

曹宁, 李润朝, 叶颖昕, 等. 基于不同海洋再分析资料的吕宋海峡热能输送及其变化[J]. 广东海洋大学学报, 2022, 42(5): 72-81.

## 基于不同海洋再分析资料的吕宋海峡热能输送及其变化

曹宁<sup>1,2,3,4</sup>, 李润朝<sup>1</sup>, 叶颖昕<sup>1</sup>, 郑兆轩<sup>1</sup>, 刘春雷<sup>1,2</sup>

(1. 广东海洋大学海洋与气象学院 / 2. 中国气象局-广东海洋大学海洋气象联合实验室 / 3. 广东海洋大学广东省高等学校陆架及深远海气候资源与环境重点实验室, 广东 湛江 524088; 4. 斯德哥尔摩大学自然地理系, 瑞典 斯德哥尔摩 SE-10691)

**摘要:** 【目的】揭示吕宋海峡热能输送的季节和年际变化特征, 并评估不同海洋再分析资料计算结果的异同。【方法】基于CMEMS的1993—2019年四套海洋再分析资料, 通过对比分析, 研究吕宋海峡120.75°E剖面热能输送的季节和年际变化特征。【结果】通过吕宋海峡的热能输送主要发生在500 m以浅, 呈“流套型”或者“弯曲型”结构。净的热能输送以输入南海为主, 夏季微弱净流出, 其他季节是净流入, 冬季最强。吕宋海峡净热运输年际变化存在约6 a周期, 与ENSO显著正相关( $P < 0.05$ ), 在ENSO发展期的10月份和衰退期的4月份相关系数最高。【结论】吕宋海峡净热运输及相关流场和混合层的季节变化受南海季风和海洋环境季节变化影响显著, 在年际尺度主要体现为与ENSO相关的变化特征。四套资料在描述吕宋海峡热能输送的季节和年际变化方面有较好的一致性, 但是在输运强度和流场结构变化方面存在显著差异, 其中FOAM资料的差异性较为明显。

**关键词:** 吕宋海峡; 热能输送; 海洋再分析

中图分类号: X87

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159(2022)05-0072-10

doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2022.05.009

## Variations of Ocean Heat Transport through the Luzon Strait Based on Global Ocean Ensemble Reanalysis

CAO Ning<sup>1,2,3,4</sup>, LI Run-chao<sup>1</sup>, YE Ying-xin<sup>1</sup>, ZHENG Zhao-xuan<sup>1</sup>, LIU Chun-lei<sup>1,2</sup>

(1. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University / 2. CMA-GDOU Joint Laboratory for Marine meteorology / 3. Key Laboratory of Climate, Resources, and Environment in Continental Shelf Sea and Deep Sea, Zhanjiang 524088, China; 4. Department of Physical Geography, Stockholm University, Stockholm SE-10691, Sweden)

**Abstract:** 【Objective】To investigate the seasonal to annual variations of ocean heat transport through the Luzon Strait and to evaluate the consistency and discrepancy of multiple ocean reanalysis datasets. 【Method】Based on monthly oceanographic data (1993—2019) from CMEMS Global Ocean Ensemble Reanalysis, the seasonal cycle and interannual variability of ocean heat transport through the 120.75°E profile at the Luzon Strait were studied by comparing the consistency and discrepancy in these four datasets. 【Result】The ocean heat transport through the Luzon Strait mainly occurs at a depth of shallower than 500 meters, showing “Loop Current” or “Bending Current” structure. Net ocean heat transport through the Luzon Strait generally shows an inflow to the South China Sea. These

收稿日期: 2022-04-20

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42130605); 广东省联合基金重点项目(2019B1515120018); 国家自然科学基金面上项目(42075036, 41875071); 广东海洋大学科研启动项目(R17056); 国家留学基金(CSC, No.201908440188)

第一作者: 曹宁(1987—), 博士, 讲师, 从事海气相互作用研究。E-mail: ncao@gdou.edu.cn

通信作者: 刘春雷(1963—), 博士, 教授, 从事地球系统能量循环研究。E-mail: liuclei@gdou.edu.cn

datasets show weak net outflows during summer, and net inflows during other seasons, most pronounced in winter. The interannual variations of the net heat transport in the Luzon Strait show a density peak at about 6 years, which is significantly positively correlated with ENSO ( $P < 0.05$ ), with the highest correlations in October of the ENSO developing year and April of the decaying year.

【Conclusion】The seasonal changes of surface ocean flow and mixed layer depth associated with net heat transport variations through the Luzon Strait are significantly related to the South China Sea monsoon and oceanic seasonal changes, while for interannual variation, their variations are related to ENSO interannual variability. There is consistency in describing the seasonal and interannual variabilities of ocean heat transport through the Luzon Strait among these four datasets, but discrepancies in transport intensity and ocean current structure are also significant, especially for the FOAM data.

**Key words:** Luzon Strait; ocean heat transport; ocean reanalysis

南海连接南亚季风、东亚季风、西北太平洋季风、澳洲季风等系统,在亚澳季风系统的形成和演化中处于非常重要的地位<sup>[1-3]</sup>。南海的气候与热带太平洋的年际变率密切相关<sup>[4-6]</sup>,二者主要是通过西北太平洋的异常反气旋/气旋环流建立起联系<sup>[7-8]</sup>。南海是一个地形复杂的边缘海,其半封闭的构造环境使得其与开放大洋的物质交换十分有限,南海深部海水只能来自吕宋海峡海槛深度 2600 m 以浅的太平洋。吕宋海峡是台湾岛和吕宋岛之间的海峡,东接太平洋,西通南海,宽度约 250 km,是两者之间水交换的重要通道,对南海的水团、环流和气候具有重要影响。研究吕宋海峡水体和热能输送的时空变化特征,可以进一步了解南海和西太平洋之间的水体和能量交换情况,加深对南海局地气候、环境、资源等演化特征的认识,具有重要的科学、经济和战略意义<sup>[9]</sup>。

