

刘琳, 于卫东, 刁新源, 等. 热带印度洋偶极子事件期间印度洋大气的变化——大气流函数场和势函数场的分析. 大气科学, 2008, **32** (5): 1083~1093

Liu Lin, Yu Weidong, Diao Xinyuan, et al. Variability of tropical Indian Ocean atmosphere during tropical Indian Ocean dipole mode event—The analysis of the stream function and the potential velocity of the wind field. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1083~1093

热带印度洋偶极子事件期间印度洋大气的变化 ——大气流函数场和势函数场的分析

刘琳 于卫东 刁新源 郭景松

1 国家海洋局第一海洋研究所, 青岛 266061

2 国家海洋局海洋环境科学和数值模拟重点实验室, 青岛 266061

摘 要 大气环流的变异是热带印度洋偶极子 (IOD) 事件研究中的一个重要问题。本文从风场旋度分量和散度分量角度出发, 利用观测资料和大气环流模式, 对 IOD 事件发生时热带印度洋海区上空的大气环流变化进行了分析, 揭示出风场不同分量在 IOD 事件期间的变化特征。研究结果表明, 热带印度洋大气环流系统在 IOD 事件期间, 旋度分量和散度分量在垂直方向上呈现明显的一阶斜压形式, 而在水平方向上呈现明显的对称分布特征。对低空 (850 hPa) 来说, 无辐散流函数距平场在 IOD 事件正位相期间表现为关于赤道对称的一对反气旋式环流; 无旋度分量在 IOD 事件正位相期间的响应表现为东印度洋辐散、西印度洋辐合; 大气环流的两种分量场均可以在赤道印度洋地区产生距平意义下的纬向东风, 正是这种形式的距平东风使得 IOD 事件依靠海气系统正反馈机制得以维持和发展。而高空 (200 hPa) 大气环流形式刚好与 850 hPa 相反。

关键词 印度洋偶极子事件 EOF 分析 流函数 势函数 大气环流模式

文章编号 1006-9895 (2008) 05-1083-11

中图分类号 P732

文献标识码 A

Variability of Tropical Indian Ocean Atmosphere during Tropical Indian Ocean Dipole Mode Event—The Analysis of the Stream Function and the Potential Velocity of the Wind Field

LIU Lin, YU Weidong, DIAO Xinyuan, and GUO Jingsong

1 First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061

2 Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061

Abstract The atmosphere circulation variability is one of the fundamental problems in the researches on the tropical Indian Ocean Dipole (IOD) mode event. The authors analyze the variability of the wind vorticity field and divergence field during IOD event based on the observation and the numerical model. The result indicates that both the divergent and rotational parts of the wind field present the first order baroclinic pattern in the vertical direction and symmetric pattern in the horizontal direction respectively. In the lower atmosphere, the rotational part shows a pair of

收稿日期 2007-01-08, 2007-06-01 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40506012、40706014, 国家重点基础研究发展规划项目 2006CB403602, 基本科研业务费专项资金项目 2007B04

作者简介 刘琳, 男, 1978 年出生, 助理研究员, 主要从事热带海气相互作用研究。E-mail: liul@fio.org.cn

symmetric anticyclones around the equator during the positive phase of IOD event and the divergent part shows the divergence in the eastern Indian Ocean and the convergence in the western Indian Ocean. Both the divergent part and the rotational part could generate zonal easterly wind above the equator region in the tropical Indian Ocean, which supports the air-sea positive feedback mechanism. The upper circulation is just reversed with the lower one.

Key words the Indian Ocean dipole mode event, EOF analysis, stream function, velocity potential, atmosphere general circulation model

1 引言

1961 年,太平洋上并没有发生 ENSO 事件,但却是印度季风降水有记录以来最强的^[1],与此同时,非洲东部地区也出现了强降水事件,导致尼罗河下游泛滥成灾;1997 年秋季开始,热带太平洋地区出现了 20 世纪以来最强的 ENSO 事件,可是印度大陆的季风降水却并没有出现大的异常,非洲却出现了洪灾,印度尼西亚地区则出现了罕见的干旱天气^[2]。通过研究,人们逐渐认识到这是印度洋偶极子事件 (IOD) 所带来的变化。IOD 事件是指发生在热带印度洋海表温度的东西方向反位相分布,当东印度洋海表温度增加的时候,西印度洋的海表温度会降低,同时伴随有赤道印度洋上空强烈的东风距平^[3~7]。与 ENSO 事件相仿,IOD 事件也存在年际和年代际的变化^[8~10],对全球气候变化产生重要作用^[11~16]。虽然一些学者^[17~20]对 IOD 事件是否存在提出了质疑,但是更多的学者通过观测资料分析、数值模式模拟等各种手段,对发生在热带印度洋的大气和海洋物理场进行分析,验证了 IOD 事件的客观存在^[21]。

IOD 事件海洋方面的研究主要集中在热带印度洋表层与次表层的温度、深度变化^[22~28];而大气方面的研究主要集中在低空风场以及纬向的 Walker 环流上^[2, 21, 29, 30],前人对于大气环流在 IOD 事件期间的响应,着重分析了纬向风场的变化^[2, 15, 21]。例如,李崇银等^[11]通过合成分析,研究了 IOD 事件盛期热带印度洋的低空风场变化特征,揭示出热带印度洋低空风场在 IOD 事件正/负位相期间呈现距平东/西风^[2]。于卫东等^[31]指出,热带大气的运动与中高纬度大气运动不同,大气散度分量扮演了重要角色,因此采用散度分量和旋度分量来分析大气运动能得到更加明确、简洁的结果。可是,前人的研究并没有过多考虑大气的无辐散分量和无旋度分量的变化特征^[29, 32, 33]。谭言科等^[32]简

单给出了热带印度洋大气无辐散分量在 IOD 事件期间的表现形式;巢纪平等^[29]通过相关分析对大气的无辐散分量和无旋度分量进行了研究;Ashok 等^[33]则对 IOD 事件发生时的大气势函数与流函数进行了合成分析,结果发现,无论是纯 IOD 事件 (Pure IOD event) 还是伴随 ENSO 循环发生的 IOD 事件都对应着一个异常 Walker 环流,即热带东印度洋低空的辐散运动、西印度洋低空的辐合运动,可是,文中并没有详细对大气流函数与势函数场进行分析,也没有通过数值模式对此进行进一步验证。

