

# 近 50 年热带印度洋海温 距平场的时空特征分析

晏红明 肖子牛

(云南省气象台, 昆明 650034)

谢应齐

(云南大学地球科学系, 昆明 650091)

**摘 要** 选取印度洋 48 年的海表温度距平资料, 采用经验正交函数法, 对热带印度洋的年季平均海表温度距平场的时空分布特征进行了研究。结果表明, 印度洋海表温度多年的年季平均距平的空间分布主要表现为三种定常类型: (1) 全区一致型; (2) 东西差异型; (3) 南北差异型。研究还表明, 印度洋 48 年的海表温度变化相对于较大时间尺度的演变来说, 主要特征是由冷到暖的年代际变化, 50~60 年代为偏冷期, 70 年代为冷暖交替的过渡期, 80~90 年代为偏暖期; 次主要特征反映了印度洋海温东西热力场的异常年际变化, 平均海温距平场第二特征向量的时间系数变化同 ENSO 有较密切的关系, 大(小)的时间系数对应 La Niña (El Niño) 事件。

**关键词:** 印度洋; 海表温度距平; 经验正交函数法; 时空特征

## 1 引言

在诸多影响气候变化的因子中, 海温异常在大气环流异常中担负着重要角色, 尤其是 ENSO 和反 ENSO 现象出现时的海温异常, 是影响全球气候异常变化中的最强信号。早在 60 年代, Bjerknes 就提出了 El Niño 和南方涛动的现象。此后, 针对海温异常对大气的影响和海气相互作用的问题, 人们做了大量的研究工作。研究表明, 在热带海域除 ENSO 事件外, 西太平洋暖池、印度洋海温也存在明显的年际异常变化, 而且这种海温的异常变化对大气环流异常和天气气候的异常有重要影响。赤道东太平洋的海温异常主要通过二维 Rossby 波列向中高纬度传播<sup>[1~3]</sup>, 引起大气环流的异常变化, 其中最典型的环流异常为北半球中高纬度地区的 PNA 波列。最近的数值模拟也发现<sup>[4]</sup>, 热带印度洋海温的异常变化在中高纬度地区同样能激起类似 PNA 型的冬季遥相关波列和夏季遥相关型波列, 对我国的气候异常有显著影响, 特别是对西南和长江中下游地区的夏季降水异常影响显著。因此, 印度洋海温的异常变化对我国气候异常的影响是不容忽视的, 研究印度洋海表温度的时空变化特征对我国的长期天气预报和气候预测有重要的理论意义和实用价值。

近年来, 人们对海温的异常变化做了一系列研究工作, 研究结果表明, 全球的海温变化既各有特点又有相互联系, 随着赤道太平洋的海温发生异常变化, 全球的其他海域

1998-12-14 收到, 1999-02-23 收到修改稿

\* 本研究得到国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害的机理和预测理论研究”和云南省气象局青年研究基金 YQ9904 课题的共同资助

表面温度也有异常的变化,何有海等<sup>[5]</sup>的研究发现,南海南部的海表温度明显增高的开始时间比赤道东太平洋落后半年左右。陈烈庭等<sup>[6~8]</sup>的研究表明,西印度洋的海温不仅有明显的年际变化,而且与东赤道太平洋的海温有密切的正相关关系。印度洋处于季风区,同太平洋比较,因受季风的影响,在季风水向转向的海区,海温的年较差和年际变化都很大。在平均状况下,北印度洋海温分布为东暖西冷,夏季,随着西南季风的建立,阿拉伯海、孟加拉湾和南洋流流向反向,使东暖西冷的热力差异更为明显。分析表明,热带印度洋海温距平的纬向分布基本存在 El Niño 和 La Niña 两种主要类型,虽然印度洋的海温距平没有赤道东太平洋大,但其纬向热力对比与太平洋具有同等量级。因此,热带印度洋地区海洋的纬向热力对比对季风环流的年际变化有非常重要的作用。印度洋的海温是影响气候异常的一个重要因素。人们曾用经验正交函数(EOF)法研究太平洋海温的分布型,发现其第一特征向量就是反映了 ENSO 循环的基本特征。张勤等<sup>[9]</sup>研究了 90 年代热带太平洋海温距平的变化,发现 EOF 第二特征向量反映了 1991~1995 年的 ENSO 循环。但目前对印度洋海温的研究工作还较少,研究印度洋海温的时空分布特征对了解海温的演变规律,进而对气候变化预测有重要意义。本文主要研究分析了近 50 年印度洋海温的时空分布特征。

