

1976/1977 年前后热带印度洋海表 温度年际异常的变化

赵珊珊^{1, 2} 周天军¹ 杨修群³ 孙旭光³ 朱益民⁴

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 国家气候中心气候影响评估室, 北京 100081

3 南京大学灾害性天气气候研究所, 南京 210093

4 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 基于 1948~2005 年 NCEP/NCAR (美国大气研究中心/环境预测中心) 再分析资料, 讨论了 1976/1977 年前后的年代际气候变化对热带印度洋海表温度 (SST) 年际变率特征的影响, 结果表明: 在气候变化前后, ENSO 都能导致热带印度洋 SSTA (海表面温度异常) 出现全海盆同号的变化, 这种模态在冬季最强; 气候变化前与变化后相比, 该模态对该地区海温年际变率的方差贡献大 22.1%, 达到最强的时间早 2 个月。气候变化前, 秋季热带印度洋 SSTA 的主导年际变率模态表现为全海盆同号, 变化后则表现为“偶极子模态” (IODM)。导致上述 SSTA 特征变化的重要原因, 是气候变化前后印度洋风场对 ENSO 的响应不同。在气候变化前, 与 ENSO 相关联的热带印度洋东风异常首先在夏季出现, 而变化后则首先在春季出现, 并且有一反气旋性环流异常维持在热带东南印度洋。

关键词 气候变化 热带印度洋 ENSO 海盆同号变化 偶极子

文章编号 1006-9895 (2008) 02-0371-09

中图分类号 P732

文献标识码 A

Interannual Variation of the Tropical Indian Ocean Sea Surface Temperature Pre- and Post-1976/1977

ZHAO Shan-Shan^{1, 2}, ZHOU Tian-Jun¹, YANG Xiu-Qun³, SUN Xu-Guang³, and ZHU Yi-Min⁴

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Severe Weather and Climate, Nanjing University, Nanjing 210093

4 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract Based on 58-year (1948-2005) NCEP/NCAR reanalysis data, interannual variation of the tropical Indian Ocean sea surface temperature pre- and post-1976/1977 is studied. The original data are filtered to retain the variation with periods from 13 months to 8 years. The results show that ENSO could cause a basin-wide warming/cooling mode with the strongest phase in winter in the tropical Indian Ocean which lags ENSO 2-6 months both pre- and post-1977. But the mode pre-1977 is stronger than that post-1977. The former leads the latter two months in phase. Prior to 1977, the dominant mode of the tropical Indian Ocean SSTA (SST anomaly) in autumn appeared as a basin-wide uniform pattern. After 1977, however, the dominant mode appeared as a dipole or zonal gradient pattern.

收稿日期 2006-06-05, 2007-03-01 收修定稿

资助项目 中国科学院大气物理研究所 LASG 国家重点实验室开放课题, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403600、2004CB418303, 中国气象局行业专项 GYHY200706010, 国家自然科学基金资助项目 40730953、40425009

作者简介 赵珊珊, 女, 1979 年出生, 博士, 副研究员, 主要从事海气相互作用和气候变化研究。E-mail: zhaoss@cam.gov.cn

Changes in the response of the Indian Ocean surface wind to ENSO pre- and post-1977 account for the shift of dominant mode. Prior to 1977, the ENSO-related anomalous tropical Indian Ocean surface easterly firstly appeared in summer. After 1977, however, it appeared firstly in spring and a strong anticyclone dominated the southern tropical Indian Ocean throughout the season.

Key words climate shift, ENSO, basin-wide warming/cooling mode, the tropical Indian Ocean dipole

1 引言

ENSO 是热带太平洋最主要的变率,它对全球气候都有着重要影响^[1, 2]。Walker 环流提供了联系热带太平洋和印度洋的机制^[3, 4]。热带印度洋最为显著的年际变率信号表现为全海盆一致的增暖,它滞后热带中东太平洋 SSTA (海表面温度异常)几个月时间^[5~8],其产生机制来源于热带中东太平洋通过“大气桥”对印度洋海表热通量的影响^[8, 9]。除了全海盆一致增暖的年际变化信号外, Saji 等^[10]发现热带印度洋 SSTA 存在东西向的“偶极子”结构 (IOD), IOD 在北半球春季发展,秋季成熟,冬季衰亡。

目前关于 IOD 的真实性尚存在争论,例如 Allan 等^[11]质疑 IOD 是 SST 的纬向梯度分布而不是反位相变化模态; Yamagata 等^[12]通过分析多种资料的多个变量,认为 IOD 不仅具有典型个例,而且通过经验正交函数 (Empirical Orthogonal Function, 简称 EOF) 分解可以得到。此外,关于 IOD 变化是否独立于 ENSO 也存在争议^[13, 14]。IOD 与 Niño 3.4 指数序列的相关系数在秋季很高,意味着前者可能受到 ENSO 的显著影响^[15, 16]。但也有研究认为某些极端事件,如 1961、1994 和 1997 年的 IOD 是热带印度洋局地海气耦合作用产生的^[17]。Shinoda 等^[18]则认为 IOD 是 ENSO 和热带印度洋次表层偶极子共同作用的结果。Zhong 等^[19]分析海气耦合模式结果发现,只有当 ENSO 事件发展较早时,才能导致印度洋 IOD 模态的发生。造成上述分歧的原因,可能是由于 ENSO 和 IOD 的关系随时间变化引起的。

