

再分析数据集模拟印尼贯穿流的验证研究

李奥杰¹, 张永垂^{1,2*}, 胡王江¹, 王宁¹, 洪梅^{1,2}, 闫恒乾¹

(1. 国防科技大学气象海洋学院 湖南 长沙 410073; 2. 中国气象局高影响天气重点开放实验室 湖南 长沙 410073)

摘 要: 印尼贯穿流(ITF)连通着太平洋和印度洋,且具有显著的时空变化特征,但现有再分析数据集对其描述的能力尚不清楚。利用布放在入流和出流的系泊潜标,对多套再分析数据模拟的ITF流场结构、最大流速、最大流速深度等要素变化特征进行验证。结果表明:CMEMS再分析数据表现较好,在望加锡海峡、帝汶海峡和翁拜海峡处与观测数据的相关系数分别为0.70、0.50和0.42,能够再现ITF对气候事件的响应;HYCOM再分析数据表现次之,其主要缺点是不能模拟出帝汶海峡和翁拜海峡300 m以下的流场结构;OFES再分析数据对望加锡海峡和翁拜海峡流速的模拟均偏小。

关键词: 印尼贯穿流;海峡通道;系泊数据;再分析数据;数据验证

中图分类号: P731.35 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2025)04-0011-15

0 引言

印尼贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF)是低纬度海域唯一一支沟通两个大洋盆地的海流,可以将温暖低盐的太平洋水输入印度洋。ITF流速强劲,体积和热量年平均输运分别达到15 Sv(1 Sv= $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)和0.24~1.15 PW(1 PW= 10^{15} W),对流经的海峡通道和相关海域的水团性质和温盐结构变化都有重要影响^[1-3]。

ITF主要的入流通道为望加锡海峡,约占流入水体体积的59%~77%^[4-6],是ITF从苏拉威西海进入印尼海域的中部路径^[6]。INSTANT (International Nusantara Stratification and Transport)观测项目和ITF观测(Monitoring the ITF, MITF)项目分别在2004年1月—2006年11月和2006年11月—2017年8月观测了望加锡海峡40~760 m的流场^[5,7-8]。ITF主要的出流通道为帝汶海峡和翁拜海峡,占流出水体体积的80%^[9]。澳大利亚的综合海洋观测系统(Integrated Marine Observing System, IMOS)项目在

ITF出流海域进行了观测^[10]。研究结果表明^[11],帝汶海峡和翁拜海峡的流出水体分别有45%和75%来自望加锡海峡(连接ITF的中部路径),41%和19%来自利法马拖拉海峡(连接ITF的东部路径)。

系泊观测数据受空间分布稀疏、时间范围短等客观因素制约,无法揭示ITF海峡流场的精细化特征。随着数值模拟和同化技术的提升,高分辨率的再分析数据越来越多地被应用于ITF流场的研究^[12-17]。但由于印尼海域地形特殊,流场特征复杂,不同的再分析数据产品对ITF的模拟存在一定的差异,如与实测的ITF整层流量变化的相关系数不一致^[14-15,17-19]。鉴于此,迫切需要定量评估各种再分析数据产品刻画ITF的能力,为印尼海的相关研究提供可靠的再分析数据支撑。

本研究利用目前所能获取的ITF重要海峡通道的系泊数据对多套再分析数据集进行验证,主要聚焦于关键的入流海峡(望加锡海峡)和出流海峡(帝汶海峡和翁拜海峡)。受系泊观测深度限制,分别对望加锡海峡760 m、翁拜海峡和帝汶海峡520 m以

收稿日期: 2024-05-06。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(42206205)。

作者简介: 李奥杰(2000-),男,硕士研究生,主要从事物理海洋学研究。E-mail: liaojie18@nudt.edu.cn

*通信作者: 张永垂(1982-),男,副教授,博士,主要从事海洋中小尺度过程及其应用研究。E-mail: zyc@nudt.edu.cn

浅的流场进行验证。

1 数据和方法

1.1 系泊数据

望加锡海峡系泊数据来自 INSTANT 和 MITF 观测项目,帝汶海峡和翁拜海峡系泊数据来自 IMOS 项目^[10]。

1.1.1 INSTANT 项目

2004年1月,作为 INSTANT 项目的一部分,研究团队在望加锡海峡部署了两个系泊站点(见图1), $2^{\circ}51.9'S$ 、 $118^{\circ}27.3'E$ 和 $2^{\circ}51.5'S$ 、 $118^{\circ}37.7'E$ ^[1,7],以观测 ITF 的主要入流;2005年7月和2006年11月还分别进行了观测设备的回收和重新布放。系泊数据每30 min记录1次三维速度分量。本研究使用了2004年1月—2006年11月的 INSTANT 数据。

1.1.2 MITF 项目

2006年11月22日,作为 MITF 计划的一部分,研究人员在 $2^{\circ}51.9'S$ 、 $118^{\circ}27.3'E$ 位置部署了一个系泊。MITF 计划每两年重新部署一次。由于设备信号传输问题,2011年8月—2013年8月的数据缺失^[4]。在系泊位置,向上和向下的声学多普勒海流剖面仪(Acoustic Doppler Current Profiler, ADCP)分别放置在463 m和487 m处。在整个观测期间,ADCP 位置略有变化,但大致保持不变。2015年8月,两个可以快速测量温度梯度谱的小型自主仪器(χ -pods)被放置在 ADCP 同一位置以观测温度微观结构^[4]。本研究使用了2006年11月—2011年8月和2013年8月—2017年8月的 MITF 数据。

1.1.3 IMOS 项目

IMOS 项目提供了温度、盐度、溶解氧、叶绿素估算值、浊度、下潜光合光子通量和流速等参数以及深度和压力数据。观测设备包括温度仪、温盐深仪、水质监测仪、ADCP 和单点流速仪等。在本研究中,翁拜海峡使用了 $125.08^{\circ}E$ 、 $8.52^{\circ}S$ 位置处的单点系泊数据(见图1),时间范围为2011年6月19日—2015年10月21日;帝汶海峡使用了帝汶北坡($127.35^{\circ}E$ 、 $9.27^{\circ}S$)的系泊数据(见图1),时间范围为2011年6月14日—2014年4月15日。两个系泊数据的时间分辨率均为逐小时,垂直深度为520 m。

1.2 再分析数据

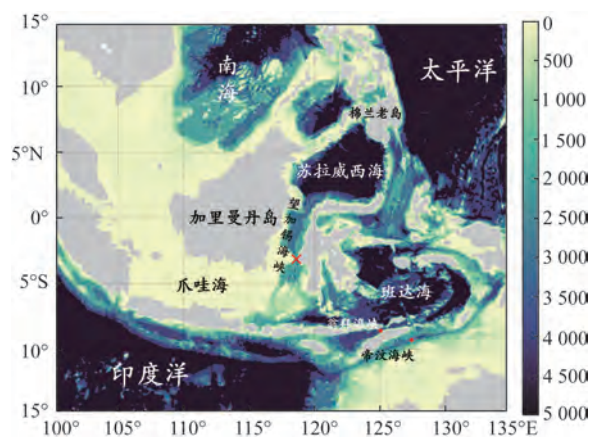
本研究评估了3套再分析数据集(见表1),分别为哥白尼海洋环境监测服务(Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS)、混合坐标海洋模型(HYbrid Coordinate Ocean Model, HYCOM)和涡解高精度海洋模式(OGCM For Earth Simulator, OFES)。

1.2.1 CMEMS

CMEMS 使用版本为 GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 的月平均全球再分析数据。该数据在深海、海岸和大陆架的地形配置分别为 ETOPO1 和 GEBCO8,采用的大气强迫为欧洲中期天气预报中心第五代再分析数据集(ECMWF's Fifth Generation Atmospheric Reanalysis of the Global Climate, ERA5)。空间分辨率为 $1/12^{\circ} \times 1/12^{\circ}$ (赤道约为 $8\text{ km} \times 8\text{ km}$),垂直分辨率为50层。同化资料主要包括沿轨高度计数据、卫星海面温度、海冰覆盖率及系泊观测温度和盐度垂直剖面数据。本研究采用其1993—2019年的逐月数据。

1.2.2 HYCOM

HYCOM 在1993—2012年、2013—2017年和2018—2019年分别采用了 GLBu0.08/expt_19.0、GLBu0.08/expt_90.9 和 GLBv0.08/expt_93.0 版本。该再分析数据采用美国海军研究实验室(United



