

# 亚丁湾海域数值预报与 Argo 观测温度比较研究\*

尹训强<sup>1,2,3</sup>, 乔方利<sup>2,3</sup>, 夏长水<sup>2,3</sup>, 杨永增<sup>2,3</sup>, 王关锁<sup>2,3</sup>

(1. 中国海洋大学 海洋环境学院, 山东 青岛 266003; 2. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;  
3. 海洋环境科学与数值模拟国家海洋局重点实验室, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 亚丁湾海域是印度洋西部一个重要海洋运输通道, 其海水性质变化多样, 海水运动复杂, 对航海等起着重要作用。利用了海浪-环流耦合模式建立的全球大洋环流预报系统 2008 年的预报结果, 结合实时/准实时的 Argo 观测资料, 针对亚丁湾海域进行了模拟与观测的对比研究。对比分析包括: 不同季节代表月份的预报结果与 Argo 剖面的比较、预报结果与全年 Argo 观测温度误差的统计分析等。比较表明: 该预报结果与 Argo 观测剖面吻合较好, 温度预报在整体上具有较小的误差, 在 100 m 以深的海洋下层有 75% 的温度误差分布在  $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内, 而 100 m 以浅的海洋上层的温度误差在该范围占 67%。比较结果也显示预报的上层混合作用仍略偏弱, 剖面中的逆温现象没有在预报中反映出来等, 其机制有待深入研究, 可能受分辨率低的限制。这些结果为将来在该海域建立高分辨率的海洋环流预报系统有一定借鉴意义。

**关键词:** 全球大洋环流预报系统; 亚丁湾海域; Argo 资料

**中图分类号:** P732

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1671-6647(2010)04-0428-08

深入认识和了解海洋状态及其运动规律对于人类活动具有重要意义, 而利用数值预报模式研究和预报大尺度海洋状态, 能为航海、渔业以及护航等提供重要参考。印度洋是国际重要水上通道, 研究该海区的海洋状态以及海洋数值预报等问题, 对航海等人类活动具有重要意义。亚丁湾海域是印度洋西部一个重要的海域, 其海水运动复杂, 是一个被世人广泛关注的航海安全重点海区。

本文在全球大洋环流预报系统的基础上, 结合 Argo 剖面观测数据, 在亚丁湾海域进行了预报系统的比较研究。该预报系统是基于普林斯顿海洋模式(POM), 结合 Qiao 等<sup>[1]</sup>提出的海浪-环流耦合理论建立的全球  $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$  分辨率的海浪-环流耦合模式。该预报系统于 2007 年 8 月 15 日开始准业务化运行, 其预报结果包括 24 h、48 h 和 72 h 等 3 个时段的预报。本文通过 2008 年全年进入亚丁湾海域的 Argo 数据和预报结果, 对该预报系统在该海区的海温预报能力进行了评估; 通过 Argo 数据和预报结果的剖面比较和误差统计等对该预报系统的海温预报能力进行了讨论和小结, 探讨该预报系统存在的问题。

## 1 预报模式与观测数据

### 1.1 模式设置与强迫数据

本研究中的预报系统依托新近发展的海浪-环流耦合理论<sup>[1,2]</sup>和 MASNUM 开发的全球海浪数值预报模式<sup>[3]</sup>, 将海洋遥感资料和全球再分析数据作为驱动和初始场, 建立全球海浪-环流耦合的准业务化数值预

\* 收稿日期: 2009-08-11

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目——基于全球实时海洋观测计划(Argo)的上层海洋结构、变异及预测研究第二子课题: 北太平洋上层海洋温盐结构的形成与变异(2007CB816002)

作者简介: 尹训强(1978-), 男, 山东夏津人, 助理研究员, 主要从事海洋数值模拟与数据同化方面的研究. E-mail: yinxq@fio.org.cn

(杜素兰 编辑)