观测资料分析表明,全球气候在 1976/1977 年前后发生了变化 (climate shift)^[20~24]。与这次气候变化相对应, ENSO 的周期、强度、空间结构和传播方向等特征都发生了变化^[1, 22, 23]; 热带印度洋 SST 也经历了气候变化^[21, 24]。谭言科等^[25, 26]讨论了变化前后热带印度洋单、偶极转换过程。Anna-

malai 等^[27]分析观测资料发现,在 1976/1977 年气候变化前, ENSO 期间的秋季热带印度 SSTA 表现为全海盆一致的增暖,而在变化后则表现为 IOD 模态; 他们通过数值试验证明,印度洋 SSTA 年际变率特征的上述不同,将对 El Niño 的发生产生影响。不过, Terray 等^[28]则强调是 ENSO 的变化导致了热带印度洋的变化。

综上所述,在年际尺度上, ENSO 对热带印度洋 SSTA 存在重要影响。在经历了 1976/1977 年的气候变化之后, ENSO 与热带印度洋 SST 都发生了变化; 在这种年代际的变化背景之下, ENSO 对热带印度洋 SSTA 的影响是否有所变化,这是一个值得探讨的问题。本文的目的,是利用再分析资料讨论在 1976/1977 年的气候变化前后, ENSO 对热带印度洋海温年际变化影响的异同点。

2 资料和分析方法

本文所用资料包括: NCEP/NCAR 再分析资料中的海表面温度、850 hPa 纬向风和经向风,水平格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间跨度是 1948~2005 年^[29]。

为了突出年际变率,参照 Wang 等^[30]的作法,本文首先采用基于傅里叶分解的滤波方法,分离出 1976/1977 年前后热带太平洋和印度洋 SST 变化的年际分量 (周期在 13 个月~8 年之间),得到不同年代际气候背景下的热带太平洋和印度洋 SSTA 的年际变率。然后,运用 EOF 分析、相关分析等方法,讨论气候变化前后 ENSO 对热带印度洋 SSTA 的影响。本文利用 Niño 3.4 指数 ($5^{\circ}\text{S} \sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{W}$ 的区域平均 SSTA) 来表征热带太平洋 ENSO 的强度。

3 1976/1977 前后热带印度洋 SST 年际异常的变化

为揭示 1976/1977 年前后的 ENSO 变化,对 1948~2005 年的 Niño 3.4 指数进行年际尺度滤

波, 结果如图 1 所示, 在 1976/1977 年以前, ENSO 事件强度较弱, 而 1976/1977 年以后, ENSO 事件的强度则显著增强, 并且暖事件的发生频率增加。

为讨论不同年代际背景下热带印度洋 SSTA 的年际变率特征, 以下分别对 1976/1977 年变化前后的 SSTA 资料做年际尺度滤波, 然后再做 EOF 分解。

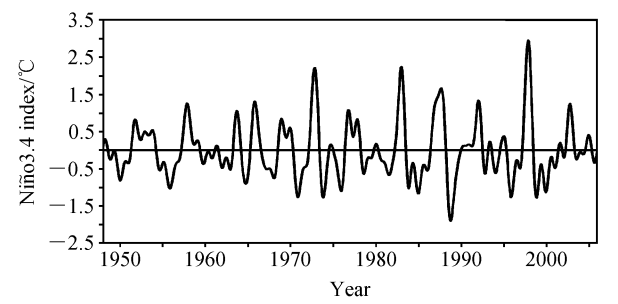


图 1 1948~2005 年年际尺度的 Niño 3.4 指数随时间变化
Fig. 1 Time series of the interannual Niño 3.4 index from 1948 to 2005

3.1 1976/1977 年前后热带印度洋 SSTA 海盆一致变化模态

对滤波后的热带印度洋 SSTA 做 EOF 分解, 得到的第一模态 (如图 2a、b 所示), 无论在 1976/1977 年气候变化发生之前还是之后, 热带印度洋 SSTA 的 EOF1 (经验正交分解第一模态) 都呈现出全海盆一致的变化特征, 并且热带南印度洋的 SSTA 变率较强, 热带东南印度洋的变率则较弱。在气候变化前, EOF1 解释了总方差的 49.9%, 这要大于变化后的 27.8%, 表明变化前热带印度洋海盆的一致性增暖模态相对于变化后要显著。图 2c、d 分别给出了变化前后 EOF1 的 PC1 (经验正交分解第一模态的主分量, 实线) 以及热带太平洋 Niño 3.4 指数 (虚线, 为了便于比较, 在图中缩小了 10 倍)。可见在气候变化前后, 热带印度洋 SSTA 的年际变率都表现为全海盆同号的变化模态, 并且滞后 Niño 3.4 指数 3~6 个月。