前人研究只关注了合成分析以及相关分析,并没有从大气流函数和势函数本征模态方面进行研究,而且也没有利用数值模式对大气流函数和势函数在 IOD 事件发生期间的响应进行分析。那么,热带印度洋大气流函数和势函数的本征模态是什么?与前人合成分析以及相关分析的结果有何关系?这些都是需要回答的问题。为了更清楚地了解 IOD 事件发生期间热带印度洋大气风场无辐散分量与无旋度分量的变化特征,本文利用观测资料以及大气环流模式,对分解得到的大气不同分量进行分析。从合成分析、相关分析以及模态分析入手,研究 IOD 事件发生期间热带印度洋大气风场无辐散分量与无旋度分量的变化特征。

2 数据和方法

风场资料使用的是美国国家环境预报中心与美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析资料中的风场数据,空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,资料长度从 1948 年 1 月到 2000 年 12 月;海表温度 (SST) 数据采用哈德莱 (Hadley) 数据中心的 HadISST 温度数据,空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$,资料长度选取从 1948 年 1 月到 2000 年 12 月。

利用于卫东等^[31]使用的风场分解方法,将大气风场资料分解为无旋度分量和无辐散分量进行研

究。为了滤除季节变化对于年际变化的影响，所使用的数据均为扣除了气候态平均值之后得到的距平数据。

LMDZ 大气环流模式是由 Sadourny 等^[34]发展的一个法国动力气象实验室的格点大气环流模式，它的动力框架是建立在球坐标基础之上的原始方程模式，利用了 Arakawa C 网格技术来进行差分。它包括了一整套完整的物理过程参数化方案，其中包括了湍流，积云对流的处理以及辐射传输，云和降水等具体的方案。本文使用的模式分辨率为 $5^{\circ} \times 4^{\circ}$ ，垂直方向为 15 层，采用 sigma 坐标，分别表示 1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、10 hPa。该模式有着几个重要的特征：(1) 模式的总质量守恒；(2) 如果没有加热，位焓守恒；(3) 总能量守恒；(4) 在正压和质量辐散趋势消亡的情况下，位熵守恒。

3 观测资料分析

3.1 相关分析

首先，对大气 850 hPa 和 200 hPa 流函数距平 (SFA) 场与偶极子事件指数 (DMI) ^[2] 进行同期相关分析。大气 850 hPa 流函数距平场与 DMI 的同期相关 (图 1)，以及和 200 hPa 高度上流函数距平 (VPA) 场与 DMI 的同期相关 (图略) 揭示了如下

的几个特点：在 850 hPa 和 200 hPa 两个高度层上南、北印度洋区域的相关系数反号，意味着气旋式或反气旋式距平风场总是在赤道两侧相伴出现；在南、北印度洋区域 850 hPa 和 200 hPa 高度上的相关系数反号，而且这种反位相关系在南印度洋表现的更加明显，意味着 Walker 环流的低空和高空分支协调一致的变化，即当低空出现东风距平时必然伴随着高空西风距平的发生；在 850 hPa 高度上，南印度洋的相关强于北印度洋，同样的形式也反映在 200 hPa 高度上，南印度洋的相关性要强于北印度洋；对于大气势函数距平场与 DMI 的同期相关来说，在两个高度层上东、西印度洋区域的相关系数反号，这意味着辐合或辐散距平风场总是在热带东、西印度洋相伴出现；在东、西印度洋区域 850 hPa 和 200 hPa 高度上的相关系数反号，意味着 Walker 环流的低空和高空分支的协调一致的变化，即当低空出现东风距平时必然伴随着高空西风距平的发生；并且，无论是低空还是高空，东印度洋上空的相关系数要强于西印度洋，呈现出东西不对称分布。

3.2 流函数和势函数场主要模态分析

对印度洋 850 hPa 流函数距平场和势函数距平场进行经验正交 (EOF) 分解，研究各自本征模态的时空分布特征。大气流函数和势函数 EOF 第一

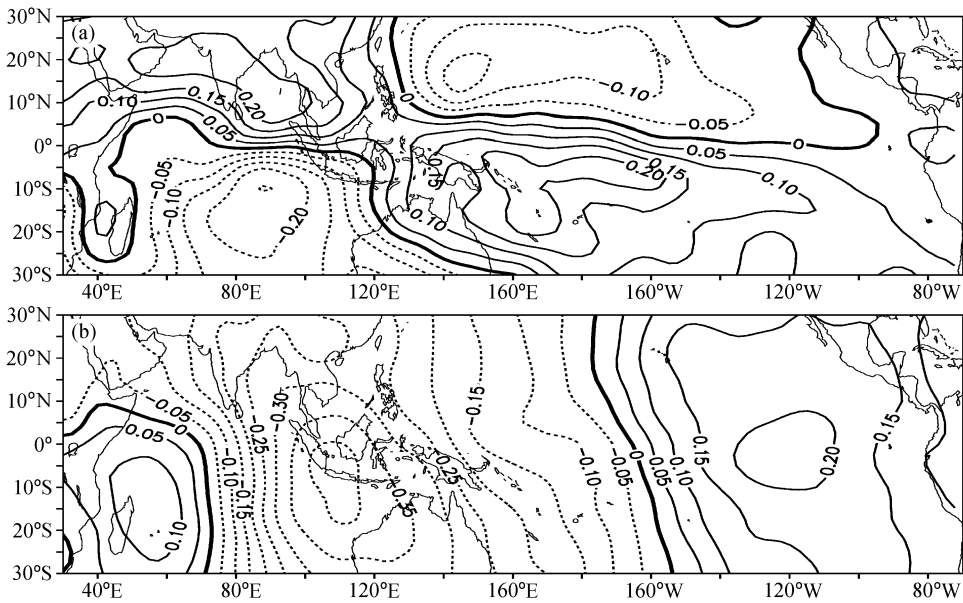


图 1 大气 850 hPa (a) 流函数距平场、(b) 势函数距平场与 DMI 的同期相关
Fig. 1 (a) Correlation between stream function anomaly field at 850 hPa and DMI (Dipole Mode Index); (b) correlation between velocity potential anomaly field at 850 hPa and DMI

特征向量(图略)和第二特征向量空间分布和对应的时间系数分别列在了图 2、3 之中。

流函数 EOF 分解第一特征向量(方差贡献为 36%) 空间分布主要反映了全场一致变化的特性;

第二特征向量空间分布则表现出关于赤道对称的一对反气旋(气旋)式环流特征, 赤道北部的反气旋(气旋)中心主要处在孟加拉湾北部地区, 赤道南部的反气旋(气旋)中心主要处在东南印度洋海

