雾个例进行模拟,结果表明两种数据集均对大雾期间的气象要素及大雾的演变特征具有一定的再现能力。卢绪兰等^[20]采用ERA-Interim作为模式初边界条件研究了一次黄海海雾过程,模拟结果较好地反映出黄海雾区的位置和范围。

SST的变化可改变边界层大气的温湿属性,而对海雾的消产生影响^[21-23]。张苏平等^[24]通过观测和数值模拟试验得出,100 m以下气层稳定性及雾区范围对SST变化敏感,SST上升,近海面气层稳定度减弱,海雾面积缩小,SST下降,稳定度增强,海雾面积增大。史得道等^[25]利用ERA再分析资料对黄渤海一次海雾过程的形成机制进行分析,发现在黄渤海雾区的发展过程中气温高于SST,大气向海洋输送热量,促使平流到海面的暖湿空气冷却凝结形成海雾,雾区与海气温差在4℃以内区域的分布一致。孟宪贵等^[26]发现低SST的海水冷却效应可以使海雾的发生频率增加15%以上。当前数值模式中对于SST的处理主要有两种方式:一种是始终将初始场中的SST作为模式中的SST进行计算,另一种是将SST与初边界条件一起进行等时间间隔更

新,能较好地反映出SST的时间变化特征,从而改善对海雾的模拟能力^[27]。

中国气象局(China Meteorological Administration, CMA)国家气象信息中心研制了中国第一代全球再分析产品(CMA Global Reanalysis, CRA),垂直方向设47个等压面层,水平分辨率为 0.25° ,时间间隔为6 h。该数据集采用了NCEP的GSI(Gridpoint Statistical Interpolation)系统的3D-Var同化技术,同化了常规观测资料(地面观测、气球探空及风廓线雷达资料等)、海洋观测、卫星监测等多种中国特有观测数据,在中国区域降水评估等方面表现出较强的优越性^[28]。本文拟选用CRA作为初边界条件驱动WRF,同时以NCEP-FNL和ECMWF-ERA5(the 5th Generation of ECMWF Reanalysis)两种再分析资料作为对照试验,对2018年2月18—20日发生在琼州海峡的持续性海雾天气过程进行数值模拟,并深入考察CRA对海雾模拟的适用性,同时加入实时海温试验,探讨海温对海雾模拟的影响,为琼州海峡的海雾数值预报工作打下坚实基础。

1 资料与方法

1.1 资料

本文使用的资料包括:①广东省徐闻与海南省海口气象站大气能见度观测资料以及海南省海事局提供的琼州海峡南岸及北岸停航时段资料。②海口L波段二次测风雷达和GTS1型数字式探空仪数据(以下简称探空资料),包含每日07时(北京时,下同)和19时的探空资料,要素包含温度、湿度、气压、风向、风速等,垂直分辨率为10 m,用于反映琼州海峡南岸上空大气层结特征。③JMA的“葵花8号”(Himawari-8)卫星观测资料。④CRA资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)、ERA5再分析资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)、NCEP-FNL分析资料(水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$)以及NCEP的全球实时(Real Time Global, RTG)海温数据(分辨率为 $0.083^\circ \times 0.083^\circ$),主要作为模式初边界条件使用。

1.2 方法

利用中尺度数值模式WRF-ARW(V3.9.1)对海

雾过程进行数值模拟。模式设置为三层双向嵌套模拟,最内层覆盖琼州海峡。三重嵌套的水平分辨率由外层至内层分别为 9 km、3 km、1 km,每层格点数分别为 300×300 、 286×286 、 270×268 。模式在垂直方向上分为 65 层不等间距的 σ 层,模式层顶设为 50 hPa,其中 2 km 以下设 34 层。边界层方案选取二阶闭合的 MYNN3 方案,该方案考虑了凝结物理过程的影响,可以有效降低混合层厚度和 TKE 量级,对平流雾具有较好的模拟能力^[29];微物理过程采用 LIN 方案^[30];积云对流参数化方案选择包含水汽、云和水相态的 Kain-Fritsch 方案^[31](只应用在最外层);陆面方案选取 Noah 方案^[32];长波辐射和短波辐射方案分别采用 RRTM^[33]和 DUDHIA 方案^[34]。模拟时段为 2018 年 2 月 18 日 08 时—20 日 08 时,模拟结

果每 0.5 h 输出一次。

为研究不同初边界条件对海雾模拟的影响,分别利用 3 种来源的资料集作为初边界条件设计试验进行对比。3 种资料集分别为 CRA、ERA5 和 NCEP-FNL 分析资料(见表 1),均选用 0.25° 的高水平分辨率。根据以上数据集设计了 4 组试验(见表 2),其中 CRA、ERA5 和 FNL 试验分别采用各自数据作为初边界条件,加入分辨率为 0.083° 的 RTG 海温数据进行逐 6 h 海温更新模拟,用以研究不同再分析数据集对海雾模拟的影响;在 EXP_SST 试验中采用默认的 CRA 表面温度作为海温场,用来与 CRA 试验进行对照并探讨实时高分辨率海温的加入对海雾模拟的影响。

在气象中,雾是悬浮在近地面大气中的微小水

表 1 作为初边界条件的 3 种数据集的对比

Tab.1 Comparison of the 3 types of initial boundary condition data

数据集	来源	同化技术	垂直层数	分辨率
CRA	CMA 国家气象信息中心第一代全球大气再分析资料	GSI	47 层	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$
		3Dvar	模式层顶 1 hPa	逐 6 h
ERA5	ECMWF 第五代全球大气再分析资料	IFS	37 层	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$
		4Dvar	模式层顶 1 hPa	逐 1 h
FNL	NCEP 全球分析资料	GDAS	26 层	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$
		3Dvar	模式层顶 10 hPa	逐 6 h

表 2 数值试验设计

Tab.2 Summary of the numerical experiments

试验	初边界条件(IBC _s)		SST	
CRA	CRA	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	RTG	$0.083^\circ \times 0.083^\circ$
ERA5	ERA5	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	RTG	$0.083^\circ \times 0.083^\circ$
FNL	FNL	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	RTG	$0.083^\circ \times 0.083^\circ$
EXP_SST	CRA	$0.25^\circ \times 0.25^\circ$	CRA 表面温度	

