

基于 GODAE Ocean View 标准的全球海洋环流预报系统评估

莫慧尔^{1,2}, 万莉颖^{1,2}, 秦英豪², 祖子清^{1,2}, 张宇^{1,2}

(1. 国家海洋环境预报中心 自然资源部海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081; 2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081)

摘 要: 基于 USGODAE 的现场漂流浮标观测数据, 利用 GODAE Ocean View 框架下的 IVTT Class4 标准, 评估了国家海洋环境预报中心业务化中等分辨率版本全球海洋环流预报系统的海表温度预报技巧。结果表明: 该系统的海表温度预报均方根误差范围在 0.65~0.73 °C 左右, 在国际 7 个业务化系统中, 预报精度处于中等水平。无论相对于延续性预报场或气候态预报场, 其技巧评分皆为正值, 说明该系统对海表温度的预报性能优于自身延续性预报和气候态场预报。

关键词: 全球海洋环流预报系统; GODAE Ocean View; 海表温度; Class4 标准

中图分类号: P731.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)06-0044-08

1 引言

全球海洋数据同化实验(Global Ocean Data Assimilation Experiment, GODAE)始于1997年,它是协调、促进全球与区域海洋分析和预报系统发展的唯一国际组织^[1]。GODAE OceanView(GOV)是GODAE的继承和延伸,自2009年成立至今,一直致力于通过国际合作继续巩固和推动国际间业务化海洋学的发展^[2-4]。GOV通过成立不同的工作组(Task Team)来聚焦不同的科学问题,其中相互比较与验证工作组(Intercomparison and Validation Task Team, IVTT)成立于2010年,旨在协同推进业务化海洋学系统的科学验证和比较工作。它的活动包括制定标准来评估分析和预报场、建立全球与区域的比较计划等,在统一框架下用相互比较和定量评估的方法判断国际间海洋分析和预报系统的强弱。

GODAE对海洋后报和预报产品的评估原则包括一致性(Consistency)、质量(Quality)和性能(Performance),即验证系统结果与对海洋环流和气候特征的现有认知是否一致,定性分析系统“最优值”与海洋真值差异以及每个系统的短期预报能力^[5]。所

用的比较验证方法基于4类“标准(Classes)”。

Class1—3标准多应用于系统气候态和后报评估: Class1标准主要用于评估相干空间结构或主要流系、海洋锋和中尺度涡等海洋过程; Class2标准侧重与锚定浮标时间序列的对比以及时间序列间的统计分析; Class3标准主要评估体积输送、热输送和涡动动能的空间分布和时间变化。而Class4标准侧重于系统预报性能和预报技巧评估,通过与所有可用的海洋观测(现场漂流浮标或卫星数据)的比较,评估系统的近实时准确性^[6-7]。Class4相互比较框架的建立基于IVTT参与者的志愿行动,即: 其中一家业务机构收集观测数据、进行质量订正、提供包含观测及自身业务化海洋预报系统(Operational Ocean Forecast Systems, Oofs)预报场的初始文件(NetCDF格式)、并上传到USGODAE服务器上,其他参与者下载该初始文件、按照该文件格式将自己的Oofs预报场插值成相似的数据文件、再上传至USGODAE服务器。最终,服务器上包含所有参与Class4相互比较的Oofs结果。目前,英国气象局志愿提供海表温度(Sea Surface Temperature, SST)、海平面异常(Sea Level Anomaly, SLA)和T/S剖面(Temperature/Salinity Profiles)的初始文件,加拿大

收稿日期: 2019-12-27; 修回日期: 2020-02-20。

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC1401401); 国家自然科学基金青年科学基金(41606029)。

作者简介: 莫慧尔(1985-),女,助理研究员,博士,主要从事海洋业务预报及大洋数值模拟研究。E-mail: huier.mo@nmefc.cn

环境中心则提供海冰密集度的初始文件。该数据并未对外公开,仅用于成员间共享。

参与比较的业务化海洋学系统主要有英国气象局的 FOAM^[8] (Forecast Ocean Assimilation Model)、法国麦卡托中心的 PSY3 和 PSY4^[9]、加拿大环境中心的 GIOPS-CONCEPTS^[10] (Global Ice Ocean Prediction System-Canadian Operational Network of Coupled Environmental Prediction Systems, 一般简称“GIOPS”)、美国国家环境预报中心/美国国家气象局/美国国家海洋和大气管理局 (National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/National Oceanic Atmospheric Administration, NCEP/NWS/NOAA) 的 RTOFS (Real-Time Ocean Forecast System)^[11]、澳大利亚气象局的 BLUElink OceanMAPS^[12] (The Ocean Model Analysis and Prediction System), 国家海洋环境预报中心自 2017 年起也向 USGODAE 服务器上传 Class4 标准下的产品-全球业务化海洋学预报系统 (Chinese Global Operational Forecasting System, CGOFS)。