报系统(下称预报系统)。该预报系统是在 POM 模式基础上建立的一个水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  的准全球环流模式。POM 模式是目前物理海洋学研究领域应用最为广泛的数值模式之一。该模式主要是为了模拟近岸问题而设计的,但是近年来 POM 模式被成功地运用到大尺度的海洋环流数值模拟研究中,如 Kagimoto 等<sup>[4]</sup>应用 POM 模拟整个太平洋的环流,Ezer 等<sup>[5]</sup>应用 POM 模拟整个大西洋的环流,Guo 等<sup>[6]</sup>采用三重嵌套模式研究了不同水平分辨率和 JEBAR 对黑潮模拟的影响,其模拟的最大区域几乎包含整个太平洋。在 POM 模式基础上,Xia 等<sup>[7]</sup>建立了一个水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  垂向  $\sigma$  层数为 16 的准全球模式,并分析了一些代表性断面的体积输运。

该预报系统的计算区域为全球  $75^\circ\text{S} \sim 65^\circ\text{N}$  之间的大洋, $65^\circ\text{N}$  以北设置为陆地,垂直方向上分成 21 层(表 1),在海洋上层采用较高的分辨率,而在海洋深层分辨率较低。模式的東西边界采用连续性(Cyclic)边界条件,南北边界采用固壁型边界条件。模式的地形由全球 ETOPO5 地形插值得到,同时按照 Mellor<sup>[8]</sup>的做法调整模式地形,使平滑后的地形满足如下条件:

$$\frac{|H_{i+1} - H_i|}{(H_{i+1} + H_i)} \leq \alpha \quad (1)$$

式中, $H_{i+1}$  和  $H_i$  为相邻的 2 个网格点的水深; $\alpha$  为平滑因子,此处取值为 0.2。

基于 POM 的全球环流模式的初始温、盐场取自 Levitus 年平均温度和盐度,全场水位、流速取为零。为了减小水平斜压梯度力的误差,在计算水平斜压梯度力时,模式密度扣除了水平平均密度。水平平均密度是由年平均密度水平平均得到。

模式首先进行气候态积分 10 a,作为模式启动阶段。在这一过程中,风场、热通量采用空间分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$  的 COADS 月平均统计结果,并在热通量中加入了简单大气反馈项进行修正<sup>[9]</sup>,

$$Q = Q_c + \left(\frac{dQ}{dT}\right)_c (T_c - T^m) \quad (2)$$

式中, $Q$  为热通量; $T^m$  为模式计算的海表温度; $T_c$  为大气温度;下标 C 表示来自于 CODAS 资料。

在气候态模拟的基础上,引入预报风场和热通量作为预报系统的驱动。自 2007 年 1 月 1 日开始进入试预报,自 2007 年 8 月 15 日起进入准业务预报,其中预报结果包括 24 h、48 h 和 72 h 等 3 个时段的预报(图 1)。本研究将利用 2008 年全年的预报结果与实测数据进行比较。

表 1 模式的垂直  $\sigma$  分层

Table 1 The vertical  $\sigma$  layers used in the model

层数	$\sigma$ 值	层数	$\sigma$ 值
1	0.000	12	-0.400
2	-0.002	13	-0.467
3	-0.004	14	-0.533
4	-0.008	15	-0.600
5	-0.017	16	-0.667
6	-0.033	17	-0.733
7	-0.067	18	-0.800
8	-0.133	19	-0.867
9	-0.200	20	-0.933
10	-0.267	21	-1.000
11	-0.333		

## 1.2 Argo 数据

Argo 观测网提供了全球大洋实时/准实时的温盐剖面数据,对于认识和了解海洋状况具有重要作用。本研究所用的 Argo 数据来自 Coriolis Argo 资料中心网站。由于时间关系,有些 Argo 数据未经过严格的延迟质量控制。未经延迟质量控制的温度数据误差较小,而盐度数据则可能存在较大偏差<sup>[10-11]</sup>。鉴于此,本文的对比研究只针对温度观测进行。选取 2008 年进入亚丁湾海域的 Argo 浮标数据与预报温度进行比较。由于预报模式分辨率较低,在 Argo 选取过程中未考虑距陆地太近的数据。本研究使用的 Argo 数据的观测位置如图 2 所示,其中黑色星号点表示观测位置,进入该区域的浮标共有 5 个,分别用不同颜色线条表示其漂移轨迹,其中浮标 2900808 观测次数最多(42 次),浮标 2900827 观测最少(3 次)。