吕宋海峡的东侧即为全球第二大暖流“黑潮”,其在流经海峡时会以分支或流套的形式入侵南海,对南海的温盐结构、环流特征产生影响<sup>[10-11]</sup>。穿过吕宋海峡的海流形态非常复杂,受到复杂地形、风场的低频变异、大洋环流等多方面因素的制约,并呈季节变化和年际变化。对吕宋海峡附近流场的研究大都聚焦在黑潮通过该海峡入侵南海的形态及其变化方面<sup>[11-18]</sup>,由于海洋调查资料的不连续性及长时间序列观测资料的缺乏,且黑潮本身的形态和入侵方式又是复杂多变的,不同学者在关于黑潮入侵南海的形态上存在不同观点,例如反气旋流套、分支、弯曲等。在季节和年际变化方面,王兆毅等<sup>[18]</sup>基于涡尺度分辨率环流模型研究了吕宋海峡水交换,发现其季节变化显著,全年均为向西输运,夏季最弱,冬季最强,同时年际变化与 ENSO 现象有较

为显著的正相关关系。黑潮入侵南海的季节变化和年际变化方面,前人研究认为其主要受风应力、北赤道流分叉位置变化<sup>[19-22]</sup>以及厄尔尼诺-南方涛动(El Niño -Southern Oscillation, ENSO)<sup>[23-24]</sup>、太平洋年代际变化的调制作用<sup>[24-25]</sup>和中尺度涡<sup>[26-28]</sup>等因素影响。

随着数值模式和资料同化技术发展,高质量海洋再分析资料的出现为进一步研究吕宋海峡断面的水体和能量交换在长时间尺度上的季节和年际变率提供了可能。以 ECMWF 为代表的研究和业务单位,对海洋再分析系统进行了系列改进。欧洲 CMEMS(Copernicus Monitoring Environment Marine Service)把海洋模式和海冰模式耦合,通过数据同化重建海洋变量的时空分布<sup>[29-30]</sup>,发布了多套海洋再分析资料,包括 ECMWF 的 ORAS5<sup>[30]</sup>,意大利 CMCC 的海洋再分析资料 C-GLORS<sup>[31]</sup>,英国气象局的 GloSea5<sup>[32-33]</sup>,和法国 Mercator Océan 的 GLO-RYS2V4<sup>[34]</sup>。这些资料为开展全球变化背景下区域海洋的长时间尺度研究提供了可能。

本研究使用 CMEMS 最新发布的四套海洋再分析资料,计算通过吕宋海峡的热能传输及其长时间尺度的变化特征,主要着眼于多资料对比分析,重点揭示四套资料在重现吕宋海峡热能输送方面的一致性和差异性,为深入理解吕宋海峡输运的时空特征及准确评估南海热能收支变化提供参考。

## 1 数据与方法

吕宋海峡断面,取经度 120.75°E,纬度 18.50°N—22.00°N,垂直方向从海表至约 2 500 m 的海底。所使用数据来自 CMEMS 提供的全球海洋集合再分析产品中的 GLOBAL\_REANALYSIS\_PHY\_

001\_031数据集,变量包括海水温度、海水流速、海洋混合层深度等,其DOI地址是<https://doi.org/10.48670/moi-00024>,覆盖1993年1月至2019年12月逐月数据。包含四套再分析资料,均基于NEMO海洋模式,使用ORCA025网格(1/4°的水平分辨率),垂直方向共75层,从海表面到海底约5900m深度。海表的强迫是基于ERA interim,并且全都同化了海表温度、海平面异常、海冰密集度和现场观测的温盐度剖面数据。表1列出了四套资料的主要信息。后文使用简称ORAS、CGLO、FOAM、GLOR来分别代表这四套再分析资料。

表征热带太平洋年际变化的ENSO指数选用的是Nino3.4指数,使用NOAA ERSST V5的海表温度数据计算中东热带太平洋区域(Nino3.4区,5°N—5°S,170°W—120°W)的海温并求距平得到<sup>[35]</sup>。考虑到全球Argo实时海洋观测网在2006年之后才建成并提供大量来自深海大洋中的温盐度信息,因此本文选取气候态基准期为2006—2019年。

混合层深度在海气相互作用中具有至关重要的作用,表征着参与海洋和大气相互作用的海水总量。本研究使用资料同化系统的输出数据,其定义为:局地海表面状况下(盐度、温度为10m深层的参考值,声压为0dB,压强为海表压强),海水温度降低0.2℃时所对应的海水密度增加值,加上10m深度层的参考密度,所得到密度值对应的深度就是混合层深度。参照Hall等<sup>[36]</sup>的定义,在给定经度的垂

直剖面上的热能输送公式如下:

$$E_H = \int_{\phi_1}^{\phi_2} \int_{z_b}^{z_0} \rho_0 c_p (\theta - \theta_r) u dz d\phi,$$

其中, $\rho_0$ 是海水密度( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), $c_p$ 是海水的比热容( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ), $\theta$ 是海水温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $u$ 是纬向海水流速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), $z_0$ 和 $z_b$ 分别表示海表和海底深度(m),而 $\phi_1$ 和 $\phi_2$ 分别表示剖面的南北边界纬度。此处基准温度取 $\theta_r = 0^{\circ}\text{C}$ ,海水比热容取 $c_p = 3850\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,海水密度取 $\rho_0 = 1025\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 吕宋海峡热能输送的空间特征

通过吕宋海峡的热能输送主要与西太平洋海水入侵南海的结构有关,入侵强度和空间结构差异必然导致热能输送大小的差异。如图1所示,四套资料显示的流场结构与前人研究比较类似,均表现为北赤道流沿菲律宾东岸向北的分支在抵达吕宋岛附近时发生弯曲,侵入吕宋海峡甚至进入南海东部海域,随后在台湾岛南侧流出,继续沿着台湾岛向东北方向流动。不过,四套资料在描述海水入侵吕宋海峡的强度和结构上存在明显差异,其中ORAS和CGLO资料显示,表层流侵入吕宋海峡后形成了典型的“流套”结构,豁口南端进、北端出,中部突入南海;而FOAM和GLOR资料则仅出现轻微弯曲,主流被限制在吕宋海峡内。

