

基于南海水下滑翔机观测的业务预报系统温盐分析数据评估

廖东侯^{1,2,3}, 凌铁军⁴, 张蕴斐^{2,3*}, 于华明^{1,5,6}, 祖子清^{2,3}, 李响^{2,3}

(1. 中国海洋大学 海洋与大气学院, 山东 青岛 266100;

2. 国家海洋环境预报中心, 北京 100081;

3. 自然资源部 海洋灾害预报技术重点实验室, 北京 100081;

4. 国家海洋局 极地考察办公室, 北京 100860;

5. 中国海洋大学 三亚海洋研究院, 海南 三亚 572024;

6. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室, 山东 青岛 266061)

摘要: 利用 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日“海翼”号水下滑翔机在南海北部的温盐观测数据, 对 3 个海洋业务预报系统(法国 Mercator Océan International 的 PSY4、美国 HYCOM Consortium 的 GOF3.1 和中国国家海洋环境预报中心的 CGOFS)的温盐分析数据进行了质量评估。结果表明, 3 个业务预报系统对温度和盐度都有较好的刻画能力。其中, PSY4 系统的温度、盐度在所有评估点处的总体均方根误差分别为 0.45 °C、0.056, 小于另外 2 个系统, 是 3 个系统中最优的。从总体偏差来看, PSY4 与 CGOFS 温度呈现暖偏差, 而 GOF3.1 温度呈现冷偏差; 3 个系统的盐度都呈现负偏差。均方根误差的垂向结构显示, 温度均方根误差与偏差最大值出现在水深 100 m 附近, 盐度最大值在水深 50 m 附近。以上结论为南海北部海域使用分析数据提供参考。此外, 大气强迫场的降水量偏多可能导致了 CGOFS 系统 8 月的盐度值出现较大的均方根误差和较明显的负偏差, 因此在数值预报时需更多地关注强迫场的选取。

关键词: 南海; 水下滑翔机; 分析场; 业务化预报系统; 评估

中图分类号: P731.11; P731.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-6647(2022)03-0435-14

doi: 10.12362/j.issn.1671-6647.20210706001

引用格式: 廖东侯, 凌铁军, 张蕴斐, 等. 基于南海水下滑翔机观测的业务预报系统温盐分析数据评估[J]. 海洋科学进展, 2022, 40(3): 435-448. LIAO D Y, LING T J, ZHANG Y F, et al. Evaluation of analysis data of operational oceanography forecasting system using profiles from underwater glider in the South China Sea[J]. Advances in Marine Science, 2022, 40(3): 435-448.

海洋科学的发展需要数据的支撑。近年来得益于计算机技术的进步, 海洋数值模拟日趋成熟, 世界上各大海洋机构都建立了业务化海洋预报系统, 发布预报和分析产品^[1]。这些产品可以为我们提供高时空分辨率的海洋状态估计, 在现代的海洋科学研究和应用中发挥着重要的作用^[2]。但是, 这些数据质量受到数值模式、同化方法等诸多因素的影响, 存在一定程度的误差。因此, 对这些产品的准确程度进行质量评估就显得十分重要。

资料同化是将观测数据与数值模式相结合, 以求得关于海洋状态的最佳估计^[3-4]。经过同化后的结果称为分析场, 可以为海洋业务预报提供初值^[5-6]。分析场的准确程度会对预报效果产生较大影响, 本文将针对预报系统的分析场进行评估。国际组织 GODAE OceanView (GOV)^[7-9]下设的预报系统间比较和验证工作组 (Intercomparison and Validation Task Team, IVTT) 曾将英国、澳大利亚、法国、加拿大、美国和中国等具有代

收稿日期: 2021-07-06

资助项目: 国家重点研发计划资助项目——高影响海-气环境事件预报试验及示范应用 (2017YFA0604203)

作者简介: 廖东侯 (1994—), 男, 硕士研究生, 主要从事水下滑翔机数据分析方面研究. E-mail: 879024856@qq.com

* 通信作者: 张蕴斐 (1976—), 男, 研究员, 博士, 主要从事海洋与大气数值模式方面研究. E-mail: zhangyf@nmfsc.cn

(王佳实 编辑)

表性的业务化海洋预报系统进行了评估。对于次表层的温盐剖面, IVTT使用Argo数据进行比较, 给出了偏差、均方根误差、相关系数等指标的时空分布^[10-12], 为改进预报系统提供了参考。

限于目前的观测技术, 海面以下的观测主要来源于Argo浮标, 但Argo浮标长时间运行在海面以下, 由于生物附着等因素, 测量数据会出现较大的偏移^[13]。水下滑翔机作为一种新型的观测平台, 观测的时段较短, 且观测结束之后会回收, 便于根据传感器的实际状态对观测数据进行质量控制。此外, 预报系统一般都会同化Argo数据, 此时再使用Argo数据检验分析场, 可能会导致误差估计偏低。因此, 本文利用相对独立的水下滑翔机在南海北部的观测数据对国际上3个主流的海洋预报机构发布的温盐分析数据进行对比和评估, 以期为用户提供参考。

1 数据和方法

1.1 水下滑翔机调查数据

水下滑翔机(Underwater Glider)是一种新型的观测平台, 此概念由Henry Stommel^[14]于1989年首次提出。1991年, 美国Teledyne Webb Research(TWR)公司研制了最早的水下滑翔机Slocum^[15]。水下滑翔机可以通过改变浮力来控制垂向位置, 并通过调整滑翔翼来控制前进方向^[16], 具有能耗小、续航能力强、自主可控等优点^[17-18]。此外, 水下滑翔机还可以搭载不同的传感器, 对海洋进行大规模、长时间、全天候和高分辨率的观测, 广泛应用于海洋调查领域^[19-21]。

2019年7月12日至9月20日, 中国科学院沈阳自动化研究所自主研发的“海翼”号水下滑翔机^[22]在南海北部执行了断面调查任务, 滑翔机编号: 1000A005, 本文数据均来自此次调查。“海翼”号水下滑翔机整体性能良好, 可以获取长时间高分辨率的温盐数据^[23]。此次水下滑翔机搭载了SBE Slocum CTD传感器, 观测变量包含温度、电导率(盐度)、水深等, 其中温度分辨率为0.001℃, 电导率分辨率为0.000 01 s/m^[24], 传感器在下水前都经过标准校正, 以获取更可靠的观测数据。对取得的原始观测数据首先进行质量控制, 具体包括删除重复值, 剔除不符合常规的异常值, 对电导率、温度和深度数据进行低通滤波和热滞校正^[25]几个步骤, 其中低通滤波环节会对电导率、温度和深度数据有所修正, 热滞校正环节对电导率数据进一步修正。然后, 采用国际海水状态方程TEOS-10(Thermodynamic Equation of Seawater-2010)^[26]中的公式, 将电导率转换成盐度。

水下滑翔机的运行模式如图1所示, 本次调查共计69 d, 一共473个剖面, 最大水深达1 000 m, 采样时间间隔为2 s。每次下潜观测时, 水下滑翔机获得下沉和上升过程共计2条廓线。在每个剖面的观测中, 虽然水下滑翔机存在一定的水平移动, 但是水平移动的距离较短, 对观测数据造成的影响可以忽略。因此, 每条廓线的观测时间和位置定义为水下滑翔机最接近海面时的时间和经纬度。由于水下滑翔机搭载的CTD采样频率很高, 仅为2 s, 因此滑翔机的采样密度很大, 即1 m内会进行多次温盐的测量, 并且每组数据的测量水深也不尽相同, 为了便于对比, 将温盐观测数据垂直插值到间隔为1 m的水深上。此外, 为避免温盐日变化对评估的影响, 本研究将水下滑翔机的温盐数据处理为日平均形式。处理之后廓线的经纬度位置如图2所示。

