

# 一个简单的印-太海气耦合模式\*

刘岩松<sup>1,2</sup> 王法明<sup>1</sup>

(1. 中国科学院海洋研究所 青岛 266071; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

**提要** 本文基于一层半海洋模式和 SVD(Singular Value Decomposition)大气模式构建了一个简单的海气耦合模式, 引入热通量的作用, 分析 ENSO 影响热带印度洋地区的动力学和热力学耦合过程。其中, 使用统计大气模式, 由给定的 SST(Sea Surface Temperature)异常得到风应力异常, 进而驱动海洋环流反馈给 SST, 完成海气的动力耦合; 使用块体经验公式由 SST 异常和风场异常计算热通量异常, 直接作用于 SST, 实现海气的热力学耦合。动力耦合实验揭示, 太平洋第一 EOF(Empirical Orthogonal Functions) 模态与观测基本吻合。并且模拟 Niño 3 指数存在两年左右的谱峰周期。这说明, 海气动力学耦合是 ENSO 生成的主要因素。热力耦合的加入是为了考察 ENSO 影响热带印度洋的热力学效应。同时考虑动力和热力耦合的实验结果表明, 热带太平洋暖异常中心更加接近观测值, 热带印度洋出现海盆尺度海温正异常。这意味着热带太平洋的 ENSO 信号通过海气界面的热量交换实现对热带印度洋地区的遥强迫, 导致印度洋海盆尺度增暖。

**关键词** ENSO; IOD(Indian Ocean Dipole); 热力学耦合

**中图分类号** P732.6

与中高纬度相比, 热带海洋是海气相互作用最强的区域, 同时也是主要气候年际变化信号产生的源地。其中, 厄尔尼诺和南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)作为热带东太平洋海面温度异常和海面气压纬向分布异常这一耦合现象的统称, 它的发生发展可通过改变大气环流, 进而影响各地的气温和降水, 造成全球范围内气候的年际异常; 而印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, IOD)作为一个热带印度洋海面温度异常的东西偶极型分布模态, 通过季风环流同样可在年际尺度上影响亚洲的气候(Chang *et al.*, 2006; Schott *et al.*, 2009)。已有研究表明, ENSO 和 IOD 事件的形成与各自海盆内海面温度—纬向风—温跃层东西梯度之间的海气正反馈过程紧密相联, 因此从本质上讲, 它们分别是热带太平洋和印度洋海洋-大气耦合系统的本征模态(Philander, 1990; Saji *et al.*, 1999)。

关于 IOD 和 ENSO 之间的关系, 目前还存在一些争议。厄尔尼诺期, ENSO 通过大气实现对热带印度

洋的遥强迫主要有热力学和动力学两方面的效应。一方面, Walker 环流东移变弱使得印度洋下沉气流旺盛, 从而抑制对流, 减小云覆盖, 增强了到达海面的太阳短波辐射, 同时正常的季风环流被削弱, 减少了海面蒸发和到大气层的潜热通量。两者的总体效果增加了进入海洋的净热通量, 因此印度洋在厄尔尼诺强盛后的 3—6 月内出现正的海面温度异常(Klein *et al.*, 1999)。另一方面, ENSO 的风场强迫对东赤道印度洋的沿岸上升流具有调制作用, 从而引起海面温度异常和温跃层的起伏(Susanto *et al.*, 2001); ENSO 还能通过风场扰动在印度洋激发 Rossby 波沿温跃层西传再反馈到海表面(Xie *et al.*, 2002; Du *et al.*, 2009)。因此, ENSO 可通过动力和热力两种过程来分别影响热带印度洋。但这两种过程是否都能有效的触发印度洋偶极子? 对于这一关键问题, 目前还不得而知。另外, 观测数据还显示并不是所有的 ENSO 事件都对应着 IOD 事件, 更为重要的是 IOD 事件可以在非厄尔尼诺的年份出现(Saji *et al.*, 2003)。例如 1961、1967 和 1994

\* 国家自然科学基金项目, 41176017 号; 山东省基金委项目, JQ201010 号; 国家重大科学研究计划项目, 2010CB950402。刘岩松, Email: liuyansong07@ms.qdio.ac.cn