在垂直结构上,如图2所示,暖色区域内表示热

表1 四套海洋再分析数据产品的主要信息  
Table 1 Outline of the four reanalysis subsystems

再分析资料 Reanalysis	产品机构 Production center	模式版本 Model version	海表强迫 Surface forcing	资料同化 Assimilation
ORAS5	ECMWF	NEMO3.4.1 LIM2	Surface waves SST, SSS surface nudging	方法:NEMOVAR (3Dvar) 窗口:5 d 资料:HadISSTv2 SST, EN4
C-GLORS	CMCC	NEMO3.4 LIM2	SST, SSS, SIC surface nudging	方法:OceanVar (3Dvar) 窗口:7 d 资料:Model MDT Reynolds SST, EN4
FOAM-GLOSEA5v13	UK Met Office	NEMO3.4 CICE4.1	SST, SSS surface nudging	方法:NEMOVAR (3Dvar) 窗口:1 d 资料:EN4
GLORYS2V4	Mercator Océan	NEMO3.1 LIM2	No surface nudging precipitation, flux correction Climatological runoff + ice shelf and iceberg melting	方法:SAM2 (SEEK) 窗口:7 d 资料:Merge MDT (obs+model) Reynolds SST, CORA

能通过该断面向东输送(南海向西太平洋输送),冷色区域表示热能通过该断面向西输送(从西太平洋向南海输送),单位已统一为PW( $1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$ )。从图2可知,四套数据均显示,通过吕宋海峡的热能输送主要发生在500 m以浅的海水层内,且呈现典型的“南进北出”型结构。在500 m以深,仍然存在热能交换,单个网格的量级基本上在0.003 PW以下。

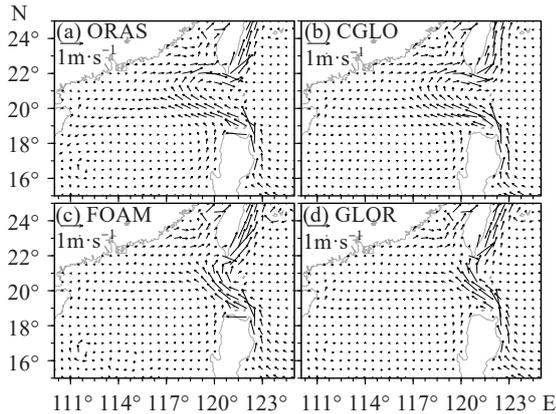


图1 四套再分析资料分别显示的基准期平均表层流场强度和空间结构

Fig. 1 Base period mean ocean surface currents using four reanalysis datasets

图3给出了吕宋海峡剖面上经向积分及垂直积分的年平均和四月份热能输送分布情况。在垂直方向上,从年平均结果来看,四套数据总体特征相似,热能交换主要发生在500 m以浅,以输入南海为主,最大净输入位于约200 m深度,在100 m以浅输入和输出相互抵消(净输送量在0附近)。四个典型月份(1、4、7、10月)的结果显示,500 m以浅存在典型季节差异,1月份为热能净输入南海,四套数据

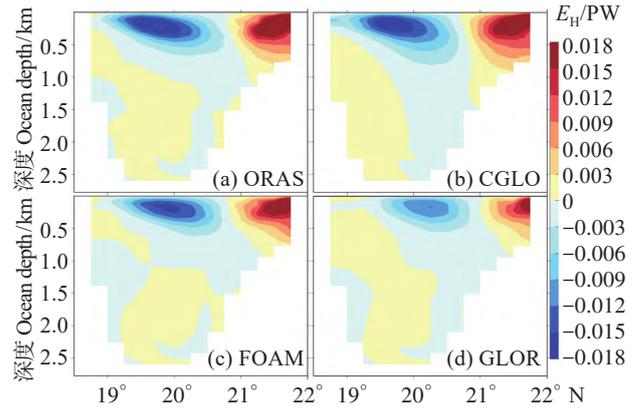
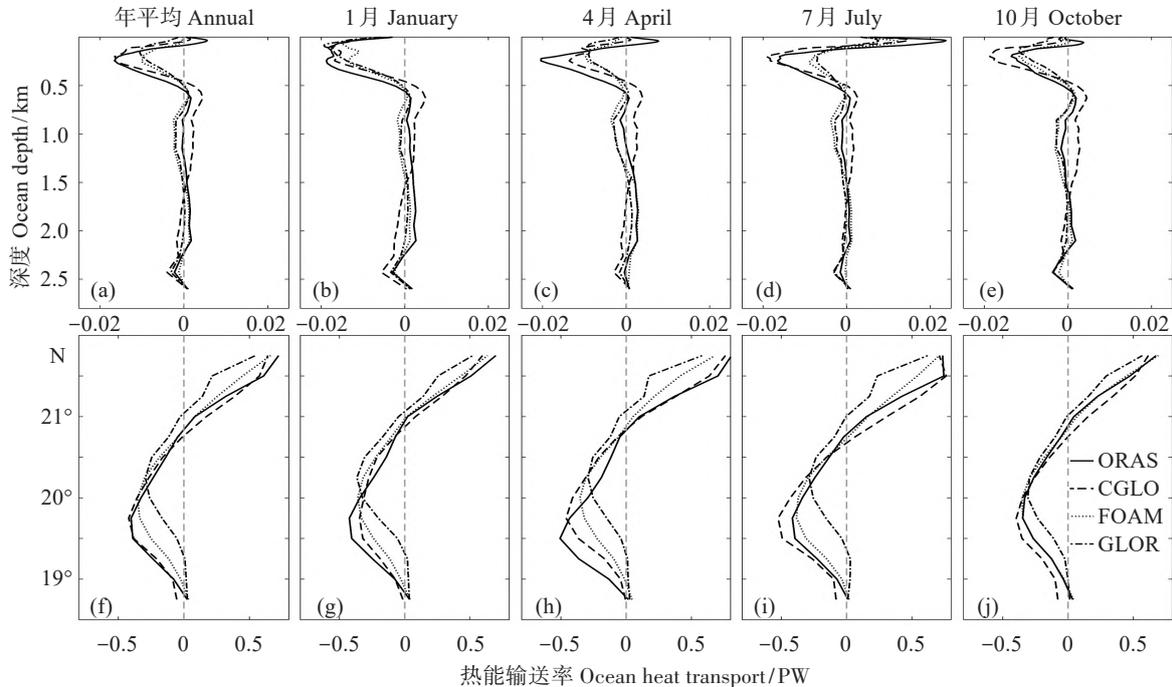


图2 四套资料给出的吕宋海峡纬向热量输送的基准期气候平均态

Fig. 2 Mean state of zonal ocean heat transport across Luzon Strait during Climatological base period



(a-e)表示经向积分,(f-j)表示垂直积分;正值代表输入南海,负值代表输出南海。

Subfigures (a-e) meridional integration, (f-j) vertical integration; positive values indicate ocean heat entering the South China Sea while negative values indicate ocean heat flowing out of the South China Sea.

