

# 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件<sup>\*</sup>

巢纪平

(国家海洋环境预报中心, 北京, 100081; 第一海洋研究所, 青岛, 266061)

巢清尘

(国家气候中心, 北京, 100081)

刘琳

(第一海洋研究所, 青岛, 266061; 中国海洋大学, 青岛, 266003)

## 摘要

在热带太平洋和印度洋的次表层构造了一个气候上的海温距平极值曲面(接近由 20 °C 定义的温跃层曲面), 分析了 1960~2000 年海温距平在这一曲面上演变的统计行为, 指出, 在这个曲面上分析海温距平的演变要比分析海表温度距平的演变规律更清楚, 例如热带太平洋的 ENSO 事件, 海温距平信号在赤道和南北 10°左右的纬带附近呈逆时针方向传播, 在传播过程中其强度产生变化甚至变号; 在热带印度洋的 Dipole 若在最大海温距平曲面上来分析, 则西、东印度洋的海温距平在统计上呈负相关(真正物理意义下的 Dipole), 而不像用海表温度距平分析那样只在西、东温度距平梯度上呈现年际的正、负号变化。进一步的分析表明, ENSO 和 Dipole 的发展, 在统计上呈现出时滞的相互关系, 一般赤道东太平洋的海温距平变化在前(一个季度左右), 联系这两者变化之间的纽带是赤道太平洋和印度洋的一对反相转动的 Walker 环流的耦合演变。

**关键词:** 最大海温距平曲面, ENSO, Dipole, Walker 环流, 耦合演变。

## 1 引言

自 20 世纪 60 年代 Bjerknes<sup>[1,2]</sup> 指出发生在热带太平洋的 El Niño 和发生在大气中的南方涛动实质上是相互联系的大尺度海气相互作用事件(以后称为 ENSO)以来, ENSO 的研究已被众多的气象学家和海洋学者重视, 普遍认为 ENSO 是引起年际全球气候异常的重要信号之一。一般对 ENSO 发展的资料分析研究中, 用海表温度距平(SSTA)来表征海洋的变化, 用 850 hPa 纬向距平风来表征大气的变化。应用这两个指标, Rasmusson 和 Carpenter<sup>[3]</sup> 分析了 ENSO 发展过程中各个位相海洋和大

气的特征。然而在“中、美西太平洋海气相互作用试验”中, 观测到 1986/1987 年那次 ENSO 中暖的海温异常首先出现在 147°~175°E 的 80~115 m 的次表层(温跃层附近)<sup>[4]</sup>。这一观测事实启示人们, 不仅西太平洋在 El Niño 发展中具有重要作用(如 1982/1983 年的正的 SSTA 首先在赤道中西太平洋出现), 而强的海温指示性信号也可能首先在次表层出现。李崇银和穆明权<sup>[5]</sup> 就分析了 1997/1998 年 El Niño 事件的发展和西太平洋次表层海温异常的关系。

在另一方面, Saji 等<sup>[6]</sup> 指出, 在热带印度洋的海表温度距平在西、东方向的梯度呈年际的正、负交替

\* 初稿时间: 2005 年 5 月 16 日; 修改稿时间: 2005 年 7 月 1 日。

资助项目: 国家自然科学基金(4176002, 40231012)。

作者简介: 巢纪平, 1932 年生, 中国科学院院士。主要从事热带大气动力学、海气相互作用、数值天气预报、中小尺度动力学、积云动力学研究。E-mail 321019chao@vip.sina.com

变化,他们把这一现象称为 Dipole。但如按物理学的 Dipole 定义,西、东印度洋的海温距平应在符号上是相反的,像 1997/1998 年和 1994 年西、东印度洋的海表温度距平是反号的除外,其他年份海表温度这种相反符号的分布并不多见。这也促使人们去探索新的分析方法。

## 2 海温距平极值曲面及应用

事实上若用温跃层为次表层的代表层是合理的,但是考虑到若以  $20^{\circ}\text{C}$  为参考温度来定温跃层的深度,则在赤道东太平洋的冷舌区其温度通常低于  $20^{\circ}\text{C}$ ,这给分析带来一定的困难,而在印度洋以什么温度作为温跃层的参考温度也未取得共识。为此巢清尘等在文献[7]中提出构造一个次表层海温距平极值曲面(MSTA)用它的深度来代替温跃层深度的想法,MSTA 是这样构造的:在每一点取表层以下温度距平的极值(不计符号),把所有极值对应的深度做气候平均,得到深度曲面,此即海温距平极值曲面。Chao 等人在文献[8]中比较了 MSTA 的深度分布和以  $20^{\circ}\text{C}$  为参考的温跃层曲面的深度,指出它们的深度分布形势十分相似。

