

张东凌, 卢炯. 2017. 冬季热带印度洋上层流场异常模态分析 [J]. 气候与环境研究, 22 (4): 463–472. Zhang Dongling, Lu Xu. 2017. Analysis of abnormal upper circulation over the tropical Indian Ocean in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22 (4): 463–472, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15011.

## 冬季热带印度洋上层流场异常模态分析

张东凌<sup>1</sup> 卢炯<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国人民解放军 61741 部队, 北京 100094

**摘要** 利用复经验正交函数 (CEOF) 分解对冬季热带印度洋海洋上层流场异常做了模态分析和结果讨论, 得到以下主要结果: 该流场异常前两个模态均呈现赤道俘获波形式, 其异常在赤道上最大, 向南北两侧迅速衰减, 呈现纬向流的形态; 第一、二模态的性质分别是大洋赤道波动的半波和 1 波形态, 这表明此时赤道波动异常在大洋流场异常中占有重要地位。冬季第一模态大洋垂直运动所导致的近表层海温异常与春、秋季不同, 此时在赤道印度洋呈现正一负一正的经向分布态势, 这与印度洋耦极子 (Indian Ocean Dipole, IOD) 的不同, 并是 IOD 在冬季衰亡的直接原因。第二模态相应的海温异常则在赤道东印度洋呈现北负南正的分布态势。第一模态与南亚冬季风异常密切相关, 为印度洋冬季风环流模态。第一、二模态都有明显的年际变化和年代际变化, 年际变化均为 3~5 年, 主要的年代际变化则分别为约 18、22 年, 此外两者还均有约 13 年的年代际变化。本文第一、二模态年代际变化的主周期也是冬季北太平洋和冬季热带太平洋流场异常第二、一模态的主周期。

**关键词** 热带印度洋 流场异常 复经验正交函数 (CEOF) 分解 南亚冬季风

文章编号 1006-9585 (2017) 04-0463-10

中图分类号 P732.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15011

## Analysis of Abnormal Upper Circulation over the Tropical Indian Ocean in Winter

ZHANG Dongling<sup>1</sup> and LU Xu<sup>2</sup>

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Unit 61741, The Chinese People's Liberation Army, Beijing 100094

**Abstract** The Complex Empirical Orthogonal Function (CEOF) analysis is applied to discuss the modes and results of abnormal upper circulation over the tropical Indian Ocean in winter. The main conclusions are as follows. The first and second leading modes of the current anomalies are trapped by the equator wave, which decay rapidly poleward from the equator and show a zonal flow pattern. The natures of the first and second modes are the half wave pattern and full wave pattern of the equatorial ocean wave, respectively. This indicates that the equatorial wave anomaly plays an important role in the oceanic flow anomaly. The near-surface sea temperature anomaly resulted from the abnormal vertical motion of the first mode in the winter is different from that in the spring and autumn. In this situation, the distribution of meridional sea temperature anomaly near the equatorial Indian Ocean presents a “+ - +” pattern. It is different from Indian Ocean Dipole (IOD) and is the direct reason for the declining of IOD in winter. The sea temperature anomaly corresponding to the second mode presents a pattern of north-negative and south-positive. The first mode is closely related to South Asian

收稿日期 2015-01-17; 网络预出版日期 2016-10-03

作者简介 张东凌, 男, 1974 年出生, 博士, 主要从事气候学的研究。E-mail: zdl@mail.iap.ac.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 2013CB956203

Funded by National Basic Research Program of China (973 Program, Grant 2013CB956203)

winter monsoon anomaly. Both modes demonstrate significant inter-annual and inter-decadal variations. The period of their inter-annual variation is about 3–5 years. The main periods of their inter-decadal variations are about 18 and 22 years, respectively, while they also have a period of about 13 years. The main inter-decadal variations of the first and second modes discussed in this paper correspond to the main inter-decadal variations of the second and first modes of circulation anomaly over the North Pacific and tropical Pacific in winter.

**Keywords** Tropical Indian Ocean, Abnormal circulation, Complex EOF decomposition, South Asian winter monsoon

## 1 引言

浩瀚的印度洋仅次于太平洋是世界第二大洋，位于我国的西南方，印度洋上空的大气状态及印度洋大洋状态对我国天气和气候有明显影响，特别是对我国西南地区（彭京备，2012；徐志清和范可，2014）。热带印度洋位于亚洲季风区，受南亚季风的控制，而南亚季风对我国的西南地区也有显著影响（曹杰等，2002）。20 世纪末，Saji et al. (1999)、肖莺等（2009）发现在热带印度洋存在着一种典型的海温异常型即印度洋偶极子 (Indian Ocean Dipole, IOD)，它对印度洋及其周边地区的气候有很大影响 (Hashizume et al., 2012)；晏红明和李崇银（2007）的研究还发现 IOD 对东亚夏季风也有影响。这表明热带印度洋上空的大气和印度洋的海洋环境与南亚季风和 IOD 密切相关。对于热带印度洋上层海温异常的研究，目前已有很多工作，特别是在对 IOD 以及其对气候影响的方面 (Luo et al., 2010; Cai et al., 2012; 徐志清和范可，2012)。海洋流场是最活跃的动力学变量，其对海洋的性状有很大影响。海洋上层流动是风生流，海洋水平流场异常是对近地面风场异常强迫的响应，同时通过海洋水平辐合、辐散而产生的海洋垂直运动，则会造成冷水上翻、暖水下沉，进而造成海温的动力变化，并使上层海温水平分布发生改变（张东凌和何卷雄，2005；张东凌，2006；张东凌等，2015）。我们曾对春季（5 月）和秋季（10 月）的热带印度洋上层流场异常分别做过复经验正交函数 (Complex Empirical Orthogonal Function, CEOF) 分解（张东凌和何卷雄，2005；张东凌，2006），讨论了前者与南海、南亚夏季风建立和后者与 IOD 的关系，这是由于 5 月正值南海、南亚夏季风的建立期（张东凌，2006），而 IOD 在 10 月则表现得最清晰（肖莺等，2009）。在热带印度洋，冬季是南亚冬季风的盛行期，也是 IOD 的衰亡期（肖莺等，2009）。冬季印度洋上层海流异常与以上春、秋季的有所不同，在冬季风的强迫下，