基于 GOV-IVTT 的 Class4 标准,目前已有不少国际业务预报系统开展了全球或区域的比较。结果表明没有一个预报系统在所有变量预报中明显优于其他系统,而多系统集成平均的预报效果比单个预报系统要好^[6,13-14]。为了解国家海洋环境预报中心 CGOFS 全球海洋环流预报系统的性能,本文基于 Class4 标准主要评估了该系统在海表温度预报上的表现。

2 系统简介

21 世纪初,世界各国的全球海洋业务预报系统得到了长足发展,预报系统在空间分辨率、同化方法等方面得到了很大改进^[15]。国家海洋环境预报中心在“十二五”期间也构建了我国首个涵盖全球大洋的一体化全球业务化海洋学预报系统 CGOFS^[16-17]。该系统中的全球海洋环流预报系统以 MOM4 (Modular Ocean Model Version 4) 海洋模式^[18]为基础,耦合 SIS (Sea Ice Simulator) 海冰模式^[19],采用三极点网格坐标,分辨率为 $1/4^\circ$,垂直分层为 50 层,225m 以上分辨率为 10m,同化方案为三维变分^[20-23]。CGOFS 实时同化了海表温度资料

(Real Time Global Sea Surface Temperature, RTGSST), 法国卫星海洋存档数据中心 (Archiving, Validation, and Interpolation of Satellite Oceanographic, AVISO) 的海表高度资料以及 Argo 温盐剖面等多源观测资料。系统自 2013 年起业务化运行,采用 0.5° 分辨率的 NCEP 全球预报系统 (Global Forecast System, GFS) 的海表面风场和热力强迫^[24]。这标志着我国海洋预报保障能力从近海扩展到全球大洋,体现了我国海洋数值预报技术的发展和进步。

本文用于比较的预报系统 FOAM 基于 NEMO 海洋模式^[25]和 CICE 海冰模式,水平分辨率为 $1/4^\circ$; PSY3 和 PSY4 基于 NEMO 海洋模式和 LIM2^[26]海冰模式,水平分辨率分别为 $1/4^\circ$ 和 $1/12^\circ$; GIOPS 同样基于 NEMO 海洋模式和 CICE 海冰模式,水平分辨率为 $1/4^\circ$; RTOFS 基于 HYCOM 模式^[27],水平分辨率为 $1/12^\circ$; BLUElink OceanMAPS 基于 MOM4 海洋模式^[18],水平分辨率为 1° ,澳大利亚周边加密至 0.1° 。关于系统参数、同化方案和强迫场等详细说明可参考文献 [6,13-14]。

3 数据及方法

系统评估所用的观测海表温度来自 USGODAE 的现场漂流浮标 (网址: http://www.usgodae.org/cgi-bin/datalist.pl?dset=fnmoc_obs_sfcobs&summary=Go), 全球温度的空间分布如图 1a 所示。大部分浮标点分布于南北纬 60° 之间,浮标点个数每天变动,约为 20,000~30,000 万个 (见图 1b)。与来自先进的沿轨扫描辐射计 (Advanced Along-Track Scanning Radiometer, AATSR) 和先进的微波扫描计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth, AMSR-E) 海表温度的误差对比分析表明,USGODAE 现场漂流浮标的海表温度观测不确定性约为 0.2°C ^[28]。除英国气象局 FOAM 系统外,其他系统均未同化该观测资料,所以可利用这个相对独立的海表温度观测资料来检验评估预报系统的预报技巧。

本文 CGOFS 的评估时间段为 2015 年 1 月 1 日—2017 年 12 月 31 日。系统采用 IVTT Class4 标准作为评估方法,在全球平均标准下评估业务化系统的技巧及性能表现。所用的统计量包括偏差 (Bias)、

