

李毅能¹ 彭世球^{1,2} 周峰华¹ 朱宇航^{1,3} 王东晓¹ 亢振军²

东印度洋天气和风暴潮预报系统的初步评估

摘要

东印度洋天气和风暴潮实时预报系统(EPMEF-EIO)由区域大气模式和区域风暴潮模型组成,每天实时运行4次。大气初边场来自美国国家环境预报中心(NCEP)的全球预测系统(GFS),通过区域嵌套得到印度洋-东印度洋-斯里兰卡区域的3 d 预报结果。大气模式的10 m 预报风场驱动风暴潮模式,得到东印度洋-斯里兰卡区域的潮汐和风暴潮3 d 预报结果。通过与中国科学院南海海洋研究所斯里兰卡气象塔观测数据、最优台风路径数据和科伦坡水位站数据对比,发现模式预报气温和相对湿度的日变化较观测值偏小,气温总体RMSE为1.26℃,相关系数为0.8,相对湿度的总体RMSE为7.0%,相关系数为0.7;模式预报风速以整体偏大为主,总体RMSE为2.3 m/s,相关系数为0.65;模式预报风向能把握主要的变化趋势,RMSE在20°~32°之间,相关系数约0.65;模式24、48和72 h 路径预报平均误差分别为110.5、166.4和181.0 km。此外,模式水位预报的RMSE为0.035 m,占最大振幅约5%,与观测的相关系数达到0.996。这说明了模式可以用于预报潮汐和风暴潮过程。

关键词

东印度洋; 预报系统; 大气模式; 风暴潮模式; 均方根误差

中图分类号 P731

文献标志码 A

收稿日期 2018-04-11

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 A(XDA11010304, XDA19060503, XDA13030103); 国家重大科学研究计划(2014CB953904); 国家自然科学基金(41776028, 41376021, 41676016, 41521005); 广东省科技计划(20150217); 广州市科技计划(201607020043); 国家留学基金项目(201704910146)

作者简介

李毅能, lyneng@scsio.ac.cn

彭世球(通信作者), speng@scsio.ac.cn

亢振军(通信作者), kzj823@163.com

1 中国科学院南海海洋研究所 热带海洋环境国家重点实验室, 广州, 510301

2 钦州学院 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室, 钦州, 535011

3 中国科学院大学, 北京, 100049

0 引言

印度洋是海洋灾害多发区,但沿岸国家的防灾能力相对较弱,部分港口区频繁受到自然灾害的影响。如1991年4月29日,孟加拉湾国吉大港以北登陆的台风引发的风暴潮席卷了孟加拉国沿海20多个岛屿,致使孟加拉国1/4的地区沦为汪洋,近1 000万人受灾,13.9万人失去生命,造成直接经济损失达30亿美元。2008年5月2日,“纳尔吉斯”(NARGIS)在缅甸的伊洛瓦底江口登陆,袭击了伊洛瓦底省、勃固省和仰光省等人口稠密带,造成人员死亡和失踪超过14万人。

相对于太平洋和大西洋,针对印度洋的调查和研究相对较少,缺少相关海域的调查数据、基础资料和研究结果。相对于欧美国家,我国对印度洋研究更少,从21世纪初才开始有印度洋的科学调查。海洋环境信息的获取和有效利用不仅关乎海上活动的安全、海洋和海岸工程的设计和防护,也与国防建设密切相关。快速发展的海洋活动需要提供高时空分辨率和足够精度的海洋环境信息预报产品以保障包括海上科考作业在内的海上作业安全。目前我国海洋业务预报单位已经基本掌握了我国近海海况的预报技术,但对印度洋海域以及相关海湾港口海域的海洋环境信息系统建设及预报能力还非常有限。“21世纪海上丝绸之路”建设,需要加强该海区海洋信息环境系统的建设,以提升对该海域海洋环境的认识水平,方可为海上丝绸之路建设提供科学依据和辅助决策,并帮助海上丝绸之路的相关国家,提高海洋防灾减灾的能力。

目前国内外主要的大气和海洋环境预报机构都采用大气数值模式来制作海面风场数值预报产品。海面风场数值预报提供的海面风、大气温度、湿度、海气界面通量等要素是海浪、海流等数值预报必不可少的边界强迫条件。国际上主要采取全球-区域模式嵌套的方式进行高分辨率海面风场数值预报。美国国家环境预报中心的大气数值预报系统包括多个业务预报系统或模式,如全球预报系统(GFS)、高分辨窗口模式(HRW)、全球集合预报系统(GEFS)、实时中尺度分析系统(RTMA)和飓风天气研究预报模式(HWRF)以及区域集合预报系统(SREF)等。欧洲中期天气预报中心的数值天气预报模式是世界上最先进的全球业务化模式之一,提供的全球预报包括:T799模式10 d 确定性预报、集合预报系统(EPS) 15 d 的预报、每周一次的32 d 的月预报、每天4次的3 d 确定性预报(分辨率为25 km)。英国气象中心

的全球预报系统的水平分辨率为 $0.5625^\circ \times 0.3750^\circ$ (在中纬度约为 40 km), 格点数为 640×481 , 垂直层数为 50 层, 预报时效为 144 h (6 d). 目前国际上常用的中小尺度大气模式有美国的 MM5、ARPS、RAMS、WRF 等模式, 德国的 DM 模式, 英国的 MESOSCL 模式等. 在印度洋区域印度国家气象局利用 WRF (The Weather Research and Forecasting) 模式建立了区域天气预报系统, 提供印度附近区域 27 km 和 9 km 的 3 d 预报产品.