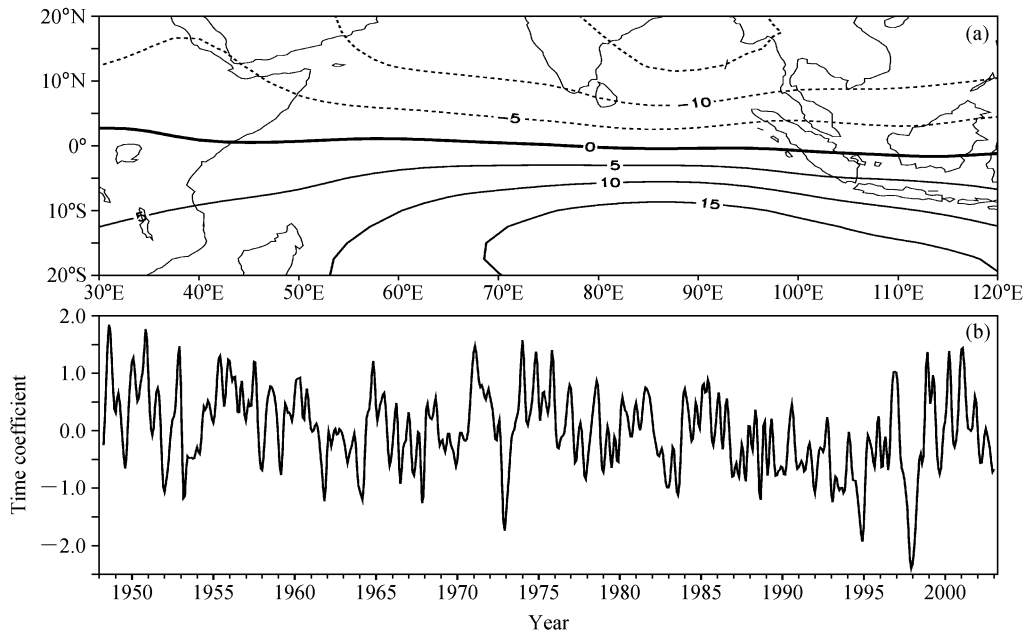


图 2 印度洋海区 850 hPa 流函数距平场的 (a) EOF 第二特征向量(单位: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) 以及 (b) 相对应的时间序列。方差贡献为 13%
Fig. 2 The EOF2 (the second mode of Empirical Orthogonal Function) of stream function anomaly field ($10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) in the tropical Indian Ocean (a) and the corresponding time series (b). Variance contribution is 13%

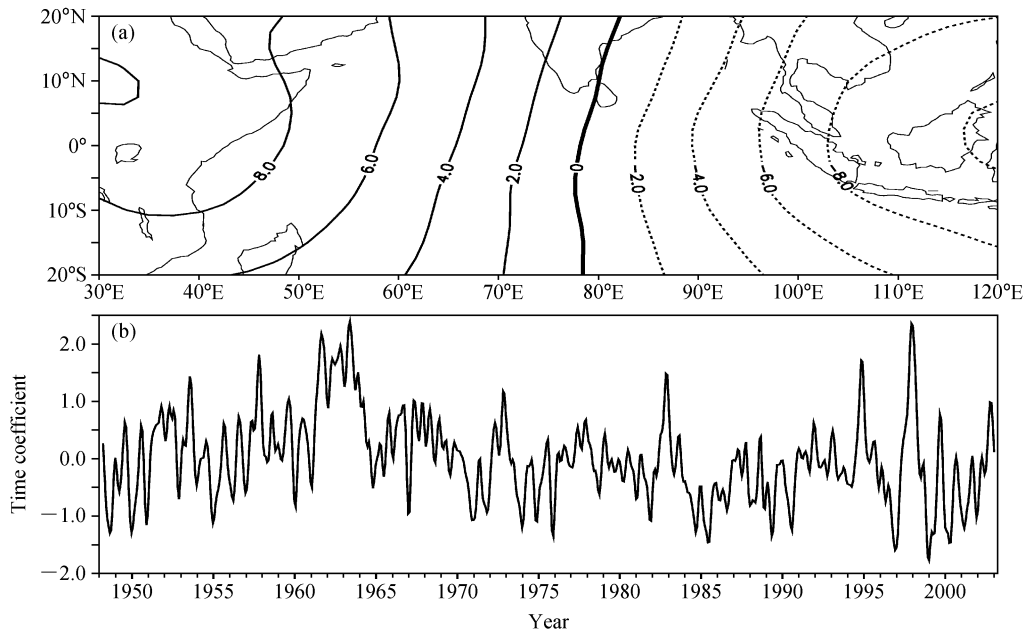


图 3 印度洋海区 850 hPa 势函数距平场的 (a) EOF 空间第二模态(单位: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) 以及 (b) 相对应的时间序列。方差贡献为 21%
Fig. 3 The EOF2 of velocity potential anomaly field ($10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) in the tropical Indian Ocean (a) and the corresponding time series (b). Variance contribution is 21%

区，与合成分析的结果^[32]相符合。势函数 EOF 第一特征向量（方差贡献为 28%）空间分布也给出了全场一致变化的形式，全场均为辐散（辐合）场，并且最大辐散中心处在海洋性大陆之上；而第二特征向量空间分布则给出了东西反位相分布特征，对应着东印度洋低空出现辐散下沉（辐合上升）运动，西印度洋则伴随着强烈的辐合上升（辐散下沉）运动，赤道中部海区因此出现了相对应的辐散东（西）风距平。从 EOF 分析结果来看，流函数场和势函数场第一特征向量空间分布与海表温度第一特征向量空间分布相符合^[35]，而各自的第二特征向量空间分布和海表温度第二特征向量空间分布相匹配。

表 1 给出了热带印度洋低空（850 hPa）流函数、势函数距平场和海表温度场 EOF 第一、二特征向量对应时间系数的同期相关系数。可以看到，热带印度洋低空流函数、势函数 EOF 第一模态时间系数与海表温度 EOF 第一模态时间系数相关性较高，相关系数分别为 -0.48、-0.38，超过了 99% 的显著性检验标准；高相关性表明热带印度洋低空流函数和势函数年际变化主要模态反映了 ENSO 循环信息（因为热带印度洋海表温度 EOF 第一特征向量主要反映了 ENSO 信息）。另外，流函数和势函数之间的第一模态时间系数相关值达到了 0.49，超过了 99% 的显著性检验标准。热带印度洋低空流函数、势函数 EOF 第二模态和海表温度第二模态时间系数的相关性也较高，分别达到了 0.32、-0.31，而流函数第二模态和势函数第二模态之间的相关系数达到了一 0.60，均超过了 99% 的