注: × 为望加锡海峡的系泊点位;从北至南两个 • 分别为翁拜海峡和帝汶海峡的系泊点位

图1 印尼海域地形和各系泊位置信息

Fig.1 Topography of Indonesian Sea and mooring location information

States Naval Research Laboratory, NRL)提供的实测地形测量数据,大气强迫场为美国环境预测中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)、气候预报系统再分析(Climat Forecast System Reanalysis, CFSR)和第二版气候预报系统(Climat Forecast System version 2, CFSv2)的逐小时数据。水平分辨率为 $0.08^{\circ} \times 0.08^{\circ}$,垂直分层为40层。同化资料主要包括卫星高度计、卫星和原位海面温度及抛弃式温深剖面仪(Expendable Bathythermograph, XBT)、地转海洋学实时观测阵(Array for Real-time Geostrophic Oceanography, Argo)浮标和系泊浮标温度和盐度垂直剖面数据。本研究采用其1993—2019年的逐日数据。

1.2.3 OFES

OFES采用了南安普顿海洋中心 OCCAM 计划 $1/30^{\circ}$ 的地形测量数据,是NCEP和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)提供的风强迫场下的全球再分析数据。水平分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$,垂向分层为54层,时间范围超过50年。本研究采用其1993—2017年的逐月数据。

1.3 方法

由于系泊数据和再分析数据的时间和空间分辨率均不同,需要对不同的数据集进行统一。对于时间分辨率,将所有的系泊数据和非逐月的再分析数据进行月内平均,进一步处理成为逐月流速数据;对于空间分辨率,在同一系泊位置处,所有的再

分析数据均选取接近系泊点位的格点数据,并且在深度上均按照系泊数据的深度设置进行插值。此外,在望加锡海峡位置处,仅考虑 INSTANT 和 MITF 同一位置处的系泊数据;同时,由于再分析数据的分布在海洋上层更加密集,因此采用一维线性插值策略,即根据某个时间点靠近系泊点位的再分析数据序列中需要插值的点的左右邻近两个数据点来进行数值估计。

1.3.1 线性相关

使用线性相关系数度量两变量之间的相关关系,该方法普遍应用于相关性研究^[14-17]。设有两个要素 x 与 y ,同时观测了 n 次,得到两组样本数据,则两个变量的样本协方差公式为:

$$s_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \quad (1)$$

式中: $\bar{x}$ 与 $\bar{y}$ 分别为两变量 x 与 y 的样本平均值。协方差可以描述两变量的相互依赖关系。由于两个变量 x 与 y 的单位往往是不同的,为了消除单位对其协方差的影响,常采用标准化变量的协方差来表示,公式为:

$$\rho = \text{Cov}(x^0, y^0) = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (2)$$

式中: ρ 为两变量的相关系数, x^0 与 y^0 为标准化变量。因此,相关系数实际上是标准化变量的协方差。

样本相关系数 r_{xy} 可以记为:

$$r_{xy} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}}{s_y} \right) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^0 y_i^0 \quad (3)$$

表1 CMEMS、HYCOM和OFES再分析数据集配置对比

Tab.1 CMEMS, HYCOM and OFES reanalysis datasets configuration comparison

类别	CMEMS	HYCOM	OFES
空间分辨率	1/12°	0.08°	0.1°
0~300 m	28	25	25
垂直分层			
300~760 m	5	5	7
地形配置	ETOPO1-深海 GEBCO8-海岸和大陆架	NRL 提供的实测地形测量数据	南安普顿海洋中心 OCCAM 计划 1/30° 的地形测量数据
大气强迫	ERA-Interim; ERA5 逐小时数据(2019 年起)	NCEP、CFSR 和 CFSv2 的逐小时数据	NCEP/NCAR 再分析月平均数据
同化资料	沿轨高度计数据、卫星海面温度、 海冰覆盖率、系泊观测温度和盐 度垂直剖面数据	卫星高度计、卫星和原位海面温度及 XBT、Argo 浮标和系泊浮标温度和 盐度垂直剖面数据	—

由于相关系数与两变量的单位无关,因此,可以用来度量两变量的相关关系,而且任意两变量的关系可以相互比较。相关系数具有对称性,即 $r_{xy} = r_{yx}$,且有 $-1 \leq r_{xy} \leq 1$ 的性质。

1.3.2 显著性检验

相关系数是衡量两个变量相关关系密切程度的数量指标,其大小与样本容量 n 有关,因此,它是否显著也要作统计检验。对于两个总体不相关的随机变量(即 $\rho = 0$),由于随机抽样的原因,两样本相关系数 r 并不等于0,而是一个随机变量。为此,在假设总体相关系数 $\rho = 0$ 的情况下,我们检验样本相关系数 r 和0是否有显著性差异。在原假设 $H_0: \rho = 0$ 成立的条件下可以证明统计量:

$$t = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} \quad (4)$$

服从自由度为 $n-2$ 的 t -分布。当给定 α 的显著水平,根据自由度查 t -分布表,可得临界值 t_{α} 。 $|t| \geq t_{\alpha}$ 时,否定原假设,可认为相关系数是显著的; $|t| < t_{\alpha}$ 则接受假设,相关系数不显著。

1.3.3 均方根误差

为了反映模拟流速和观测流速的差异,可以计算均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE, 记作 E_{RMS}),其值越小,表明两者越接近。计算公式为:

