

# 1998~1999 年间负位相印度洋偶极子事件的长波动力机制研究

王 晶<sup>1,2</sup>, 袁东亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 海洋环流与波动重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 海洋研究所, 山东 青岛 266071)

**摘要:** 使用美国海洋环境预报中心(NCEP)逐日的表面风场和热通量强迫的大洋环流模式(LICOM)研究了 1998~1999 年负位相印度洋偶极子(IOD)事件期间赤道印度洋环流长波动力机制的年际变化。模式能够很好地模拟出高度计资料的海面高度异常。使用垂直模分解方法对模式输出进行赤道波分解, 结果表明: 西边界反射在负位相 IOD 事件发生、发展和衰亡过程中起了重要作用。虽然西边界反射在正、负位相 IOD 期间均起到了重要的负反馈作用, 但两者的来源机制却是不同的。在 1998~1999 年负位相 IOD 事件期间, 西边界处产生的两个上翻的开尔文波均来自赤道罗斯贝波在西边界处的反射。第一个上翻的开尔文波主要在西印度洋和中印度洋发生作用, 由于受到西风异常强迫的下沉的开尔文波的影响, 它并没有成功到达东印度洋, 但是却一定程度上削弱了中东印度洋的下沉异常; 而第二个上翻开尔文波成功到达东爪哇沿岸终止了那里的下沉异常, 最终终止了负位相 IOD 事件。首次从赤道长波动力学角度解释了 1998~1999 年负位相 IOD 事件的结束机制, 有利于进一步了解 IOD 对印度洋周边气候甚至太平洋的影响。

**关键词:** 开尔文波; 罗斯贝波; 西边界反射; 海面高度异常; 负位相; 印度洋偶极子(IOD)

中图分类号: P724;P731.2;N32 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2013)02-0112-06

印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, 简称 IOD)事件是印度洋最强的年际气候异常事件。在年际尺度上, 正位相 IOD 事件表现为热带东南印度洋爪哇沿岸异常变冷及中印度洋和西印度洋异常变暖<sup>[1]</sup>; 而负位相 IOD 表现为热带东印度洋、印度尼西亚周边海水异常变暖, 同时在热带西印度洋及非洲沿岸附近海水异常变冷, 常常导致澳大利亚部分地区降水增加<sup>[1]</sup>。许多研究表明, 海洋动力学在热带印度洋海表面温度的年际尺度上起了重要作用<sup>[2-4]</sup>。IOD 期间, 南印度洋罗斯贝波的传播能够维持西部海盆的海表面温度(SST)异常并可能终止东部海盆的 SST 异常<sup>[5]</sup>。正位相 IOD 期间, 印度洋西边界处产生了双下沉开尔文波, 第一个开尔文波来自西边界赤道罗斯贝波的反射; 第二个开尔文波来自南印度洋赤道外罗斯贝波<sup>[6]</sup>。负位相 IOD 期间, 孟加拉瓦中南半岛存在异常气旋性环流, 使得印度次大陆和中南半岛南部印度尼西亚地区的降水增加, 从而对亚洲季风区的气候变化产生重要影响<sup>[7]</sup>, Rao 等<sup>[8]</sup>从次表层年际变化的角度证明了印度洋偶极子事件的两年振荡, 认为负位相印度洋偶极子事件常常紧跟在正位相印度洋偶极子事件之后。另外, 印度洋的海温变化与赤

道东太平洋的海温异常也存在着较密切的相关关系<sup>[9]</sup>, 迄今为止, 负位相 IOD 事件期间的赤道波动力学机制, 尚未有人研究。本文主要从赤道波与海面高度变化的角度研究了负位相印度洋偶极子事件期间的长波动力学机制。

## 1 数值模式介绍及检验

本文使用的大洋环流模式为 LICOM1.0, LICOM, 是中国科学院大气物理研究所(IAP)大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG)气候系统(Climat system)海洋模式(Ocean model)。在  $\eta$  坐标系下, 采用自由表面原始方程和相应的能量守恒数值差分格式。模式区域为  $0^\circ$  到  $360.5^\circ$ ,  $90^\circ\text{N}$  到  $78.5^\circ\text{S}$ , 水平分辨率为  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ , 能够很好地分辨出赤道罗斯贝波半径(120 km 左右), 因此对模式结果的赤道波分析是可靠的。模式地形采用美国海军海洋科学

