

基于卫星测高资料的班达海海平面 季节及年际变化研究*

王立伟^{1,2} 王永刚^{1,2} 徐腾飞^{1,2} 魏泽勋^{1,2}

(1. 国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061; 2. 海洋国家实验室区域海洋动力学与数值模拟功能实验室 青岛 266061)

摘要 本文基于法国空间局 AVISO 提供的格点化绝对动力地形(MADT: maps of absolute dynamic topography)资料, 分析了 1993 年 1 月—2013 年 12 月班达海(Banda Sea)海平面的季节和年际变化特征。班达海海面高度的季节变化主要表现为 12 月到翌年 4 月西北季风盛行时较高, 7 月到 10 月东南季风盛行时较低, 全年变化幅度为 16.5cm; 班达海东部近阿拉弗拉海(Arafuru Sea)与西南部近弗洛勒斯海(Flores Sea)海平面随季风转换表现出“跷跷板”形态。海平面的变化受比容海面变化和海水质量变化共同调制, 其中比容海面高度季节变化振幅为 14cm 左右, 约占海平面变化的 84%, 并且班达海比容海平面的季节性空间分布与总体海平面具有明显的一致性, 因此比容海平面的变化是造成班达海海平面季节变化的主要原因; 而风生 Ekman 流引起的海水堆积会影响班达海东北部的海平面高度。年际尺度上, 班达海海平面与 ENSO 事件密切相关, 月平均海面高度异常 EOF 分解第一模态方差贡献率高达 96%, 第一模态时间序列(PC1)滞后 Niño3.4 指数 1 个月左右时相关系数达到-0.76, 远超过 95%置信度水平; 相比之下, IOD 事件对班达海海平面的影响较小, PC1 与印度洋偶极子指数(DMI)之间的最大相关系数仅为-0.3, 低于 95%置信度水平。并且月平均比容海面异常和动力地形异常之间的差异在 ENSO 事件期间显著增大, 表明 ENSO 事件引起的平流输送在班达海海平面高度年际变化中起到重要作用。

关键词 班达海; 海面高度; 季节及年际变化; 比容海面高度

中图分类号 P731 **doi:** 10.11693/hyh20160200031

班达海(Banda Sea)位于印度尼西亚东部, 西靠苏拉威西岛, 北、东、南三面为班达弧所环绕, 通过海峡与周围的萨武海、帝汶海、阿拉弗拉海、塞兰海、马鲁古海和弗洛勒斯海等连通(图 1)。班达海总面积约 47 万平方公里, 平均水深 3064m, 最深处位于班达海东部的韦伯海槽约 7440m(陈史坚, 1989)。印度尼西亚贯穿流(Indonesian Throughflow, ITF)通过印度尼西亚海内众多的海峡从太平洋进入印度洋, 是全球海洋热盐环流传送带的关键环节, 维持全球大洋间的物质、动量和能量平衡(杜岩等, 2011)。班达海作

为 ITF 流经的一个重要海区, 接收由 ITF 运输的来自热带西太平洋的大部分水体和热量, 经几个重要的海峡通道流入印度洋。ITF 运输总量的约 80%通过望加锡海峡(Makassar Strait), 剩余的 20%流经东部的哈马黑拉海(Halmahera Sea)或利法马托拉通道(Lifamatola Passage)(Gordon *et al.*, 1996)。根据 INSTANT(International Nusantara Stratification and Transport)计划的结果, 2004—2006 年平均 ITF 入流约为 12.7Sv(1Sv=10⁶m³/s), 其中通过望加锡海峡的流入量约为 11.6Sv, 通过利法马托拉通道的流入量约为

* 国家自然科学基金委员会-山东省人民政府联合资助海洋科学研究中心项目, U1406404 号; 国家自然科学基金项目, 41476025 号, 41306031 号; “全球变化与海气相互作用”专项项目, GASI-03-01-01-04 号, GASI-IPOVAI-01-02 号。王立伟, 硕士研究生, E-mail: wanglw@fio.org.cn

通讯作者: 王永刚, 副研究员, E-mail: ygwang@fio.org.cn

收稿日期: 2016-02-05, 收修改稿日期: 2016-04-27

1.1Sv; 年平均 ITF 流出量约为 15.0Sv, 除了其中约 2.6Sv 通过龙目海峡(Lombok Strait)流出外, 剩余的约 12.4Sv 通过班达海流入印度洋(Gordon *et al.*, 1996, 1999, 2001, 2010)。

观测表明, 班达海表层存在明显的季节和年际变化。Gordon 等(2001)通过对班达海海面温度(SST)、海面高度异常(SLA)和局地风场数据的分析, 证实了 Wyrтки(1961)提出的班达海海面温度(SST)的季节变化主要受季风影响的机制, 东班达海和阿拉弗拉海(Arafura Sea)存在很强的由局地风应力旋度造成的 Ekman 抽吸, 从每年的 4 月持续到 11 月, 平均上升流量约 1.27Sv, 其将深层较冷的水输送到表层, 从而影响 SST。在正常年份下, Ekman 上升流导致了班达海较低的海表面温度以及较浅的温跃层, 而在 ENSO 事件发生的年份, 这一现象有所改变: El Niño 年东南季风盛行时, Ekman 上升流减弱而海表面温度与正常年份相比较冷; La Niña 年东南季风盛行时, 则对应较强的 Ekman 上升流以及较暖的海表面温度。Gordon 等(2001)认为这是由于受 ENSO 等大尺度运动的影响, 班达海温跃层发生抬升或下降, 从而影响海表面温度。Qu 等(2008)利用一个高分辨率海洋环流模式证实了印尼海域存在“缓存现象”, 具体表现为印尼海上层在每年 11 月到翌年 6 月西北季风盛行时表现为“储水期”, 储存了更多的水, 而在 7 月至 10 月东南季风盛行时为“排水期”, 他们认为这一现象主要受局地风场导致的 Ekman 流的辐聚辐散调制。Kida 等(2009)发现该海域 SST 的季节变化大多主要受季风控制, 也有一部分受表层热通量的影响。Gordon 等(2010)分析 INSTANT 计划资料时发现, 入流海域垂向剖面 and 出流区域存在明显差异, 具体表现为出流区域等温线比入流区域浅 15m 左右, 这说明在印尼贯穿流流经海域存在显著的上升流, 并且分为两个部分: 500m 以浅的温跃层上升流和 600m 以深的深层水上升流。Syamsudin 等(2010)在对班达海南边界流流速和流量的研究中发现其存在丰富的季节内、季节和年际变化, 他们认为这些信号主要受局地风场的季节变化、来自赤道印度洋激发的 Kelvin 波和 ENSO 的影响。Yuan 等(2013)通过对 ITF 观测资料的滞后相关分析, 证实了 Yuan 等(2011)提出的 ITF 是 IOD (Indian Ocean Dipole)事件在年际尺度上影响热带太平洋的重要信号通道, 在 IOD 事件发生的年份, ITF 自赤道太平洋向印度洋输送更多的暖水, 使太平洋温跃层抬升, 其激发的上升 Kelvin 波向东传播, 有利