此时会形成印度洋冬季风大洋环流，而三大洋中唯一存在季风大洋环流的只有印度洋。亚洲冬季风的源头是蒙古西伯利亚高压，并分为东亚冬季风和南亚冬季风两类 (Ha et al., 2012; 刘舸等，2013)。

大洋流场异常的年代际变化是气候变化中的重要方面，然而至今该方面的工作尚不多见。我们曾采用 CEOF 分解等方法对北太平洋的上层大洋环流异常做过诊断，给出了其第一、二模态的空间场和时间系数，得到了这两个模态年代际变化的主周期，并讨论了其与北太平洋主要气候模态太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 和北太平洋涡旋振荡 (North Pacific Gyre Oscillation, NPGO) 的关系 (吕庆平等，2015)。我们还对热带太平洋的上层流场做了类似的工作 (卢炯等，2014)。在本文中，我们仍采用 CEOF 分解等方法对冬季热带印度洋的上层流场异常做了诊断，给出了其第一、二模态的空间场和时间系数，指出其第一模态与南亚冬季风密切相关，并将本文上层海洋的海温动力变化与春、秋季的情况做了比较，揭示了冬季 IOD 衰亡的直接原因。此外还讨论了这两个模态的年际、年代际变化，及其与冬季北太平洋和冬季热带太平洋上层流场异常的关系。考察冬季印度洋上层洋流的异常，不但对了解南亚冬季风盛行时印度洋冬季风环流异常的状况有所帮助，而且能为探讨印度洋与太平洋海气系统的相互影响提供线索，故而本文在气候动力学和气候预测方面具有理论意义和实用价值。

## 2 分析方法

本文以 1 月代表冬季，利用 Carton and Giese (2008) 提供的大洋上层从 1950~2001 年共 52 年、网格距约为  $1^\circ$  (纬度)  $\times$   $1^\circ$  (经度)、深度为 112.5、97.5、82.5、67.5、52.5、37.5、22.5、7.5 m 的 1 月份月平均海洋流场资料，对印度洋上层流场异常作了模态分析。所取热带印度洋范围为 ( $25^\circ\text{N}\sim 25^\circ\text{S}$ ,  $30^\circ\text{E}\sim 120^\circ\text{E}$ )，参见图 1。采用的

方法主要是对以上 8 层的流场异常做联合 CEOF 分解。此时可得各模态的流场异常并能相应得到 22.5 m 处的垂直运动异常，进而可知该处由该垂直运动异常所造成的海温异常（海温动力异常）的趋势。这里联合 CEOF 分解原理和具体操作步骤参见文献（张东凌和何卷雄，2005；吕庆平等，2015），不再赘述。本文将主要讨论深度为 7.5 m 和 112.5 m 上第一、二模态的空间场，两者分别可作为表层、次表层的代表，为方便计，下面就直接称之为表层、次表层。此外以下还将深度为 22.5 m 的层次称之为近表层。本文分析了 1 月印度洋上层流场异常前两个模态的空间结构和时间系数，给出了这两个模态的年际和年代际变化，并进行了有关讨论。

1 月印度洋上层流场偏差的前 2 个 EOF 模态都

通过显著性检验 (North et al., 1982)；其第一、二模态的方差贡献分别为 32.6% 和 13.2%，是各月相应模态中方差贡献的次大者，仅次于 11 月的 33.9% 和 14.0%（张东凌和何卷雄，2005），这两个模态的累积方差贡献为 45.8%，接近总方差贡献的一半，由此可知，这两个模态是冬季热带印度洋上层流场异常的主要模态。