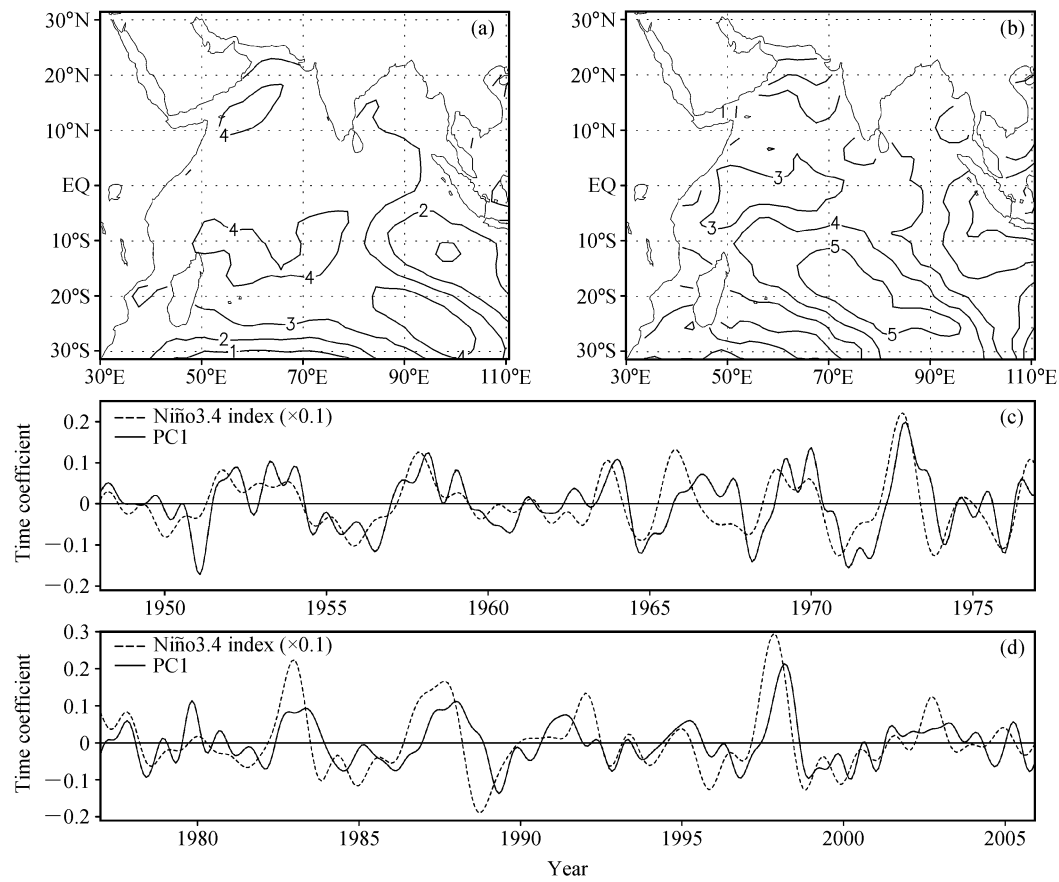


图 2 年际尺度热带印度洋 SSTA 的 EOF1 空间分布 (a、b, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及对应的时间序列 (c、d): (a、c) 气候变化前; (b、d) 气候变化后
Fig. 2 Spatial pattern (a, b, units: $^{\circ}\text{C}$) and associated time series (c, d) of the first EOF mode of the tropical Indian Ocean SSTA (SST anomaly): (a, c) Before climate shift; (b, d) after climate shift

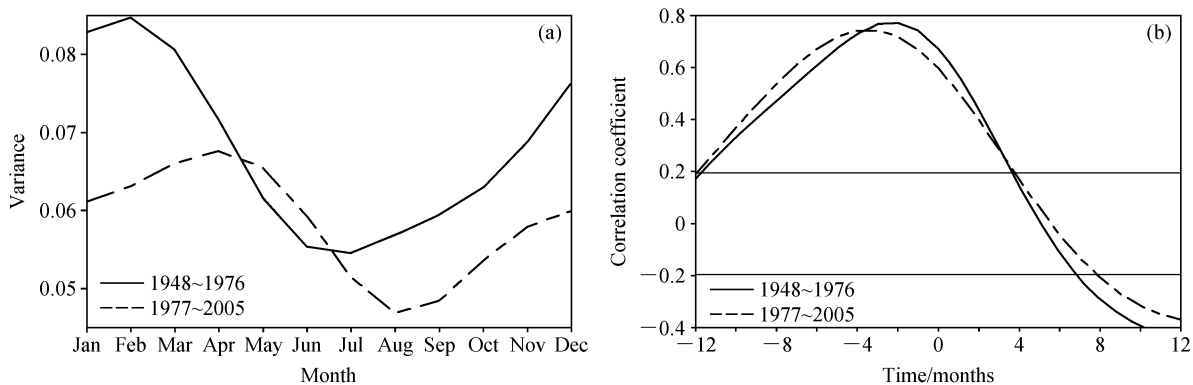


图3 (a) 热带印度洋 SSTA 的 PC1 逐月方差; (b) PC1 与 Niño 3.4 指数的超前滞后相关 (负号代表 Niño 3.4 指数超前 PC1)

Fig. 3 (a) Monthly variance of the PC1 (principal component 1) of the tropical Indian Ocean SSTA; (b) lead-lag correlation between the PC1 and the Niño 3.4 index, negative values of the abscissa denote the Niño 3.4 index leads the PC1

不过,全海盆同号的变化模态达到最强的季节在气候变化前后明显不同,如 PC1 的方差季节分布所示(图 3a),在变化前,热带印度洋 SSTA 的 EOF1 在 2 月最强、6 月最弱,而变化后则在 4 月最强、8 月最弱。因此,热带印度洋 SSTA 全海盆同号的变化模态达到最强的时间,在变化后较之变化前要推迟 2 个月。同时,PC1 与 Niño 3.4 指数的超前滞后相关(图 3b)也表明,变化前热带印度洋 SSTA 全海盆同号的变化模态滞后 Niño 3.4 指数约 2 个月达最强,而变化后滞后 4 个月达最强。

