

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.04.017

热带印度洋偶极子区域海表面温度特征与海流相关性分析

张国胜^{1,2}, 徐 青^{1,2}, 程永存³, 张苏平⁴, 王 蕾^{1,2}

(1. 河海大学海岸灾害及防护教育部重点实验室, 江苏 南京 210098 ; 2. 河海大学港口海岸与近海工程学院, 江苏 南京 210098 ;
3. 丹麦技术大学国家空间研究所, 哥本哈根 2800 ; 4. 中国海洋大学海洋与大气相互作用及气候实验室, 山东 青岛 266100)

摘要 : 为了研究热带印度洋偶极子(IOD)爆发年其耦合作用迅速消亡是否由海流异常引起, 利用 1958—2007 年热带印度洋月均海表面温度(SST)和海流数据, 分析 IOD 的主要特征, 并探讨 IOD 与 ENSO 和海流异常之间的相关关系。通过对印度洋偶极子指数(DMI)及其经 Hilbert-Huang 变换后得到的固有模态函数(IMF)与南方涛动指数(SOI)的相关性分析, 指出 IOD 与 ENSO 之间可能存在相关性, 其中, 表现出准 2 a 周期振荡的 IMF-3 与 ENSO 相关性最好。通过对 IOD 爆发年 DMI 的进一步分析, 证实 IOD 具有季节锁相的重要特征, 并探讨该季节变化与海流异常的相关关系。结果表明, 海流异常在热带印度洋 SST 的耦合振荡中起重要作用, 但是它可能不是引起 IOD 迅速消亡的原因。

关键词 : 热带印度洋 ; 印度洋偶极子 ; SST ; ENSO ; 海流异常 ; Hilbert-Huang 变换

中图分类号 : P732 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1000-1980(2012)04-0455-06

Correlation analysis of SST and ocean current in tropical Indian Ocean dipole region

ZHANG Guosheng^{1,2}, XU Qing^{1,2}, CHENG Yongcun³, ZHANG Suping⁴, WANG Lei^{1,2}

(1. Key Laboratory of Coastal Disaster and Defence, Ministry of Education, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
2. College of Harbor, Coastal and Offshore Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;
3. National Space Institute, Technical University of Denmark, Copenhagen 2800, Denmark ;
4. Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract : The monthly sea surface temperature(SST) and ocean current data during the period from 1958 to 2007 were analyzed to study the Indian Ocean dipole(IOD) phenomenon and its relationship with the El Niño Southern oscillation(ENSO) and ocean current anomaly. Based on correlation analysis of the dipole mode index(DMI), the intrinsic mode function(IMF) obtained from the Hilbert-Huang transform of DMI, and the southern oscillation index(SOI), it was found that the IOD and ENSO might be correlated. Of all the IMFs, the IMF-3 that has a quasi-biennial oscillation has the strongest correlation with ENSO. Further analysis of DMI in IOD years proved the seasonal phase locking of IOD. The correlation of this seasonal variation with the ocean current anomaly was then investigated. The results show that the ocean current anomaly in the tropical Indian Ocean plays an important role in the coupled oscillation of SST, but may not be the cause of the rapid demise of IOD.

Key words : tropical Indian Ocean ; Indian Ocean dipole ; SST ; ENSO ; ocean current anomaly ; Hilbert-Huang transform

在热带印度洋存在着一个类似于 ENSO 的海表温度(SST)异常(西高东低)现象, 这种现象被称为印度洋偶极子(IOD)^[1-3]或印度洋纬向模(IOZ)^[4](本文统称为 IOD)。IOD 对印度洋地区气候以至全球气候都有着

收稿日期 : 2011-08-24

基金项目 : 国家自然科学基金(41006108) ; 国家海洋局近岸海域生态环境重点实验室开放基金(201113) ; 卫星海洋环境动力学国家重点实验室开放基金(SOED1104) ; 中国海洋大学本科研究训练计划(OUC-SRTP0711010104)

作者简介 : 张国胜(1986 —) , 男, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事海洋遥感及海气相互作用研究。E-mail :ouc3001@yeah.net