滴或冰晶的水汽凝结物,能见度小于 1 000 m。通常认为雾的液态水含量范围为 $0.05 \sim 0.5 \text{ g/kg}$ ^[35]。岳岩裕等^[36]通过对湛江多年大雾过程的统计分析发现,华南南部沿海海雾的液态水含量低于中高纬地区。故本文将液态水含量 0.05 g/kg 作为琼州海峡地区雾区的临界下限值,以此标准来进行分析。

2 海雾天气过程

冯箫等^[37]对 2018 年 2 月 18—20 日的海雾个例进行了分析,得出该次过程为入海变性高压后部的平流雾过程。从海雾前期的环流形势来看,地面上蒙古地区有一冷高压逐渐东移出海,琼州海峡处于西南低压前侧和入海变性冷高压后部,高压脊线呈东北—西南走向,低层琼州海峡受偏强的南—东南气流影响,暖湿水汽输送条件较好,暖湿气团在冷的下界面凝结,最终形成海雾。从海口站和徐闻站的大气能见度时序图来看(见图 1),低能见度时段主要集中在凌晨—早晨,其中徐闻站海雾发展更盛,最低能见度仅 100 m,最长持续时数达 10 h,雾在凌晨时形成,日出后并未消散,而是持续发展,无

明显日变化特征。

由“葵花8号”卫星的可见光云图来看(见图2),从2018年2月19日凌晨起,琼州海峡和雷州半岛附近海面上有大面积的白亮云团发展,云体纹理不一,边缘较为平滑,可以与陆地上较高的云系区分;

19日08时,琼州海峡—雷州半岛南部云团纹理均匀,根据监测实况可判断为海雾;10时,海雾向南向西扩展至整个琼州海峡;12时,琼州海峡上海雾沿海岸线逐渐减弱,但琼州海峡中部仍有雾区存在;14时,琼州海峡海雾消散,上空为少量低云存在。

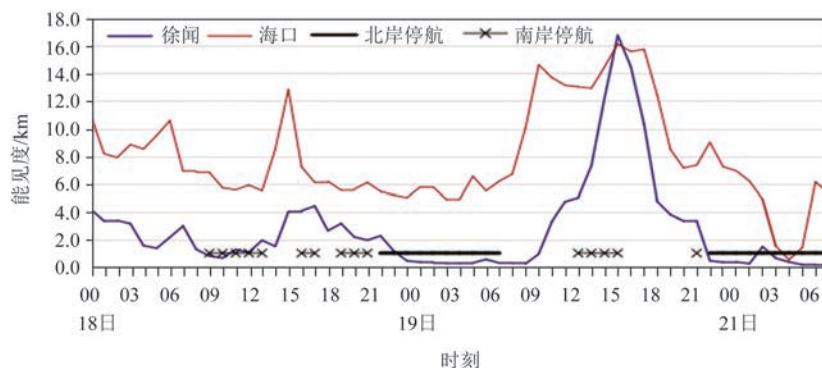


图1 徐闻和海口站大气能见度随时间的变化及琼州海峡停航时段

Fig.1 Time variations of atmospheric visibility at the Haikou and Xuwen stations, and the suspension period of the Qiongzhou Strait

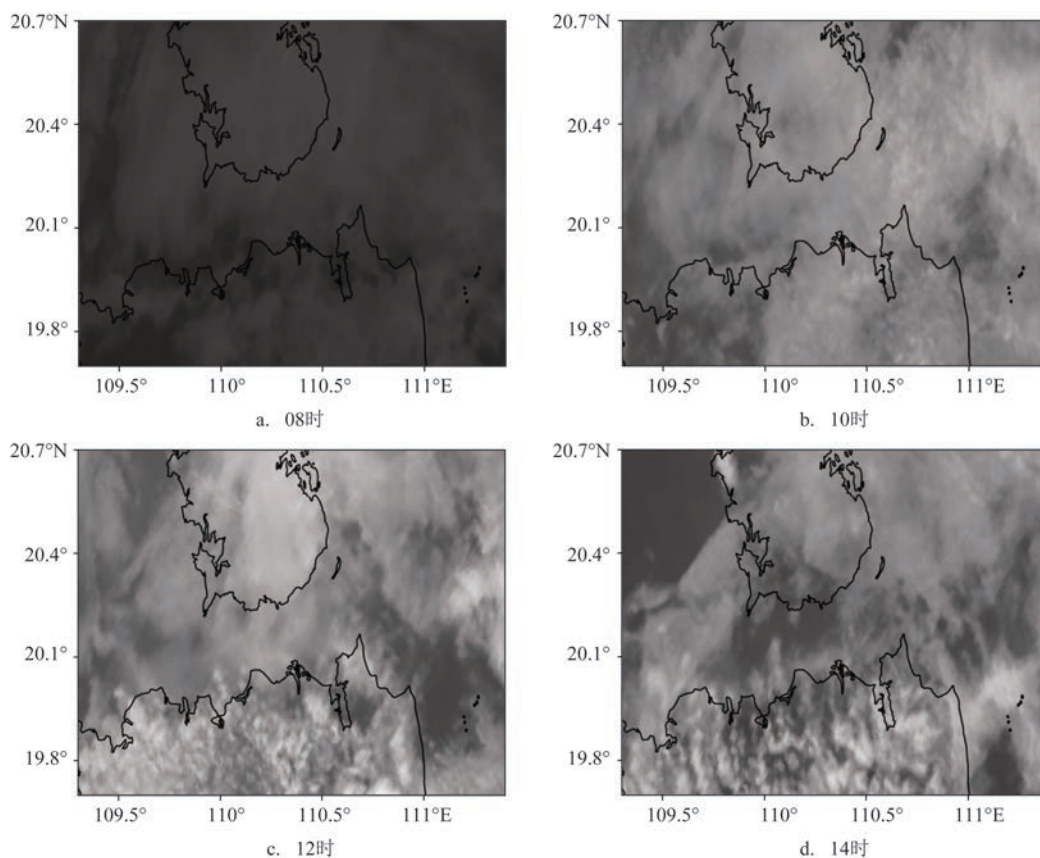


图2 2月19日海雾过程的“葵花8号”可见光云图

Fig.2 Himawari-8 visible cloud images of sea fog on February 19

3 模拟结果分析

3.1 不同初边界条件对海雾水平发展模拟的影响

图3为CRA、ERA5、FNL模拟的13 m高度液态水含量的分布图。通过与图2对比可知,3个试验均模拟出琼州海峡雾区发展的过程,即19日凌晨雾区自琼州海峡以东开始发展直至覆盖整个琼州海峡,13时左右海雾开始逐渐减弱并消散。结果同时表明不同数据集模拟的雾区也存在差异。19日00时,雾区在偏东风影响下逐渐向南、向西扩展,ERA5试验模拟的偏东风风速较大,雾区已发展至琼州海峡