综上所述,无论在 1976/1977 年气候变化之前还是之后,热带太平洋 ENSO 都能导致热带印度洋 SSTA 的全海盆一致的滞后增暖;但是这种增暖达到最强的时间,变化后较之变化前要晚 2 个月,并且在强度上要弱一些。

3.2 1976/1977 年前后热带印度洋 IOD

分别对气候变化前后不同季节的热带印度洋 SSTA 做 EOF 分解(图略),发现在变化前后的冬春季,热带印度洋 SSTA 都表现为全海盆一致的变化模态,其对应的时间序列滞后 Niño 3.4 指数的时间位相也一致。但是秋季热带印度洋 SSTA 的 EOF 第一模态的空间分布在气候变化前后显著不同。在变化前(图 4a),秋季热带印度洋 SSTA 的 EOF1 为全海盆同号的分布型,但热带东南印度洋 SSTA 相对较弱。在变化后(图 4b),秋季热带印度洋 SSTA 为 IOD 分布特征,热带东南印度洋 SSTA 与海盆其它区域 SSTA 呈反位相变化。图 4c、d 分别给出气候变化前后 PC1 与同年秋季的 Niño 3.4 指数序列(缩小了 10 倍),变化前有些年份

PC1 与 Niño 3.4 指数在位相上非同步,尤其是 1960~1970 年代期间,而在变化后,PC1 与 Niño 3.4 指数的时间变化位相同步;这意味着在气候变化后,热带印度洋 SSTA 伴随 ENSO 发生偶极子事件。

需要说明的是,Annamalai 等^[27]曾对气候变化前后的典型 El Niño 事件期间的热带印度洋 SSTA 做合成分析,得到了与图 4a、b 相似的结果。不过,他们强调的是热带印度洋的上述变化对随后的 El Niño 发展的影响。由图 4c、d 中的 PC1 和 Niño 3.4 指数序列的位相关系可知,主要是 PC1 超前(或同步)于 Niño 3.4 指数,而少有相反的情况出现,这意味着主要是热带太平洋对热带印度洋产生影响(而不是相反)。另外,在 IODM(热带印度洋偶极子模态)研究中,一直存在着因方法而质疑结论的争议,例如由于再分析资料的时间长度较短,尽管在 1950~2001 年间共发生 11 次 El Niño 事件,但气候变化后的典型 El Niño 事件只有 4 次,由于样本数较少,Annamalai 等^[27]合成分析结果的显著性亟待验证。同时,简单的分时段个例合成,可能难以克服年代际变化信号的影响。本文采用滤波技术,有效去除了年代际变化信号,同时利用 EOF 分析方法,避免了气候变化后典型 El Niño 事件样本数较少的情况,使得变化前后的 EOF 分析结果更具可比性。综合本文和 Annamalai 等^[27]的结果,秋季热带印度洋 SSTA 的主要年际变率模态在气候变化前后发生了显著变化,由气候变化前的全海盆同号的分布特征,转换为变化后的 IOD 分布特征。