通讯作者: 王法明, faming\_wang@ms.qdio.ac.cn

收稿日期: 2010-05-28, 收修改稿日期: 2011-03-22

年, 当强 IOD 事件在印度洋发生时, 太平洋中就没有 ENSO。这说明 IOD 和 ENSO 之间既存在一定的独立性, 又存在一定的相关性(吴国雄等, 1998; 李崇银等, 2001; 赵珊珊等, 2004; 周天军等, 2004; 巢纪平等, 2005)。

自 20 世纪八十年代以来, 简单海洋-大气耦合模式在 ENSO 研究过程中发挥了至关重要的作用。其中, Zebiak 等(1987)利用约化重力海洋模式和简单大气模式, 首次实现了对 ENSO 事件的成功数值预报, 成为年际气候变化预报的里程碑。直到今天, 尽管出现了超高性能计算机和各类复杂的气候模式, 但 Zebiak-Cane 模式的预报模拟性能仍不能被超越(Chen *et al.*, 2004)。这说明简单的海洋-大气模式抓住了热带海气耦合过程的本质, 能够解释大部分的气候年际变化信号。但以往简单模式的研究多以 ENSO 为主, 对印度洋海气耦合信号关注较少。本文尝试将热通量的作用引入 Zebiak-Cane 类简单海气模式, 以期揭示 ENSO 影响热带印度洋的动力学和热力学耦合过程。

## 1 模式介绍

本文所用简单海气耦合模式已被成功用于热带大西洋气候年际变化的研究(Chang *et al.*, 1997; Wang *et al.*, 2008a)。我们将其基本模式框架移植到热带印太海气耦合系统, 并结合气候平均态做相应的调整。下面就其海洋部分和大气部分作简要介绍。

### 1.1 海洋模式

本文使用的海洋模式为一层半约化重力模式的扩展, 遵循了 Zebiak-Cane 模式的基本设置, 并包括了海洋上混合层的热力学过程(模式方程详见 Wang *et al.*, 2008a)。

忽略可压缩性及盐度的影响, 且假定混合层深度不变, 海面温度(Sea Surface Temperature, SST)方程形式上可写为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -u\nabla T - \frac{1}{H_{\text{mix}}} w_e(T - T_e) + \frac{Q}{\rho_0 C_p H_{\text{mix}}} \quad (1)$$

其中,  $T$  和  $T_e$  分别代表海表温度和次表层温度,  $u$  和  $w_e$  分别代表混合层水平流速和次表层夹卷速度,  $Q$  代表热通量,  $\rho_0$  和  $C_p$  分别代表海水的密度和比热。该方程中右边第一和第二项分别代表了水平温度输运和次表层冷水夹卷过程对 SST 的影响。而流场  $u$  和  $w_e$  的变化通过浅水方程与海面风应力驱动联系在一起, 因此这两项代表了大气扰动的动力学效应, 是 El Niño 生成的必要条件, 同时也是经典 Zebiak-Cane 模

式所关注的最关键海洋过程。方程(1)右边第三项则是海面热通量加热项, 代表着大气扰动的热力学效应, 在简单 ENSO 模式中一般取为年平均值, 即我们通常不考虑海面热通量变化对 ENSO 方差的贡献。鉴于本文关注太平洋 ENSO 对印度洋的动力学和热力学两方面的效应, 我们将在模式驱动项中加入热通量异常的影响(见下一小节)。

### 1.2 大气模式

如 Wang 等(2008a, b)所述, 海面风场和热通量形式上可分为两部分:

$$\tau = \bar{\tau} + \tau', \quad Q = \bar{Q} + Q'$$

其中,  $\bar{\tau}$  和  $\bar{Q}$  代表多年平均的季节循环,  $\tau'$  和  $Q'$  代表其它时间尺度上的大气异常扰动。