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - T_i)^2} \quad (5)$$

式中: N 表示样本个数; Y_i 表示实测值; T_i 表示各再分析数据的对比值。

2 再分析数据集模拟印尼贯穿流的对比结果

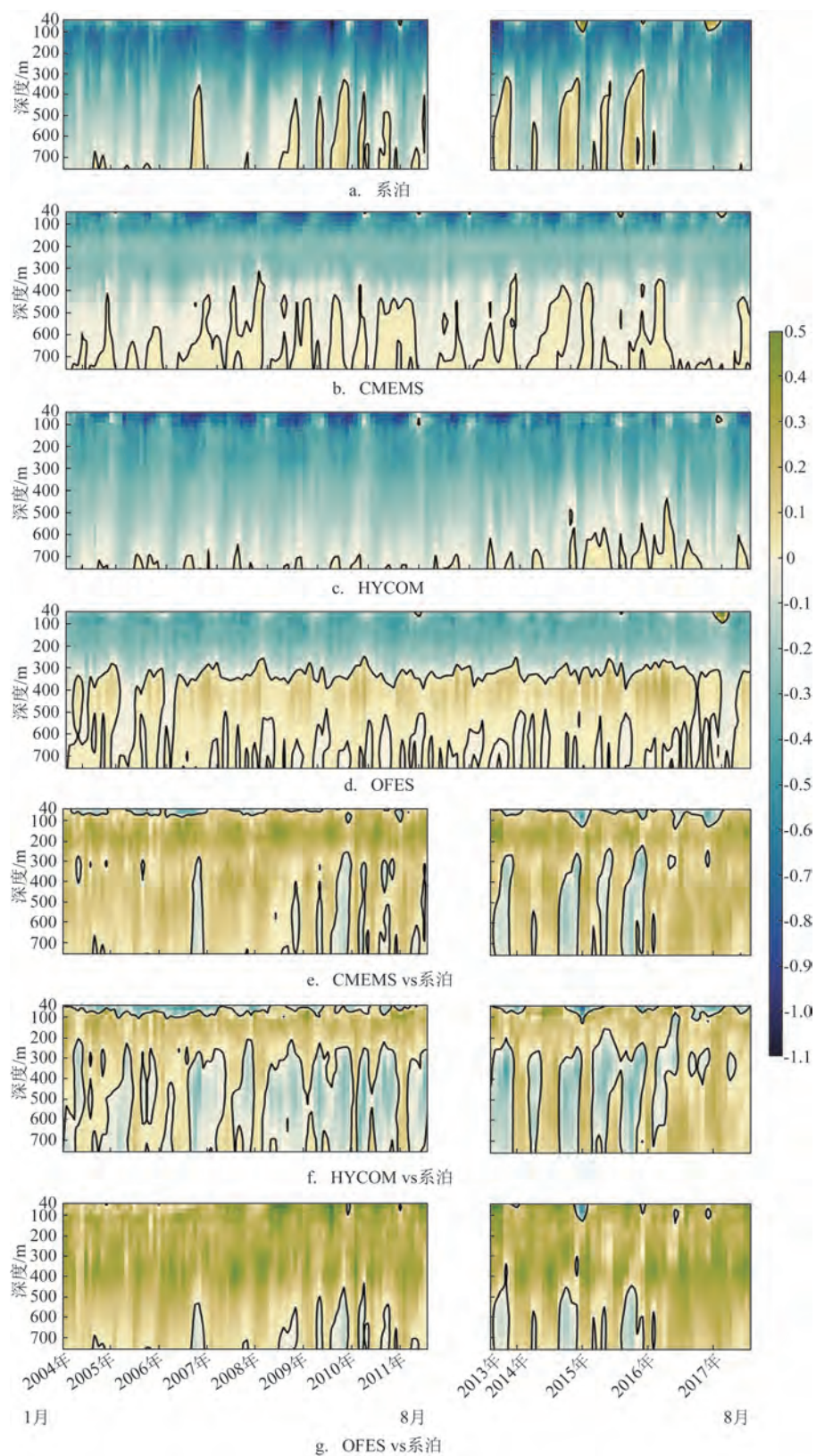
2.1 望加锡海峡

图2为两段时间内系泊观测数据与再分析结果的详细对比和差异情况。从系泊数据来看(见图2a),在40~300 m处,较强的南向流主要分布在2004—2011年的2—10月、2013—2016年的2—10月以及2017年3—8月,200 m以浅的南向流速大于0.8 m/s。这其中,2008年6月和2009年6—7月150 m以浅的南向流速大于1.1 m/s。在300~760 m处,较弱的南向流分布在每年的3—5月和8—11月。

CMEMS再分析数据在40~300 m与系泊数据较为接近,其中南向流速在近表层较强,100~300 m处普遍较弱;北向流速略弱于系泊数据,300 m以深的南向和北向流速均弱于系泊数据(见图2b和2e)。HYCOM再分析数据在40~300 m处与系泊数据相对接近,但南向流速在近表层较强、100~300 m处较弱;300~760 m处南向流动较强、北向流动较弱,300 m以深的北向流速普遍弱于系泊数据(见图2c和2f)。OFES再分析数据的南向流速在40~300 m处普遍较弱,流速差值达到0.5 m/s以上;300~760 m处的北向流速较强(见图2d和2g)。对比3套再分析数据结果(见表2),CMEMS和HYCOM再分析数据的表现相当,OFES再分析数据的表现较差。具体来看,在40~760 m、40~300 m以及300~760 m处深度上,CMEMS再分析数据与系泊数据的相关系数分别为0.70、0.87和0.72;HYCOM再分析数据与系泊数据的RMSE分别为0.07 m/s、0.09 m/s和0.10 m/s;而OFES再分析数据虽与系泊数据相关性较好,但其RMSE较大,均达到0.19 m/s及以上。

为了比较3种再分析数据集对极值流速的模拟水平,图3显示了系泊位置最大南向流速及其深度随时间的变化情况。从最大南向流速来看(见图3a),CMEMS和HYCOM再分析数据的模拟效果较好,而OFES再分析数据普遍偏小,尤其是在2009年8月,系泊数据、CMEMS和HYCOM再分析数据的南向最大流速分别为1.07 m/s、0.92 m/s和0.96 m/s,而OFES再分析数据为0.41 m/s。通过相关性分析可知,CMEMS和HYCOM再分析数据与系泊数据前半段(2004年1月—2011年8月)/后半段(2013年8月—2017年8月)的相关系数分别为0.85/0.88和0.73/0.78,而OFES再分析数据的相关系数为0.64/0.68。在最大南向流速随深度的变化上(见图3b),CMEMS再分析数据的模拟效果较好。通过相关性分析可知,CMEMS、HYCOM和OFES再分析数据与系泊数据前/后半段的相关系数分别为0.68/0.54、0.23/0.48和0.39/0.36,除前半段的HYCOM模拟外,其他模拟结果均通过95%显著性检验。

为了更加清晰地对比不同数据之间的流场差异,选取了不同深度的流速随时间的变化情况进行比较(见图4)。参照Gordon等^[4]对望加锡海峡系泊数据的研究,选取了40 m、100 m和340 m 3个深度。



注:a—d中负(正)值表示向南(北)流速;e—g中负(正)值表示南向流速大(小)于系泊数据;黑色等值线表示值为0。

图2 望加锡海峡系泊位置流速(单位:m/s)

Fig.2 Flow velocity at Makassar Strait mooring position (unit:m/s)

表2 再分析数据集与系泊数据的相关系数(R)和均方根误差(RMSE)

Tab.2 Correlation coefficient and RMSE between the reanalysis datasets and the mooring data

位置	深度/m	R/RMSE(单位:m/s)		
		CMEMS	HYCOM	OFES
望加锡海峡	40~760	0.70/0.13	0.47/0.07	0.68/0.21
	40~300	0.87/0.18	0.81/0.09	0.73/0.28
	300~760	0.72/0.12	0.35/0.10	0.72/0.19
帝汶海峡	30~520	0.50/0.05	0.25/0.04	0.36/0.04
	30~300	0.54/0.07	0.56/0.04	0.34/0.04
	300~520	0.65/0.05	0.14/0.05	0.59/0.07
翁拜海峡	30~520	0.42/0.24	0.39/0.19	0.49/0.35
	30~300	0.55/0.21	0.58/0.17	0.62/0.41
	300~520	0.76/0.15	0.56/0.12	0.76/0.19

在 40 m 处(见图 4a), CMEMS 和 HYCOM 再分析数据的模拟效果均较好, 与系泊数据的流速变化趋势较符合, 即在 1—8 月逐渐减小, 9—12 月又逐渐增大; OFES 再分析数据在整体上与系泊数据变化一致, 但流速较小。在 100 m 处(见图 4b), HYCOM 再分析数据的模拟效果相对较好, 而 CMEMS 和 OFES 再分析数据的流速相对较小。在 340 m 处(见图 4c), CMEMS 和 HYCOM 再分析数据的模拟效果较好, 而 OFES 再分析数据的流速仍较小。

综合以上 ITF 重要入流处望加锡海峡的对比结果, CMEMS 和 HYCOM 再分析数据的模拟效果相当, 优于 OFES 再分析数据。其原因可能与不同再分析数据同化的观测资料有关。CMEMS 和 HYCOM 再分析数据同化了卫星和系泊的多种观测数据(见表 1), 而 OFES 再分析数据同化的观测资料较为欠缺, 进一步导致了对本身观测数据较少的望加锡海峡的模拟效果较差。

2.2 帝汶海峡

图 5 显示了帝汶海峡系泊观测数据和 3 套再分析数据集在 2011 年 6 月—2014 年 4 月的对比和差异情况。从系泊数据来看(见图 5a), 在 30~200 m 处, 较强的西向流动主要存在于 2011 年 6—8 月的 30~40 m 处, 2011—2013 年的 9—10 月和 2012—2013 年的 3—6 月的 30~80 m 处, 其中 2012 年 4—5 月 30~50 m 的西向流速超过 0.5 m/s。在 200~520 m 处,

2011 年 6—7 月和 9—11 月、2012—2013 年的 4—11 月存在较弱的西向流动。CMEMS 再分析数据对 30~200 m 的模拟效果较好, 但西向流速整体偏大, 差值在 0.2 m/s 以下; 而在 200~520 m 处东向流动的模拟效果较差, 未表现出显著的东向流动特征(见图 5b 和 5e)。HYCOM 再分析数据在 30~200 m 表现出与系泊数据相近的西向流速, 在较强的西向流动区还表现出 0.1 m/s 的更强流速; 但在 200~520 m 处的模拟效果较差, 东向流动同样不显著(见图 5c 和 5f)。OFES 再分析数据在 30~200 m 处的西向流更强, 差值达到 0.2 m/s; 在 200~520 m 处的东向流更强, 差值达到 0.2 m/s 以上(见图 5d 和 5g)。对比 3 套再分析数据的结果(见表 2), CMEMS 和 OFES 再分析数据的模拟效果较好, HYCOM 再分析数据较差。CMEMS 再分析数据在 30~520 m、30~300 m 以及 300~520 m 与系泊数据的相关系数分别为 0.50、0.54 以及 0.65, 且 RMSE 均在 0.07 m/s 及以下; OFES 再分析数据的表现与 CMEMS 较为接近, 两者均可以较好地模拟帝汶海峡西向流速的相位变化; 而 HYCOM 再分析数据在 30~300 m 处与系泊数据的相关性较好, 相关系数达到 0.56, 但在 300~520 m 处的相关性较差, 其在模拟帝汶海峡下层西向流速变化中的表现较差。

