

肖莺, 张祖强, 何金海, 等. 2010. 印度洋偶极子与热带太平洋海温异常多时间尺度相互作用初析 [J]. 大气科学, 34 (3): 483–494. Xiao Ying, Zhang Zuqiang, He Jinhai, et al. 2010. Multi-scale interactions between the Indian Ocean dipole and the tropical Pacific sea surface temperature anomalies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 483–494.

印度洋偶极子与热带太平洋海洋表面温度异常 多时间尺度相互作用初析

肖莺^{1,2,3} 张祖强² 何金海³ 祁丽³ 任永建¹

1 武汉区域气候中心, 武汉 430074

2 国家气候中心, 北京 100081

3 南京信息工程大学, 南京 210044

摘 要 本文利用交叉谱方法, 将印度洋偶极子 (简称 IOD) 与 ENSO 的相关关系分解到不同的时间尺度上来分析, 进而通过对海气耦合过程的初步分析, 讨论了不同时间尺度上 IOD 与 ENSO 的相互作用。结果表明, IOD 与 ENSO 在准 1~2 年、准 3 年、准 4 年等三个时间尺度上存在显著相关, 同时, IOD 还存在一个独立于 ENSO 的模式, 主要表现在准 8 个月时间尺度上。从海气相互作用的角度看, 在与 ENSO 相关的三个特征时间尺度上, IOD 年际变率主要通过引发热带印度洋纬向风异常并且东传到太平洋, 从而引起热带中东太平洋海温的年际变率。与 ENSO 相对独立的 IOD 模式则没有类似的纬向风异常东传过程。此外, 在上述四个不同时间尺度上, 产生 IOD 变率的印度洋海气耦合过程不尽相同, 各具特点。

关键词 印度洋偶极子 ENSO 交叉谱

文章编号 1006-9895 (2010) 03-0483-12

中图分类号 P732

文献标识码 A

Multi-Scale Interactions between the Indian Ocean Dipole and the Tropical Pacific Sea Surface Temperature Anomalies

XIAO Ying^{1,2,3}, ZHANG Zuqiang², HE Jinhai³, QI Li³, and REN Yongjian¹

1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 Nanjing Information and Technology University, Nanjing 210044

Abstract Spatial and temporal characteristics of the Indian Ocean Dipole (IOD) and the relationship between the variabilities of IOD and ENSO at several interannual time scales are addressed. It is found that the interannual variability of IOD is associated with that of ENSO significantly at the time scales of quasi-1–2 years, quasi-3 years, and quasi-4 years. Besides, IOD also exhibits a robust variation at the quasi-8-month time scale which appears to be independent on the ENSO. At the three interannual time scales mentioned above, the IOD contributes to the interannual variations of ENSO through the westward shifts of zonal wind anomalies associated with the IOD over the tropical Indian Ocean into the tropical Pacific Ocean. The similar process is not found for the quasi-8-month mode of IOD. In addition, the ocean-atmosphere interactions in the tropical Indian Ocean responsible for the interannual vari-

ations of IOD are different at the four different time scales.

Key words the Indian Ocean Dipole (IOD), ENSO, cross spectrum

1 引言

ENSO 事件作为热带太平洋年际变率最强的信号, 对全球许多地区的天气气候都有显著影响。例如, El Niño 事件发生当年夏季, 印度地区常常发生严重干旱。然而, 1997 年强 El Niño 事件发生时, 印度地区夏季降雨量接近正常, 甚至部分地区降水偏多。这一异常现象引起了研究专家的高度关注, 研究除 ENSO 信号外, 是否还有其它模态对大气产生影响。值得注意的是, 1997 年赤道印度洋海表温度异常 (SSTA) 十分明显, 强度高达 2°C 以上, 由此热带印度洋 SSTA 变化及其对气候强迫效应日益受到重视。其实, 中国学者早就注意到印度洋 SSTA 的纬向变化 (Luo et al., 1985; 陈烈庭, 1991), 并指出印度洋与太平洋之间存在一定的联系 (李国庆, 1982; 陈敬阳和孙照渤, 1993)。近年来, Saji et al. (1999) 指出, 赤道印度洋 SSTA 的变化存在东西偶极子型振荡, 并称其为印度洋偶极子 (简称 IOD)。此后, 许多学者从不同的角度对 IOD 进行了分析, 研究其形成机制 (Hendon, 2003; 巢纪平和袁绍宇, 2003; 王东晓等, 2003; Lau and Nath, 2004; Behera et al., 2006) 以及年际 (Behera et al., 2000; 李东辉等, 2005)、年代际 (李崇银和穆明权, 2001; 殷永红等, 2001; Du and Xie, 2008) 的变化特征。

自提出 IOD 现象以来, IOD 与 ENSO 的相互关系一直是研究的焦点。一方面, 有些学者 (Webster, 1999; Li et al., 2002; Saji and Yamagata, 2003; Ashok et al., 2003; Behera et al., 2006) 认为 IOD 完全是印度洋海气耦合作用的产物, 与 ENSO 相互独立。另一方面, 有些学者的研究结果表明 ENSO 与 IOD 之间关系密切, 可能通过诸如大气桥 (Kawamura et al., 2001)、Walker 环流 (Yu and Reinecker, 1999; 李崇银和穆明权, 2001; 巢纪平和袁绍宇, 2003)、印度尼西亚贯穿流 (Waj-sowicz and Schneider, 2001)、Kelvin 波 (Xie et al., 2009)、大气行星波 (刘娜等, 2005) 等途径相互影响, 由此提出了太平洋—印度洋海温异常综合模概念 (杨辉等, 2006)。最近, 有研究还表明 IOD 与

ENSO 的相互关系存在明显的年代际变化 (袁媛和李崇银, 2008)。然而, 上述研究着重从总体上分析两者的相关关系以及通过何种机制来实现彼此间的相互影响, 但 IOD 和 ENSO 作为印度洋和太平洋海温异常年际变化最显著的两个模态, 在不同的年际变化时间尺度上关系如何, 以及彼此相互作用的物理过程是否存在差异等问题尚需深入探讨。为此, 本文拟从时频分析着手, 就不同时间尺度上 IOD 和 ENSO 的相互关系及其作用过程进行探讨。

2 资料与方法

2.1 资料

根据 NCEP/NCAR 的 1982~2006 年最优插分海温资料、美国 NCEP\NCAR 再分析风场资料来分析印度洋偶极子 IOD 与赤道太平洋 SSTA 的关系, 本文采用交叉谱分析来探讨不同时间尺度上 IOD 与 ENSO 的相互作用。

2.2 交叉谱方法简介

在实际问题中, 不仅要研究单个气候序列的频域结构和周期特征, 还要分析不同序列在频域变化上的相互关系。交叉谱能较好地反映两个相同时段的不同时间序列在频域变化上的相互关系。因此, 可以利用交叉谱来讨论多个序列的关系。

对于时间序列 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$, 两个序列的互相关函数做交叉谱分析时, 首先确定出最大滞后长度 m 。本文取 $m=n/2=150$, n 为时间序列的长度, 利用

$$R_{12}(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left(\frac{x_{1i} - \bar{x}_1}{s_1} \right) \left(\frac{x_{2(i+j)} - \bar{x}_2}{s_2} \right), \quad (1)$$

$$R_{21}(j) = \frac{1}{n-j} \sum_{i=1}^{n-j} \left(\frac{x_{1(i+j)} - \bar{x}_1}{s_1} \right) \left(\frac{x_{2i} - \bar{x}_2}{s_2} \right), \quad (2)$$