中段,起雾时间相对其他两个试验更早,CRA模拟出的起雾时间则相对较迟。19日09时为海雾发展阶段,在3个试验中琼州海峡均处在 0.05 g/kg 以上的液态水含量区,CRA试验和ERA5试验中低层为偏东气流,但CRA试验中琼州海峡西侧液态水含量较大,最大值在 1 g/kg 以上,ERA5试验中西段雾区范围偏大。FNL试验中琼州海峡东侧逐渐转为东南风和东北风辐合区,对应雾区集中在海南岛东北部海域。在海雾消散阶段,3个试验中的风向均转为东北风,雾区从西段逐渐消散,其中ERA5和FNL试验中雾区消散较快,CRA试验中琼州海峡雾区持续至14时后才消散。从整体来看,ERA5试验和

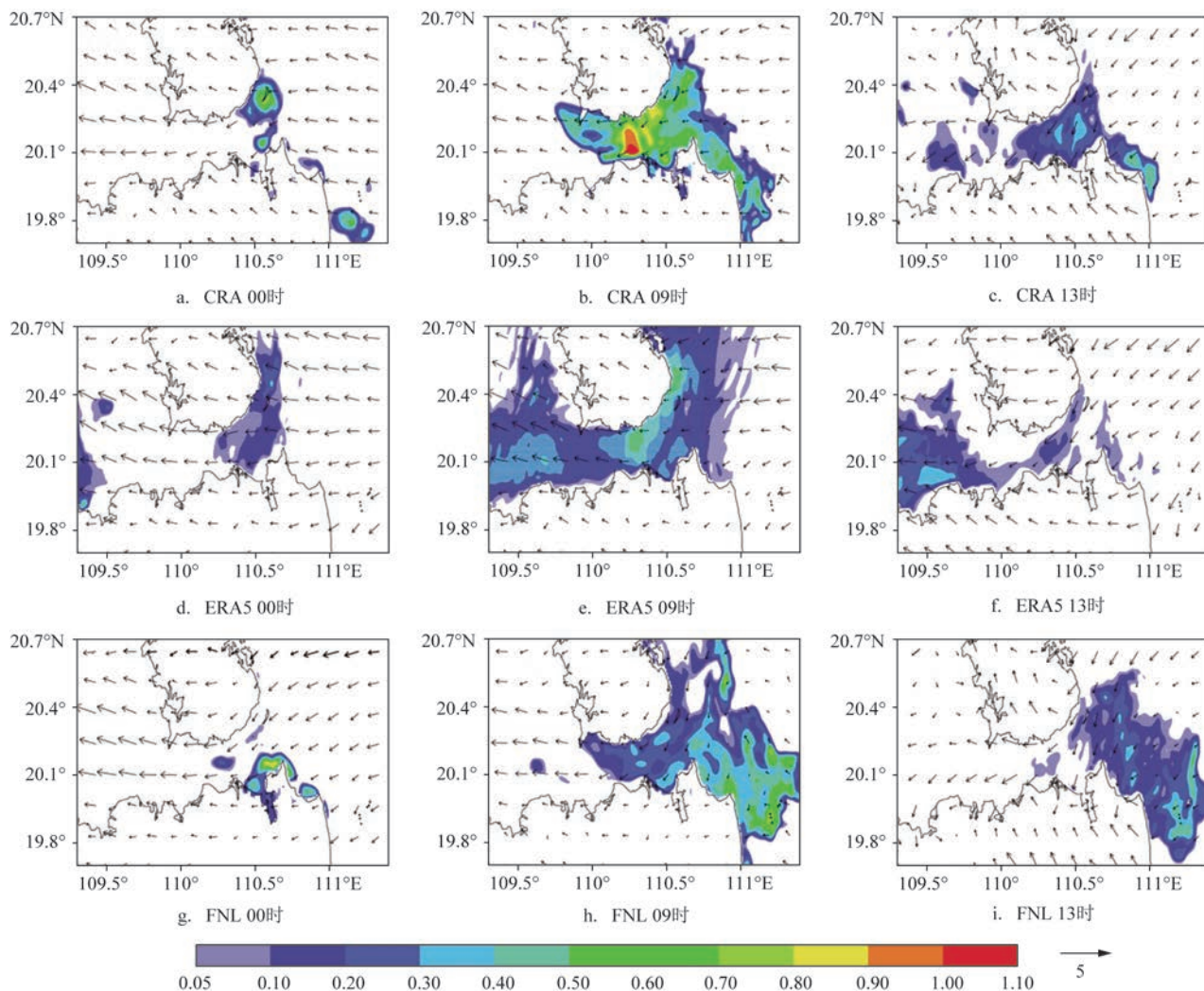


图3 2月19日3个试验模拟的13 m高度的液态水含量(阴影,单位: g/kg)和风场(矢量,单位: m/s)水平分布
Fig.3 The horizontal distributions of liquid water content (shaded, unit: g/kg) and wind field (vector, unit: m/s) at the height of 13 m simulated by the 3 experiments on February 19

CRA 试验模拟的雾区均在偏东暖湿气流下形成,其中 ERA5 试验模拟的底层风速较大,起雾最快,海雾向西扩散距离最远,CRA 试验模拟的海雾持续时间最长,琼州海峡的液态水含量最高,模拟的低层云水混合比的形状与雾团的位置、分布形状和区域都更加接近云图实况(见图2)。FNL 试验模拟的底层风速和海雾发展情况与其他两个试验均存在较大差异,其模拟出的琼州海峡东北风发展较早,对应海雾消散最快。