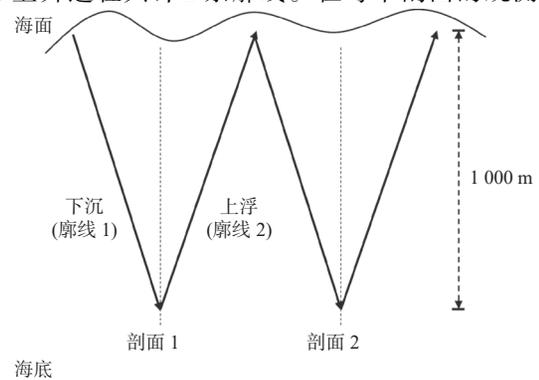


图1 水下滑翔机工作模式

Fig. 1 Working mode of underwater glider

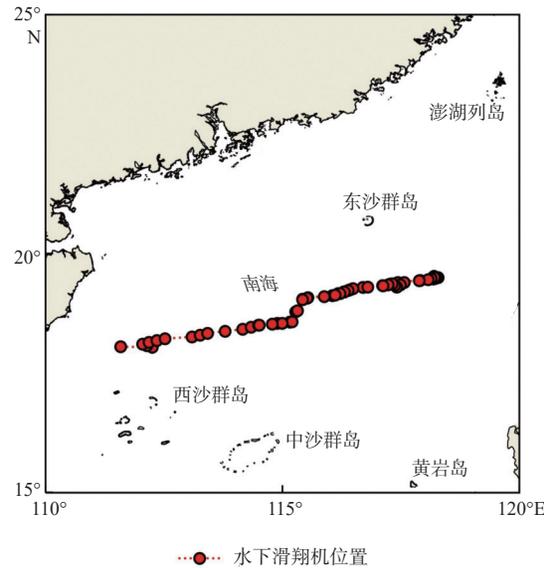


图 2 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日“海翼”号水下滑翔机每天观测点轨迹

Fig. 2 Track of the underwater glider “Hai Yi” from July 12 to September 20, 2019

1.2 温盐分析资料

分析资料来自法国的 Mercator Océan International 和美国的 HYCOM Consortium 以及国家海洋环境预报中心。

Mercator Océan International 有 PSY3 和 PSY4 两套预报系统, 本研究选取 PSY4 系统的分析产品。PSY4 数值模式为 NEMO 3.1^[27], 大气强迫由欧洲中期天气预报中心 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) 提供。PSY4 同化方案为降阶卡曼滤波 (Reduced-order Kalman Filter), 并配合三维变分 (3DVAR) 的偏差调整。同化的数据有 OSTIA (Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis) SST 数据、AVISO (Archiving, Validation, and Interpolation of Satellite Oceanographic) 的 SLA 数据、CMEMS (Copernicus Marine Environment Monitoring Service) 海冰密集度数据以及温盐剖面数据、WOA 2013 的温盐气候态数据, 并使用法国太空研究中心的卫星测高数据 CNES-CLS13 进行平均动力地形的调整^[28-29]。

HYCOM Consortium 是由美国国家海洋伙伴关系计划 (National Ocean Partnership Program, NOPP) 赞助的机构。HYCOM 为一个原始方程海洋环流模式, 由美国迈阿密大学的等密度面坐标海洋模式改进而来^[30]。本研究采用了 HYCOM Consortium 的 GOFS 3.1 系统分析数据。该系统使用耦合海洋资料同化系统 (Navy Coupled Ocean Data Assimilation)^[31], 利用三维变分 (3DVAR) 方法同化了卫星高度计观测反演的 SSH, 卫星遥感、现场观测的 SST, 以及 Argo 浮标和 XBT、锚系浮标的温盐剖面^[32-33]。此外, 该系统还利用合成海洋剖面系统将海面信息投影到下层海洋中^[34]。

国家海洋环境预报中心选用了中国海洋预报系统 (Chinese Global Oceanography Forecasting System, CGOFS), 其数值模式为 NEMO, 大气强迫场来源于美国国家环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 全球预报系统 (Global Forecasting System, GFS)。同化方案为集合局部误差子空间变换卡尔曼滤波 (Ensemble Local Error Subspace Transform Kalman Filter), 同化的数据包括 OSTIA 的 SST 数据, AVISO 的 SLA 数据, 以及 Argo 和 Tao 的观测数据^[35]。

PSY4、GOFS3.1 和 CGOFS 三个业务化预报系统都选择日平均的温盐分析场数据, 分辨率均为 $(1/12)^\circ$ 。为了便于比较, 将 3 套分析数据通过水平和垂向插值, 获得与水下滑翔机观测匹配的温盐廓线分析数据, 其中水平插值使用了线性插值, 垂向插值使用了 3 次样条插值。

预报系统的分析场数据来源于同化系统, 3个系统的同化系统和同化的观测数据都有很大的差别(表1)。从SST数据来看, PSY4和CGOFS使用的均是OSTIA SST数据, OSTIA是由英国气象局发布的全球SST逐日分析资料, 融合了多个平台的红外、微波卫星遥感数据(ENVISAT、AATSR、NOAA-17、NOAA-18、METOP-A、MSG-SEVIRI、AMSR-E和TRMM-TMI)以及GTS提供的现场观测数据, 分辨率为 $(1/20)^{\circ}$ ^[36]。GOFS3.1同化的SST来源于多个红外和微波遥感的SST数据, 以及现场观测SST。从海表面高度数据来看, PSY4和CGOFS使用的是AVISO SLA卫星数据^[37], GOFS3.1使用的是Jason1,2和Envisat的卫星高度计数据。对于剖面数据, 三者都同化了Argo浮标的观测。

表1 PSY4、GOFS3.1、CGOFS同化系统与数据对比

Table 1 Assimilation methods and data used in PSY4, GOFS3.1, CGOFS forecasting systems

预报系统	同化系统与技术	同化数据
PSY4 ^[28-29]	降阶卡曼滤波 分析增量更新 三维变分偏差调整	OSTIA SST CMEMS 海冰密集度 AVISO SLA 现场观测温盐剖面(CMEMS 数据集) WOA 2013 气候态数据
GOFS3.1 ^[32-33]	三维变分 合成海洋剖面系统	卫星 SST(NOAA-18、NOAA-19、AMSR-E、 METOP-A、GOES-E、GOES-W、MeteoSat-2、AATSR) 现场观测 SST(船测、漂流浮标、固定浮标) 卫星高度计(Jason 1, 2、ENVISAT) Argo 浮标、漂流浮标、固定浮标、XBT 的温盐剖面 海冰密集度数据
CGOFS ^[35]	集合局部误差子空间变换卡尔曼滤波 并行数据同化框架	OSTIA SST AVISO SLA Argo/Tao 温盐剖面

