

# 热带印度洋海温异常与 ENSO 关系的进一步研究<sup>\*</sup>

蔡 怡<sup>1</sup> 李 海<sup>1</sup> 张人禾<sup>2</sup>  
CAI Yi<sup>1</sup> LI Hai<sup>1</sup> ZHANG Renhe<sup>2</sup>

1. 国家海洋环境预报中心, 北京, 100081

2. 中国气象科学研究院, 北京, 100081

1. National Research Center for Marine Environmental Forecasting, Beijing 100081, China

2. Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

2005-11-23 收稿, 2006-05-18 改回.

**Cai Yi, Li Hai, Zhang Renhe. 2008. A study on relationship between ENSO and tropical Indian Ocean temperature. Acta Meteorologica Sinica, 66(1): 120–124**

**Abstract** The relationship between ENSO and Indian Ocean Dipole was discussed by using the data set of sea temperature from Scripps Institute of Oceanography, the air temperature at 1000 hPa from the NCEP reanalysis data and the Nino3 index from the Climate Prediction Center (CPC) of U. S. A. during the period from 1955 to 2001. The results show that there exists a Dipole on the maximum temperature anomalous level (MTAL) in the Indian Ocean, which close relates to ENSO in the Pacific Ocean. During El Niño periods there are good relationships between ENSO and Indian Ocean Dipole with the maximum correlation occurring when the ENSO leads by one month, but in La Nina periods the relationship is not so good. The distribution of Dipole in Indian Ocean is from northeast to southwest, with one (west) pole in 65°–75°E, 6°–10°S and the other in 85°–95°E, 2°–6°N, which is different from that defined by Saij. The correlation coefficients of Nino3 index with temperature anomalies in the west/east poles on the MTAL are over 0.4/–0.15, respectively. It is a main sea temperature system in the tropical Indian Ocean. However, in the surface layer from sea surface to 20–30 m depth there is no such a dipole with opposite sea temperature anomalies in the NE and SW of tropical Indian Ocean. The SSTa in the NE might be influenced by the sensible exchange process because the evolution of sea and 1000 hPa air temperature anomaly time series of the NE of tropical Indian Ocean is quite similar except 1962–1963 and 1986. The periods of the Indian Ocean Dipole are shorter than that of ENSO, and about 1 to 6-year.

**Key words** Pacific Ocean ENSO, Indian Ocean Dipole, Vertical maximal temperature anomalous level, EOF analysis

**摘 要** 用 1955 年 1 月—2001 年 12 月美国 Scripps 海洋研究所的海温再分析资料、美国 NCEP 再分析资料和美国气候预测中心(CPC)资料,讨论了热带太平洋 ENSO 与热带印度洋海温距平以及与印度洋偶极子(Dipole)的关系,研究结果发现:在垂直最大温度距平曲面(MTAL)上,热带印度洋海温距平分布存在着与热带太平洋 ENSO 密切相关的 Dipole 现象,其中最大的相关在太平洋 ENSO 超前印度洋 Dipole 一个月。但是,热带印度洋 Dipole 的分布与 Saij 定义的位置略有不同,为东北西南向,它们分别在 6°–10°S、65°–75°E(西印度洋)和 2°–6°N、85°–95°E(东印度洋),它是赤道印度洋的一个主要海温距平系统。另外,在热带印度洋东北部与 ENSO 相关的海温距平是一个上下不一致的系统,该海温距平并没有伸展到海面,从海面到 20–50 m 的浅薄水层,则为与赤道西南印度洋相同符号的海温距平分布。因此,在海面,海温距平不存在与 ENSO 有关的 Dipole 现象,赤道印度洋 Dipole 只存在于次表层以下,这是赤道印度洋 Dipole 与 ENSO 不同之处。这种赤道东北印度洋表层与赤道西南印度洋表层同符号的海温距平现象,有可能是海气热力过程如感热过程造成的。热带印度洋 Dipole 的周期要小于 El Niño,一般为 1–6 a。