## 2 分析方法和资料

EOF 方法<sup>[10]</sup>是近代气象学中常用的气象要素场的分析方法,它将气象要素场分解为特征向量和时间系数两部分,特征向量反映场的空间分布特征,不随时间变化;时间系数(主要分量)描述场的变化规律,EOF 方法可将要素场的主要特征浓缩在前几个特征向量和时间系数上,用 EOF 方法将资料阵 $\{X_{ij}\}$ ( $i$ 为年代序号, $j$ 为空间点序号)展开为空间向量  $V$  和时间系数  $T$  的乘积:

$$X = V \times T$$

其中,  $V$  为  $174 \times 174$  的空间向量阵,  $T$  为  $174 \times 48$  的时间系数阵。

资料选用《国家“九五”重中之重科技项目“短期气候预测业务系统的研究”96-908-04-08 专题气候资料集〈一〉》的海表温度距平资料,考虑到资料的完整性,本文只选用 1950~1997 年近 48 年  $30^{\circ}\text{E}$ 、 $30^{\circ}\text{S}$ ~ $30^{\circ}\text{N}$  范围内的印度洋海温距平资料,格距为  $5.0^{\circ} \times 5.0^{\circ}$ ,海温距平相对于 1961~1990 年平均而言。

## 3 热带印度洋海温距平场的空间分布特征

表 1 是各季印度洋海温距平前十个特征向量的累计方差贡献,可以看到,前十个特征向量的解释方差是 70%~80%,季第一特征向量的方差贡献占 30%左右,前四个特征向量即可以提取原场 50%以上的信息;年平均距平场由于平滑了一些季节变化特征,前几个特征向量的收敛速度较快,第一特征向量的解释方差就占总方差的 48%,前十个特征向量就提取了原场 84%的信息,年季平均距平的前几个特征向量场的分布特征即可反映印度洋海温距平多年的气候分布特征。

表 1 各季气温前十个主要分量累计方差贡献

| 特征向量 | 春季  | 夏季  | 秋季  | 冬季  | 年   |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1    | 29% | 28% | 30% | 26% | 48% |
| 2    | 40% | 40% | 39% | 35% | 59% |
| 3    | 48% | 47% | 47% | 44% | 64% |
| 4    | 53% | 54% | 54% | 50% | 69% |
| 5    | 58% | 60% | 58% | 54% | 72% |
| 6    | 61% | 64% | 62% | 58% | 75% |
| 7    | 64% | 67% | 65% | 61% | 78% |
| 8    | 67% | 70% | 67% | 64% | 80% |
| 9    | 70% | 72% | 70% | 67% | 82% |
| 10   | 72% | 74% | 72% | 69% | 84% |

### 3.1 季节分布特征

图 1 为 1950~1997 年春季 (3~5 月)、夏季 (6~8 月)、秋季 (9~11 月) 和冬季 (12~2 月) 印度洋海温距平前二个特征向量场, 占累计方差贡献的 40% 左右。分析图 1 可以看到, 各个季节第一特征向量场所反映的分布特征比较一致, 全区为正, 不同季节正值区的大小和范围有所差别, 夏季和秋季的值和范围比春季和冬季的大, 最大正值中心在南印度洋比北印度洋明显, 表明印度洋海温的变化虽