1.3 研究方法

参考前人的研究方法^[38-40], 本研究使用偏差(Bias)、均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)和相关系数(Coefficient of Relationship, COR)三个统计量来评估分析数据的质量。其中, 偏差、均方根误差可以从不同角度反映分析值与观测值的差别, 相关系数可以反映两者的线性相关程度, 三者计算公式如下。

偏差:

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

均方根误差:

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

相关系数:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (A_i - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (3)$$

式中: A_i 为插值到观测点上的温盐分析场; \bar{A} 为平均值; O_i 为水下浮标的观测值; \bar{O} 为观测值平均值; N 为样本总数; i 为逐个样本编号。

由于温盐数据既有水深变化又有时间变化,因此,在计算偏差、均方根误差和相关系数时,可以分别考察这3个指标随水深和时间的变化情况。

2 结果对比

2.1 温度对比

在滑翔机观测数据和3种分析数据的温度剖面图中,将纵坐标刻度做了一定程度的拉伸,具体为对纵坐标轴的刻度使用开平方根的映射,使之在海洋上层的分布相较于下层较为稀疏(后文中凡是纵坐标为水深的图片,均采用此种坐标),以获得更为细致的海洋上层结构(图3)。3个预报系统温度分布基本相同,温度由表层到底层逐渐降低。3种分析数据的温度相对于水下滑翔机观测数据来说更为平滑一些,这应当是由于水下滑翔机所搭载的高精度CTD传感器可以捕捉到真实海洋更小尺度的变化。

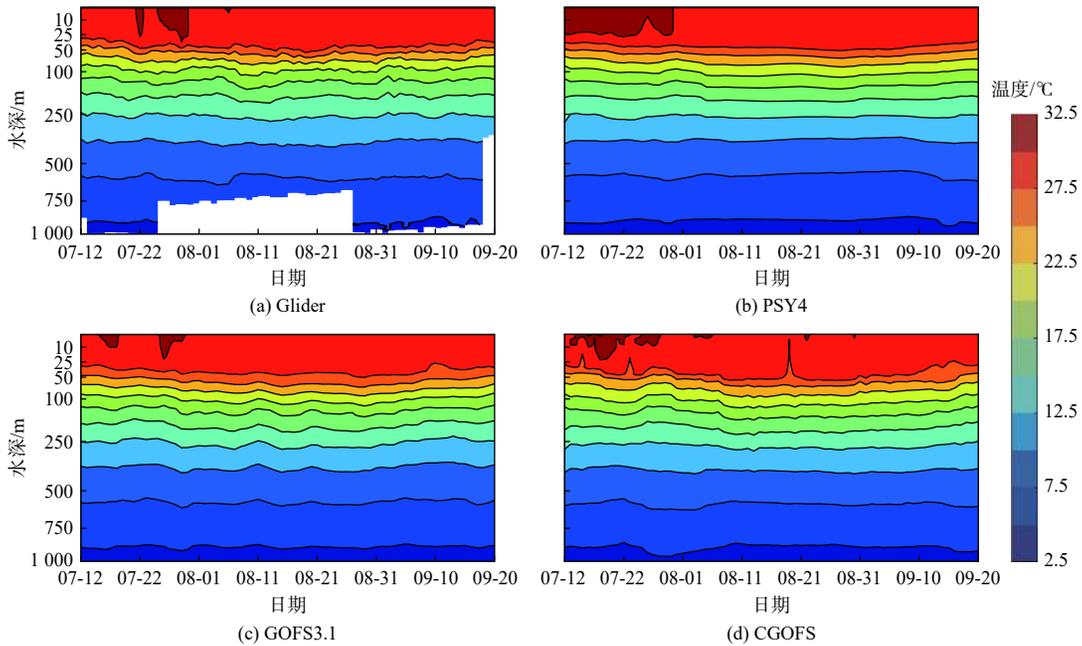


图3 2019年7月12日至9月20日水下滑翔机观测数据和PSY4、CGOFS、GOF3.1分析数据的温度剖面分布
Fig. 3 Temperature profiles of the underwater glider, PSY4, CGOFS, and GOF3.1 from July 12 to September 20, 2019

图4为滑翔机数据和3种分析数据的温度异常剖面图(温度数据减去该数据在各个水深的的时间平均值)。由图4可见,4套数据在水深25~100 m,温度异常的振幅较大。水下滑翔机的数据显示,8月水深25~100 m处温度为正异常;而在7月和9月,则为负异常。3套分析数据也大致呈现类似观测的特征,但CGOFS的温度异常振幅要高于PSY4和GOF3.1的数据,更接近观测。

为了研究误差的垂向分布特征,利用式(1)~式(3)在不同水深处,分别计算分析数据相对于观测的偏差、均方根误差和相关系数,结果如图5所示。从平均廓线图(图5a)中可以看出,分析数据与观测值较为一致,混合层水深大致都在30 m左右。对3套分析数据的偏差而言,在水深50 m以上,PSY4,CGOFS呈现冷偏差,而GOF3.1则呈现暖偏差;水深100 m左右三者都呈现暖偏差,且三者都出现了偏差最大值,PSY4为0.90 °C, GOF3.1为0.96 °C, CGOFS为1.30 °C;在水深500 m以下3个系统都呈现冷偏差(图5b)。对均方根误差而言,3个系统的趋势较为一致,在水深约100 m处均出现了最大值,PSY4为1.06 °C,

GOFS3.1 为 $1.29\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，CGOFS 为 $1.54\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 5c)。相关系数在水深 100 m 以深，许多位置无法通过 90% 的显著性检验，因此并不具有参考价值 (图 5d)。

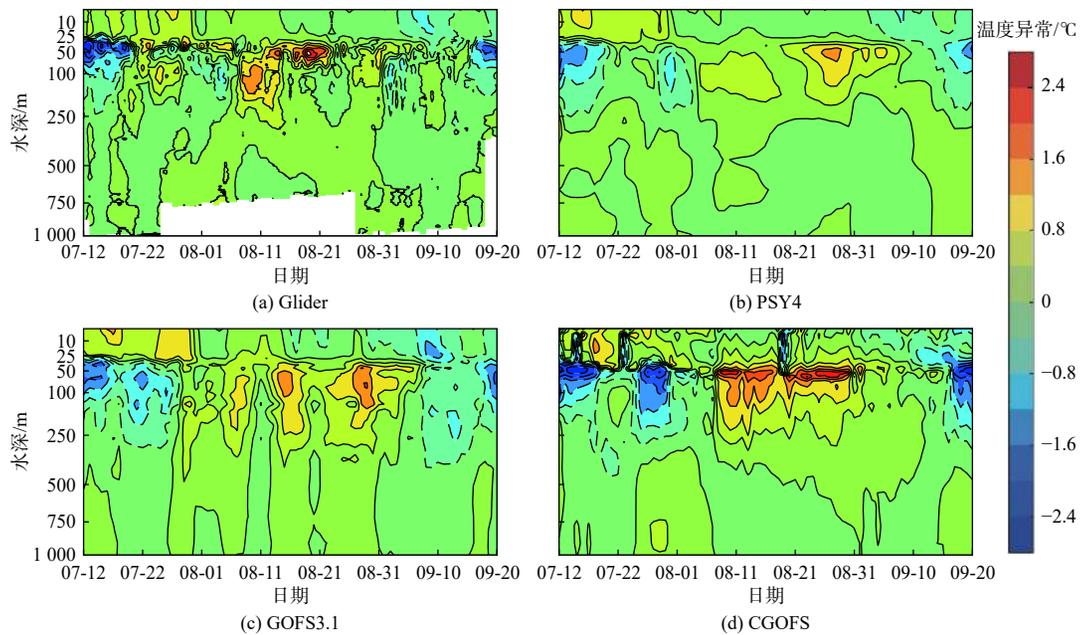
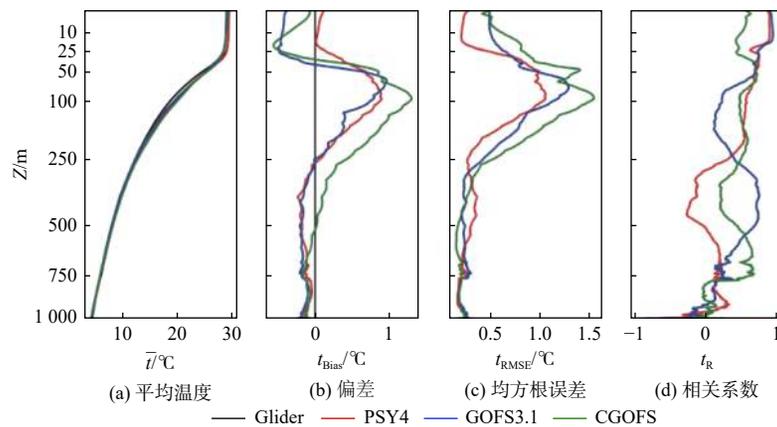