**关键词** 太平洋 ENSO, 印度洋 Dipole, 海洋垂直最大海温距平曲面(MTAL), EOF 分析

**中图法分类号** P47

<sup>\*</sup> 资助课题:国家重点自然科学基金项目(40231012)和国家自然科学基金项目(40276002)。

作者简介:蔡怡,主要研究全球增暖和 El Niño 海气相互作用及海气耦合数值模式。E-mail: caiyi@nmefc.gov.cn

## 1 引言

自 Saij 等(1999)第 1 次提出热带印度洋海面温度距平(SSTA)的偶极子(Dipole)概念以来,关于印度洋偶极子的研究引起了人们极大的兴趣,Saij (1999),Webster 等(1999)认为它是独立于 ENSO 的一种热带印度洋海气相互作用现象,事实上从偶极子指数与 ENSO 指数的相关来看关系并不好,巢纪平(2003),蔡怡等(2005)用印度洋上层垂直最大温度距平曲面(MTAL)上的海温距平演变研究,认为它与 ENSO 是密切相关的,李崇银等(2001)认为在印度洋不但存在着 Dipole 现象而且与 ENSO 有很好的负相关,它们的联系主要是赤道大气纬向(Walker)环流,而钱海峰等(2003)认为在表层 80 m 以下,Dipole 表现得比较明显,并且与 ENSO 是密切相关的,Stefan Hastenrath(2003)则认为在印度洋根本不存在 Dipole,因为所谓 Dipole 应该是一正一负类似“跷跷板”的现象,但是在赤道印度洋海面东西两端的 SSTA 是正相关的,它只是两个相同符号的 SSTA 的相对差而已,因此,到目前为止,关于印度洋是不是存在 Dipole, Dipole 与 ENSO 的关系,仍然是众说纷纭。以上提到的关于 Dipole 与 ENSO 关系的工作,都是从已经定义的热带印度洋海面 Dipole 出发来讨论印度洋 Dipole 与 ENSO 的关系,这里我们抛开印度洋 Dipole,从 ENSO 出发,来讨论 ENSO 与印度洋海温距平以及印度洋 Dipole 的关系。

## 2 资料来源

分析所用的海温资料来自美国 Scripps 海洋研究所 1955 年 1 月—2001 年 12 月共 564 个月的海温再分析月平均资料,深度为 0—400 m,分为 11 层,它们的垂直深度分别是 0、20、40、60、80、120、160、200、240、300、400 m,水平范围为 20°S—20°N、40°—120°E,水平网格距是 5°×2°。El Niño 用赤道太平洋 Nino3 区的 SSTA 来定义,资料来源为美国气候预测中心(CPC)(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/>)。1000 hPa 的气温来自美国 NCEP 再分析资料,时间是 1960—1999 年月平均,

水平网格距是 2.5°×2.5°。本文所用到的以上这些资料,都是讨论气候平均意义下的距平,为此,首先对资料作气候平均,然后,用原始资料减去气候平均,得到气候平均的距平,下面都是对距平进行讨论。

## 3 资料分析

首先,为了讨论 ENSO 与印度洋海温的关系,用 Nino3 区的 SSTA 与印度洋在垂直最大温度距平曲面上(MTAL)的海温距平作相关(图 1a),所谓 MTAL 是首先在三维空间温度场中,挑选垂直方向最大海温距平,得到每月垂直最大海温距平的水平曲面,然后将各月垂直最大海温距平曲面的高度进行平均,得到气候意义的垂直最大海温距平曲面,在该曲面上讨论海温距平,巢纪平等(2001,2005)曾经证明该曲面相当于海洋上层的斜温层,能较好地反映海洋上层的特征。从图 1a 中可以看到,太平洋的 ENSO 与印度洋 MTAL 上的海温距平有很明显的相关,最大的正相关在赤道以南大约 6°—10°S、65°—75°E(西印度洋)范围内,相关系数超过 0.4,而在赤道东印度洋沿岸 2°—6°N、85°—95°E(东印度洋)范围内,则有负的相关中心,相关系数超过 -0.15,从该图上可以看到,在 MTAL 上,与 ENSO 关系密切的海温距平分布确实存在着类似“跷跷板”的 Dipole 现象,但是它的位置与 Saij 定义的 Dipole 位置略有区别,它是东北西南向分布,本文称它为 MTAL 上的 Dipole,简称 Dipole,我们将上述定义的西南印度洋海温距平减去东北印度洋的海温距平,作为 Dipole 指数,然后与 Nino3 区的 SSTA 作相关,其中最大的相关在 ENSO 超前印度洋 Dipole 一个月,得到相关系数为 0.46(图 1b),从图中可以看到,对于 El Niño 年份,Dipole 都有非常好的对应关系,除了 1994 年那次以外,每次 El Niño 都对应了一次印度洋的 Dipole 过程,但是反之不然,对于 La Nina 年份,它们之间并没有那么好的对应关系,由此可以知道,在 MTAL 上的 Dipole 特别是负位相事件,并不是完全由太平洋 ENSO 引起,它还与印度洋本身的海气相互作用有关。从功率谱的分析可以知道,印度洋 Dipole 的周期要小于 El Niño,一