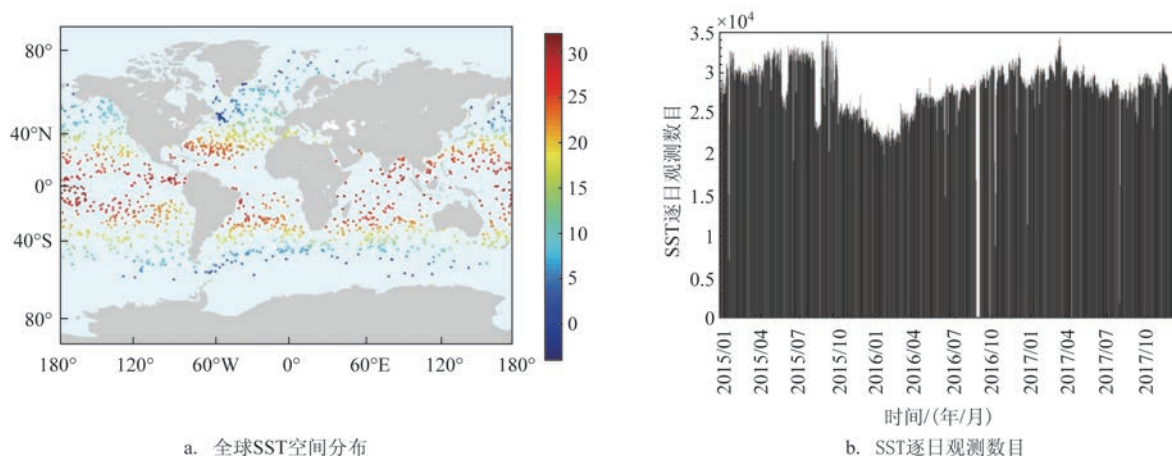


图1 USGODAE现场表层漂流浮标

均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、异常相关(Anomaly Correlation, AC)以及用延续性预报场(Persistence)和气候态场(Climatology)构造的两个技巧评分(Skill Score)。公式如下:

偏差:

$$Bias = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i) \quad (1)$$

均方根误差:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (2)$$

异常相关:

$$AC = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - C_i)(O_i - C_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - C_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - C_i)^2}} \quad (3)$$

式中: F 为预报值; O 为观测值; C 为气候态。

技巧评分:

$$Skill = 1 - \left(\frac{RMSE_{forecast}}{RMSE_{reference}} \right) \quad (4)$$

式中: 延续性预报场是由预报场前移 1 d 并插值到观测点得到; 气候态场由《世界海洋图集 2001》(World Ocean Atlas 2001, WOA01) 月平均场插值得到^[29]。当参考场(Reference)为延续性预报场时, 技巧评分为延续性预报技巧(Persistence Skill Score, PSS); 当参考场为气候态场时, 技巧评分为气候态预报技巧(Climatology Skill Score, CSS)。

4 结果

将多个预报系统与同一观测资料对比, 既可了解预报系统本身预报精度, 也可以进行各个预报系统的横向对比分析。表 1 是各预报系统 SST 预报的 RMSE 随预报天数的变化。结果表明, 英国气象局预报系统 FOAM 预报前 4 d 的 RMSE 值最小, 但其

表1 各预报系统 SST 预报 1—7 d 的 RMSE(单位: °C) 及误差增长百分比

系统	预报天数							误差增长 百分比/%
	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d	6 d	7 d	
FOAM	0.373 6	0.457 3	0.509	0.547	0.576 4	0.601 8		61.1
OceanMAPS	0.702 2	0.720 5	0.736 5	0.754 3	0.771 8	0.788 9	0.804 4	14.6
GIOPS	0.483 6	0.508 8	0.532 5	0.554	0.574 4	0.594	0.613 2	26.8
RTOFS	0.668 6	0.694 7	0.720 2	0.741 4	0.760 2	0.781 2		16.8
PSY3	0.593 6	0.604 3	0.614 4	0.624	0.634 9	0.647 4		9.1
PSY4	0.600 6	0.610 5	0.620 7	0.631 2	0.642 3	0.654 9	0.647 3	7.8
CGOFS	0.646 3	0.661 1	0.674 8	0.688 7	0.701 6	0.715 9	0.730 4	13.0

误差增长较大,预报6 d后误差增长百分比达61.1%。这可能因为FOAM系统是所有系统中唯一直接同化了USGODAE现场漂流浮标观测的SST,随着预报天数增长,该观测资料带来的同化增益必然降低。从表1中可见,积分5 d后,加拿大的GIOPS系统的误差甚至少于FOAM系统。相对于FOAM系统,其他预报系统误差较大,但误差增长百分比低,一般在10%左右。国家海洋环境预报中心CGOFS系统的第1 d误差为0.65 °C左右,7 d误差增长为13%,预报精度在参与评估的多个预报系统中处于中等水平。