图 4 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日水下滑翔机观测数据和 PSY4、CGOFS、GOFS3.1 分析数据的温度异常剖面分布

Fig. 4 Temperature anomaly profiles of the underwater glider, PSY4, CGOFS, and GOFS3.1 from July 12 to September 20, 2019



注: Z 为水深; \bar{t} 为平均温度; t_{Bias} 为温度偏差; t_{RMSE} 为温度均方根误差; t_{r} 为温度相关系数。

图 5 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日水下滑翔机观测数据和 PSY4、GOFS3.1 和 CGOFS 的平均温度、偏差、均方根误差、相关系数随深度分布廓线

Fig. 5 Profiles of mean temperature, bias, RMSE, and correlation coefficient of the underwater glider, PSY4, GOFS3.1, and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

利用式(1)、式(2)和式(3)分别计算分析数据相对于水下滑翔机数据的偏差、均方根误差和相关系数,即可获得 3 项指标随时间的变化图(图 6)。PSY4 系统一直围绕观测值上下波动,预报效果较好,最大偏差绝对值为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$; GOFS3.1 系统同样围绕观测值波动,但波动幅度较 PSY4 更大,最大偏差绝对值为 $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}$; CGOFS 系统在整个调查阶段主要呈现正偏差,最大偏差值为 $0.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 6a)。3 个系统的均方根误差总体趋

势较为一致,在调查中期(8月1日至8月31日)均方根误差较高,GOFS3.1最大均方根误差最小,为0.85℃(图6b)。三者的相关系数均通过99%的显著性检验,总的来说,相关性都维持在比较高的水平(图6c)。

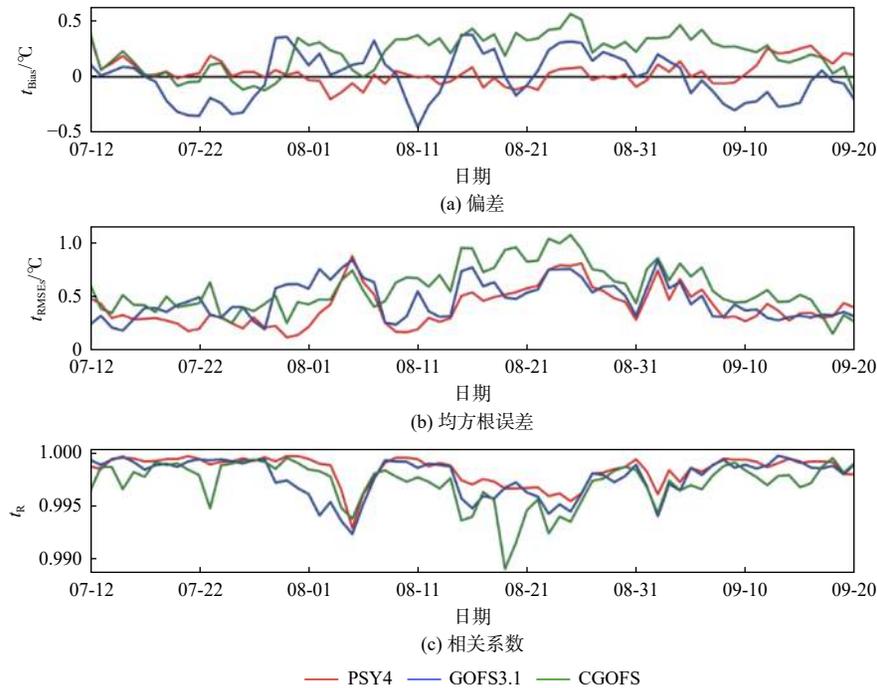


图6 2019年7月12日至9月20日PSY4、GOFS3.1、CGOFS系统温度分析数据的偏差、均方根误差和相关系数随时间分布
Fig. 6 Time series of bias, RMSE, and correlation coefficient of the temperature from the PSY4, GOFS3.1 and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

2.2 盐度对比

水下滑翔机调查数据和PSY4、GOFS3.1、CGOFS分析数据的盐度剖面图(图7)表明,3个预报系统都能刻画盐度的主要特征,盐度随深度分布的规律与温度不同:表层盐度最低。随着水深的增加,盐度逐渐增加,在水深100m左右盐度达到最高值,其后随着水深的增加,盐度却逐渐降低。此外,水深500m左右,水下滑翔机观测盐度出现了一块极小值区,除PSY4外,其他2个系统并未较好地反映该情况。

为滑翔机数据和3种分析数据的盐度异常剖面图,即盐度数据减去该数据在各个水深的的时间平均值(图8)。与温度不同,盐度异常在水深100m以上存在较强的变化。4套数据都呈现相似的情况,8月以前表层盐度高于平均值,8月以后表层盐度低于平均值。

图9为多条廓线的平均值以及3套分析数据统计指标的垂向分布特征。在混合层内,观测及3套分析数据平均值而言(图9a)都显示随着水深变化,盐度的变化不大;水深30~100m范围内,盐度迅速增大;水深100m以深,盐度变化较小。3套分析数据与观测的盐度垂向分布特征一致。对3套分析数据的偏差(图9b)而言,在水深0~25m范围内,CGOFS呈现负偏差,而另外2套分析数据呈现正偏差,但量值较小;在50m处,三者都呈现负偏差,CGOFS的量值最大,为-0.347。对均方根误差而言,PSY4的误差随深度大致呈现单调递减的趋势,但GOFS3.1和CGOFS在约50m处出现了较大值,GOFS3.1为0.176,CGOFS为0.395(图9c)。相关系数(图9d)的结果显示,3套分析数据大致呈现上层高、下层低的特征,但在100m以下也有许多点不能通过90%的显著性检验。

图10为3个系统盐度偏差、均方根误差和相关系数随时间的变化特征。PSY4与GOFS3.1系统大多呈现正偏差,GOFS3.1仅在8月下旬出现了短暂的负偏差。对于CGOFS系统,则是围绕观测值上下波动:

7月、9月为正偏差,8月则是负偏差(图10a)。PSY4和GOF3.1系统的均方根误差较为接近,PSY4的最大均方根误差为0.097,GOF3.1的最大均方根误差为0.087,CGOFS在整个8月整体误差偏大,最大值为0.157(图10b)。盐度相关系数(图10c)均通过99%的显著性检验,PSY4系统和GOF3.1系统相关系数较为接近。CGOFS的相关系数跟其他2个系统差异不大,但是在8月出现了相关系数极小值。

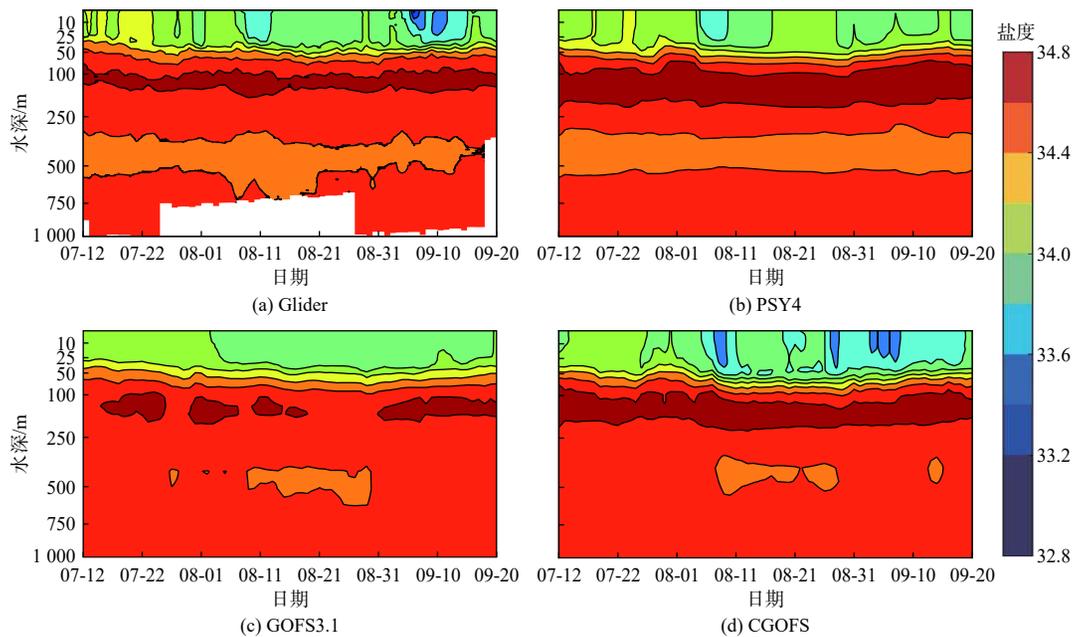


图7 2019年7月12日至9月20日水下滑翔机观测数据和PSY4、CGOFS、GOF3.1分析数据的盐度剖面分布

Fig. 7 Salinity profiles of the underwater glider, PSY4, CGOFS, and GOF3.1 from July 12 to September 20, 2019

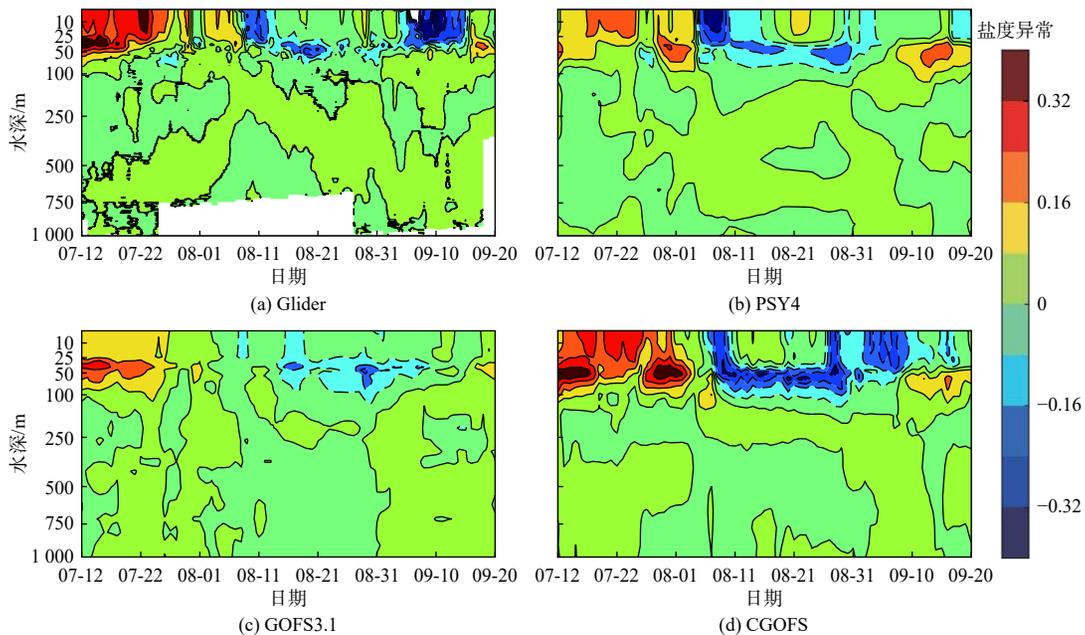
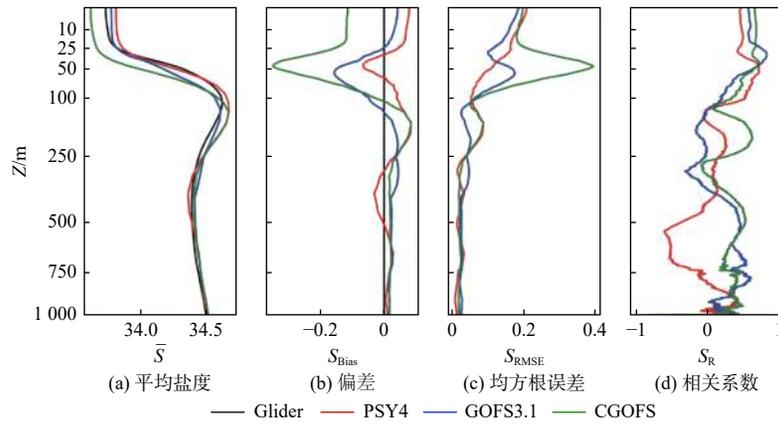


图8 2019年7月12日至9月20日水下滑翔机观测数据和PSY4、CGOFS、GOF3.1分析数据的盐度异常剖面分布

Fig. 8 Salinity anomaly profiles of the glider, PSY4, CGOFS, and GOF3.1 from July 12 to September 20, 2019



注: Z 为水深; \bar{S} 为平均盐度; S_{Bias} 为盐度偏差; S_{RMSE} 为盐度均方根误差; S_R 为盐度相关系数。

图 9 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日水下滑翔机、PSY4、GOF3.1、CGOFS 的平均盐度、偏差、均方根误差和相关系数随水深分布廓线

Fig. 9 Profiles of mean salinity, bias, RMSE and correlation coefficients of the underwater glider, PSY4, GOF3.1, and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