收稿日期: 2011-05-26; 修回日期: 2012-11-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(41206018); 全球化研究国家重大科学研究计划(2012CB956000)

作者简介: 王晶(1983-), 女, 吉林长春人, 助理研究员, 博士, 目前研究方向为赤道波动力学, 电话: 0532-82886976, E-mail: wang-jing@qdio.ac.cn

办公室 DBDB5(Digital bathymetric data base 5minute) 数据, 能够真实地刻画出印度洋区域的真实地形。垂直方向为 30 层: -12.5, -37.5, -62.5, -87.5, -112.5, -137.5, -162.5, -187.5, -212.5, -237.5, -262.5, -287.5, -313.5, -344.6, -387.8, -450.7, -540.3, -662.8, -823.6, -1026.6, -1274.6, -1569.0, -1909.9, -2295.8, -2724.0, -3190.3, -3689.6, -4215.6, -4761.3, -5319.1 m。湍流扩散方案采用热带海洋的 P-P 垂直扩散方案<sup>[10]</sup>, 模式实验初始场为 Levitus 资料<sup>[11]</sup>, 采用欧洲中心中期天气预报(ECMWF)再分析风应力和热通量季节气候态(1990~2001 年)强迫 900 a, 模式达到稳定后, 使用美国环境预报中心(NCEP)再分析资料(1948~2007 年)

实际逐日风应力和热通量资料强迫模式得到 60 a 控制实验模拟结果。

本文分析的是海洋模式 LICOM 输出的月平均结果, 研究使用的年际异常是相对于 1990~2007 年间的气候态季节平均。图 1 显示了印度洋 1990~2000 年间 5°S~5°N 区域高度计资料及模式模拟的海面高度异常的时间-经度图, 从图 1 中可以看出, 模式模拟结果与高度计资料是相吻合的, 故模式可以用来研究负位相 IOD 事件的赤道波动力机制。本文针对 1998~1999 年间的负位相 IOD 事件研究了负位相 IOD 事件的长波动力学机制。

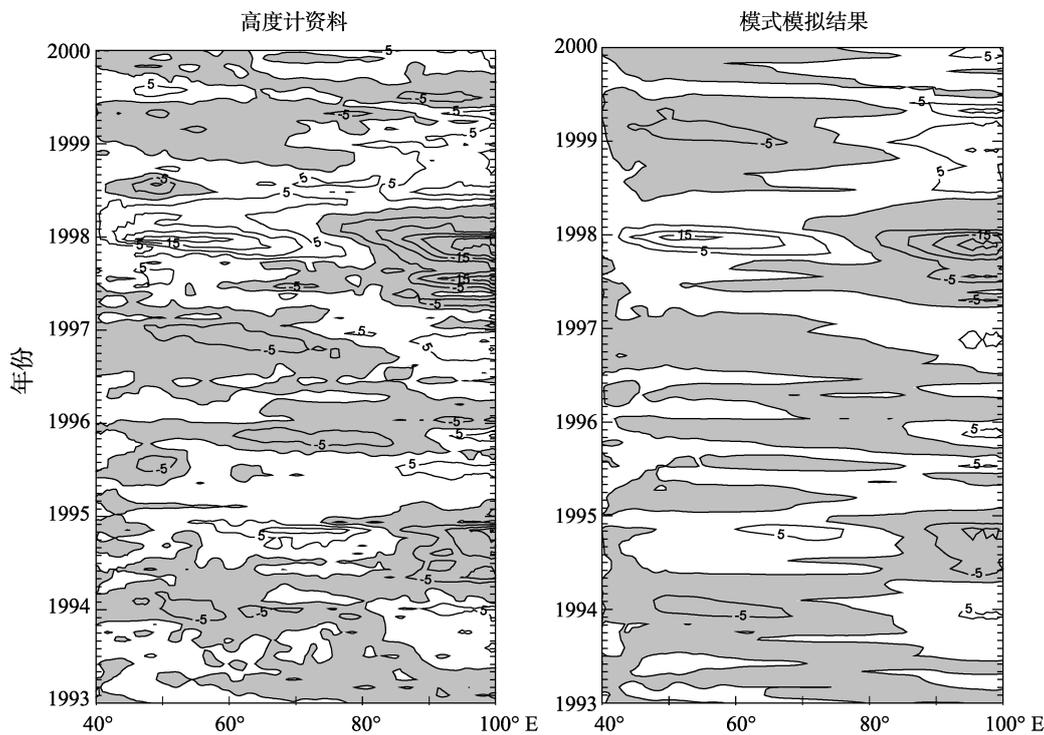


图 1 印度洋 1993~2000 年间 5°S~5°N 区域卫星高度计资料与大洋环流模式模拟的海面高度异常的时间-经度图

Fig. 1 The averaged Altimetry sea level anomalies and the averaged sea level anomalies simulated by ocean general circulation model (OGCM) between 5°S and 5°N over the Indian Ocean during 1993~2000