式中, $\bar{x}_1$ 、 $\bar{x}_2$ 为 $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$ 的平均值, s_1 和 s_2 是它们的标准差, i 是循环变量, j 是滞后长度, $R_{12}(j)$ 为 x_1 超前 x_2 时间长度为 j 的交叉相关系数, $R_{21}(j)$ 为 x_1 滞后 x_2 时间长度为 j 的交叉相关系数。

利用

$$P_{12}(k) = \frac{1}{m} \left\{ r_{12}(0) + \sum_{j=1}^{m-1} [r_{12}(j) + r_{21}(j)] \cos \frac{k\pi j}{m} + r_{12}(m) \cos k\pi \right\}, \quad (3)$$

$$Q_{12}(k) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^{m-1} [r_{12}(j) - r_{21}(j)] \sin \frac{k\pi j}{m}, (4)$$

得到协谱 $P_{12}(k)$ 和正交谱 $Q_{12}(k)$ ，其中 k 是离散频率的序号。然后对 $P_{12}(k)$ 和 $Q_{12}(k)$ 进行 Han-ning 平滑，分别计算 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的光滑功率谱，得到 $P_{11}(k)$ 和 $P_{22}(k)$ 。将 $P_{12}(k)$ 、 $Q_{12}(k)$ 、 $P_{11}(k)$ 、 $P_{22}(k)$ 代入

$$\theta_{12}(\omega) = \arctan \frac{Q_{12}(\omega)}{P_{12}(\omega)}, (5)$$

$$R_{12}^2(\omega) = \frac{P_{12}^2(\omega) + Q_{12}^2(\omega)}{P_{11}(\omega) \cdot P_{22}(\omega)}, (6)$$

分别得到位相谱和凝聚谱值，其中 ω 是频率。从位相角与周期的关系计算落后时间长度谱：

$$L(k) = \frac{m\theta_{12}(k)}{\pi k}. (7)$$

3 印度洋偶极子指数特征

本文采用 Saji (1999) 的偶极子定义，将赤道西印度洋 (10°S~10°N, 50°E~70°E) 和东南印度洋 (10°S~180°, 90°E~110°E) 海区平均的海表温度距平之差定义为印度洋偶极子指数 (I_{IOD})。

根据 1982~2006 年印度洋偶极子指数 (图略)，确定当年秋季 $I_{IOD} > 0.6\sigma$ 的年份为偶极子正位相年； $I_{IOD} < -0.6\sigma$ 为负位相年。由此得出正位相个例年为 1982、1991、1994、1997、2006 年，负位相个例年为 1990、1992、1996、1998、2005 年。分析正负位相年 IOD 合成指数随时间的变化 (图略) 发现，在正位相年，春季 IOD 发展迅速，秋季达到最强，然后冬季迅速减弱，到次年春季指数已转为负值。负位相年的指数强度相对较弱，维持时间较短，初夏开始明显，在秋季达到最强，次年的春季已经趋于正常。由此可以看出，IOD 发展过程

具有显著的季节锁相特征——春季开始出现、秋季达到盛期、冬季衰亡。这与 Saji et al. (1999)、李崇银和穆明权 (2001)、谭言科等 (2008) 的研究结果一致。

图 1 (见文后彩图) 给出了秋季 IOD 正、负位相年合成的海温距平分布。在正位相年，正的海温距平位于赤道东太平洋和西印度洋，中心位于赤道中东太平洋和中南印度洋；负的海温距平出现在东印度洋到西太平洋海区，中心位于印度尼西亚沿海。负位相年的海温距平场分布相反，强度较弱。这表明：当赤道印度洋偶极子处于正位相时，赤道太平洋海温距平呈现东高西低 (类似 El Niño) 特征；而在赤道印度洋偶极子处于负位相时，赤道太平洋海温距平呈西高东低 (类似 La Niña) 分布形势。有理由认为 IOD 的发生、发展与太平洋海温异常之间存在一定的相互作用。

4 热带太平洋海温与印度洋偶极子的关系分析

4.1 ENSO 指数的定义

为了更好地揭示 IOD 与热带太平洋海温年际异常之间的关系，本文通过二者逐月的时滞相关分析来确定热带太平洋的 IOD 敏感区。图 2 给出 IOD 超前海温 2 个月时， I_{IOD} 与太平洋—印度洋海表温度异常的时滞相关系数分布。二者相关在 IOD 超前海温异常 2 个月时达到最强，由此确定热带太平洋与 IOD 关系紧密的敏感海区 (图 2 中方框所示)。该矩形区域 (5°S~5°N, 175°E~80°W) 平均的海温异常值与 Niño3 指数序列的相关系数高达 0.98，说明 IOD 与 ENSO 关系密切。下文主要以该指数来研究 IOD 与 ENSO 的关系。

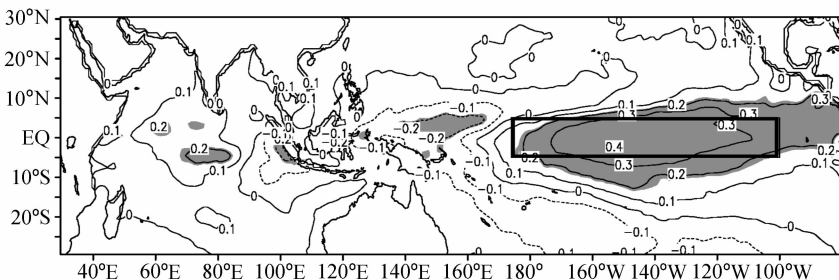


图 2 I_{IOD} 与太平洋—印度洋海表温度异常的时滞相关系数场。矩形：本文定义的热带太平洋 IOD 敏感区域；阴影：通过 99% 信度检验的区域

Fig. 2 Lag correlation between I_{IOD} and SSTA in the Indian Ocean—the Pacific, with I_{IOD} leading SSTA by 2 months. Rectangular denotes sensitive area of IOD in the tropical Pacific; shadows: areas with confidence level exceeding 99%

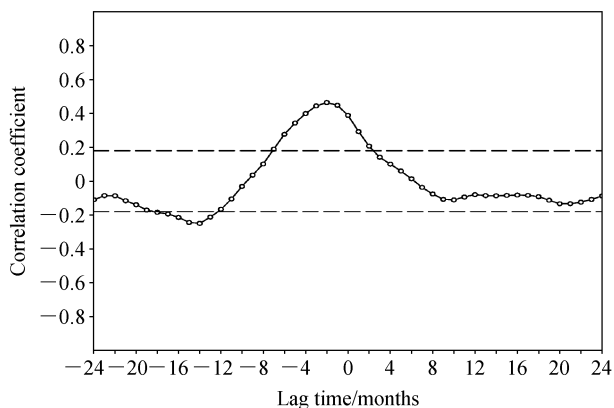


图3 I_{IOD} 与 ENSO 指数的时滞相关图。虚线为 99% 信度检验标准; 月份为负值表示 IOD 变化超前于 ENSO (下同)

Fig. 3 Lag correlation between I_{IOD} and ENSO index. Dashed lines denote test standard of 99% confidence level; negative months, mean that the IOD leads ENSO (the same below)