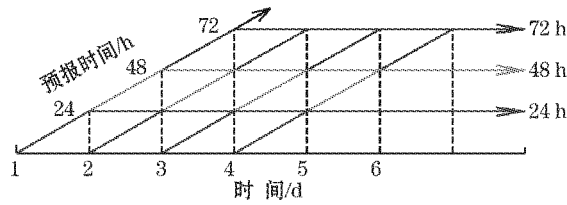


图 1 预报过程示意图

Fig. 1 Sketch showing the forecast process

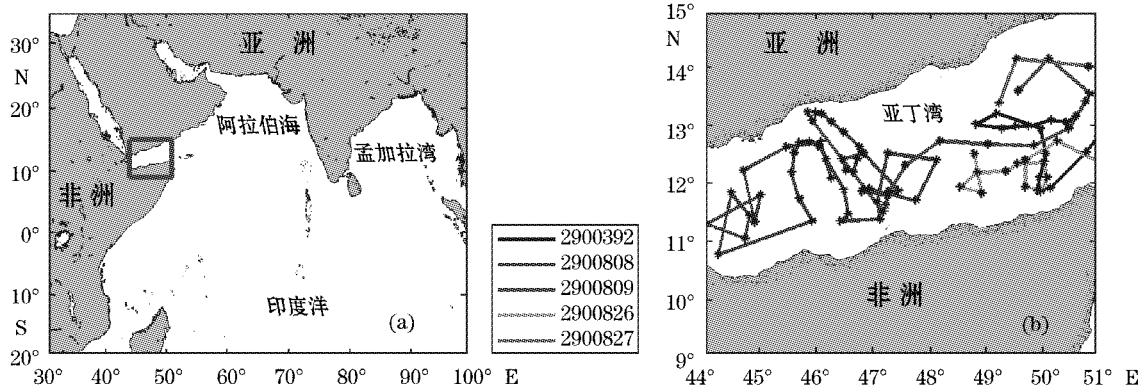


图 2 亚丁湾地理位置及其 2008 年进入该海域的 Argo 浮标运动轨迹

(a) 亚丁湾所在地理位置; (b) 2008 年进入亚丁湾海域 Argo 浮标的观测位置和运动轨迹

Fig. 2 The location of the Aden Gulf and the trajectories of the Argo floats in the Aden Gulf in 2008

(a) The location of the Aden Gulf; (b) The Argo float trajectories in the Aden Gulf in 2008

## 2 海温预报结果与观测结果比较

### 2.1 温度剖面比较

剖面比较是一种最直接的方法,可用于考察预报温度垂直结构与观测的一致性。为了保证分析的准确性,首先将预报结果插值到 Argo 观测位置,然后在观测位置上进行比较。由于在 2008 年的观测剖面较多,此处只给出了各季节的代表性月份(2 月、5 月、8 月和 11 月)的相应比较。在 2008 年进入亚丁湾海域的 Argo 浮标的全部观测位置上,24 h 和 48 h 预报之间的温度差异均小于 0.05 °C,24 h 和 72 h 预报之间的温度差异有所增加,但这些差异大部分小于 0.05 °C,部分较大的差异达到 0.2 °C 左右。从整体上看,24 h、48 h 和 72 h 预报的结果差异较小,因此,以下分析比较只针对 24 h 预报的结果进行。

2 月份进入该海域的浮标共有 18 次观测,相应的温度剖面如图 3 所示。其中圆圈表示 Argo 观测温度,星号点为预报温度。虽然模式分辨率较低,亚丁湾海域也并非该预报系统关注的海区,但预报温度结构与 Argo 观测相比仍较为吻合。预报结果与 Argo 观测相比,18 个温度剖面中的温跃层的垂向位置均得到了较好刻画。对于观测,除浮标 2900809 在 2 月 5 日的上混合层不明显外,其它观测均有上 100 m 左右的均匀层,而预报海温中的上层混合层略微偏弱;浮标 2900808 在 2 月 17 日—21 日中的 400~800 m 层观测有弱的逆温现象,预报结果也没有反映出来。