然比较一致, 但各个季节和海区的变化是有差异的, 夏季和秋季的海温变化比冬季和春季大, 南印度洋的海温变化比北印度洋明显。第二特征向量场占总方差的 10% 左右, 反映了各个季节海温距平的不同分布特征, 分析图 1 可以看到, 春季和夏季的第二特征向量场的分布比较一致, 反映了东西印度洋海温相反的变化趋势, 即东西向的海温差异, 南北半球热带印度洋海温变化的东西差异显著不同, 热带南印度洋的东西差异较显著, 热带北印度洋的东西差异较小, 零线由西北向东南倾斜, 最大正值中心和最大负值中心均位于南印度洋, 这种特征场的分布代表了夏季印度洋的海温分布特征; 在秋季, 第二特征向量场的分布与春季和夏季比较, 开始发生了一些变化, 赤道附近的印度洋东部开始出现负值区, 赤道印度洋中部的正值区开始向西和向南扩展, 与此相应, 南印度洋的负值区范围缩小, 表明在夏季风向冬季风的转换过程中, 热带印度洋的海温分布开始由夏季型差异向冬季型差异转变, 其海温的变化首先是从赤道附近的印度洋东部开始的, 从冬季第二特征向量场的分布可以清楚看到反映南北向海温差异的冬季型分布特征, 表明在冬季南北印度洋相反的海温变化。第三特征向量场 (图略) 春季和夏季为北负南正的南北差异, 秋季为东负西正的东西差异, 冬季为北正南负的南北差异, 和第二特征向量场的分布刚好是相反的。

以上分析表明, 印度洋海温变化的第一特征向量全区表现为一致的变化趋势, 因为我们所取海温距平是相对于 1961~1990 年平均而言的, 第一特征向量可能代表了海洋温度增暖的趋势, 它表明春夏秋冬四季印度洋海温都有增暖的趋势。值得注意的是, 南印度洋的海温变化比北印度洋明显。各个季节的海温变化是有差异的, 夏季风期间印度洋海温的变化主要以东西差异为主, 冬季风期间印度洋海温的变化主要以南北差异为主。从第二特征向量场所反映的不同季节印度洋东西、南北向差异的海温分布特征表明, 南亚冬夏季风虽然主要由不同季节海陆热力差异所引起, 但实际在海洋上还存在与这种的热力差异方向相同或相反的海洋内部的热力差异, 这一海洋内部的热力差异的异常变化, 通过海气耦合作用, 对于冬夏南亚季风的加强或减弱的影响是很大的。另外, 从春季所反映的海温距平场分布可以明显看到, 大气对海温变化的响应是滞后的, 南亚季风的爆发一般比东亚季风晚, 平均在 6 月上旬左右, 而从 3 月份开始, 印度洋海温的变化已完全由冬季型转为夏季型。