4.2 印度洋偶极子与 ENSO 的关系

图 3 是 I_{IOD} 与 ENSO 指数的时滞相关系数图, 其中最大超前滞后时间长度为 24 个月。负值表示 IOD 超前于 ENSO, 反之则 ENSO 超前 IOD。由图 3 可见, 当 ENSO 落后 IOD 现象 2 个月时, 两者的相关系数达到最大, 为 0.463, 远超过 99% 的信度检验, 可见两者之间存在较强的正相关性, 即 IOD 正 (负) 位相发生发展常跟随着 El Niño (La Niña) 的发生发展。

然而, 从年际变率的主要周期来看, ENSO 冷暖位相循环主要表现出 2~7 年主周期的变化特征, 而 IOD 的正负位相循环更多地表现为 1~2 年的周期变化。两者变化的主周期并不完全重合, 有必要从多时间尺度的角度来分析研究它们的联系。

本文利用交叉谱方法来探讨 ENSO 和 IOD 两者在不同频域区间上的相关关系。交叉谱分析结果表明, 在小于 10 年的周期段, 通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验的周期为 16~20、30~40、43~53 个月。表 1 给出以上周期对应的滞后时间长度。可以看出, 在 43~53 个月时间尺度上, ENSO 与 IOD 变化的同步相关最好; 但在 16~20、30~40 个月时间尺度上, IOD 变化超前 ENSO 变化 2~4 个月时, 两者相关性最显著。

为了验证交叉谱方法是否有效地检测出 IOD 与 ENSO 变率相关的部分, 我们利用 Butterworth 带通滤波器从 I_{IOD} 中分离去除上述显著相关周期段的海温变率, 然后计算剩余的 I_{IOD} 扰动时间序列与

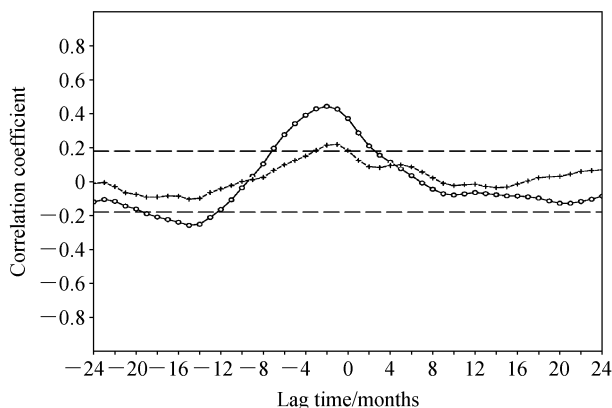


图4 I_{IOD} 与 ENSO 指数的时滞相关图。虚线: 99% 信度检验标准; 圆圈线: 原始 I_{IOD} 的结果; 叉线: I_{IOD} 去除与 ENSO 显著相关的扰动后的结果

Fig. 4 Lag correlation between IOD index and ENSO index. Dashed lines denote test standard of 99% confidence level. Line with circles denotes the correlation coefficient between I_{IOD} and ENSO index, while line with crosses the correlation coefficient between I_{IOD} and ENSO after removing the ENSO-related modes

表 1 IOD 与 ENSO 显著相关的周期及对应的滞后时间

Table 1 Significant periods for the correlation between the IOD and ENSO, and the corresponding lag time

通过 F 显著检验周期/月	滞后时间长度/月
16~20	-3~-4
30~40	-2~-3
43~53	0

ENSO 指数的相关。图 4 表明, 剩余的 I_{IOD} 变率与 ENSO 的相关性显著减弱, 表明采用交叉谱方法比较成功地分离了与 ENSO 相关的 IOD 模态信息。对剩余的 I_{IOD} 小波分析 (图 5) 发现, 在去除上述与 ENSO 相关关系密切的 3 个周期扰动之后, I_{IOD} 仍然还存在通过 95% 信度的准 8 个月周期变率, 而该模态与 ENSO 变率的相关不显著。

从上面的分析, 得到了 IOD 的 4 个周期, 分别是 8、16~20、30~40、43~53 个月。为了证实这 4 个周期的显著性, 我们利用小波做功率谱分析 (图 6)。结果表明: 在年际时间尺度上, 存在着 8 个月、14~20 个月和 32~45 个月的周期变化, 并且这 3 个周期都通过了 5% 的显著性水平检验。而从相对应提出的 4 个不同周期的模态可以看出, 该 4 个周期是显著的。另外, 利用印度洋海温 EOF 第二模态的时间系数定义为 IOD 指数, 同样也得到了准 8 个月、准 1~2 年这两个周期。

根据上面的研究，可以将季节—年际时间尺度上印度洋—太平洋海—气耦合过程进行如下分类（图 7）：一类是 IOD 与 ENSO 相关的模态，另一类是独立于 ENSO 的 IOD 模态。二者相关的模态具

体体现在准 1~2 年、准 3 年、准 4 年三个时间尺度上；IOD 独立于 ENSO 的模态为准 8 个月。下面重点研究上述几类印度洋—太平洋海—气相互作用过程的差异。

4.3 ENSO 与 IOD 相互作用物理过程

IOD 的发生发展与大气风场存在很好的相关关系（Luo et al., 1985）。另外，ENSO 发生的必要条件之一是热带西太平洋出现持续的纬向风异常（张祖强等，2000；Xu and Chan, 2001；Terray and Dominiak, 2005）。巢清尘和巢纪平（2001）指出，赤道东印度洋的西风距平可激发热带西太平洋的西风距平。因此，下面着重从风场与海温耦合的关系来讨论不同时间尺度上 IOD 和 ENSO 之间相互作用的过程。

为了研究各周期上海温和风场之间相互作用的异同，选取 40°E~100°W 范围内特定纬带的平均海温、*u*、*v* 风场做经度一位相图来探讨海温以及风场的位相演变过程。各周期对应的时间序列如图 8（见文后彩图）所示。位相按照常规的余弦波九位相选取（图 9）。海温纬向平均的区域选择如下：120°E 以西，选择 15°S~5°S 作为纬向平均区域；120°E~140°E，在（10°S，120°E）—（0°S~140°E）这一斜线上各取南北 5 个纬度求平均；140°E 以东，取 5°S~5°N 平均。纬向风场平均取赤道附近 5°S~5°N 区域平均；经向风场平均取 15°S~5°N 区域平均。

图 10 给出海温、纬向风经度一位相演变图。单从海温异常位相演变过程来看：在准 4 年时间尺度上，ENSO 与 IOD 几乎同时达到盛期，太平洋和印度洋海温变化基本同步（图 10a）；准 3 年时间尺度上，ENSO 在落后 IOD 约 2 个位相时达到盛期，最先出现异常的区域位于印度尼西亚附近，并且可以看出印度洋上海温异常演变表现出西传特征，而