阴影为负值(后同), 单位: cm

Shadow indicates negative anomalies (apply to the paper), unit: cm

## 2 负位相 IOD 事件海面高度异常的动力分析

对模式输出进行赤道波分解, 方法同文献[12], 研究了 1998~1999 年负位相 IOD 事件的赤道波动力机制。图 2 显示了 NCEP 再分析资料 1997~1999 年间风应力异常分布的时间-经度图, 从图 2 中可以看出, 1998 年初, 东风异常占主导, 在 4 月份时东风转向, 西风异常占主导并且持续到 1999 年初。从图 2

中可以看出, 西风异常最大值中心出现在中东印度洋, 这与东印度洋出现下沉异常是分不开的。

图 3 显示了 1997~1999 年间分解的赤道开尔文波和罗斯贝波系数。1997 年是较强的正位相 IOD 事件, Yuan 和 Liu<sup>[6]</sup>指出, 在 1997 年底, 下沉开尔文波到达东边界, 削弱了东印度洋的上升异常, 如图 3, 上升罗斯贝波在 1998 年初到达西边界后, 反射成上升开尔文波, 在开尔文波向东传的过程中, 与西风异常的强迫开尔文波叠加, 补充了东印度洋的上升

异常。1998年4月赤道外罗斯贝波反射的下沉开尔文波到达东边界终止了正位相 IOD 事件,并在东印度洋引起了下沉异常,为负位相 IOD 事件的发生提供了必要条件,此时在整个印度洋西风异常爆发(图2)。从图3可以看出,西风异常强迫的上升开尔文波在年初向东边界传播,在东边界处反射成第一上升罗斯贝波,此上升罗斯贝波向西传播,在1998年5月到达西边界,削弱了西印度洋的下沉异常,并在西印度洋产生了上升异常。此上升罗斯贝波反射的开尔文波由于西风强迫的加强并没有传播到印度洋东边界,因此在东印度洋依然是下沉异常占主导,导致负位相偶极子事件发生。图3显示风强迫的下沉开尔文波在9月到达东边界,反射成西传的下沉罗斯贝波马上又削弱了西印度洋的上升异常。从分解的罗斯贝系数可以看出,在10月时西风异常强迫的第二上升罗斯贝波在中印度洋产生,向西传播在年底到达印度洋西边界,马上又补充了西印度洋的上翻异常。上升开尔文波在1999年初最终终止了东印度洋的下沉异常,负位相 IOD 事件停止。图4显示了开尔文波与罗斯贝波在东西边界处反射的时间序列图,从左图中西边界处分解的开尔文波系数(实线)与来自第一经向模罗斯贝波反射的波系数(虚线)的一致性可以看出,西边界处的上升开尔文波主要来自罗斯贝波的反射。右图中类似,从点线与实线的一致性可以看出,东边界处的罗斯贝波主要来自开尔文波的反射。