一般为 1—6 a。从上述的分析可以得出在印度洋 MTAL 上沿着赤道的东北西南方向,确实存在类似于“跷跷板”的 Dipole 现象,而且该现象与 ENSO 有非常好的相关,其中最大的相关在太平洋 ENSO 超前印度洋 Dipole 一个月。

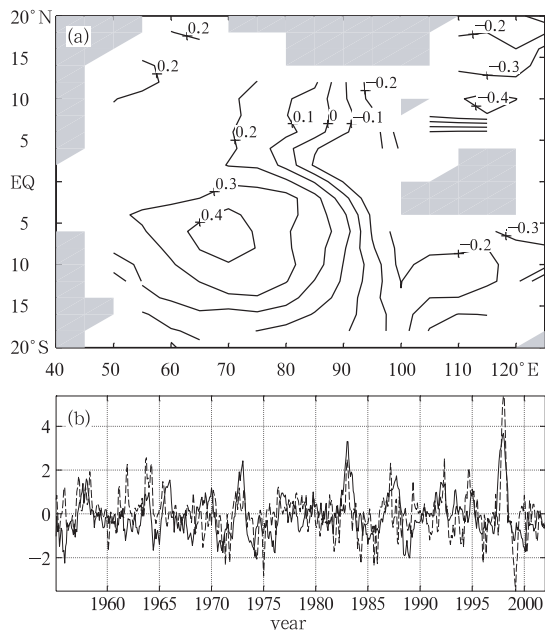


图 1 (a) Nino3 区的 SSTA 与印度洋 MTAL 上海温距平相关分布, (b) MTAL 上 Dipole 指数 (虚线) 与 Nino3 区 SSTA (实线)

Fig. 1 (a) Distribution of correlations between SSTA in Nino3 and temperature anomalies at the maximal anomalous temperature level (MTAL); and (b) Temporal evolution of dipole index at the MTAL (dashed line) and SSTA in Nino3 (solid line)

同样,为了讨论 ENSO 与印度洋海面 SSTA 的关系,我们用 Nino3 区的 SSTA 与印度洋海面海温距平作相关(图 2),从图 2 可以看到,并不存在类似 MTAL 上海温相关系数那样的 Dipole 分布,而是整个印度洋为一致的正相关,两个最大的相关中心分别在东北印度洋和西南印度洋,与 MTAL 上的 Dipole 位置(图 1a)基本上一致,但是不同的是在 MTAL 上东北印度洋与 ENSO 的负相关中心,这里变成了正的相关中心,且相关系数大于 0.35,由此我们可以知道,在印度洋西南部与 ENSO 正相关的海温距平是印度洋上层比较深厚的系统,而在印度洋东北部与 ENSO 相关的海温距平则是一个上下

不一致的系统,这也就是为什么目前大家争论的一个问题,在印度洋是否存在 Dipole,且印度洋 Dipole 是否与 ENSO 有关,从图 2 可以看到,根据 Stefan Hastenrath<sup>[8]</sup>的观点,至少在印度洋海面的 SSTA 不存在与 ENSO 有关的 Dipole。

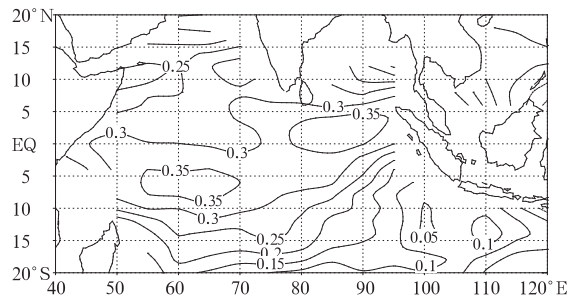


图 2 Nino3 区的 SSTA 与印度洋海面海温距平相关分布

Fig. 2 Distribution of correlations between SSTA in Nino3 and SSTAs in the Indian Ocean