根据其与海洋的耦合关系, 风应力异常又可进一步分为 SST-相关和 SST-无关两部分:

$$\tau' = \mathcal{A}T' + \zeta \quad (2)$$

其中,  $\mathcal{A}$  代表着简单大气模式所给定的海温到风场的线性反馈关系, 即给定 SST 异常, 通过大气模式  $\mathcal{A}$ , 我们得到风应力异常, 进而驱动海流异常再通过方程(1)反馈给 SST。在本文中, 我们称这种有海洋动力过程参与的海洋-大气反馈过程为动力学耦合。而  $\zeta$  则代表着与 SST 变化无关的大气内部随机振荡, 在年际尺度上多表现为白噪声, 即不具有任何可预报性(Wang *et al.*, 2008b)。

同样, 海面热通量异常也可分为与 SST 线性相关部分加上大气随机噪声部分。如方程(1)所示, 热通量可直接作用于 SST, 不需要海洋动力过程参与, 因此我们把这种 SST 到热通量的反馈称之为热力学海气耦合。但值得注意的是, 海面热通量异常中的潜热通量异常和海面风场异常并不是两个相互独立的物理量。在本文中, 我们是通过块体经验公式由 SST 和风场异常计算而得潜热通量异常(Michael *et al.*, 2003)。

### 1.3 模式验证

为了取得好的模拟效果, 我们利用统计方法来构建线性大气模式(方程(2))。即将 1948—2007 年的 NCEP(National Centers for Environmental Prediction)再分析资料作为一个 60 年样本序列, 利用奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)的方法将海面风场和温度异常资料拟合到方程(2)中去, 以求得广义的线性回归系数  $\mathcal{A}$ (详见 Wang *et al.*, 2008b)。考虑到风场对 SST 的响应有一定的延迟, 且西太平洋和印度洋地区受季风环流影响强烈, 我们取风场异常

滞后温度异常一个月，再分别对四个季节的 180 个月样本序列进行 SVD 分析，求得随季节变化的动力学耦合强度  $\lambda$ 。确定了统计大气模式(方程(2))中的  $\lambda$ ，就可直接计算得出与 SST 异常相对应的风场异常。图 1 显示了用上述方法算出的典型 El Niño 事件中的风场响应。与观测值相比，模式基本抓住了热带太平洋中的西风异常和热带印度洋中的东风异常。可见统计大气模式(方程(2))，简单易行，性能可靠。

另外，尽管随机大气噪声不具备任何可预报性，但它为 ENSO 的发生发展提供背景能量，是我们统计大气模式(方程(2))中不可或缺的一部分。本文使用 NCEP 数据，将风应力异常值去除与海温有关的部分，剩余部分进行经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)分析，并对其时间序列进行 Ljung-Box 白噪声检验。结果显示，大部分时间序列通过 95% 的置信度检验，说明 ENSO 的驱动风场中包含相当成分的随机白噪声。因此，我们将前 20 个 EOF 模态作为大气噪声的空间结构乘以数值产生的随机时间序列，代入耦合模式，从而驱动 ENSO 演化。

最后，我们采用的是异常耦合的模式，即平均流场和平均海面温度是由 NCEP 的平均风场和热通量单向驱动海洋模式而得，海洋和大气分量仅就其异常值相互交换信息。模式的应用范围为 24°S—24°N, 30°E—70°W，涵盖整个热带印度洋和热带太平洋地区。海陆岸线采用无滑边界条件，南北边界为 5°宽的海绵层。海绵层内的 SST 逐渐松弛到气候平均态。模式的空间分辨率为经向 1°×纬向 2°，积分时间步长

为 1 小时。模式先在平均风场和热通量驱动下积分 10 年，达到稳定气候平衡态；然后再逐步引入海气耦合和大气随机噪声，并向前积分 100 年。为避免初始条件的影响，仅取最后 70 年的月平均资料用于下面的数据分析。

## 2 模式结果分析

我们利用简单耦合模式进行两组试验：一、动力学耦合试验，即仅考虑风场反馈引发的海洋波动对 SST 的影响，热通量的扰动人为设为零；二、热力动力全耦合试验，即在动力学耦合的基础上，加入热力学耦合的影响。