在以下的分析中将用 MSTA 表面上的次表层海温距平来代替通常用的海表温度距平(SSTA)。作这种替换在物理上是考虑到年际时间尺度上大气对海洋的作用,主要通过低空风应力的辐合、辐散或旋度影响了温跃层的深度,而温跃层深度变化,在一定程度上可用气候温跃层上的温度变化来表示,例如当温跃层变浅(深)时,气候温跃层面上的海温变冷(暖)。在另一方面,海表温度的变化除受风应力影响外还受到感热、潜热及降水、蒸发等影响,使海表温度变化比较复杂,对一定时间尺度的信号来讲,噪音较多,且海表温度变化的强度也较弱。

作为例子文中分析了从 1968 到 2000 年海温距平在 MSTA 上的演变特征。图 1 是文献[8]中的图 2 对信号作了 9 个月的滑动平均处理后给出的新图。

图 1 明显地呈现出,当一个暖(冷)的海温信号沿赤道从西太平洋暖池向东传播到东太平洋北上的过程中,在这期间一般有一个冷(暖)的海温距平信号在  $10^{\circ}\text{N}$  附近(一般为  $8^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{N}$ )从太平洋的东侧向

西传向西太平洋后并南下到暖池的赤道附近。这样冷、暖海温距平信号在不同纬度上的传播,在赤道某一指定的经度上构成冷、暖位相的交替出现,即形成一个 ENSO 循环。一般来说在南半球也存在类似地海温距平传播回路,但不如北半球明显,这可能因为赤道以南海温距平极值曲面较深,在那里海温距平强度不强,不易分析,也可能易受干扰。

海温信号在 MSTA 表面上的这种有规则的传播特征,用 SSTA 是分析不出来的。

## 3 热带太平洋的海气相互作用事件(ENSO)

从图 1 可以看到,在众多的例子中,同一时间在赤道东太平洋为暖(冷)的温度距平时,西太平洋暖池区为冷(暖)的温度距平,图 2 分别给出 MSTA 表面上太平洋西部  $10^{\circ}\text{N}\sim 4^{\circ}\text{S}$ ,  $130^{\circ}\sim 155^{\circ}\text{E}$  和东部  $4^{\circ}\text{N}\sim 4^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$  海温距平的年际变化曲线(资料取自 Scripps 海洋研究所),可见两者呈反相关趋势,相关系数为  $-0.43$ (最大相关系数出现在东太平洋海温距平超前 2 个月时,为  $-0.45$ )。可见,在 MSTA 表面上大洋东、西两部海温距平呈偶极子(Dipole)分布。

图 3a 给出西太平洋上述指标区 MSTA 表面上的海温距平及相应区的面深度距平的年际变化曲线,这两条曲线呈正相关趋势,相关系数为  $0.31$ ,可见,MSTA 表面上的海温距平变化反映了温跃层深度的变化。图 3b 给出太平洋中部( $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}$ ,  $180^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{W}$ )  $850\text{ hPa}$  纬向风距平和西太平洋指标区次表层海温距平的年际变化曲线(纬向风超前 3 个月),它们之间呈反相关变化趋势,相关系数为  $-0.51$ 。图 3c 给出东太平洋的情况,海温距平和 MSTA 深度变化之间的相关系数为  $0.28$ ,而海温距平和纬向风(纬向风超前 4 个月)之间为正相关,相关系数为  $0.41$ (图 3d)。这几张图表明用 MSTA 表面上的海温距平可以很清楚地表明 ENSO 事件。

