

印尼贯穿流出流海域海表高度时空变化

金娇燕^{1,2}, 王永刚^{1,2*}, 朱耀华^{1,2}, 徐腾飞^{1,2}, 李淑江^{1,2}

(1. 自然资源部 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266237)

摘 要: 采用经验正交分解(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析方法对印尼贯穿流出流海域卫星测高海面高度异常资料进行了分析, 分析结果显示研究海域海面高度异常存在多时间尺度变化特征。1993—2013 年期间, 研究海域海面高度异常场存在明显的升高趋势, 其升高速率为 0.6 cm/a; 研究海域海面高度异常存在显著的年际变化, 其与 Nino3.4 指数的相关系数超前滞后相关最大可达 0.65, 且厄尔尼诺年偏高, 拉尼娜年偏低; 海面高度异常年周期变化显著海域主要受印尼贯穿流、印度洋南赤道流和 Eastern Gyral Current (EGC) 季节变化的影响, 半年周期变化则对应于爪哇沿岸流与南赤道流共同作用下形成的涡旋的半年周期变化; 另外, 研究海域海面高度异常还存在显著的季节内变化特征。

关键词: 印尼贯穿流; 海平面高度异常; 卫星高度计; 年际变化; 季节变化

中图分类号: P731.2

文献标识码: A

文章编号: 1671-6647(2020)04-0574-08

doi: 10.3969/j.issn.1671-6647.2020.04.003

引用格式: JIN J Y, WANG Y G, ZHU Y H, et al. The spatial-temporal variation of sea level anomalies in the Indonesian Throughflow outflow region[J]. *Advances in Marine Science*, 2020, 38(4): 574-581. 金娇燕, 王永刚, 朱耀华, 等. 印尼贯穿流出流海域海表高度时空变化研究[J]. *海洋科学进展*, 2020, 38(4): 574-581.

印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF; 简称印尼贯穿流)连接了太平洋低纬西边界流和印度洋赤道流系与东边界流, 是全球唯一一支发生在低纬度洋盆之间的流动。它既是全球大洋传送带(The Great Ocean Conveyor)的枢纽^[1-2], 也存在于大气 Walker 环流上升支发生的海域^[3]。ITF 将太平洋海水的质量和热量输送进入印度洋, 不仅会对两大洋及印尼海的环流和热盐产生影响, 而且对全球海洋环境、生态系统和气候都有重要影响, 是海洋和气候研究领域的主要热点之一^[4-9]。

印尼贯穿流出流海域受到通过龙目海峡、翁拜海峡和帝汶通道进入印度洋的印度贯穿流的直接影响的同时, 还会受到爪哇沿岸流、印度洋南赤道流、西澳大利亚海流以及 Leeuwin 海流等的综合影响, 再加上中尺度涡多发, 导致该海域海洋动力环境复杂。印尼贯穿流出流海域早期的观测断面来自法国和印度尼西亚合作的 JADE 项目, 其于 1989 年 8 月和 1992 年 2 月在澳大利亚北部和巴厘岛之间断面实施剖面观测^[10-13]。WOCE(the World Ocean Circulation Experiment)开展了 IX1 断面自 1986 年以来大约每两周观测一次的 XBT(expendable bathythermograph)观测^[14-16]。与多数以年变化为主要周期变化的海域不同, 印尼贯穿流出流海域在多流系综合控制下并受局地大气强迫影响, 该海域海洋环境在季节内、半年周期、年周期和年际尺度均呈显著变化。该海域海洋环境季节内尺度变化主要由赤道印度洋季节内振荡信号西传至巽他岛链后沿岛链西传以及局地大气季节内振荡强迫海洋所致; 半年周期变化则与印度洋季风转换密切相关; 年际变化

收稿日期: 2020-04-29

资助项目: 国家重点研发计划项目——大气海洋耦合机制、同化方法与数值模式研究(2017YFC1404201); 国家自然科学基金项目——班达海水体充放过程及其对印尼贯穿流的调制机理研究(41776042); 国家电网公司科技项目——海底电缆工程高精度多元数据获取及分析技术研究(JYYKJXM[2017]003); 全球变化与海气相互作用专项——热带印度洋海洋过程与海气相互作用(GASI-IPOVAI-02)

作者简介: 金娇燕(1995-), 女, 硕士研究生, 主要从事物理海洋学方面研究. E-mail: 384911386@qq.com

*** 通信作者:** 王永刚(1977-), 男, 研究员, 博士, 主要从事潮汐潮流与海洋环流的分析和数值模拟方面研究. E-mail: ygwang@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