本文分析了CGOFS全球海洋环流预报系统的SST预报与多个系统的相互比较情况,以下是对CGOFS SST预报的详细评估。CGOFS系统的预报偏差随预报时间变化偏差平均值为负(见图2a),且随预报时间呈略微下降趋势,绝对偏差增大。这说明:总体而言CGOFS全球预报的SST总体较观测偏冷,且预报技巧随天数增加略微下降。从系统预报偏差随时间变化可以看出,系统偏差值约在-0.4~0.2 °C之间,以负偏差为主;而2016年5—12月间存

在与其他时段不同的正偏差(见图2b)。数值预报的误差主要分系统性误差和非系统性误差。系统性误差和模式性能有关,例如模式动力过程、分辨率和参数化等;非系统性误差是模式以外的原因造成的。因此,初步判断2016年5—12月间的正偏差是由于非系统性误差造成的,即观测误差以及强迫场误差等。我们将进一步针对数值预报误差的来源进行详细分析,以期改善数值预报和提高数值预报质量提供重要参考。

CGOFS全球海洋环流预报系统预报第1 d的RMSE值约为0.65 °C(见图3),随预报天数增长,预报误差呈增大趋势。由预报的RMSE随时间变化也可以看出,除少数天数外,预报的RMSE范围多在0.5~0.7 °C左右,系统在某些天数的最大均方根误差达1 °C左右。系统性能稳定,误差可能与外部强迫有关。

AC刻画的是预报异常与观测异常的相关性。AC常用于验证数值天气预报的结果,AC值越接近1越佳,但AC对预报偏差不敏感,好的AC不能保证预报精度更高。CGOFS预报第1 d的AC平均值在