图中纬向风取超前的月份,因那时的相关系数值最大,这表明在这一海气相互作用的位相中大气起主导作用。关于海洋影响大气的过程待分析。

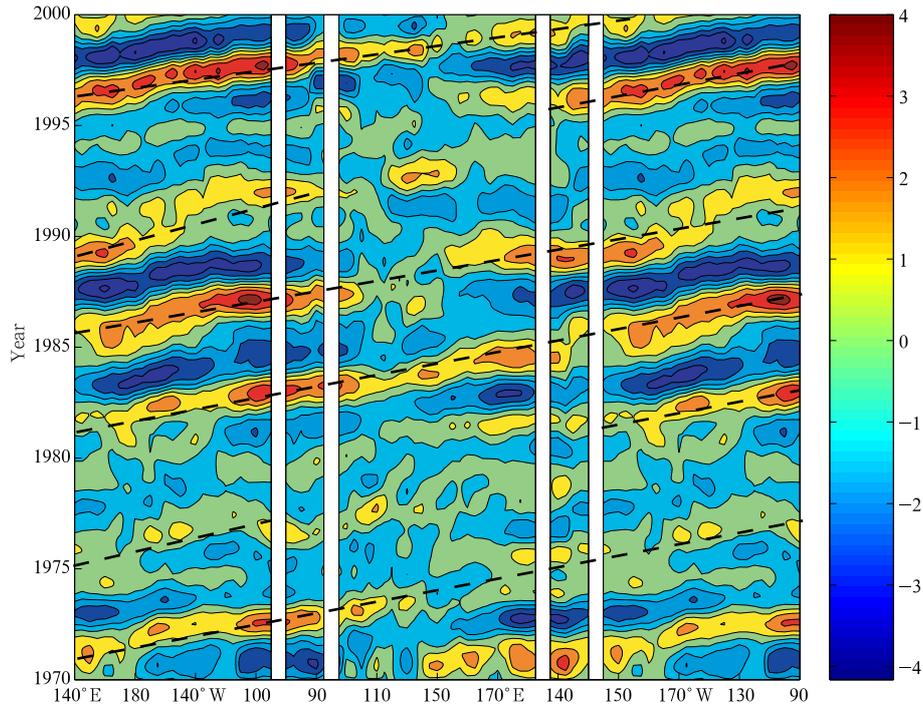


图 1 在 MSTA 上海温距平的演变(虚线表示变化趋势;横坐标第一分格是沿赤道从西太平洋 140°E 到东太平洋 115°W,第二分格是在 115°W 上从赤道到 10°N(由于空间较小纬度未给出),第三分格是 10°N 从 115°W 回到 140°E,第四分格在 140°E 上从 10°N 回到赤道(由于空间较小纬度未标出),第五分格同第一分格)

Fig. 1 The evolving of sea-temperature anomaly on MSTA (the first segment of x-axis (abscissa) represents the leg from West Pacific 140°E to East Pacific 115°W along the equator; the second one from the equator to 10°N along the longitude of 115°W (no latitude degree indicated due to narrow space); the third from 115°W back to 140°E along 10°N; the fourth from 10°N back to the equator along 140°E (no latitude degree indicated due to narrow space); the fifth is the same as the first)

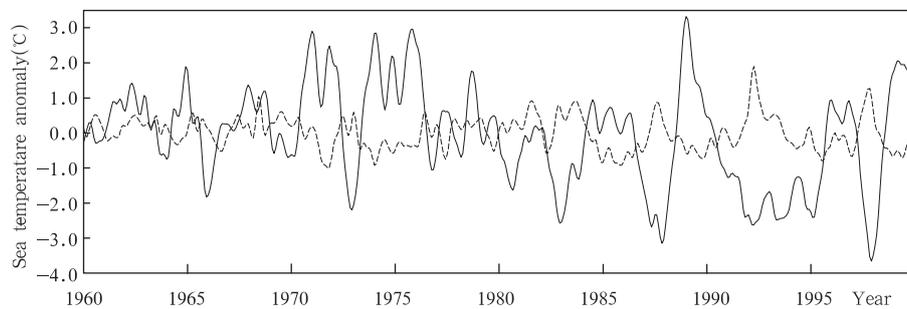


图 2 MSTA 曲面上太平洋西部(10°N~4°S, 130°~155°E,实线)和东部(4°N~4°S, 90°~150°W,虚线)海温距平的年际变化曲线

Fig. 2 The inter-annual changes of the sea-temperature anomaly in the western(130°-155°E, 10°N-4°S, solid line) and eastern (90°-150°W, 4°N-4°S, dashed line) Pacific Ocean