则表现出受厄尔尼诺和印度洋偶极子影响。

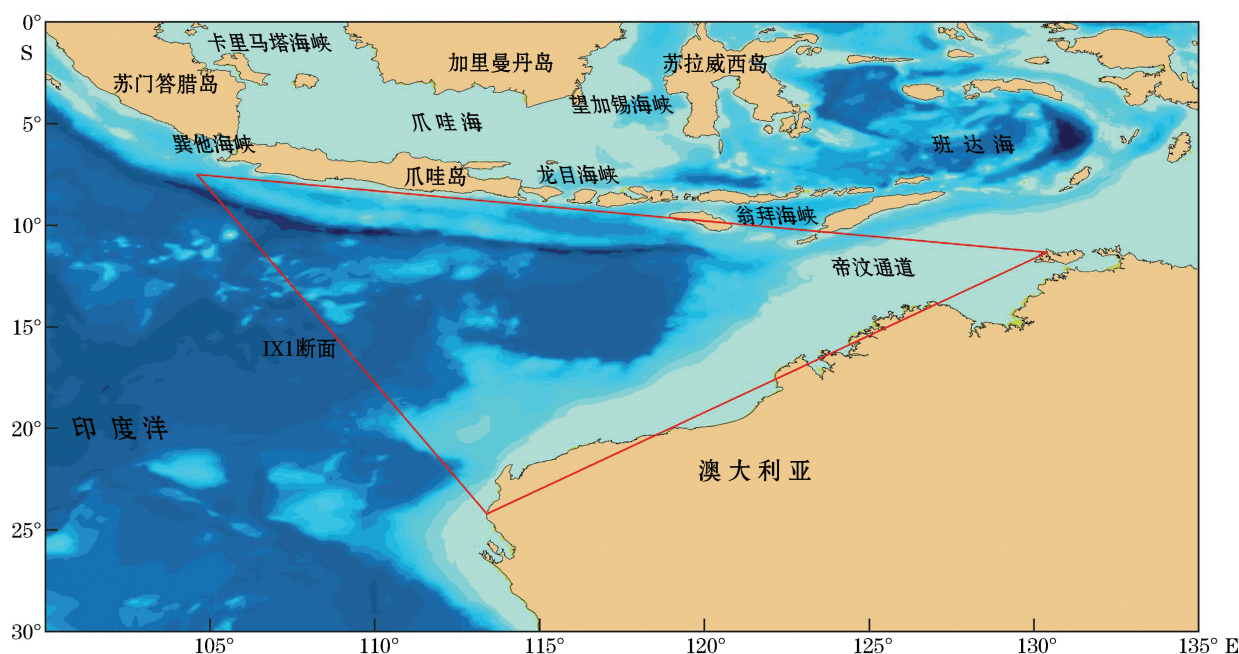
本文利用卫星高度计测高资料,采用 EOF 分解方法,分析印尼贯穿流出流海域海面高度异常的时空变化特征,并探讨其季节内至年际变化的主要机理。

1 资料及方法

1.1 数据介绍

本文使用的海面高度异常日平均数据来自 Aviso 校对整理的卫星高度计资料(<http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/madt.html>),水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$,时间跨度为 1993 年 1 月至 2013 年 12 月。

针对印尼贯穿流出流海域,我们提取了东起巴瑟斯特岛,西至印度尼西亚巽他海峡,止于西澳大利亚利尔蒙斯西北角之间的印尼贯穿流三角出流区域(图 1)的数据资料。我们通过对这些数据做 EOF 分析,来研究此海域海面高度异常的时空分布变化规律。