图3 吕宋海峡剖面上经向积分及垂直积分的年平均和四月份热能输送分布情况

Fig. 3 Annual mean and monthly meridional and vertical integrations of ocean heat transport across Luzon Strait

基本一致;4、10月份,依然是净输入占主导;而7月份存在显著的净输入和净输出,且量级相当,最大净输入深度大约在200~250 m,净输入量在四套资料中分别约为0.016、0.018、0.008、0.007 PW,最大净输出深度大约25~50 m,净输出量分别为0.023、0.014、0.011、0.007 PW,在大约100 m深度,输入和输出相互抵消。从1月和7月对比来看,二者明显差异是在100 m以浅,前者以侵入南海为主,后者则以输出南海为主,这可能与海峡表层流场受季风作用有关。在吕宋海峡附近区域,冬季盛行东北风,风应力对吕宋海峡北部的表层输出流有一定抑制作用,而夏季盛行西南风,对表层输出流有促进作用。在500 m以深,净输送量级较小,且看不出明显季节变化特征。在经向分布上,年平均和四个月的的结果比较类似,均呈现典型的“南进北出”特征,南北分界处位于20.5°N—21°N之间,四套数据亦存在一定差异性,其中ORAS和CGLO较为一致,最大输入位于19.75°N附近,而FOAM和GLOR的最大输入位置更加靠北,强度也更弱。

## 2.2 吕宋海峡热能输送的时间特征

计算断面上累计输入、输出量和净通量,如图4所示,输送强度在整年中一致表现为ORAS和CGLO大于FOAM和GLOR,且GLOR最弱,这与图1中四套资料描述的吕宋海峡海水入侵结构差异一致。季节变化上,总体上东向输送在夏季最强,冬季最弱;而西向输送则差异较大。对于净能量输送,四套资料给出的季节变化非常一致,在夏季是净流出南海,其他季节是净流入南海,在冬季西向输送最强,这可能与季风变化导致黑潮入侵南海的强度变化有关。北半球Ekman输运方向与风应力方向垂直且指向右方,因此夏季该区域盛行西南风,带动东南方向的Ekman传输,使黑潮易向东边偏离吕宋海峡,不利于穿过吕宋海峡向南海的输送;而冬季则相反。

在年际尺度,如图5所示,三组曲线存在明显的年际变率。在该时间段内,四个数据产品给出的输入南海的热能平均值为1.93、2.16、1.66、1.31 PW,而输出南海的平均热能为1.79、1.95、1.48、1.06 PW,总体上表现为净能量从西太平洋输送到南海,输入量平均为0.14、0.21、0.18、0.25 PW。从平均值亦可定量看出ORAS和CGLO的输送强度明显大于FOAM和GLOR。从时间变化来看,四套数据总体上变化还算一致,但振幅不同,CGLO模式的振幅在输入量

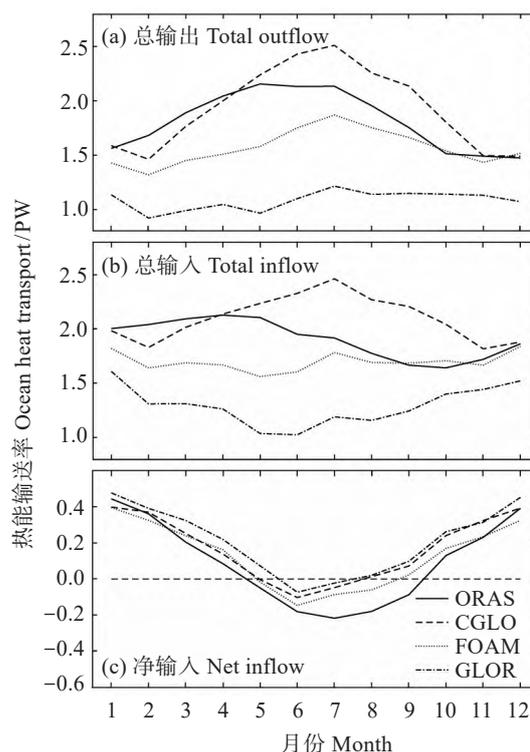


图4 穿过吕宋海峡的热能输入总量、输出总量和净输送量的季节变化

Fig. 4 Seasonal variations of ocean heat transport total outflow, total inflow, and net inflow to the South China Sea across Luzon Strait

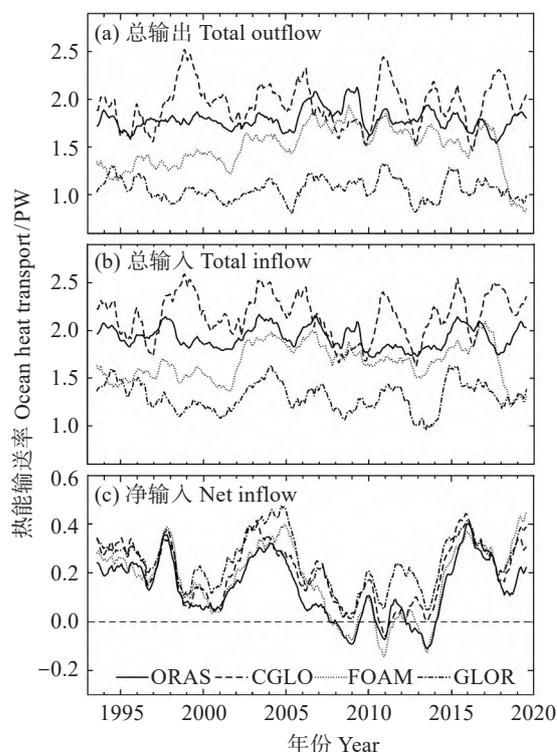


图5 穿过吕宋海峡的热能输入总量、输出总量和净输送量的年际变化

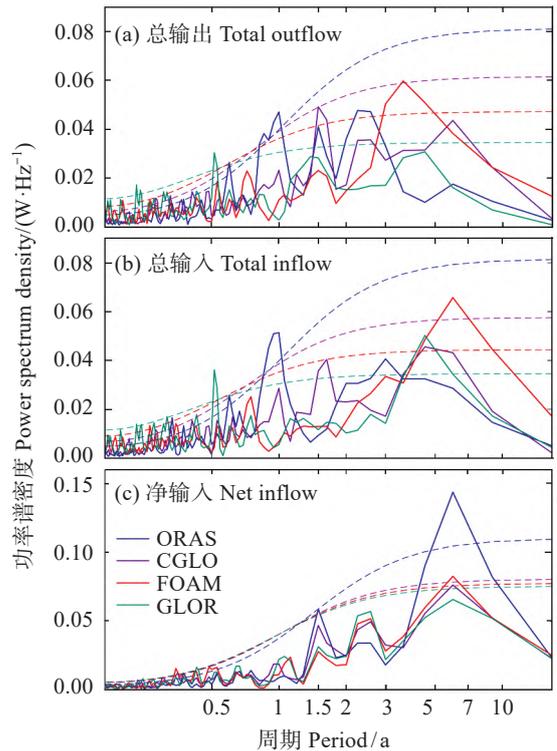
Fig. 5 Annual variations of total outflow, total inflow, and net inflow of ocean heat transport across Luzon Strait