于 ENSO 事件的产生。王健等(2014)发现望加锡海峡中 ITF 的年际变化主要受与 ENSO 和 DMI(Dipole Mode Index)等大尺度过程相关的 Kelvin 波、Rossby 波调制, 局地风场的作用并不是很重要。

本文采用法国空间局 AVISO 提供的 1993 年 1 月—2013 年 12 月的网格化绝对动力地形(MADT: maps of absolute dynamic topography)资料, 分析班达海区(图 1 黑色框内区域, 经纬度范围为 3.5°—7.5°S, 123.5°—134.5°E)海面高度的变化。第二部分描述数据和方法; 第三部分对 MADT 资料进行了气候态月平均处理, 分析了班达海面高度的季节变化特征; 第四部分计算了 MADT 年际异常场, 并对该异常场进行 EOF 分解, 将得到的第一模态时间序列与 Niño3.4 和 DMI 指数进行相关分析, 讨论该海区海平面高度的年际变化特征及其与 ENSO、IOD 事件的关系; 第五部分为总结与讨论。

1 资料与方法

本文采用的卫星测高资料为法国空间局 AVISO 下 SSALTO/DUACS 系统发布的融合了 Topex/Poseidon (T/P)、Jason-1/2、ERS-1/2 等多颗测高卫星得到的格点化绝对动力地形资料, 时间跨度为 1993 年 1 月—2013 年 12 月, 时间分辨率为 1 天, 空间分辨率为 0.25°×0.25°。绝对动力地形(ADT)为海平面异常(SLA)与平均动力地形(MDT)之和。相比 SLA 数据, ADT 能保留长时间尺度定常流影响的海平面高度信号。风场数据采用欧洲中期天气预报中心 ECMWF 提供的 ERA-Interim 数值预报再分析月平均 10m 风场。时间跨度为 1993 年 1 月—2013 年 12 月, 空间分辨率为 0.75°×0.75°。

MADT 数据下载网址: <http://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea-surface-height-products/global/madt.html>;

风场数据下载网址: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-mode/levtype=sfc/>。

本文采用的海洋 200m 以浅的月平均温盐场数据来自日本气象厅提供的 Ishii V6.13 版再分析资料。该资料主要基于 WOD05/WOA05(World Ocean Database/Atlas 2005)、全球温盐剖面计划 IRD(L'institut de recherché pour le developement, France)采集的温盐资料以及 ARGO 剖面数据等, 时间跨度为 1993 年 1 月—2012 年 12 月, 空间分辨率为 1°×1°。

Ishii 温盐场数据下载网址: <https://amaterasu.ees.hokudai.ac.jp/~ism/pub/ProjD/>。

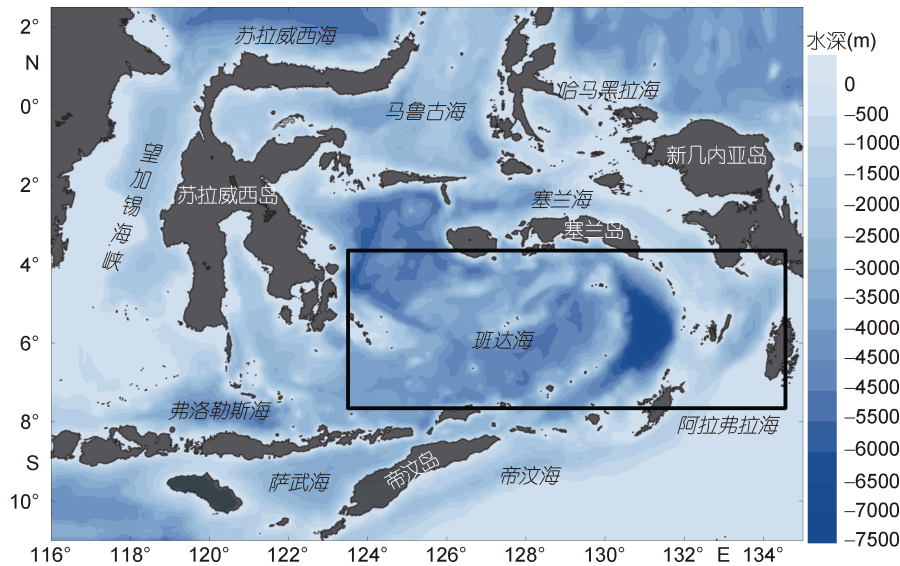


图 1 东印尼海地形

Fig.1 Geography of the eastern Indonesian seas

注: 黑色框区为本文研究海域, 填色图为水深(单位: m)

本文首先计算了班达海 MADT 气候态月平均空间分布, 研究班达海区域海平面的季节变化特征及其空间分布; 随后做出 MADT 区域月平均的距平场以及对应比容海面高度距平, 从整体角度分析班达海面高度季节变化和比容海面高度变化的关系, 其中比容海面高度的计算参照 Gill(1982)和 Shao 等(2015):

$$h_{\text{steric}}(x, y, t) = \int_0^D \frac{\rho_0(x, y, z) - \rho(x, y, z, t)}{\rho_0(x, y, z)} dz$$

其中 D 为水深, ρ_0 为标准海水密度(取参照温度 $T=0$, 盐度 $S=35$), ρ 为海水密度, ρ_0 和 ρ 的计算均使用基于 TEOS-10(Thermodynamic Equation of Seawater 2010)的 GSW 工具包(下载网址: <http://www.teos-10.org/software.html>)。然后对班达海 10m 风场进行了同样的空间分布处理, 并计算了气候态月平均风应力旋度的空间分布, 将其与班达海海平面的空间分布进行对比, 其中风应力旋度参照 Fang 等(2006), Lian 等(2015)文章中的计算方法

$$\text{curl } \bar{\tau} = \nabla \times \bar{\tau}$$

其中 $\text{curl } \bar{\tau}$ 为风应力旋度, $\bar{\tau}$ 为风应力, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$

为哈密顿算子。风应力计算方法如下

$$\bar{\tau} = \rho \cdot C_d \cdot U \cdot \bar{U}$$

其中 $\bar{\tau}$ 为风应力, ρ 为大气密度(本文取 1.3 kg/m^3), \bar{U} 为海洋上 10m 高度风场矢量, U 为风速标量, C_d 为拖曳系数。对于拖曳系数 C_d 的取法, 本文采用 Yelland