注:红色框区为本文研究海域

图 1 印尼贯穿流出流海域地形图

Fig.1 Topographic map of the ITF outflow area

1.2 经验正交分解(EOF)分析方法

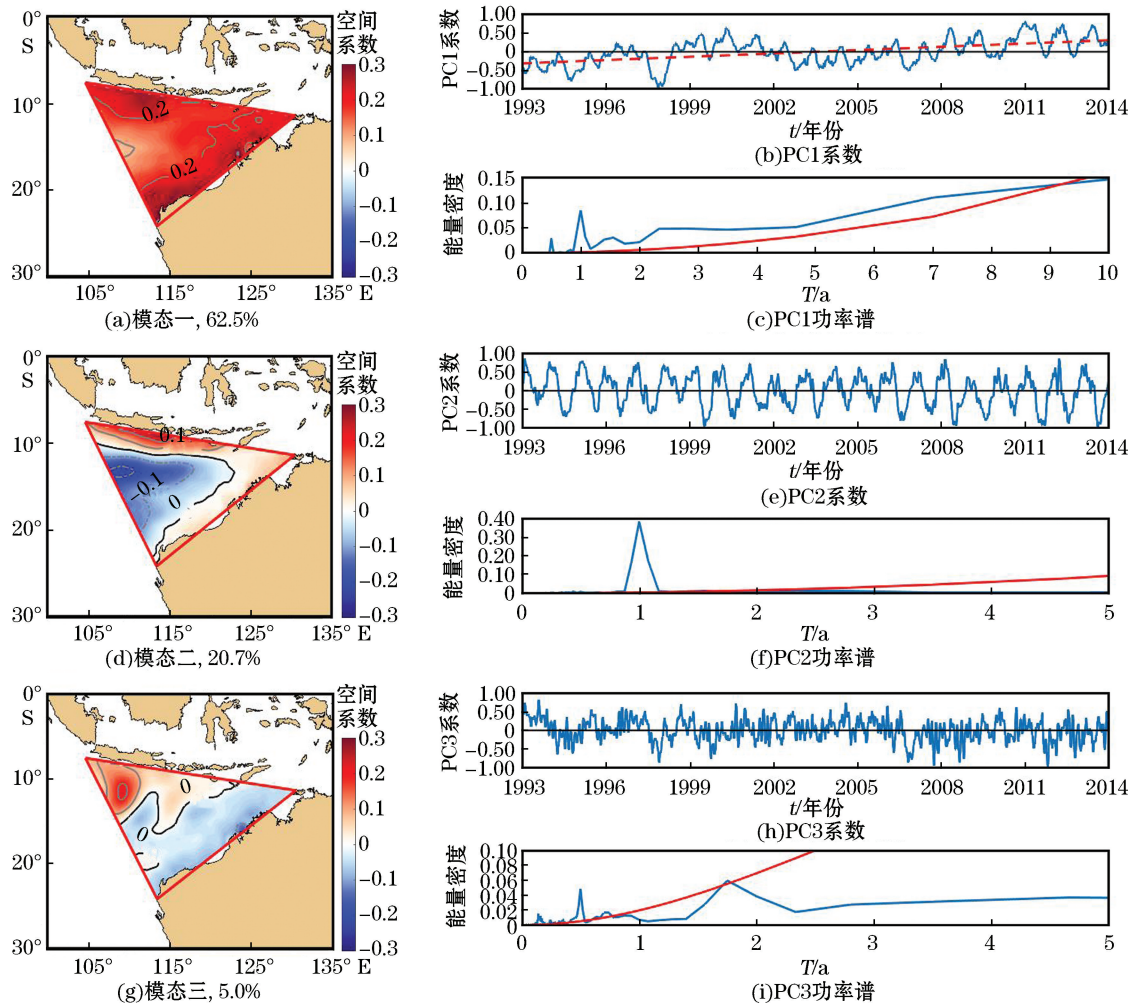
EOF 分解实质上就是一个求矩阵的特征值和特征向量的过程,而我们使用经过不同方法处理之后的矩阵,得到的结果会产生一定的差别。本文将日平均海面高度异常数据作为分析数据源,进行 EOF 分解^[17],根据面向年际至季节内特征规律分析的需要,我们采用以下 2 种 EOF 分析方法:

1) 直接用海面高度异常数据矩阵 A_{it} 进行 EOF 分析;

2) 去空间均值法(简称 S 法)^[18-19]:为了突出季节内变化特征,用去空间均值处理后的距平矩阵 X_{it} 进行 EOF 分析, $X_{it} = A_{it} - P_t$, 式中, A 和 X 为数据矩阵, P_t 是研究海域海面高度异常数的空间均值序列。

2 印尼贯穿流出流海域海面高度异常场 EOF 分析

直接用海面高度异常数据进行 EOF 分解后前 3 个模态的空间结构和时间系数及其对应的功率谱分析的结果(图 2)显示:前 3 个模态的方差贡献分别为 62.5%, 20.7% 和 5.0%, 第四模态方差贡献低于 4.5%。由前 3 个模态的时间系数变化(图 2b, 2e 和 2h)可见, 3 个模态由低频向高频变化, 对应的典型变化周期(图 2c, 2f 和 2i)包括年际变化、年变化、半年变化及更为高频的季节内变化。第一模态空间特征表现为印尼贯穿流出流海域海面高度异常全海域同涨同落特征, 爪哇岛南侧和澳大利亚近岸区域变化幅度较大。第一模态时间系数 PC1 具有显著的年际变化特征, PC1 与 Niño3.4 指数的相关系数在滞后 1 个月达到最大, 可达 0.65; 与印度洋偶极子亦存在相关关系, 在滞后 1 个月时达到最大, 相关系数为 0.34, 均超过 95% 置信度检验。也就是说, 在厄尔尼诺年印尼贯穿流出流海域海面高度会异常偏高, 在拉尼娜年印尼贯穿流出流海域海面高度异常偏低, 与印尼贯穿流受太平洋和印度洋海面高度差驱动相符。PC1 存在显著的年际变化的同时还存在明显的海面高度上升趋势, 其上升速率为 0.6 cm/a, 与基于海面高度异常计算的该海域区域平均海面上升趋势



注:图 a, d 和 g 分别为 EOF 的第一、第二和第三模空间分布;图 b, e 和 h 分别对应 EOF 第一、第二和第三模态的时间序列, 其中红色虚线对应第一模态时间序列的趋势;图 c, f 和 i 分别为对时间序列进行相对应的功率谱分析的结果,