3.2 不同初边界条件对海雾垂直结构模拟的影响

利用垂直分辨率为 10 m 的海口探空资料与模

式试验结果进行对比,分析不同初边界条件对要素垂直廓线模拟的影响(见图4)。从温度廓线来看,除 FNL 试验外,各试验均模拟出 19 日 07 时出现贴地逆温,探空观测显示逆温浅薄,高度在 50 m 左右,CRA 试验和 ERA5 试验则显示逆温高度接近 100 m。从风速廓线来看,在 500 m 以下高度时,观测和模拟的风速变化较为一致,风速均从地面开始逐渐增加,实况风速在 400 m 左右达到最大,CRA 和 ERA5 试验结果与观测值最为接近;在 1 km 以上高度时,风速随高度减小,ERA5 和 FNL 试验的风速变化趋势与实况更为一致,CRA 试验的风速则表现出较大波动,存在风速随高度虚假增大的现象。3 个试验

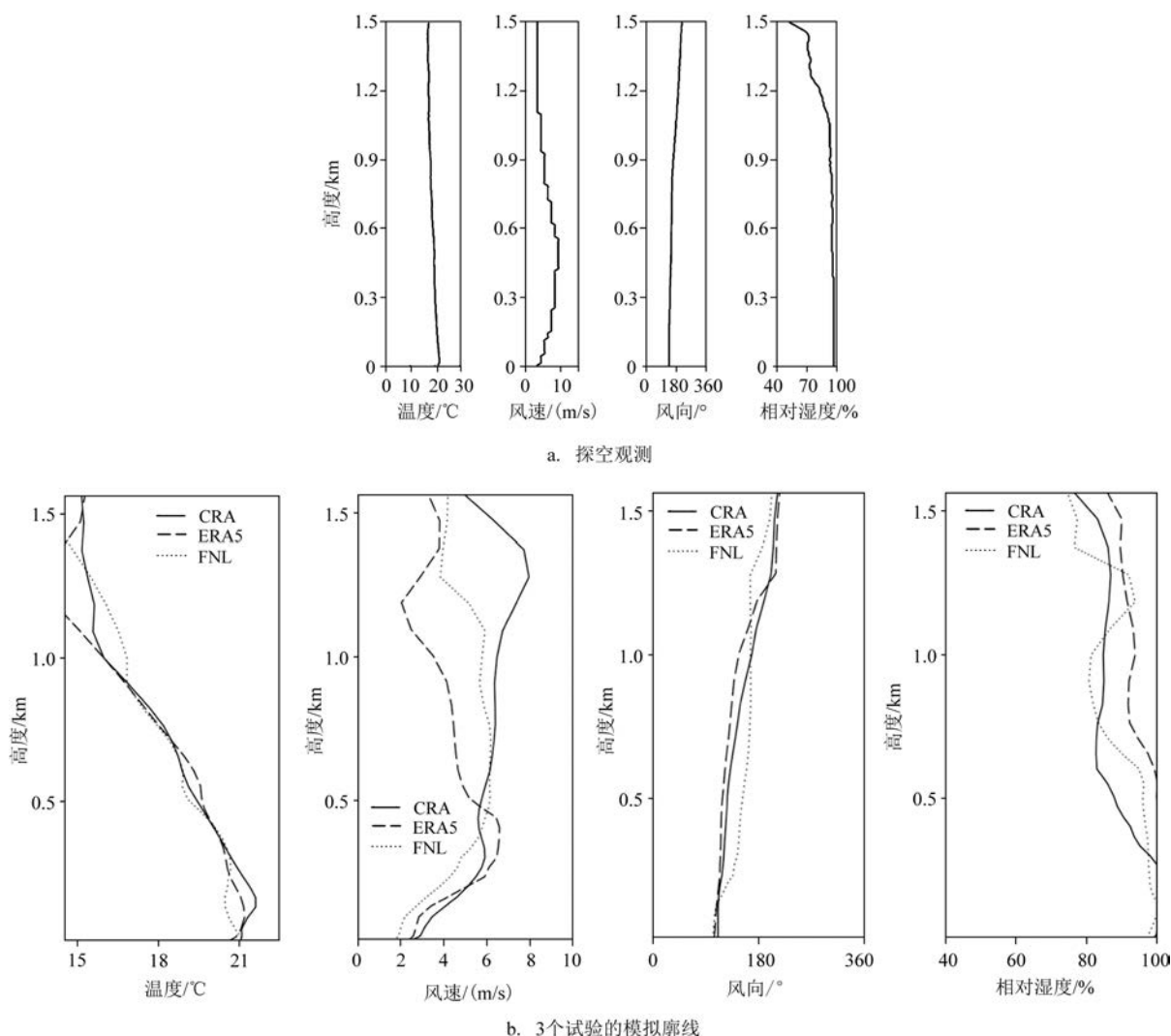


图4 2月19日07时探空要素与模式模拟的垂直廓线对比

Fig.4 Comparison of profiles of meteorological parameters between experimental simulations and sonde observation at 07:00 on February 19

模拟的风向表现都较为稳定,观测值和模拟结果均以偏东风为主,只有 FNL 试验的风向在 200 m 以上高度时转为偏南风,与其他两个试验出现偏差。从湿度廓线来看,探空观测的雾顶高度在 400 m 左右, CRA 试验模拟的雾顶偏低,在 300 m 左右, ERA5 模拟的雾顶偏高,在 500 m 左右, FNL 模拟的雾顶在 150 m 左右,与实况差距最大。综合分析可以发现,当 CRA 和 ERA5 为初边界条件时,模式对于垂直高度 1 km 内温度、湿度、风向和风速的变化刻画得更细致和准确。

图 5 是 3 个试验模拟的液态水含量的垂直剖面图,剖面位置沿 20.2°N,大致为琼州海峡中部。对比 3 个试验结果可以发现,海雾均在 19 日凌晨自海峡东部发展,19 日早晨整个琼州海峡被海雾覆盖。ERA5 模拟的海峡上液态水含量均在 0.3 g/kg 以下,海雾发展高度最高达 500 m; CRA 试验模拟的海峡中部最大液态水含量达 0.8 g/kg,对应海雾发展高度最大在 300 m 左右,与图 4 中相对湿度饱和区发展高度接近; FNL 试验模拟出的海雾高度最低,为 200 m 左右。在海雾消散阶段, FNL 试验中琼州海峡上液