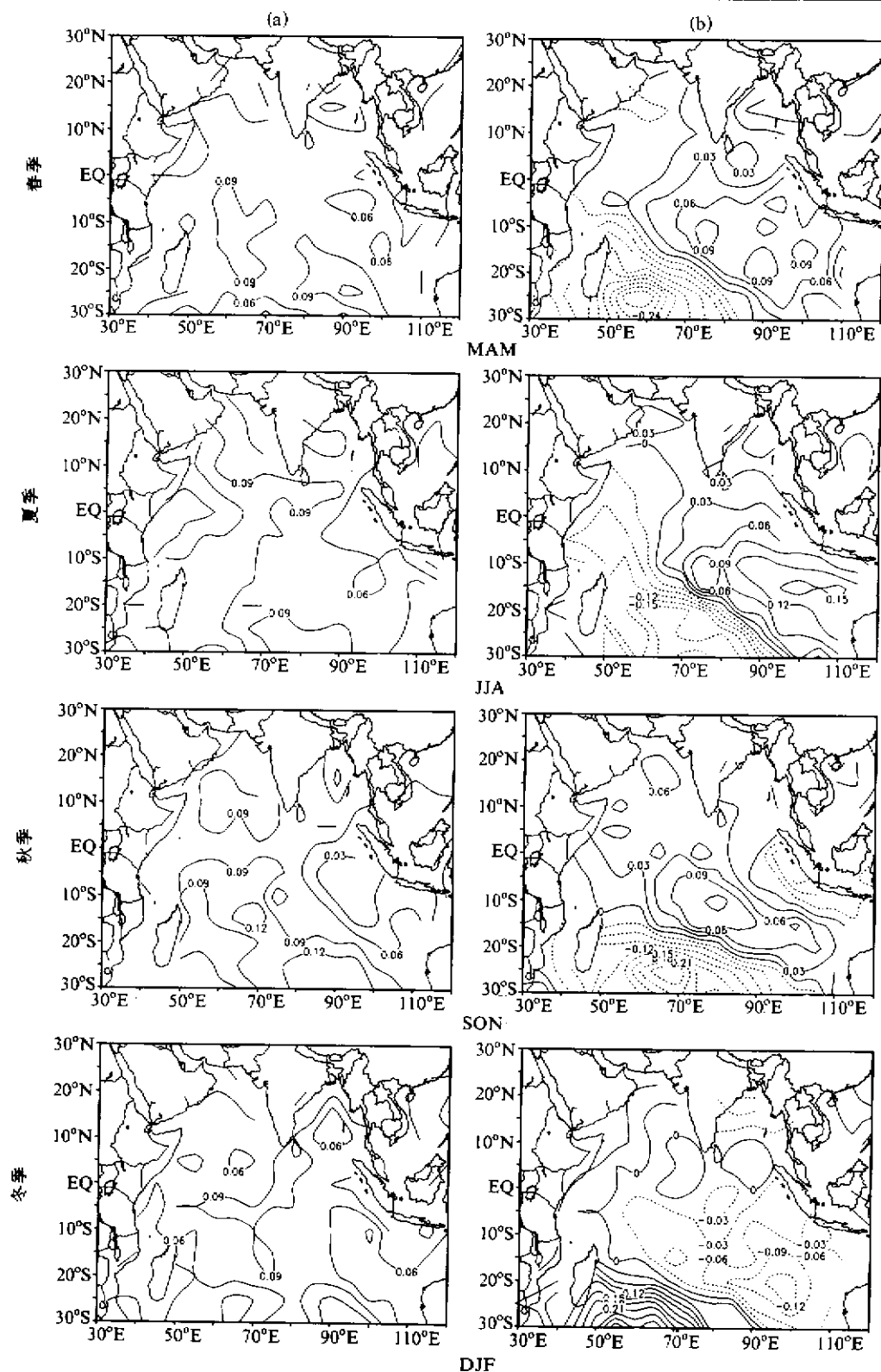


图1 1950~1997年各季印度洋海温距平的第一、二特征向量场

(a) 第一特征向量场; (b) 第二特征向量场

### 3.2 年平均分布特征

图 2 为 1950~1997 年印度洋海温距平场前四个占特征向量累计方差贡献 69% 的特征向量场, 可以看到, 第一特征向量场的分布比较一致, 全区为正, 几个最大值中心分散在不同的海区, 最大值中心位于  $5^{\circ}\text{S}$  附近的印度洋中部和  $30^{\circ}\text{S}$  附近的印度洋中部。后三个特征向量场所反映印度洋海温变化与第一特征向量场明显不同, 主要反映了不同海区海温的差异。第二特征向量场的分布与春季和夏季的第二特征向量场一致, 反映了夏季海温变化的东西差异; 第三特征向量场反映了冬季海温变化的南北差异,  $10^{\circ}\text{S}$  以南为正值区, 最大正值中心位于澳洲附近,  $10^{\circ}\text{S}$  以北为负值区, 最大负值中心位于赤道附近的印度洋东部。从第二、三特征向量场所占累计方差贡献的大小来看, 印度洋海温变化的东西差异比南北差异明显。第四特征向量场反映了印度洋中部海温变化和东西部海温变化的差异, 印度洋中部为负值区, 东部和西部为正值区, 这种特征向量场的方差贡献占总方差的 5%, 可能反映了一种海温异常变化的分布特征。

上述分析给出了占累计方差贡献较大的前几个特征向量场年季平均印度洋海温的主要特征, 给出了印度洋海温分布的三种主要的定常类型: (1) 全区一致; (2) 东西差异 (夏季型); (3) 南北差异 (冬季型)。印度洋作为著名的季风气候区, 各个季节的环流