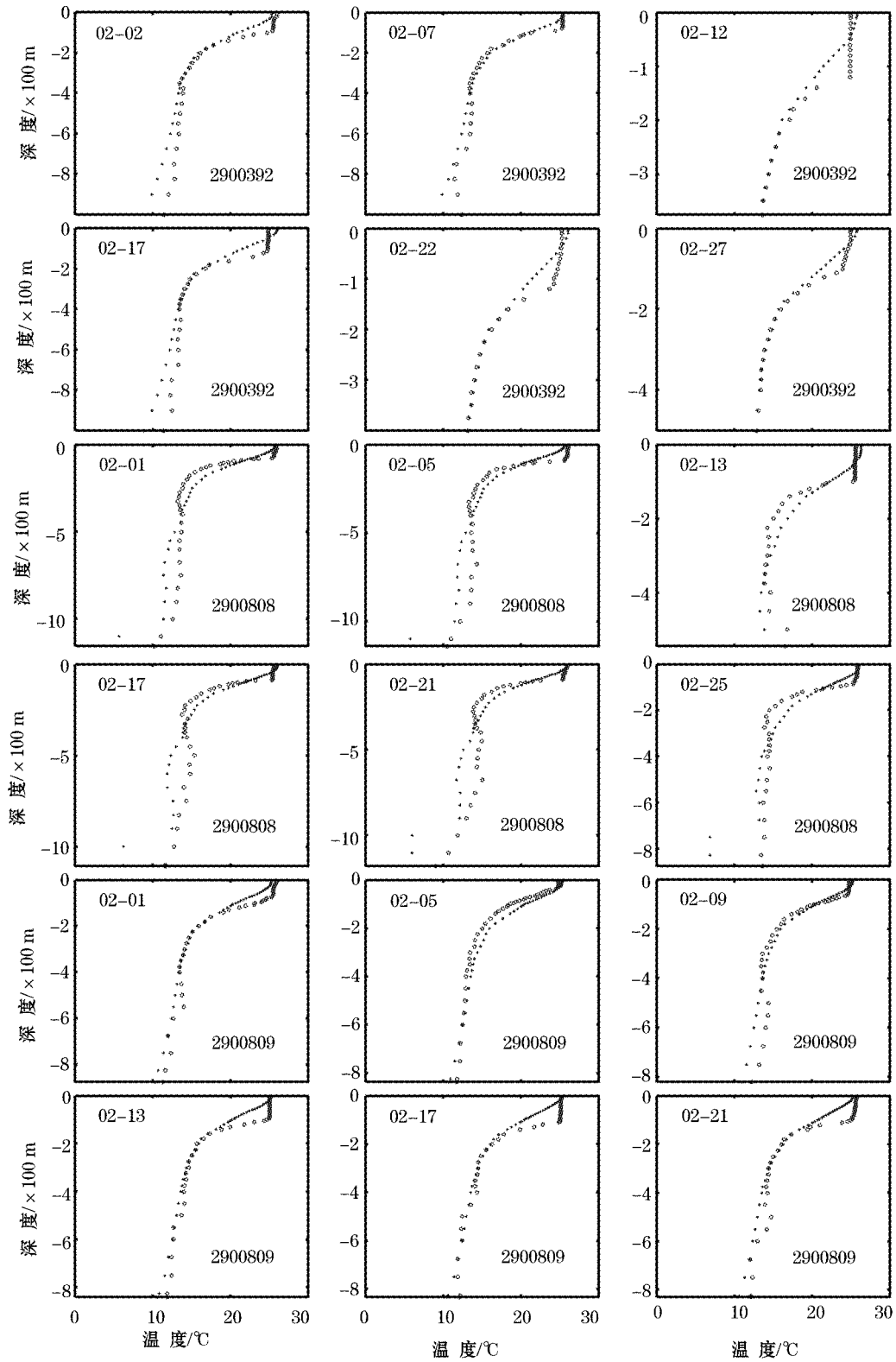


图3 冬季(2月份)进入亚丁湾海域的 Argo 浮标观测和预报温度剖面

(\*—预报结果,○—Argo 观测)

Fig. 3 The Argo temperature profiles in the Aden Gulf in winter and the related forecast ones (The asterisks are for the forecast results and the circles for the Argo profiles.)