国外对风暴潮的研究及预测始于 20 世纪 50 年代. 美国海洋大气管理局 (NOAA) 于 70 年代末开发了风暴潮业务预报模式: SLOSH (Sea, Lake, & Over-land Surges from Hurricanes) 模式. 进入 21 世纪后, 随着计算机技术的发展与社会经济发展的需求, 风暴潮数值预报模式朝三维的、高分辨率的、多个分量模式 (海-气-浪-潮) 耦合的、包含更多复杂物理过程的趋势发展. Peng 等^[1-2] 利用三维风暴潮模式及其伴随模式研究了四维变分资料同化方法在风暴潮预报中的应用, 发现通过将水位及海表流场同化进模式中去优化模式初始场及风应力场, 可显著提高对风暴潮的模拟精度. 最近, Bunya 等^[3] 和 Dietrich 等^[4] 将无结构网格的三维近岸环流模式与河流、风、浪、潮汐模型进行耦合, 发展成新一代的高分辨率 (达 50 m) 风暴潮预报系统.

在风暴潮的业务预报系统方面, 我国于 20 世纪 90 年代引进了美国的 SLOSH 模式, 并在此基础上加以改造以适合我国沿海地区. 中国国家海洋环境预报中心 2003 年开始业务化运行至今的台风风暴潮数值预报模式 (CTS 模式) 采用深度平均流方程组作为控制方程, 模式空间分辨率为 $2'$, 预报相对误差小于 30%, 预报保证率为 70.4%. 近年来我国在风暴潮漫滩及近岸浪流耦合数值模式研究及开发方面取得了可喜的进展, 建立了高分辨率的覆盖中国沿海的业务化风暴潮数值预报系统^[5-6]. 近 20 年来, 随着波浪研究及波-流-潮之间非线性相互作用成为国际研究热点, 我国科研人员也在此领域展开了研究^[7-8]. 对于海盆尺度的风暴潮数值研究, 国内科研人员也进行了不少工作, 如李杰等^[9] 对珠江口 3 个强台风风暴潮进行了数值研究和后报检验; Peng 等^[10] 建立了从南海到珠江口的风暴潮和海浪多重嵌套数值预报系统; Prabhu 等^[11] 利用包括珠江口水位资料在内的多个南海水位观测和四维变分同化系统, 获取了南海北部风暴潮预报模式中“最优”的初始场和风

应力拖曳系数, 进而改善了对南海北部风暴潮预报的精度.

2010 年 3 到 5 月, 中国科学院南海海洋研究所完成了历时 60 多天的首次东印度洋科考航行. 此后, 针对科考航行和作业安全的需求, 结合中国科学院中斯联合科教中心和中国科学院南海海洋研究所斯里兰卡站的建设, 研究团队在原“南海海洋环境预报试验平台”^[10] 的基础上构建了东印度洋天气和风暴潮预报系统, 从 2011 年开始试运行, 在稳定运行了近 6 年后, 我们对该系统进行了初步的评估. 本文将着重介绍系统的基本情况和初步评估结果.

1 EPMEF-IO 的建立

我们建立了针对东印度洋区域的天气和风暴潮实时预报系统 (Experimental Platform of Marine Environment Forecasting for Eastern Indian Ocean, EPMEF-EIO). 其中大气模式采用国际先进的 WRF 模式^[12-13], 以美国国家海洋与大气管理局 NOAA (The National Oceanic and Atmospheric Administration) 每 6 h 发布的 GFS (The Global Forecast System) 全球 $1^\circ \times 1^\circ$ 预报产品作为初始场和边界场, 采用三重嵌套网格技术实现“动力降尺度”^[14-15]. 其中大区域网格尺度为 72 km, 提供 15 d 的预报结果, 中区域和小区域网格尺度分别为 24 km 和 8 km (图 1a), 提供 78 h 的预报结果; 大气模式采用的数值方案为 the Ferrier 微物理方案^[16]、the Kain-Fritsch 积云方案^[17-18]、the YSU PBL 方案^[19]、the Dudhia 短波^[20] 和 RRTM 长波^[21] 辐射方案. 利用大气中区域提供的 10 m 风场和海面气压场驱动海洋模式 POM (Princeton Ocean Model)^[22-23], 并用俄勒冈州立大学的潮汐模型 (the Oregon State University Tidal Prediction Software, OTPS) 提供边界处的潮汐调和常数^[24], 得到东印度洋区域 ($70^\circ \sim 100^\circ \text{E}$, $5^\circ \text{S} \sim 23^\circ \text{N}$, 网格尺度为 $1/12^\circ$) 和斯里兰卡附近区域 ($77^\circ \sim 83^\circ \text{E}$, $3^\circ \sim 11^\circ \text{N}$, 网格尺度为 $1/36^\circ$) 72 h 的潮汐风暴潮预报结果 (图 1b). 同时, 本平台的创新之处为: 在大气模式中加入“选尺度变分同化” (Scale-Selective Data Assimilation, SS-DA) 方法, 有效提高了大尺度背景风场的预报精度, 进而提高了台风路径的预报精度^[25]; 在海洋模式中加入基于 POM 的四维变分同化系统 POM-4DVAR, 通过将水位高度及海表流速同化进海洋模式中, 对模式初始场、边界场和物理参数进行优化, 有效提高了模式对风暴潮增水的预报精度^[11]. 该试验平台每