从系泊数据的最大西向流速来看(见图 6a), 3 套再分析数据集与系泊数据的最大幅度和相位均能较好地对应。这其中, CMEMS 再分析数据的模

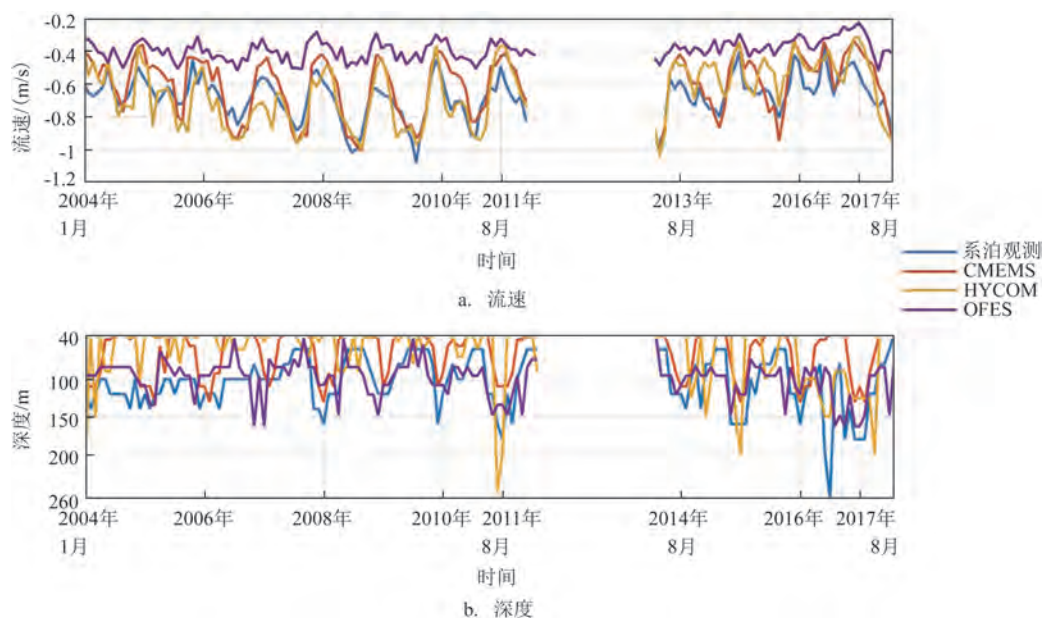


图3 望加锡海峡系泊位置处流场信息对比

Fig.3 Comparison of flow field at the mooring position of Makassar Strait

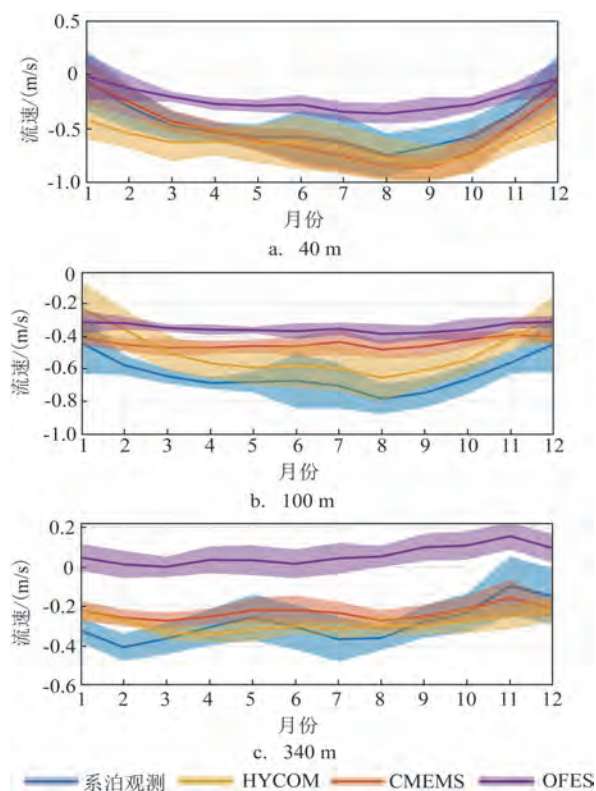


图4 望加锡海峡系泊位置不同深度处流速的逐月变化 (阴影表示标准差)

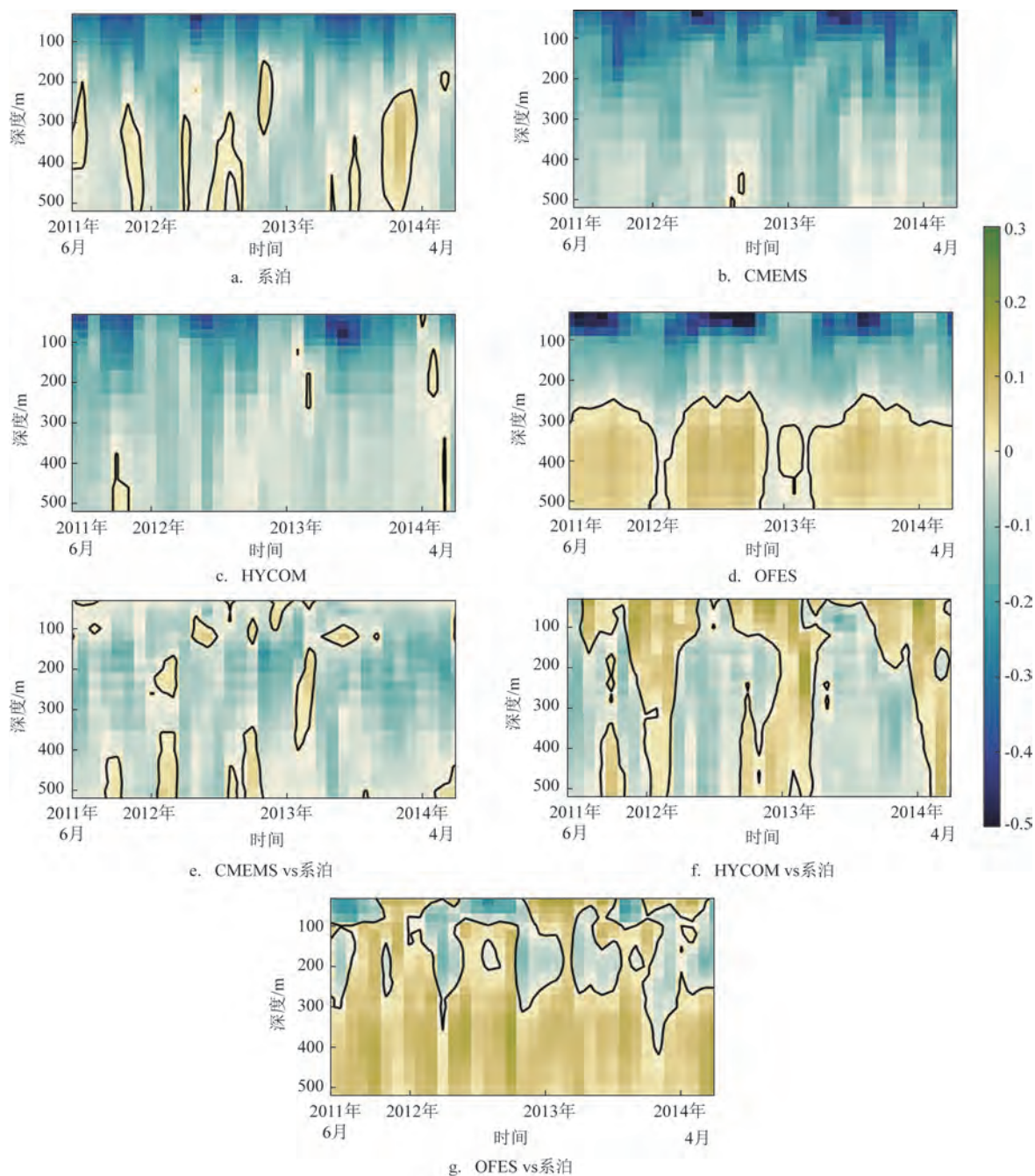
Fig.4 Monthly variation of Makassar Strait mooring location flow velocity at different depths (Shadows represent standard deviations)