5 月份进入该海域的浮标较少,只有 5 次剖面观测(图 4)。对于春季,上 200 m 浮标剖面观测与预报结果较为一致,但 5 月 3 日—7 日在水深 400~600 m 范围观测有逆温现象,5 月 11 日以后渐不明显,应该与盐度有关。

8 月份有 8 个浮标进入该海域,相应温度剖面如图 5 所示。预报结果与这 8 个浮标观测相比,除 8 月 23 日在浮标 2900808 位置上上层预报温度偏差较大外,温度的垂向结构在大部分浮标观测位置上均得到了较吻合的预报。

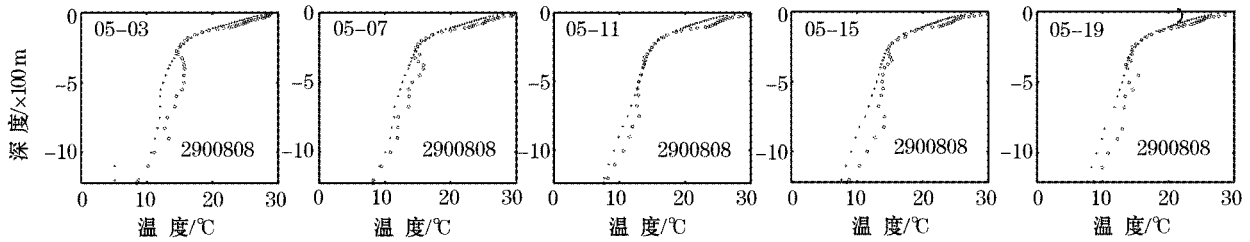


图 4 春季进入亚丁湾海域的 Argo 浮标观测和预报温度剖面  
(\*—预报结果,○—Argo 观测)

Fig. 4 The Argo temperature profiles in the Aden Gulf in spring and the related forecast ones  
(The asterisks are for the forecast results and the circles for the Argo profiles.)

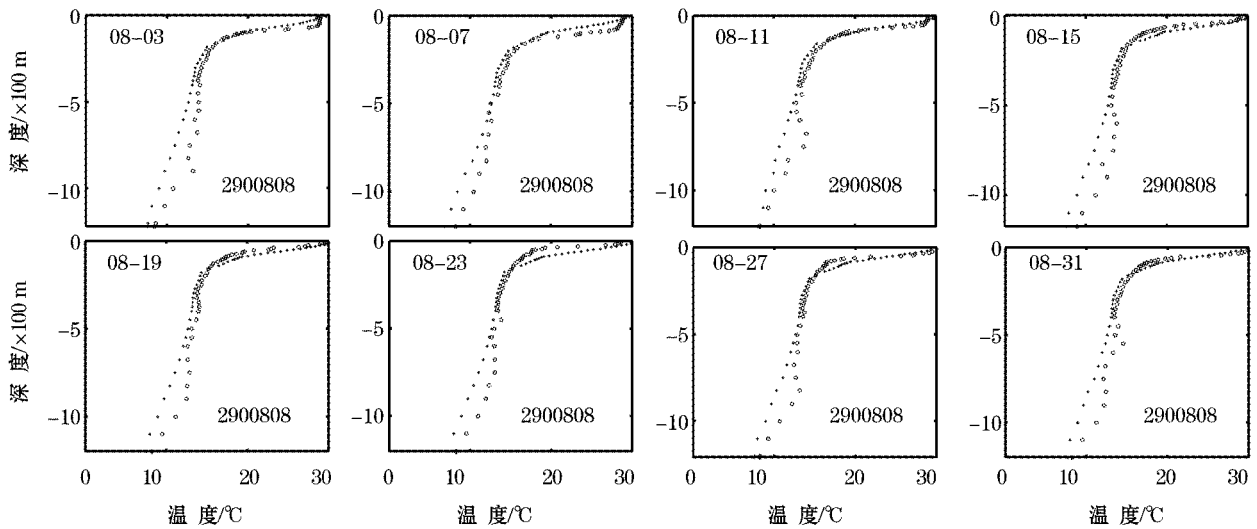


图 5 夏季进入亚丁湾海域的 Argo 浮标观测和预报温度剖面  
(\*—预报结果,○—Argo 观测)

Fig. 5 The Argo temperature profiles in the Aden Gulf in summer and the related forecast ones  
(The asterisks are for the forecast results and the circles for the Argo profiles.)