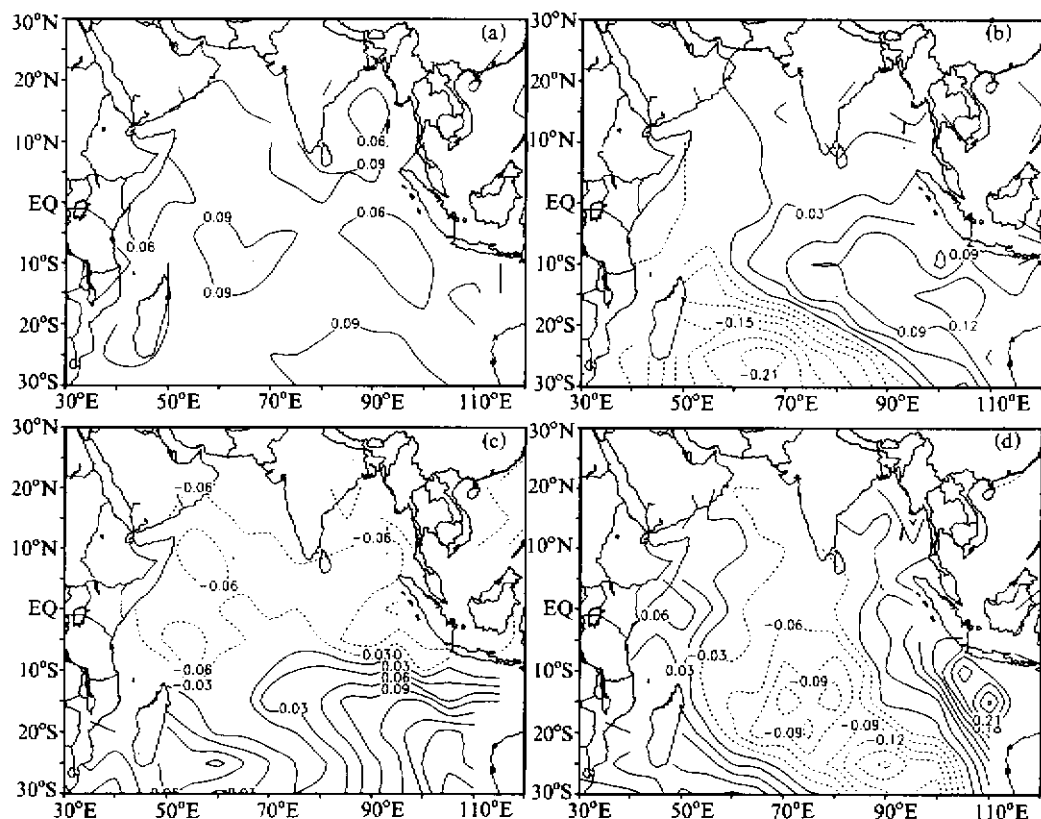


图 2 1950~1997 年印度洋海温距平的前四个特征向量场

(a) 第一特征向量; (b) 第二特征向量; (c) 第三特征向量; (d) 第四特征向量

变化很明显, 与此相应, 各个季节的海温距平的分布也有显著差异, 但总的来看, 除了海温增暖的趋势外, 东西热力差异(夏季型)是其特征。

## 4 热带印度洋海温距平时间变化特征

### 4.1 时间系数的年变化特征

由于年平均第一特征向量场的方差贡献为 48%, 第一时间系数的变化即能代表热带印度洋海温气候变化的首要趋势。图 3 为印度洋年平均海温距平场第一特征向量的时间系数的变化曲线, 从图中可以清楚看到, 热带印度洋海温有明显的年代际变化特征。总的来说, 印度洋在 50~60 年代为冷位相期, 70 年代的海温变化波动较大, 大致为两年周期的冷暖交替变化, 80~90 年代为暖位相期。以上变化表明, 1950~1997 年相对于 1961~1990 年这一较长的时间尺度来看, 印度洋海温经历了从冷位相向暖位相的变化过程, 而 70~80 年代可以看作冷暖交替的过渡期。

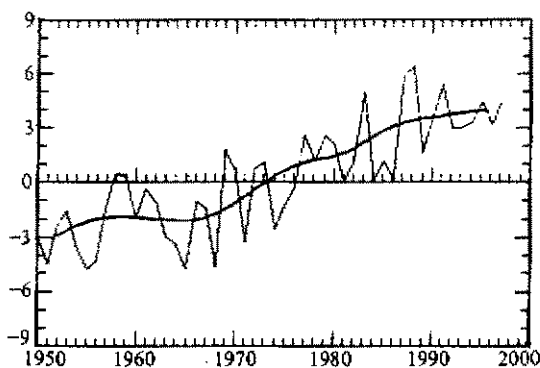


图 3 年平均海温距平场第一特征向量的时间系数  
细线为第一时间系数, 粗线为 5 年滑动平均

图 4 为各年代印度洋平均海温距平场, 可以看到不同年代距平场分布明显不同, 在 50~60 年代, 印度洋为全区一致的负距平场, 70 年代为不均匀的正负距平分布, 80~90 年代为全区一致的正距平场。这进一步表明了印度洋由冷到暖的年代际变化特征。