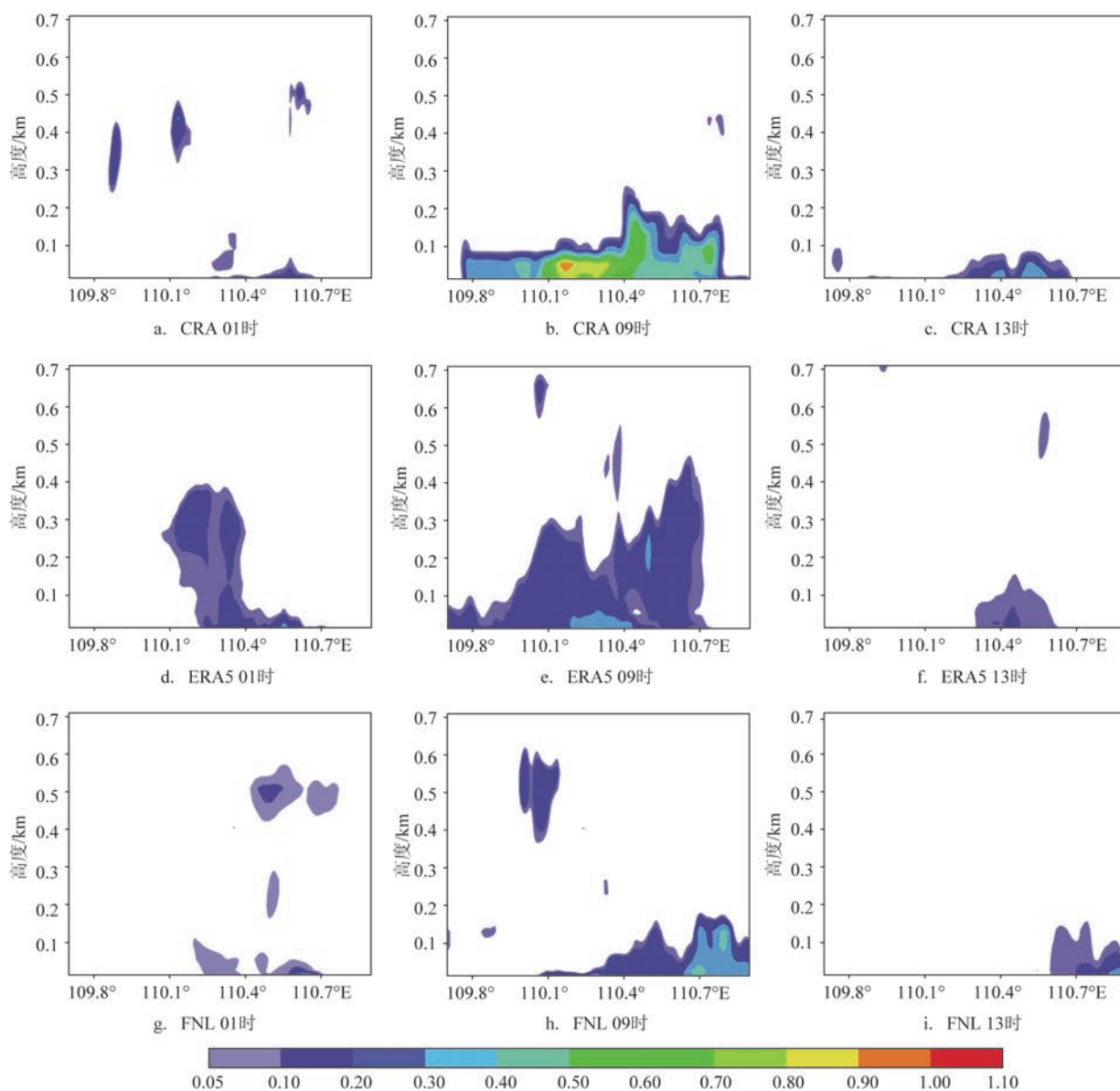


图 5 2月19日3个试验模拟的沿20.2°N的液态水含量垂直剖面(单位:g/kg)

Fig.5 Vertical cross sections of liquid water content (unit: g/kg) along 20.2°N simulated by the 3 experiments on February 19

态水含量迅速减小,CRA试验中海峡东部仍有较大范围的雾区,雾区消散慢于ERA5和FNL试验,与图3中雾区的发展对应。

通过以上比较分析发现,不同初始场模拟的海雾发展高度、海雾强度以及消散时段均存在较大差异。为了进一步探究初始场对海雾垂直结构模拟的影响,图6分别给出19日09时3个试验模拟的沿20.2°N的温度垂直剖面。从图中可以看出,在海雾发展阶段,低层逆温的发展高度与图5中液态水含量对应,较低的逆温层和近地面温度有利于海雾的发展和维持,当地表温度较高时,水汽难以在近地层凝结形成海雾,而当逆温层底较高时,水汽向上扩散,海雾难以长时间维持。CRA试验和ERA5试验模拟的逆温明显较FNL试验更强,CRA试验模拟的琼州海峡西侧110.2°E处逆温最强,逆温高度在120 m左右,对应该处液态水含量达0.8 g/kg。在

ERA5试验中,110.4°E处逆温层发展高度达300 m,与液态水含量发展高度一致。FNL试验模拟的温度明显较其他试验偏小,且未模拟出琼州海峡西侧的逆温区,近地层处于弱不稳定状态,海雾消散较快。

3.3 海温对海雾模拟的影响

为了研究实时海温场的加入对海雾模拟的影响,在对照试验EXP_SST中默认采用CRA表面温度,而在CRA试验中则加入分辨率为0.083°的RTG实时海温。从图3与图7中CRA和EXP_SST两个试验模拟的海雾演变来看,两者均模拟出海雾的发展演变,即19日凌晨海雾在偏东气流中发展,09时左右整个琼州海峡均被海雾覆盖。不同的是,EXP_SST试验模拟的琼州海峡上液态水含量较CRA试验偏小,海雾持续时间偏短。从海雾发展前的气海温差来看(见图8),CRA试验中琼州海峡海