和输出量的表现上明显比其他三个模式更大,意味着其方差更大,变率更强(图5(a)中标准差分别为0.26、0.45、0.31、0.36;图5(b)中分别为0.32、0.54、0.36、0.29)。对于净热能输入量(图5(c)),四套数据给出的结果非常接近,说明不同产品资料在描述净热输送量方面具有很强一致性。可以将穿过吕宋海峡的净热输送量作为表征其热能交换量的一个指数,定义为LS-OHT。

对这些时间序列进行带通滤波,使用Lanczos滤波器(通过波段为1~10 a,权重系数个数取100),然后对滤波后的序列进行功率谱分析。在95%的信度水平下,对于输出南海的热量变化(图6(a)),ORAS显示准1 a周期,CGLO显示约1.5 a的周期,FOAM显示约3~5 a的周期,GLOR未给出显著谱;对于输入南海的热量变化(图6(b)),ORAS模式的显著谱位于约10~12个月,是准年际变化,CGLO未给出显著谱,FOAM显示约5~9 a的显著周期,GLOR给出了约5 a的显著周期;对于输入南海的净热量变化(图6(c)),四个产品在约6 a周期的位置都一致显示最大谱密度,其中ORAS和FOAM超过了95%信度水平,而CGLO和GLOR未达到显著水平(非常接近)。这些结果进一步验证了前人研究中关于吕宋海峡输送与ENSO密切相关的观点。

2.3 吕宋海峡热能输送的变化与ENSO的关系

对月数据进行12个月滑动平均,如图7,四套数据给出的净热输送量变化与Nino3.4指数均具有极好的对应关系,在四个数据产品中,相关系数分别是0.64、0.72、0.63、0.62。这意味着,当厄尔尼诺发生时,西太平洋通过吕宋海峡向南海的净热能输送增强;当拉尼娜发生时,则相反。



图中虚线代表谱分析结果的95%显著性水平。

Dashed lines indicate the 95% significant levels of spectrum analysis

图6 穿过吕宋海峡的热能输入总量、输出总量和净输送量的功率谱分析

Fig. 6 Spectrum analysis total outflow, total inflow, and net inflow of ocean heat transport across Luzon Strait

ENSO事件具有典型的季节锁相特征,在冬季赤道东太平洋海温异常最大。对Nino 3.4区海温距平在12、1、2月(DJF)的值计算平均,得到描述ENSO成熟期强度的指数。在±12个月内,将LS-OHT指数每月的年变化序列与DJF-Nino3.4序列求相关系数,如图8所示,可以明显看到吕宋海峡净热输送

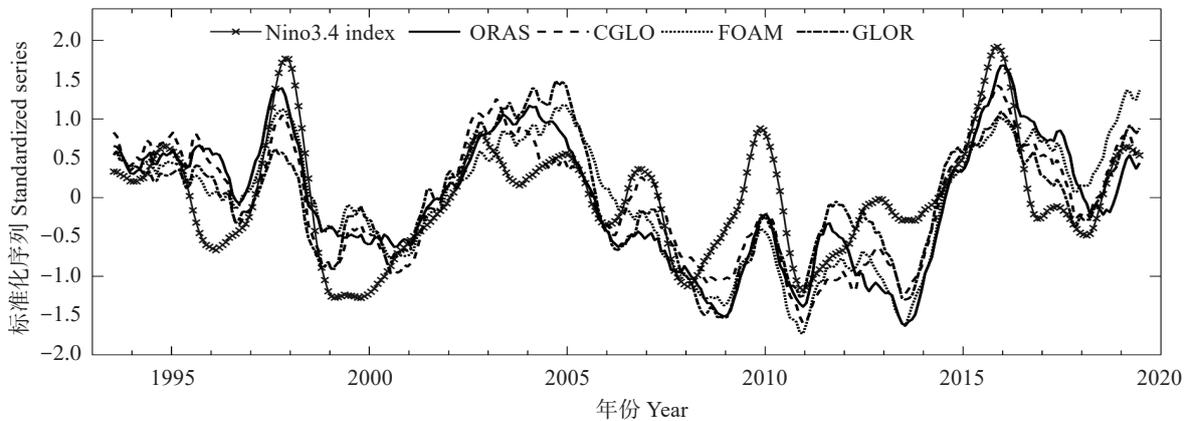


图7 Nino3.4指数及穿过吕宋海峡的净热能输送量的时间序列

Fig. 7 Time series of Nino3.4 index and net ocean heat transport across Luzon Strait

量的异常与DJF-Nino3.4在比12月超前2个月、滞后3~4个月处出现相关系数的双峰,意味着在ENSO事件的发展期(约10月份)和衰退期(约4月份),吕宋海峡净热输送响应最为明显,且在整个发展期和衰退期( $\pm 5$ 个月)基本上都超过99%的显著性水平。