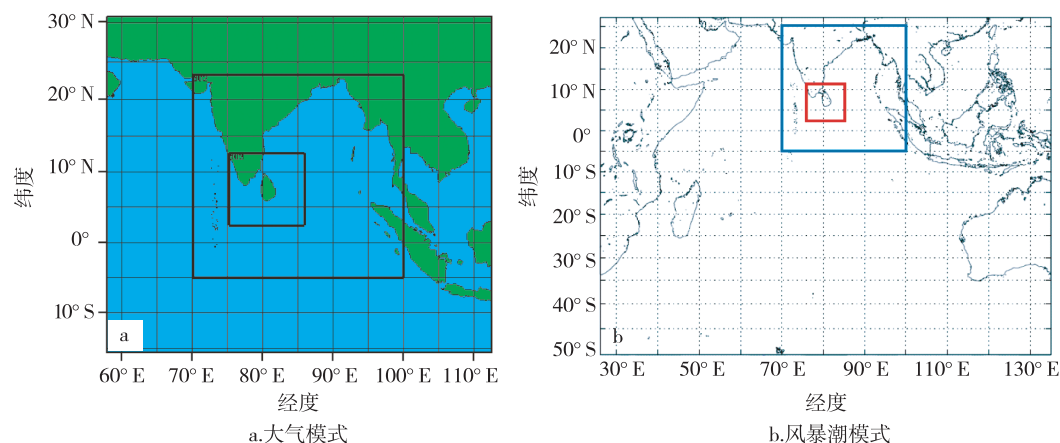


图1 模式区域划分

Fig. 1 Domains of (a) atmospheric model and (b) storm surge model

天进行4次实时预报,实现了资料下载和处理、模式运行及预报结果实时显示的全自动化(图2).该试验平台的建成,实现了对东印度洋及斯里兰卡附近区域大气与海洋状况实时短期(3 d)和中期(15 d)的预报和预测.主要的模式结果将以网页的形式在网上发布(图3),并提供了斯里兰卡3个主要站点(Colombo、Mirissa 和 University of Ruhuna)的预报结果,供相关人员查询(图4).

点观测数据,包括中国科学院南海海洋研究所斯里兰卡观测站位于 Ruhuna 大学的气象塔数据和斯里兰卡国家水环境与研究局(National Aquatic and Research Authority, NARA)科伦坡水位站数据(具体地点见图5);另一类是美国联合台风警报中心(Joint Typhoon Warning Center, JTWC)的最优台风路径数据.其中,气象塔数据是2017年4月10日到2018年1月31日每半小时一次的气象观测数据,主要对比相对湿度、气温、风速和风向;水位站数据是2016年5月1日到31日每分钟一次的水位观测数据.

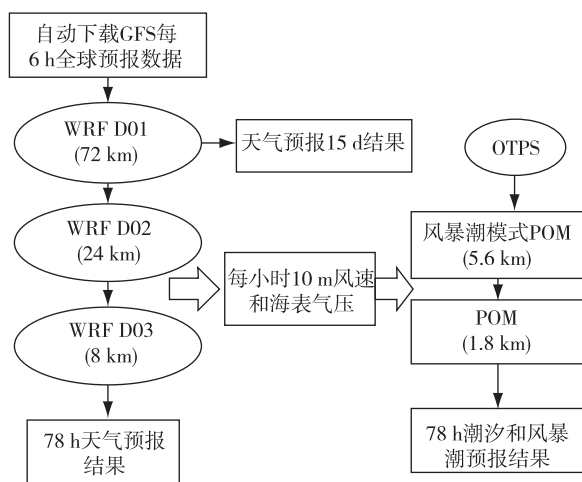


图2 EPMEF_EIO 的计算流程,其中 OTPS

为俄勒冈州立大学的潮汐预报软件

Fig. 2 Flowchart for EPMEF_EIO including the Oregon State University (OSU) Tidal Prediction Software (OTPS)

2 预报系统的检验

2.1 观测数据

用于检验预报系统的数据分为两类:一类是站

2.2 大气预报检验评估

将大气第三重区域输出结果与中国科学院南海海洋研究所斯里兰卡站的气象塔观测数据进行对比,检验评估 EPMEF_IO 天气预报的精度.图6给出了气温、相对湿度、风速和风向分别在0~24、25~48和49~72 h 预报与观测的对比.从气温看,模式结果在低气温段偏高,高气温段则偏低,说明模式气温的日变化较观测值偏小;24、48和72 h 的 RMSE 分别为1.26、1.26和1.28℃;与观测值的相关系数变化不大,分别为0.8、0.8和0.79;总体 RMSE 为1.26℃,相关系数约为0.8.相对湿度的误差情况和气温类似,模式相对湿度的日变化较观测值偏小;总体 RMSE 为7.0%,相关系数约为0.7,其中24、48和72 h 的 RMSE 分别为6.97%、6.98%和7.18%,相关系数分别为0.65、0.67和0.64.模式预报风速偏大居多,总体 RMSE 在2.3 m/s,相关系数在0.65左右,其中24、48和72 h 的 RMSE 分别为2.26、2.27和2.32 m/s,相关系数分别为0.68、0.64和0.61.模式预报风向总体能把握主要的变化趋势,24、48和72 h