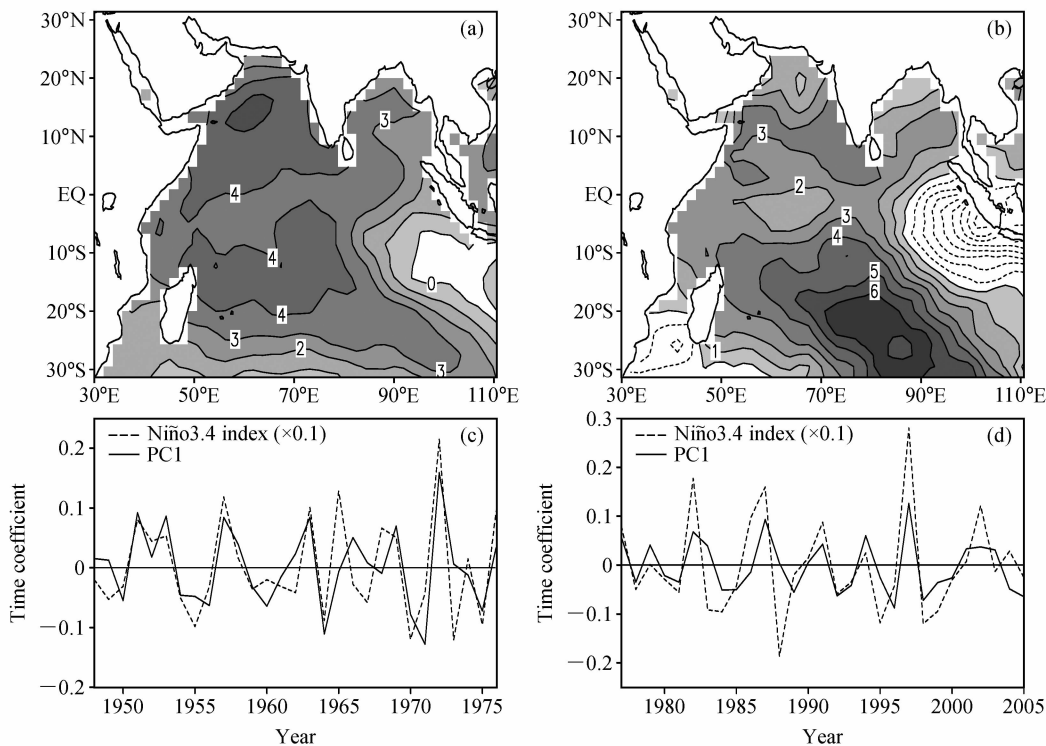


图4 秋季 (SON) 热带印度洋 SSTA 的 EOF1 空间分布 (阴影表示正异常, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 及对应的时间序列: (a、c) 变化前; (b、d) 变化后
Fig. 4 Spatial pattern (shading, positive SSTA; units: $^{\circ}\text{C}$) and associated time series of the first EOF mode of the tropical Indian Ocean SS-TA in autumn (SON): (a, c) Before climate shift; (b, d) after climate shift

已有研究表明, IOD 具有季节锁相性, 其振幅在秋季 (SON) 最强^[16, 17], 但是以往的工作少有区分气候变化前后的分析。本文结果表明, 在气候变化前, 秋季热带印度洋 SSTA 的主要年际变率模态表现为梯度分布特征, 与 ENSO 的联系较弱。而在气候变化后, 秋季热带印度洋 SSTA 的年际变率模态主要表现为 IOD 分布, 它与 ENSO 有着很好的位相上的同步性。

4 1976/1977 前后 ENSO 对热带印度洋 SSTA 年际异常的影响

前文指出, 在 1976/1977 年气候变化前后, 秋季热带印度洋 SSTA 的主要年际变率模态呈现出不同的特征。有迹象表明, 这种变化是和 ENSO 事件联系在一起的。但气候变化前后 ENSO 影响热带印度洋 SSTA 年际异常的具体过程的异同, 尚需进一步讨论。ENSO 的最强信号在冬季, 分别针对气候变化前后两个时段, 将冬季 (DJF) Niño 3.4 指数与随后 4~11 月的热带印度洋 SSTA (2 个月平均) 求相关, 结果如图 5 所示。在气候变化前,

ENSO 事件期间的春季 (图 5a), 热带印度洋海盆大部分区域为 SSTA 冷异常, 热带西北印度洋和西南印度洋有弱的 SSTA 正异常; 从夏季到秋初 (图 5b~c), 热带西印度洋 SSTA 暖异常发展, 热带东南印度洋 SSTA 冷异常范围减小; 到秋季 (图 5d), 热带东南印度洋 SSTA 冷异常进一步减弱, 海盆大部分区域为暖异常。因此, 在变化前的 El Niño 事件发展期间, 热带印度洋 SSTA 暖异常首先出现在西印度洋, 然后逐渐向东印度洋扩展; 在夏末秋初, 热带印度洋 SSTA 出现偶极子型分布, SSTA 冷异常主要位于赤道以南的热带东南印度洋; 在秋季, 偶极子型海温异常基本消失, 整个海盆 SSTA 呈同号的变化特征。

在气候变化后, ENSO 事件期间的春季 (图 5e), 热带印度洋大部分区域 SSTA 为暖异常, 海盆东南部 SSTA 为冷异常; 从夏季到秋初 (图 5f~g), 热带东印度洋 SSTA 冷异常发展增强并向北扩展, 其它区域 SSTA 暖异常增强; 到秋季 (图 5h), 热带东南印度洋 SSTA 为冷异常, 其它区域 SSTA 为暖异常, 呈现出 IODM 型的分布特征。因此, 在