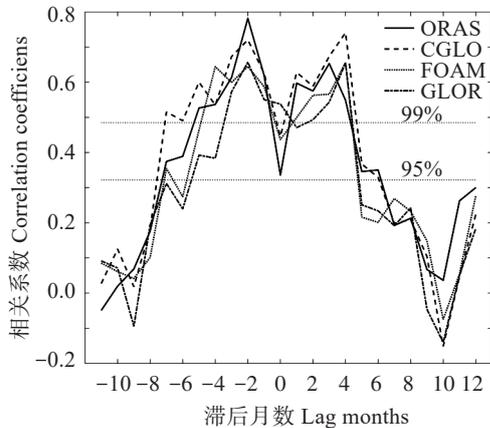


图8 吕宋海峡净热能输送年际变化与成熟期DJF平均Nino3.4指数序列之间的超前-滞后相关分析

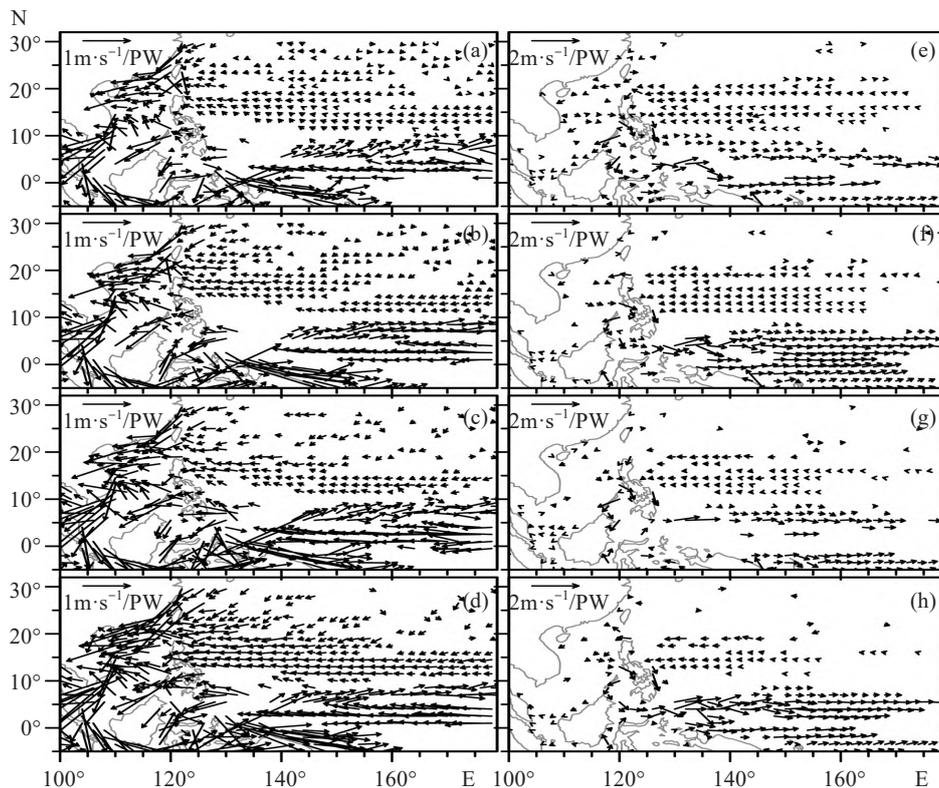
Fig. 8 Lag-lead correlation between year-to-year series of net ocean heat transport across Luzon Strait and DJF mean Nino3.4 index

在成熟期(约12月份)相关系数处于相对较低,但也通过了95%的信度,且不同资料具有很好的一致性。

#### 2.4 相关区域的表层流场和混合层深度变化

北赤道流是典型的风生海流,其位置大约在 $10^{\circ}\text{N}$ — $20^{\circ}\text{N}$ 之间。吕宋海峡输运就来自于太平洋北赤道流到达西边界后分叉出来的向北的一支。因此,重点关注西北太平洋区域,选定 $100^{\circ}\text{E}$ — $180^{\circ}$ 和 $5^{\circ}\text{S}$ — $30^{\circ}\text{N}$ 范围,从表层流场和混合层深度的季节和年际变异来进行对比分析。

从季节变异角度,由图9(a-d)可以看出,四套数据显示的季节变率相关性高度一致,表现为沿赤道的异常西向流、吕宋海峡两侧的异常西向流、南海的异常西南向流等。这体现了前文所述及的季风变化导致黑潮入侵南海的变化特征,不同季节风应力导致不同方向的Ekman输运,从而影响吕宋海峡的热能输运。从年际变异角度,图9(e-f)显示,与LS-OHT年际变化相关的流场异常,主要体现在增



仅显示通过95%显著性检验的结果;(a-d)表示季节变率,(e-h)表示年际变率;(a)和(e)表示ORAS,(b)和(f)表示CGLO,(c)和(g)表示FOAM,(d)和(h)表示GLOR。

Only vectors exceeding 95% significant level are shown; (a-d) indicate the seasonal variability, (e-h) indicate the annual variability; (a)(e), (b)(f), (c)(g) and (d)(h) indicate the results of ORAS, CGLO, FOAM and GLOR respectively.

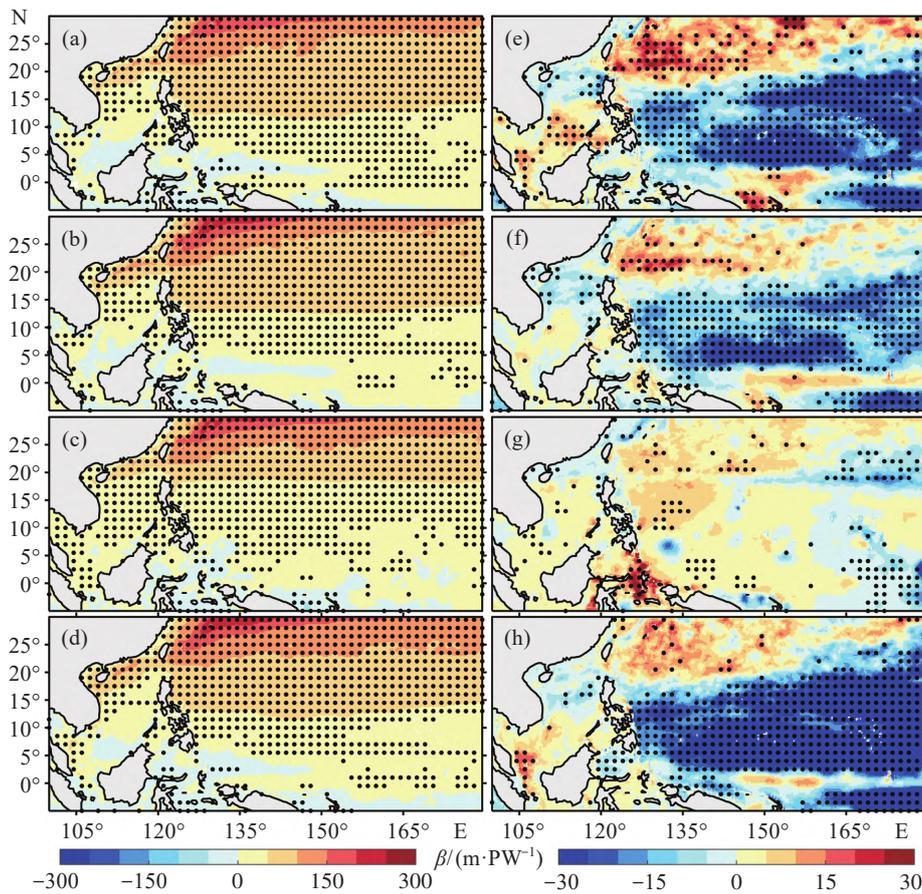
图9 表层海水流速对吕宋海峡净热能输送量的季节和年际变化回归分析

Fig. 9 Regression of ocean surface currents onto the net ocean heat transport across Luzon Strait in seasonal cycle