一致性可以看出,东边界处的罗斯贝波主要来自开尔文波的反射。

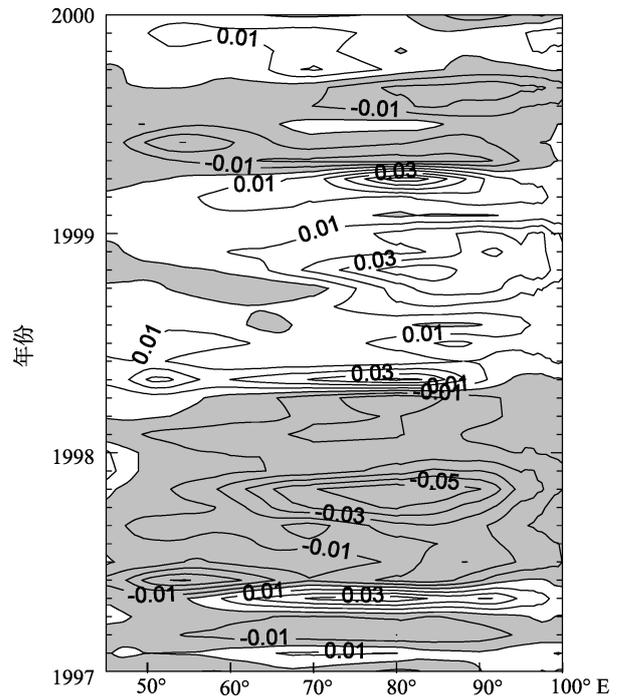


图2 NCEP再分析资料1997~1999年间的风应力异常(Pa)  
Fig. 2 The NCEP reanalysis data of wind stress anomalies (Pa) during 1997~1999

图5显示了1998年负位相 IOD 事件期间海面高度异常与风应力异常的发展过程,从图5中可以看

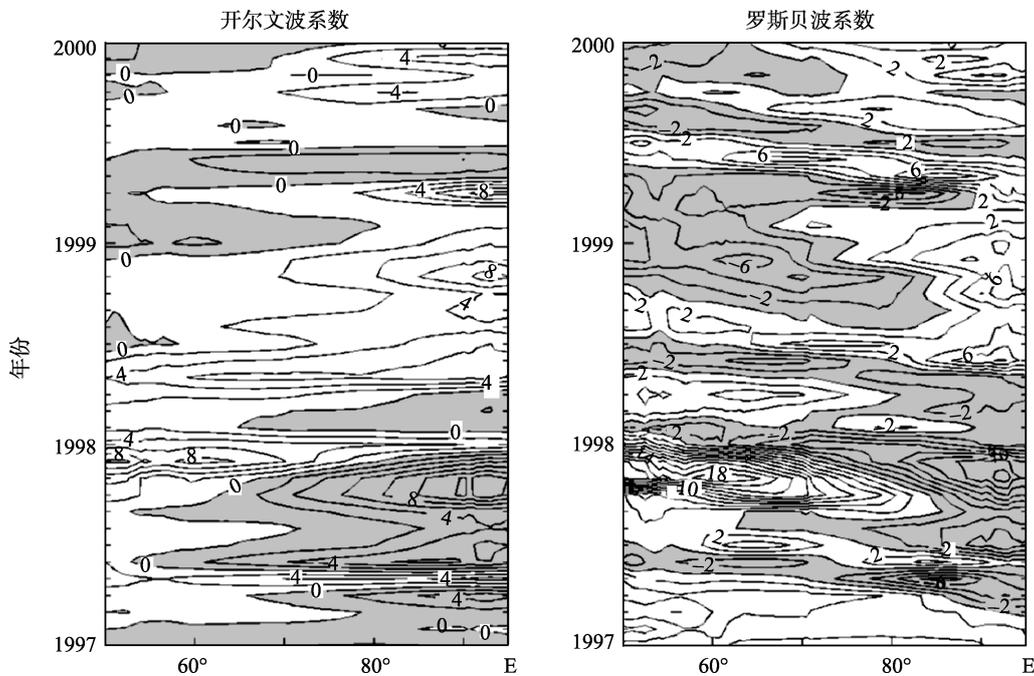


图3 分解的1997~1999的赤道开尔文波和罗斯贝波系数

Fig. 3 Decomposed coefficients of equatorial Kelvin and Rossby waves of the first baroclinic mode from-OGCM simulation for the period of 1997~1999