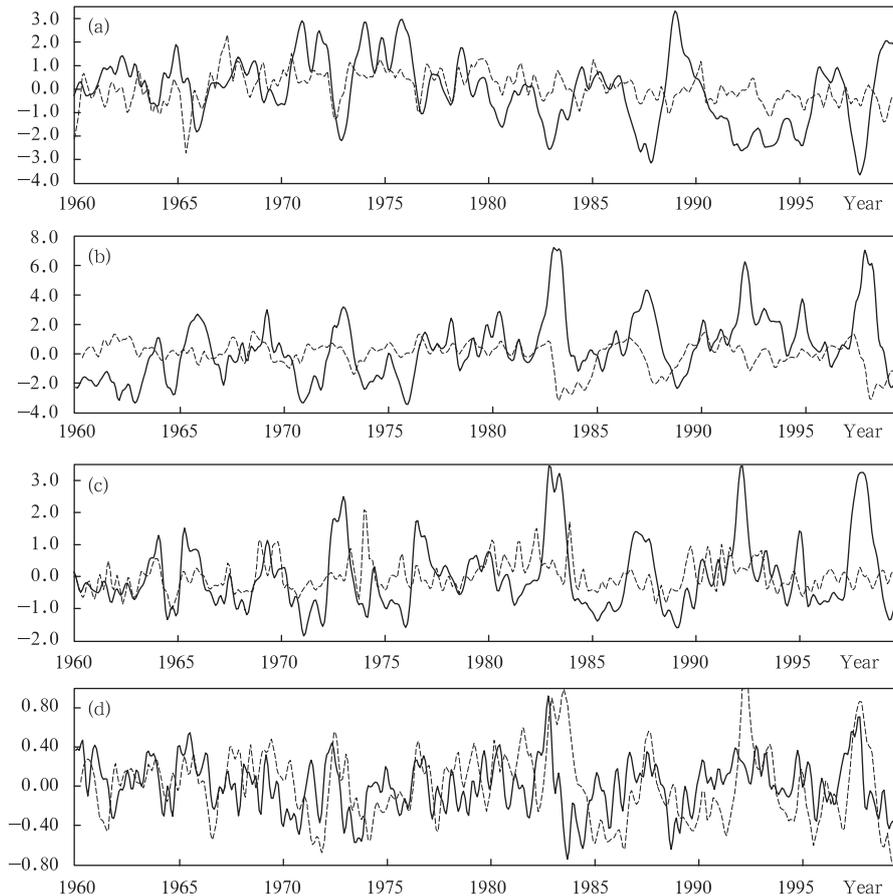


图 3 MSTA 曲面上的海温距平(实线)和该曲面的深度距平(虚线)的时间序列 (a. 西太平洋, c. 东太平洋); 太平洋中(b)、东(d)部 850 hPa 纬向风距平(实线)分别与西(b)、东(d)太平洋 MSTA 曲面上的温度距平(虚线)的年际变化曲线 (以上各变化曲线经过了 5 个月的滑动平均)

Fig. 3 The inter-annual changes of sub-surface sea-temperature anomaly (solid line) and the deep anomaly distribution (dashed line) on MSTA of (a) the western and (c) the eastern Pacific Ocean; the inter-annual changes of 850 hPa zonal wind anomaly (solid line) in (b) the middle and (d) the eastern Pacific Ocean and sea-temperature anomaly (dashed line) on MSTA of (b) the western and (d) the eastern Pacific Ocean

#### 4 热带印度洋海气相互作用事件(Dipole)

在热带印度洋, Saji 等<sup>[6]</sup>用 SSTa 提出的 Dipole 指数(DMI)实际上反映了西、东印度洋海表温度距平梯度的年际变化, 在相当多的情况下, 西、东印度洋海温距平的符号是一样的, 只不过强度不同。巢纪平等<sup>[9]</sup>指出, 若在印度洋的 MSTa 曲面上来分析, 则西印度洋( $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}, 50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$ )和东印度洋( $10^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}, 90^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$ )的海温距平年际变化(图 4)呈反相关变化趋势, 相关系数为 $-0.38$ 。

图 5a 是西印度洋的海温距平年际变化及相应

的 MSTa 曲面深度的年际变化, 两者之间的相关系数为 $0.32$ 。这同样地表明在印度洋也是一样, MSTa 曲面上的温度距平变化是该曲面深度变化的反映。在图 5b 中也给出印度洋中部( $4^{\circ}\text{N}\sim 10^{\circ}\text{S}, 60^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{E}$ )的纬向风变化和西印度洋的次表层的温度距平曲线, 温度距平和纬向风距平呈反相关的变化趋势, 相关系数为 $-0.34$ 。图 5c 是东印度洋的情况, 这时海温距平和 MSTa 深度变化之间的相关系数为 $0.23$ , 而纬向风(超前 2 个月)和温度距平是正相关变化, 相关系数为 $0.34$ (图 5d)。可见印度洋的 Dipole 事件同样是海气相互作用事件。

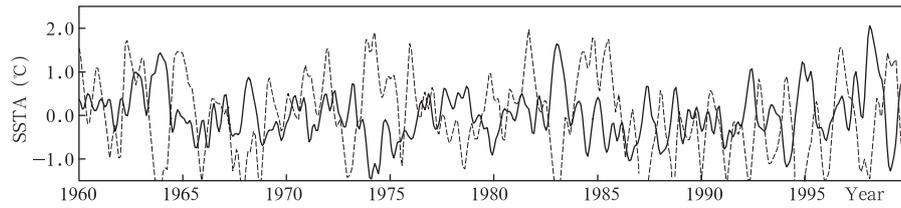


图 4 西印度洋(10°N~10°S, 50°~70°E, 实线)和东印度洋  
(10°N~10°S, 90°~110°E, 虚线)的海温距平年际变化

Fig. 4 The inter-annual changes of sea-temperature anomaly in western  
(solid line) and eastern (dashed line) Indian Ocean