强的赤道逆流(赤道附近, 5°S—5°N)和增强的北赤道流(10°N—20°N)。结合LS-OHT年际变化与ENSO指数的显著正相关关系(图7), 赤道附近的异常东向流可能与厄尔尼诺发生时出现在该区域上空的异常西风有关, 在风应力驱动下, 沿着赤道的东向海流增强。由于赤道逆流是信风驱动下南北赤道暖流的一种水平补偿流, 当赤道逆流增强(超过  $0.6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{PW}^{-1}$ )时, 对应的赤道暖流也会有所增强, 但增强幅度相对要低很多(大约  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{PW}^{-1}$ )。其中ORAS、CGLO、GLOR三套数据的结果较为类似, 而FOAM显示的异常赤道东向流不太典型, 且强度偏弱。西太平洋的北赤道流异常在四套数据中基本上一致。

对于该区域的海洋混合层深度, 其季节变化对LS-OHT响应(图10(e-f))主要表现为随纬度变化的

特征, 纬度越高, 季节特征越明显, 从而对LS-OHT的响应也更加显著, 且不同资料具有很好的一致性。而年际变化的回归分析(图10(e-f))的显示, 当吕宋海峡净热运输增强时, 西北太平洋黑潮区、赤道东太平洋区域的混合层深度增加, 同时中、西太平洋的混合层深度显著变浅。这些特征与厄尔尼诺事件发生期间热带太平洋的混合层深度变化特征是一致的, 这种现象是由于厄尔尼诺事件中赤道信风的东风分量较常年减弱, 使东太平洋海水涌升及表面海水西传减弱而形成。这与图9中出现的赤道附近的异常东向流特征是一致的, 都可以认为是热带太平洋对ENSO年际变率的响应。同样地, ORAS、CGLO、GLOR三套数据的结果较为一致, 典型特征也都比较明显, 而FOAM资料则无法识别出显著的混合层深度变化。



黑色圆点标注区域表示通过95%显著性检验;  $\beta$ 表示回归系数; (a-d)表示季节变率, (e-h)表示年际变率; (a)和(e)表示ORAS, (b)和(f)表示CGLO, (c)和(g)表示FOAM, (d)和(h)表示GLOR。  
Dotted areas indicate values exceeding 95% significant level;  $\beta$  is used to represent the regression coefficient; (a-d) indicate the seasonal variability, (e-h) indicate the annual variability; (a)(e), (b)(f), (c)(g) and (d)(h) indicate the results of ORAS, CGLO, FOAM and GLOR respectively.

图10 海洋混合层深度对吕宋海峡净热输送量的季节变化和年际变化回归分析

Fig. 10 Regression analysis of seasonal variation and interannual variation of ocean mixed layer depth on net heat transport across Luzon Strait

### 3 结论

使用CMEMS提供的最新全球海洋集合再分析资料,针对1993—2019年期间吕宋海峡热能输送季节和年际变化,分析了四套不同数据(ORAS、CGLO、FOAM、GLOR)给出的结果之间的一致性和差异性。

通过吕宋海峡热能输送主要发生在500 m以浅的海水层内,呈“南进北出”型结构,但是在输运结构和强度方面存在显著差异。其中,ORAS和CGLO的表层海流入侵吕宋海峡形成典型的流套结构,热能输运较强;而FOAM和GLOR资料则显示表层海流经过吕宋海峡时仅出现轻微弯曲,主流被限制在吕宋海峡内,热能输运较弱。净热输运量的季节变化非常一致,在夏季是净向东输运,其他季节是净向西输运,且冬季最强,达0.4 PW。年际变化方面,对于吕宋海峡总向西热输运和向东热输运,四套数据在强度方面差异明显,而净热输运量的变化则非常一致,都与ENSO指数存在显著正相关关系。年际尺度的谱分析显示,四套资料计算的吕宋海峡净热输运量最大谱密度均对应约6 a的周期。分析吕宋海峡净热输运量年际变化在 $\pm 12$ 个月内对ENSO年际变率的相关性发现,四套资料均显示在ENSO发展期的10月份和衰退期的3—4月份相关系数最高。

基于海洋表层流场和混合层深度数据,分析与吕宋海峡净热输运变化相关联的热带太平洋海洋环境季节变化和年际变化情况。在季节变化方面,四套数据显示的表层流季节变率非常一致,主要包括沿赤道的异常西向流、吕宋海峡两侧的异常西向流、南海的异常西南向流等;混合层深度季节变化主要表现为随纬度而变化,纬度越高,季节特征越明显。在年际变化方面,与吕宋海峡净热输运相关的流场异常,主要体现在西太平洋区域的增强的赤道逆流和北赤道流;混合层深度变化显示,当吕宋海峡净热输运增强时,西北太平洋黑潮区、赤道东太平洋区域的混合层深度增加,同时中、西太平洋的混合层深度显著变浅。这些都可以认为是热带太平洋对ENSO年际变率的响应。从四套数据的差异来看,ORAS、CGLO、GLOR三套数据的结果较为一致,流场和混合层变化特征也都比较明显,而FOAM资料显示的异常赤道东向流不太典型,且强度偏弱,同时无法识别出显著的混合层深度变化。