拟效果相对更好,CMEMS、HYCOM 和 OFES 再分析数据与系泊数据的相关系数分别为 0.97、0.79 和 0.61。在最大西向流速深度方面(见图 6b),3 套再分析数据集均显示出模拟深度偏大,其中,OFES 再分析数据的平均深度最大,CMEMS、HYCOM 和 OFES 再分析数据与系泊数据在最大流速深度上的相关系数分别为 0.65、0.36 和 0.72。以上结果均通过 95% 的显著性检验。

图 7 为帝汶海峡系泊位置 50 m、300 m 和 520 m 不同深度的流速变化。在 50 m 深度(见图 7a),系泊数据在 1—5 月的西向流速逐渐增大,最大可达 0.39 m/s; 6—8 月西向流速逐渐减小; 9—10 月和 11—12 月的西向流速分别增大和减小。CMEMS 和 HYCOM 再分析数据均与系泊数据对应较好,而 OFES 再分析数据在 7—9 月与系泊数据差异较大。在 300 m 和 520 m 深度(见图 7b 和 7c),CMEMS 和 OFES 再分析数据相对较好,而 HYCOM 再分析数据相对较差。

2.3 翁拜海峡

图 8 为翁拜海峡系泊数据和 3 套再分析数据在 2011 年 6 月—2015 年 10 月的对比和差异情况。在 30~300 m 处,较强的西向流普遍存在于 2011—2015 年的 6—10 月(见图 8a),其中 2011 年 6—12 月 30~100 m 的西向流速达到 1.2 m/s, 2013 年 7—9 月



注:图a—d的负(正)值表示向西(东)流速;图e—g的负(正)值表示西向流速大于(小于)系泊数据;黑色等值线表示值为0

图5 帝汶海峡系泊位置流速(单位:m/s)

Fig.5 Flow velocity at Timor Strait mooring position (unit:m/s)

40~120 m的西向流速超过1.2 m/s。在300~520 m处,较弱的西向流和东向流存在于2012—2013年的5—6月、2012—2014年的8—11月以及2014—2015年的2—5月。CMEMS再分析数据的西向流速变化与系泊数据相似,但强流区的模拟深度较浅(见

图8b),其在近表层和100~200 m处的较强西向流区域表现出更大的流速,差值达到0.4 m/s,而在东向流动区域,模拟结果的分布范围更广,流速更强(见图8e)。HYCOM再分析数据在30~300 m西向流动区域的流速较小,差值达到0.4 m/s;而300~520 m处的

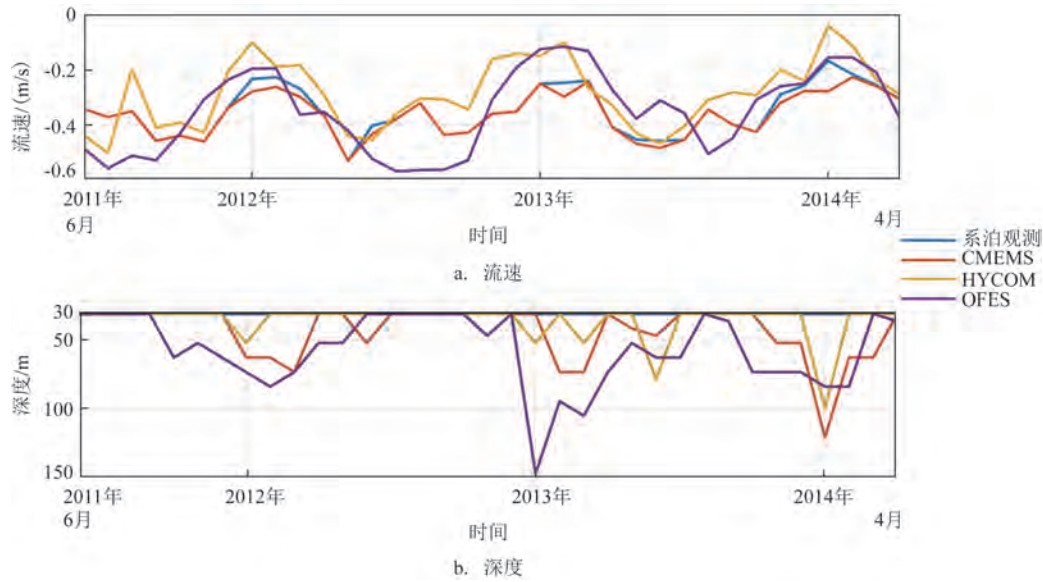


图6 帝汶海峡系泊位置处流场信息对比

Fig.6 Comparison of flow field at the mooring position of Timor Strait

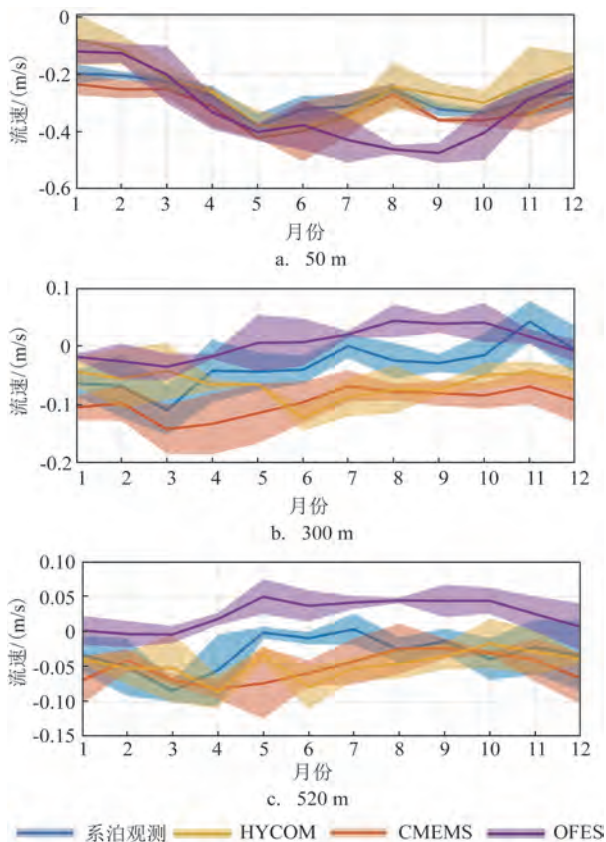
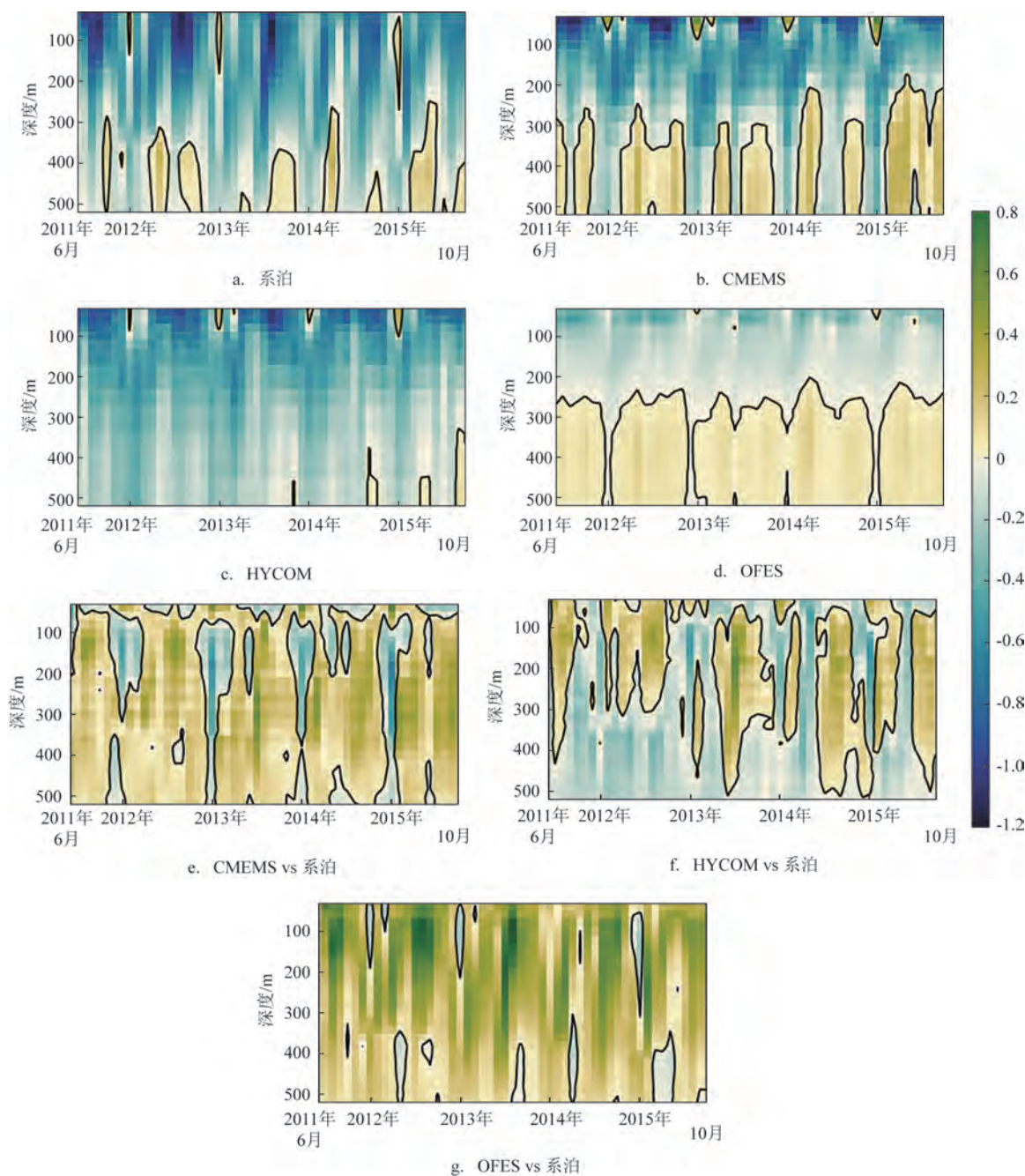