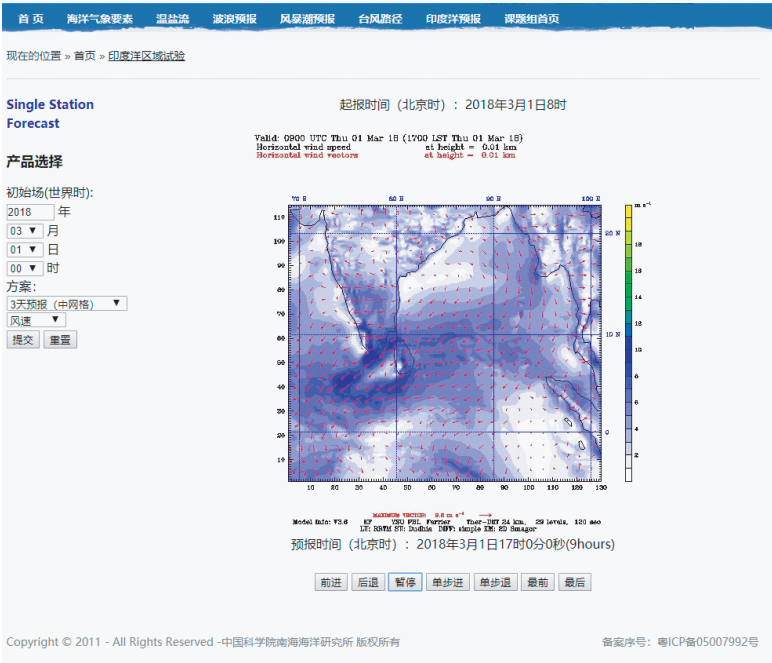


图3 EPMEF_EIO 主页面
Fig. 3 The main website of EPMEF_EIO

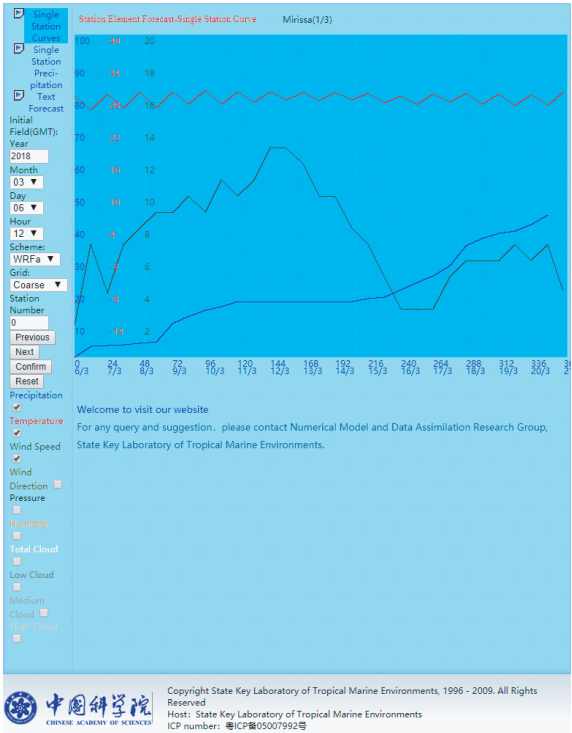


图4 斯里兰卡主要站点预报结果查询页面
Fig. 4 Page for forecast results of the stations in Sri Lanka

的 RMSE 分别为 20.0°、23.2° 和 31.8°, 相关系数分别为 0.69、0.67 和 0.6.

东印度洋地区每年也会有一定数量的台风甚至

强台风发生,对当地沿岸国家的人民生命财产安全构成危险.我们也评估了 2016—2017 年期间几个主要台风过程期间模式对台风路径的预报精度情况.主要的台风过程包括 2016 年的 ROANU、TWO、KY-ANT、NADA 和 VARDHA, 以及 2017 年的 MAARUTHA 和 MORA.模式的台风中心提取采用 the Read/Interpolate/Plot (RIP4) 程序,该程序考虑了上层大气和海表面的动力条件,包括最小中心气压、最大 10 m 风速、650~850 hPa 之间的最大涡度和海表到 700 hPa 之间的气温等.表 1 给出了模式台风路径误差情况.2016—2017 年在东印度洋 7 个主要台风过程模式路径预报平均误差在 24、48 和 72 h 分别为 110.5、166.4 和 181.0 km.48 和 72 h 误差明显优于印度气象局 (India Meteorological Department, IMD) 2016 年时的预报技巧 (路径误差为 96.1、185.1 和 291.7 km,数据来源 <http://www.rsmcnewdelhi.imd.gov.in>).在 7 个台风过程中,24 h 预报误差最小为 MORA (79.0 km),最大为 MAARUTHA (177.5 km); 48 h 预报误差最小为 MORA (111.0 km),最大为 KYANT (223.0 km); 72 h 预报误差最小为 ROANU (136.5 km),最大为 KYANT (248.3 km).图 7 给出了几个预报个例的路径误差情况.从图 7 中可以看出模式能很好地模拟台风移动变化情况,总体的误差较小.特别是 72 h 预报也基本能保持较好的预报

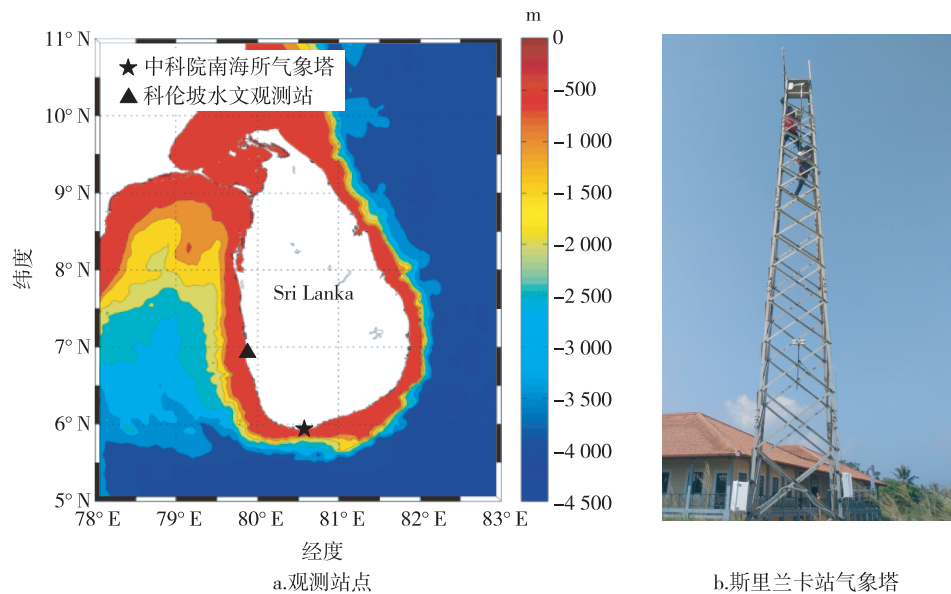


图5 观测站点和斯里兰卡站气象塔现场图
Fig.5 (a) Observing stations and (b) site map of Sri Lanka station weather tower

技巧,路径预报误差与 24 和 48 h 相比没有明显增大,基本保持同一水平.