表 1 热带印度洋海表温度距平 (SSTA)、850 hPa 流函数距平 (SFA) 与势函数距平 (VPA) 的 EOF 第一模态、第二模态的同期相关

Table 1 The correlation coefficients between time series of EOF1 and EOF2 of SST anomaly (SSTA), stream function anomaly (SFA) at 850 hPa and velocity potential anomaly (VPA) at 850 hPa in the tropical Indian Ocean

	第一模态			第二模态		
	SSTA	VPA	SFA	SSTA	VPA	SFA
SSTA	1	-0.38	-0.48	1	0.32	-0.31
VPA	-0.38	1	0.49	0.32	1	-0.60
SFA	-0.48	0.49	1	-0.31	-0.60	1

显著性检验标准。这表明印度洋低空的流函数和势函数的 EOF 第二模态主要呈现 IOD 事件形式（因为热带印度洋海表温度 EOF 第二特征向量主要反映了 IOD 事件信息^[2]）。另外，印度洋低空流函数和势函数各自 EOF 第一模态和第二模态时间系数之间有着很高的线性对应关系，表明大气流函数和势函数对于表示同一种物理过程来有一致变化的特性。

由此可以看到，与热带印度洋 IOD 事件相对应的热带印度洋低空大气流函数场和势函数场的变化并不是热带印度洋大气变化的主导模态。热带印度洋低空大气流函数场和势函数场的第一模态主要反映了 ENSO 循环信息。

4 大气环流模式模拟结果

上一小节分析主要基于观测资料。全球大气和海洋系统是密不可分的整体。研究表明作为全球范围内规模最大、影响最深的热带太平洋海气耦合事件 ENSO 会对 IOD 事件产生相当大的影响。因此，基于热带印度洋观测资料的分析也势必带来其他大洋海气相互作用事件的一些干扰。为了更加清晰地了解只有 IOD 事件发生时，热带印度洋大气所产生的响应及其变化，我们利用大气环流数值模式来研究。

4.1 数值试验设计

为分析热带印度洋海温对局地大气的影响，本文设计了 2 个数值试验。第一个试验是控制试验，利用 ECMWF 提供的只包含有季节变化的气候态海表温度场和海冰场作为大气环流模式边界条件，并对模式进行 10 年积分，得到关于大气模式对于全球基本气候态的模拟结果；第二个试验是印度洋试验，设计了只有印度洋海区的海温边界条件。由于热带印度洋海表温度受热带太平洋 ENSO 循环影响很大，实际海表温度资料中包含着 ENSO 信息，所以使用实际海表温度资料作为边界条件，会使大气环流模式在一定程度上受到 ENSO 的影响而对本文所关心的问题带来偏差。因此，需要选用适当的方法滤除 ENSO 循环的影响来体现印度洋海表温度的作用。已有研究表明，热带印度洋海表温度 EOF 第一模态反映了 ENSO 循环的信息，因此本文先将实际海表温度资料进行 EOF 分析，然后从实际海表温度中除去 EOF 第一模态信息，最

后得到的海表温度作为大气环流模式边界条件。热带印度洋区域(20°S~20°N, 30°E~120°E)使用按照上述方法滤除 ENSO 循环影响的实际海表温度变化资料, 其他区域使用与控制试验相同的气候平均态海表温度和海冰数据, 利用这个边界条件对大气模式进行积分, 从 1960 年 1 月开始至 1999 年 12 月结束, 共积分 40 年。利用这个试验可以看到只有热带印度洋影响之下的全球特别是热带印度洋大气的演化过程。

4.2 控制试验 10 个样本平均之后的大气风场分布
为了检查模式的模拟性能。首先对 LMDZ 大气环流模式进行了 10 年控制积分试验, 得到的结果与 NCEP/NCAR 风场数据进行了对比(图 4、5)。可以看到, 在全球空间分布形式上大气环流模式的模拟结果与观测资料还是一致的, 只是风场强度上有所差别, 模式模拟得到的风场强度要强于观测资料。因此, 可以认为本文使用的大气环流模式可信。

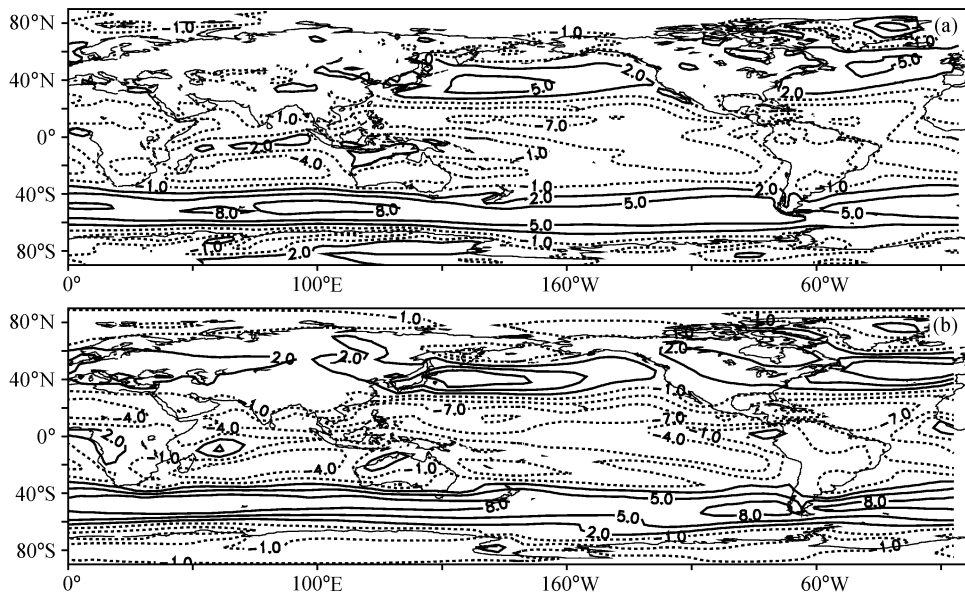


图 4 (a) NCEP/NCAR 的纬向风在 DJF 3 个月的分布和 (b) LMDZ 模式的模拟结果
Fig. 4 (a) The distribution of zonal wind of NCEP/NCAR reanalysis data in Dec – Feb (DJF) and (b) the simulation with LMDZ model