### 参考文献

- [1] 何金海,丁一汇,高辉,等.南海夏季风建立日期的确定与季风指数[M].北京:气象出版社,2001:123.
- [2] WANG B, HUANG F, WU Z W, et al. Multi-scale climate variability of the South China Sea monsoon: a review[J]. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 2009, 47(1/2/3): 15-37.
- [3] 胡鹏, 陈文. 南海夏季风爆发与前期东亚冬季风异常的关系以及ENSO的作用[J]. *气候与环境研究*, 2018, 23(4): 401-412.
- [4] ZHANG R H, SUMI A, KIMOTO M. Impact of El Niño on the east Asian monsoon: a diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1996, 74(1): 49-62.
- [5] TOMITA T, YASUNARI T. Role of the northeast winter monsoon on the biennial oscillation of the ENSO/monsoon system[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 1996, 74(4): 399-413.
- [6] OSE T, SONG Y K, KITOH A. Sea surface temperature in the South China Sea[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 1997, 75(6): 1091-1107.
- [7] WANG B, WU R G, FU X. Pacific-east Asian teleconnection: how does ENSO affect east Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [8] XIE S P, KOSAKA Y, DU Y, et al. Indo-western Pacific Ocean capacitor and coherent climate anomalies in post-ENSO summer: a review[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2016, 33(4): 411-432.
- [9] 宋星林, 王辉, 李凯, 等. 吕宋海峡水体通量时空变化特征的数值模拟研究[J]. *海洋预报*, 2020, 37(4): 1-14.
- [10] 贾英来. 吕宋海峡黑潮形变的时空分布特征和形成机制[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2002.
- [11] NAN F, XUE H J, YU F. Kuroshio intrusion into the South China Sea: a review[J]. *Progress in Oceanography*, 2015, 137: 314-333.
- [12] 刘秦玉, 刘倬腾, 郑世培, 徐启春, 李薇. 黑潮在吕宋海峡的形变及动力机制[J]. *青岛海洋大学学报*, 1996, 26(4): 413-420.
- [13] JIA Y L, LIU Q Y. Eddy shedding from the Kuroshio bend at Luzon strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2004, 60(6): 1063-1069.
- [14] JIA Y L, LIU Q Y, LIU W. Primary study of the mechanism of eddy shedding from the Kuroshio bend in Luzon strait[J]. *Journal of Oceanography*, 2005, 61(6): 1017-1027.
- [15] 马超, 吴德星, 鞠霞. 利用Argos浮标资料对黑潮入侵南海问题的分析[J]. *海洋湖沼通报*, 2010(2): 1-5.

- [16] 郭景松, 冯颖, 袁业立, 等. 入侵南海的黑潮流套及其脱落涡旋[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(3): 537-544.
- [17] 李云, 俞永强. 涡分辨率全球海洋环流模式 LICOM 模拟的吕宋海峡流场的季节变化[J]. 气候与环境研究, 2014, 19(5): 547-558.
- [18] 王兆毅, 刘桂梅, 王辉, 等. 吕宋海峡水交换季节和年际变化特征的数值模拟研究[J]. 海洋学报, 2016, 38(5): 1-13.
- [19] TOOLE J, MILLARD R, WANG Z, et al. Observations of the Pacific North Equatorial Current bifurcation at the Philippine coast[J]. Journal of Physical Oceanography, 1990, 20: 307-318.
- [20] KIM Y Y, QU T D, JENSEN T, et al. Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2004, 109(C3): C03040.
- [21] WANG Q Y, HU D X. Bifurcation of the North Equatorial Current derived from altimetry in the Pacific Ocean[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser B, 2006, 18(5): 620-626.
- [22] QIU B, CHEN S M. Interannual-to-decadal variability in the bifurcation of the North Equatorial Current off the Philippines[J]. Journal of Physical Oceanography, 2010, 40(11):2525-2538.
- [23] SHEREMET V A. Hysteresis of a Western Boundary Current Leaping across a Gap[J]. Journal of Physical Oceanography, 2001, 31(5): 1247-1259.
- [24] 杨龙奇, 许东峰, 徐鸣泉, 等. 黑潮入侵南海的强弱与太平洋年代际变化及厄尔尼诺-南方涛动现象的关系[J]. 海洋学报, 2014, 36(7): 17-26.
- [25] WU C R. Interannual modulation of the Pacific Decadal Oscillation (PDO) on the low-latitude western North Pacific[J]. Progress in Oceanography, 2013, 110: 49-58.
- [26] 袁东亮, 李锐祥. 中尺度涡旋影响吕宋海峡黑潮变异的动力机制[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(4): 1-9.
- [27] ZHENG Q A, TAI C K, HU J Y, et al. Satellite altimeter observations of nonlinear Rossby eddy-Kuroshio interaction at the Luzon Strait[J]. Journal of Oceanography, 2011, 67(4): 365-376.
- [28] LIEN R C, MA B, CHENG Y H, et al. Modulation of Kuroshio transport by mesoscale eddies at the Luzon Strait entrance[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2014, 119(4): 2129-2142.
- [29] BALMASEDA M A, HERNANDEZ F, STORTO A, et al. The Ocean Reanalyses Intercomparison Project (ORA-IP)[J]. Journal of Operational Oceanography, 2015, 8(sup1): s80-s97.
- [30] ZUO H, BALMASEDA M, TIETSCH S, et al. The ECMWF operational ensemble reanalysis-analysis system for ocean and sea-ice: a description of the system and assessment[J]. Ocean Science Discussions, 2019: 1-44.
- [31] STORTO A, MASINA S, NAVARRA A. Evaluation of the CMCC eddy-permitting global ocean physical reanalysis system (C-GLORS, 1982-2012) and its assimilation components[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2016, 142(695): 738-758.
- [32] MACLACHLAN C, ARRIBAS A, PETERSON K A, et al. Global Seasonal forecast system version 5 (GloSea5): a high-resolution seasonal forecast system[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(689): 1072-1084.
- [33] BLOCKLEY E W, MARTIN M J, MCLAREN A J, et al. Recent development of the Met Office operational ocean forecasting system: an overview and assessment of the new Global FOAM forecasts[J]. Geoscientific Model Development, 2014, 7, 2613-2638.
- [34] 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.
- [35] TRENBERTH K E, STEPANIAK D P. Indices of El Niño evolution[J]. Journal of Climate, 2001, 14(8): 1697-1701.
- [36] HALL M M, BRYDEN H L. Direct estimates and mechanisms of ocean heat transport[J]. Deep Sea Research Part A Oceanographic Research Papers, 1982, 29(3): 339-359.

(责任编辑: 刘岭)