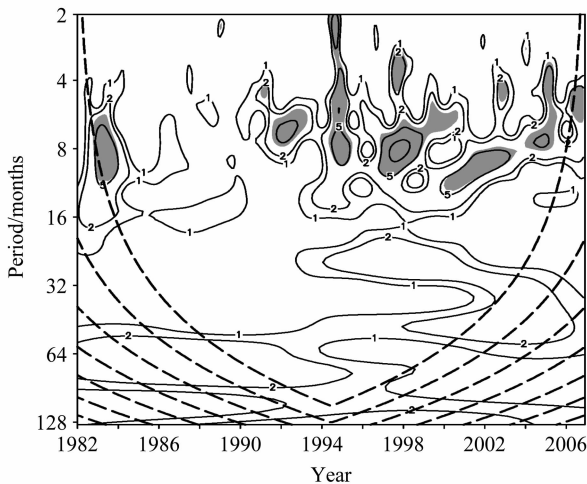


图 5 滤除与 ENSO 显著相关的扰动后 I_{IOD} 的小波分析图。阴影：信度超过 95%；虚线：边界影响区域
Fig. 5 Wavelet spectrum of I_{IOD} with the ENSO-related modes removed. Shadows: areas with confidence level exceeding 95%; dashed lines: area of boundary influence

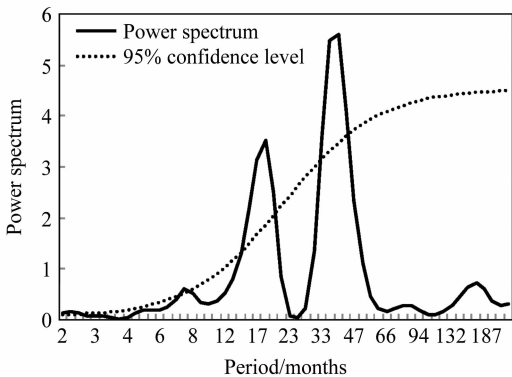


图 6 小波标准化功率谱（印度洋偶极子指数的小波全谱）
Fig. 6 Wavelet spectrum of I_{IOD}

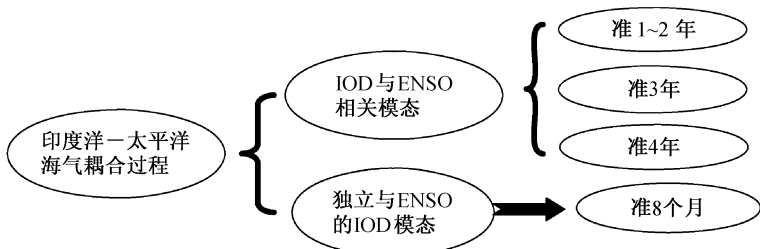


图 7 季节—年际时间尺度上印度洋—太平洋海气耦合过程分类图示

Fig. 7 Classification of ocean-atmosphere interaction processes in the Indian Ocean-the Pacific

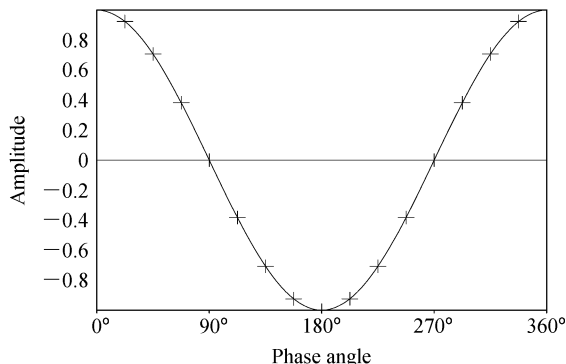


图9 九位相合成图示。叉号表示合成时所选的点

Fig. 9 Nine-phase synthesis graphical representation

太平洋上存在向东传播特征(图 10b); 准 1~2 年时间尺度上, IOD 超前 ENSO 约 3 个位相时达到盛期, 太平洋—印度洋海温异常演变呈准驻波形态(图 10c)。

从图 10 还可以看出, 上述 3 个时间尺度上纬向风异常传播特征的相同之处在于: 印度洋—太平洋上的纬向风场异常总是最先在印度洋上出现, 然后西传至太平洋。由此说明 IOD 事件与 ENSO 事件的联系是通过纬向风异常从热带印度洋向太平洋传播来实现的。纬向风异常传播特征的不同之处在于: 在准 4 年时间尺度上, 印度洋风场异常最先出现在东印度洋, 然后东传到东印度洋, 进而扩展到太平洋; 在准 3 年时间尺度上, 风场异常信息最先出现在东印度洋 90°E 附近, 然后迅速增强并向西传播, 同时也向西太平洋扩展; 而在准 1~2 年时间尺度上, 纬向风场异常几乎在整个热带印度洋上同时出现, 呈驻波的形态, 其中心位于 80°E~90°E 之间, 然后逐渐向西太平洋延伸。

从纬向风与海温的配置关系看, 在上述 3 个时间尺度上存在以下相同特征: 即在一 4 至 -1 位相, 85°E~100°E 的热带东印度洋海温负(正)距平出现后, 在 80°E 附近的赤道印度洋才随之出现纬向东风(西风)异常, 然后热带西印度洋海温出现正(负)距平。更重要的是, 图 10 中热带中西印度洋纬向风传播方向与海温传播方向非常一致, 并且超前于海温的变化。由此推断产生 IOD 年际变率的海气耦合过程为: IOD 的位相转换信号首先表现在印度洋东边一极海温的变化, 然后改变赤道印度洋纬向海温梯度的方向, 进而引起热带纬向风向反转, 纬向风的反转导致西印度洋海温距平的反转。

图 11 给出了经向风与海温的经度一位相演变图。从经向风异常的位相演变看, 在上述 3 个时间尺度上, 当偶极子处于正(负)位相成熟期时, 西印度洋为北(南)风异常, 而东印度洋为南(北)风异常。值得注意的是, 除准 4 年时间尺度模态外, 其余两个时间尺度上东印度洋经向风异常均超前于西印度洋。东印度洋的经向风异常最先出现在 110°E 附近, 随后强度增强并向西扩展。结合海温异常的变化, 可以看出在 80°E 以东, 经向风的变化均超前于海温的变化, 即南风距平出现后才伴有海温负距平, 反之亦然。这种海气耦合关系的产生原因在于南风距平会引发苏门答腊沿岸涌升流, 导致冷海水上翻到表层, 而北风距平引发下沉流, 导致海温正距平出现。

综上所述, 在上述 3 个特征时间尺度上, 引起 IOD 年际变率的海—气耦合关系可以表述如下: 首先是 80°E 以东的经向风异常通过改变苏门答腊沿岸涌升流强弱, 引起 IOD 东边一极的海温异常, 从而改变热带东西印度洋纬向海温梯度方向, 导致热带纬向风距平反向, 进而引起 IOD 西边一极海温的变化。另外, 在这几个时间尺度上, 印度洋海温的变化均超前于热带太平洋海温的变化, 并且 IOD 变率诱发的纬向风距平呈现自印度洋向太平洋传播的特征, 由此说明 IOD 的年际变化对 ENSO 年际变率有一定的贡献。

4.4 IOD 独立模态

图 5 表明, 将 IOD 指数序列去除与 ENSO 有关的变率之后, IOD 指数仍然呈现准 8 个月左右的显著周期。由此对准 8 个月时间尺度上 IOD 事件的海温异常进行合成。由图 12 可见, 在 IOD 的正、负位相成熟期, 热带印度洋海温异常呈现出较典型的偶极分布形式, 而太平洋并没有出现 ENSO 海温分布。由此说明, 在此时间尺度上, IOD 的变化与太平洋 ENSO 无关, 下面着重分析讨论其相应的海—气相互作用特征。