通讯作者 : 徐青(1981 —) , 女, 山东菏泽人, 副教授, 博士, 主要从事海洋遥感与海洋物理学研究。E-mail :xuqing215@yahoo.com.cn

不同程度的影响,该现象引发了人们对印度洋海、气相互作用以及 IOD 与全球气候变化之间相关关系的研究^[5-8]。

文献 1 提出用印度洋偶极子指数(DMI)这一概念来研究 IOD,并通过对连续 40 a 的 DMI 与南方涛动指数(SOI)的相关分析,指出 IOD 与 ENSO 是两个独立的系统,没有必然的联系。然而,文献 6 则认为,IOD 与 ENSO 通过上空的 Walker 环流联系在一起,ENSO 通过海面风场影响 IOD。文献 9 也发现,赤道印度洋纬向风异常和 SOI 的相关系数非常高,表明 ENSO 对印度洋有重要影响。IOD 与 ENSO 之间是否存在相互作用是目前 IOD 研究中的 1 个热点。

IOD 的 1 个重要特征是季节锁相,体现了 SST 与海表面风场及降雨的海气耦合过程^[1,4]。基于 IOD 爆发年月均指数得出 IOD 的演变规律^[1]是 5—6 月是 IOD 的发生期,7—8 月是 IOD 的发展期,9—10 月是 IOD 的成熟期,11—12 月是 IOD 的衰亡期,与季节循环存在非常好的位相锁相。因此,可以推断,IOD 的突然消亡主要是由于太阳辐射的变化而非海流异常引起的。但是,上述结论并未得到证实。

本研究将依据 1958—2007 年连续 50 a 的 SST 和海流数据,对 IOD 特征进行深入分析,探讨 IOD 与 ENSO 和海流异常之间的相关关系,以及海流异常在 IOD 迅速消亡中的作用。

1 数据与研究方法

1.1 数据

本研究所用的海洋数据来自全球简单海洋数据同化系统(SODA),选取其中热带印度洋海洋表层(海面以下 5.01 m 处)温度与海流的月平均再分析资料,其空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$,覆盖范围是($20^{\circ}\text{S} \sim 20^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{E} \sim 120^{\circ}\text{E}$),时间长度为 1958—2007 年的 50 a。

1.2 Hilbert-Huang 变换

Hilbert-Huang 变换(HHT)是 1 种分析非线性动态过程的新方法^[10],可以给出复杂数据的最显著特征。这种变换主要由 2 部分组成:经验模态分解(EMD)和 Hilbert 谱分析。EMD 是把原始的数据分解成有限个数的出现频率高的固有模态函数(IMF),其特征为:在整个数据中,极值的个数与零交点的个数是相等的,或者最多相差 1 个,并且极大值的包络线和极小值的包络线的均值为零。分解出 IMF 后,再进一步对其进行 Hilbert 谱分析。

对任意时间函数 $X(t)$,它的 Hilbert-Huang 变换为

$$Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{X(\tau)}{t - \tau} d\tau \tag{1}$$

定义复数函数:

$$Z(t) = X(t) + iY(t) \tag{2}$$

$X(t)$ 和 $Y(t)$ 在复平面中的夹角为

$$\theta(t) = \arctan \left[\frac{Y(t)}{X(t)} \right] \tag{3}$$

瞬时变化率速率为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \tag{4}$$

瞬时变化率(时间函数)就是所得到的 1 个依赖于时间的谱。

Hilbert-Huang 变换是 1 种局地的自适应的频谱分析方法,在提取数据的固有特性方面比其他方法(如小波方法、Wigner-Vile 分布等)更准确^[11]。

2 IOD 的年际特征

利用 1958 年 1 月至 2007 年 12 月 IOD 区域($30^{\circ}\text{E} \sim 110^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$)的 SST 数据,去除其月均值后对 SST 的距平值做 EOF 分解。EOF 分解的第 1 模态(EOF-1)的贡献约占热带印度洋 SST 异常的 36.33%,第 2 模态(EOF-2)的贡献约占 SST 异常的 14.83%,其对应的空间模态如图 1 所示。从图 1 可以看出,热带印度洋的 SST 有东西两极:东极存在 1 个明显的 SST 的异常降低,而西极存在 SST 的异常升高,这反映了热带印度洋 SST 的跷跷板特性。