### 3 分析结果

#### 3.1 第一模态

从表层第一模态空间场的分布（参见图 1a）可知：明显的流场异常均位于 5°S 至 5°N 之间，在该范围除海岸线附近海域外，都呈现一致向西向流，

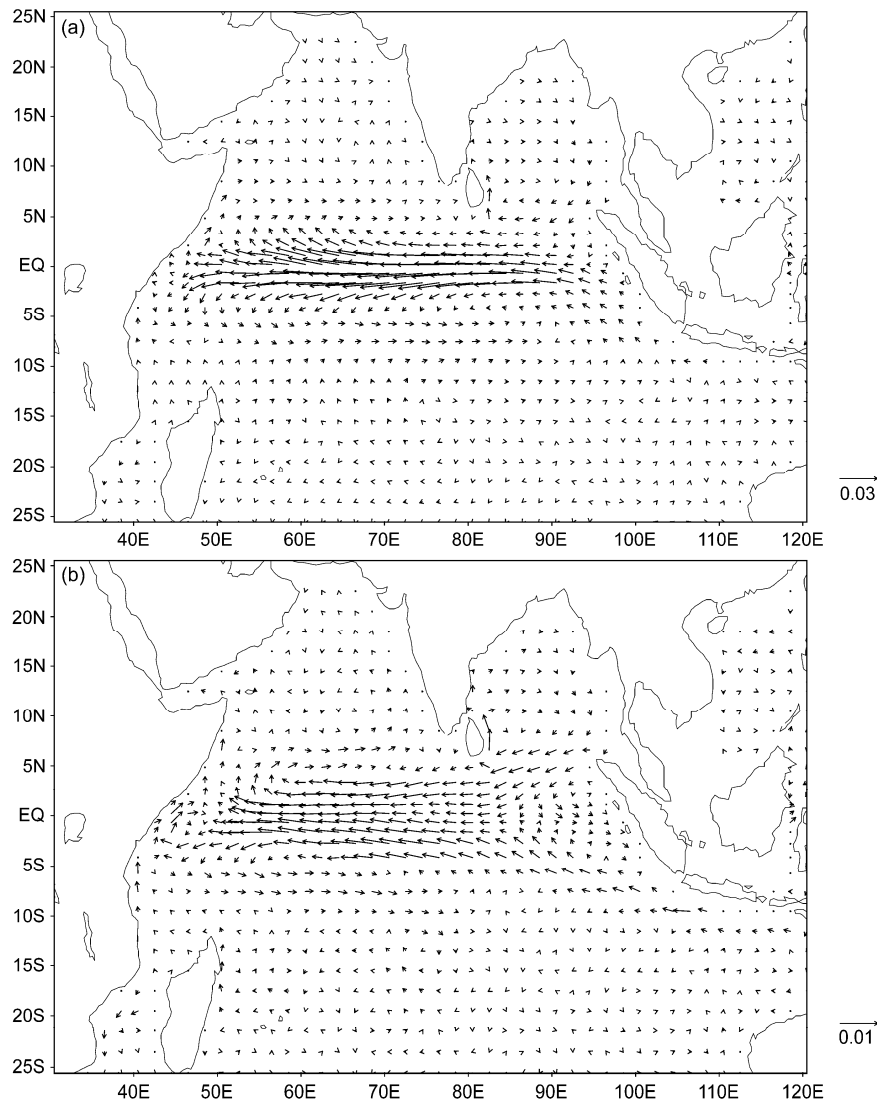


图 1 洋流的复经验正交函数分解 (CEOF) 得到的第一模态空间场分布：(a) 表层；(b) 次表层

Fig. 1 Spatial pattern of the first leading mode for ocean circulation by complex Empirical Orthogonal Function (CEOF): (a) Surface; (b) subsurface

即其为赤道所俘获；在赤道印度洋西海岸以东海域，上述西向流的南、北侧，则分别有逆、顺时针旋转的环流；在 5°S 至 5°N 之外，流场异常都不很大。在此模态上，印度洋冬季风环流清晰体现在：苏门答腊岛中部以西海域的偏西北向流，西向的赤道暖流，赤道以南东向的赤道逆流，这三者构成一个逆时针旋转的环流圈；此外在孟加拉湾还有弱的顺时针旋转环流圈。表层以下至次表层，流场异常的分布都与表层相似，仅其异常随深度增加而略减小（参见图 1b）。

从第一模态时间系数的模和幅角上可见（图略），其幅角分布在 0°和±180°附近，这表明其幅角分布大体对应于两个状态，并可用数学符号“+”、“-”来标注；该模态时间系数的模值各年也有所不同。对于幅角分布有两个态的情况，可

将幅角和模的这两个时间系数序列综合为一个时间序列。具体的做法是：将每年时间系数的模值乘以该年幅角的余弦，如此该余弦值均接近±1，这样就能得到一个新的实数序列，不妨称为该模态的实时间系数序列，其能综合反映幅角和模的时间演变。注意，以上做法仅适用于时间系数的幅角分布在 0°和±180°附近的情况。此时该模态各年的流向就约等于此模态空间场的流向，而其强度则由实时间系数序列值的绝对值来决定；若该序列值为负，则流向要反向。对于时间系数的幅角分布在 3 个及以上状态的情况，则不能得到实时间系数序列，此时必须要用幅角和模的时间系数序列来讨论问题。

图 2a 给出了冬季（1 月）该 CEOF 第一模态的实时间序列（其时段如上所述为 1950~2001 年），并可见其有明显的年际和年代际变化。为了更准确

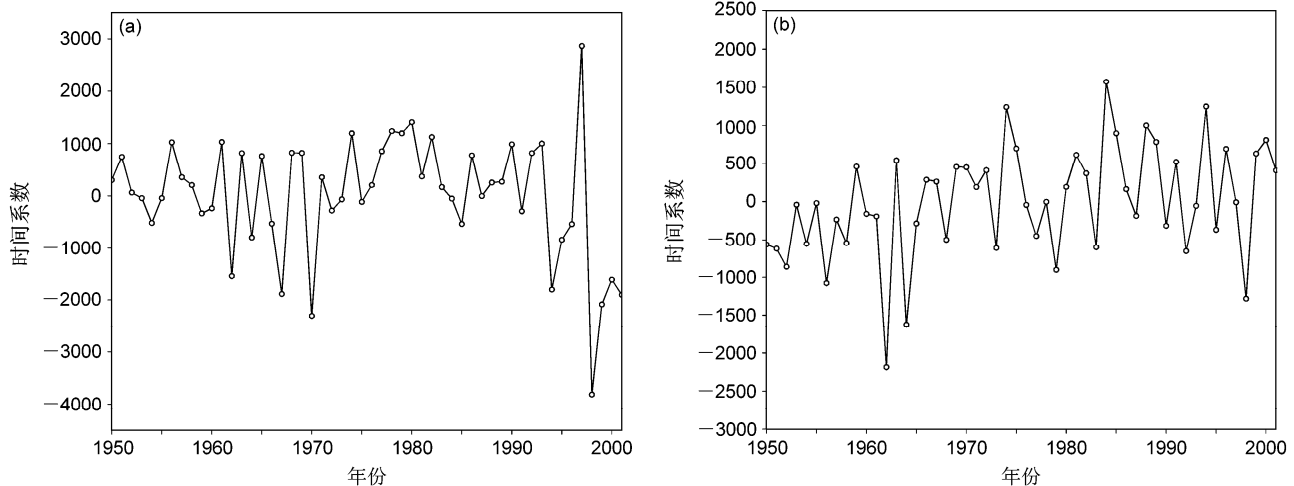


图 2 洋流的 CEOF 得到的 (a) 第一模态、(b) 第二模态实时间系数

Fig. 2 Real time coefficients for the first two leading modes for ocean circulation by CEOF: (a) The first mode; (b) the second mode