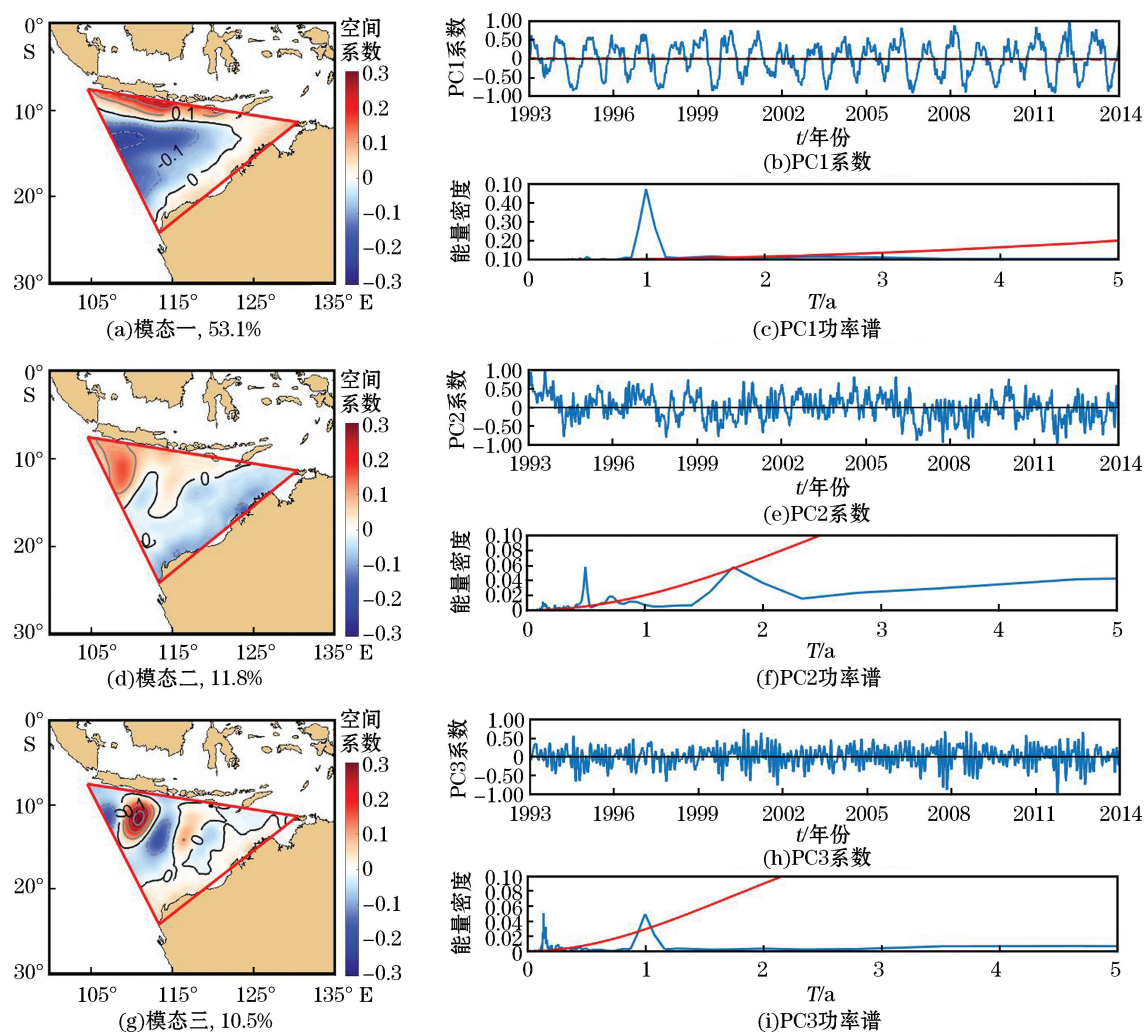
其中红色实线对应时间序列的 95% 置信曲线

图 2 海面高度异常 EOF 分析结果

Fig.2 EOF analysis results of sea level anomaly

率(约为 0.62 cm/a)一致。海面高度异常 EOF 分解第二模态时间系数呈明显的年变化特征,其对应的空间分布为近岸与外海呈“跷跷板”式变化。海面高度异常 EOF 分解第三模态时间系数功率谱分析显示,其半年周期变化较为显著,对应的空间分布变化的高值区位于爪哇岛南侧。

考虑到印尼贯穿流出流海域季节内变化特征也较为典型,但直接用海面高度异常数据进行 EOF 分解得到的主模态未能完全揭示季节内变化情况,为了更为清晰地分析此类更高频的变化特征,我们进一步开展了去空间均值(S 法)处理后的海面高度异常资料的 EOF 分解。图 3 为分解后的前 3 个模态的空间结构和时间系数及其对应的功率谱分析结果,前 3 个模态的方差贡献分别为 53.1% 、 11.8% 和 10.5% 。与图 2 相比较可见,S 法 EOF 的第一和第二模态分别与直接 EOF 分解后图 2 的第二和第三模态完全对应,其主周期分别对应年变化和半年变化。S 法 EOF 分解第一模态年周期变化表现为印尼岛链南侧和澳大利亚沿岸海域海面高度异常场冬高夏低变化特征,外海则与之反位相,且在爪哇岛沿海岸海域年变化幅度最大。S 法 EOF 分解第二模态半年周期变化最为显著,变化最显著的区域位于爪哇岛南侧以 $(109^\circ\text{E}, 12^\circ\text{S})$ 为中心的海域。此半年周期变化可能受赤道印度洋 Wyrski 急流影响所致,Wyrski 急流实际上是赤道印度洋急流,只是在春季