表 1 EPMEF_EIO 台风路径误差情况
Table 1 TC track error of EPMEF_EIO forecast

台风名称	误差/km		
	24 h	48 h	72 h
ROANU	98.8	121.7	136.5
TWO	119.5	147.6	172.3
KYANT	100.2	223.0	248.3
NADA	97.1	183.2	212.6
VARDHA	101.5	198.8	190.2
MAARUTHA	177.5	180.0	164.3
MORA	79.0	111.0	142.5
平均误差	110.5	166.4	181.0

2.3 水位预报检验评估

由于台风期间的观测数据缺乏,我们采用 2016 年 5 月科伦坡水位站观测数据用于模式预报水位的检验.图 8 给出一个月的水位对比结果.从结果看,水位的总体 RMSE 为 0.035 m,占最大振幅约 5%,与观测的相关系数达到 0.996.这说明了模式能较好地预报水位的变化过程,特别是近岸的潮汐过程.风暴潮的过程主要是由风场误差决定的,而考虑潮汐的作用后,潮汐的模拟误差也对预报误差产生影响.从水位的预报误差看,模式有能力同时预报潮汐和风暴潮过程.

3 讨论和结论

本文在原“南海海洋环境数值预报试验平台”(EPMEF)的基础上构建了东印度洋区域的天气与风暴潮实时预报系统(EPMEF_EIO),并对该平台进行了初步的评估.该平台由区域大气预报模式 WRF 和基于 POM 模式的区域风暴潮模式组成.利用美国 NCEP 的全球预报系统 GFS 资料作为大气模式初边场,并通过三重嵌套实现“动力降尺度”,获取斯里兰卡附近最高 8 km 的 78 h 天气预报结果,而天气预报的 10 m 风场和海表面气压场又为风暴潮模式提供了主要的驱动场.过去 2 年每天进行 4 次预报并实现了稳定的运行,证明了该系统的稳定性.通过和中国科学院南海海洋研究所斯里兰卡站气象塔观测数据的对比,发现模式预报气温和相对湿度的日变化较观测值偏小;气温总体 RMSE 在 1.26℃,相关系数在 0.8 左右;相对湿度的总体 RMSE 在 7.0%,相关系数在 0.7 左右.模式预报风速的整体偏大居多,总体 RMSE 在 2.3 m/s,相关系数在 0.65 左右;模式预报风向总体能把握主要的变化趋势,总体 RMSE 在 20°~32°之间,相关系数约 0.65 左右.而对于台风路径的预报,模式路径预报平均误差在 24、48 和 72 h 分别为 110.5、166.4 和 181.0 km.48 和 72 h 误差明显优于印度气象局(IMD)2016 年时的预报技巧(185.1 和 291.7 km).此外,通过水位站的对比检验,模式水位预报的总体 RMSE 为 0.035 m,占最大