图7 帝汶海峡系泊位置处不同深度处流速的逐月变化(阴影表示标准差)

Fig.7 Monthly variation of Timor Strait mooring location flow velocity at different depths (Shadows represent standard deviations)

西向流速较强,差值达到 0.3 m/s(见图 8c 和 8f)。OFES 再分析数据的整体流速模拟较小(见图 8d),分别在 30~280 m 和 280~520 m 显示出更弱的西向流速和更强的东向流速,其中上层流速差值达到 0.8 m/s(见图 8f)。对比 3 套再分析数据集结果(见表 2)可以得出,CMEMS 再分析数据的模拟效果相对较好,其在 30~520 m、30~300 m 以及 300~520 m 处与系泊数据的相关系数分别为 0.42、0.55 以及 0.76,且 RMSE 均在 0.24 m/s 及以下;整体上 HYCOM 再分析数据的 RMSE 较小,但其与系泊数据良好的相关性仅体现在 30~300 m 处,而在 300~520 m 处的相关性较其余两套再分析数据偏差;OFES 再分析数据整体的 RMSE 较大。

翁拜海峡系泊位置处最大西向流速及其深度随时间的变化情况见图 9。从系泊位置处的最大流速来看(见图 9a),3 套再分析数据集的相位变化与系泊数据符合较好,其中 CMEMS 和 HYCOM 再分析数据在流速幅度上表现较好,而 OFES 再分析数据的流速偏小。例如,2013 年 8 月,系泊数据、CMEMS 以及 HYCOM 再分析数据的西向最大流速分别为 1.15 m/s、1.13 m/s 以及 1.28 m/s,而 OFES 再分析数据仅为 0.45 m/s。相关性分析表明,CMEMS、HYCOM 和 OFES 再分析数据与系泊数据的相关系数分别为 0.79、0.77 和 0.76。在最大西向



注:图a—d中,负(正)值表示向西(东)流速;图e—g中,负(正)值表示西向流速大(小)于系泊数据;黑色等值线表示值为0

图8 翁拜海峡系泊位置流速(单位:m/s)

Fig.8 Flow velocity at Ombai Strait mooring position (unit:m/s)

流速深度上(见图9b),3套再分析数据集的相位变化均表现较好,但在2012—2015年的1月均显示出较浅的西向最大流速深度。CMEMS、HYCOM和OFES再分析数据的最大流速深度与系泊数据的相

关系数分别为0.88、0.84和0.73。以上结果均通过99%的显著性检验。

进一步对比翁拜海峡不同深度的流速变化情况(见图10)。总体而言,CMEMS再分析数据的模

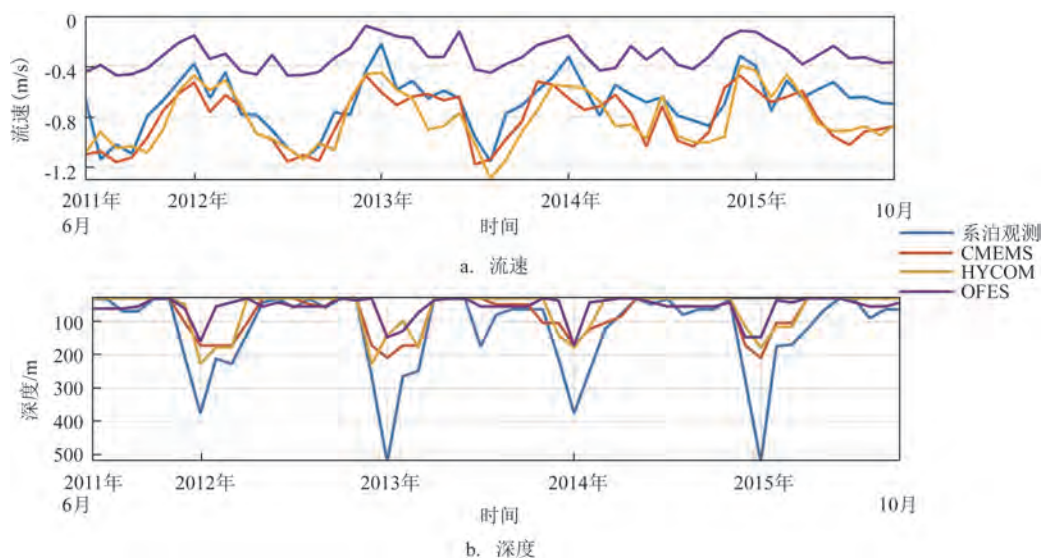


图9 翁拜海峡系泊位置处流场信息对比

Fig.9 Comparison of flow field at the mooring position of Ombai Strait

拟效果较好, HYCOM再分析数据次之, OFES再分析数据较差。在50 m处(见图10a), CMEMS和HYCOM再分析数据与系泊数据符合较好, 而OFES再分析数据的流速较小; 在300 m和520 m处(见图10b和10c), HYCOM再分析数据的模拟表现变差, OFES再分析数据的流速较弱。

综合3套再分析数据集在ITF两个主要的出海峡流场的模拟结果, CMEMS再分析数据的表现相对较好, HYCOM再分析数据对两个海峡的下层流场模拟较差, OFES再分析数据对帝汶海峡和翁拜海峡的流场模拟分别偏大和偏小。由于HYCOM再分析数据在深度配置中采用垂向混合坐标, 在水深配置上与现实深度可能不匹配, 从而导致整个深度上的模拟不稳定。该现象同样出现在类似翁拜海峡的海域。OFES再分析数据由于没有同化数据, 因而对ITF出流的模拟不准确。

3 印尼贯穿流对气候事件响应对比分析

为进一步验证再分析数据与系泊数据的比较结果, 下面对ITF受特定气候事件, 如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)和印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)的调制情况进行详细对比。

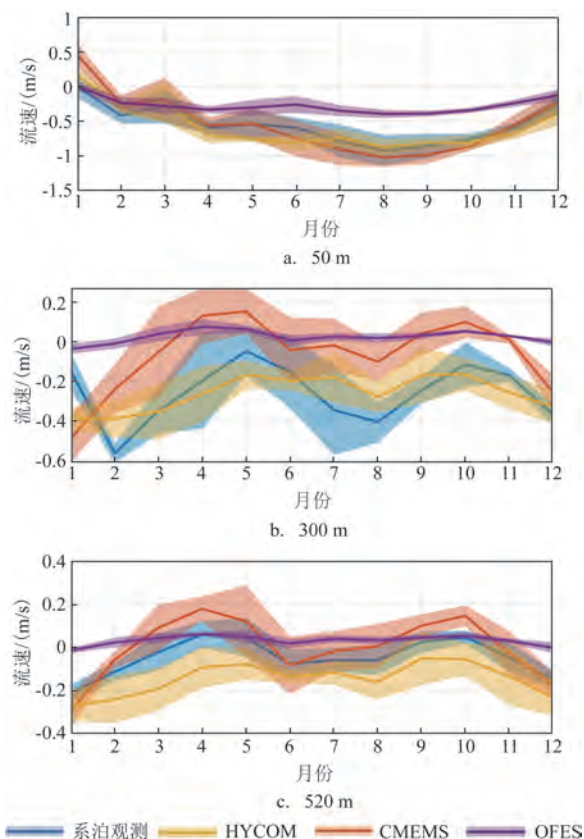


图10 翁拜海峡系泊位置处不同深度处流速的逐月变化(阴影表示标准差)