注:图 a、d、和 g 分别为 EOF 的第一、第二和第三模态空间分布;图 b、e 和 h 分别对应 EOF 第一、第二和第三模态的时间序列,其中红色虚线对应第一模态时间序列的趋势;图 c、f 和 i 分别为对时间序列进行相对应的功率谱分析的结果,

其中红色实线对应时间序列的 95% 置信曲线

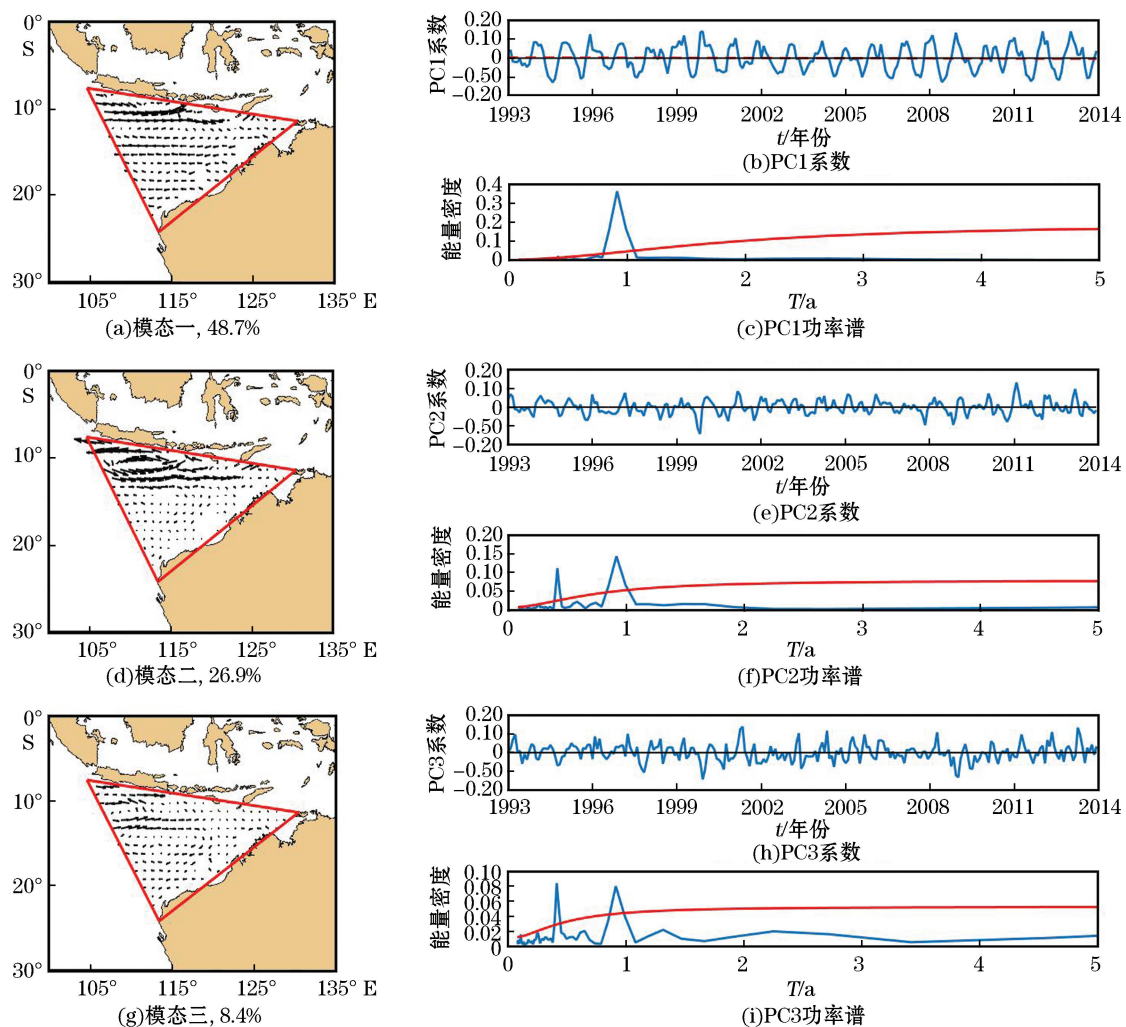
图 3 海面高度异常 S 法 EOF 分析结果

Fig.3 EOF analysis results of S-method for sea level anomaly

和秋季时强于其他月份,而这种半年一次的变化会影响到印尼贯穿流出流海域海面高度异常的变化。本文利用 SODA^[20] (Simple Ocean Data Assimilation) 海流资料构建 Wyrтки 急流指数,分别选取 Wyrтки 急流春季($65^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$, $2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) 和秋季($60^{\circ}\sim 75^{\circ}\text{E}$, $2^{\circ}\text{S}\sim 2^{\circ}\text{N}$) 典型海区纬向流平均来构建 Wyrтки 急流春季指数和秋季指数,相关分析结果显示, S 法 EOF 分解第二模态时间系数与 Wyrтки 急流春季指数和秋季指数均呈正相关,春季指数和秋季指数与第二模态时间系数的相关系数差异不大,在 0.36 左右,超过 95% 置信度检验。