等(1996)的方法

$$C_d \cdot 1000 = \begin{cases} \left(0.29 + \frac{3.1}{U} + \frac{7.7}{U^2} \right), & 3 \text{ m/s} < U < 6 \text{ m/s} \\ (0.6 + 0.07 \cdot U), & 6 \text{ m/s} < U < 26 \text{ m/s} \end{cases}$$

为研究其年际变化, 本文首先对班达海区域逐日 MADT 资料进行了月平均处理, 基于月平均 MADT 资料计算了其年际异常场, 即减去其气候态月平均, 得到 MADTA(MADT Anomaly), 再对 1993 年 1 月—2013 年 12 月的 MADTA 资料进行了经验模态分解(EOF, empirical orthogonal function), 将其第一模态时间序列与 Niño3.4 指数、DMI 指数作超前滞后相关, 分析该海域海平面年际变化与 ENSO 事件以及 IOD 事件之间的关系。其中 Niño3.4 指数定义为太平洋 $5^\circ\text{S}—5^\circ\text{N}$, $120^\circ—170^\circ\text{W}$ 区域的海表面温度异常(SSTA)区域平均; DMI 指数定义为印度洋 $10^\circ\text{S}—10^\circ\text{N}$, $50^\circ—70^\circ\text{E}$ 区域与 $0^\circ—10^\circ\text{S}$, $90^\circ—110^\circ\text{E}$ 区域的海表面温度异常(SSTA)区域平均之差(Saji *et al.*, 1999)。之后对比容海面高度也做了相同的处理, 分析班达海海平面年际变化特征与比容海面变化的关系。

Niño3.4 指数与 DMI 指数下载网址: <http://climexp.knmi.nl/selectindex.cgi?id=someone@somewhere>

2 海平面的季节变化

2.1 季节变化特征

海平面的变化主要受两个因素影响: 海水质量的变化和海水密度的变化导致的海面高度变化(Gilson

et al., 1998), 其中后者被称为比容海面高度(Steric height, SH)。Gill 等(1973)提出海平面的季节变化主要由大气压强、局地风场和热膨胀造成的比容海平面这三个因素的季节变化所决定。图2为班达海气候态月平均海面高度距平(MADTA)(减去1993—2013年多年年平均海面高度)和基于Ishii温盐场得到的200m以浅比容海面高度距平(steric height anomaly, SHA)气候态月平均时间序列,从图中可以看出,班达海海面高度和比容海面高度均表现出明显且一致的季节变化特征,其海面高度最大值均出现在3月,最低值出现在8、9月。每年1—4月,班达海海面高度略高于比容海面高度,而每年6—9月,班达海海面高度略低于比容海面高度,前者周年变化幅度约为16.5cm,后者约为14cm,比容海面高度约占海平面高度变化的84%。

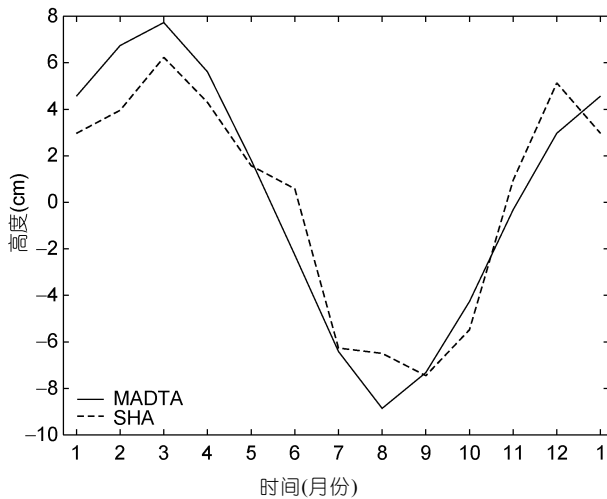


图2 班达海 MADTA 和 SHA(比容海面高度距平)的季节变化

Fig.2 Seasonal variability of the MADTA and SHA (steric height anomaly) averaged over the Banda Sea

图3为班达海MADTA和SHA空间分布。可见,班达海海面高度3月最高,8月最低,其中班达海东部近阿拉弗拉海区域与西南部近弗洛勒斯海区域海面高度存在着一个“跷跷板”形态。具体表现为:班达海东部近阿拉弗拉海海面高度周年变化幅度约为27cm,其海平面从每年11月开始升高,到翌年3月达到峰值,随后开始降低,8月达到最低值;而班达海西南区域近弗洛勒斯海周年变化振幅约为12cm,每年11月海平面开始下降,到翌年2、3月达到最低,随后海平面开始升高,到5、6月达到最高,这与班达海东部3月高、8月低的变化态势相反。SHA的空间分布(图中等值线)与MADTA基本相似,11月到翌年5月较高,

6—10月较低,并且在1月、2月、3月、6月、7月、11月也都出现了较为明显的“跷跷板”形态。这一结果符合Gordon等(2001)对班达海SST的研究结果。他们计算了1982—2000年气候态月平均SST以及1993—2000年月平均SLA,发现每年班达海海面高度低值出现在8月底9月初,对应较低的SST以及较浅的温跃层;最高值出现在4、5月,对应较高的SST;空间分布上班达海东部近阿拉弗拉海区SST变化幅度最大。然而在图3中的部分区域,MADTA和SHA表现出了明显差异:2月、12月的班达海东北部MADTA均明显高于SHA,5月、6月、8月的班达海东北部MADTA明显低于SHA。结合图2曲线中两者表现出的季节性差异,说明班达海海平面的变化还存在其他较为重要的动力机制。Gordon等(2001)对班达海SST的分析表明,班达海温跃层较浅,且海平面在西北季风盛行时升高,东南季风盛行时下降,这与本地季节变化的Ekman上升流相对应。因此每年1—3月和6—9月两者的差异可能是局地季风影响下,海平面的辐聚辐散导致的。