Fig.10 Monthly variation of Ombai Strait mooring location flow velocity at different depths (Shadows represent standard deviations)

3.1 ENSO事件

图11显示了不同数据对ENSO事件的响应情况。在入流的望加锡海峡,El Niño事件期间(2014年11月—2015年1月和2015年11月—2016年1月,见图11a),系泊数据在40~160 m处的南向流速逐渐增强,其中140~160 m的南向流速达到0.48 m/s;在160~760 m处,南向流速随着深度增加而逐渐减小。CMEMS再分析数据除在100~280 m的南向流速较小外,其余层的模拟结果与系泊数据符合较好;HYCOM再分析数据在40~100 m处与系泊数据的流速变化相反,而在下层表现较好;OFES再分析数据在100 m以下的南向流速偏小,且在280~600 m处出现较强的北向流速变化,甚至在400 m处的北向流速达到0.20 m/s。La Niña事件期间(见图11b),系泊数据在上层显示出南向流速增强,140~160 m处的南向流速达到0.55 m/s。CMEMS、HYCOM和OFES再分析数据的南向流速均比El Niño事件期间有所增大,但CMEMS和OFES再分析数据在300~760 m处的南向流速相对较弱,HYCOM再分析数据则在300~580 m处的南向流速相对较强。

在出流帝汶海峡,La Niña事件期间(2011—2012年,见图11c),随着深度增加,系泊数据的流速逐渐减小,520 m处的南向流速接近于0。CMEMS再分析数据与系泊数据的流速变化较为接近;HYCOM和OFES再分析数据在30~80 m处的西向流速较小,其中OFES再分析数据在300~520 m存在较弱的东向流动。在出流翁拜海峡,La Niña事件期间(2011—2012年,见图11d),HYCOM再分析数据与系泊数据的流速变化较为一致,但西向流速整体偏大;CMEMS再分析数据在30~60 m和240~520 m较系泊数据偏小,而在60~240 m偏大;OFES再分析数据整体上小于系泊数据。

3.2 IOD事件

图12显示了不同数据对IOD事件的响应情况。在入流望加锡海峡的正IOD事件期间(2006年、2007年和2015年的9—11月,见图12a),系泊数据在80 m处存在最大南向流速,为0.69 m/s,随着深度增加,南向流速逐渐减弱。CMEMS和HYCOM再分析数据在80~520 m处与系泊数据变化相近,但在40~80 m处与系泊数据变化相反;OFES再分析数据在40~600 m的南向流速较小。负IOD事件期

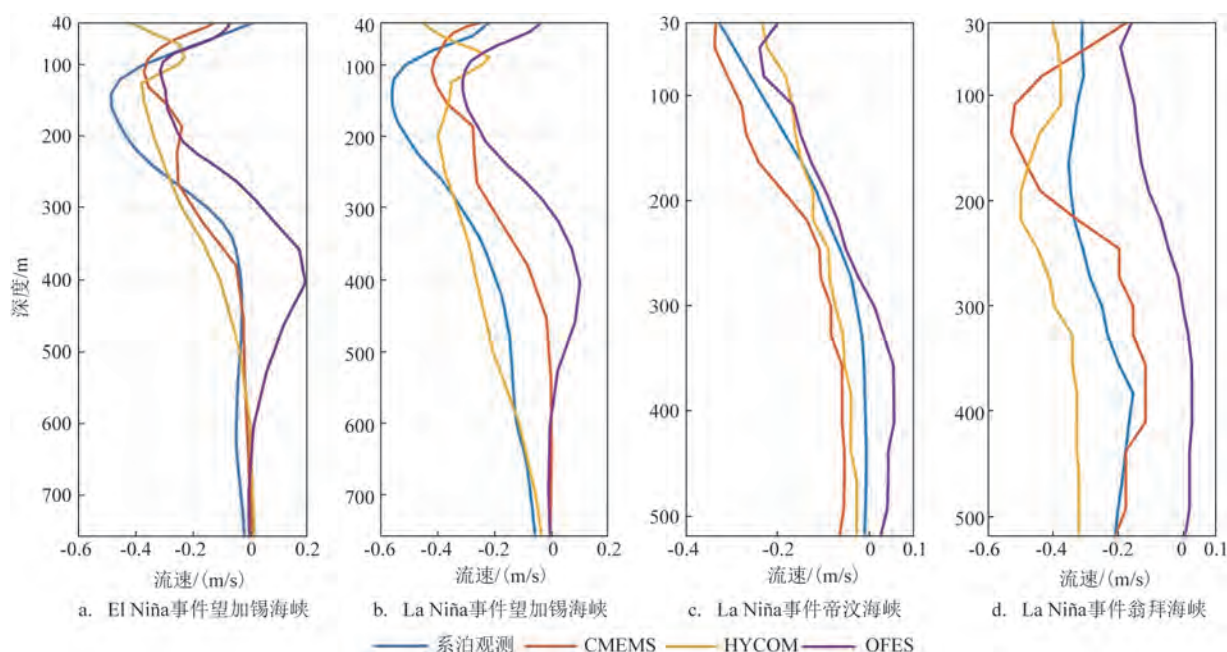


图11 ENSO事件期间流速剖面

Fig.11 Velocity profile during the ENSO events

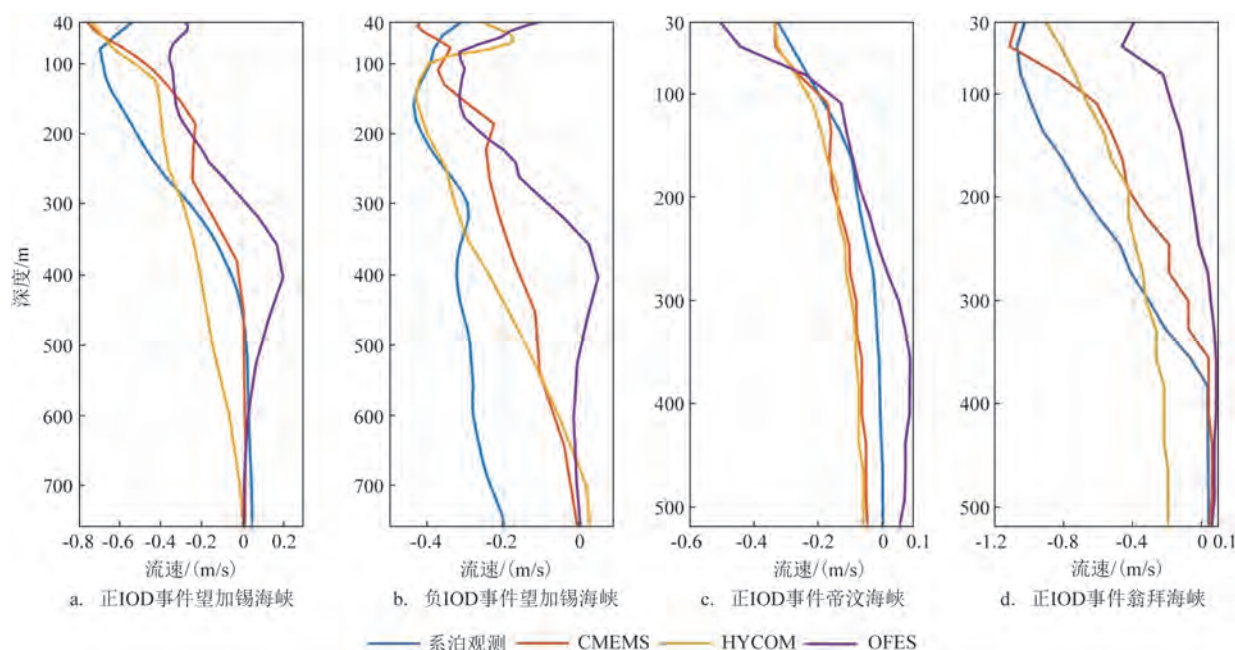


图12 IOD事件期间流速剖面

Fig.12 Velocity profile during the IOD events

间(2016年5—7月,见图12b),系泊数据在300~760 m显示出较强的南向流动,而在40~300 m处较正IOD事件期间流速减小,最大流速所在的深度增大;CMEMS和HYCOM再分析数据在40~80 m处仍与系泊数据变化相反。3套再分析数据集在300 m以下处虽与系泊数据的变化趋势相同,但均显示出较强的南向流速。