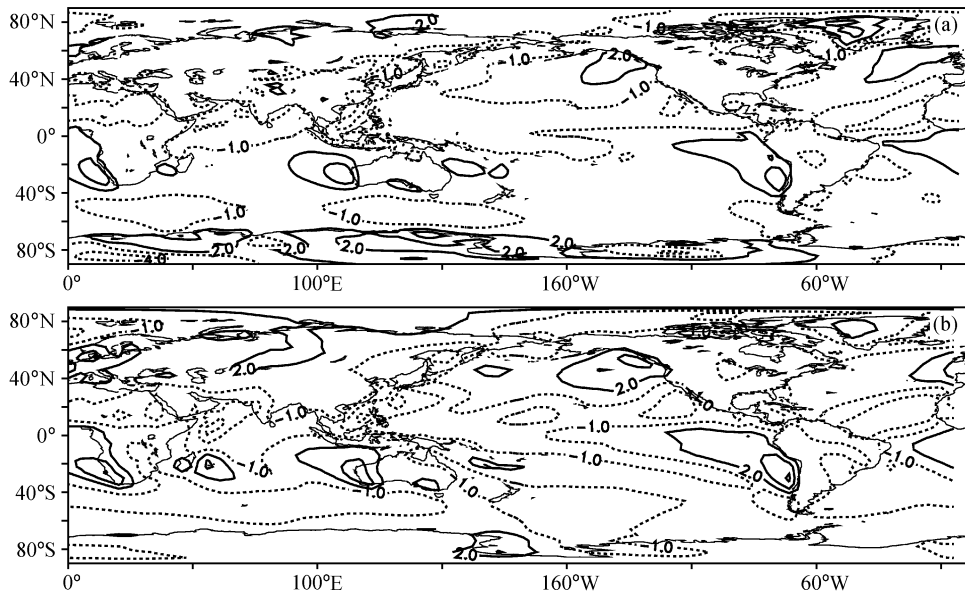


图 5 同图 4, 但为经向风
Fig. 5 The same as Fig. 4 except for the meridional wind

4.3 热带印度洋大气流函数距平场和势函数距平场

对印度洋试验，我们共进行了 5 次模拟试验，每一次试验均采用不同的初始条件和相同的边界条件。然后对 5 次试验得到的结果进行平均，得到集合试验结果，为以下分析使用。

将印度洋试验之中 IOD 事件正位相盛期 [按照 Yamagata^[21] 定义的正 IOD 年份 (1961、1963、1967、1972、1977、1982、1994、1997)] 850 hPa 和

200 hPa 流函数和势函数场进行合成分析，结果如图 6 和图 7 所示。模拟结果表明，在 IOD 事件正位相发生盛期，热带印度洋低空流函数主要表现为关于赤道对称的一对反气旋式环流，而且其中心位置分别位于孟加拉湾地区和 (15°S, 80°E) 附近，与此相对应的低空无辐散风场是赤道地区的距平东风和孟加拉湾北部的距平西风，另外在 30°S 附近也存在着无辐散的距平西风系统。

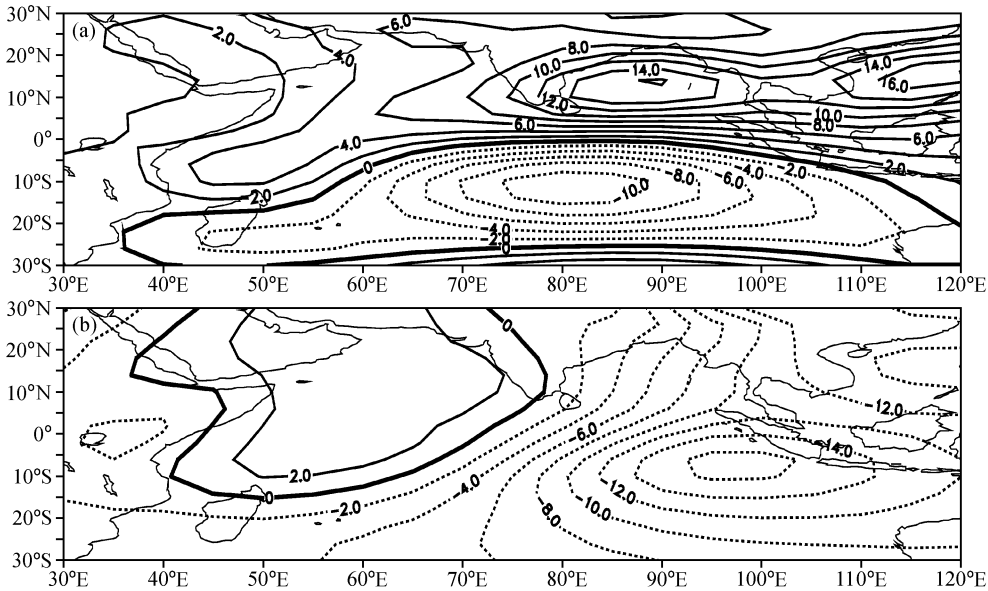


图 6 印度洋试验模拟的 850 hPa (a) 流函数、(b) 势函数在 IOD 事件正位相盛期合成 (单位: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)

Fig. 6 The composites of simulated (a) stream function and (b) velocity potential field at 850 hPa during the peaks of positive the tropical Indian Ocean Dipole (IOD) events (units: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)