### 4.2 时间系数的季节变化特征

图 5 为印度洋各季节平均海温距平场第一特征向量的时间系数的变化曲线, 可以清楚看到, 各季节热带印度洋海温由冷到暖的年代变化特征和年平均海温的年代变化特征基本上是一致的, 特别是在 80~90 年代的暖位相期, 这种变化趋势较一致, 但在 50~60 年代冷位相期, 变化是有差异的, 夏季和秋季所有年的第一特征向量的时间系数为负; 而在春季和冬季, 时间系数出现了正负交替的波动, 只是波动的冷位相期要长一些。从 5 年的滑动平均来看, 在 50~70 年代, 海温的变化经历了由冷-相对偏暖-冷-暖的变化。

## 5 异常特征

由于印度洋年平均海温距平第二特征向量场反映了具有夏季特征东西海温差异的分布, 夏季印度洋海温的异常变化可以直接影响到夏季印度西南季风的强弱, 近年来的许多研究表明, ENSO 的发生可以影响到南亚季风的强弱, 在 ENSO 年, 南亚季风减

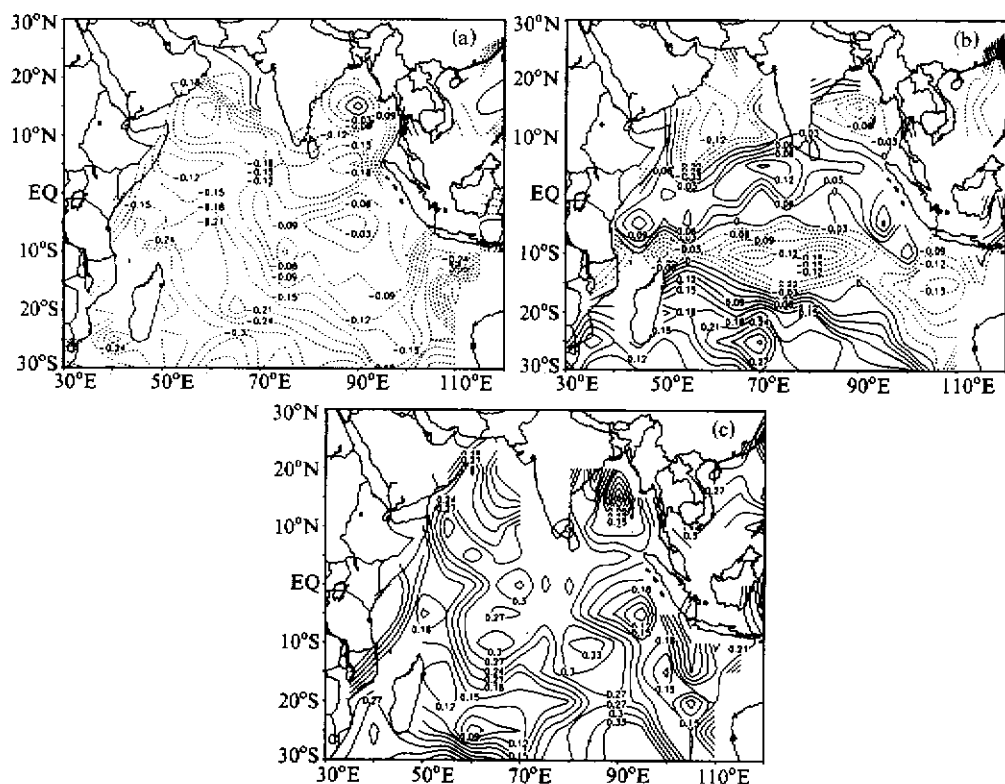


图4 各年代海温距平场平均

(a) 50~60年代; (b) 70年代; (c) 80~90年代

弱, 在反 ENSO 年, 南亚季风增强, 那么, 第二特征向量场时间系数的变化在一定程度上是否可以反映出一些印度洋东西海温异常变化和 ENSO 一致的变化特征呢?