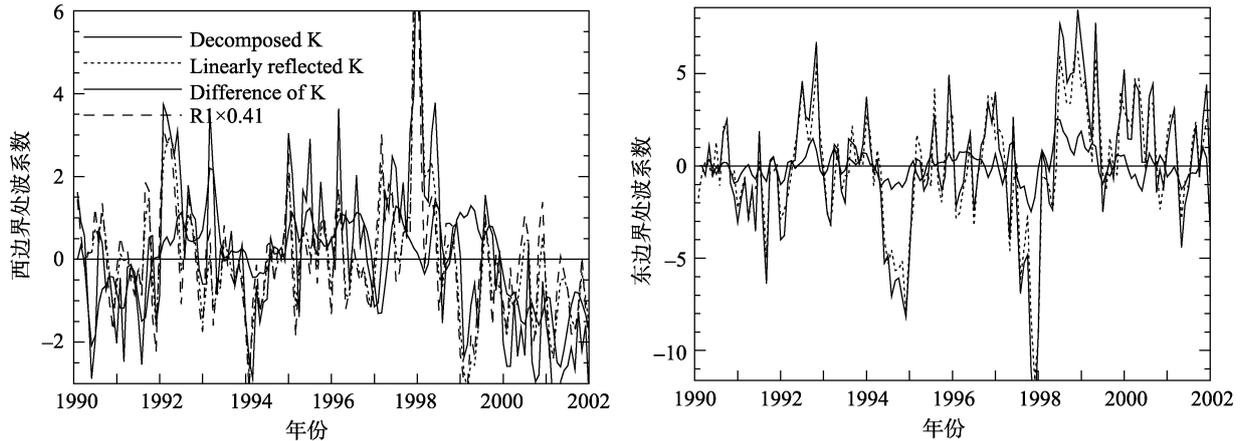


图 4 西边界处(49°E)分解的第一斜压开尔文波系数和线性反射的第一斜压开尔文波系数, 厚实线表示两者的差异, 虚线为来自第一经向模罗斯贝波反射的开尔文波系数(左图)。东边界处(96°E)开尔文波反射的罗斯贝波系数(点线)和分解的第一经向模罗斯贝波系数(实线)(右图)

Fig. 4 Coefficients of the decomposed (thin solid curve) and linear reflected (dotted curve) Kelvin waves of the first baroclinic mode at the western boundary (left). The thick solid curve represents the difference between them. The time-shifted first meridional-mode Rossby wave coefficient multiplied by its reflection ratio is also shown with the dashed curve. Kelvin wave (solid) and the first meridional-mode Rossby wave divided by the Kelvin wave reflection ratio (dotted) at the eastern boundary (right)

出, 1998 年 6 月海面高度异常出现偶极子现象, 说明上升罗斯贝波的传播促进了负位相 IOD 事件的产生。随着西风异常的增强, 风强迫的下沉开尔文波的产生补偿了东印度洋的下沉异常(图 3), 故东印度洋下沉异常增强, 此时西印度洋上升异常减弱, 但由于第一上升罗斯贝波的到达, 西印度洋的上升异常得到了补充, 因此负位相 IOD 事件继续发展。通过图 3 分解的罗斯贝波系数分析知, 风强迫的第二支上升罗斯贝波在年底到达西边界。由图 5 可以看出, 第二支上升罗斯贝波的到达补偿了西印度洋的上升异常, 其反射的上升开尔文波, 向东传播并没有到达东边界, 从图 3 可以看出, 西边界处上升开尔文波系数很小, 向东传播过程中增强, 说明风强迫起到了加强作用, 到达东边界后削弱了东印度洋的下沉异常, 最终终止了东印度洋的下沉异常, 负位相 IOD 事件停止。通过分析 1998 年负位相 IOD 事件知, 此次负位相 IOD 事件伴随在 1997 年正位相 IOD 事件之后, 东印度洋下沉异常是由于下沉开尔文波的到达而产生的。根据 Yuan 和 Liu 的分析<sup>[6]</sup>, 第二下沉开尔文波的到达终止正位相 IOD 事件的同时, 也增加了东印度洋的下沉异常。这就为负位相 IOD 事件的发生提供了必要条件。负位相结束过程中, 虽然东风异常的爆发强化了 IOD 事件的结束过程, 但西边界反射的上翻开尔文波起到了决定性作用, 虽然西边界反射的开尔文波系数很小, 但引起的温跃层变化(这里没显示)是不可忽视的。

### 3 结论

使用 NCEP 逐日风场和热通量强迫的大洋环流模式 LICOM 研究了 20 世纪 90 年代 1998~1999 年负位相印度洋偶极子事件长波动力学机制, 结果表明: 模式能够很好地模拟出高度计资料的海面高度异常。通过对模拟结果进行了赤道波分解, 研究了负位相印度洋偶极子事件的产生、发展和延迟反馈机制。研究表明赤道波的传播和反射对印度洋偶极子事件的发展和衰亡起了重要作用, 海面高度异常最大值与西风异常最大值之间的滞后关系主要是由于赤道波的传播造成的。1998 年负位相 IOD 事件, 风强迫的上升开尔文波在东边界反射成第一上升罗斯贝波, 其西传到西边界, 增强了西印度洋的上升异常, 同时西风异常强迫的下沉开尔文波到达东边界, 在东印度洋产生下沉异常, 导致了负位相 IOD 事件的发生。西风异常强迫的第一上升赤道罗斯贝波在 1998 年底到西边界, 补充了西印度洋的上升异常, 反射的第一上升开尔文波, 向东传播过程中削弱了中东印度洋的下沉异常; 西风异常强迫的第二上升赤道罗斯贝波在 1999 年 4 月到达西边界, 反射成第二上升开尔文波造成东印度洋的下沉异常消失, 终止了负位相 IOD 事件。长波动力分析表明, 两个上升开尔文波在负位相偶极子事件发展和衰亡过程中起了重要的负反馈作用, 与正位相 IOD 事件不同的是, 两者均来自赤道罗斯贝波的反射。