2.2 季节变化机制

当班达海盛行西北季风时(11月到翌年3月),弗洛勒斯海大部分表层海水流入班达海后下沉,只有一小部分表层海水通过班达海向北输送至马鲁古海和哈马黑拉海,向南汇入帝汶海;相反,当东南季风盛行时(5—9月),班达海和阿拉弗拉海出现上升流来补偿通过帝汶海峡流入印度洋的海水(Wyrtki, 1958)。图4为班达海各月(1993—2013年平均)海表风场以及风应力旋度分布。从图中可以看出,在5—9月,班达海受东南季风控制,此时班达海东部风场风应力旋度为负,西南部风应力旋度为正;而12月到翌年3月盛行西北季风,风应力旋度与5—9月相反,即东部北部为正旋度,西部南部为负旋度,而4月和10、11月为季风转换期。结合图3海面高度距平来看,西北季风盛行时,班达海平均风应力旋度为正,海水辐聚为主,整体海平面较高,其中西南部近弗洛勒斯海的风应力负旋度导致海水辐散,海平面较低,东部近阿拉弗拉海的风应力正旋度导致海水辐聚,海平面较高;而6月到10月平均风应力旋度为负,整体海平面较低,其中西南部近弗洛勒斯海的风应力正旋度导致海水辐聚,海平面较高,东部近阿拉弗拉海的风应力负旋度导致海水辐散,海平面较低。这一点和图2中比容海面高度与总体海面高度之间的差异相符合。除了向海洋输入旋度场影响海面高度以及上层热

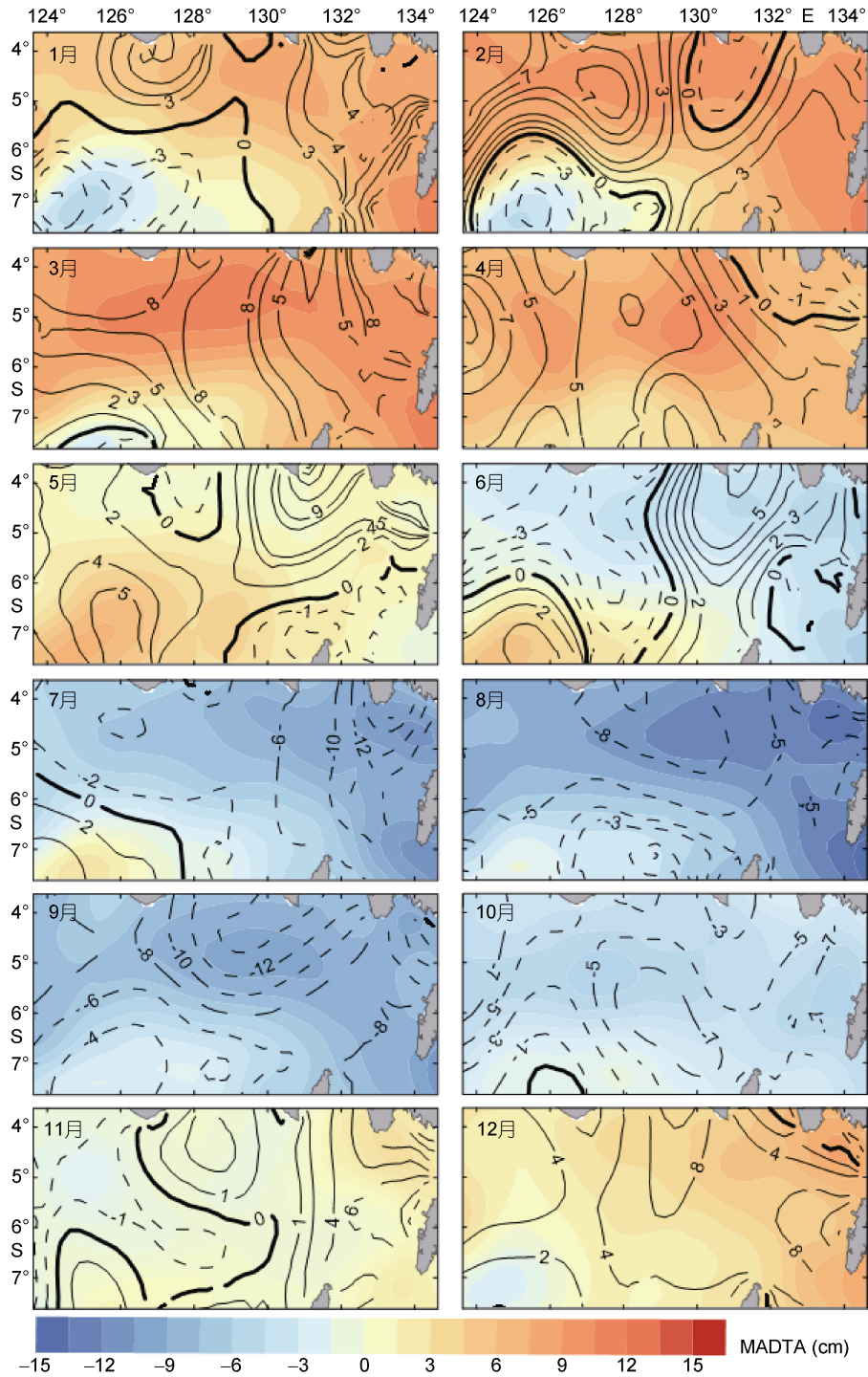


图3 班达海 MADTA 与 SHA 气候态月平均空间分布
 Fig.3 Climatological monthly-mean MADTA and SHA in the Banda Sea
 注: 填色图为 MADTA, 等值线为 SHA(单位: cm)

含量外, 局地风场激发的 Ekman 输运也会对班达海海面造成一定影响。

图 5 为局地风场激发的班达海 Ekman 输运和 MADTA 与 200m 以浅 SHA 之差, 如图中所示, 在 12

月到翌年 3 月, 西北季风驱动班达海上层东北向的 Ekman 输运, 使部分海水在班达海东北部的塞兰岛南部和新几内亚岛西南部堆积, 从而造成了海水质量上的“南低北高”; 而每年 5—9 月班达海盛行东南

季风激发了班达海上层西南向的 Ekman 输运, 导致海水向西南方向堆积, 东北陆地边界附近海水质量减少, 造成了质量上的“南高北低”。这一现象也解释了 MADTA 与 SHA 空间上的差异, 12 月和 2 月东北部的 MADTA 高于 SHA 原因是局地风场激发的东北向 Ekman 输运在东北陆地边界堆积, 海水质量增加; 同样 5 月、6 月、8 月西南向 Ekman 输运使东北陆地

边界海水质量减少, 且班达海东北部水深较浅(图 1), 海水辐散引发的上升流对上层热含量的影响较小, 从而导致东北部的 MADTA 低于 SHA。

班达海在 1—3 月盛行西北季风, 驱动上层东北向的 Ekman 输运, 使海水向班达海东北部堆积, 并且正的风应力旋度导致班达海上层海水辐聚, 总体海面高度略高于比容海面高度, 另一方面上层海水堆