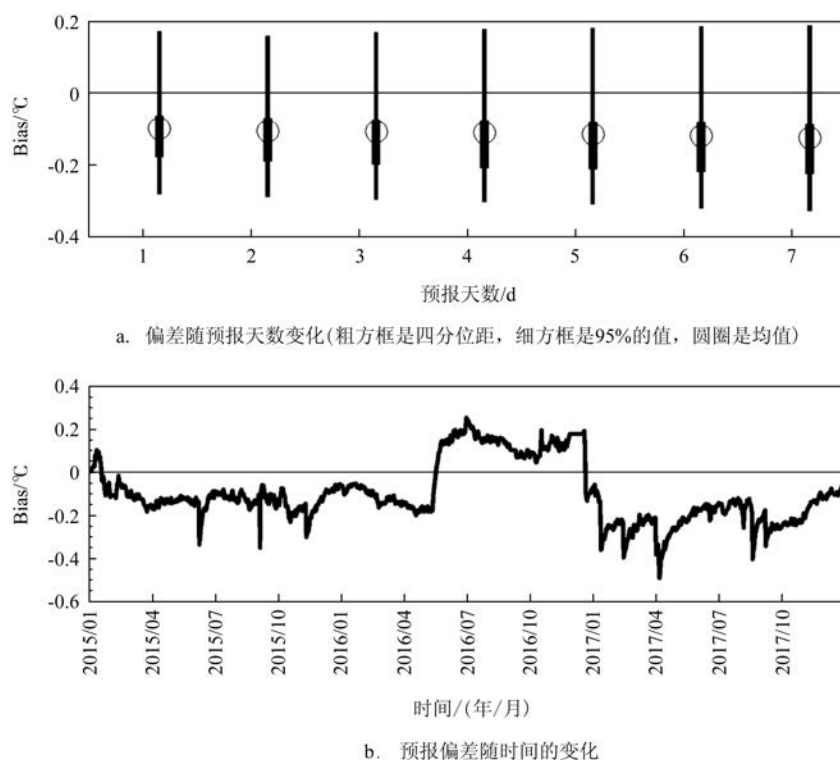


图2 CGOFS全球海洋环流预报系统SST偏差

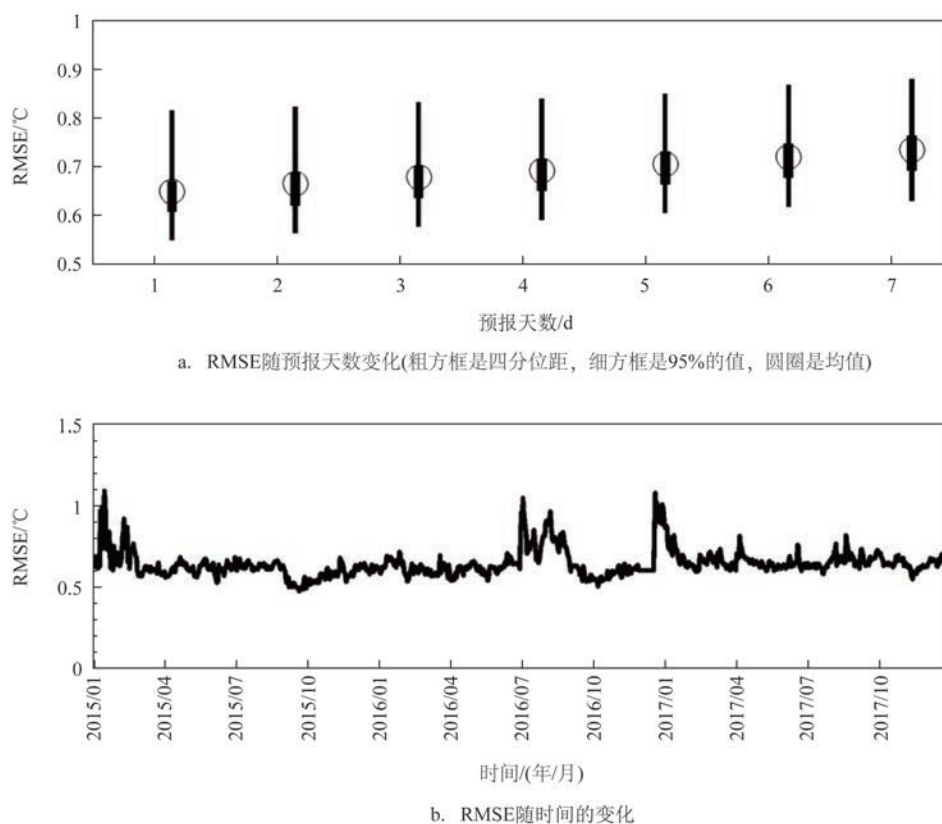


图3 CGOFS全球海洋环流预报系统SST的均方根误差

0.75左右(见图4),随积分天数的增长下降至0.65左右;预报的AC随时间的变化也表明预报与观测相关的范围在0.6~0.8左右。

为了解CGOFS环流系统在全球各区域的预报误差,根据IVTT Class4标准划分了全球大洋各海盆(见表2)。图5为系统预报第1d在不同海域的RMSE,其中北大西洋和北太平洋的RMSE值与全球相当,约为0.65℃左右;南大西洋误差最大,约为0.68℃;赤道太平洋误差最小,约0.38℃。

为了更好地理解预报系统的性能,需要将预报场准确性与参考场作对比。在IVTT Class4框架下,有两个参考场,分别为延续性预报场和气候态场,所以根据定义,可构造两个技巧评分,分别为PSS和CSS。图6和图7分别为相对于延续性预报场和气候态预报场的技巧评分。对于延续性预报而言,CGOFS的PSS大于零,并随预报天数增加而下降。这说明CGOFS系统预报的SST准确性比它自身的延续性场要好(见图6a)。另外该系统在南北纬40°间大部分范围内对SST延续性预报技巧比全球其

表2 Class4标准下全球海盆的划分

名称	地理范围
全球	90°S~90°N, 180°W~180°E
北大西洋	0°~70°N, 100°W~31°E
赤道大西洋	20°S~20°N, 70°W~30°E
南大西洋	60°S~0°, 70°W~30°E
北太平洋	0°~65°N, 100°E~77°W
赤道太平洋	20°S~20°N, 90°E~70°W
南太平洋	60°S~0°, 100°E~70°W
印度洋	40°S~31°N, 20°~120°E
南大洋	70°S~20°N, 90°E~180°

他区域更高,而在南极绕极流地区的预报技巧较低(见图6b)。同样,相对于气候态预报场来说,CGOFS的气候态技巧也为正值,系统预报理论上应比气候态预测准确,CSS较高区域位于北太平洋西部、赤道太平洋中西部以及北大西洋中高纬地区(见图7)。