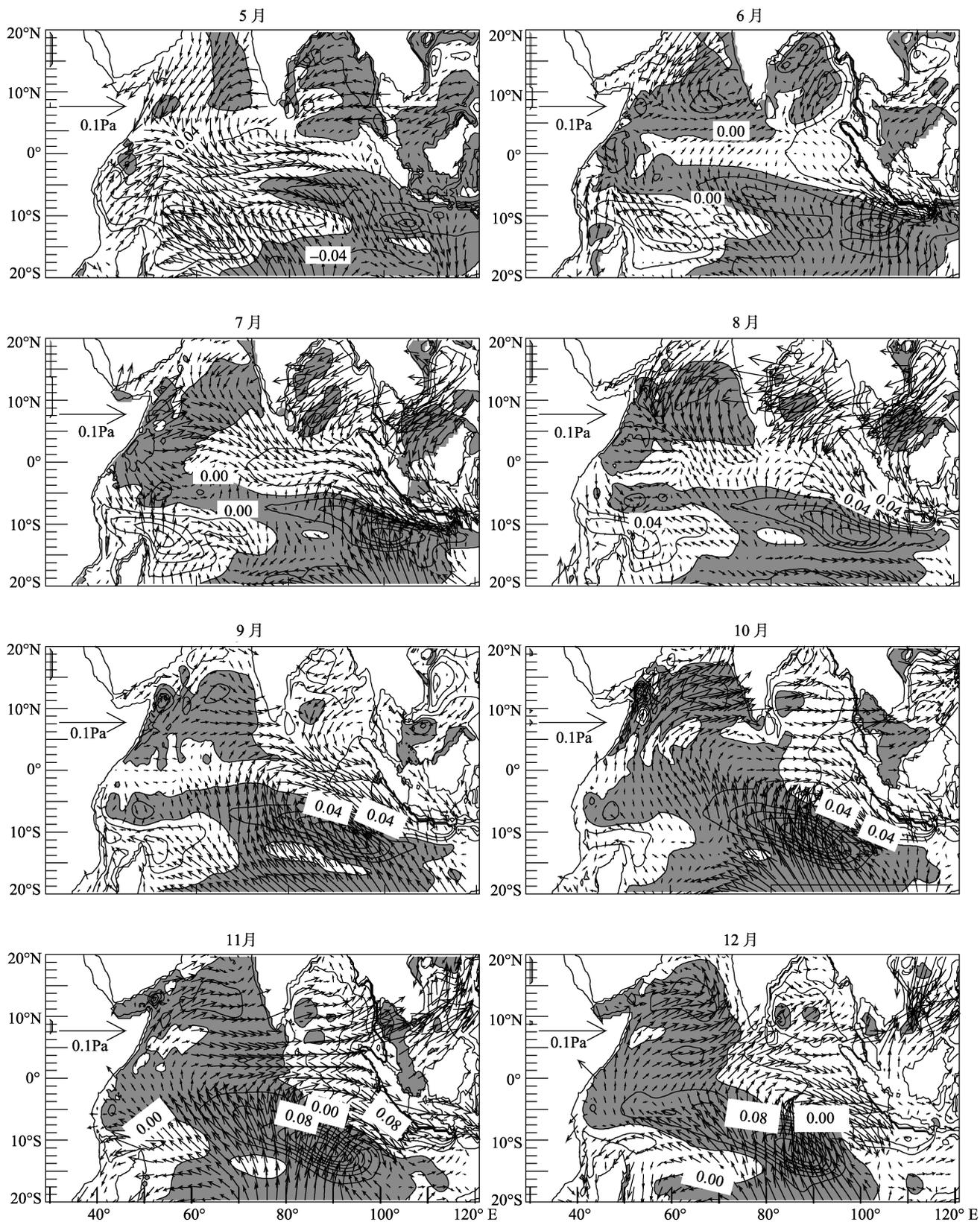


图 5 1998 年海面高度异常与风应力异常的发展过程

Fig. 5 Sea level anomalies and wind stress vector anomalies during 1998  
 单位: m; 等值线间隔: 0.02  
 unit: m; Contour interval: 0.02