图 1 热带印度洋 SST 的 EOF 分解的第 2 模态

Fig. 1 EOF-2 of SST of Indian Ocean dipole

本研究选取热带西印度洋(50°E ~ 70°E ,10°S ~ 10°N)和东印度洋(90°E ~ 110°E ,10°S ~ 0°) 分别代表热带印度洋的西极和东极 ,利用连续 50 a 的月平均 SST 资料计算 DMI ,计算公式为

$$D_{DMI}(m,Y)=S_{SSTA_W}(m,Y)-S_{SSTA_E}(m,Y) \tag{5}$$

式中 :Y——年份 ;m——月份 ; S_{SSTA_W} 和 S_{SSTA_E} ——印度洋西极和东极的 SST 距平。

图 2 分别给出了 1960—2005 年 DMI ,SOI 和海流异常的标准化数值 ,其中海流异常值为区域(70°E ~ 90°E ,5°S ~ 5°N)内纬向海流异常的平均值。数据处理过程中 ,首先利用高通滤波滤除 3 组数据 7 a 及 7 a 以上的周期 ,再通过 5 个月的窗口滑动滤波滤去年信号 ,然后对 3 组数据标准化。



图 2 1960—2005 年的 DMI ,SOI 和海流异常

Fig. 2 DMI ,SOI , and ocean current anomaly during period from 1960 to 2005

从图 2 可以看出 ,1961 年、1967 年、1972 年、1982 年、1994 年、1997 为 IOD 爆发年。IOD 与 ENSO 存在着一定的联系 ,DMI 与 SOI 的相关系数约为 0.35 ,但是 2 者之间没有很好的同步性。在 1972 年、1982 年和 1997 年 ,IOD 与 ENSO 同时发生 ,而在 1961 年、1967 年、1994 年 ,ENSO 没有发生。

1960—2005 年海流异常值与 DMI 的相关系数为 0.30 ,但是 ,在 IOD 爆发年 ,DMI 与海流异常有着很好的对应关系 ,相关系数约为 - 0.90。由此推断海流异常可能对 IOD 有很好的响应和反馈。本文在下节分析 IOD 的季节锁相中将进一步讨论 DMI 与海流异常的关系。

对 DMI 进行 Hilbert-Huang 变换 ,得到 8 个 IMF 及 1 个残值 ,如图 3 所示 ,对应的 Hilbert 波谱如图 4 所示。IMF-1 到 IMF-8 以及残值与 SOI 指数的相关性分别为 : - 1.56% , - 14.09% , - 29.37% , - 16.37% , 5.26% ,1.86% ,1.19% ,0.45%。



图 3 对 DMI 进行 EMD 分解后的 IMF-3 与 SOI 指数图

Fig. 3 IMF-3 and SOI of DMI after EMD

图 4 显示 IOD 存在着准两年振荡(quasi-biennial oscillation ,QBO)。从相关性分析得出 ,IMF-3 与 SOI 指数的相关性最好。很多研究表明 ENSO 与气候学中的 QBO 有着很好的相关性^[12-13] ,大的振荡主要出现在 1997 年前后。1997 年 ,IMF-3 的振幅明显增大 ,与上文提到的 ENSO 与 IOD 同时发生的年份相吻合 ,表明 IOD

存在着固有的受 ENSO 影响的 QBO。由于在对流层中存在着 QBO ,推断 ENSO 与 IOD 可能是通过 walker 环流联系起来 ,而且这种联系存在准 2 a 的周期 ,这与文献 6 和文献 9 的结论较为一致。