S 法 EOF 第三模态时间系数显示出典型的季节内变化特征,其空间分布则表现为沿印尼岛链方向正负相间的涡带分布特征,该空间分布特征既可能与沿岛链传播的 MJO 相关也可能与局地季节内尺度的大气强迫有关,另外该海域还是涡旋多发区,第三模态空间分布中的气旋与反气旋涡旋相间的结构也可能与该海域中尺度涡的生成和传播有关^[21]。

为了更加清晰地了解海面高度异常所对应的海洋动力环境状况,本文采用 S 法 EOF 对同期的 SODA 再分析资料 50 m 层月平均流场进行了分析, EOF 分析结果见图 4。由图 4 可见,流场 EOF 分解第一模态和第二模态在空间分布上与 S 法海面高度异常分析结果(图 3)基本符合,在时间系数上除图 3f 与图 4f 相比还



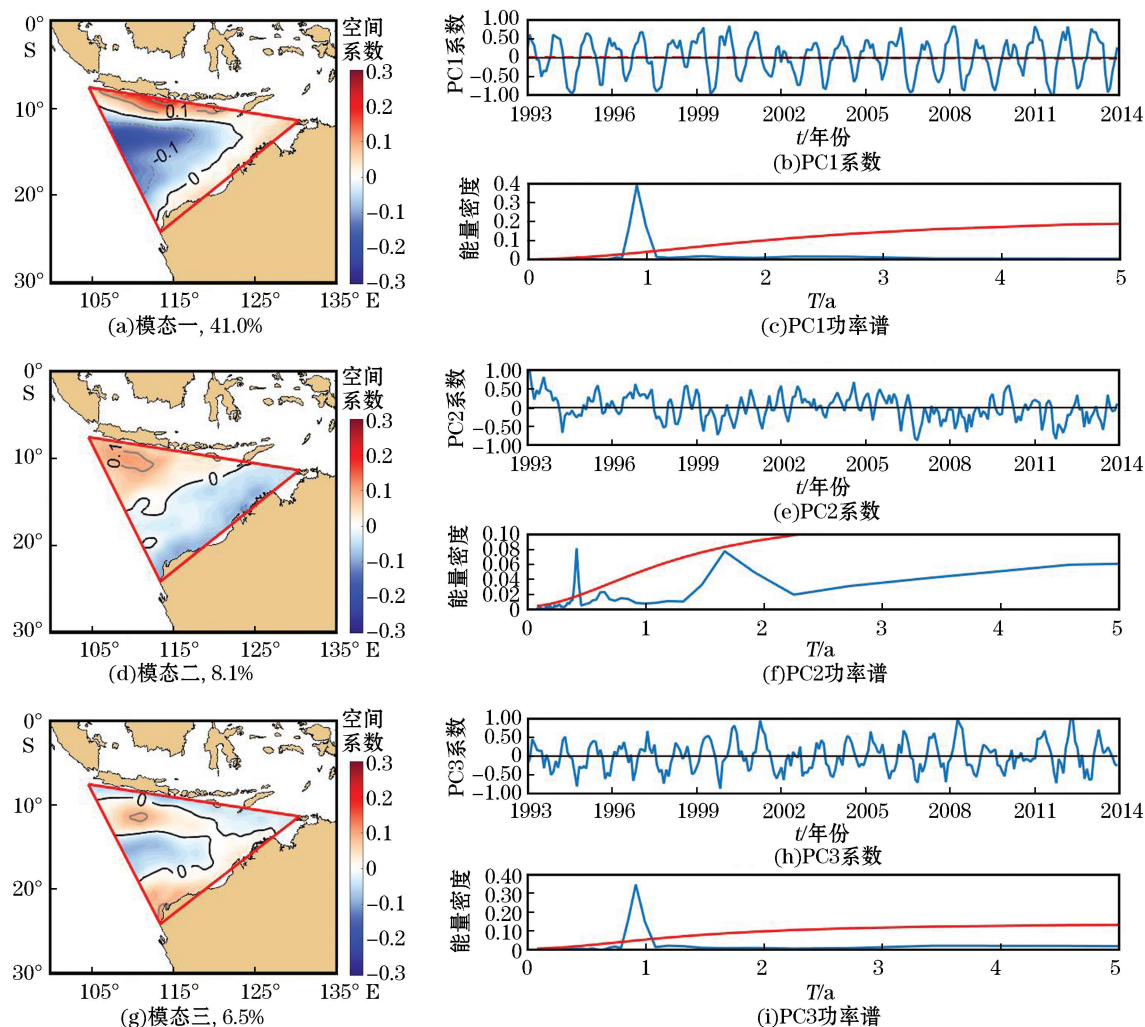
注:图 a, d, 和 g 分别为 EOF 的第一、第二和第三模态空间分布;图 b, e 和 h 分别对应 EOF 第一、第二和第三模态的时间序列,其中红色虚线对应第一模态时间序列的趋势;图 c, f 和 i 分别为对时间序列进行相对应的功率谱分析的结果,