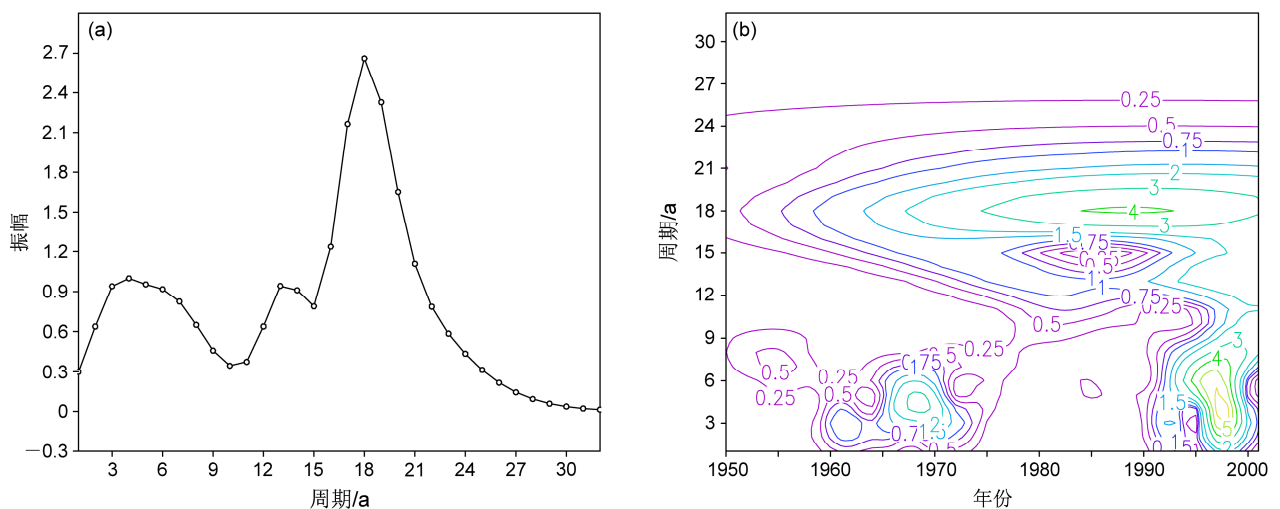


图 3 洋流的 CEOF 得到的第一模态时间系数小波分析图：(a) 小波全谱；(b) 局地功率谱

Fig. 3 (a) Wavelet spectrum and (b) local power spectrum of the time coefficients for the first leading mode for ocean circulation by CEOF

地反映这种变化，现对冬季第一模态实时间系数序列做小波分析。图 3a、3b 分别给出了第一模态小波分析得到的小波全谱图和小波局地功率谱图。从图 3a 上可见，第一模态具有 3~5 a 的年际变化周期和非常明显的约 18 年的年代际变化周期，此外还有约 13 年的年代际变化周期。从图 3b 上可见，3~5 a 的年际变化周期最明显的时段出现在 20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期和 90 年代以后；而约 18 年的年代际变化周期则贯穿在这整个 52 年始终。

### 3.2 第二模态

从诊断得到的 1 月 EOF 第二模态空间场的分布可知（参见图 4）：在海洋上层，明显的流场异常都

位于 7°S 至 5°N 之间，第二模态的流场异常也为赤道所俘获。在 7°S 至 5°N 之外，除西海岸附近海域，异常也均不大。第二模态表层在赤道上的流场异常与第一模态在该处呈现一致的西向流（参见图 4a）有所不同，第二模态在赤道上不再具有流向一致的纬向流，而是以 70°E 为界，分为东、西两段；东段为西向流，西段为东向流。在 5°S 至 7°S 间，除接近海岸的海域外，还有一支东向流。在斯里兰卡岛以东海域，有一个顺时针旋转的涡旋。在以 (5°N, 55°E) 为中心的周边海域，则有一个逆时针旋转的涡旋。在表层之下至 82.5 m 层，流场异常的分布与表层类似，仅流速略有减小。然而在 97.5、112.5 m 两层（后者即为次表层），流场异常则有所改变，