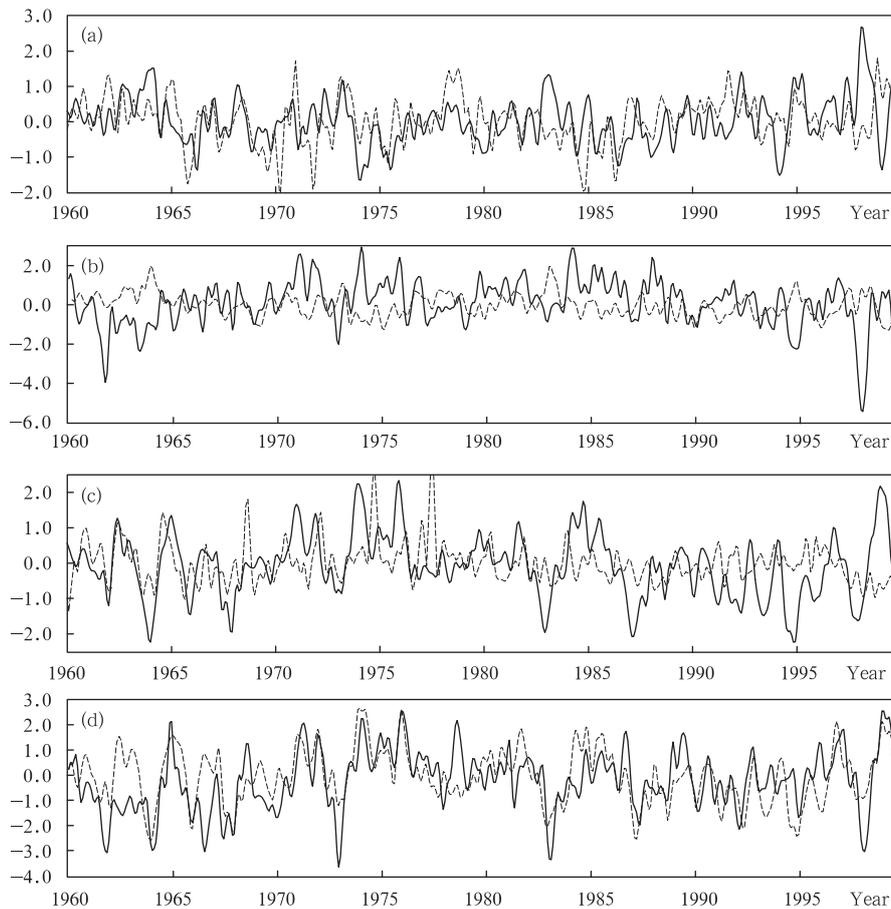


图 5 说明同图 3, 但是印度洋的情况

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for Indian Ocean

## 5 ENSO 和 Dipole 发展的相关

Saji 等<sup>[6]</sup>认为印度洋的 Dipole 是独立于太平洋 ENSO 的事件, 但 Webster 等<sup>[10]</sup>指出就 1997/1998 年印度洋的海气相互作用事件而言, 它和 ENSO 事件是有关联的, 李崇银和穆明权<sup>[11]</sup>认为用海表温度距平表示的印度洋 Dipole 和太平洋的 ENSO 是有联系的。巢纪平和袁绍宇<sup>[12]</sup>分析了两大洋次表层的海温距平和纬向风的关系后认为 Dipole 和 EN-

SO 是有联系的。这里用资料进一步分析它们的联系。

图 6a(彩图)是赤道东太平洋(4°N~4°S, 90°~150°W)次表层海温和两大洋 MSTA 面上海温距平的同期相关系数的分布, 可以看到与西太平洋暖池的海温呈负相关(信度 99.9% 的相关系数值为 0.1), 这是 El Niño 形势, 而在印度洋与东部呈负相关, 与西部呈正相关, 后者是 Dipole 形势, 这表明 El Niño 和 Dipole 两者的发展, 在海洋 MSTA 曲面上

的海温距平有着明显的联系。图 6b(彩图)是西印度洋上述指标区中次表层海温距平与 MSTA 面上热带两大洋海温距平同期相关,可以看到它和东印度洋的海温是负相关,这是印度洋的 Dipole,与西太平洋的海温是负相关(相关系数超过  $-0.2$ ),与东太平洋是正相关(相关系数超过  $0.2$ ),这表明,就统计上看(不是哪一个别年份),Dipole 和 El Niño 两者的发

展在 MSTA 曲面的海温距平上有着明显的相关联系。

文献[12]指出,联系 El Niño 和 Dipole 发展的纽带是热带太平洋和印度洋那一对相互依存的 Walker 环流的变化,本文在这里作进一步分析。对于 Walker 环流的演变可用垂直运动来表示,而垂直运动可以通过与风的辐合、辐散相联系的速度势来计算。