其余的 IMF 函数与振幅图在本文未给出。IMF-1 主要为 0.5 a 及 0.5 a 以下信号 ,在 1982 年左右有 1 次大的振荡 ,1982 年为 1 次 IOD 爆发年 ;IMF-2 主要为 1 a 的信号 ,大的振荡出现在 1961 年和 1997 年前后 ;IMF-4 和 IMF-5 表现为长周期的振荡(5 ~ 7 a) ,在 IMF-5 中 ,1997 年以后的振荡明显加强 ,在 7 a 的振荡中只有强 ENSO 事件才能影响 IOD ;IMF-6 ,7 ,8 为 10 a 以上的周期振荡 ,振幅比较均匀 ,最后的残值显示了 DMI 的变化趋势 ,表明 IOD 的年际变化是增强的 ,呈上升趋势。



图 4 对 DMI 进行 Hilbert-Huang 变换后 IMF-3 的波谱
Fig. 4 Spectrum of IMF-3 of DMI after Hilbert-Huang transform

3 IOD 季节锁相及与海流异常的相关关系

季节锁相是 IOD 的重要特征^[1]。图 5(a) 给出了 IOD 爆发年(1961 年、1967 年、1972 年、1982 年、1994 年、1997 年)DMI 和海流异常的月均值 ,其中 DMI 为未经标准化的值。从图 5(a) 中可以看出 ,DMI 在 IOD 爆发年随月份增加而逐渐增强 ,在 10 月份达到最大值 ,然后迅速消亡。为了进一步论证这种 IOD 爆发年海流异常与 DMI 的极值关系 ,将 7 a 的 IOD 事件中 8 月份海流异常与对应年均值的比值 ,及 10 月份 DMI 与对应年均值的比值绘成曲线 ,见图 5(b) 。两者有着很好相关性(52.46%)。海流异常值在 8 月份达到负的最大值 ,出现在 DMI 最大值的前 2 个月 ,之后其绝对值逐渐减小直至消亡。由此可进一步推断海流异常有可能是引起 IOD 消亡的原因之一。



图 5 IOD 爆发年 DMI 与海流异常

Fig. 5 DMI and ocean current anomaly in IOD years

通过计算区域(70°E ~ 90°E ,5°S ~ 5°N)的纬向海流异常平均值与纬向风应力异常平均值的相关性(相关系数为 0.78) ,得出纬向风应力与纬向海流之间有着很好的相关关系。为了进一步研究海流异常在 IOD 季节锁相中的作用 ,本研究给出了 IOD 爆发年的 SST 异常和海流异常的空间分布图 ,见图 6。图 6 同时显示了 6 月、8 月、10 月和 12 月热带印度洋海流异常与 SST 异常的分布。从图 6 可以看出 ,6 月份苏门答腊岛右侧的 SST 开始降低 ,海流异常还比较杂乱 ,随着苏门答腊岛附近的海水温度继续降低 ,热带印度洋东极的海水密度增大 ,西极的温度开始升高 ,密度减小 ,同时 ,异常的 SST 引起了纬向风应力的异常 ,使得西向的海流异常开始增长。在 10 月和 12 月西向的海流异常依然强盛。西向的海流异常把东极的高温海水源源不断地输送至西极 ,使得西极的 SST 继续升高 ,而苏门答腊岛附近底层的冷水上涌 ,东极的 SST 继续降低 ,从而使得东极海水密度继续增大 ,西极海水密度继续减小 ,风应力异常加强 ,海流异常继续加强 ,东西极的 SST 异常继续增大 ,使耦合不断加强。



图 6 IOD 爆发年的标准化月均 SST 异常和海流异常

Fig. 6 Standardized monthly average SST anomaly and ocean current anomaly in IOD years

IOD 在 10 月达到最大后 ,迅速开始减小消亡 ,东极的 SST 负异常开始消失 ,然而西向的海流异常依然存在。12 月 ,海流依然有较强的西向流动 ,并且延伸至印度洋西极 ,将东极的高温海水带往更偏西的海域。

由图 6 可以发现 ,在 IOD 消亡前后海流一直存在西向异常。为了进一步分析这种异常是加强还是减弱 ,本研究计算了后一个月与前一个月海流异常的差值 ,结果见图 7。从图 7 可以看出 ,8 月和 9 月西向海流异常变化不大 ,10 月份西向海流异常得到增强 ,到了 11 月才开始减弱。由此推断 ,海流异常并不是引起 IOD 消亡的原因 ,相反 ,IOD 的消亡引起了海流异常的减弱。这证实了文献 [1] 提出的推论。