11 月份进入该海域的浮标也较少,只有 6 个剖面(图 6)。本月份的温度预报误差在整体上比其他月份偏大,但预报温度垂向结构也得到了较好的刻画。观测温度结构分布较为不光滑,其原因一方面,由于该月份的 Argo 数据较新,部分数据尚未经过严格的延时质量控制;另一方面,由于模式分辨率较低,垂向分层较少,无法较为细致地刻画温度的垂向结构。

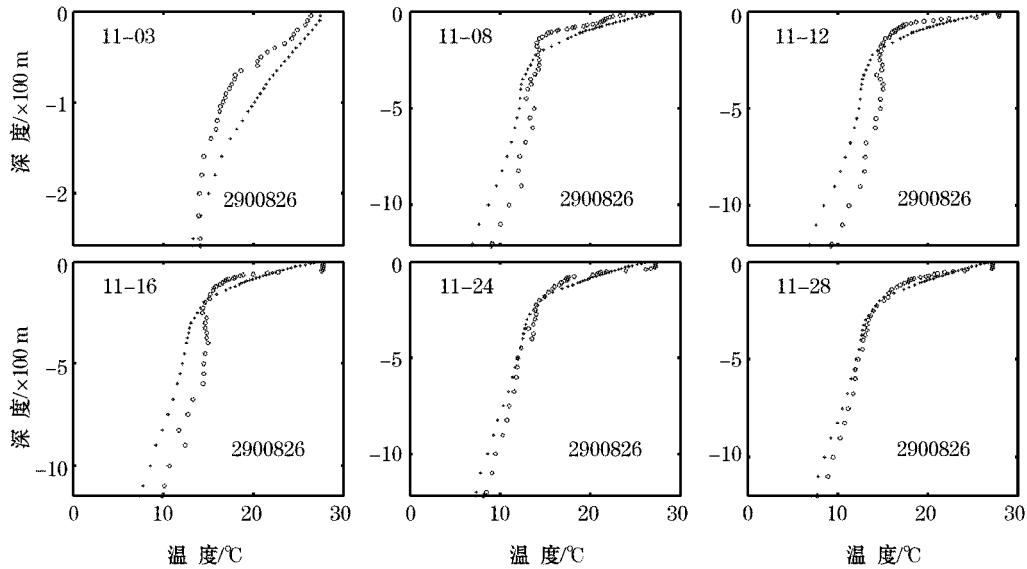


图 6 秋季进入亚丁湾海域的 Argo 浮标观测和预报温度剖面  
(\*—预报结果,○—Argo 观测)

Fig. 6 The Argo temperature profiles in the Aden Gulf in autumn and the related forecast ones  
(The asterisks are for the forecast results and the circles for the Argo profiles.)

综合上述比较,该系统成功预报出了与 Argo 实际观测温度剖面具有一定吻合度的垂向结构,温度误差在各个季节上无显著的季节变化。由于水平分辨率较低,垂向分层在温跃层附近层数偏少,导致温度的垂向分布中较为细致的结构不能得到充分的刻画。

## 2.2 温度误差统计

作为整体的温度对比状况,图 7a 给出了观测温度和预报温度之间的散点图。散点图上的点主要集中在虚线所示的对角线附近,说明预报温度和观测温度有较好的一致性。由于观测点较多,散点图中所看到的点上并非代表一个点,可能有多个点。单纯从散点图出发,很难对预报温度误差的分布有一个更清楚的了解。因此,我们对对预报与观测温度之间的误差进行了统计,定量分析预报结果相对 Argo 浮标观测数据的整体可靠性。图 7b 给出了海洋上层(100 m 以浅)和海洋下层(100 m 以深)相应的温度误差的概率密度分布情况。统计分析显示在海洋下层有 75% 的温度误差分布在 $\pm 1^\circ\text{C}$  范围内(图 7b 中的 2 条虚划线之间),海洋上层的温度误差在该范围占 67%。由于下层海水的运动相对上层海水较为缓慢,温度变化也相对较小,对下层海水温度的预报较易得到较好的结果。海洋上层存在各种复杂的动力过程,往往存在温跃层现象,这使得对上层海温的预报具有更为重要的意义。温度误差的概率密度分布表明该预报系统不仅能够较为准确的预报下层海水温度,而且对海洋上层也具有较好的预报能力,能够对海水温度垂向结构进行较为可靠的预报。