图6为印度洋年平均海温距平场第二特征向量的时间系数变化曲线, 分析曲线的变化可以看到, 它与 ENSO 有较为明显的关系, 在 1951、1953、1965、1968、1972、1976、1982、1986、1987、1991、1993、1994、1997 年的 ENSO 暖位相期, 第二时间系数较小, 大部分为谷值, 相反, 在 ENSO 冷位相的 1954、1964、1967、1970、1973、1975、1984、1988、1989、1992、1996 年, 第二时间系数较大, 大部分为峰值, 表明对应于赤道东太平洋的海温异常变化, 印度洋东西部的海温也出现相反的异常变化。

## 6 结论和讨论

通过对近 48 年印度洋海温距平场的时空特征进行研究, 可以得到以下几点结论:

(1) 热带印度洋海温的年季变化全区位相比较一致, 夏季和秋季的海温变化比冬季和春季大, 海温变化最明显的区域在南印度洋。

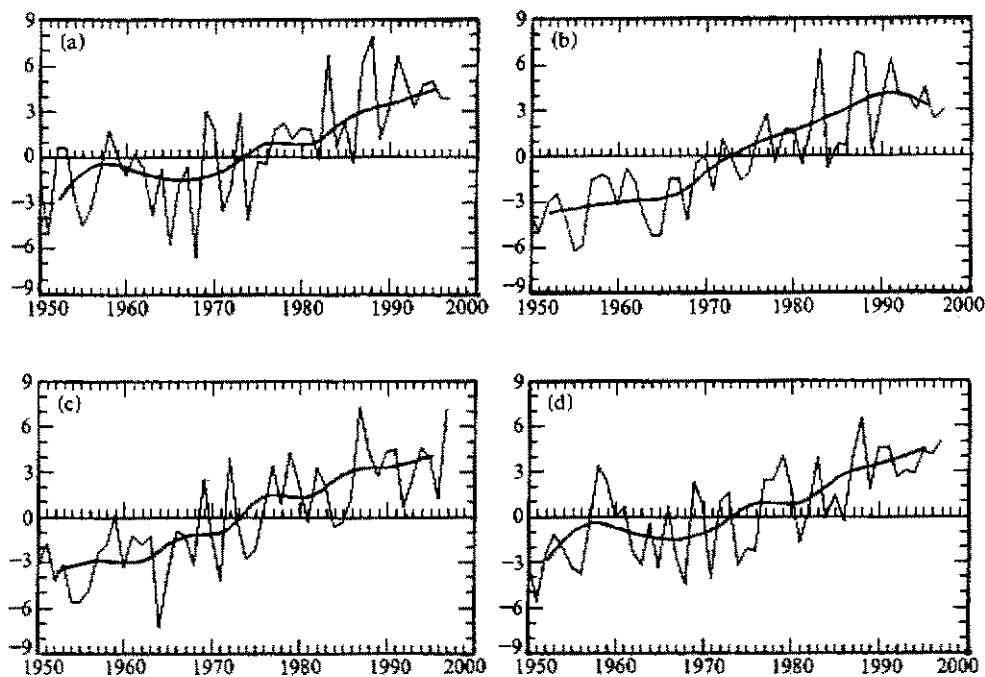


图 5 季平均海温距平场第一特征向量的时间系数  
细线为第一时间系数, 粗线为 5 年滑动平均  
(a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季

(2) 热带印度洋海温距平的年季气候特征分布主要表现为 3 种常定类型: (a) 全区一致型; (b) 东西差异型 (夏季型); (c) 南北差异型 (冬季型)。

(3) 相对于 30 年较长时间尺度来看, 1950~1997 年热带印度洋海温变化表现为由冷到暖的变化, 50~60 年代为冷位相期, 70 年代为冷暖交替的过渡期, 80~90 年代为暖位相期。