图 13a 给出准 8 个月时间尺度上, 位相合成的海温、纬向风异常经度一位相演变图, 选取的纬度平均区域同图 10。从图 13a 中可以看到: 在热带印度洋上, 准 8 个月周期的海温、纬向风位相演变过程与准 1~2 年周期的类似——纬向风场异常几乎在同一时刻爆发, 其中心位于 80°E 附近, 呈驻波的形态。但是, 在热带太平洋区域则不同: 在准 1~2

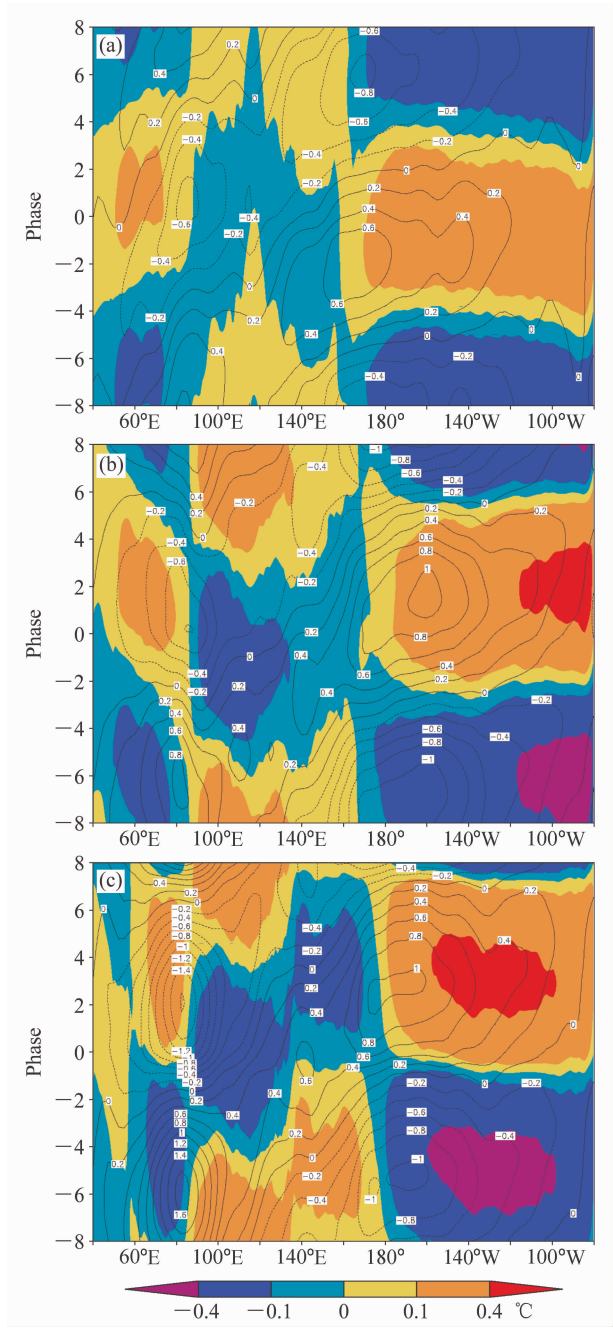


图 10 海洋表面温度距平 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、纬向风距平 (等值线, 单位: m/s) 经度—位相演变图: (a) 准 4 年; (b) 准 3 年; (c) 准 1~2 年。纵坐标轴: 0 为 IOD 正位相成熟期, -8、8 为 IOD 负位相成熟期。(下同)

Fig. 10 Longitude-phase variations of SSTA (shaded) and u -wind anomaly (contour, units: m/s) at (a) quasi-4 year, (b) quasi-3 year, and (c) quasi-1-2 year time scales. Ordinate: 0 phase is the mature period of positive phase, -8 and 8 are the mature periods of negative phases. (The same below)

年时间尺度上, 印度洋上生成的纬向风异常有明显的东传至中东太平洋的现象, 而准 8 个月时间尺度

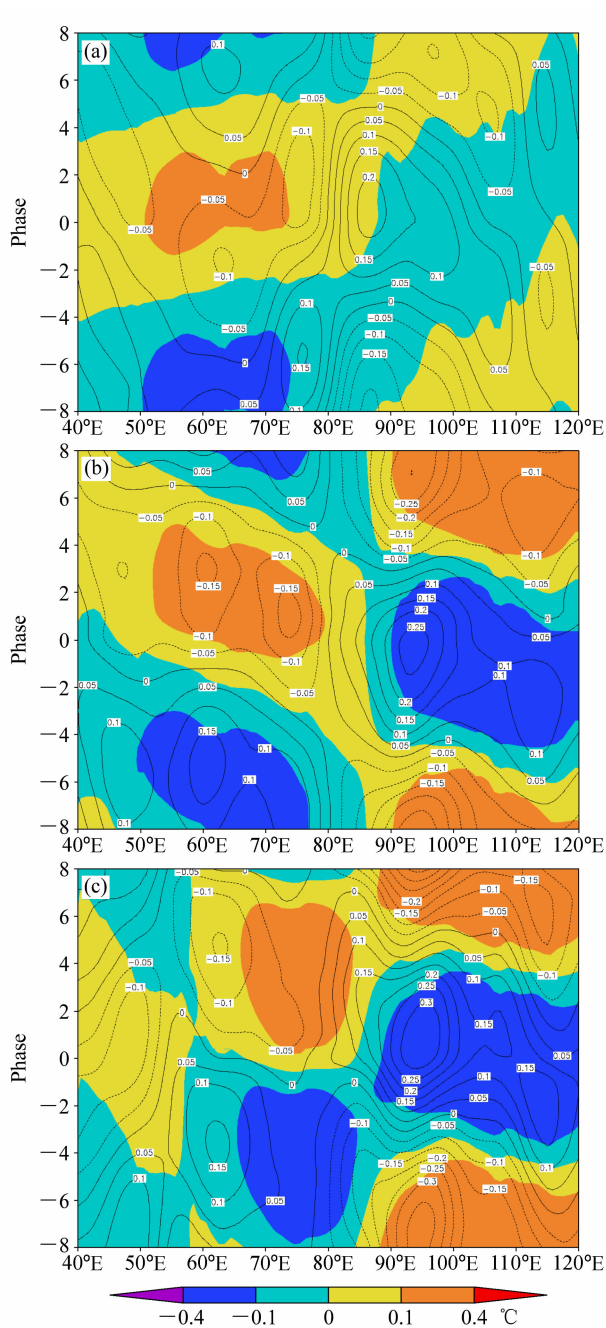


图 11 海洋表面温度距平 (阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$)、经向风距平 (等值线, 单位: m/s) 经度—位相演变图。其余同图 10

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for longitude-phase variations of SSTA (shaded) and v -wind anomaly (contour, units: m/s)