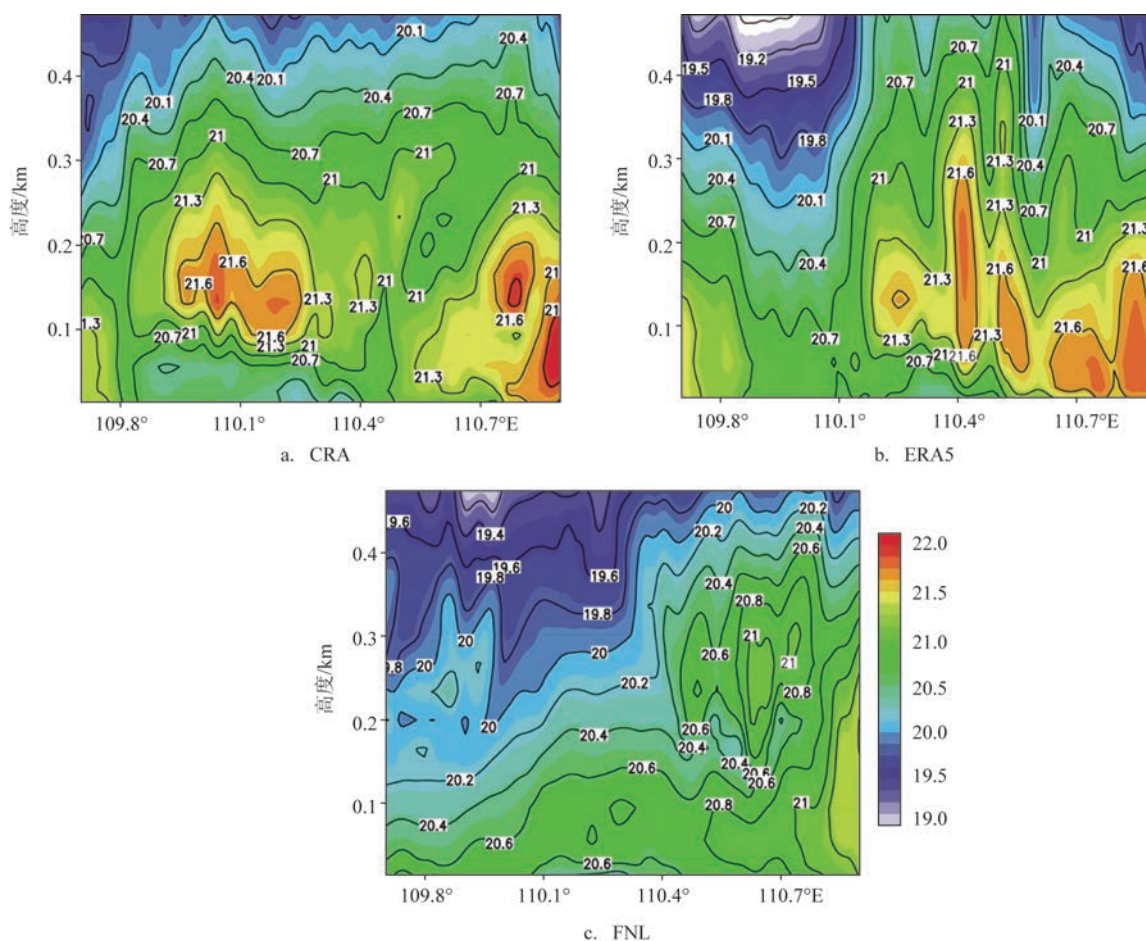


图6 2月19日09时沿20.2°N的温度垂直剖面(单位:°C)

Fig.6 Simulated hourly area-averaged temperature (unit: °C) of the Qiongzhou Strait along 20.2°N at 9:00 on February 19

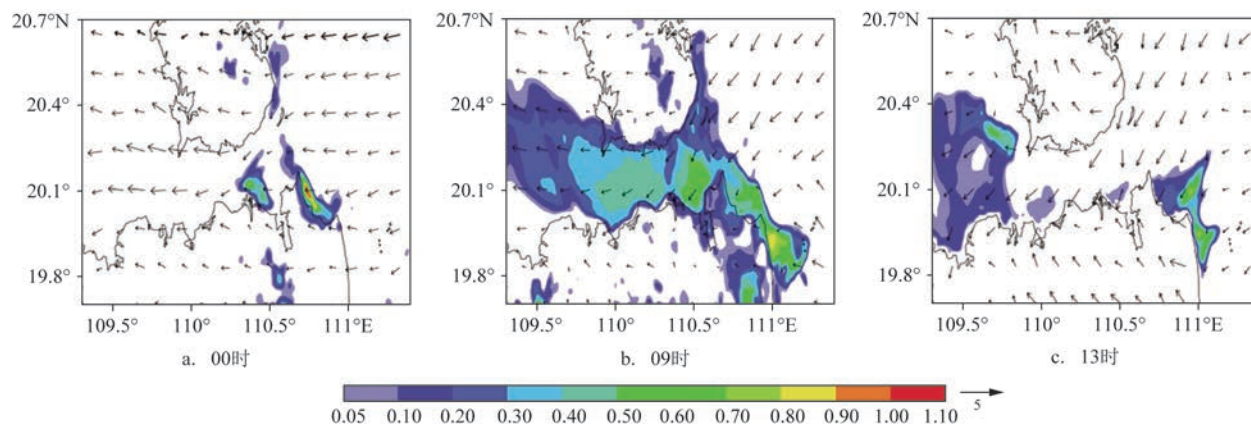


图7 2月19日EXP_SST试验模拟的13 m高度的液态水含量(单位:g/kg)和风场(矢量,单位:m/s)水平分布

Fig.7 The horizontal distributions of liquid water content (unit: g/kg) and wind field (vector, unit: m/s) at the height of 13 m simulated by the EXP_SST on February 19