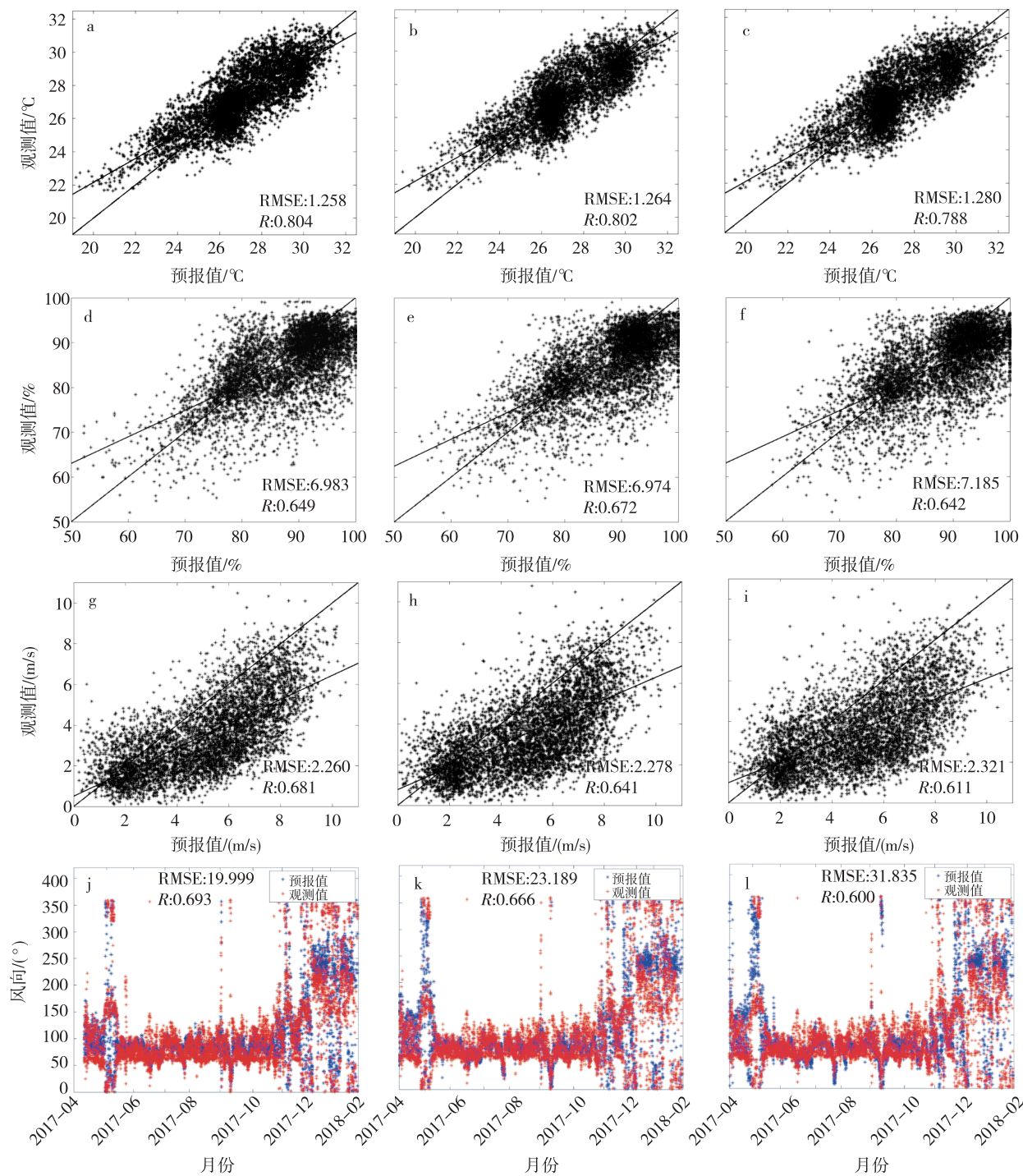


图 6 EPMEF_EIO 气象预报与气象塔观测值的对比情况:左列为 0~24 h 预报对比,中间列为 25~48 h 预报对比,右列为 49~72 h 预报对比;其中图 a—c 为气温(单位:℃);图 d—f 为相对湿度(单位:%);图 g—i 为风速(单位:m/s);图 j—l 为风向(单位:(°))

Fig. 6 Comparison of EPMEF_EIO weather forecast and meteorological tower observations:left panels for 0~24 hour forecast;center panels for 25~48 hour forecast;right panels for 49~72 hour forecast;a-c for temperature (unit:℃);d-f for relative humidity (unit:%);g-i for wind speed(unit:m/s);and j-l for wind direction (unit:(°))

振幅约 5%,与观测的相关系数达到 0.996.这说明了模式有能力同时预报潮汐和风暴潮过程.