上, 来自印度洋上的纬向风场异常仅仅传播至 140°E 附近就减弱消失。这很可能就是导致太平洋上没有 ENSO 发生的重要原因。

图 13b 给出了相应的经向风与海温的经度—位相演变图。在 100°E 以西的印度洋海区, 准 8 个月周期的经向风异常演变过程也与准 1~2 年周期

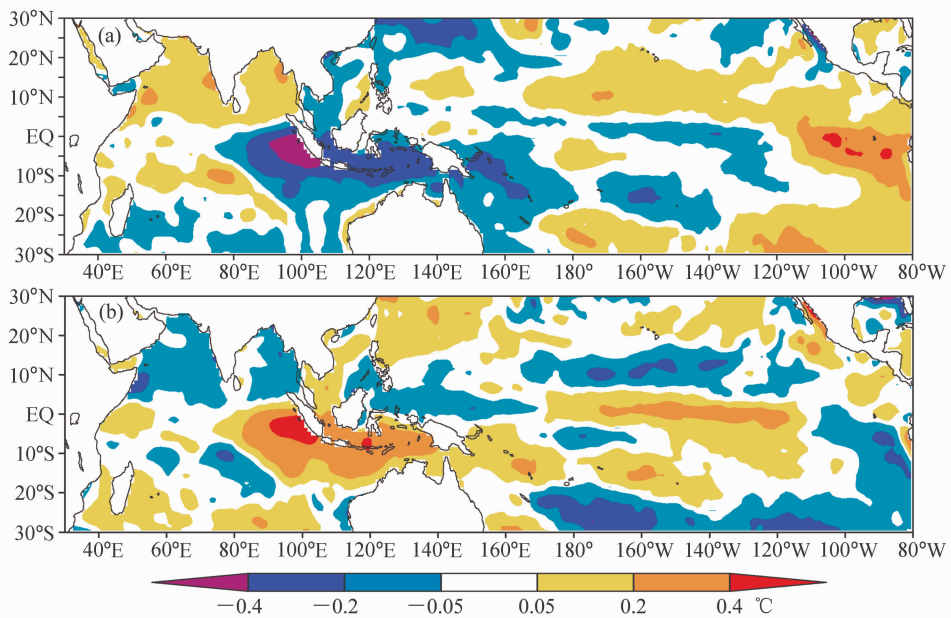


图 12 准 8 个月时间尺度上的海洋表面温度异常分布图: (a) 偶极子正位相成熟期; (b) 偶极子负位相成熟期

Fig. 12 Distributions of SSTA at the quasi-8 month time scale; (a) The mature phase of positive IOD; (b) the mature phase of negative IOD

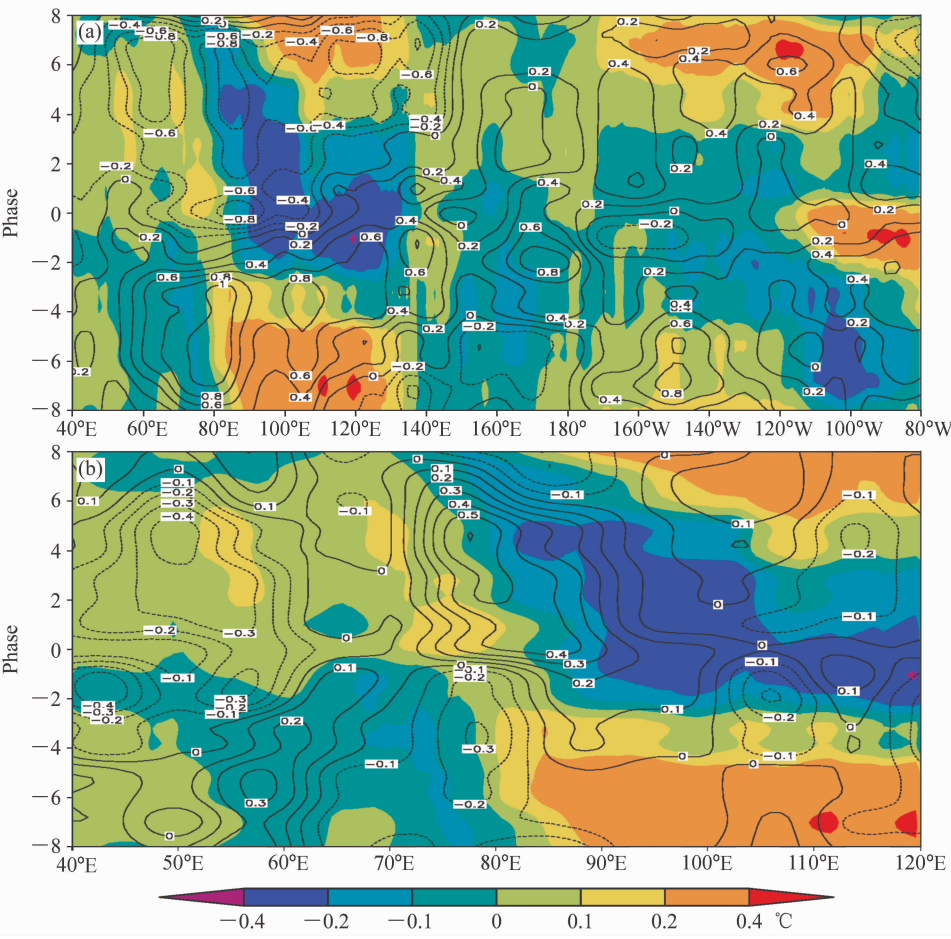


图 13 准 8 个月周期的海洋表面温度距平 (阴影) 和 (a) 纬向风、(b) 经向风距平 (等值线, 单位: m/s) 的经度一位相演变图

Fig. 13 Longitude-phase variations of SSTA (shaded) and (a) u , (b) v anomalies (contours, units: m/s) at the quasi-8 month time scale

的一致, 呈驻波的形态分布。与图 12 对比, 经向风异常中心位置偏东, 位于 80°E 附近。在偶极子正位相期间, 西(中)印度洋风场异常分别对应北(南)风异常; 反之亦然。在 100°E 以西, 经向风异常变化超前海温异常场的变化, 即南风距平超前于海温负距平, 北风超前于海温正距平。由此说明, 在准 8 个月周期上, IOD 事件的海气耦合过程与前述的准 1~2 年周期的耦合过程相似。

5 结论

本文通过交叉谱诊断分析方法, 将 IOD 变率中与 ENSO 有关和无关模态的分离, 进而通过对海气耦合过程的初步分析, 讨论了不同时间尺度上 IOD 与 ENSO 的相互作用, 得到以下结论:

(1) 利用相关分析和交叉谱方法, 可以将太平洋—印度洋海气耦合过程分为 2 类, 一类是 IOD 与 ENSO 的相关模态, 一类是独立于 ENSO 的 IOD 模态。相关模态分为准 1~2 年、准 3 年、准 4 年; 独立模态为准 8 个月。

(2) 在 IOD 变率与 ENSO 变率相关的 3 个时间周期上, 印度洋与太平洋海气耦合过程基本相似: 80°E 以东的经向风变化引起 IOD 东边一极海温变化, 进而改变东西印度洋纬向海温梯度反向, 导致纬向风距平反向, 进而引起 IOD 西边一极海温的变化。在这几个时间尺度上, 印度洋海温的变化均超前于热带太平洋海温的变化, 并且西印度洋上生成的纬向风距平都呈现向热带太平洋传播的特征, 说明 IOD 的年际变率对 ENSO 年际变率有一定的贡献。

(3) 在 IOD 变率与 ENSO 变率相关的 3 个时间周期上, 印度洋与太平洋海气耦合过程的差异主要体现在 IOD 与 ENSO 成熟位相之间的滞后时间长度以及风场—海温场位相演变上。其中在准 4 年时间尺度上, 印度洋风场异常最先出现在东印度洋, 然后东传到东印度洋和太平洋; 在准 3 年时间尺度上, 风场异常最先出现在东印度洋 90°E 附近, 然后迅速增强并向东西两侧传播; 而在准 1~2 年时间尺度上, 纬向风场异常几乎在整个热带印度洋上同时出现, 呈驻波的形态, 然后逐渐向西太平洋延伸