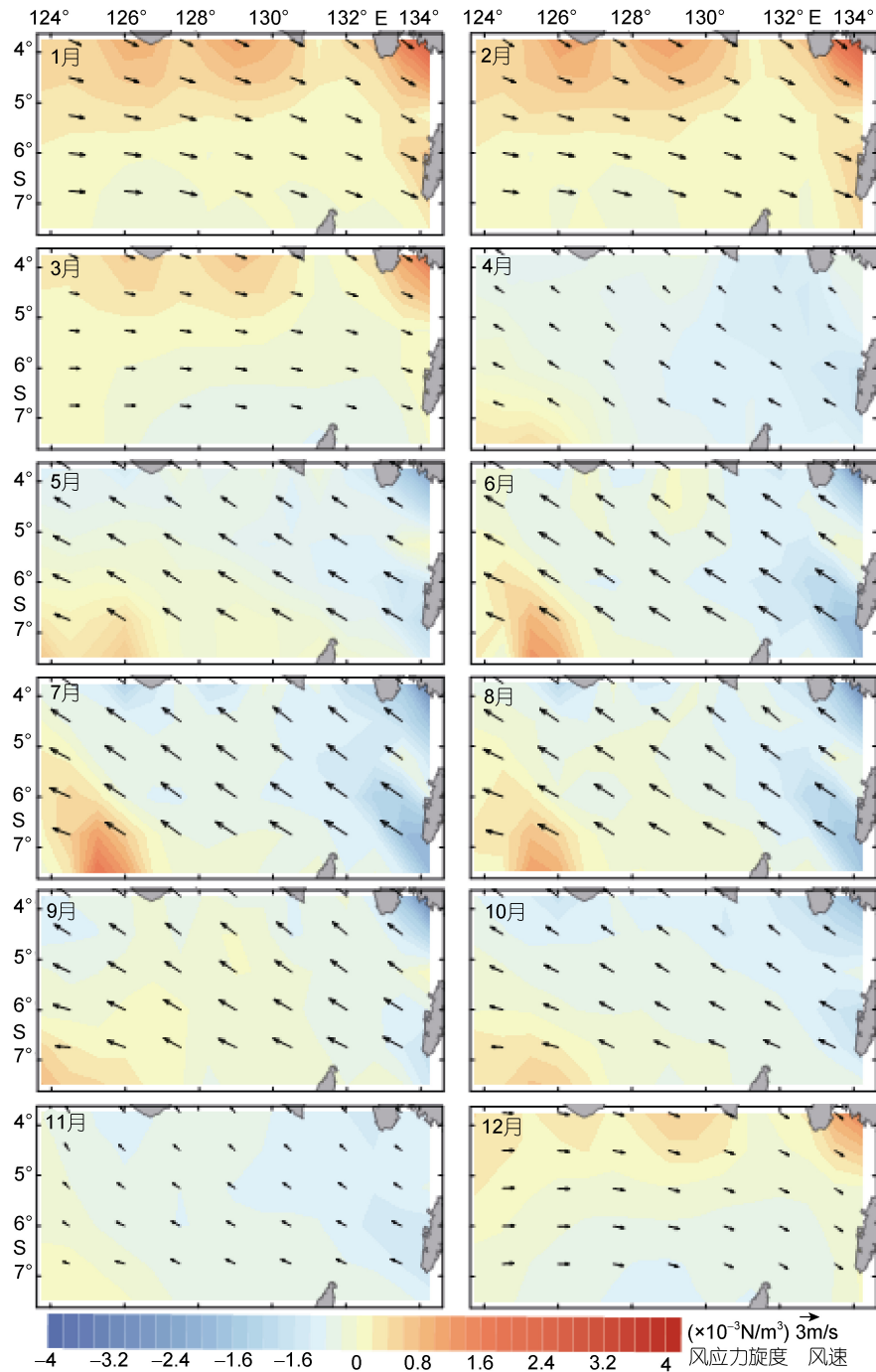


图 4 班达海海表风场(箭头)和风应力旋度气候态月平均空间分布(填色图)

Fig.4 Climatological monthly-mean sea surface wind velocity and wind stress curl over the Banda Sea