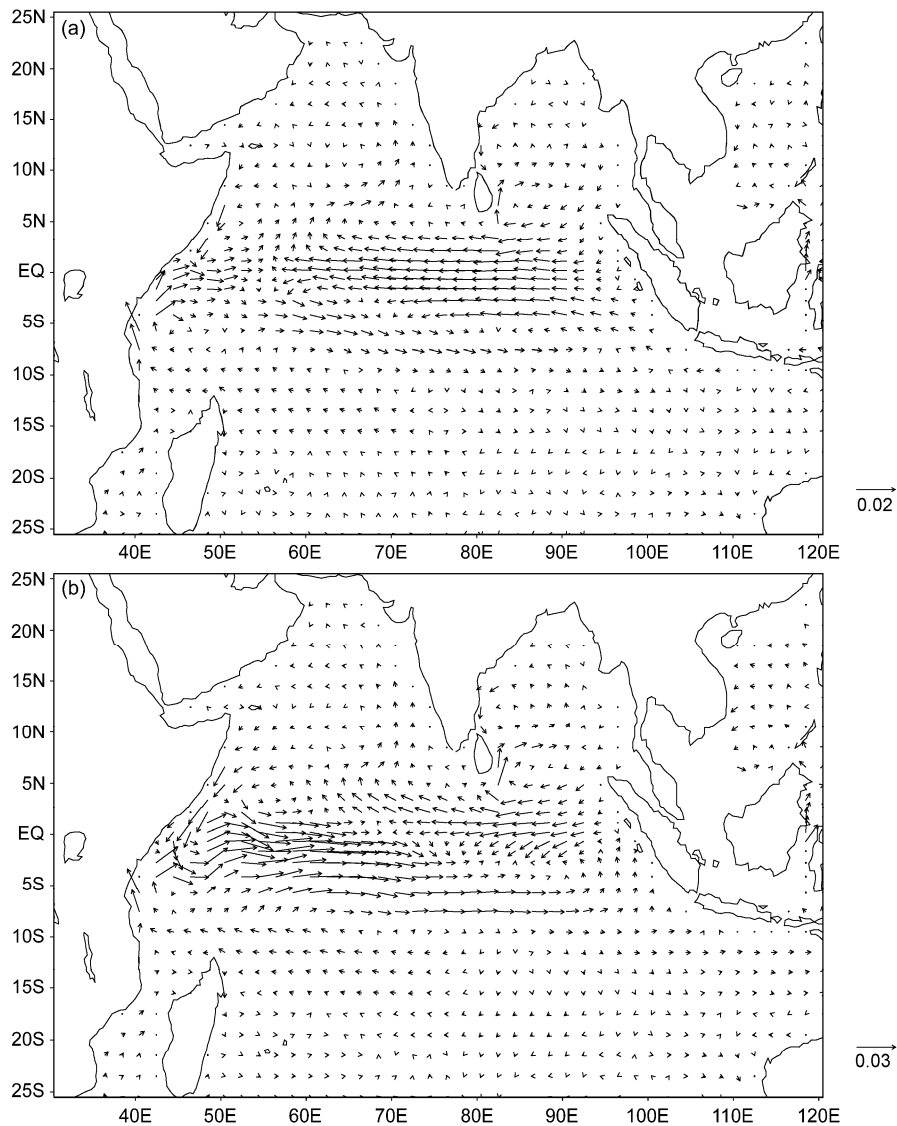


图 4 同图 1，但为第二模态  
Fig. 4 Same as Fig. 1, but for the second mode

并类似于次表层的分布。该分布在赤道及其附近,从 58°E 至 95°E,为一支西向流;在该西向流的南面即在 6°S 至 7°S 处,有明显的东向流,并与以上西向流构成逆时针旋转的回流涡旋;在斯里兰卡以东海域也有顺时针旋转的涡旋(参见图 4b)。

从第二模态时间系数的模和幅角上可见(图略),其辐角分布也在 0°和 ±180°附近,即其辐角分布也大体对应于两个状态。为此可采用第一模态中所用的处理方法,得到第二模态的实时间序列。图 2b 给出了该 CEOF 第二模态的实时间序列,并可见其也有明显的年际和年代际变化。为此与第一模态同,现对各季第二模态实时间系数序列做了小波分析。图 5a、5b 分别给出了第二模态小波分析得到的小波全谱和小波局地功率谱。从图 5a 上可见,第二模态也具有 3~5 a 的年际变化周期和非常明显的约 22 年的年代际变化周期,此外仍有约 13 年的年代际变化周期。从图 5b 上可见,3~5 a 的年际变化周期最明显的时段出现在 20 世纪 60 年代的前半期和 80 年代后至 21 世纪初;而约 22 年的年代际变化周期则也贯穿在这整个 52 年始终。

## 4 讨论

### 4.1 各模态赤道流场异常性质

由各模态空间场所见,最大的流场异常出现在赤道上,在离赤道几度外的海域,异常均很小,这具有赤道波动的特点(Matsuno, 1966)。第一模态从表层至次表层空间场的分布变化不大,且除边界海域外,在赤道附近整个大洋均呈西向流。该模态的性质应是印度洋赤道波动的半波形态,其波长是赤道印度洋宽度的两倍。第二模态从表层至 82.5 m 层,在赤道附近印度洋中,流场异常仍为纬向流的形式,但其流向在整个大洋中不再具有一致性,在大洋东、西半部分别呈西向流、东向流的形态。该模态的性质应是大洋赤道波动的 1 波形态,其波长即为赤道印度洋的宽度。注意到在赤道附近流场异常最大,以及第一、二模态两者的方差贡献之和约占整个流场异常方差总贡献的一半,可知赤道波动在热带印度洋流场异常中占有重要的地位,必须充分予以重视。

### 4.2 各模态海洋垂直运动的异常

在此仿照文献(张东凌和何卷雄, 2005; 张东凌, 2006)中所采用的方法,也可得到各层的垂直

运动。由近表层的垂直运动分布(图 6a)可见,此时在除边界海域外的赤道印度洋均为强上升运动,在其南北两侧纬度 5°附近的中西印度洋则有强下沉运动。海洋近表层上升、下沉运动则分别会造成海洋上层海温的负、正异常(张东凌和何卷雄, 2005; 张东凌, 2006; 吕庆平等, 2015),这样以上的垂直运动异常分布会造成赤道印度洋近表层海温产生负异常,在距赤道两侧纬度 5°附近的中西印度洋海温产生正异常,并在南北向呈现正—负—正的海温异常经向分布态势。文献在利用冬季海表温度异常(Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA)资料对整个印度洋所做的 EOF 分解中,其第一模态空间场在热带印度洋的经向分布也有类似本文的态势[参见文献(徐志清和范可, 2012)中的图 1a];尽管 SSTA 受辐射和感热的影响较大,且该资料使用的分辨率也较粗,为 2.5°(纬度)×2.5°(经度)。本文第一模态的这种经向分布态势与文献(张东凌和何卷雄, 2005)中的纬向分布态势即 IOD 的截然不同,而这也是 IOD 在冬季趋于衰亡的直接原因。

本文第二模态的垂直运动异常如图 6b 所示,其在东印度洋的赤道上垂直运动异常有类似文献(Ha et al., 2012)的分布,其造成的近表层海温异常在赤道东印度洋也呈北负南正的分布态势。

### 4.3 第一模态与南亚冬季风的关系

1 月是南亚冬季风的盛行期,此时印度洋大洋环流的异常应受南亚冬季风异常的驱动,并形成了印度洋冬季风环流。在本文第一模态的空间场上,赤道印度洋和孟加拉湾的印度洋冬季风环流都有清晰体现(参见 3.1 节和图 1a),为此可称本文第一模态为印度洋冬季风环流模态。