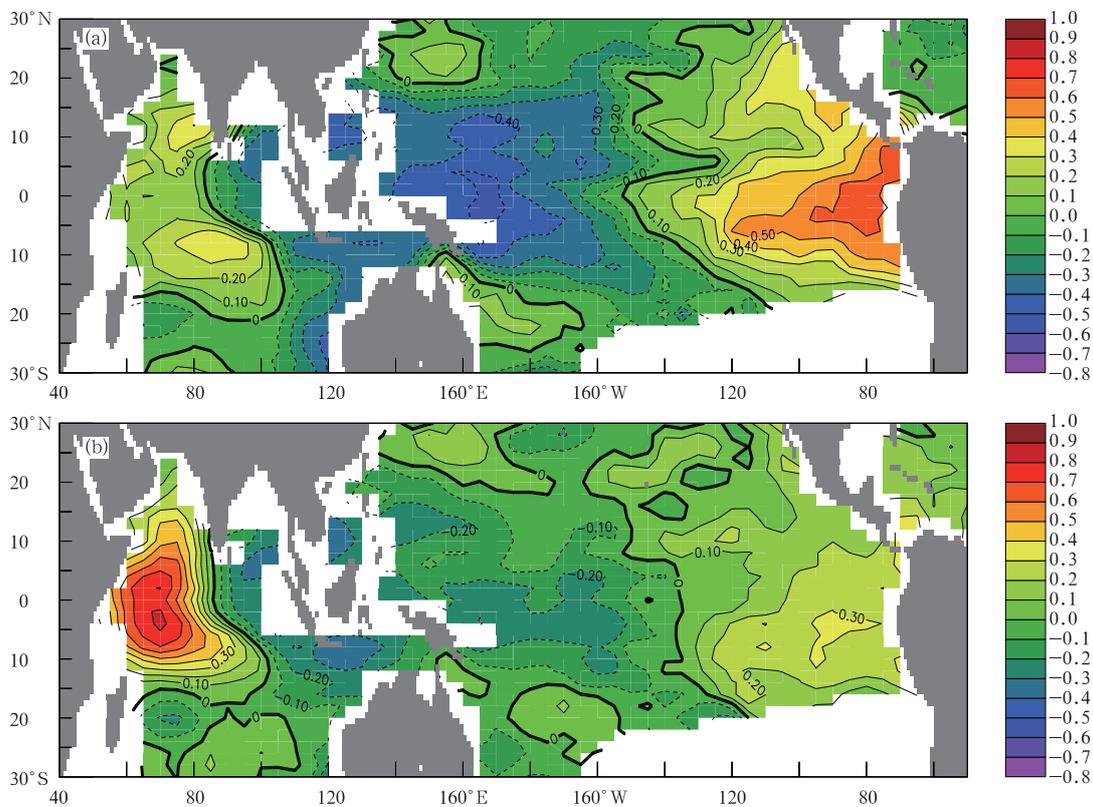


图 6 东太平洋(a)和西印度洋(b)次表层海温距平分别与两大洋 MSTA 面上海温距平的相关系数

Fig. 6 The correlation coefficient between sub-surface sea-temperature anomaly and sea-temperature anomaly on MSTA  
(a. eastern Pacific, b. western Pacific)

图 7(彩图)是西印度洋指标区 MSTA 曲面上的海温距平与热带上空两大洋速度势的相关系数分布。由这一相关系数场的分布容易推断出当西印度洋次表层温度是正(负)距平时,在中、西印度洋是距平意义下的上升(下沉)气流,从印度洋中部到太平洋中部是大范围的下沉(上升)气流,而在东太平洋是上升(下沉)气流,从而在低空将有距平东(西)风从西太平洋—东印度洋吹向西(东)印度洋,距平西(东)风从西、中太平洋吹向东(西)太平洋。这反映了跨越印度洋和太平洋两个纬圈环流(在太平洋即为 Walker 环流)在西印度洋次表层海温出现异常时的结构。

图 8(彩图)是东太平洋 MSTA 曲面上的海温距平和距平速度势的相关系数分布。显然,相关系数场的分布形势基本同图 7,因此上升和下沉气流的分布基本上也是一样的。