在出流帝汶海峡的正IOD事件期间(2012年7—9月,见图12c),系泊数据同样显示出流速随深度增加而逐渐减小的变化。CMEMS和HYCOM再分析数据模拟较好,而OFES再分析数据在30~80 m处的西向流动较强,200~520 m处的东向流动较弱。在出流翁拜海峡的正IOD事件期间(2012年7—9月,见图12d),CMEMS和HYCOM再分析数据对50~300 m处的模拟结果偏小,而HYCOM再分析数据对300~520 m处的模拟偏大;OFES再分析数据的整体模拟结果仍偏小。

基于ITF入流和出流的系泊数据,评估了CMEMS、HYCOM以及OFES再分析数据在ENSO和IOD事件期间的表现。总体而言,CMEMS再分析数据的模拟效果相对较好,与系泊数据较为一致;HYCOM再分析数据在近表层的模拟效果较为一般;OFES再分析数据模拟的流速整体较小。值

得注意的是,3套再分析数据集在望加锡海峡负IOD事件期间的下层模拟表现均较差。

4 结论

本研究利用系泊数据,比较了3套再分析数据集在望加锡海峡、帝汶海峡和翁拜海峡对ITF流场时空变化特征的模拟效果,并分析了其对ENSO和IOD事件的响应。主要结论为:

①在望加锡海峡,3套再分析数据集均能较好地表征ITF的相位变化,且基本都能够表征在ENSO和IOD事件中的流速变化情况,其中CMEMS和HYCOM再分析数据的模拟效果较好,OFES再分析数据模拟的南向流速整体较小。

②在帝汶海峡,CMEMS和OFES再分析数据都能够较好地模拟ITF西向流速的相位变化,而HYCOM再分析数据对200~520 m处流速相位变化的模拟相对较差。3套再分析数据集均对ENSO和IOD事件期间流速剖面的变化有较好的模拟。

③在翁拜海峡,CMEMS再分析数据的模拟效果较好,而HYCOM和OFES再分析数据的模拟效果较差,其中,HYCOM再分析数据对300~520 m的流场模拟较差,OFES再分析数据对流速的模拟

整体偏弱。

整体而言,CMEMS再分析数据在ITF主要的人流和出流海峡通道均表现出相对较好的模拟结果,能够为ITF时空变化特征分析提供数据支撑。这主要得益于其同化的多源观测数据以及较为精细的地形。HYCOM再分析数据在ITF入流通道的模拟效果较好,但在相对较窄的出流通道中表现较差,这可能与混合垂直坐标无法反映复杂地形有关。OFES再分析数据与实际观测结果有较大差异,主要是由于其未同化观测数据。本研究揭示的再分析数据集对ITF刻画能力的定量分析,为研究印尼海海洋环境时空变化特征提供了可靠的数据支撑,也为区域高分辨率数值模拟和预报提供了数据基础。

参考文献:

- [1] GORDON A L, SPRINTALL J, VAN AKEN H M, et al. The Indonesian throughflow during 2004—2006 as observed by the INSTANT program[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50(2): 115-128.
- [2] LIU Q Y, FENG M, WANG D X, et al. Interannual variability of the Indonesian throughflow transport: a revisit based on 30 year expendable bathythermograph data[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2015, 120(12): 8270-8282.
- [3] SPRINTALL J, GORDON A L, WIJFFELS S E, et al. Detecting change in the Indonesian seas[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2019, 6: 257.
- [4] GORDON A L, NAPITU A, HUBER B A, et al. Makassar Strait throughflow seasonal and interannual variability: an overview[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(6): 3724-3736.
- [5] 李奥杰, 张永垂, 洪梅, 等. 基于高分辨率再分析产品的印尼贯穿流时空变化特征研究[J]. *气象水文装备*, 2023, 34(5): 64-72.
LI A J, ZHANG Y C, HONG M, et al. Study on the spatiotemporal variation characteristics of Indonesian throughflow based on a high-resolution reanalysis product[J]. *Meteorological and Hydrological Equipments*, 2023, 34(5): 64-72.
- [6] DU Y, QU T D. Three inflow pathways of the Indonesian throughflow as seen from the simple ocean data assimilation[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50(2): 233-256.
- [7] GORDON A L, SUSANTO R D, FFIELD A, et al. Makassar Strait throughflow, 2004 to 2006[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(24): L24605.
- [8] SUSANTO R D, FFIELD A, GORDON A L, et al. Variability of Indonesian throughflow within Makassar Strait, 2004—2009[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C9): C09013.
- [9] SPRINTALL J, WIJFFELS S E, MOLCARD R, et al. Direct estimates of the Indonesian throughflow entering the Indian Ocean: 2004-2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2009, 114 (C7): C07001.
- [10] IMOS. IMOS-Moorings-Hourly time-series product [EB/OL]. [2024-05-06]. <https://www.selectdataset.com/dataset/e5976310a-2f23233bfeacceeabf40eb6>.
- [11] GUO Y R, LI Y L, YANG D Z, et al. Water sources of the Lombok, Ombai and Timor outflows of the Indonesian throughflow[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1326048.
- [12] 刘钦燕, 王东晓, 谢强, 等. 印尼贯穿流与南海贯穿流的年代际变化特征及机制[J]. *热带海洋学报*, 2007, 26(6): 1-6.
LIU Q Y, WANG D X, XIE Q, et al. Decadal variability of Indonesian throughflow and South China Sea throughflow and its mechanism[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2007, 26(6): 1-6.
- [13] METZGER E J, HURLBURT H E, XU X, et al. Simulated and observed circulation in the Indonesian seas: 1/12° global HYCOM and the INSTANT observations[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2010, 50(2): 275-300.
- [14] LI M T, GORDON A L, GRUENBURG L K, et al. Interannual to decadal response of the Indonesian throughflow vertical profile to Indo-Pacific forcing[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47 (11): e2020GL087679.
- [15] LI A J, ZHANG Y C, HONG M, et al. Relative importance of ENSO and IOD on interannual variability of Indonesian throughflow transport[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1182255.
- [16] LI A J, ZHANG Y C. Long-term thermohaline trends in the Sulawesi Sea based on a high-resolution reanalysis data[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2023, 2486: 012047.
- [17] LI A J, ZHANG Y C, HONG M, et al. Spatial-temporal characteristics of temperature in Indonesian Sea based on a high-resolution reanalysis data[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2024, 2718: 012041.
- [18] ZHU Q R, WANG C Z. Contributions of Indo-Pacific forcings to interannual variability of the Indonesian throughflow in the upper and lower layers[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2024, 129(1): e2023JC020306.
- [19] XU T F, WEI Z X, ZHAO H F, et al. Simulated Indonesian Throughflow in Makassar Strait across the SODA3 products[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2024, 43(1): 80-98.

Validation of reanalysis data simulating Indonesian Throughflow

LI Aojie¹, ZHANG Yongchui^{1,2*}, HU Wangjiang¹, WANG Ning¹, HONG Mei^{1,2}, YAN Hengqian¹

(1. College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China, 2. High Impact Weather Key Laboratory of CMA, Changsha 410073, China)

Abstract: The Indonesian Throughflow (ITF) connects the Pacific Ocean and the Indian Ocean, which has the flow field with significant spatiotemporal variation. However, the ability of existing reanalysis datasets to describe the ITF is unclear. The ITF flow field structure, maximum velocity and maximum velocity depth of the reanalysis data are verified by using the mooring submerged buoys placed in the inflow and outflow. The results show that the CMEMS reanalysis data has a good performance, and the correlation coefficients between it and the mooring data in Makassar Strait, Timor Strait and Ombai Strait are 0.70, 0.50 and 0.42, respectively. And it can reproduce the response of ITF to climate events. In contrast, the HYCOM reanalysis data cannot simulate the flow field structure below 300 m in Timor Strait and Ombai Strait. The OFES reanalysis data has relatively smaller flow velocity in Makassar Strait and Ombai Strait.

Key words: The Indonesian Throughflow; strait channels; mooring data; reanalysis data; data validation