其中红色实线对应时间序列的 95% 置信曲线

图 4 SODA 月平均 50 m 层海流 S 法 EOF 分析结果

Fig.4 EOF analysis results of S-method for the SODA monthly average 50 m layer ocean current

表现出年周期变化信号外,其他特征也基本一致,说明 SODA 再分析流场数据与卫星测高海面高度异常数据在时空变化方面能够较好地匹配。选取 100 m 和 150 m 层的 SODA 再分析流场得到的结果与 50m 流场基本一致(图略)。在 200 m 以深,由于受到其他动力过程影响,得到的结果存在较大差异和不确定性。进一步分析海面高度异常与环流结构可见,爪哇岛链南侧海面高度异常高值区(图 3a)主要对应于印尼贯穿流和南赤道流的年变化,而中部海盆的低值区则与 EGC 密切相关;空间分布(图 3d)则对应于爪哇沿岸流与南赤道流共同作用下形成的涡旋的半年周期变化,只是 SODA 再分析资料分析得到的涡旋中心较海面高度异常场分析得到的涡旋中心更偏近岸且其还存在年周期变化特征。由于 SODA 资料为月平均海流资料,难以刻画季节内变化尺度的变化,但比较图 4g 和图 3g 基本能发现其在年周期变化方面存在一定的关联。对海面高度异常场取月平均进行 S 法 EOF 分解(图 5),比较图 3 第三模态和图 5 第三模态可见,取月平均后第三模态体现了年周期变化特征(图 5i),且在图 3g 正负相间的涡旋分布由一个带状变化区域所替代,进一步与环流第三模态结果比较发现,该带状变化区域与图 4g 的环流结构能够较好地对应。



注:图 a, d, 和 g 分别为 EOF 的第一、第二和第三模态空间分布;图 b, e 和 h 分别对应 EOF 第一、第二和第三模态的时间序列,其中红色虚线对应第一模态时间序列的趋势;图 c, f 和 i 分别为对时间序列进行相对应的功率谱分析的结果,其中红色实线对应时间序列的 95% 置信曲线

图 5 月平均海面高度异常 S 法 EOF 分析结果

Fig.5 EOF analysis results of S-method for monthly average sea level anomaly

3 结 论

本文采用 EOF 分解方法对印尼贯穿流出流海域卫星测高海面高度异常数据的时空变化进行了分析。从时间周期来看,海面高度异常存在显著的年际变化、年变化、半年变化、季节内变化,且存在海面高度异常场升高的长期趋势;从空间变化来看,爪哇岛南侧海域为各时间尺度变化的最显著海域,这源自该海域直接受到印尼贯穿流出流、爪哇沿岸流、南赤道流和沿岸开尔文波传播等多源影响所致。

在年际尺度上,印尼贯穿流出流海域海面高度异常的年际变化与厄尔尼诺或拉尼娜关系密切,表现为海面高度异常场厄尔尼诺年偏高,拉尼娜年偏低;海面高度异常的年周期变化、半年周期变化均与环流变化相匹配,但其季节内变化因其与外源强迫、局地大气强迫甚至与中尺度涡生消等多过程相关,其机制机理需进一步分析研究。

参考文献(References):