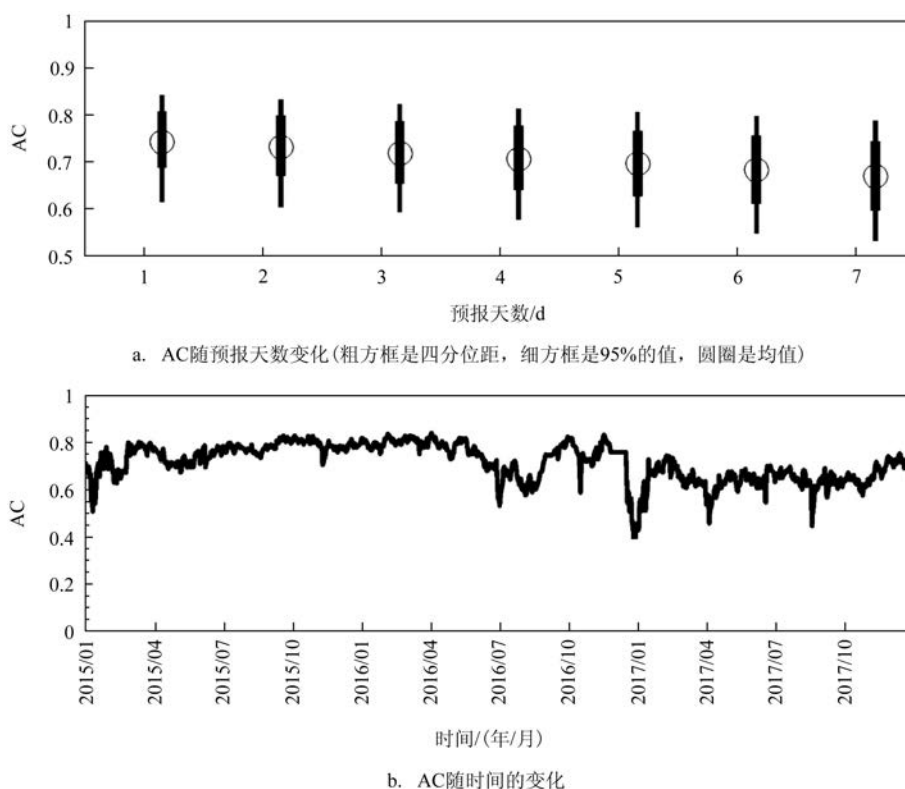


图4 CGOFS全球海洋环流预报系统的SST异常相关

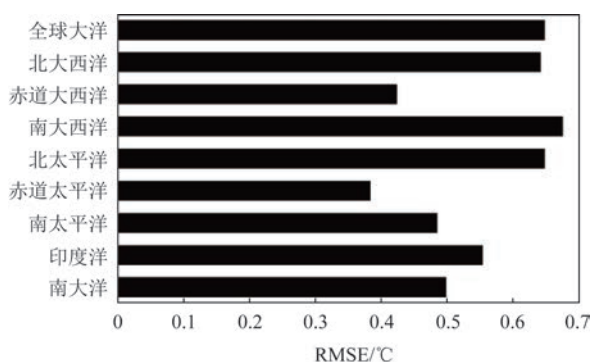


图5 CGOFS全球海洋环流预报系统预报第1 d在不同海域的RMSE

5 结论及讨论

本文基于IVTT Class4的观测资料 and 标准,评估了国家海洋环境预报中心中等分辨率业务化全球海洋环流数值预报系统CGOFS。综上可知,CGOFS的SST预报RMSE范围在 $0.65 \sim 0.73$ °C,在多个国际业务化系统中预报精度处于中间位置。全球整体预报偏差约为 -0.1 °C,预报较观测偏冷。

预报与观测的相关性可高达 $0.6 \sim 0.8$ 。且无论对于延续性预报场还是气候态场而言,其技巧评分皆为正值,说明该系统可用来进行表层海表温度的预报。

值得注意的是,英国气象局FOAM系统预报的误差增长率虽远高于其他几个系统,但由于其是唯一同化了USGODAE准实时观测SST的系统,虽然系统同化的SST特征随着模式积分而丢失,但仍可维持其预报时效内误差小于其他大部分预报系统,这充分说明了近实时观测对数值预报的重要性。

另外,PSY3和PSY4是麦卡托中心基于同一海洋模式、同样强迫场、同化同样的观测资料,但分辨率不同的两套业务系统,分辨率提高在预报中的优势并没有得到很好的体现。Class4标准评估所用的观测资料是否可以抓住中尺度涡的变化特征?是否可以用来评估涡分辨率系统对中尺度涡的模拟以及现有的Class4标准是否能适用于高分辨率系统中中尺度涡预测能力的评估还需进一步研究。目前,国家海洋环境预报中心基于海洋模式NEMO研发的高分辨率全球海洋环流数值预报系统已业务