(4) 准 8 个月周期上, 印度洋海温出现了偶极子现象, 但并无 ENSO 事件的伴随。通过相应的纬

向风场异常分析, 发现印度洋风场异常无东传现象。这可能是造成无 ENSO 现象发生的一个重要原因。

通过以上分析, 说明 IOD 年际变率在准 1~2 年、准 3 年、准 4 年三个时间尺度上与 ENSO 相关, 而且 IOD 的变化均超前于 ENSO 的变化, 而且这种相关关系是通过与 IOD 有关的热带印度洋纬向风异常东传实现的。这一结论较好地解释了在 IOD 指数超前于 Niño3.4 指数 2 个月时二者相关最显著的结果(见图 3; 张福颖等, 2008)。目前的研究只是表明 IOD 的年际变化超前于 ENSO 的变化, 说明 IOD 的年际变率未必就是热带印度洋对 ENSO 的响应, 但尚不足以证实就是 IOD 的变化引起了 ENSO 的变化。此外, IOD 还存在准 8 个月的变率, 这一模态与 ENSO 无关, 是印度洋海气相互作用的结果, 也意味着印度洋存在某种 IOD 的自维持机制。对于形成 IOD 年际变率的原因, 对于上述三个年际变化时间尺度上印度洋海气耦合过程的差异以及印度洋 IOD 的自维持机制等关键问题, 目前尚不清楚, 这都是下一步研究的重点。

参考文献 (References)

- Ashok K, Guan Z, Yamagata T. 2003. A look at the relationship between the ENSO and the Indian Ocean dipole [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81 (1): 41–56.
- Behera S K, Salvekar P S, Yamagata T. 2000. Simulation of interannual SST variability in the tropical Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 13 (19): 3487–3499.
- Behera S K, Luo J, Masson S, et al. 2006. A CGCM study on the interaction between IOD and ENSO [J]. *J. Climate*, 19 (9): 1688–1705.
- 巢纪平, 袁绍宇. 2003. 热带印度洋和太平洋海气相互作用事件间的联系 [J]. *自然科学进展*, 11 (12): 1280–1285.
- Chao Jiping, Yuan Shaoyu. 2003. Connection between the ocean–atmosphere interactions of the tropical Indian Ocean and the Pacific Ocean [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 11 (12): 1280–1285.
- 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 [J]. *气象学报*, 61 (2): 508–512.
- Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Cai Yi. 2003. The large-scale air–sea interaction events in the tropical Indian Ocean [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 61 (2): 508–512.
- 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 [J]. *自然科学进展*, 11 (12): 1293–1300.
- Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. The influence of the tropical west-

- ern Pacific and eastern Indian Ocean on the development of ENSO [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 11 (12): 1293 – 1300.
- 陈敬阳, 孙照渤. 1993. 热带西太平洋和印度洋海表温度的时空分布特征 [J]. *南京气象学院学报*, 16 (1): 41 – 47. Chen Jingyang, Sun Zhaobo. 1993. Features of the SST time – space distribution in the tropical western Pacific and the Indian Ocean [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 16 (1): 41 – 47.
- 陈烈庭. 1991. 阿拉伯海 – 南海海温距平纬向差异对长江中下游降水的影响 [J]. *大气科学*, 15 (1): 33 – 42. Chen Lieting. 1991. Effect of zonal difference of sea surface temperature anomalies in the Arabian Sea and the South China Sea on summer rainfall over the Yangtze River [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 15 (1): 33 – 42.
- Du Y, Xie S P. 2008. Role of atmospheric adjustments in the tropical Indian Ocean warming during the 20th century in climate models [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35, L08712, doi: 10.1029/2008GL033631.
- Hendon H H. 2003. Indonesian rainfall variability: Impacts of ENSO and local air – sea interaction [J]. *J. Climate*, 16 (11): 1775 – 1790.
- Kawamura R, Matsuura T, Iizuka S. 2001. Role of an equatorially asymmetric mode in the Indian Ocean in the Asian summer monsoon ENSO coupling [J]. *J. Geophys. Res.*, 106: 4681 – 4693.
- Lau N C, Nath M J. 2004. Coupled GCM simulation of atmosphere – ocean variability associated with the zonally asymmetric SST changes in the tropical Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 17 (2): 245 – 265.
- 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 [J]. *大气科学*, 25 (4): 433 – 443. Li Chongyin, Mu Mingquan. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (4): 433 – 443.
- 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 [J]. *科学通报*, 46 (20): 1747 – 1751. Li Chongyin, Mu Mingquan, Panjing. 2001. The dipole in the equatorial Indian Ocean and SST anomaly in the Pacific Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 46 (20): 1747 – 1751.
- 李东辉, 俞永强, 刘海龙, 等. 2005. FGCM-1.0 耦合模式对热带印度洋偶极子的模拟 [J]. *自然科学进展*, 15 (10): 1230 – 1236. Li Donghui, Yu Yongqiang, Liu Hailong, et al. 2005. The simulation of the tropical Indian Ocean dipole by means of FGCM-1.0 coupled mode [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 15 (10): 1230 – 1236.
- 李国庆. 1982. 亚洲季风区经度范围内低纬地区环流变化的一些关联现象 [J]. *大气科学*, 6 (1): 95 – 102. Li Guoqing. 1982. Some correlation phenomena of the low latitude circulation over the Asian summer monsoon area and the Southern Hemisphere [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 6 (1): 95 – 102.
- Li T, Zhang Y, Lu E, et al. 2002. Relative role of dynamic and thermodynamic processes in the development of the Indian Ocean dipole: An OGCM diagnosis [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (23): 251 – 253.
- 刘娜, 陈红霞, 陈显尧, 等. 2005. 印度洋海温偶极子型振荡与热带太平洋之间的对流层遥相关模态及相应的机制解释 [J]. *科学通报*, 50 (17): 1893 – 1897. Liu Na, Chen Hongxia, Chen Xian-yao, et al. 2005. The interpretation of tropospheric teleconnection mode and its mechanism between Indian Ocean dipole and tropical Pacific [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 50 (17): 1893 – 1897.
- 罗绍华, 金祖辉, 陈烈庭. 1985. 印度洋和南海海温与长江中下游降水的相关分析 [J]. *大气科学*, 9 (3): 314 – 320. Luo S, Jin Z, Chen L. 1985. Correlation analysis of the sea surface temperature in the Indian Ocean/ the South China Sea and the precipitation in the middle-lower reaches of the Changjiang River [J]. *Chinese J. Atmos. Sci. (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 9 (3): 314 – 320.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360 – 363.
- Saji N H, Yamagata T. 2003. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean dipole mode events: COADS observations [J]. *J. Climate*, 16 (16): 2735 – 2751.
- 谭言科, 刘会荣, 李崇银, 等. 2008. 热带印度洋偶极子的季节性位相锁定可能原因 [J]. *大气科学*, 32 (2): 197 – 205. Tan Yanke, Liu Huirong, Li Chongyin, et al. 2008. Possible causes for seasonal phase locking of the tropical Indian Ocean dipole [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 197 – 205.
- Terray P, Dominiak S. 2005. Indian Ocean sea surface temperature and El Niño – Southern Oscillation: A new perspective [J]. *J. Climate*, 18 (9): 1351 – 1368.
- Wajswicz R C, Schneider E K. 2001. The Indonesian throughflow's effect on global climate determined from the COLA coupled climate system [J]. *J. Climate*, 14: 3029 – 3042.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean – atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997 – 98 [J]. *Nature*, 401: 356 – 360.
- 王东晓, 刘赞, 刘钦燕, 等. 2003. 1997~1998 年 El Niño 期间印度洋和西太平洋上层海洋的联系 [J]. *自然科学进展*, 13 (9): 957 – 963. Wang Dongxiao, Liu Yun, Liu Qinyan, et al. 2003. The relationship between Indian Ocean and western Pacific upper marine during El Niño in 1997 – 1998 [J]. *Progress in Natural Science (in Chinese)*, 13 (9): 957 – 963.
- Xie S P, Hu K, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730 – 747.
- Xu J, Chan J C L. 2001. The role of the Asian – Australian mon-