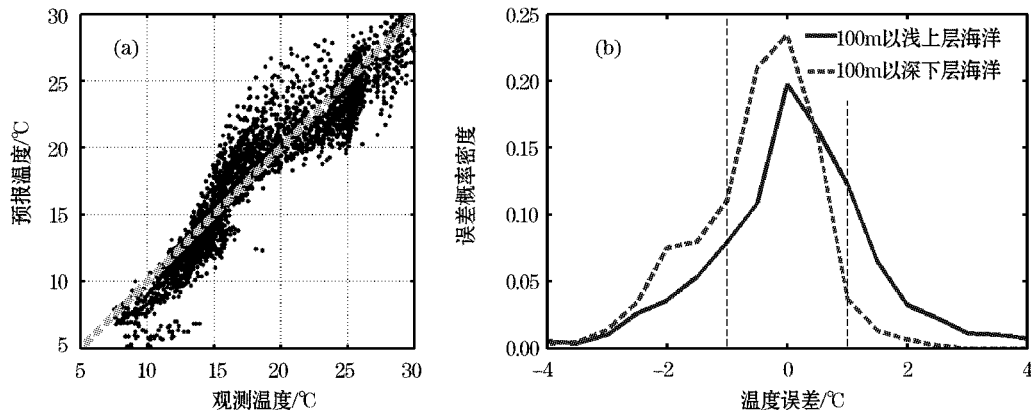


图7 观测温度与预报温度的整体比较

(a)观测温度与预报温度散点图;(b)预报温度误差的概率分布统计图

Fig. 7 The comparison between the observed and forecasted temperatures.

(a) The scatter points for the observed and forecasted temperatures; (b) the probability distribution of the deviant in the forecast temperatures.

### 3 结 语

本研究利用2008年进入亚丁湾海域的Argo剖面观测,对全球环流预报系统在亚丁湾海域的预报结果进行了检验研究。比较结果表明:预报温度剖面结构与Argo观测结果较为吻合,预报误差随季节无显著变化。温度预报误差的统计分析也显示该预报系统在亚丁湾海域的预报结果具有较高的精度,在100 m以深的海洋下层有75%的温度误差分布在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内,而100 m以浅的海洋上层的温度误差在该范围占67%。该预报系统能够对该海域的温度垂向结构进行有效预报。

比较结果还显示该预报结果也存在一定缺陷,如上层混合略偏弱,剖面中的逆温现象没有在预报中反映出来等。虽然该预报系统采用浪一流耦合模式,改进了海洋的上层结构,但是由于该系统是针对全球区域海洋环流设计的,其水平分辨率较粗,垂向分层也较少,而且在预报过程中对北印度洋区域的径流、蒸发降水、以及热通量等因素的考虑不够充分。上述这些因素也正是造成海洋上层结构出现误差的原因。在即将开发改进的高分辨率海洋环流预报系统中,不但要提高水平和垂向的分辨率,径流、蒸发和降水等质量通量,以及热通量等也需要进一步补充和完善。