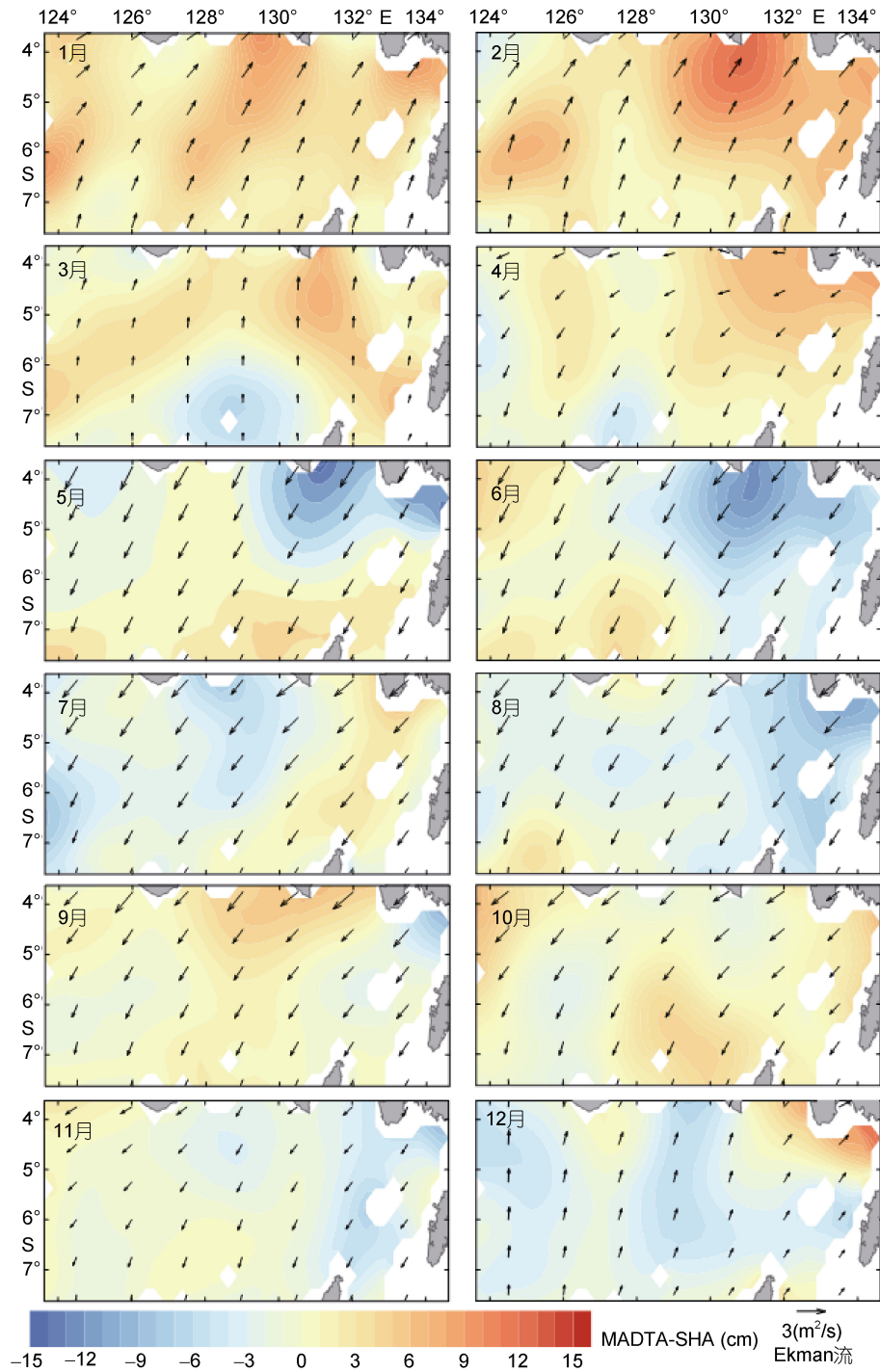


图 5 班达海上层 Ekman 运输(箭头)和 MADTA 与 SHA 之差(填色图)

Fig.5 The Ekman transport in Banda Sea (arrows) and the difference between MADTA and SHA (color bar)

积引起的上层热含量增加会导致比容海平面的升高;而 6—9 月东南季风盛行,驱动上层西南向的 Ekman 运输,使海水从班达海西南部流出,并且负的风应力旋度导致班达海上层海水辐散,质量减少,总体海面高度略小于比容海面高度,而海水辐散引起的 Ekman 上升流带来的低温高盐水会使上层热含量减

少,比容海面高度较低。

3 班达海海面高度年际变化

为研究班达海区域海平面的年际变化,本文首先计算了 MADT 的年际异常场 MADTA(MADT Anomaly),然后对 MADTA 进行 EOF 分解。EOF 分

解后得到前三模态方差贡献率分别为 96.10%、1.56%、0.90%，其中第一模态方差贡献率占到了 95% 以上，而后几个模态所占方差很小，因此本文着重对第一模态进行分析讨论。图 6 为 EOF 分解第一模态 (EOF1) 的空间分布，从第一模态空间分布中可以看出，班达海区整体海平面变化表现出同相位，其中班达海东部海区海平面变化幅度略高于西南海区近弗洛勒斯海的变化幅度。

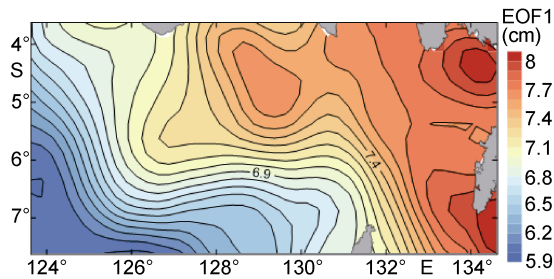


图 6 班达海 MADT 异常场 EOF 分解第一模态空间分布(cm)
Fig.6 The first EOF modes of the Banda Sea MADTA

图 7 为第一模态时间序列 PC1(负)与 Niño3.4 指数和 DMI 指数，其中 Niño3.4 指数和 DMI 指数分别代表太平洋 ENSO 事件和印度洋 IOD 事件。据此分析班达海面高度的年际变化与 ENSO 和 IOD 之间的关系。从图 7 中可以看出，PC1 与 Niño3.4 指数有很强的相关性，尤其在 1997—1998、2002—2003、2004—2005、2006—2007 和 2009—2010 的 El Niño 年以及 1995—1996、1999—2000、2011—2012、2007—2008 和 2010—2011 的 La Niña 年中均表现出了较为明显的相位变化，在正负 IOD 事件的年份，PC1 也表现出一定相关性，具体表现为 El Niño 年和正 IOD 事件对应较高的海平面，La Niña 年和负 IOD 事件对应较低的海平面。

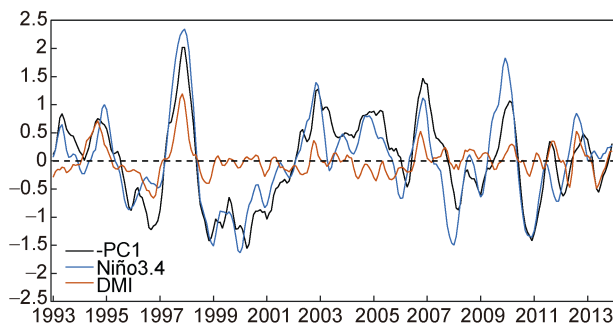


图 7 班达海 MADT 异常场 EOF 分解第一模态时间序列 PC1(负), Niño3.4 指数, 以及 DMI 指数(已去除线性趋势)
Fig.7 The first EOF modes of the Banda Sea MADTA, Niño3.4 and DMI index (linear trend has been removed)

图 8 为 PC1 与 Niño3.4 指数、DMI 指数的超前滞后相关。从图中可以看出，PC1 与 Niño3.4 指数和 DMI 指数均呈负相关，其中 PC1 滞后 Niño3.4 指数 1 个月的相关系数为 0.76 并超过 95% 置信度水平。班达海海面年际尺度上的变化与 ENSO 间的关系，许多前人的工作中也有总结(Wytki, 1961; Bray *et al*, 1996; Gordon *et al*, 2001; Iskandar, 2010; Syamsudin *et al*, 2010)。其中 Gordon 等(2001)用 1993 年 1 月—1999 年 12 月的 SLA 数据与 Niño3 指数对比，证实了 Bray 等(1996)提出的班达海海面 La Niña 年较高而 El Niño 年较低的变化特征。本文利用更长时间资料，发现 2000—2013 年班达海海面与 ENSO 间依然显著相关，尤其在 El Niño 年与 La Niña 年中，海平面的起伏有明显的相位变化。

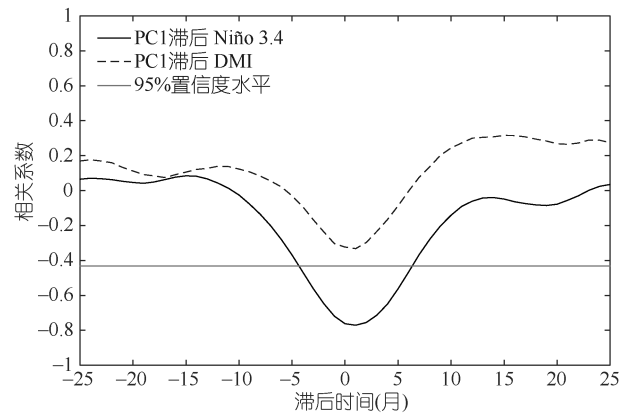


图 8 PC1 与 Niño3.4 及 DMI 指数的滞后相关系数
Fig.8 Lag correlation between PC1 and Niño 3.4 or DMI index