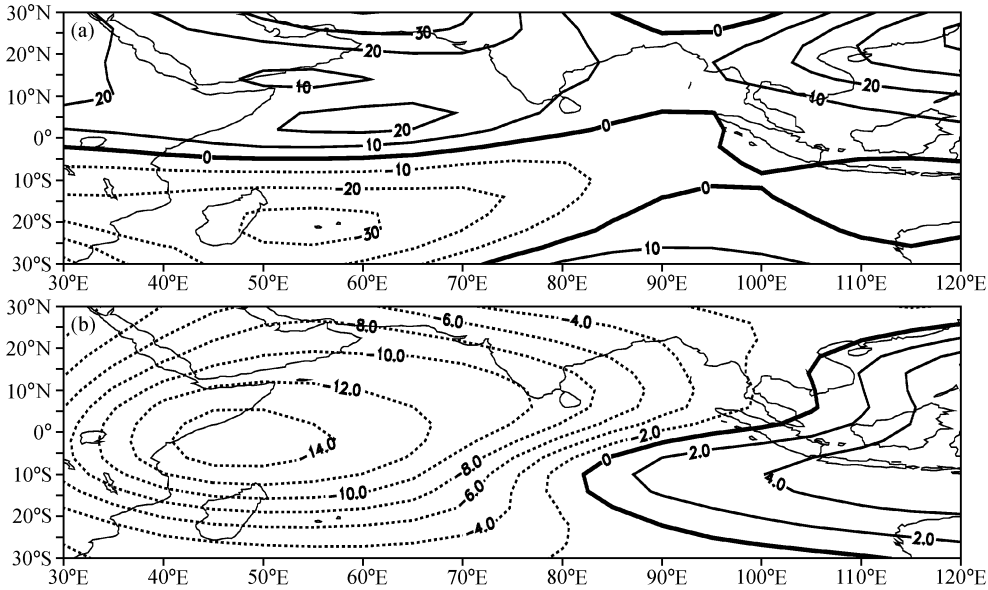


图 7 同图 6，但为 200 hPa

Fig. 7 The same as Fig. 6 except for 200 hPa

热带印度洋低空 (850 hPa) 势函数场表现出了与流函数场相协调的形态。赤道西印度洋海区表现为辐合上升运动而在赤道东印度洋地区则呈现辐散下沉运动, 由此导致的辐散风分量在赤道印度洋地区保持东风距平。

高空 (200 hPa) 流函数和势函数场的分布形式与低空相互对应。流函数场主要表现为关于赤道对称的一对气旋式环流 (图 7)。与低空流函数场不同, 高空气旋对的中心位置均位于赤道西印度洋。高空势函数场也保持了与低空势函数场相协调的空间分布形式, 赤道东印度洋辐合而赤道西印度洋辐散, 并且辐合辐散中心基本上与低空势函数的辐散辅合中心重合。高、低空流函数和势函数的协调变化说明 IOD 事件期间大气的变化类似于 ENSO 循环之中的大气响应^[30], 无论是无辐散场还是无旋场上, 都存在着协调的发展。

试验的合成结果有其自己的不足之处, 当某一次事件发生振幅很强而其他事件振幅很小时, 合成试验的结果会体现出振幅强烈试验的结果, 而小振幅事件的特性会被淹没。但并不能说小振幅事件反映出的信息不是普遍特征。为克服这个不足, 我们对印度洋试验结果中大气低空流函数距平场, 势函数距平场与 DMI 计算同期相关系数, 结果列在图 8 之中。

流函数和 DMI 的相关场表现为关于赤道对称

的一对反气旋式环流对。与合成分析结果类似, 赤道北部反气旋中心主要位于东印度洋的孟加拉湾海区, 而赤道南部反气旋中心位置在 (15°S, 80°E) 附近, 并在赤道印度洋上空形成无辐散东风。势函数场与 DMI 的相关图上表现出西印度洋辐合、东印度洋辐散的形式, 东印度洋的辐散中心主要位于印度尼西亚附近海区, 西印度洋辐合中心主要位于热带西南印度洋地区, 并在赤道印度洋上空形成无旋度东风。大气的如此响应会通过 Bjerkness^[36, 37] 反馈机制有利于 IOD 事件的发展和维持。

从相关图上还可以看到, 在印度洋试验之中, 太平洋海区低空大气运动与 IOD 事件联系不是很紧密。因此, IOD 事件发生时候大气响应主要是局地响应。

图 9 给出了印度洋试验之中低空流函数距平场和势函数距平场 EOF 第一特征向量空间分布结果。无论是流函数还是势函数的第一模态都表现出与 IOD 事件相匹配的分布形式, 即流函数表现为关于赤道对称的反气旋式环流对, 势函数表现为东印度洋辐散、西印度洋辐合。除此之外, 从流函数第一特征向量空间分布来看, 虽然反气旋对空间分布关于赤道对称, 但是最大值中心位于赤道南印度洋, 而且赤道南印度洋反气旋强度大于赤道北印度洋。为什么流函数 EOF 第一模态会出现这个分布形式? 我们认为可能是由于赤道印度洋海表温度对大气的

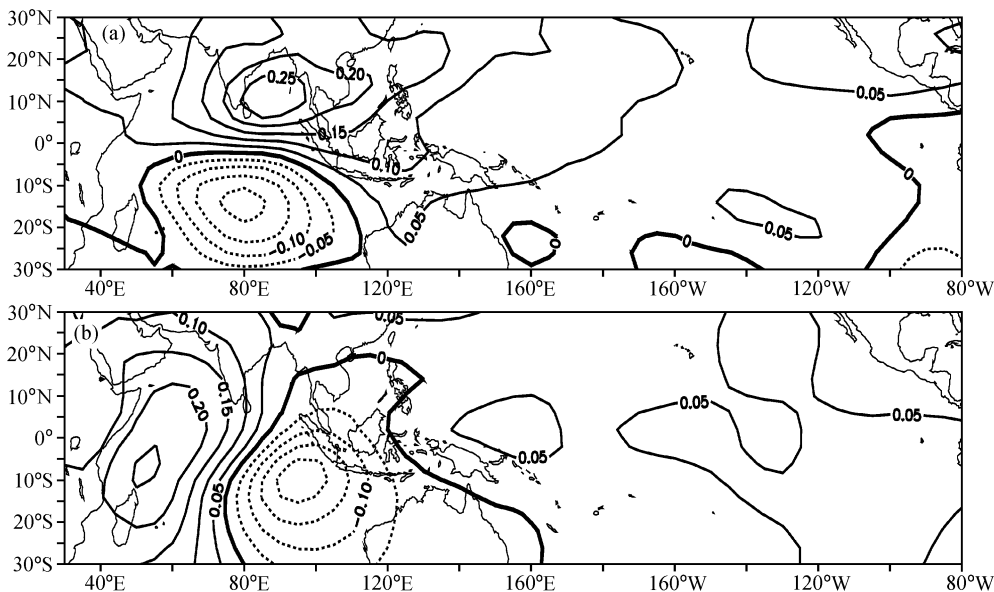


图 8 印度洋试验之中模拟出来的 850 hPa (a) 流函数、(b) 势函数与 DMI 指数的同期相关

Fig. 8 The correlations between simulated 850-hPa (a) stream function, (b) velocity potential field and DMI in the Indian Ocean experiment