致谢:Coriolis Argo 资料中心提供的准实时 Argo 数据。

### 参考文献(References):

- [1] QIAO F L, YUAN Y L, YANG Y Z, et al. Wave induced mixing in the upper ocean: Distribution and application to a global ocean circulation model [J]. *Geophys. Res. Lett.* 2004, 31, L11303, doi:10.1029/2004GL019824.
- [2] YUAN Y L, QIAO F L, HUA F, et al. The development of a coastal circulation numerical model; 1. Wave-induced mixing and wave-current interaction [J]. *J. Hydrodynamics, Ser. A.* 1999, 14(4B): 1-8. 袁业立, 乔方利, 华锋, 等. 近海环流数值模式的建立, 部分1: 海浪的搅拌和波-流相互作用 [J], *水动力学研究与进展: A 辑*, 1999, 14(4B): 1-8.
- [3] YANG Y Z, QIAO F L, ZHAO W, et al. MASNUM ocean wave numerical model in spherical coordinates and its application [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(2): 1-7. 杨永增, 乔方利, 赵伟, 等. 球坐标系下 MASNUM 海浪数值模式的建立及其应用 [J], *海洋学报*, 2005, 27(2): 1-7.
- [4] KAFIMOTO T, YAMAGATA T. Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation [J]. *J. Phys. Ocean*, 1997, 27:

403-418.

- [5] EZER T, MELLOR G L. Simulation of the Atlantic Ocean with a free surface sigma coordinate ocean model [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, 102: 15647-15657.
- [6] GUO X Y, HUKUDA H, MIYAZAWA Y, et al. A triply nested ocean model for simulating the Kuroshio-roles of horizontal resolution and JEBAR [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 2003, 33: 146-169.
- [7] XIA C S, QIAO F L, ZHANG Q H, et al. Numerical modeling of the quasi-global ocean circulation based on POM [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2004, 16(5): 537-543.
- [8] MELLOR G L. User's guide for a three-dimensional, primitive equation, numerical ocean model [M]. Princeton: Program in Atmospheric and Oceanic Sciences, Princeton University, 1992.
- [9] HANEY R L. Surface thermal boundary condition for ocean circulation models [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 1971, 1: 241-248.
- [10] WONG A P S, JOHNSON G C, OWENS W B. Delayed mode calibration of autonomous CTD profiling float salinity data by  $\theta$ -s climatology [J]. *J Atmosph and Oceanic Tech*, 2003, 20: 308-318.
- [11] LIU Z H, XU J P, ZHU B K. Observing process of an Argo profiling float and discussion on its data application [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2008, 27(4): 66-72. 刘增宏,许建平,朱伯康. 一个 Argo 剖面浮标的观测过程及其资料应用探讨 [J], *热带海洋学报*, 2008, 27(4): 66-72.

## Comparative Study on Results Respectively From Numerical Prediction and Argo Temperature-observation in Aden Gulf

YIN Xun-qiang<sup>1,2,3</sup>, QIAO Fang-li<sup>2,3</sup>, XIA Chang-shui<sup>2,3</sup>, YANG Yong-zeng<sup>2,3</sup>, WANG Guan-suo<sup>2,3</sup>

(1. *College of Physical and Environmental Oceanography, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;*

2. *First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;* 3. *Key Lab of Marine Science and*

*Numerical Modeling, SOA, Qingdao 266061, China)*

**Abstract:** The Aden Gulf is located in the west of the Indian Ocean, and it is an important region for marine transportation. A variety of the variations of the marine properties with the complicated movements in the water, which have their important effects on marine navigation, can be found in the Aden Gulf. This comparative study is focused on the Aden Gulf in order to compare the results from the wave-circulation coupling model in the global ocean circulation prediction system with the results from the real time/near real time Argo data observed in 2008. The comparative analyses include the comparison between the results from the prediction and the Argo profiles observed in the typical months respectively for various seasons, and the statistical analysis of the predicted temperature deviation from the Argo observational temperature for one year around in 2008. It is learnt from the comparison that the results from the prediction are better consistent with the Argo observed profiles, with the entire predicted values deviated insignificantly from the Argo measurements. 75% of the deviants are limited within  $\pm 1$  °C in the lower depths below 100 m, and 67% of deviants within  $\pm 1$  °C in the upper depths above the 100 m. Some deficiency in the prediction is that the upper layer mixing becomes weakened, and the temperature inversions are not reflected, and some others. The reasons for the deficiency need further studying. One reason might be that the model has its insufficiently high resolution. The results from this study might be useful in setting up a higher resolution system for ocean circulation prediction in the future.

**Key words:** global oceanic general circulation forecast system; the Aden Gulf area; Argo data

**Received:** August 11, 2009