那么在印度洋东北部与 ENSO 相关的中心和整个赤道印度洋在垂直方向上海温距平究竟是怎样分布的,为此我们沿着 2°S—2°N 作经向平均,得到纬向垂直剖面,并且在该剖面上作海温距平 EOF 分析,图 3a 是垂直纬向剖面海温距平 EOF 分析第一特征向量,图 3b 是第一特征向量的时间系数和 Nino3 区的 SSTA,其中 EOF 分析第一主分量占了总量的 24%,这里为了使时间系数和 Nino3 区的 SSTA 有可比性,已经对它们作了标准化处理。从图 3 可以看到,在赤道印度洋,第一特征向量的时间系数与 Nino3 区的 SSTA 有非常好的相关,同期的相关系数最大,为 0.504。从图 3a 可以看到,在印度洋沿着赤道在垂直方向主要的海温距平分布与太平洋相似,东西方向分别为暖、冷中心,西印度洋为从海面到接近 200 m 一致的暖中心,而东印度洋的冷中心则在 20—50 m 以下,结合图 1a 和图 2 可以知道,在赤道东印度洋海面与 ENSO 相关的正距平中心,实际是一个只有从海面到 20—50 m 的非常浅薄系统,而在整个赤道印度洋,主要的系统还是与 ENSO 相关的东西印度洋类似于“跷跷板”的 Dipole,这也就是印度洋 Dipole 与太平洋 ENSO 一个很大的区别,我们认为在东印度洋从表面到 20—50 m 这种如此浅薄的系统,有可能是局地的海气热力过程造成的,为此,再一次用 Nino3 区的 SS-

TA 与印度洋上空 1000 hPa 的气温距平作相关(图 4),从图 4 可以看到,在赤道东北印度洋上空,有一个大于 0.3 的正相关中心,它位于赤道东印度洋海面温度距平的相关中心(图 2)附近,我们分别作东印度洋海面温度距平中心平均(0°—6°N, 80°—90°E)和 1000 hPa 的气温距平中心平均(5°—10°N, 77.5°—85°E)的时间序列(图 5),对于图 5 中的两条曲线已作了标准化处理,从图 5 可以看到,除了 20 世纪 60 年代初期和 1986 年以外,在其他年份它们有非常一致的变化趋势,这从一个方面也证实了我们的推测。

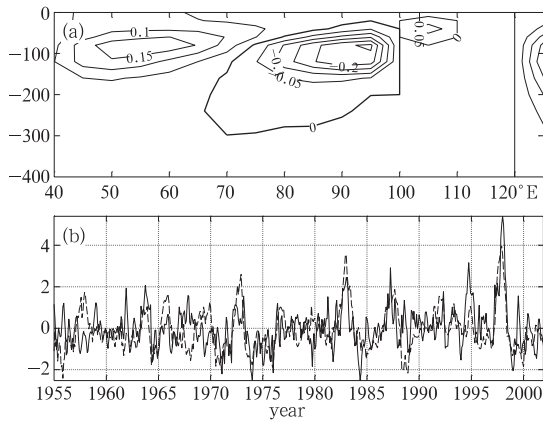


图 3 赤道区域(2°S—2°N 经向平均) 垂直剖面海温距平 EOF 分析  
(a. EOF 分析第 1 特征向量, b. 第 1 特征向量的时间系数(虚线)和 Nino3 区的 SSTA(实线))  
Fig. 3 EOF analysis of the temperature anomaly of longitude-depth section along the Equator (the mean over 2°S—2°N): (a) the first mode eigenvector; and (b) the first mode time serial (dashed line) and SSTA in Nino3 (solid line)

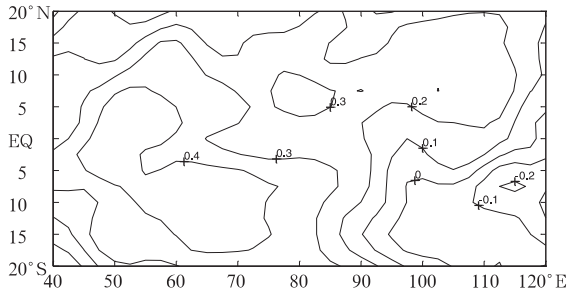


图 4 Nino3 区的 SSTA 与印度洋上空 1000 hPa 气温距平相关系数分布  
Fig. 4 Distribution of correlations between SSTA in Nino3 and Indian Ocean air temperature anomaly at 1000 hPa