以下进一步考察该第一模态的时间系数与南亚冬季风强、弱年份之间的关系。李琳等(2013)给出了南亚冬季风的强、弱年份(参见表 1、2)。本文按此标准,则在表 1、2 中分别给出了相应此强、弱年份的该第一模态时间系数值(仅取其整数部分)。由表 1 可见,在印度洋冬季风强年,该时间系数除 1967 年为负值外,其余均为较大的正值,符号相关为 10/11,其中有 9 年时间系数值接近或大于 800。由表 2 可见,在印度洋冬季风弱年,该时间系数除有 4 年为正值外(最大正值小于 800),其余均为负值,符号相关为 9/13。以上结果表明,该模态时间系数与南亚冬季风的强、弱年份有较高相关,该第一模态的确反映了印度洋洋流异常对南

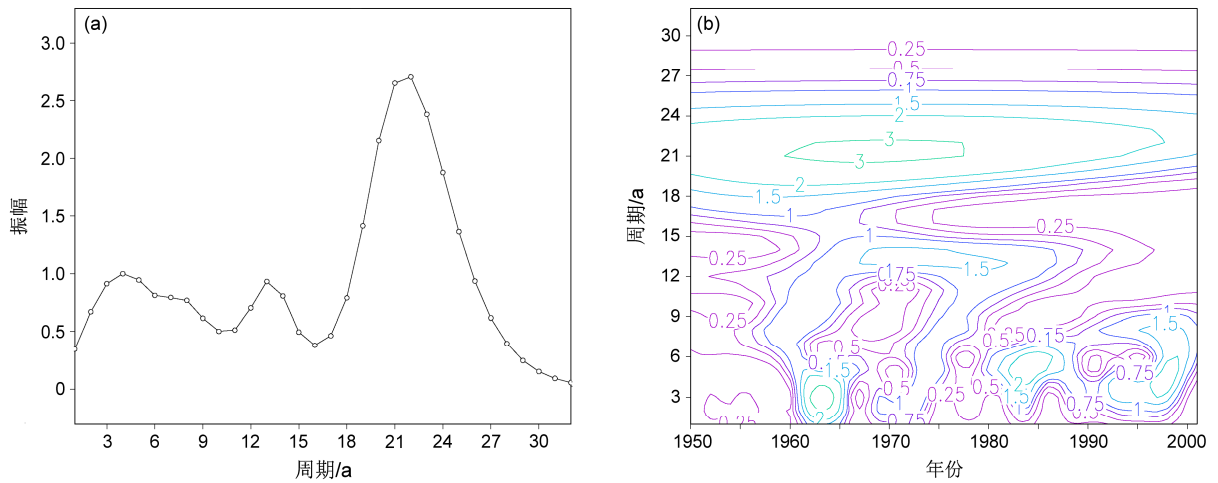


图5 同图3, 但为第二模态

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for the second mode

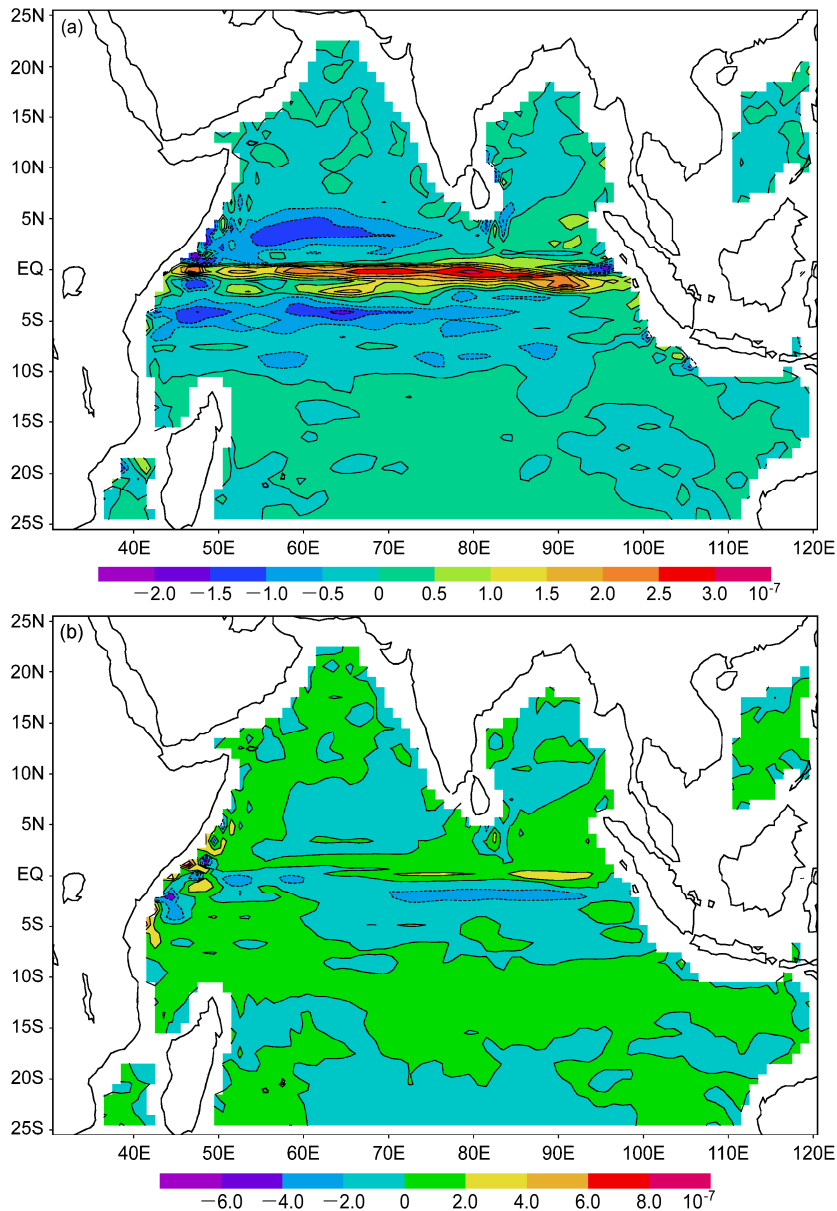


图6 近表层垂直速度场的分布: (a) 第一模态; (b) 第二模态

Fig. 6 The near-surface vertical velocity distribution: (a) The first mode; (b) the second mode