图 7 IOD 爆发年 7—12 月海流异常的逐月变化

Fig. 7 Ocean current anomaly changes from July to December in IOD years

4 结 语

本研究基于对 1958—2007 年连续 50 a 热带印度洋月均 SST 和海流数据的分析 ,发现在热带印度洋存在

SST 的偶极振荡,它可能既是 1 个相对独立的耦合系统,同时又通过 Walker 环流与 ENSO 联系在一起。

IOD 存在明显的季节锁相,IOD 成熟的位相锁定在北半球秋季,不出现在亚洲季风最强的夏季,不能确定 IOD 的季节锁相与大气基本态的关系,IOD 的季节锁相仍需深入研究^[14]。海流异常可能是除海表面风场与降雨异常外参与 SST 耦合的另一个重要因素。但是,IOD 迅速消亡可能并非由海流异常引起,它是否与热通量的异常有关,以及 IOD 与赤道密度流的关系还需要进一步讨论。

参考文献:

- [1] SAJI N H , GOSWAMI B N , VINAYACHANDRAN P N , et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean[J]. Nature ,1999 ,401 :360-363.
- [2] YAMAGATA T , BEHERA S , RAP S A. Comments on“ Dipoles , temperature gradient , and tropical climate anomalies [J]. Bulletin of the American Meteorological Society ,2003 ,84 :1418-1422.
- [3] YAMAGATA T , BEHERA S K , LUO J J , et al. Coupled ocean-atmosphere variability in the tropical Indian Ocean[J]. Geophys Monogr , 2004 ,147 :189-211.
- [4] WEBSTER , P J , ANDREW M M , LOSCHIGG J P , et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997-98[J]. Nature , 1999 ,401 :356-360.
- [5] LATIF M , DOMMENGET D , DIMA M. The role of Indian Ocean sea surface temperature in forcing east African rainfall anomalies during December-January 1997/1998[J]. Climate , 1999 ,12 (12) :3497-3504.
- [6] 李崇银 , 穆明权. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响[J]. 大气科学 , 2001 ,25 (4) :433-443. (LI Chongyin , MU Mingquan. The Dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2001 ,25 (4) :433-443. (in Chinese))
- [7] SAJI N H , YAMAGATA T. Possible impacts of Indian Ocean dipole mode events on global[J]. Climate Res , 2003 ,25 :151-169.
- [8] 晏红明 , 李崇银. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响[J]. 大气科学 , 2007 ,31 (1) :64-76. (YAN Hongming , LI Chongyin. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its influence on climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2007 ,31 (1) :64-76. (in Chinese))
- [9] XIE Shangping , ANNANMALAI H , SCHOTT F A , et al. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability[J]. Climate , 2002 ,15 :864-878.
- [10] HUANG R , ZHANG R , ZHANG Q. The 1997/98 ENSO cycle and its impact on summer climate anomalies in East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences , 2000 ,17 :348-362.
- [11] PAN J , YAN X H , ZHENG Q , et al. Interpretation of scatterometer ocean surface wind vector EOFs over the Northwestern Pacific[J]. Remote Sensing of Environment , 2003 ,84 :53-68.
- [12] LAU K M , SHEU P J. Annual cycle , quasi-biennial oscillation , and southern oscillation in global precipitation[J]. Journal of Geophysical Research , 1988 ,93 :10975-10988.
- [13] RASMUSSEN E M , WANG X , ROPELEWAKI C F. The biennial component of ENSO variability[J]. Journal of Marine System , 1990 ,1 :71-96.
- [14] 谭言科 , 刘会荣 , 李崇银 , 等. 热带印度洋偶极子的季节性位相锁定可能原因[J]. 大气科学 , 2008 ,32 (2) :197-205. (TAN Yanke , LIU Huirong , LI Chongyin , et al. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences , 2008 ,32 (2) :197-205. (in Chinese))