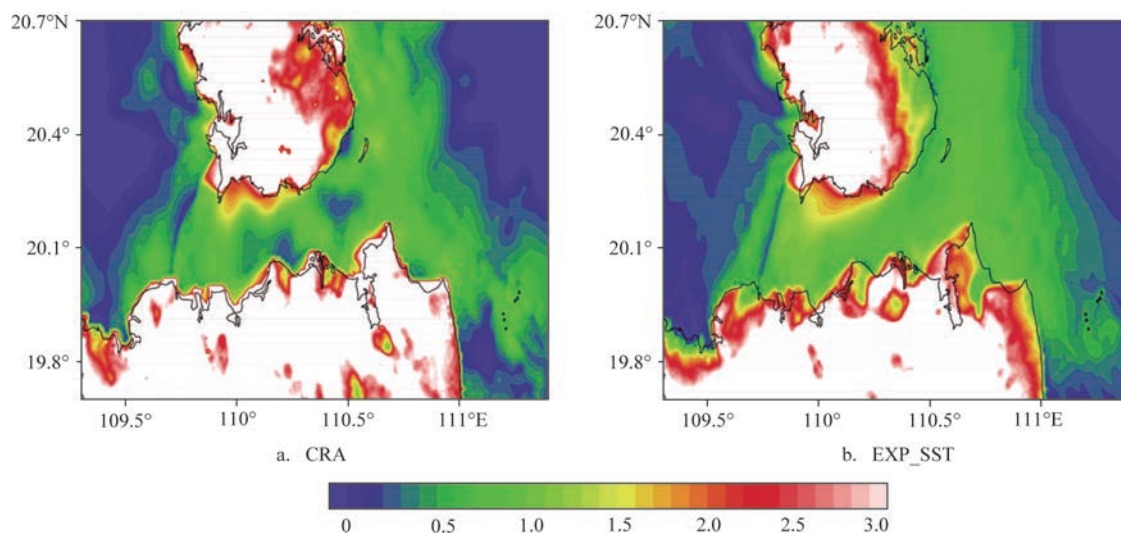


图8 2月18日20时模拟的气海温差(单位:℃)分布

Fig.8 The distributions of air sea temperature difference (unit: $^{\circ}\text{C}$) at 20:00 on February 19

域的气海温差在 $0\sim 2^{\circ}\text{C}$ 之间,其中海峡中部和东部的局地气海温差小于 0.5°C ;而EXP_SST试验中整个海峡的气海温差均高于 0.5°C 。气海温差小有利于海雾的发展和持续,气海温差太大,水汽则不易达到饱和凝结形成海雾。相较于EXP_SST,CRA试验能刻画出琼州海峡东侧以及中部的温差小值区,对应海雾先从海峡东侧开始发展,且液态水含量在海峡中部达到最大,持续时间也更长。

4 小结

本文采用不同来源的数据集(CMA-CRA,

ECMWF-ERA5,NCEP-FNL)以及以不同海温场作为WRF模式驱动的初边界条件,对发生在琼州海峡的一次持续性海雾过程进行数值模拟,同时利用“葵花8号”卫星资料和L波段探空资料等综合观测资料,对比分析了海雾模拟的水平发展范围、垂直结构以及海气特征。结论如下:

①从对海雾范围发展的模拟结果来看,3种初边界条件均能模拟出琼州海峡海雾的发生、发展和消亡过程,但是ERA5和FNL试验模拟的起雾较早,CRA模拟的海雾强度更强,持续时间更长。CRA试验模拟的低层偏东风下琼州海峡水汽更强,使海雾得以发展和维持,而FNL试验的风向转变更早,海

雾消散快。

②从对海雾垂直结构的模拟结果来看,ERA5试验和CRA试验模拟的海雾发展高度与实况接近,FNL试验结果则偏低明显。较低的逆温层以及近地层温度使水汽在低层聚集,有利于海雾的发展和长时间维持。

③加入实时更新的海温场后,模拟出琼州海峡上液态水含量更高,海雾更强,这是由于模拟的气海温差差值较固定海温场更精细,可表现出琼州海峡中部及东部温差小于0.5℃的区域,低于0.5℃的气海温差有利于海雾的发展和持续。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
WANG B H. Sea fog[M]. Beijing: China Ocean Press, 1983.
- [2] GULTEPE I, TARDIF R, MICHAELIDES S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6-7): 1121-1159.
- [3] BERGOT T, GUEDALIA D. Numerical forecasting of radiation fog. Part I: numerical model and sensitivity tests[J]. Monthly Weather Review, 1994, 122(6): 1218-1230.
- [4] PAGOWSKI M, GULTEPE I, KING P. Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario[J]. Journal of Applied Meteorology, 2004, 43(1): 3-16.
- [5] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 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, 2010, 40(10): 1-9.
GAO S H, QI Y L, ZHANG S B, et al. 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, 2010, 40(10): 1-9.
- [6] WANG Y M, GAO S H, FU G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea[J]. Weather and Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [7] 史得道, 吴振玲, 高山红, 等. 海雾预报研究综述[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 49-55.
SHI D D, WU Z L, GAO S H, et al. A summary of research on sea fog forecasting[J]. Advances in Meteorological Science and Technology, 2016, 6(2): 49-55.
- [8] LI P Y, FU G, LU C G, et al. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet [J]. Weather and Forecasting, 2012, 27(6): 1538-1553.
- [9] HARIPRASAD K B R R, SRINIVAS C V, SINGH A B, et al. Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different PBL schemes in WRF using experimental observations at a tropical site[J]. Atmospheric Research, 2014, 145-146: 27-44.
- [10] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄前海雾WRF参数化方案敏感性研究[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
LU X, GAO S H, RAO L J, et al. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea [J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2014, 25(3): 312-320.
- [11] 黄翊, 彭新东. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响[J]. 大气科学, 2017, 41(3): 533-543.
HUANG Y, PENG X D. The impact of an improved planetary boundary layer parameterization scheme on the simulation of fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2017, 41(3): 533-543.
- [12] 王帅, 傅聘, 陈德林, 等. 2009年春季一次黄前海雾的观测分析及数值模拟[J]. 大气科学学报, 2012, 35(3): 282-294.
WANG S, FU D, CHEN D L, et al. An observation and numerical simulation of a sea fog event over the Yellow Sea in the spring of 2009[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2012, 35(3): 282-294.
- [13] ZHANG F, SNYDER C, ROTUNNO R. Mesoscale predictability of the "surprise" snowstorm of 24-25 January 2000[J]. Monthly Weather Review, 2002, 130(6): 1617-1632.
- [14] ZHANG F Q, ODINS A M, NIELSEN-GAMMON J W. Mesoscale predictability of an extreme warm-season precipitation event [J]. Weather and Forecasting, 2006, 21(2): 149-166.
- [15] 戴泽军, 宇如聪, 李建, 等. 三套再分析资料的中国夏季降水日变化特征[J]. 气象, 2011, 37(1): 21-30.
DAI Z J, YU R C, LI J, et al. The characteristics of summer precipitation diurnal variations in three reanalysis datasets over China[J]. Meteorological Monthly, 2011, 37(1): 21-30.
- [16] GHARAYLOU M, FARAHANI M M, MAHMOUDIAN A, et al. Prediction of lightning activity using WRF-ELEC model: impact of initial and boundary conditions[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2020, 210: 105438.
- [17] KHADKE L, PATTNAIK S. Impact of initial conditions and cloud parameterization on the heavy rainfall event of Kerala (2018)[J]. Modeling Earth Systems and Environment, 2021, 7(4): 2809-2822.
- [18] 杨薇, 张春花, 冯箫, 等. 琼州海峡两次高压后部型海雾的对比分析和数值模拟[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 762-774.
YANG W, ZHANG C H, FENG X, et al. Comparison and numeric simulation of two sea fog processes behind High Pattern over Qiongzhou strait[J]. Plateau Meteorology, 2022, 41(3): 762-774.
- [19] WILSON T H, FOVELL R G. Modeling the evolution and life cycle of radiative cold pools and fog[J]. Weather and Forecasting, 2018, 33(1): 203-220.
- [20] 卢绪兰, 彭新东. 尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2021, 79(1): 119-131.
LU X L, PENG X D. Scale-aware parameterization of