班达海 SST 的年际变化与 ENSO 和 IOD 事件有密切的联系，具体表现为 La Niña 年对应较高的 SST，El Niño 年和 IOD 事件对应较低的 SST(Gordon *et al*, 2001; Wijffels *et al*, 2004; McClean *et al*, 2005; Iskandar, 2010)。而 SST 的变化与海洋上层热含量的变化密不可分，图 9 为减去气候态月平均的 MADT 和 SH 的区域平均时间序列，与 MADT 相似，比容海面高度也表现出明显的年际变化，并且变化趋势与 MADT 基本一致，在 El Niño 年比容海面降低，La Niña 年升高，两者同期相关系数为 0.93，并通过 99% 置信度检验；MADT 年际变化幅度约为 36cm，比容海面年际变化幅度约为 17cm，两者在极端 ENSO 事件发生的月份存在显著的高度差，这说明 ENSO 等大尺度运动发生时，不仅伴随着由于班达海上层热含量的变化导致的海平面高度变化，还存在着明显局地海水质量的变化。

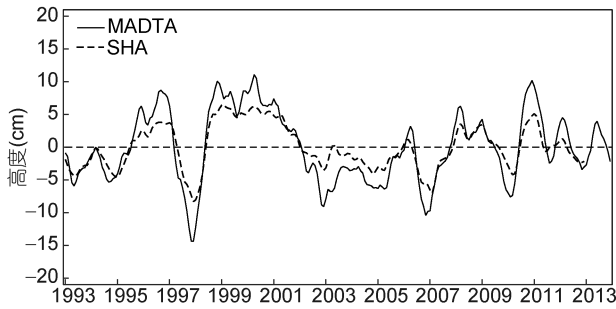


图9 班达海 MADT 和比容海面高度异常年际变化(已去除线性趋势)

Fig.9 Interannual variability of MADTA and SHA of the Banda Sea (linear trend has been removed)

El Niño 建立初期,赤道西太平洋西风异常,激发暖的下沉 Kelvin 波和冷的上升 Rossby 波,其中下沉 Kelvin 波向东传播,使赤道东太平洋海区 SST 上升,促进 El Niño 的形成;而上升 Rossby 波西传至印度尼西亚群岛,其中一部分以上升沿岸陷波(coastally trapped waves, CTW)形式传入班达海,使班达海温跃层抬升, SST 降低; La Niña 年则情况相反(Wajsowicz *et al.*, 2003; Iskandar, 2010)。因此 El Niño 发生的年份班达海比容海面较低, La Niña 年则对应较高的比容海面。ENSO 事件发生时,通常伴有尺度的天气过程,例如 El Niño 现象发生时,沃克环流减弱,西太平洋大气上升区东移,班达海表面出现西风异常; La Niña 现象发生时,沃克环流增强,西太平洋大气上升区向西移动,班达海表面出现东风异常。这一大尺度天气过程势必造成班达海海水的堆积和扩散,从而影响班达海海面高度。

4 总结与讨论

本文利用 1993 年 1 月—2013 年 12 月的卫星测高数据,分析了班达海海平面的季节和年际变化特征。在季节尺度上,班达海海面 12 月—翌年 4 月较高,7—10 月较低,最低出现在 8 月中下旬,其中区域平均海面高度 3 月中上旬最高,随后一直下降,到 8 月中下旬达到最低,全年变化幅度为 16.5cm 左右。班达海海面季节变化具有明显的空间差异,东部近阿拉弗拉海全年海面变化幅度较大,12 月—翌年 4 月较高,7—10 月较低;而西部近弗洛勒斯海面变化幅度较小,12 月—翌年 4 月较低,7—10 月较高,两者全年表现出偶极子形态。海平面的变化受比容海面变化和海水质量变化共同调制。其中班达海比容海面变化与总体海面变化密切相关,全年变化

幅度为 14cm 左右,占海面变化的 82%。受季风影响,班达海上层的辐聚(辐散)是导致海水质量变化的主要原因:每年 12 月—翌年 3 月班达海盛行西北季风,正的风应力旋度造成了上层海洋的辐聚,温跃层下降,海平面上升;5—9 月东南季风盛行,负的风应力旋度造成了上层海洋的辐散,温跃层上升,海平面下降。同时激发的下降(上升)Ekman 流,会影响海洋上层热含量的变化,从而影响比容海面。而局地风场激发的水平方向 Ekman 输运会造成海水质量的季节性南北空间分布差异。因此班达海海面高度的季节变化主要由上层热含量变化导致的比容海面变化和局地风场的季节变化共同调制,其中局地风场不仅通过海水质量的堆积与分散影响海平面高度变化,还能通过引起的上升、下降流影响海洋上层热含量的分布,从而调控比容海平面的变化。

年际尺度上,班达海海面呈典型的 ENSO 形态,其中 MADTA 的 EOF 分解后第一模态方差贡献率高达 96%,第一模态时间序列(PC1)与 Niño3.4 指数和 DMI 指数均呈负相关,其中 PC1 滞后 Niño3.4 指数 1 个月的相关系数为 0.76,超过 95%置信度水平。这说明班达海海平面的年际变化与大尺度的 ENSO 事件有密切的关系。在 El Niño、La Niña 的年份,PC1 均表现出明显的相位变化。班达海比容海面也存在明显的年际变化特征,其年际异常序列与 MADT 年际异常序列有较强的相关性,同期相关系数为 0.93。MADT 年际变化幅度约为 36cm,比容海面变化幅度约为 17cm,两者在极端 ENSO 事件发生的月份存在明显的高度差,说明 ENSO 对班达海海平面的影响不仅体现在对其上层热盐含量的影响上,还体现在海水质量的变化上。

本文工作进行时,曾尝试使用重力卫星 GRACE 资料,定量分析班达海海水质量的变化。然而班达海所处的印尼海域岛屿众多,地形复杂,空间分辨率 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 的 GRACE 资料在班达海的准确性有待商榷。本文下一步工作将利用 INSTANT 计划在 ITF 主要入流和出流通道中观测得到的流量资料,结合班达海海平面的变化,分析两者间的关系。并且通过班达海入流、出流的流量差,推算海水质量变化对班达海海面变化的影响。