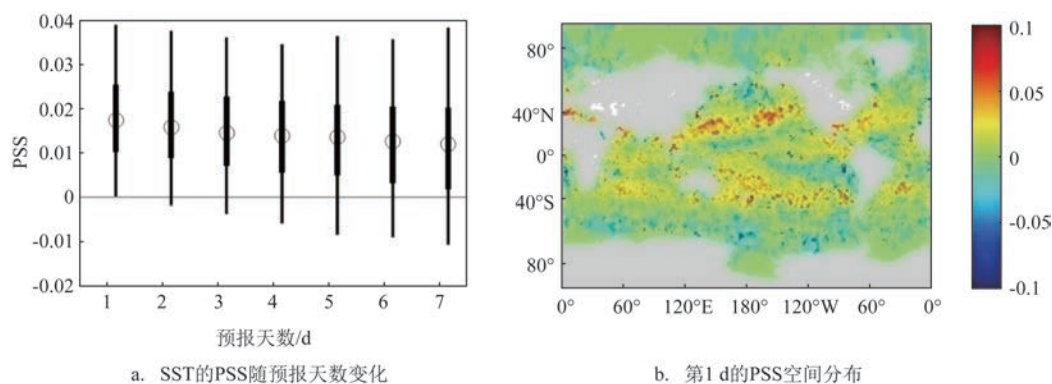


图6 CGOFS全球海洋环流预报系统的延续性预报技巧

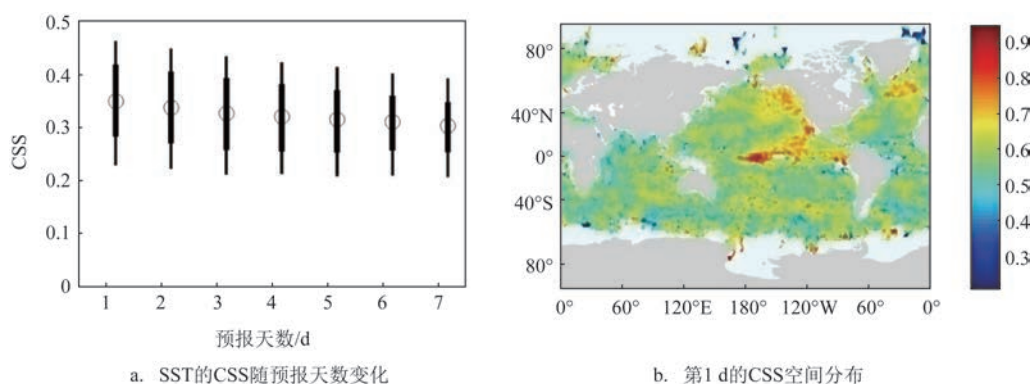


图7 CGOFS全球海洋环流预报系统的气候态预报技巧

化运行,我们未来将对高分辨率对大洋环流预报的影响开展进一步评估。

参考文献:

- [1] Bell M J, Lefebvre M, Le Traon P Y, et al. GODAE: the global ocean data assimilation experiment[J]. Oceanography, 2009, 22(3): 14-21.
- [2] Bell M J, Schiller A, Le Traon P Y, et al. An introduction to GODAE ocean view[J]. Journal of Operational Oceanography, 2015, 8(S1): s2-s11.
- [3] Martin M J, Balmaseda M, Bertino L, et al. Status and future of data assimilation in operational oceanography[J]. Journal of Operational Oceanography, 2015, 8(S1): s28-s48.
- [4] 夏冬冬, 任湘湘. 国外海洋预报动态[J]. 海洋预报, 2012, 29(2): 73-74.
- [5] Le Provost C. GODAE Internal Metrics for model performance evaluation and intercomparison[M]. Toulouse, France: CNRS / LEGOS, 2002.
- [6] Hernandez F, Bertino L, Brassington G, et al. Validation and intercomparison studies within GODAE[J]. Oceanography, 2009, 22(3): 128-143.
- [7] Hernandez F. List of internal metrics for the MERSEA-GODAE global ocean internal document[M]. France: Mercator Ocean, 2007.
- [8] Hunke E C, Lipscomb W H. CICE: the Los Alamos sea ice model documentation and software user's manual version 4.1[R]. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 2010.
- [9] Lellouche J M, Le Galloudec O, Drévillon M, et al. Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan[J]. Ocean Science, 2013, 9(1): 57-81.
- [10] Smith G C, Roy F, Reszka M, et al. Sea ice forecast verification in the Canadian global ice ocean prediction system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(695): 659-671.
- [11] Mehra A, Rivin I. A real time ocean forecast system for the North Atlantic Ocean[J]. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 2010, 21(1): 211-228.
- [12] Brassington G B, Freeman J W, Huang X, et al. Ocean model, analysis and prediction system: version 2[R]. CAWCR Technical Report No 52, Aspendale, VIC, Australia: Centre for Australian Weather and Climate Research, 2012.
- [13] Hernandez F, Blockley E, Brassington G B, et al. Recent progress in performance evaluations and near real-time assessment of operational ocean products[J]. Journal of Operational