这两张图一方面反映了印度洋和太平洋海气相互作用的形势,进而也表明这种海气相互作用形势的发展,在统计意义上,两大洋的海气相互作用事件是有关系的。

前面关于海温距平和低空纬向风的相关分析表明,最大的相关系数出现在风场超前海温,因此可以认为热带两大洋纬圈环流的耦合变化制约并联

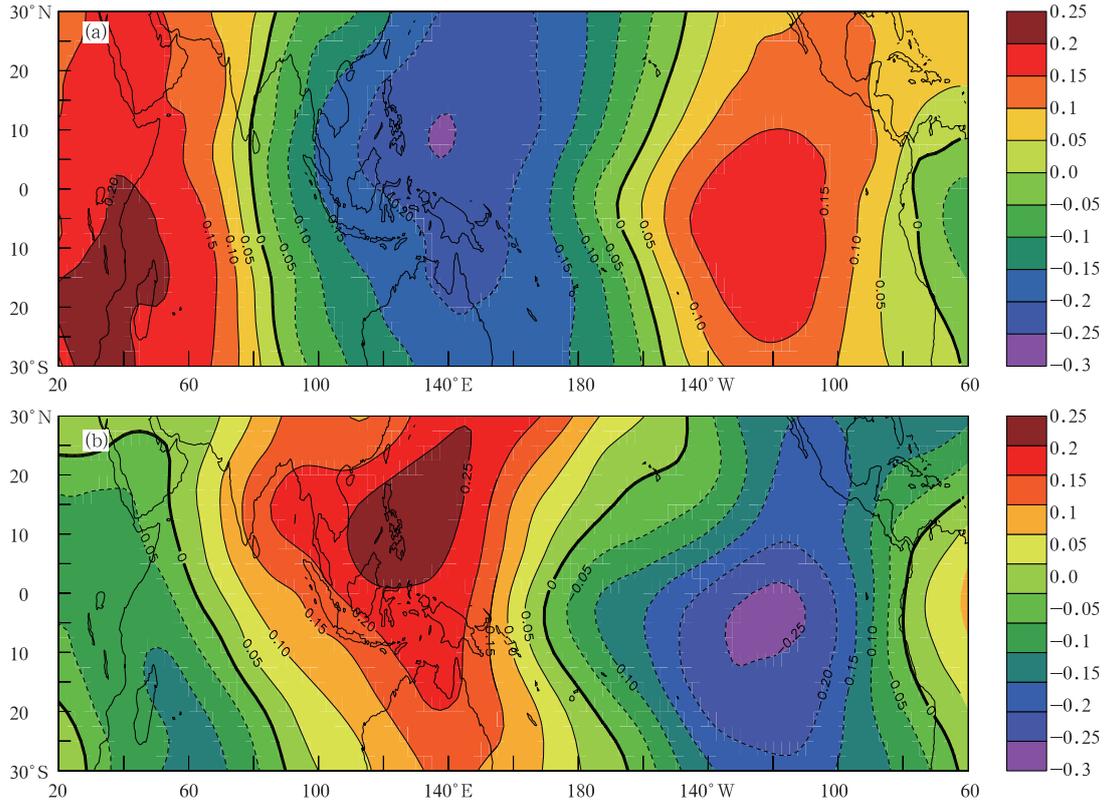


图7 西印度洋 MSTa 曲面上的海温距平分别和 200 hPa(a),850 hPa(b)速度势的相关系数

Fig.7 The correlation coefficient between sea-temperature anomaly on MSTa in western Indian Ocean and 200 hPa (a), 850 hPa (b) velocity potential

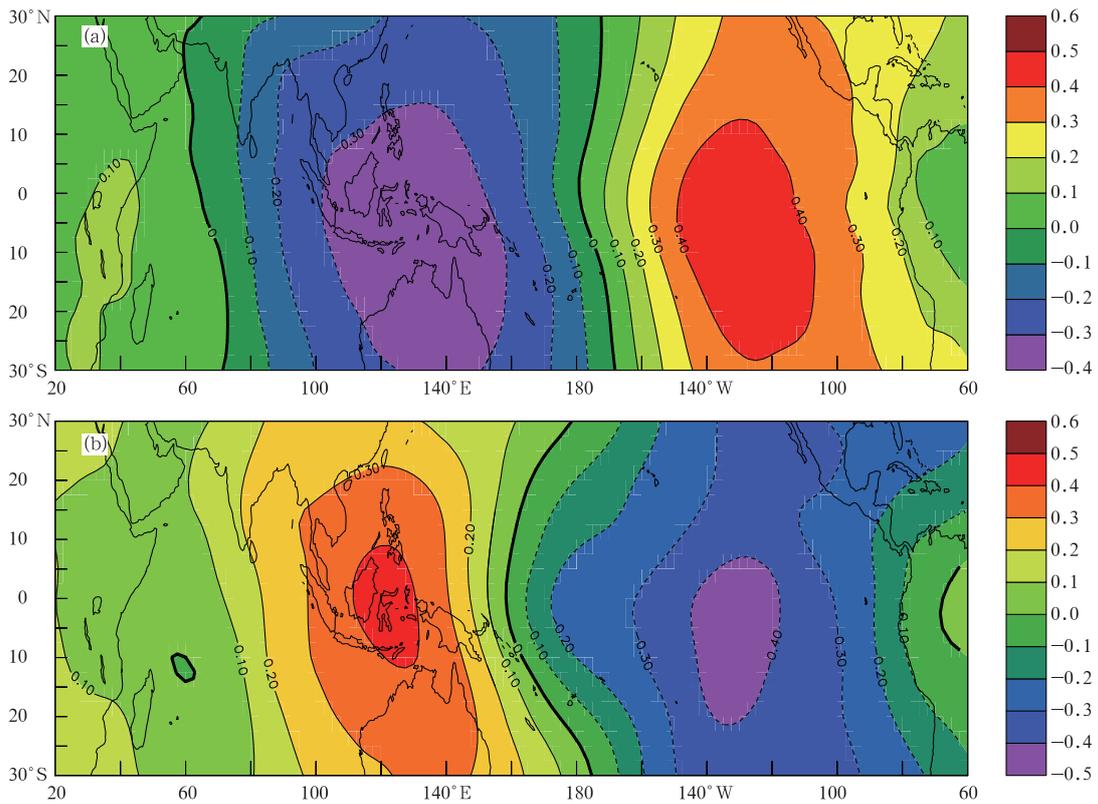


图8 东太平洋 MSTa 曲面上的海温距平分别和 200 hPa(a),850 hPa(b)速度势的相关系数

Fig.8 The correlation coefficient between sea-temperature anomaly on MSTa in eastern Pacific Ocean and 200 hPa (a), 850 hPa (b) velocity potential