- atmospheric planetary boundary layer and its application to sea fog simulation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2021, 79(1): 119-131.
- [21] GAO S H, LIN H, SHEN B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 65-81.
- [22] 黄辉军, 詹国伟, 刘春霞, 等. 一次华南沿海海雾个例的数值模拟研究[J]. *热带气象学报*, 2015, 31(5): 643-654.
- HUANG H J, ZHAN G W, LIU C X, et al. A case study of numerical simulation of sea fog on the southern china coast[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 31(5): 643-654.
- [23] 史得道, 吴振玲, 罗凯, 等. 2015-04-28渤海海雾形成过程中的海气相互作用分析[J]. *热带气象学报*, 2018, 34(3): 324-331.
- SHI D D, WU Z L, LUO K, et al. Analysis of air-sea interaction on the formation of April 28, 2015 sea fog over Bohai sea[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2018, 34(3): 324-331.
- [24] 张苏平, 任兆鹏. 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*, 2010, 68(4): 439-449.
- ZHANG S P, REN Z P. The influence of the thermal effect of underlying surface on the spring sea fog over the Yellow Sea: observations and numerical simulations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2010, 68(4): 439-449.
- [25] 史得道, 黄彬, 吴振玲. 2016年春季一次黄渤海明显海雾过程的大气海洋特征分析[J]. *海洋预报*, 2018, 35(5): 85-92.
- SHI D D, HUANG B, WU Z L. Analysis of atmosphere and sea characteristics under an obvious sea fog process over the Bohai and Yellow Sea in spring 2016[J]. *Marine Forecasts*, 2018, 35(5): 85-92.
- [26] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响[J]. *中国海洋大学学报*, 2012, 42(6): 16-23.
- MENG X G, ZHANG S P. The effect of cold SST on summer atmosphere boundary layer and sea fog over the Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2012, 42(6): 16-23.
- [27] HUANG H J, ZHAN G W, LIU C X, et al. A case study of numerical simulation of sea fog on the southern china coast[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 22(4): 497-507.
- [28] ZHAO D, ZHANG L X, ZHOU T J, et al. Contributions of local and remote atmospheric moisture fluxes to East China precipitation estimated from CRA-40 reanalysis[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 32-45.
- [29] NAKANISHI M, NIINO H. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 2009, 87(5): 895-912.
- [30] LIN Y L, FARLEY R D, ORVILLE H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [31] KAIN J S. The Kain-Fritsch convective parameterization: an update[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(1): 170-181.
- [32] EK M B, MITCHELL K E, LIN Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2003, 108(D22): 8851.
- [33] IACONO M J, DELAMERE J S, MLAWER E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, 113(D13): D13103.
- [34] DUDHIA J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1989, 46(20): 3077-3107.
- [35] 科顿, 安泽斯. 风暴和云动力学[M]. 叶家东, 译. 北京: 气象出版社, 1993: 331-342.
- COTTON W R, ANTHES R A. Storm and cloud dynamic[M]. YE J D, trans. Beijing: China Meteorological Press, 1993: 331-342.
- [36] 岳岩裕, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析[J]. *大气科学*, 2013, 37(3): 609-622.
- YUE Y Y, NIU S J, ZHAO L J, et al. Study on the synoptic system and macro-micro characteristics of sea fog along the Zhanjiang coastal area[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2013, 37(3): 609-622.
- [37] 冯箫, 李勋, 杨薇, 等. 2018年2月琼州海峡一次持续性海雾过程特征分析[J]. *干旱气象*, 2021, 39(5): 785-795.
- FENG X, LI X, YANG W, et al. Characteristics of a persistent sea fog process over the Qiongzhou strait in February 2018[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(5): 785-795.

Impact analysis of the CRA product on simulated sea fog over the Qiongzhou Strait

YANG Wei^{1,2}, FENG Xiao^{1,2*}, FENG Wen^{1,2}, LI Xun^{1,2}, ZHANG Tao³

(1. Hainan Meteorological Observatory, Haikou 570203, China; 2. Key Laboratory of South China Sea Meteorological Disaster Prevention and Mitigation of Hainan Province, Haikou 570203, China; 3. National Meteorological Information Center, Beijing 100081, China)

Abstract: To investigate the application of China Meteorological Administration Global Reanalysis (CRA) product on sea fog simulation, the 5th Generation of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts Reanalysis (ERA5) and the Final Reanalysis Data (FNL) of the National Centers for Environmental Prediction are used in this study. The Weather Research and Forecasting Model (WRF) is driven by these products as the initial boundary conditions, and a persistent sea fog process in the Qiongzhou Strait is simulated. The results show that all the three reanalysis products can simulate the process of sea fog over the Qiongzhou Strait. In the CRA and ERA5 simulation, sea fog develops under the easterly wind and dissipates when the wind direction turns to northeast. The CRA simulates a strongest and longest sea fog for this process. In the FNL simulation, the wind direction changes to northeast earlier and result in earlier dissipation of the sea fog. In the vertical direction, the height of sea fog simulated by the ERA5 and CRA is close to observation data, while that simulated by the FNL is quite low. In the CRA simulation, the water vapor is aggregated in the low layer due to the low temperature of the inversion layer and the near ground layer, making the sea fog develops continuously and maintains in a long time. After adding the real-time updated high-resolution sea surface temperature data, a more refined air-sea temperature difference field is obtained, which can reflect the difference area less than 0.5 °C over the Qiongzhou Strait, and simulate a stronger sea fog.

Key words: China Meteorological Administration Global Reanalysis; sea fog; Qiongzhou Strait; numerical simulation