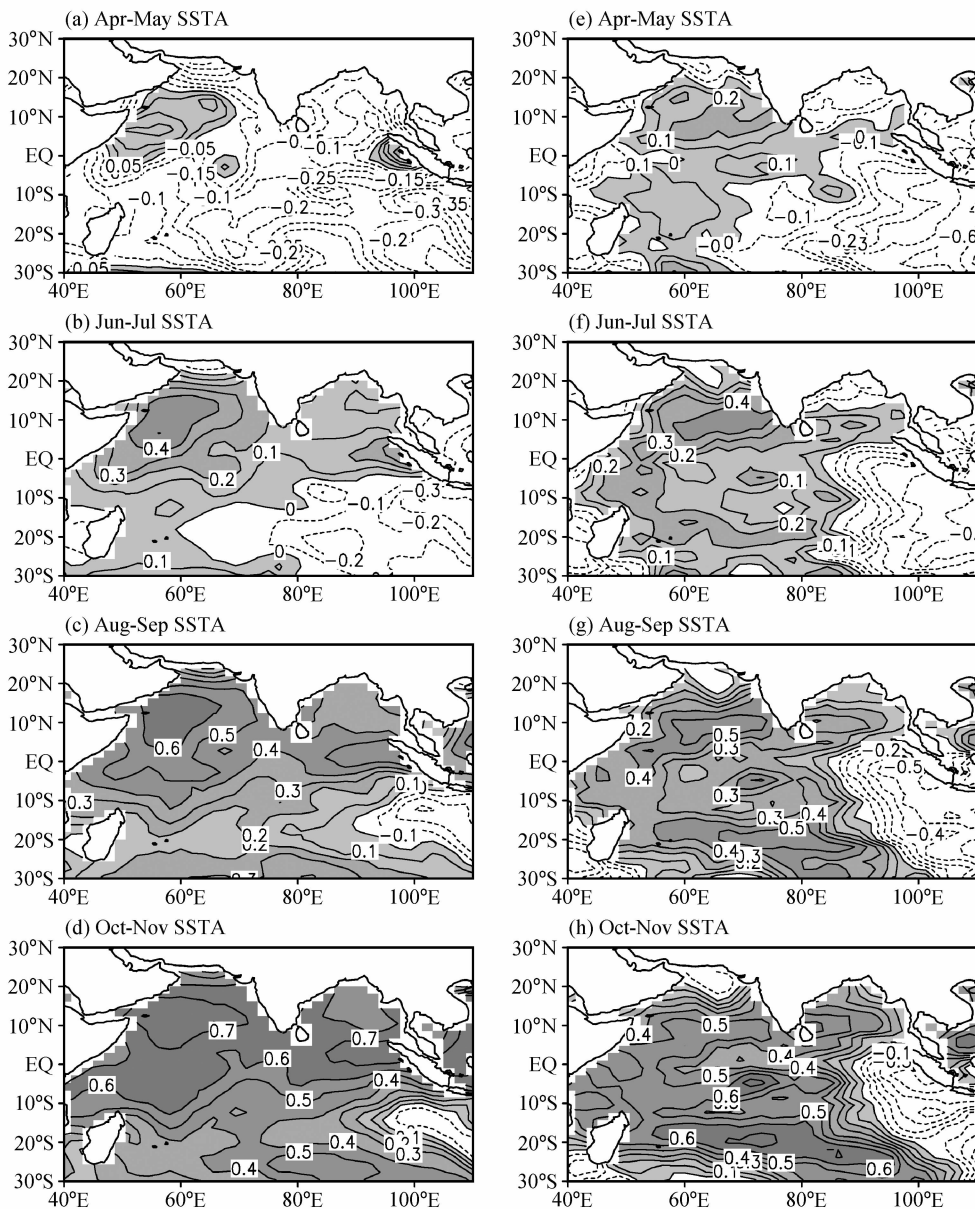


图5 冬季 (DJF) Niño 3.4 指数与热带印度洋 SSTA 的相关关系 (阴影表示正相关): (a~d) 变化前; (e~h) 变化后

Fig. 5 Correlation between the Niño 3.4 index in winter (DJF) and the tropical Indian Ocean SSTA (positive correlation is shaded): (a~d) Before climate shift; (e~h) after climate shift

气候变化后的 El Niño 事件发展期间, 热带东南印度洋 SST 冷异常发展增强并不断向北扩展, 导致秋季 SSTA 分布出现偶极子型。

表面风场变化是联系 ENSO 和印度洋 SST 变化的桥梁^[31, 32]。对应图 5, 将冬季 (DJF) 的 Niño 3.4 指数与热带印度洋 850 hPa 风场作相关 (见图 6)。对气候变化前 (图 6a~d) 和变化后 (图 6e~h) 的结果作比较, 发现与秋季热带印度洋 SSTA 模态在气候变化前后的变化相对应, 热带印度洋海面

风场的异常型也发生了变化。在气候变化前, 热带东印度洋海面东风异常首先在夏季出现, 随后在秋季增强; 在变化后, 热带东印度洋海面东风异常在春季就已经出现。周天军等^[31]指出只有当 ENSO 产生的热带印度洋东风异常出现较早时, 才能有效促发热带印度洋局地海气耦合, 产生 IOD 模态。气候变化后的热带印度洋表面东风异常的强度和范围, 都超过了变化前, 并且热带南印度洋维持一反气旋性环流。因此, 变化后的热带东印度洋东风异