### 2.1 动力学耦合试验

图 2 显示了基于模拟和观测资料的热带太平洋海表温度异常的第一 EOF 模态。可以看出，模式基本模拟出了热带中东太平洋地区的厄尔尼诺增温现象，从而证实 ENSO 是一个海气动力学耦合现象。但与观测值相比，模式也存在一定偏差。如实际的暖异常主要出现在中东太平洋的赤道附近，模拟的暖异常集中于东热带太平洋，向西延伸不够，南北覆盖范围太宽。同时，模拟的第一 EOF 解释方差为 53%，实际的第一 EOF 解释方差为 43%。

衡量 ENSO 时间变化的一个重要指标是 Niño3 指数，定义为 5°S—5°N 和 150°W—90°W 范围内 SST 异常的区域平均值。图 3 给出观测和模拟的 Niño 3 时间序列的功率谱。可以看出，观测谱峰周期出现在 3—5 年，即 ENSO 是一个不规则的年际振荡；而模拟

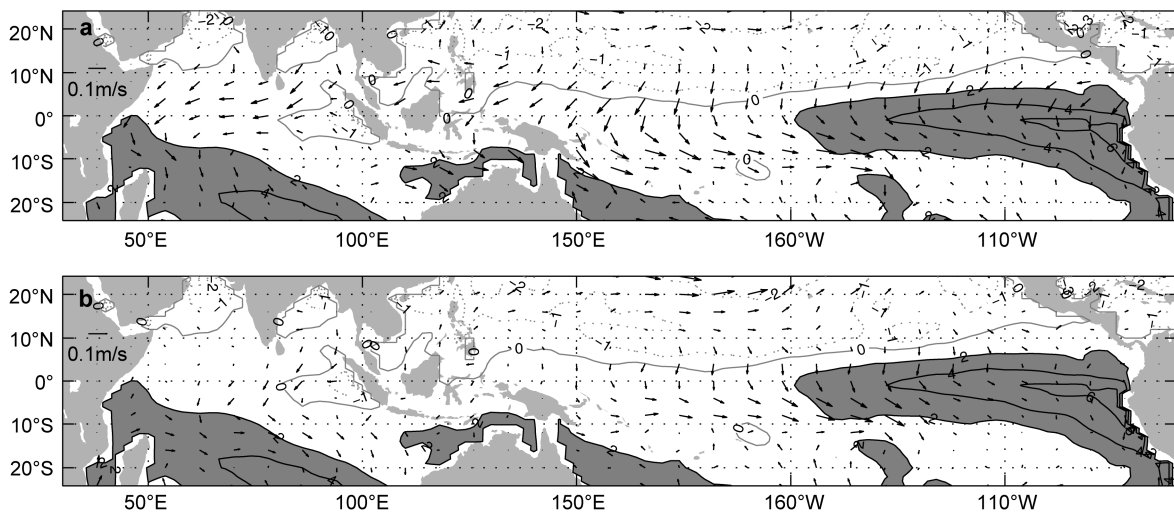


图 1 1997 年 12 月份 SST 异常(阴影代表升温)和 1998 年 1 月份的海面风场异常(箭头)  
 Fig.1 SST anomalies in December 1997 (positive anomalies are shaded) and wind anomalies in January 1998 (arrow)  
 a: NCEP 再分析资料; b: 统计大气模式的模拟值