- Oceanography, 2015, 8(S2): s221-s238.
- [14] Ryan A G, Regnier C, Divakaran P, et al. GODAE ocean view class 4 forecast verification framework: global ocean inter-comparison[J]. Journal of Operational Oceanography, 2015, 8 (S1): s98-s111.
- [15] 方长芳, 张翔, 尹建平. 21 世纪初海洋预报系统发展现状和趋势[J]. 海洋预报, 2013, 30(4): 93-102.
- [16] Wang H. Operational oceanography forecasting system in developing countries[R]. Washington, USA: GODAE OceanView Symposium, 2013.
- [17] 王辉, 万莉颖, 秦英豪, 等. 中国全球业务化海洋学预报系统的发展和应用[J]. 地球科学进展, 2016, 31(10): 1090-1104.
- [18] Griffies S M, Harrison M J, Pacanowski P C, et al. A technical guide to MOM4. GFDL ocean group technical report NO.5[R]. Princeton, New Jersey: NOAA / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, 2004: 1-291.
- [19] Winton M. A reformulated three-layer sea ice model[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2000, 17(4): 525-531.
- [20] Wang D X, Qin Y H, Xiao X J, et al. El Niño and El Niño Modoki variability based on a new ocean reanalysis[J]. Ocean Dynamics, 2012, 62(9): 1311-1322.
- [21] Wang D X, Qin Y H, Xiao X J, et al. Preliminary results of a new global ocean reanalysis[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57 (26): 3509-3517.
- [22] 肖贤俊, 何娜, 张祖强, 等. 卫星遥感海表温度资料 and 高度计资料的变分同化[J]. 热带海洋学报, 2011, 30(3): 1-8.
- [23] 刘娜, 王辉, 凌铁军, 等. 一个基于 MOM 的全球海洋数值同化预报系统[J]. 海洋通报, 2018, 37(2): 139-148.
- [24] Kalnay E, Kanamitsu M, Baker W E. Global numerical weather prediction at the national meteorological center[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1990, 71(10): 1410-1428.
- [25] Madec G. NEMO reference manual, ocean dynamics component: NEMO-OPA, preliminary version[M]. France, Institute Pierre Simon Laplace (IPSL), 2008: 1288-1619.
- [26] Fichefet T, Maqueda M A M. Sensitivity of a global sea ice model to the treatment of ice thermodynamics and dynamics[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1997, 102(C6): 12609-12646.
- [27] Bleck R. An oceanic general circulation model framed in hybrid Isopycnic-Cartesian coordinates[J]. Ocean Modelling, 2002, 4(1): 55-88.
- [28] O'Carroll A G, Eyre J R, Saunders R W. Three-way error analysis between AATSR, AMSR-E, and in situ sea surface temperature observations[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2008, 25(7): 1197-1207.
- [29] Boyer T, Levitus S, Garcia H, et al. Objective analyses of annual, seasonal, and monthly temperature and salinity for the world ocean on a 0.25° grid[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(7): 931-945.

Validation of the Chinese Global Ocean Circulation Forecasting System using the GODAE Ocean View Class4 metrics

MO Hui-er^{1,2}, QIN Ying-hao^{1,2}, WAN Li-ying², ZU zi-qing^{1,2}, ZHANG Yu^{1,2}

(1. Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, National Marine Environmental Forecasting Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081 China; 2. National Marine Environmental Forecasting Center, Beijing 100081 China)

Abstract: This paper evaluates the performance of the Chinese Global operational Oceanography Forecasting system (CGOFS) with the intermediate resolution version in forecasting SST using the Intercomparison and Validation Task Team Class4 metrics under the framework of GODAE Ocean View. The observational SST data observations used for validation in this study are the in-situ surface drifting bouys that are archived by the USGODAE server. The results show that the SST RMSE of the CGOFS system is about between 0.65~0.73 °C through the forecast leading day, which is the middle range within the seven international operational forecasting systems. The skill scores against persisted field and climatology are positive, which demonstrates the skill of CGOFS system out-performs its own persisted forecasts and climatology for the SST.

Key words: Global Ocean Circulation Forecasting System; GODAE Ocean View; sea surface temperature; Class4 metrics.