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] Chambers D P, Tapley B D, Stewart R H. Anomalous warming in the Indian Ocean coincident with El Nino[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 1999, 104(C2): 3035-3047.
- [3] Saji N H, Yamagata T. Structure of SST and surface wind variability during Indian ocean dipole mode events: COADS observations[J]. *Journal of Climate*, 2003, 16(16): 2735-2751.
- [4] Yu Lisan, Rienecker M M. Indian Ocean warming of 1997-1998[J]. *Journal of Geophysical Research-Oceans*, 2000, 105(C7): 16923-16939.
- [5] Kinter J L, Miyakoda K, Yang S. Recent change in the connection from the Asian monsoon to ENSO[J]. *Journal of Climate*, 2002, 15(10): 1203-1215.
- [6] Yuan Dongliang, Liu Hailong. Long-wave dynamics of sea level variations during Indian Ocean dipole events[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2009, 39(5): 1115-1132.
- [7] 晏红明, 杨辉, 李崇银. 赤道印度洋海温偶极子的气候影响及数值模拟研究[J]. *海洋学报*, 2007, 29(15): 31,39.
- [8] Rao S A, Behera S K, Masumoto Y, et al. Interannual subsurface variability in the tropical Indian Ocean with a special emphasis on the Indian Ocean dipole [J]. *Deep-Sea Research Part -Tropical Studies in Oceanography*, 2002, 49: 1549-1572.
- [9] 郑冬梅, 张启龙. 热带印度洋-太平洋热力异常联合模及其指数定义研究[J]. *海洋科学进展*, 2008, 1: 12-21.
- [10] Pacanowski R C, Philander S G H. Parameterization of vertical mixing in numerical models of the tropical oceans [J]. *Journal of Physical Oceanography*, 1981, 11: 1442-1451.
- [11] Levitus S, Antonov J I, Boyer T P. Interannual variability of temperature at a depth of 125 meters in the North-Atlantic Ocean[J]. *Science*, 1994, 266: 96-99.
- [12] Yuan Dongliang, Han Weiqing. Roles of equatorial waves and western boundary reflection in the seasonal circulation of the equatorial Indian Ocean[J]. *Journal of Physical Oceanography*, 2006,36: 930-944.

## Long wave dynamics of sea level variations during the negative Indian Ocean dipole event during 1998—1999

WANG Jing<sup>1, 2</sup>, YUAN Dong-Liang<sup>1, 2</sup>

(1. Key Laboratory of Ocean Circulation and Waves, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China; 2. Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China)

**Received:** May, 26, 2011

**Key words:** Kelvin wave; Rossby wave; western boundary reflection; sea level anomalies; negative; the Indian Ocean Dipole (IOD)

**Abstract:** The interannual variation of long wave dynamics of the negative Indian Ocean Dipole (IOD) event of 1998—1999 are studied using Ocean General Circulation Model (LICOM) forced by daily surface winds and heat flux of National Centers for Environmental Prediction (NCEP), the simulation can reproduce the sea level anomalies of the altimetry data observations well. The equatorial Kelvin wave and Rossby wave decomposed from model output using vertical mode decomposition method show that western boundary reflection plays an important role in the evolution of negative IOD. Different from positive IOD events, the role of off-equatorial Rossby wave can be neglected and both two upwelling Kelvin waves are reflected from equatorial Rossby waves at the western boundary during negative IOD events. During 1998—1999 negative IOD events, the first upwelling Kelvin wave functions in the western and central Indian Ocean and was overwhelmed by westerlies anomalies forced downwelling Kelvin wave; and the second upwelling Kelvin wave terminates the downwelling anomalies off the Java coast and terminates the 1998—1999 negative IOD event eventually. The paper explains the termination mechanism of negative IOD events during 1998—1999 from the view of equatorial long wave dynamics at the first time, which laid down the foundation of understanding the influence of IOD on the surrounding climate even the Pacific Ocean.

(本文编辑: 刘珊珊)