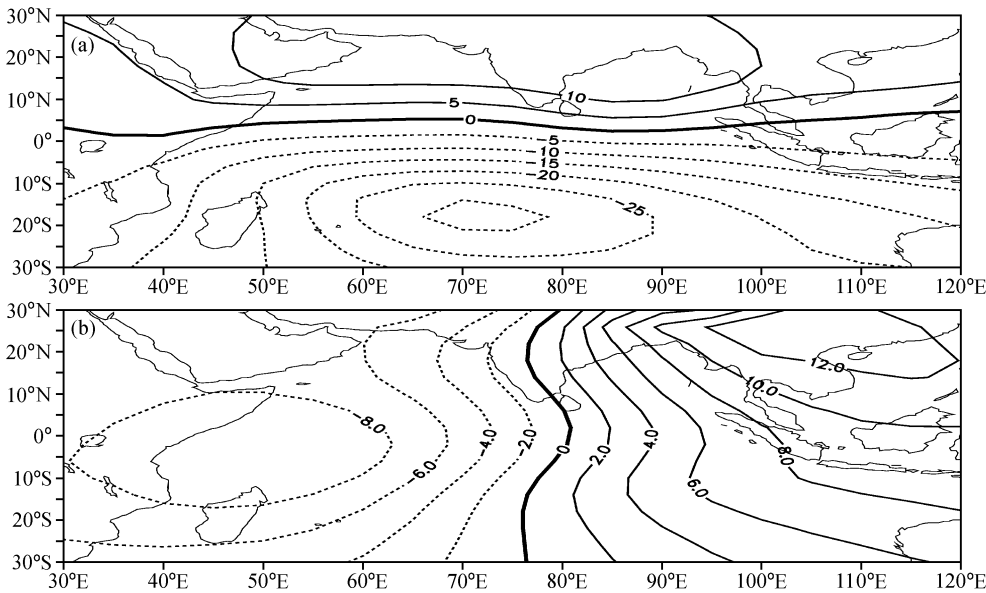


图 9 印度洋试验之中的 850 hPa (a) 流函数场、(b) 势函数场的 EOF 第一特征向量空间分布 (单位: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)。方差贡献各为 12%、19%

Fig. 9 The EOF1 of simulated 850-hPa (a) stream function and (b) velocity potential filed (units: $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$). The variance contributions are 12% and 19% in (a) and (b), respectively

强迫所引发。IOD 事件发生时,赤道东印度洋海区苏门答腊沿岸海表温度距平变化很强烈,而且苏门答腊沿岸并没有关于赤道对称,而是位于赤道南部,这就相当于海洋对大气有一个关于赤道不对称的冷源强迫。大气对这样的一个温度异常响应会按照 Gill 模型^[38]提到的那样进行发展,产生赤道南部偏强的大气响应。如此一来,表现在流函数场上就是关于赤道不对称的响应。

印度洋试验的结果表明,热带印度洋流函数距平场和势函数距平场在 IOD 事件期间的响应形式,促发了纬向风距平在赤道印度洋地区的东风异常。根据巢纪平等^[28]的分析结果以及 Bjerknes 的海气相互作用正反馈假说,在赤道印度洋地区的东风作用下,东印度洋的表层暖水会向西印度洋扩展,降低热带印度洋东、西方向海表温度梯度。接着,热带东印度洋海表温度由于距平意义下的变冷而出现局地低压,而西印度洋地区由于距平意义下的海表温度增暖出现局地高压。大气低空的如此压力分布又会加强原有的东风距平,从而通过海气正反馈机制使 IOD 事件得以维持和加强。

5 结论

热带印度洋 IOD 事件是近年来得到关注的一

个海气耦合事件,对全球气候变化产生了重要影响。对 IOD 事件的研究逐渐成为了国际上气候变化研究的一个热点,而关于 IOD 事件发生时候大气环流响应问题,则是研究 IOD 事件发生、发展的一个重要方面,因为只有了解热带印度洋大气环流变化,才能更好地理解海气耦合系统的相互作用。前人对于此问题的研究主要集中在低空风场以及纬向 Walker 环流异常变化上,并没有过多关注于大气风场的旋度分量和散度分量在 IOD 事件期间的响应问题。已有的研究表明,热带大气的运动与中高纬度大气运动不同,大气散度分量扮演了重要角色,采用散度分量和旋度分量来分析大气运动能得到更加明确与简洁的结果。因此,有必要详细研究 IOD 事件期间的大气风场两个分量的响应。

本文从风场的旋度分量和散度分量角度出发,利用观测资料和大气环流模式,对 IOD 事件发生时热带印度洋海区上空大气环流变化进行了分析,揭示出风场不同分量在 IOD 事件发生期间的变化特征。研究表明,热带印度洋大气环流系统在 IOD 事件期间,垂直方向上呈现明显的一阶斜压形式,水平方向上呈现明显的对称特征。对低空(850 hPa)来说,无辐散流函数距平场在 IOD 事件正位相期间表现为关于赤道对称的一对反气旋式环

流;无旋度分量在 IOD 事件正位相期间的响应表现为东印度洋辐散、西印度洋辐合;大气环流的两种分量场均可以在赤道印度洋地区产生距平意义下的纬向东风,正是这种形式的距平东风使得 IOD 事件依靠海气系统正反馈机制得以维持和发展。高空(200 hPa)大气环流形式刚好与 850 hPa 相反。

另外,数值模式的模拟结果还指出,IOD 事件发生时,虽然低空赤道反气旋对空间分布关于赤道对称,但是最大值中心位于赤道南印度洋,赤道南印度洋反气旋强度远大于赤道北印度洋。其原因可能是因为热带东印度洋关于赤道的不对称加热所引发。该结论还需要通过进一步的观测资料分析和数值模式进行验证。

本文使用的 LMDZ 模式是一个大气环流模式,只能依靠人为给定的边界条件来进行模拟,在模拟过程之中无法刻画海洋之中的变化。因此,以上的分析还需要利用耦合模式来进一步进行检验。

参考文献 (References)