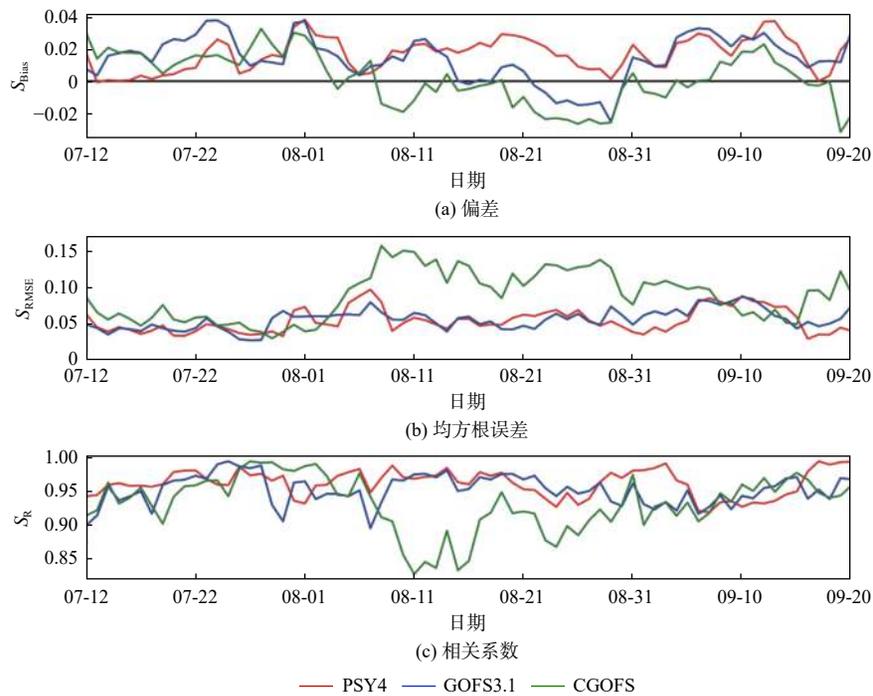


图 10 2019 年 7 月 12 日至 9 月 20 日 PSY4、GOF3.1、CGOFS 系统盐度分析数据的偏差、均方根误差、相关系数随时间分布

Fig. 10 Time series of bias, RMSE and correlation coefficient of salinity from the PSY4, GOF3.1, and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

2.3 总体评价

本文利用式(1)~式(3)对 PSY4、GOF3.1、CGOFS 系统的分析值与观测值(包含所有深度和时间)分别求出总体的偏差、均方根误差和相关系数, 结果见表 2 和表 3。

表 2 2019年7月12日至9月20日 PSY4、GOFS3.1、CGOFS 系统温度总体偏差、均方根误差和相关系数

Table 2 Mean temperature bias, RMSE, and correlation coefficients of the PSY4, GOFS3.1, and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

预报系统	$t_{\text{Bias}}/^\circ\text{C}$	$t_{\text{RMSE}}/^\circ\text{C}$	t_{R}
PSY4	0.04	0.45	0.998
GOFS3.1	-0.01	0.50	0.997
CGOFS	0.20	0.61	0.996

表 3 2019年7月12日至9月20日 PSY4、GOFS3.1、CGOFS 系统盐度总体偏差、均方根误差和相关系数

Table 3 Mean salinity bias, RMSE, and correlation coefficient of the PSY4, GOFS3.1, and CGOFS from July 12 to September 20, 2019

预报系统	S_{Bias}	S_{RMSE}	S_{R}
PSY4	0.016	0.056	0.943
GOFS3.1	0.014	0.057	0.936
CGOFS	0.003	0.091	0.913

对于温度, PSY4与CGOFS均呈现暖偏差, 而GOFS3.1呈现冷偏差, 且量值较大(表2)。PSY4、GOFS3.1、CGOFS均方根误差分别为0.45 °C、0.50 °C和0.61 °C, 三者对温度都有较好的刻画能力。另外, IVTT的结果显示PSY4的温度分析场与Argo剖面的均方根误差值为0.5~0.6 °C^[10], 这与本文结果较为接近。相关系数三者都在0.99以上(通过99%显著性检验), 说明温度分析值与观测数据的线性相关程度很高。

3个系统的盐度分析场都呈现正偏差, CGOFS最小, 为0.003(表3)。PSY4、GOFS3.1和CGOFS的均方根误差分别为0.056, 0.057, 0.091, PSY4系统与GOFS3.1系统差异不大, 误差均较小, CGOFS受8月误差偏大的影响, 整体误差偏大。相关系数三者都在0.9以上(通过99%显著性检验), 总体来说, 预报系统的分析数据与观测数据的线性相关程度较高。

3 分析与讨论

本文利用水下滑翔机在南海北部的温盐调查数据对PSY4、GOFS3.1以及CGOFS三个预报系统的分析场进行了对比检验, 给出了随深度和时间变化的误差统计量。

对比中CGOFS预报系统在2019年8月的盐度分析场出现了比较明显的负偏差(图10a)和较大的均方根误差(图10b)。一般来说, 误差大致可以分为两类, 一是来自系统本身, 比如模式的动力过程以及同化系统的差异等, 即系统性误差; 二则是模式以外的原因, 比如强迫场误差和观测误差等, 也即非系统性误差^[12]。从图10来看, 8月以外的其他月份, CGOFS系统与另外2个系统的偏差与均方根误差情况较为相似, 但8月出现了较为明显的异常。这种误差短期内增大的现象更可能来自于非系统性误差。从另一个角度讲, CGOFS与PSY4系统均使用NEMO模式, 但两者大气强迫场的来源不同: CGOFS使用了NCEP数据, 而PSY4使用了ECMWF数据。因此, 本文推测8月CGOFS误差增大现象有可能是来源于大气强迫。

为探究是否是由于大气强迫造成了CGOFS与PSY4系统在8月盐度刻画的差异, 本文选择NCEP的再分析数据CFS2与ECMWF的再分析数据ERA5进行对比, 变量为可能对盐度产生影响的降水量。将CFS2的降水量减去ERA5, 得到观测点附近8月日平均的降水量差(图11)。从图11可以看出, 在南海北部区域, CFS2的日均降水量大多高于ERA5, 在8月的水下滑翔机观测点附近, CFS2的日均降水量比ERA5高10 mm以上。较高的降水量, 很有可能是造成8月CGOFS的盐度偏差较低(图11)的原因。

忽略盐度扩散过程的影响, 考虑1个长宽均为100 km、深度为30 m(混合层厚度)的海水立方体,

该立方体的质量约为 3×10^{11} kg。盐度定义为海水中溶解固体物质质量(g)与海水质量(kg)之比^[41], PSY4的8月上混合层(30 m)平均盐度为33.78,因此其含有的溶解物质量为 1.0134×10^{13} g。8月两者的日均降水差基本在10~20 mm,此处取为日均15 mm,则半个月(15日)在长宽均为100 km的正方体上的降水量为 2.25×10^9 kg,以此淡水替换上述正方体的同等体积海水,则原海水减少的溶解物质的质量约为 7.6×10^{10} g,仍然剩余的溶解物质量为 1.0058×10^{13} g,则此时的盐度下降至33.52。而8月CGOFS上混合层(30 m)平均盐度为33.59,这与计算结果非常接近。因此,大气强迫场更多的降水很有可能是造成CGOFS上层盐度偏低的原因。