系着两大洋海温距平的变化。

## 6 结 论

最近一系列的资料分析表明,应用最大海温距平曲面(其深度在热带太平洋接近以 20 °C 为参考的温跃层深度)上的次表层海温距平能更好地分析 El Niño 和 Dipole 的发展,分析表明,印度洋的 Dipole 事件,在多数情况下不是独立的,它们和 ENSO 的发展有着紧密的联系,联系它们发展的是两大洋上空的距平 Walker 环流的耦合变化。

## 参考文献

- [1] Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 1966, 18:820—829
- [2] Bjerknes J. Atmospheric teleconnection from the equatorial Pacific. *Mon Wea Rev*, 1969, 97:163—172
- [3] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variation in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/ El Nino. *Mon Wea Rev*, 1982, 110: 354—384
- [4] Wang Zongshan, Zou Emei, Tool J M, et al. Air sea interaction in tropical Western Pacific. Beijing. Chao Jiping, Young J Aed. In: Proc. US—PRC International TOGA Sym., Beijing; China Ocean Press, 1990. 15—26
- [5] 李崇银,穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常. *大气科学*, 1999, 23:513~526  
Li Chongyin, Mu Mingquan. The occurrence of the El Niño event and the subsurface temperature anomaly of warm pool in the equatorial western Pacific Chinese. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 1999, 23: 513—526
- [6] Saji N H, Goswami B N, Viayachandrom P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, 401: 360—363
- [7] 巢清尘,巢纪平. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响. *自然科学进展*, 2001, 11:1293~1300  
Chao Qingchen, Chao Jiping. The influence of western tropical Pacific and eastern Indian Ocean on the development of ENSO event. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 2001, 11(12): 1293—1300
- [8] Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Chao Qingchen, et al. A data analysis study on the evolution of the El Nino/ La Nina cycle. *Adv Atmos Sci*, 2003, 19: 837—844
- [9] 巢纪平,袁绍宇,蔡怡. 热带印度洋的大尺度海气相互作用事件. *气象学报*, 2003, 61:251~256  
Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Cai Yi. Large-scale air-sea interaction in the tropical Indian Ocean. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 2003, 61:251—256
- [10] Webster PT, Moore A M, Loschnig J P, et al. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian ocean during 1997—98. *Nature*, 1999, 401: 337—339
- [11] 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. *大气科学*, 2001, 25:433~443  
Li Chongyin, Mu Mingquan. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 2001, 25:433—443
- [12] 巢纪平,袁绍宇. 热带太平洋和印度洋海气相互作用事件的相互联系. *自然科学进展*, 2003, 13(12):1280~1285  
Chao Jiping, Yuan Shaoyu. Relationship of air-sea interaction in the tropical Pacific and Indian Ocean. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 2003: 13(12):1280—1285

## THE ENSO EVENTS IN THE TROPICAL PACIFIC AND DIPOLE EVENTS IN THE INDIAN OCEAN

Chao Jiping

(*National Marine Environment Forecast Center, Beijing 100081; The First Institute Oceanography, SOA, Qingdao 266061*)

Chao Qingchen

(*National Climate Center, Beijing 100081*)

Liu Lin

(*The First Institute Oceanography, SOA, Qingdao 266061; Ocean University of Qingdao, Qingdao 266003*)

### Abstract

A curved surface (close to that of the thermocline as defined by 20 °C) of climatically maximum sea-temperature anomaly was created at the subsurface of the tropical Pacific and Indian Ocean, based on which the evolving sea-temperature anomaly at this curved surface from 1960 to 2000 was statistically analyzed. It is noted that the evolving sea temperature anomaly at this curved surface can be better analyzed than the evolving sea surface one. For example, during the ENSO event in the tropical Pacific, the sea-temperature anomaly signals propagate counter-clockwise within the range of 10 degree north and south latitudes along the equator, and while moving, the signals change in intensity or even type. If Dipole is used in the tropical Indian Ocean, for analyzing the curved surface of maximum sea-temperature anomaly, the sea-temperature anomalies of the eastern and western Indian Ocean would be negatively correlated in statistical sense (Dipole in real physical sense), which is unlike the sea surface temperature anomaly based analysis that demonstrates that the inter-annual positive and negative changes only occur on the gradients of the western and eastern temperature anomalies. A further analysis shows that the development of ENSO and Dipole has a time lag features statistically, with the sea-temperature anomaly in the eastern equatorial Pacific changing earlier (by three months or so). And the linkage between these two changes is a pair of coupled evolving Walker circulations that move reversely in the equatorial Pacific and Indian oceans.

**Key words:** Curved surface of maximum sea-temperature anomaly, ENSO, Dipole, Coupled evolving of Walker circulations.