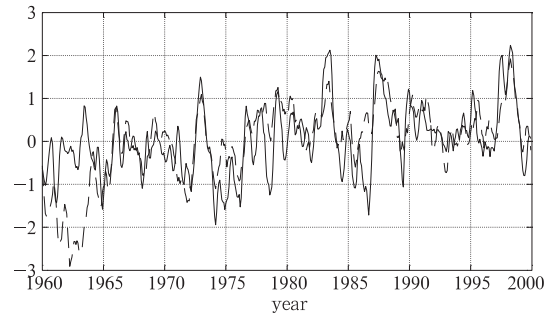


图 5 平均赤道东印度洋海面温度距平中心(0°—6°N, 80°—90°E; 实线)和 1000 hPa 的气温距平中心(5°—10°N, 77.5°—85°E; 虚线)  
Fig. 5 Temporal evolution of mean sea surface temperature anomalies(0°—6°N, 80°—90°E) in the equatorial east Indian Ocean (dashed line) and mean air temperature anomalies (5°—10°N, 77.5°—85°E) at 1000 hPa (solid line) in 1960—2000

#### 4 结 论

通过对印度洋大气和海洋的各种资料分析,发现在印度洋的 MTAL 上海温距平分布存在着与 ENSO 密切相关的 Dipole 现象,它们的分布与 Saij 定义的位置略有不同,为东北西南向,它是赤道印度洋的一个主要系统,但是与 ENSO 不同的是在赤道东印度洋,该海温距平并没有伸展到海面,从海面到 20—50 m 的浅薄水层,则为与赤道西南印度洋相同符号的海温距平分布,因此在海面,不存在与 ENSO 有关的 Dipole 现象。赤道东印度洋表层与赤道西南印度洋同符号的海温距平有可能是海气热力过程如感热过程造成的。

#### References

Cai Yi, Zhang Jianhua, Yu Weidong. 2005. An analysis of temperature anomaly in 0-400m layer of equatorial Indian and Pacific oceans. *Journal of Tropical Oceanography* (in Chinese), 24(4): 60-66

Chao Jiping, Chao Qingchen Liu Lin. 2005. The ENSO events in the tropical Pacific and Dipole events in the Indian ocean. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 63(5):594-602

Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Cai Yi. 2003. Large-scale air-sea interaction in the tropical Indian ocean. *ACTA Meteor Sinica* (in Chinese), 61(2):251-256

Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. The tropical western Pacific and eastern Indian ocean impacts on ENSO. *Progress in Natural Science* (in Chinese), 11:1293-1300

- Li Chongyin, Mu Mingquan, Pan Jing. 2001. The dipole in the equatorial Indian ocean and anomalous temperature in the Pacific ocean. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 46(20):1747-1751
- Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The dipole in the Equatorial Indian ocean and its impacts on climate. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25(4):433-443
- Qian Haifeng, Yin Yonghong, Ni Yunqi. 2003. Tropical Indian ocean subsurface dipole mode and diagnostic analysis of Dipole event in 1997/1998 Quarterly. Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 14(2):129-139
- Saji H N, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. Nature, 401: 360-363
- Stefan Hastenrath. 2002. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. Bull Amer Meteor Soc, 83(5):735-738
- Tan Yanke, Zhang Renhe, He Jinhai, et al. 2004. Relationship of the interannual variations sea surface temperature in tropical Indian ocean to ENSO. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 62(6): 831-840
- Webster P J, Moore A, Loschnigg J, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean. Nature, 401:356-360

### 附中文参考文献

- 蔡怡, 张建华, 于卫东. 2005. 赤道太平洋-印度洋海洋上层海温分析. 热带海洋学报, 24(4): 60-66
- 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(05):594-602
- 巢纪平, 袁绍宇, 蔡怡. 2003. 热带印度洋的大尺度海气相互作用事件. 气象学报, 61(2): 251-256
- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 ENSO 发展的影响. 自然科学进展, 11:1293-1300
- 李崇银, 穆明权, 潘静. 2001. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常. 科学通报, 46(20): 1747-1751
- 李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响. 大气科学, 25(4): 433-443
- 钱海峰, 殷永红, 倪允琪. 2003. 热带印度洋次表层偶极子模态及其 1997/1998 年过程诊断分析. 应用气象学报, 14(2):129-139
- 谭言科, 张人禾, 何金海等. 2004. 热带印度洋海温的年际变化与 ENSO. 气象学报, 62(6):831-840