另外,发布PSY4和GOFS3.1系统的机构都有自己的数据集或数据来源,其同化的温盐剖面应当多于CGOFS系统,这可能是他们的分析数据质量好于CGOFS的原因之一。此外,更先进的同化技术也可以提高分析数据的准确程度。

4 结 论

本文利用“海翼”号水下滑翔机在南海北部的温盐调查数据对国际主流的3个预报系统PSY4、GOFS3.1以及CGOFS的分析场进行了对比检验,给出了随深度和时间变化的误差统计量以及总体的均方根误差、偏差和相关系数。总结前文所述,得到的主要结论如下。

从温度的对比来看,三套分析数据对南海北部的海温均有较好的刻画能力,其中效果最好的是PSY4系统,均方根误差为0.45℃。误差的垂向结构显示,三者的偏差和均方根误差最大值均出现在水深约100 m。从盐度的对比来看,PSY4与GOFS3.1预报系统的刻画效果较好,均方根误差分别为0.056和0.057。CGOFS系统均方根误差较高,尤其是在8月。与温度不同,3个系统的盐度均方根误差与偏差极大值出现于水深约50 m处(仅有PSY4的均方根误差随深度大致呈现单调递减的趋势)。

2019年8月,CGOFS系统与PSY4系统相比出现了较低的盐度偏差和较大的均方根误差,从CGOFS和PSY4系统的大气强迫场来看,这很可能是由8月CGOFS系统的强迫场的降水量高于PSY4系统强迫场所致。

虽然此次评估的观测数据局限在南海北部,但是南海范围内,除Argo浮标观测数据之外,可用的廓线观测非常少。Argo数据通常会被同化到预报系统中,对误差的评估存在一定的影响。因此,水下滑翔机数据作为一种独立的观测数据,在这个方面具有一定的优势,可为相关人员在南海使用分析数据提供参考。

致谢: 感谢国家海洋技术中心提供水下滑翔机观测数据。

参考文献 (References):

- [1] 刘娜,王辉,凌铁军,祖子清.全球业务化海洋预报进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(2):131-140. LIU N, WANG H, LING T J, et al. Review and prospect of global operational ocean forecasting[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(2): 131-140.
- [2] 王世红,赵一丁,尹训强,等.全球海洋再分析产品的研究现状[J].地球科学进展,2018,33(8):794-807. WANG S H, ZHAO Y D, YIN X Q,

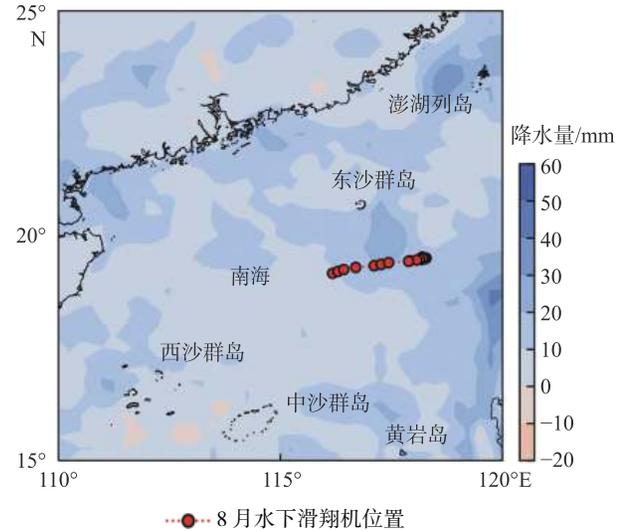


图 11 2019年8月CFS2与ERA5观测区域附近日均降水量差

Fig. 11 Difference in precipitation between CFS2 and ERA5 in August 2019

- et al. Current status of global ocean reanalysis dataset[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(8): 794-807.
- [3] 乔方利. 现代海洋/大气资料同化方法的统一性及其应用进展[J]. *海洋科学进展*, 2002, 20(4): 79-93. QIAO F L. The unification and application reviews of modern oceanic /atmospheric data assimilation algorithms[J]. *Advances in Earth Science*, 2002, 20(4): 79-93.
- [4] 朱国富. 数值天气预报中分析同化基本方法的历史发展脉络和评述[J]. *气象*, 2015, 41(8): 986-996. ZHU G F. Remarks on development of basic methods of atmospheric data assimilation for numerical weather prediction[J]. *Meteorological Monthly*, 2015, 41(8): 986-996.
- [5] 李宏, 许建平. 资料同化技术的发展及其在海洋科学中的应用[J]. *海洋通报*, 2011, 30(4): 463-472. LI H, XU J P. Development of data assimilation and its application in ocean science[J]. *Marine Science Bulletin*, 2011, 30(4): 463-472.
- [6] 韩鹏, 李宇航, 揭晓蒙. 国际全球海洋环流预报系统的现状与展望[J]. *海洋预报*, 2020, 37(3): 98-105. HAN P, LI Y H, JIE X M. The status and prospect of global ocean circulation forecasting system in foreign countries[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(3): 98-105.
- [7] BELL M J, SCHILLER A, LE TRAON P Y, et al. An introduction to GODAE ocean view[J]. *Journal of Operational Oceanography*, 2015, 8(Suppl.1): 2-11.
- [8] 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(Suppl.1): 28-48.
- [9] LE PROVOST C. GODAE Internal Metrics for model performance evaluation and intercomparison[M]. Toulouse, France: CNRS/LEGOS, 2002.
- [10] 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(Suppl.1): 98-111.
- [11] 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(Suppl.2): 221-238.
- [12] 莫慧尔, 万莉颖, 秦英豪, 等. 基于GODAE Ocean View标准的全球海洋环流预报系统评估[J]. *海洋预报*, 2020, 37(6): 44-51. MO H E, WAN L Y, QIN Y H. Validation of the Chinese Global ocean circulation forecasting system using the GODAE Ocean View Class4 metrics[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(6): 44-51.
- [13] WONG A, WIJFFELS S E, RISER S C, et al. Argo data 1999—2019: two million temperature-salinity profiles and subsurface velocity observations from a global array of profiling floats[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020(7): 1-23.
- [14] STOMMEL H. The slocum mission[J]. *Oceanography*, 1989, 2(1): 22-25.
- [15] WEBB D C, SIMONETTI P J, JONES C P. SLOCUM: an underwater glider propelled by environmental energy[J]. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2001, 26(4): 447-452.
- [16] RUDNICK D L, DAVIS R E, ERIKSEN C C, et al. Underwater glider for ocean research[J]. *Marine Technology Society Journal*, 2004, 38(2): 73-84.
- [17] RUDNICK, DANIEL L. Ocean research enabled by under-water gliders[J]. *Annual Review of Marine Science*, 2016, 8: 519-541.
- [18] 方尔正, 周子凌, 桂晨阳. 水下滑翔机原理与应用[J]. *国防科技工业*, 2020(8): 66-68. FANG E Z, ZHOU Z L, GUI C Y. Principle and application of underwater glider[J]. *National Defense Science, Technology and Industry*, 2020(8): 66-68.
- [19] 宗正, 熊学军, 刘玉红, 等. 水下滑翔机的中尺度涡观测方法[J]. *海洋科学进展*, 2018, 36(2): 180-187. ZONG Z, XIONG X J, LIU Y H, et al. The method of mesoscale eddy observation using underwater glider[J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 36(2): 180-187.
- [20] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望[J]. *水下无人系统学报*, 2018, 26(2): 89-106. SHEN X R, WANG Y H, YANG S Q. Development of underwater gliders: an overview and prospect[J]. *Journal of Unmanned Undersea Systems*, 2018, 26(2): 89-106.
- [21] 庞重光, 连喜虎, 俞建成. 水下滑翔机的海洋应用[J]. *海洋科学*, 2014, 38(4): 96-100. PANG C G, LIAN X H, YU J C. Ocean application of the underwater glider[J]. *Marine Sciences*, 2014, 38(4): 96-100.
- [22] YU J C, ZHANG A Q, JIN W M, et al. Development and experiments of the Sea-Wing underwater glider[J]. *China Ocean Engineering*, 2011, 25(4): 721-736.
- [23] 任强, 于非, 李硕, 等. 国产水下滑翔机2014年南海海试实验数据分析[J]. *海洋技术学报*, 2017, 36(1): 52-57. REN G, YU F, LI S, et al. Analysis on the experimental data acquired from the sea tests for domestic underwater glider in the South China Sea in 2014[J]. *Journal of Ocean Technology*, 2017, 36(1): 52-57.
- [24] 马梦真, 李芊, 吴正超, 等. 南海北部最小含氧带水下滑翔机观测结果初步分析[J]. *热带海洋学报*, 2022, 41(1): 131-142. MA M Z, LI Q, WU Z C, et al. Underwater glider observation of the oxygen minimum zone in the northern South China Sea[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2022, 41(1): 131-142.
- [25] LUECK R G. Thermal inertia of conductivity cells: theory[J]. *Journal of Atmospheric & Oceanic Technology*, 1990, 7(5): 741-755.
- [26] IOC, SCOR, IAPSO. The international thermodynamic equation of seawater-2010: calculation and use of thermodynamic properties[J]. *Intergovernmental Oceanographic Commission, Manuals and Guides*, 2010, 56: 196.
- [27] FICHEFET T, MAQUEDA 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.
- [28] LELLOUCHE J M, GALLOUDEC O L, DRÉVILLON M, et al. Evaluation of global monitoring and forecasting systems at Mercator Océan[J]. *Ocean*