- [1] GORDON A L. Is there a global scale ocean circulation?[J]. EOS Transactions American Geophysical Union, 1986, 67(9): 109-110.
- [2] BROEKER W. The great ocean conveyor[J]. Oceanography, 1991, 4(2): 79-89.
- [3] TOKINAGA H, XIE S P, TIMMERMAN A, et al. Regional patterns of tropical Indo-Pacific climate change: evidence of the Walker circulation weakening[J]. Journal of Climate, 2012, 25(5): 1689-1710.
- [4] GODFREY J S. The effect of the Indonesian Throughflow on ocean circulation and heat exchange with the atmosphere: a review[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C5): 12217-12237.
- [5] SCHNEIDER N. The Indonesian Throughflow and the global climate system[J]. Journal of Climate, 1998, 11(4): 676-689.
- [6] WAJSOWICA R C, SCHNEIDER E K. The Indonesian Throughflow's effect on global climate determined from the COLA coupled climate system[J]. Journal of Climate, 2001, 14(13): 3029-3042.
- [7] WANG Y G, FANG G H, WEI Z X, et al. Interannual variability of the Indonesian Throughflow: preliminary simulated results of a variable-grid global ocean model[J]. Advances in Marine Science, 2005, 23(2): 127-134. 王永刚, 方国洪, 魏泽勋, 等. 印度尼西亚贯穿流的年际变化: 一个全球变网格海洋模式的初步模拟结果[J]. 海洋科学进展, 2005, 23(2): 127-134.
- [8] WIJFFELS S E, MEYERS G, GODFREY J S. A 20yr average of the Indonesian Throughflow: regional currents and the interbasin exchange[J]. Journal of Physical Oceanography, 2008, 38(9): 965-1978.
- [9] SPRINTALL J, GORDON A L, WIJFFELS S E, et al. Detecting change in the Indonesian Seas[J]. Frontiers in Marine Science, 2019, 6(257): 1-24.
- [10] FIEUX M, ANDRIE C, DELECLUSE P, et al. Measurements within the Pacific-Indian Oceans Throughflow[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1994, 41(7): 1091-1130.
- [11] FIEUX M, ANDRIE C, CHARRIAUD E, et al. Hydrological and chlorofluoromethane measurements of the Indonesian Throughflow entering the Indian Ocean[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 1996, 101(C5): 12433-12454.
- [12] FIEUX M, MOLCARD R, ILAHUDE A G. Geostrophic transport of the Pacific-Indian Oceans Throughflow[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 12421-12432.
- [13] WIJFFELS S, SPRINTALL J, FIEUX M, et al. The JADE and WOCE I10/IR6 Throughflow sections in the southeast Indian Ocean. Part 1: water mass distribution and variability[J]. Deep Sea Research Part II, 2002, 49(7): 1341-1362.
- [14] MEYERS G, BAILEY R J, WORBY A P. Geostrophic transport of Indonesian Throughflow[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1995, 42(7): 1163-1174.
- [15] MEYERS G. Variation of Indonesian Throughflow and the El Niño—Southern Oscillation[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 12255-12264.
- [16] SPRINTALL J, WIJFFEL S, CHERESKIN T, et al. The JADE and WOCE I10/IR6 throughflow sections in the southeast Indian Ocean. Part 2: Velocity and transports[J]. Deep Sea Research Part II, 2002, 49(7-8): 1363-1389.
- [17] WEI F Y. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1999: 106-112. 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 106-112.
- [18] WANG F M, LI W, ZHEN Q A. Empirical orthogonal function analysis of coastal zone color scanner images in the East China Sea[J].

- Haiyang Xuebao, 1999(6): 110-115. 王法明, 李武, 郑全安. 海洋水色遥感资料的经验正交函数分析[J]. 海洋学报, 1999(6): 110-115.
- [19] HUANG E H, YANG Y M, PAN D L. Analysis of effects of invalid value on the temporal-spatial distribution of ocean remote sensing data with EOF and REOF methods[J]. Journal of Oceanography In Taiwan Strait, 2008, 27(1): 99-111. 黄二辉, 杨燕明, 潘德炉. 海洋遥感数据缺值对 EOF 和 REOF 时空分布分析的影响[J]. 台湾海峡, 2008, 27(1): 99-111.
- [20] CARTON J A, CHEPURIN G A, CHEN L. SODA3: a new ocean climate reanalysis[J]. Climate, 2018, 31: 6967-6983.
- [21] YANG G, YU W D, YUAN Y L, et al. Characteristics, vertical structures, and heat/salt transports of mesoscale eddies in the south-eastern tropical Indian Ocean[J]. Journal of Geophysical Research Oceans, 2015, 120(10): 6733-6750.

The Spatial-Temporal Variation of Sea Level Anomalies in the Indonesian Throughflow Outflow Region

JIN Jiao-yan^{1,2}, WANG Yong-gang^{1,2}, ZHU Yao-hua^{1,2}, XU Teng-fei^{1,2}, LI Shu-jiang^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, MNR, Qingdao 266061, China;*

2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China)*

Abstract: The Empirical Orthogonal Function (EOF) is used to analyze the sea level anomalies in the outflow region of the Indonesian Throughflow, and the results show that multi-scale variations of sea level anomalies exist in the study region. Significant ascending trend in the sea level anomalies with a value of 0.6 cm/a is found from 1993 to 2013. The sea level anomaly in the region shows interannual variation and is correlated with the Niño3.4 index, with a correlation coefficient of up to 0.65, implying positive/negative sea level anomalies during El Niño/La Niña events, respectively. The annual cycle of the sea level anomaly is mainly influenced by the Indonesian Throughflow, the South Java Current and the Eastern Gyral Current, and the semi-annual cycle is mainly caused by the eddy generated by the interaction between the South Java Current and the South Equatorial Current. Analysis also reveals that the sea level anomaly exhibits distinct intraseasonal variation in the outflow region of the Indonesian Throughflow.

Key words: Indonesian Throughflow; sea level anomaly; satellite altimetry; interannual variation; seasonal variation

Received: April 29, 2020