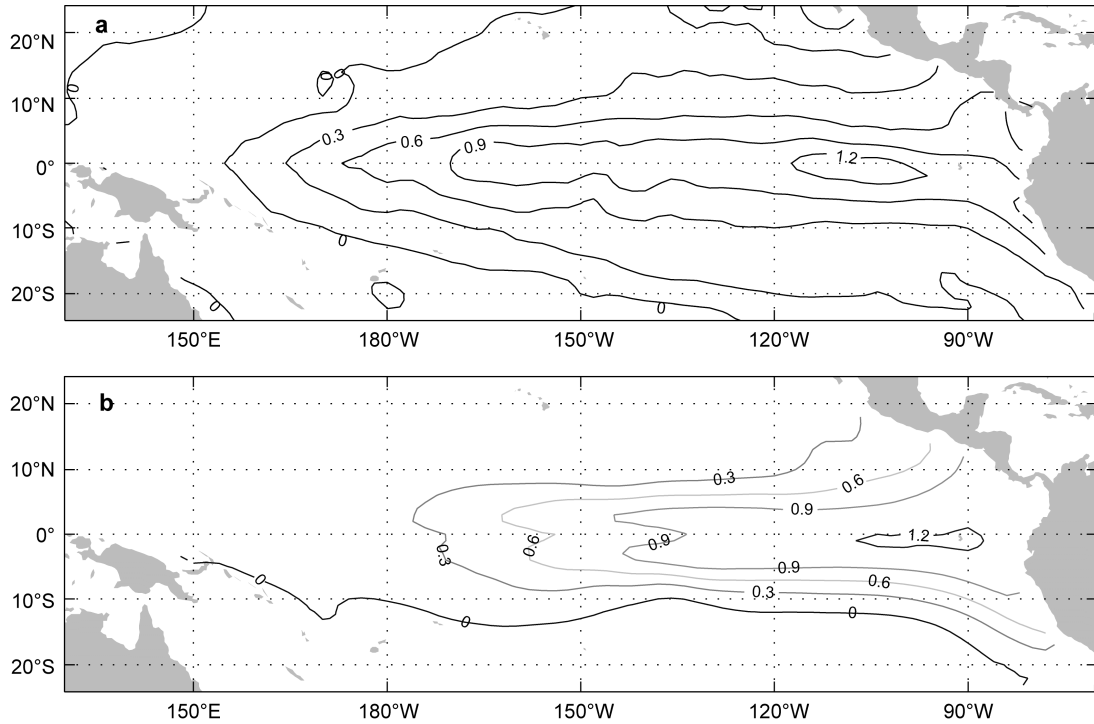


图 2 热带太平洋 SST 异常的第一 EOF 模式

Fig.2 First leading EOF mode of SST anomalies in the tropical Pacific  
a: NCEP 资料; b: 动力耦合模拟

的谱峰周期略短, 主要集中于 2 年左右, 因为动力耦合模式只考虑了海洋波动过程对时间的调整, 太平洋赤道的 Kelvin 波自西向东大约需要 3 个月, 而返回的 Rossby 波大约需要 9 个月, 这样半个周期就在 1 年左右, 所以模拟的 ENSO 周期在 2 年左右。而实际的 ENSO 循环还包括很多其他的动力过程, 比如 recharge 和 discharge 振子机制等, 考虑这些之后会对 ENSO 的周期具有调制作用。因此模式虽然在模拟 ENSO 的低频震荡方面有一定缺陷, 但是我们的模式

能够抓住热带太平洋动力学耦合这一关键物理过程, 可对 ENSO 的空间结构和时间演化进行较好的模拟。

通常使用 SST 异常的第一 EOF 模式来代表热带印度洋海盆正异常的模式, 也就是 El Niño 对印度洋作用结果的表现, 而 IOD 现象通常出现在第二模态中(Chang *et al*, 2006)。图 4 给出了热带印度洋海表温度异常的观测资料的第二 EOF 模态和模拟第一模态。由结果可以看出, 模式也能够模拟出印度洋海温异常的偶极型分布状态。但是与观测值相比, 模拟结果