- [Science](#), 2013, 9(1): 57-81.
- [29] LELLOUCHE J M, GREINER E, GALLOUDEC O L, et al. Recent updates to the copernicus marine service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system[J]. [Ocean Science](#), 2018, 14(5): 1093-1126.
- [30] HURLBURT H E. U. S. GODAE: global ocean prediction with the HYbrid Coordinate Ocean Model[J]. [Oceanography](#), 2006, 22(2): 64-75.
- [31] CUMMINGS J A. Operational multivariate ocean data assimilation[J]. [Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society](#), 2005, 131(613): 3583-3604.
- [32] CHASSIGNET E P, HURLBURT H E, SMEDSTAD O M, et al. The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system[J]. [Journal of Marine Systems](#), 2007, 65(1/4): 60-83.
- [33] CUMMINGS J A, SMEDSTAD O M. Variational data assimilation for the global ocean[M/OL]. (2013-02-20)[2021-07-06]. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35088-7_13.
- [34] HELBER R W, TOWNSEND T L, BARRON C N, et al. Validation Test Report for the Improved Synthetic Ocean Profile (ISOP) System, Part I: Synthetic Profile Methods and Algorithm[R/OL]. (2021-07-06). <https://www.hycom.org/dataserver/gofs-3pt1/analysis>.
- [35] LI Z J, WANG Z Y, LI Y, et al. Evaluation of global high-resolution reanalysis products based on the Chinese global oceanography forecasting system[J]. [Atmospheric and Oceanic Science](#), 2021, 14(5): 100037.
- [36] DONLON C J, MARTIN M, STERK J, et al. The operational sea surface temperature and sea ice analysis (OSTIA) system[J]. [Remote Sensing of Environment](#), 2012, 116: 140-158.
- [37] PUJOL M I, FAUGERE Y, TABURET G, et al. DUACS DT2014: the new multi-mission altimeter data set reprocessed over 20 years[J]. [Ocean Science](#), 2016, 12(5): 1067-1090.
- [38] 高志刚, 骆敬新, 刘克修, 等. ERA-Interim再分析数据在中国沿海的质量评估[J]. [海洋科学](#), 2015, 39(5): 92-105. GAO Z G, LUO J X, LIU K X, et al. Evaluation of ERA-Interim reanalysis data along coast of China[J]. [Marine Sciences](#), 2015, 39(5): 92-105.
- [39] 王晨琦, 李响, 张蕴斐, 等. 3套不同的SST再分析数据与中国近海浮标观测的对比研究[J]. [海洋学报](#), 2020, 42(3): 118-128. WANG C Q, LI X, ZHANG Y F, et al. A comparative study of three SST reanalysis products and buoys data over the China offshore area[J]. [Haiyang Xuebao](#), 2020, 42(3): 118-128.
- [40] 刘解明, 熊学军, 宫庆龙, 等. 4种表层风场资料在北半球海域的适用性评估[J]. [海洋科学进展](#), 2020, 38(1): 38-50. LIU X M, XIONG X J, GONG Q L, et al. Applicability evaluation of four surface wind products in the northern hemisphere sea area[J]. [Advances in Marine Science](#), 2020, 38(1): 38-50.
- [41] 董昌明, 禹凯, 王锦, 等. 物理海洋学导论[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 17-20. DONG C M, YU K, WNAG J, et al. Introduction to physical oceanography[M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2019: 17-20.

Evaluation of Analysis Data of Operational Oceanography Forecasting System Using Profiles From Underwater Glider in the South China Sea

LIAO Dong-yu^{1,2,3}, LING Tie-jun⁴, ZHANG Yun-fei^{2,3}, YU Hua-ming^{1,5,6}, ZU Zi-qing^{2,3}, LI Xiang^{2,3}

(1. *College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;*

2. *Key Laboratory of Marine Hazards Forecasting, Beijing 100081, China;*

3. *National Marine Environmental Forecasting Center, MNR, Beijing 100081, China;*

4. *Chinese Arctic and Antarctic Administration, Beijing 100860, China;*

5. *Sanya Institute of Ocean Research, Ocean University of China, Sanya 572024, China;*

6. *Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266061, China)*

Abstract: The temperature and salinity analysis from three operational forecasting systems (PSY4 of Mercator Océan International of France, GOFS3.1 of HYCOM Consortium of the United States, and CGOFS of the National Center for Marine Environmental Forecast of China) were evaluated with the observation data by "Haiyi" underwater glider in the northern South China Sea from July 12, 2019 to September 20, 2019. In general, the three forecasting systems can well reproduce the distribution and variability of temperature and salinity. The RMSE of temperature and salinity of PSY4 system are 0.45 °C and 0.056, respectively, which are smaller than those of the other two forecasting systems. Evaluation also shows that the temperature produced by the PSY4 and CGOFS forecasting systems presents warm bias, while that by the GOFS3.1 presents cold biases, and the salinity of all the three systems exhibits negative biases. In addition, the salinity in August 2019 produced by the CGOFS shows a large RMSE and significant cold deviation, which might be due to the large precipitation in its atmospheric forcing field.

Key words: the South China Sea; underwater glider; analysis field; operational ocean forecasting system; evaluation

Received: July 6, 2021