EPMEF_EIO 主要用于检验新预报技术和方法,不仅可以为东印度洋附近国家特别是斯里兰卡相关

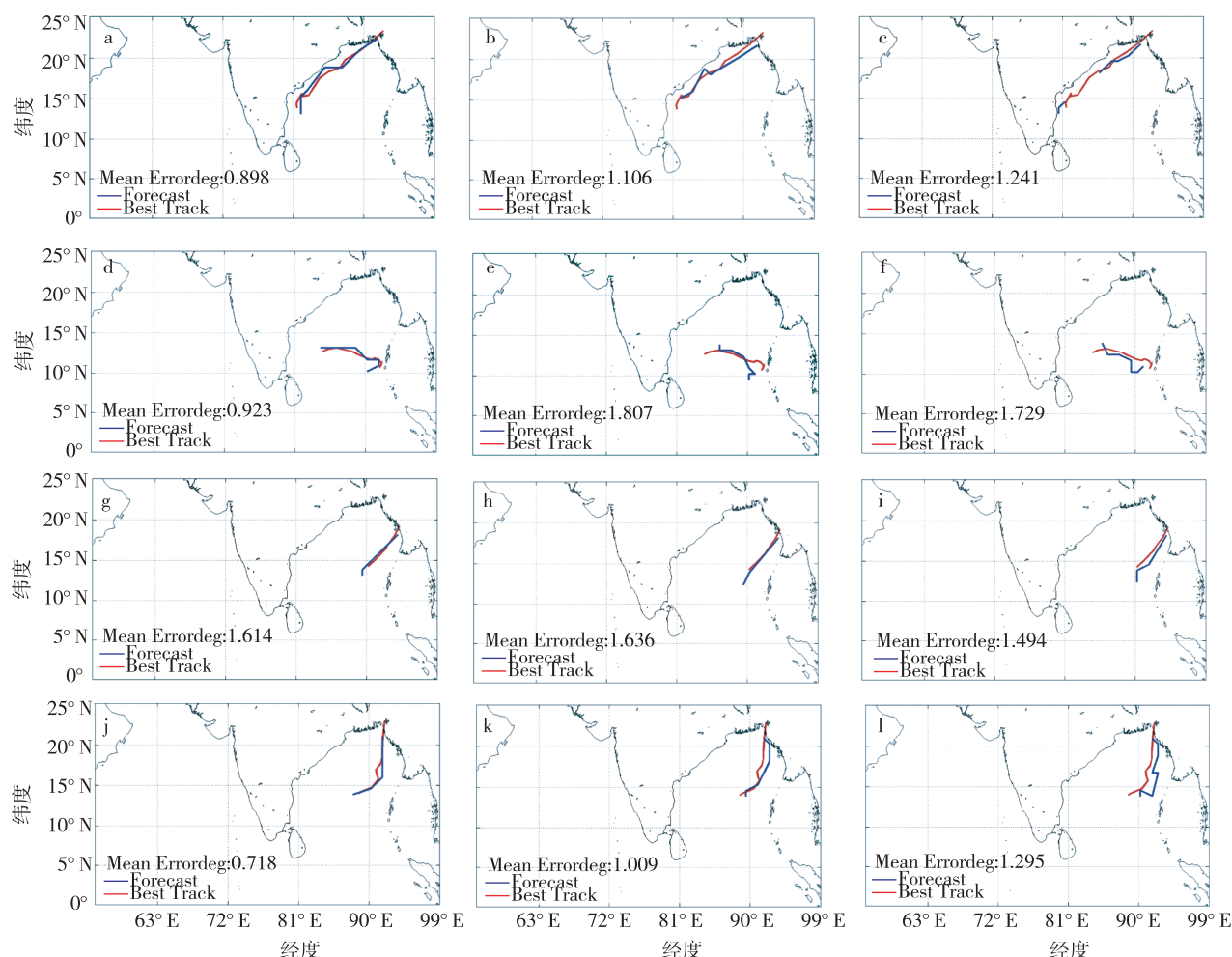


图7 主要台风过程 EPMEF_EIO 预报路径情况示意;左列为 0~24 h 预报对比,中间列为 25~48 h 预报对比,右列为 49~72 h 预报对比;其中蓝色线代表模式预报路径,红色线代表 JTWC 的 Best Track,

图 a—c 为 ROANU,图 d—f 为 VARDHA,图 g—i 为 MAARUTHA,图 j—l 为 MORA

Fig. 7 TC tracks of EPMEF_EIO forecast and JTWC;left panels for 0-24 hour forecast;center panels for 25-48 hour forecast;right panels for 49-72 hour forecast;blue lines refer to the model tracks and red lines refer to the best tracks from JTWC,a-c for ROANU,d-f for VARDHA,g-i for MAARUTHA,j-l for MORA

海洋和气象预报机构的预报员在其日常业务预测中提供有价值的参考资料,而且可以为该区域热带气旋预报能力的提高提供一些实际线索或提示.此外,它还通过提供大气和海洋环境预报(尤其是 TC 路径预报)以及相对较高的准确性来为该海洋地区进行的一些重要的社会活动和科学海洋调查提供保障.

然而,EPMEF_EIO 正在不断发展和完善之中.未来,海气耦合系统将取代目前的单向耦合版本,而大气和海洋区域模式将采用更高的网格分辨率.此外,大气和温盐流资料同化系统将被纳入 EPMEF_EIO,特别是将高效简化版的选尺度变分同化技术(SSDA)方案引入到系统中,必将进一步提高系统的

运行效率,同时,海浪预报也将加入到 EPMEF_EIO 中.另一方面,与目前少数有限的观测结果相比,系统对水位的预报似乎比较理想,但总体评估尚未完成.在收集更多数据后,我们将对系统进行更全面的评估对比.

参考文献

References

- [1] Peng S Q, Xie L, Pietrafesa L J. Correcting the errors in the initial conditions and wind stress in storm surge simulation using an adjoint optimal technique[J]. Ocean Modelling, 2007, 18(3): 175-193
- [2] Peng S Q, Xie L. Effect of determining initial conditions by four-dimensional variational data assimilation on storm

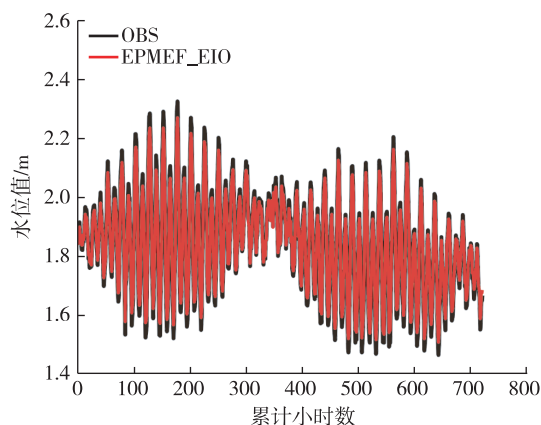


图8 2016年5月水位逐时变化对比情况
(横坐标为5月1日00时开始累计的小时数)

Fig. 8 Hourly time series of water level in May 2016
(x-axis is the cumulative number of hours
from 0000 UTC May 1st, 2016)