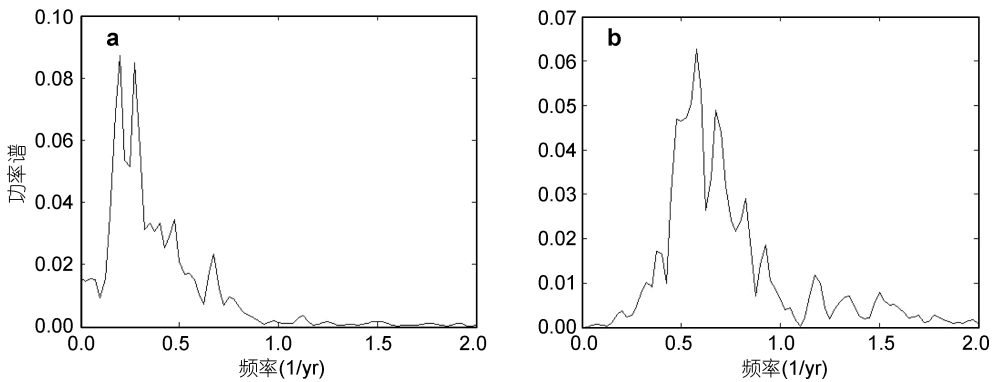


图 3 Niño 3 指数的功率谱

Fig.3 The power spectrum of Niño 3 index  
a: NCEP 资料; b: 动力耦合模拟

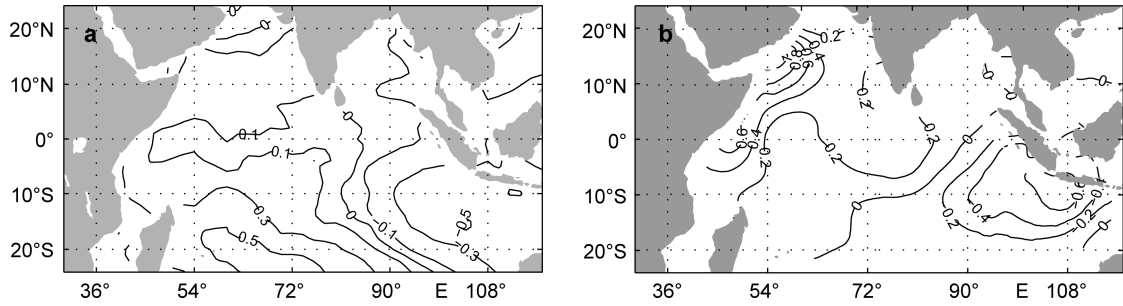


图4 热带印度洋 SST 异常的 NCEP 资料第二 EOF 模态(a)和动力耦合模拟第一 EOF 模态(b)

Fig.4 Second leading EOF mode from NCEP reanalysis (a) and first leading EOF mode from dynamic model result (b) of SST anomalies in the tropical Indian Ocean

的暖异常范围较小,且向东延伸不够。另外,模拟值的第一 EOF 解释方差为 37%,而观测的第二 EOF 解释方差为 27%。

## 2.2 热力学耦合试验

图 5 给出的是动力热力全耦合下热带太平洋 SST 异常的第一 EOF 模态,与观测结果(图 2a)比较,太平洋地区暖异常范围向西延伸不足的缺点仍然存在,其中第一模态解释方差为 55%;与动力耦合结果(图 2b)比较,暖异常中心范围有所增加,而且更加向西扩散,更接近观测值。因此,热力学反馈过程对太平洋地区的异常信号模拟有所改善,但影响并不大。除此而外, Niño3 指数与动力试验差别不大。

在 El Niño 影响下, SST 异常的第一 EOF 模态代表热带印度洋海盆正异常的模式。图 6 给出的是动力热力全耦合下热带印度洋 SST 异常的第一 EOF 模态,解释方差为 38%的第一 EOF 模态与实际值类似,表现的是海盆尺度的正异常。与动力耦合结果(图 4b)比较,通过动力热力的共同耦合,赤道印度洋暖异常范围加大。这说明在 ENSO 影响热带印度洋的过程中,海气的热力学效应起着至关重要的作用。潜热通量在

向印度洋传播太平洋地区的 ENSO 信号的过程中,起到了关键作用,主要表现在印度洋地区海盆尺度的海温升高。

## 3 总结与讨论

本文通过构建一个简单的海气耦合模式,讨论了 ENSO 影响热带印度洋的动力学和热力学效应。主要模拟了 ENSO 及 IOD 事件的空间结构及年际变化,探究海气热力耦合在 ENSO 影响热带印度洋海温的过程中所扮演的角色。

海洋部分为经典的 Zebiak-Cane 模式,使用 SVD 统计分析模式由 SST 异常计算风应力异常,通过驱动海流异常反馈给 SST,完成海气的动力耦合。使用块体公式计算潜热通量异常,直接作用于 SST,实现海气热力学耦合。经验证, SVD 统计大气模式能够模拟出厄尔尼诺年热带太平洋中的西风异常和热带印度洋中的东风异常现象。