亚季风异常的响应，故称该第一模态为印度洋季风环流模态是恰当的。该第一模态有明显的约 18 年的年代际变化主周期并贯穿始终。由此可认为，该主周期反映了印度洋大洋环流异常对南亚季风异常响应的年代际变化。

表 1 南亚季风强年第一模态时间系数

Table 1 Time coefficients of the first leading mode in strong South Asia winter monsoon years

年份	时间系数	年份	时间系数
1967	-1883	1981	372
1968	827	1982	1128
1969	823	1986	778
1977	856	1992	821
1978	1242	1997	2867
1979	1199		

表 2 南亚季风弱年第一模态时间系数

Table 2 Time coefficients of the first leading mode in weak South Asian winter monsoon years

年份	时间系数	年份	时间系数
1960	-235	1984	-50
1965	762	1988	255
1966	-527	1996	-535
1970	-2305	1998	-3811
1971	355	1999	-2085
1973	-64	2000	-1607
1983	168		

#### 4.4 年代际变化及其与太平洋的关系

本文第一、二模态分别有非常突出的约 18、22 年的年代际变化主周期，并均贯穿始终。注意到本文第二模态年代际变化的主周期约为 22 年，而这也是冬季北太平洋主要气候模态 PDO 的周期（杨修群等，2004），也分别是冬季北太平洋和冬季热带太平洋流场异常第一模态年代际变化的主周期，且表现十分突出（卢炯，2014；吕庆平等，2015），并与本文第二模态的小波分析图（图 5a）类似。这或许不是偶然的，而是说明本文第二模态的该主周期可能是冬季北太平洋 PDO 模态以及北太平洋和热带太平洋两者流场异常第一模态在印度洋流场异常第二模态上的反映。

从文献（卢炯，2014；吕庆平等，2015）中还可可见，在冬季北太平洋和冬季热带太平洋流场异常的第二模态上，两者表现最明显的年代际变化主周期均为约 18 年，而这正是本文第一模态表现最明显的主周期。这同样或许不是偶然的，这说明本文第一模态（其与南亚季风密切相关），在冬季北

太平洋和热带太平洋流场异常第二模态上也有反映。

此外，从本文的第一、二模态小波全谱图（图 3a、图 5a）上还可可见，其都有约 13 年的年代际变化周期，而该周期正是北太平洋次要气候模态 NPGO 的周期（吕庆平等，2013）在冬季北太平洋和冬季热带太平洋流场异常的第二模态上也均有所体现（卢炯，2014；吕庆平等，2015）。由此可认为本文第一、二模态约 13 年的周期可能是热带印度洋对北太平洋次要气候模态 NPGO 的响应。

在冬季，从本文给出的印度洋与卢炯等（2014）、吕庆平等（2015）分别给出的北太平洋及热带太平洋流场异常各模态的以上关系可见，热带印度洋与北太平洋和热带太平洋海气系统之间可能存在相互影响，而影响的途径会通过海洋桥和大气桥来进行。海洋桥的途径最可能是印尼穿越流。大气桥的途径主要表现在东亚和南亚季风的相互影响上，这是由于两者均与冬季的蒙古西伯利亚冷高压密切相关，其是东亚和南亚季风的共同源头。除此而外还可能与赤道纬向风（Walker 环流）的异常有关（陈隽和孙淑清，1999）。至于上述海洋桥与大气桥存在性的论证以及其具体的影响机理，则仍需要做深入细致的探究，不过我们的工作也在这方面提供了一些有用的线索。

## 5 结语

本文利用 CEOF 分解等方法对冬季热带印度洋上层流场异常做了模态分析，并进行了讨论，得到了以下主要结果：

(1) 该流场异常前两个模态都呈现赤道俘获波形式，其异常在赤道上最大，向南北两侧迅速衰减，在赤道附近主要呈现纬向流形态；第一、二模态分别体现了大洋赤道波动的半波和 1 波形态，赤道波动在冬季热带印度洋流场异常中占有重要地位。

(2) 第一、二模态由海洋垂直运动异常所导致的近表层海温异常，前者在印度洋的南、北纬 5°间呈现南北向正一负一正的分布态势，这也与 IOD 的不同，后者则在赤道东印度洋呈现北负南正的分布态势。

(3) 位于赤道印度洋和孟加拉湾的印度洋季风环流在第一模态空间场上都有清晰体现，南亚季风的强、弱年份与该模态时间系数有较高相关，



该模态为印度洋季东风环流模态。

(4) 第一、二模态都有明显的年际变化和年代际变化,前者周期均为3~5年;后者的主周期分别为约18、22年,此外还均有约13年的周期;第一、二模态年代际变化的主周期则与冬季北太平洋和热带太平洋流场异常第二、一模态的主周期相同。

由于本文是诊断分析,故很难对热带印度洋海气系统的彼此影响机理,以及其与太平洋海气系统之间的相互影响机理做出具体深入的揭示,而只能在这方面提供一些有用的线索,为此利用海气耦合气候模式进行数值试验应是一条有效途径。

### 参考文献 (References)

Cai W J, van Rensch P, Cowan T, et al. 2012. An asymmetry in the IOD and ENSO teleconnection pathway and its impact on Australian climate [J]. *J. Climate*, 25 (18): 6318–6329, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00501.1.

曹杰, 陶云, 段旭. 2002. 云南 5 月强降雨天气与亚洲季风变化的关系 [J]. *云南大学学报 (自然科学版)*, 24 (5): 361–365. Cao Jie, Tao Yun, Duan Xu. 2002. The relation between the May very heavy rainfall in Yunnan and the Asia monsoon index [J]. *Journal of Yunan University (Natural Sciences)* (in Chinese), 24 (5): 361–365, doi: 10.3321/j.issn: 0258-7971.2002.05.011.