soon system in the onset time of El Niño events [J]. J. Climate, 14 (3): 418–433.

殷永红, 史历, 倪允琪. 2001. 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 [J]. 大气科学, 25 (3): 355–371. Yin Yonghong, Shi Li, Ni Yunqi. 2001. A diagnosis of interactions between the tropical Indian Ocean and Pacific Ocean air–sea systems in the past 20 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (3): 355–371.

Yu L S, Reinecker M M. 1999. Mechanisms for the Indian Ocean warming during the 1997–98 El Niño [J]. Geophys. Res. Lett., 26: 735–738.

杨辉, 贾小龙, 李崇银. 2006. 热带太平洋–印度洋海温异常综合模及其影响 [J]. 科学通报, 51 (17): 2085–2090. Yang Hui, Jia Xiaolong, Li Chongyin. 2006. The combined SST anomaly mode of the tropical Pacific–Indian Ocean and its impacts [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (17): 2085–2090.

袁媛, 李崇银. 2008. 热带印度洋偶极子与 ENSO 事件关系的年代际变化 [J]. 科学通报, 53 (12): 1429–1436. Yuanyuan, Li Chongyin. 2008. Inter-decadal variations in the relationship between the dipole mode in the tropical Indian Ocean and ENSO events [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 53 (12): 1429–1436.

张祖强, 丁一汇, 赵宗慈. 2000. ENSO 发生前与发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题 [J]. 气象学报, 58 (11): 11–25. Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2000. On the westerly wind outbursts in equatorial western Pacific during the onset and development phases of ENSO and before [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (11): 11–25.

张福颖, 郭品文, 于群, 等. 2008. 热带太平洋与印度洋相互作用的年代际变化 [J]. 南京气象学院学报, 31 (1): 68–74. Zhang Fuying, Guo Pinwen, Yu Qun, et al.. 2008. The interdecadal variability of the interaction between the tropical Pacific and Indian Ocean [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31 (1): 68–74.

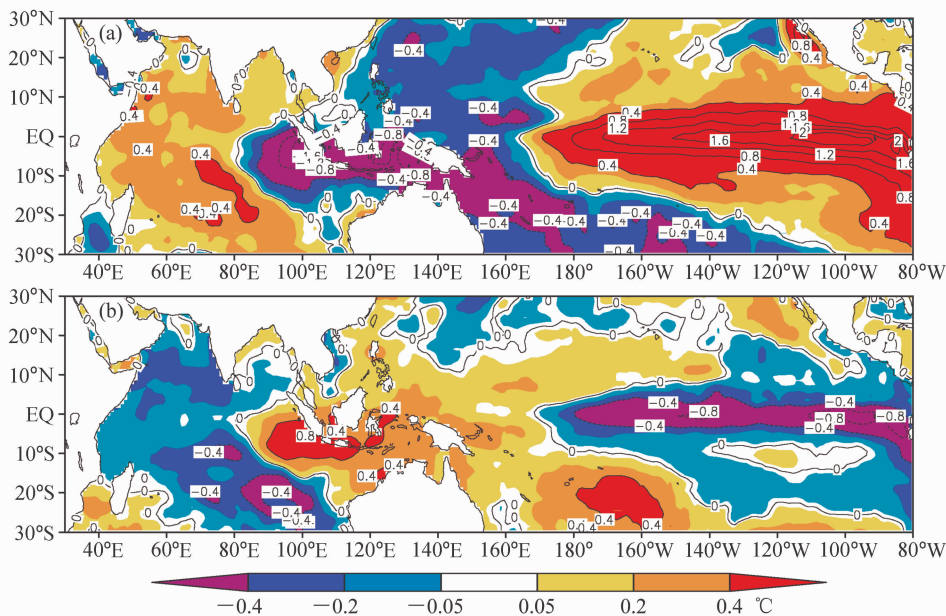


图 1 IOD 年秋季海表温度距平合成分布图 (单位: $^{\circ}\text{C}$): (a) 正位相; (b) 负位相

Fig. 1 Composites of SST anomalies (SSTA) in autumn in (a) positive and (b) negative Indian Ocean Dipole (IOD) events

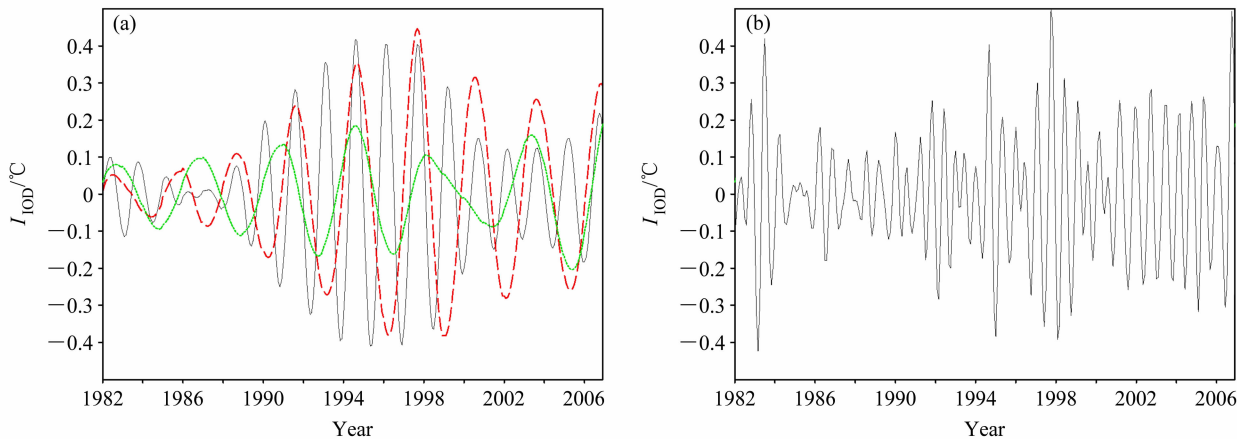


图 8 1982~2006 年 I_{IOD} 的时间序列: (a) 黑线为准 1~2 年周期, 红线为准 3 年周期, 绿线为准 4 年周期; (b) 准 8 个月周期

Fig. 8 The time series of I_{IOD} from 1982 to 2006: (a) Quasi-1~2 year period (black line), quasi-3 year period (red line), quasi-4 year period (green line); (b) quasi-8 month period