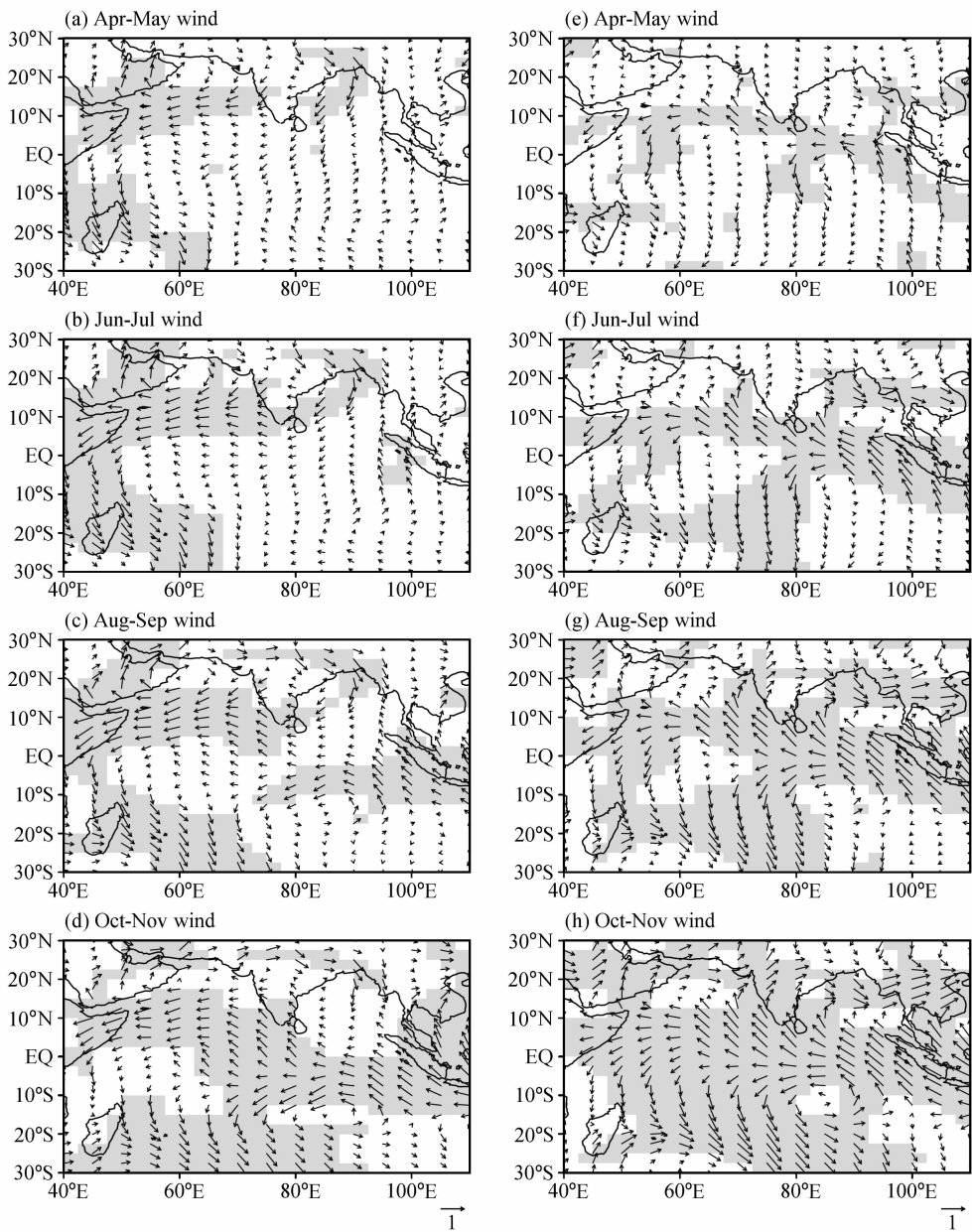


图 6 冬季 (DJF) Niño 3.4 指数与热带印度洋 850 hPa 风场的相关 (矢量): (a~d)变化前; (e~h)变化后。阴影: 超过 95% 信度检验
Fig. 6 Correlation between the Niño 3.4 index in winter (DJF) and 850-hPa wind in the tropical Indian Ocean (vectors): (a~d) Before climate shift; (e~h) after climate shift. Areas above 95% confidence level are shaded

常出现的时间较之变化前要早、强度要强。风场的上述变化,是导致气候变化前后热带印度洋 SSTA 年际变率模态特征不同的重要原因。

5 总结

利用 NCEP/NCAR 再分析资料,讨论了 1976/1977 年前后 ENSO 期间热带印度洋 SSTA 的变化,结果表明:

在 1976/1977 年前后, ENSO 都能导致热带印

度洋 SSTA 滞后的全海盆同号的变化,这种同号的变化在冬季最强。在气候变化前,热带印度洋 SSTA 全海盆同号的主导模态对该地区海温年际变率的方差贡献,较之变化后要强,并且这种模态达到最强的时间,变化后比变化前在位相上要晚两个月。1976/1977 年以前的秋季,热带印度洋 SSTA 年际变率的主导模态表现为全海盆一致的变化,而 1976/1977 年以后则表现为 IOD 模态,并且与 ENSO 的发生位相同步。

气候变化前后的 ENSO 发展期间, 热带印度洋 SSTa 的季节演变特征不同。在气候变化前, 热带印度洋 SSTa 在夏末秋初出现了偶极子型分布, 在秋季偶极子型分布消亡, 呈海盆一致的变化模态。在变化后, 热带东南印度洋 SST 冷异常发展增强并不断向北扩展, 导致秋季 SSTa 分布的偶极子型。气候变化前后印度洋风场对 ENSO 的响应不同, 是导致 SSTa 变化特征不同的主要原因。在气候变化前, 与 ENSO 相关联的热带印度洋东风异常首先在夏季出现, 而变化后则首先在春季出现, 并且在热带东南印度洋有一较强的反气旋性环流异常维持。

参考文献 (References)