- surge forecasting[J]. Ocean Modeling, 2006, 14(1): 1-18
- [3] Bunya S, Dietrich J C, Westerink J J, et al. A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for Southern Louisiana and Mississippi. Part I: model development and validation [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(2): 345-377
- [4] Dietrich J C, Bunya S, Westerink J J, et al. A high-resolution coupled riverine flow, tide, wind, wind wave, and storm surge model for Southern Louisiana and Mississippi. Part II: synoptic description and analysis of hurricanes Katrina and Rita [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(2): 345-377
- [5] 董剑希, 付翔, 吴玮, 等. 中国海高分辨率业务化风暴潮模式的业务化预报检验[J]. 海洋预报, 2008, 25(2): 11-17
DONG Jianxi, FU Xiang, WU Wei, et al. Operational forecast and test of the high resolution numerical storm surge forecast model for China Sea [J]. Marine Forecasts, 2008, 25(2): 11-17
- [6] 李永平, 于润玲, 郑运霞. 一个中国沿岸台风风暴潮数值预报系统的建立与应用[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 884-891
LI Yongping, YU Runling, ZHENG Yunxia. A numerical forecast for typhoon storm surge over China coast [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 67(5): 884-891
- [7] 周旭波, 孙文心. 长江口以外海域风暴潮与天文潮的非线性相互作用[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2000, 30(2): 201-206
ZHOU Xubo, SUN Wenxin. The non-linear interaction between storm surges and astronomical tides in the sea area off River Changjiang's mouth [J]. Journal of Ocean University of Qingdao (Natural Sciences), 2000, 30(2): 201-206
- [8] 姜兆敏, 王如云, 黄金城. 风暴潮与天文潮非线性相互作用的理论分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2004, 32(4): 447-450
JIANG Zhaomin, WANG Ruyun, HUANG Jincheng. Non-linear interaction between storm surges and astronomical tides [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2004, 32(4): 447-450
- [9] 李杰, 于福江, 李洋, 等. 珠江口地区台风风暴潮的数值模拟试验[J]. 海洋预报, 2009, 26(2): 1-6
LI Jie, YU Fujiang, LI Yang, et al. Numerical simulation of typhoon storm surge in Zhujiang River estuary [J]. Marine Forecasts, 2009, 26(2): 1-6
- [10] Peng S Q, Li Y N, Gu X Q, et al. A real-time regional forecasting system established for the South China Sea and its performance in the track forecasts of tropical cyclones during 2011-13 [J]. Weather & Forecasting, 2015, 30(2): 150123122225003
- [11] Prabhu S, Lee M J, Hu W Y, et al. On improving storm surge forecasting using an adjoint optimal technique [J]. Ocean Modelling, 2013, 72(12): 185-197
- [12] Michalakes J, Dudhia J, Gill D, et al. Design of a next-generation regional weather research and forecast model [C] // Proceedings of The 9th Ecmwf Workshop on the Use of Parallel Processors in Meteorology European Centre for Medium Range Weather Forecasts, 1998, 1: 269-276
- [13] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Technical Note, 2008; NCAR/TN 468+STR
- [14] Lo C F, Yang Z L, Pielke R A Sr. Assessment of three dynamical climate downscaling methods using the Weather Research and Forecasting (WRF) model [J]. J Geophys Res, 2008, 113(D9): D09112
- [15] Zhang Y X, Dulière V, Mote P W, et al. Evaluation of WRF and HadRM mesoscale climate simulations over the U.S. Pacific Northwest [J]. Journal of Climate, 2009, 22(20): 5511-5526
- [16] Ferrier B S, Lin V Y, Black F, et al. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta model [C] // 19th Conference on Weather Analysis and Forecasting/15th Conference on Numerical Weather Prediction, 2002
- [17] Kain J S. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1990, 47(23): 2784-2802
- [18] Kain J S, Fritsch J M. Convective parameterization for mesoscale models: the Kain-Fritsch scheme [M] // Emanuel K A, Raymond D J. The representation of cumulus convection in numerical models. American Meteorological Society, 1993: 165-170
- [19] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341
- [20] Dudhia J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1989, 46(20): 3077-3107
- [21] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a

- validated correlated- k model for the longwave[J].J Geophys Res,1997,102(14):16663-16682
- [22] Heaps N S.A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model[M]//Heaps N S.Three-dimensional coastal ocean models.Washington D C: American Geophysical Union,2013:1-16
- [23] Mellor G L.Users guide for a three-dimensional,primitive equation, numerical ocean model [J]. Program Atmos Ocean Sci Princeton Univ,2003,17(1):1
- [24] Egbert G D,Bennett A F,Foreman M G G.TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model [J].J Geophys Res,1994,99(C12):24821-24852
- [25] Peng S Q,Xie L,Liu B, et al. Application of scale-selective data assimilation to regional climate modeling and prediction [J]. Monthly Weather Review, 2010, 138(4):1307-1318

Preliminary assessment of a real-time forecasting system for atmosphere and storm surge in eastern Indian Ocean

LI Yineng¹ PENG Shiqiu^{1,2} ZHOU Fenghua¹ ZHU Yuhang^{1,3} WANG Dongxiao¹ KANG Zhenjun²

1 State Key Laboratory of Tropical Oceanography, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301

2 Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf, Qinzhou University, Qinzhou 535011

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract A real-time regional forecasting system for the Eastern Indian Ocean (EIO), called the Experimental Platform of Marine Environment Forecasting for EIO (EPMEF_EIO), is introduced in this paper. EPMEF_EIO consists of a regional atmosphere model and a regional storm surge model, and performs a real-time run four times a day. Output from the Global Forecast System (GFS) from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP) is used as the initial and boundary conditions of two nested domains of the atmosphere model, which can exert a constraint on the development of small- and meso-scale atmospheric perturbations through dynamical downscaling. Then the system outputs the 3 day forecast of 72 km, 24 km, 8 km for Indian Ocean-EIO-Sri Lanka. The forecasted winds at 10 m height from the atmosphere model are used to drive the storm surge model, obtaining the $1/12^{\circ}$ – $1/36^{\circ}$ results for EIO-Sri Lanka. By comparing observation data from the Sri Lanka Station Meteorological Tower of the South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, TC best track data, and data from the Colombo tide gauge station, it is found that the daily variations of the model forecasted temperature and relative humidity are smaller than the observations; the overall root mean square error (RMSE) of the air temperature is 1.26°C , and the coefficient is 0.8; the overall RMSE of relative humidity is 7.0, and the correlation coefficient is 0.7. The model forecasted wind speed is mostly larger than the observation, with an overall RMSE of 2.3 m/s and a correlation coefficient of 0.65. The forecasted wind direction of the model can grasp the main trend of variation, with an overall RMSE of between 20° – 32° and a correlation coefficient of about 0.65. The average error of model track forecast is 110.5 km, 166.4 km, and 181.0 km at 24 hour, 48 hour, and 72 hour, respectively. In addition, the overall RMSE of the model water level forecast is 0.035 m, accounting for about 5% of the maximum amplitude, and the correlation coefficient with the observation reaches 0.996. This shows that the model has the ability to simultaneously forecast tidal and storm surge processes. EPMEF_EIO, established primarily for research purposes with the potential to be implemented into operations, provides valuable information to the operational forecasters of local marine/meteorological agencies or international TC forecast centers.

Key words Eastern Indian Ocean; forecasting system; atmosphere model; storm surge model; root mean square error (RMSE)