(4) 年平均海温距平场第二特征向量的时间系数变化同 ENSO 有较密切的关系, 大 (小) 的时间系数对应 La Niña (El Niño) 事件。

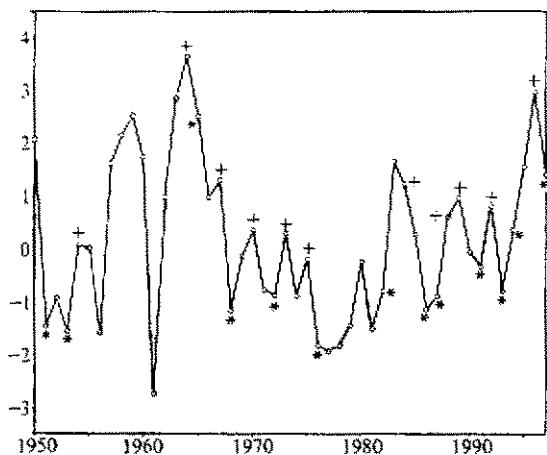


图 6 年平均海温距平场第二特征向量的时间系数  
\* 表示 El Niño 年; + 表示 La Niña 年

由于印度洋年平均海温距平场第二特征向量时间系数变化和赤道东太平洋的海温异常变化有较好的对应关系, 第二特征向量场在一定程度上也就反映了印度洋海温变化的

某些异常特征, 但海温的变化具有全球结构, 海气相互作用相当复杂, 只有把印度洋海温的异常变化放到全球海温异常变化的研究中, 才有可能对印度洋海温的异常变化特征有客观和深刻的认识和理解, 这将是以后研究工作的重点, 进一步研究印度洋海温的异常变化特征对我国的长期天气预报和气候预测有重要的理论意义和实用价值。

## 参 考 文 献

- Wallace, J. M. and M. L. Blackmon, Observation of low-frequency atmosphere variability, *Large-Scale Dynamical Processes in the Atmosphere*, Ed. by B. J. Hoskins and R. Pearce, Academic Press, 1983, 55~94.
- Keshavamurty, R. N., Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the equatorial Pacific and the teleconnections of the Southern Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, 1982, **39**, 1241~1259.
- 肖子牛、李崇银, 大气对外强迫低频响应的数值模拟. I: 对赤道东太平洋 SSTA 的响应, *大气科学*, 1992, **16**(6), 707~717.
- 晏红明、肖子牛, 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究, *热带气象学报*, **16**(1), 18~27.
- 何有海、关翠华, 南海南部上层水温变异与 ENSO 事件, *中国的气候变化与气候影响研究*, 北京: 气象出版社, 1996, 219~226.
- 陈烈庭、金祖辉、罗绍华, 印度洋和南海海温变化的特征及其与大气环流的某些联系, *海洋学报*, 1985, **7**, 103~110.
- 陈烈庭, 热带印度洋-太平洋海温纬向差异及其对亚洲夏季风的影响, *大气科学 (特刊)*, 1988, 142~148.
- 陈烈庭, 阿拉伯海-南海海温距平纬向差异对长江下游降水的影响, *大气科学*, 1991, **15**(1), 33~42.
- 张 勤、丁一汇、周琴芳, 1991-1995 年 El Niño 的基本特征和形成机制的初步探讨, *亚洲季风研究的新进展*, 北京: 气象出版社, 1996, 150~161.
- 黄嘉佑, *气象统计分析与预报方法*, 北京: 气象出版社, 1990, 170~199.

## The Analysis of Spatial and Temporal Characteristics of Sea Surface Temperature Anomaly in the Indian Ocean during Last 50 Years

Yan Hongming and Xiao Ziniu

(Meteorological Observatory of Yunnan Province, Kunming 650034)

Xie Yingqi

(The Earth Science Department, Yunnan University, Kunming 650091)

**Abstract** The diagnostic studies for the characteristics of spatial and temporal distribution of annual and seasonal mean sea surface temperature anomaly in the India Ocean are made with EOF by using 48 years data. The results show that there are three kinds of spatial distributions: (1) annual and seasonal variation in all areas is consistent; (2) west-east distribution; (3) north-south distribution. At the same time, the studies show that the significant characteristics of hierarchical changes of 48 years sea surface temperature is from cold to warm. 1950s~1960s is a cold phase period and 1980s~1990s is a warm phase period, whereas 1970s is a transition period from cold to warm. The second main characteristic reveled the interannual change of the Indian Ocean SST and was closely related with ENSO event.

**Key words:** Indian Ocean; sea surface temperature anomaly; EOF method; spatial and temporal characteristics