在对海气动力学耦合结果的考察中,热带太平洋地区的 ENSO 无论是空间结构还是时间变化尺度,均与观测值接近。而且在热带印度洋地区也有海温异

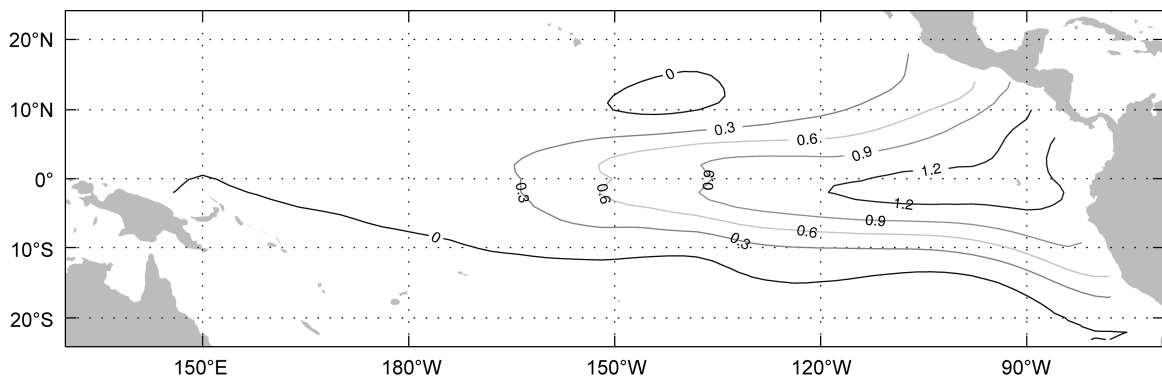


图5 动力热力耦合下热带太平洋 SST 异常的第一 EOF 模态

Fig.5 First leading EOF mode of SST anomalies from dynamic model result in the tropical Pacific

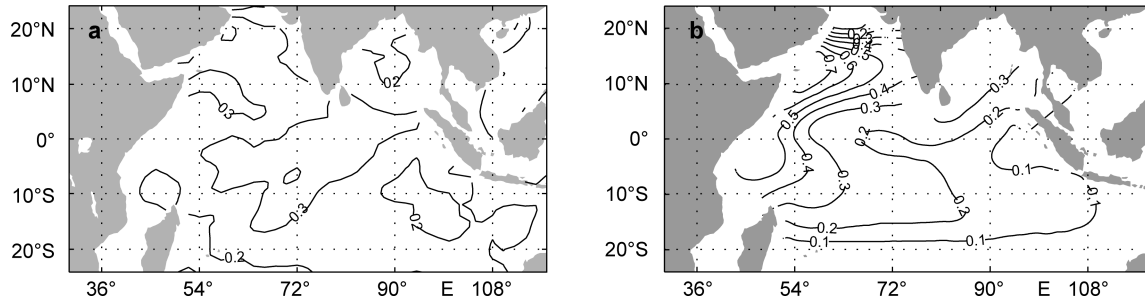


图 6 热带印度洋 SST 异常第一 EOF 模态

Fig.6 First leading EOF mode of SST anomalies in the tropical Indian Ocean:  
a: NCEP 资料; b: 动力热力全耦合模拟

常西正东负的 IOD 信号。这表明, ENSO 及 IOD 事件的形成与各自海盆内海面温度—纬向风—温跃层东西梯度之间的海气正反馈过程紧密相连。但是, ENSO 的海温异常信号不能仅通过海气动力作用传到印度洋地区。

为进一步考察 ENSO 与热带印度洋之间的关系, 研究海气界面的热量交换是否对此关系有影响, 在动力耦合的基础上加入热力耦合。动力热力全耦合结果显示, 太平洋地区仍然出现较强的 ENSO 信号, 并且暖异常中心更与观测值接近。关键是在印度洋地区, 出现了海盆范围内的增暖现象, 这与观测现象符合较好。因此, 热带太平洋与热带印度洋通过大气环流联系起来, 厄尔尼诺时期热带印度洋向下的潜热通量增加是出现正的海面温度异常的主要因素。