Carton J A, Giese B S. 2008. A reanalysis of ocean climate using simple ocean data assimilation (SODA) [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136 (8): 2999–3017, doi: 10.1175/2007MWR1978.1.

陈隽, 孙淑清. 1999. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究 [J]. *大气科学*, 23 (1): 101–111. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (1): 101–111, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1999.01.12.

Ha K J, Heo K Y, Lee S S, et al. 2012. Variability in the East Asian monsoon: A review [J]. *Meteorological Applications*, 19 (2): 200–215, doi: 10.1002/met.1320.

Hashizume M, Chaves L F, Minakawa N. 2012. Indian Ocean dipole drives malaria resurgence in East African highlands [J]. *Scientific Reports*, 2: 269, doi: 10.1038/srep00269.

李琳, 李崇银, 阙志萍. 2013. 南亚季风区 TBO 机制的进一步研究 [J]. *热带气象学报*, 29 (1): 1–6. Li Lin, Li Chongyin, Que Zhiping. 2013. Further research on mechanism of TBO in South Asian monsoon region [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 29 (1): 1–6, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2013.01.001.

刘舸, 纪立人, 孙淑清, 等. 2013. 关于东亚冬季风指数的一个讨论——东亚中、低纬冬季风的差异 [J]. *大气科学*, 37 (3): 755–764. Liu Ge, Ji Liren, Sun Shuqing, et al. 2013. A discussion on the East Asian winter monsoon index—Differences between the East Asian winter monsoon at mid-high and low latitudes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 755–764, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12054.

卢娟, 包赞, 吕庆平. 2014. 热带太平洋上层流场异常的复 EOF 分析 [J].

海洋预报, 31 (2): 56–66. Lu Xu, Bao Yun, Lü Qingping. 2014. CEOF analysis for upper current of tropic Pacific Ocean [J]. *Marine Forecasts* (in Chinese), 31 (2): 56–66, doi: 10.11737/j.issn.1003-0239.2014.02.009.

Luo J J, Zhang R C, Behera S K, et al. 2010. Interaction between El Niño and extreme Indian Ocean Dipole [J]. *J. Climate*, 23 (3): 726–742, doi: 10.1175/2009JCLI3104.1.

吕庆平, 路凯程, 张铭. 2013. 北太平洋冬季上层海温异常的 NPGO 模态 [J]. *气候与环境研究*, 18 (2): 210–220. Lü Qingping, Lu Kaicheng, Zhang Ming. 2013. NPGO mode of the upper sea temperature anomalies in the North Pacific during winter [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 18 (2): 210–220, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11156.

吕庆平, 卢娟, 朱娟, 等. 2015. 冬季北太平洋流场异常主要模态与 PDO 及 NPGO 的关系 [J]. *海洋学研究*, 33 (2): 1–7. Lü Qingping, Lu Xu, Zhu Juan, et al. 2015. Relationship between the main modes of circulation anomalies and the PDO, NPGO modes in the North Pacific during winter [J]. *Journal of Marine Sciences* (in Chinese), 33 (2): 1–7, doi: 10.3969/j.issn.1001-909X.2015.02.001.

Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44 (1): 25–43.

North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706, doi: 10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.

彭京备. 2012. 东印度洋海温对中国南方冬季降水的影响 [J]. *气候与环境研究*, 17 (3): 327–338. Peng Jingbei. 2012. Influence of the sea surface temperature in the eastern Indian Ocean on the wintertime rainfall in the southern part of China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (3): 327–338, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10139.

Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401 (6751): 360–363.

肖莺, 张祖强, 何金海. 2009. 印度洋偶极子研究进展综述 [J]. *热带气象学报*, 25 (5): 621–627. Xiao Ying, Zhang Zuqiang, He Jinhai. 2009. Progresses in the studies on Indian Ocean dipoles [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 25 (5): 621–627, doi: 10.3969/j.issn.1004-4965.2009.05.014.

徐志清, 范可. 2012. 冬季和春季印度洋海温异常年际变率模态对中国东部夏季降水的可能影响过程 [J]. *大气科学*, 36 (5): 879–888. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2012. Possible process for influences of winter and spring Indian Ocean SST anomalies interannual variability mode on summer rainfall over Eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (5): 879–888, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176.

徐志清, 范可. 2014. 印度洋海温异常年际变率模态对中国东部地区夏季降水影响机制的数值试验 [J]. *气候与环境研究*, 19 (1): 31–40. Xu Zhiqing, Fan Ke. 2014. Simulating the mechanism of the interannual variability mode of the Indian Ocean Sea surface temperature anomalies impacting on the summer rainfall over Eastern China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 19 (1): 31–40, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12114.

晏红明, 李崇银. 2007. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响 [J]. *大气科学*, 31 (1): 64–76. Yan Hongming, Li Chongyin. 2007. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian

- Ocean and its influence on climate [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 64–76, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.07.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. 大气科学, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (6): 979–992, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.15.
- 张东凌, 何卷雄. 2005. 热带印度洋上层洋流的动力统计诊断 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 387–400. Zhang Dongling, He Juanxiong. 2005. Dynamic statistic diagnosis of upper current in tropical Indian Ocean [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 387–400, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2005.03.12.
- 张东凌. 2006. 亚洲夏季风空间结构与时间演变的动力统计分析 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士论文, 286–292. Zhang Dongling. 2006. Dynamic statistic analysis of space structure and time evolution in Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 286–292.
- 张东凌, 吕庆平, 张立凤. 2015. 冬季北太平洋海气环流年代际异常的统计动力诊断 [J]. 大气科学, 39 (4): 692–704. Zhang Dongling, Lü Qingping, Zhang Lifeng. 2015. Dynamical statistic analysis of decadal anomalies of air–sea circulation in the North Pacific during winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 692–704, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14132.