- [1] Reverdin G, Cadet D, Gutzler D. Interannual displacements of convection and surface circulation over the equatorial Indian Ocean. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1986, **112**: 43~67
- [2] Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 1999, **401**: 359~363
- [3] Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. Coupled ocean - atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997 - 98. *Nature*, 1999, **401**: 356~360
- [4] Vinayachandran P N, Saji N H, Yamagata T. Response of the equatorial Indian Ocean to an unusual wind event during 1994. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 1613~1615
- [5] Behera S K, Krishnan R, Yamagata T. Unusual ocean - atmosphere conditions in the tropical Indian Ocean during 1994. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 3001~3004
- [6] Yu J Y, Mechoso C R. Links between annual variations of Peruvian stratocumulus clouds and of SST in the eastern equatorial Pacific. *J. Climate*, 1999, **12**: 3305~3318
- [7] Murtugudde R, McCreary J P, Busalacchi A J. Oceanic processes associated with anomalous events in the Indian Ocean with relevance to 1997 - 1998. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 3295~3306
- [8] Behera S K, Yamagata T. Influence of the Indian Ocean dipole on the Southern Oscillation. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2003, **81**: 169~177
- [9] Kripalani R H, Pankaj Kumar. Northeast monsoon rainfall variability over south Peninsular India vis-à-vis the Indian Ocean dipole mode. *International Journal of Climatology*, 2004, **24**: 1267~1282
- [10] Ashok K, Chan W, Motoi T, et al. Decadal variability of the Indian Ocean dipole. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, **31**: 3720~3724
- [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** (4): 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** (4): 433~443
- [12] 梁肇宁, 温之平, 吴丽姬. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系 I. 耦合分析. *大气科学*, 2006, **30** (4): 619~634
Liang Zhaoning, Wen Zhiping, Wu Liji. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of South China Sea summer monsoon. I. Coupling analysis. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (4): 619~634
- [13] 温之平, 梁肇宁, 吴丽姬. 印度洋海温异常和南海夏季风建立迟早的关系 II. 机理分析. *大气科学*, 2006, **30** (6): 1138~1146
Wen Zhiping, Liang Zhaoning, Wu Liji. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of the South China Sea summer monsoon. II. Analyses of mechanisms. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (6): 1138~1146
- [14] 肖子牛, 梁红丽. 2004 年夏季经向型雨带及其与印度洋偶极模异常海温的关系. *大气科学*, 2006, **30** (5): 791~801
Xiao Ziniu, Liang Hongli. The meridian pattern of summer rainfall in 2004 and its relationship with Indian Ocean dipole. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (5): 791~801
- [15] 刘琳, 于卫东. 热带印度洋偶极子事件和副热带印度洋偶极子事件的联系. *海洋科学进展*, 2006, **24** (3): 301~306
Liu Lin, Yu Weidong. The correlation between tropical Indian Ocean dipole event and subtropical Indian Ocean dipole event. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 2006, **24** (3): 301~306
- [16] 晏红明, 李崇银. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响. *大气科学*, 2007, **31** (1): 64~76
Yan Hongming, Li Chongyin. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its impact on climate. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2007, **31** (1): 64~76
- [17] Allan R, Chambers D, Drosowsky D, et al. Is there an Indian Ocean dipole, and is it independent of the El Niño - Southern Oscillation? *CLIVAR Exchanges*, 2001, (6): 18~22
- [18] Baquero-Bernal A, Latif M, Legutke S. On dipolelike variability of sea surface temperature in the tropical Indian Ocean.

- J. Climate*, 2002, **15** (11): 1358~1368
- [19] Hastenrath S. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2002, **83**: 735~738
- [20] Dommenget D, Latif M. Reply. *J. Climate*, 2003, **16** (7): 1094~1097
- [21] Yamagata T, Behera S, Rao S A, et al. The Indian Ocean dipole: A physical entity. *CLIVAR Exchange*, 2002, **24**: 15~18
- [22] Rao A S, Behera S K, Masumoto Y, et al. Interannual variability in the subsurface tropical Indian Ocean. *Deep-Sea Res.*, 2002, **49**: 1549~1572
- [23] Qian W H, Hu H R, Deng Y, et al. Signals of interannual and interdecadal variability of air-sea interaction in the basin-wide Indian Ocean. *Atmosphere-Ocean*, 2002, **40** (3): 293~311
- [24] Li Tim, Zhang Yongsheng, Lu Er, et al. Relative role of dynamic and thermodynamic processes in the development of the Indian Ocean dipole: An OGCM diagnosis. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29** (23): 251~253
- [25] Qian W H, Hu H R, Zhu Y F. Thermocline oscillation and warming event in the tropical Indian Ocean. *Atmosphere-Ocean*, 2003, **41** (3): 241~256
- [26] 巢纪平, 袁绍宇. 热带印度洋和太平洋海气相互作用事件的协调发展. 海洋科学进展, 2004, **22** (3): 247~252
Chao Jiping, Yuan Shaoyu. Concerted development of atmosphere-ocean interaction events in the tropical Indian Ocean and Pacific Ocean. *Advances in Marine Science* (in Chinese), 2004, **22** (3): 247~252
- [27] Prasad T G, McClean J L. Mechanisms for anomalous warming in the western Indian Ocean during dipole mode events. *J. Geophys. Res.*, 2004, **109**: 10129~10140
- [28] 杜振彩, 谭言科, 张人禾, 等. 热带印度洋海温异常单、偶极模式及其相互作用. 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2006, **30** (1): 11~24
- [29] 巢纪平, 巢清尘, 刘琳. 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件. 气象学报, 2005, **63** (5): 594~602
Chao Jiping, Chao Qingchen, Liu Lin. The ENSO events in the tropical Pacific and DIPOLE events in the Indian Ocean. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 594~602
- [30] Yu Weidong, Xiang Baoqiang, Liu Lin, et al. Understanding the origins of interannual thermocline variations in the tropical Indian Ocean. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **32** (24): 13028~13031
- [31] 于卫东, 巢纪平. 热带太平洋 ENSO 期间的海气相互作用分析——大气环流无旋和无辐散分量的年际变化. 自然科学进展, 2004, **14** (8): 917~924
Yu Weidong, Chao Jiping. The air-sea interaction during ENSO event — the interannual variability of irrotational part and non-divergent part of atmosphere circulation. *Progress in Nature Science* (in Chinese), 2004, **14** (8): 917~924
- [32] 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 J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 2003, **27** (1): 53~66
- [33] Ashok K, Guan Z, Yamagata T. A look at the relationship between the ENSO and the Indian Ocean dipole. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2003, **81** (1): 41~56
- [34] Sadourny R, Laval K. January and July performance of the LMD general circulation model. *New Perspectives in Climate Modelling*. Berger A, Nicolis C, Eds. Elsevier, 1984. 173~198
- [35] 刘琳, 于卫东, 刘玉国. 印度洋 dipole 事件的年际变化与 ENSO 事件的联系. 湛江海洋大学学报, 2006, **26** (3): 50~55
Liu Lin, Yu Weidong, Liu Yugu. The correlation between interannual variability of Indian Ocean dipole mode event and ENSO event. *Journal of Zhanjiang Ocean University* (in Chinese), 2006, **26** (3): 50~55
- [36] Bjerknes J. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus*, 1966, **18**: 820~829
- [37] Bjerknes J. Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**: 163~172
- [38] Gill A E. Some simple solution for heat-induced tropical circulation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1980, **106**: 447~462