### 参 考 文 献

- 李崇银, 穆明权, 2001. 赤道印度洋海温偶极子型及其气候影响. *大气科学*, 25(4): 433—443
- 吴国雄, 孟文, 1998. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析. *大气科学*, 22(4): 470—480
- 周天军, 俞永强, 宇如聪等, 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟. *大气科学*, 28(3): 357—373
- 赵珊珊, 杨修群, 2004. 风应力桥梁作用下热带太平洋和热带印度洋相互作用的数值试验. *海洋学报*, 26(4): 33—48
- 巢纪平, 巢清尘, 刘琳, 2005. 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件. *气象学报*, 63(5): 594—602
- Chang P, Ji L, Li H, 1997. A decadal climate variation in the tropical Atlantic Ocean from thermodynamic air-sea interactions. *Nature*, 385: 516—518
- Chang P, Yamagata T, Schopf P *et al*, 2006. Climate fluctuations of tropical coupled system: The role of ocean dynamics. *J Climate*, 19: 5122—5174
- Chen D, Cane M A, Kaplan A *et al*, 2004. Predictability of El Niño in the past 148 years. *Nature*, 428: 733—736
- Du Y, Xie S P, Huang G *et al*, 2009. Role of air-sea interaction in the long persistence of El Niño-induced North Indian Ocean Warming. *J Climate*, 22: 2023—2038
- Klein S A, Soden B J, Lau N C, 1999. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J Climate*, 12: 917—932
- Michael A B, Chris W F, Zeng X B *et al*, 2003. Which bulk aerodynamic algorithms are least problematic in computing ocean surface turbulent fluxes? *J Climate*, 16: 619—635
- Philander S G H, 1990. *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*. San Diego Academic Press, San Diego: 293
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N *et al*, 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401: 360—363
- Saji N H, Yamagata T, 2003. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean Dipole Mode years: COADS observations. *J Climate*, 16: 2735—2751
- Schott F A, Xie S P, McCreary J P, 2009. Indian Ocean circulation and climate variability. *Rev Geophys*, 47: RG1002, doi: 10.1029/2007RG000245
- Susanto R D, Gordon A L, Zheng Q, 2001. Upwelling along the coasts of Java and Sumatra and its relation to ENSO. *Geophys Res Lett*, 28(8): 1599—1602
- Xie S P, Annamalai H, Schott F *et al*, 2002. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability. *J Climate*, 15: 864—878
- Wang F, Chang P, 2008a. A linear stability analysis of coupled tropical Atlantic variability. *J Climate*, 21: 2421—2436
- Wang F, Chang P, 2008b. Coupled variability and predictability in a stochastic climate model of tropical Atlantic. *J Climate*, 21: 6247—6259
- Zebiak S E, Cane M A, 1987. A model El Niño-Southern oscillation. *Monthly Weather Review*, 115: 2262—2278

## AN INTERMEDIA AIR-SEA COUPLED MODEL FOR THE INDO-PACIFIC OCEAN

LIU Yan-Song<sup>1,2</sup>, WANG Fa-Ming<sup>1</sup>

(1. *Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*; 2. *Graduate University, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049*)

**Abstract** An intermedia couple model with heat-flux effect was used in this study to analyze thermodynamical air-sea feedbacks in the tropical Indian Ocean forced by El Niño-Southern Oscillation (ENSO). To achieve the dynamical air-sea feedback, an empirical model was constructed in statistical technique to determine wind stress anomalies from model sea surface temperature (SST). To achieve thermodynamical air-sea feedback, a bulk formula was used to calculate heat flux from model SST and wind speed anomalies. Results show that the first empirical orthogonal function mode accorded with observation in the tropical Pacific, and has about 2-year interannual variability from power spectrum of Niño 3 index, suggesting that the dynamic air-sea feedback controlled the ENSO. In addition, results indicate that the center of positive anomaly in the tropical Pacific showed strong ENSO signals, more-positive anomaly was generated in the tropical Indian Ocean, especially in the West Indian Ocean, which are similar to the observation data. Therefore, ENSO acts as an atmospheric tele-connector linking the tropical Indian Ocean with tropical Pacific via air-sea heat-flux changes for generating positive anomaly in these basins.

**Key words** ENSO; IOD(Indian Ocean Dipole); thermodynamic feedback