参 考 文 献

王 健, 杜 岩, 郑少军等, 2014. 2004~2011 年印度尼西亚贯穿流在望加锡海峡中的年际变化. 热带海洋学报, 33(6):

9—16

- 杜岩, 方国洪, 2011. 印度尼西亚海与印度尼西亚贯穿流研究概述. *地球科学进展*, 26(11): 1131—1142
- 陈史坚, 1989. 班达海. *南海研究与开发*, (3): 73—79
- Bray N A, Hautala S, Chong J *et al*, 1996. Large-scale sea level, thermocline, and wind variations in the Indonesian throughflow region. *Journal of Geophysical Research*, 101(C5): 12239—12254
- Fang G H, Chen H Y, Wei Z X *et al*, 2006. Trends and interannual variability of the South China Sea surface winds, surface height, and surface temperature in the recent decade. *Journal of Geophysical Research*, 111(C11): C11S16
- Gill A E, Niller P P, 1973. The theory of the seasonal variability in the ocean. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 20(2): 141—177
- Gill A E, 1982. *Atmosphere-Ocean Dynamics*. New York: Academic Press
- Gilson J, Roemmich D, Cornuelle B *et al*, 1998. Relationship of TOPEX/Poseidon altimetric height to steric height and circulation in the North Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 103(C12): 27947—27965
- Gordon A L, Fine R A, 1996. Pathways of water between the Pacific and Indian oceans in the Indonesian seas. *Nature*, 379(6561): 146—149
- Gordon A L, Susanto R D, Ffield A, 1999. Throughflow within Makassar Strait. *Geophysical Research Letters*, 26(21): 3325—3328
- Gordon A L, 2001. Interocean exchange. In: Siedler G, Church J, Gould J eds. *Ocean Circulation and Climate*. New York: Academic Press, Plenum Press, 303—314
- Gordon A L, Susanto R D, 2001. Banda Sea surface-layer divergence. *Ocean Dynamics*, 52(1): 2—10
- Gordon A L, Sprintall J, Van Aken H M *et al*, 2010. The Indonesian throughflow during 2004—2006 as observed by the INSTANT program. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2): 115—128
- Iskandar I, 2010. Seasonal and interannual patterns of sea surface temperature in Banda Sea as revealed by self-organizing map. *Continental Shelf Research*, 30(9): 1136—1148
- Kida S, Richards K J, 2009. Seasonal sea surface temperature variability in the Indonesian Seas. *Journal of Geophysical Research*, 114(C6): C06016
- Lian Z, Fang G H, Wei Z X *et al*, 2015. A comparison of wind stress datasets for the South China sea. *Ocean Dynamics*, 65(5): 721—734
- McCLean J L, Ivanova D P, Sprintall J, 2005. Remote origins of interannual variability in the Indonesian Throughflow region from data and a global Parallel Ocean Program simulation. *Journal of Geophysical Research*, 110(C10): C10013
- Qu T D, Du Y, McCreary J P *et al*, 2008. Buffering effect and its related ocean dynamics in the Indonesian throughflow region. *Journal of Physical Oceanography*, 38(2): 503—516
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N *et al*, 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751): 360—363
- Shao Q L, Zhao J P, 2015. Comparing the steric height in the Nordic Seas with satellite altimeter sea surface height. *Acta Oceanologica Sinica*, 34(7): 32—37
- Syamsudin F, Van Aken H M, Kaneko A, 2010. Annual variation of the southern boundary current in the Banda Sea. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 50(2): 129—139
- Wajsowicz R C, Gordon A L, Ffield A *et al*, 2003. Estimating transport in Makassar Strait. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 50(12—13): 2163—2181
- Wijffels S, Meyers G, 2004. An intersection of oceanic waveguides: Variability in the Indonesian throughflow region. *Journal of Physical Oceanography*, 34(5): 1232—1253
- Wyrtki K, 1958. The water exchange between the Pacific and the Indian Oceans in relation to upwelling process. In: *Proceedings of the Ninth Pacific Science Congress*. Djakarta, Indonesia: Inst Mar Res, 16: 61—65
- Wyrtki K, 1961. *Physical oceanography of the Southeast Asian waters*. NAGA Rep, 2, New York: Plenum Press, 165
- Yelland M, Taylor PK, 1996. Wind stress measurements from the open ocean. *Journal of Physical Oceanography*, 26(4): 541—558
- Yuan D L, Wang J, Xu T F *et al*, 2011. Forcing of the Indian Ocean dipole on the interannual variations of the tropical Pacific Ocean: Roles of the Indonesian Throughflow. *Journal of Climate*, 24(14): 3593—3608
- Yuan D L, Zhou H, Zhao X, 2013. Interannual climate variability over the tropical Pacific Ocean induced by the Indian Ocean Dipole through the Indonesian Throughflow. *Journal of Climate*, 26(9): 2845—2861

SEASONAL AND INTERANNUAL VARIATION IN SEA LEVEL HEIGHT IN THE BANDA SEA BASED ON SATELLITE ALTIMETER DATA

WANG Li-Wei^{1,2}, WANG Yong-Gang^{1,2}, XU Teng-Fei^{1,2}, WEI Ze-Xun^{1,2}

(1. *First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China*; 2. *Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, National Laboratory for Marine, Qingdao 266061, China*)

Abstract Using the AVISO MADT (maps of absolute dynamic topography) data, seasonal and interannual variation in sea surface height anomaly (SSHA) in the Banda Sea from January 1993 to December 2013 (21 years) were analyzed. Results show that the SSHA is higher from December to April affected by northwest monsoon and lower in December to April by southeast monsoon. The seasonal variability is about 16.5 cm. The SSHA is higher (lower) in the eastern (western) part of the sea during northwest monsoon and opposite in the western (eastern) part during southeast monsoon. The sea level change could be explained by water density change, resulting in so-called steric height change; and the steric height anomalies (SHA) in Banda Sea show similar seasonal variation to that of SSHA, being lower in August-September but higher in March, with an annual range of 14 cm. In addition, the southwestward (northeastward) Ekman transport that induced by southeast (northwest) monsoon could be another reason for the SSHA. As Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis shows, 96.1% of the variance accounts for the interannual variation in the SSHA, which agrees well with the ENSO, evidenced by a large correlation coefficient at -0.76 with a one-month lag, while that of the Dipole Mode Index (DMI) is only -0.3 . Comparison between the monthly MADT anomaly and SHA shows larger differences in ENSO years than in normal years, suggesting that ENSO could induce the water transport in Banda Sea as an important contributor to the interannual variation of SSHA.

Key words the Banda Sea; sea level height; seasonal and interannual variation; steric height