- [1] Wallace J M, Rasmusson E M, Mitchell T P, et al. On the structure and evolution of ENSO related climate variability with the El Nino-Southern Oscillation. *J. Geophys. Res.*, 1998, **104**: 5131~5149
- [2] Trenberth K E, Branstator G W, Karoly D, et al. Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**: 14291~14324
- [3] 吴国雄, 孟文. 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, 1998, **22**(4): 470~480
Wu Guoxiong, Meng Wen. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1998, **22** (4): 470~480
- [4] 孟文, 吴国雄. 赤道印度洋-太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 II. 数值模拟. 大气科学, 2000, **24**(1): 15~25
Meng Wen, Wu Guoxiong. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part II: Numerical simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2000, **24** (1): 15~25
- [5] Klein S A, Soden B J, Lau N C. Remote sea surface temperature variations during ENSO: Evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, 1999, **12**: 917~932
- [6] 周天军, 宇如聪, 李薇, 等. 20 世纪印度洋气候变率特征. 气象学报, 2001, **59** (3): 831~840
Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Wei, et al. On the variability of the Indian Ocean during the 20th century. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2001, **59** (3): 831~840
- [7] 殷永红, 史历, 倪允琪. 近 20 年来热带印度洋与热带太平洋海气系统相互作用特征的诊断研究. 大气科学, 2001, **25** (3): 355~371
Yin Yonghong, Shi Li, Ni Yunqi. A diagnosis of interactions between the tropical Indian Ocean and Pacific Ocean air-sea systems in the past 20 years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 355~371
- [8] 赵珊珊, 杨修群. 中东复杂程度全球热带海洋模式模拟的热带印度洋海表温度变率. 南京大学学报, 2003, **39** (3): 358~369
Zhao Shanshan, Yang Xiuqun. SST variability in the tropical Indian Ocean simulated by an intermediate tropical global ocean model. *Journal of Nanjing University* (in Chinese), 2003, **39** (3): 358~369
- [9] Shinoda T, Alexander M A, Hendon H H. Remote response of the Indian Ocean to interannual SST variations in the tropical Pacific. *J. Climate*, 2004, **17**: 363~372
- [10] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, **401**: 360~363
- [11] Allan R, Chambers D, Drosowsky W, et al. Is there an Indian Ocean dipole independent of the El Niño-Southern Oscillations? CLIVAR Exchanges, International CLIVAR Project Office, Southampton, United Kingdom, 2001, **6** (3): 18~22
- [12] Yamagata T, Behera S, Rao S A, et al. Comments on "Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies." *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2003, **84**: 1418~1422
- [13] Annamalai H H, Slingo J M, Sperber K R, et al. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECWMF and NCEP-NCAR reanalyses. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127**: 1157~1186
- [14] Hastenrath S. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**: 735~738
- [15] Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability. *J. Climate*, 2002, **15**: 867~878
- [16] Krishnamurthy V, Kirtman B P. Variability of the Indian Ocean: Relation to monsoon and ENSO. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2003, **129**: 1623~1646
- [17] 钱海峰, 殷永红, 倪允琪. 热带印度洋次表层偶极子模态及其 1997/1998 年过程诊断分析研究. 应用气象学报, 2003, **14** (2): 129~139
Qian Haifeng, Yin Yonghong, Ni Yunqi. Tropical Indian Ocean subsurface dipole mode and diagnostic analysis of dipole event in 1997/1998. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 2003, **14** (2): 129~139
- [18] Shinoda T, Hendon H H, Alexander M A. Surface and subsurface dipole variability in the Indian Ocean and its relation with ENSO. *Deep-Sea Res.*, 2004, **51**: 619~635
- [19] Zhong A, Hendon H H, Alives O. Indian Ocean variability and its association with ENSO in a global coupled model. *J.*

- Climate*, 2005, **18**: 3634~3649
- [20] Nitta T, Yamada S. Recent warming of tropical sea surface temperature and its relationship to the Northern Hemisphere. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1989, **67**: 375~383
- [21] Terray P. An evaluation of climatological data in the Indian Ocean area. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1994, **72**: 359~386
- [22] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J. Climate*, 1995, **8**: 267~285
- [23] An S I, Wang B. Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impacts on the ENSO frequency. *J. Climate*, 2000, **13**: 2044~2055
- [24] Aoki S, Yoritaka M, Masuyama A, et al. Multidecadal warming of subsurface temperature in the Indian sector of the Southern Ocean. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**, 8081, doi: 10.1029/2000JC000307
- [25] 谭言科, 张人禾, 何金海. 热带印度洋海温的年际异常及其海气耦合特征. *大气科学*, 2003, **27** (1): 53~66
Tan Yanke, Zhang Renhe, He Jinhai. Features of the interannual variation of sea surface temperature anomalies and the air-sea interaction in tropical Indian Ocean. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2003, **27** (1): 53~66
- [26] 杜振彩, 谭言科, 张人禾 等. 热带印度洋海温异常单、偶极模态及其相互作用. *大气科学*, 2006, **30** (1): 11~24
Du Zhencai, Tan Yanke, Zhang Renhe, et al. Two modes of sea surface temperature anomalies in the tropical Indian Ocean: Monopole, dipole and their interactions. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2006, **30** (1): 11~24
- [27] Annamalai H, Xie S P, McCreary J P. Impact of Indian Ocean sea surface temperature on developing El Niño. *J. Climate*, 2005, **18**: 302~319
- [28] Terray P, Dominiak S. Indian Ocean sea surface temperature and El Niño - Southern Oscillation: A new perspective. *J. Climate*, 2005, **18**: 1351~1368
- [29] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77** (3): 437~472
- [30] Wang B, Wu R G, Li T. Atmosphere - warm ocean interaction and its impacts on Asia - Australian monsoon variation. *J. Climate*, 2003, **15**: 1195~1211
- [31] 赵珊珊, 杨修群. 风应力桥梁作用下热带太平洋和印度洋相互作用的数值试验. *海洋学报*, 2004, **26** (7): 33~48
Zhao Shanshan, Yang Xiuqun. Numerical experiments on interaction between the tropical Pacific and the Indian Ocean through the wind-stress "bridge". *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 2004, **26** (7): 33~48
- [32] 周天军, 俞永强, 宇如聪, 等. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟. *大气科学*, 2004, **28** (3): 357~373
Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. Indian Ocean response to ENSO: Observation and air-sea coupled model simulation. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (3): 357~373