

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176. 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.

# 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

徐志清<sup>1,2</sup> 范可<sup>1,3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国科学院东亚区域气候环境重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 印度洋热力状况是影响全球气候变化和亚洲季风变异的一个重要的因素, 但以往研究更多关注热带印度洋海温的变化, 对南印度洋中高纬地区海温变化关注不够, 由此限制了对印度洋的全面认识。本文研究了年际尺度上整个印度洋海温异常主导模态的特征及其对我国东部地区夏季降水的可能影响过程, 以期望为气候变异研究及预测提供理论依据。研究结果表明: 全印度洋海温异常年际变率的主导模态特征是在南印度洋副热带地区海温异常呈现西南—东北反向变化的偶极子模态, 西极子位于马达加斯加以东南洋面, 东极子位于澳大利亚以西洋面; 同时, 热带印度洋海温异常与东极子一致。当西极子为正的海温异常, 东极子、热带印度洋为负异常时定义为正的印度洋海温异常年际变率模态; 反之, 则为负的印度洋海温异常年际变率模态。从冬至春, 印度洋海温异常年际变率模态具有较好的季节持续性; 与我国长江中游地区夏季降水显著负相关, 而与我国华南地区夏季降水显著正相关。其可能的影响过程为: 对于正的冬、春季印度洋海温异常年际变率模态事件, 印度洋地区异常纬向风的经向大气遥相关使得热带印度洋盛行西风异常, 导致春、夏季海洋性大陆对流减弱, 使夏季西太平洋副热带高压强度偏弱、位置偏东偏北, 造成华南地区夏季降水增多, 长江中游地区降水减少; 反之亦然。同时, 印度洋海温异常年际变率模态可通过改变印度洋和孟加拉湾向长江中游地区的水汽输送而影响其夏季降水。

**关键词** 印度洋 海温异常年际变率模态 中国东部夏季降水 经向大气遥相关

文章编号 1006-9895(2012)05-0879-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11176

## Possible Process for Influences of Winter and Spring Indian Ocean SST Anomalies Interannual Variability Mode on Summer Rainfall over Eastern China

XU Zhiqing<sup>1,2</sup> and FAN Ke<sup>1,3</sup>

1 Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Key Laboratory of Regional Climate-Environment for East Asia, Chinese Academy of Sciences Beijing 100029

**Abstract** The thermal conditions of the Indian Ocean is an important factor that can affect the global climate and Asian

收稿日期 2011-09-27, 2012-04-01 收修定稿

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB950304, 公益性行业(气象)科研专项 GYHY200906018, 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-BR-14, 国家自然科学基金资助项目 41175071

作者简介 徐志清, 男, 1987 年出生, 硕士, 从事气候动力学研究。E-mail: xuzq@mail.iap.ac.cn

通讯作者 范可, E-mail: fanke@mail.iap.ac.cn

monsoon variability. Previous studies have paid much more attention to sea surface temperature (SST) variability in the tropical Indian Ocean than the middle- and high-latitude South Indian Ocean, which limits the overall understanding about the Indian Ocean. This study presents the leading mode of the Indian Ocean sea surface temperature anomalies (SSTA) on interannual time scale and the possible process for its influences on summer rainfall over eastern China, expecting to provide a theoretic basis for climate variations research and prediction. The results indicate that the leading mode of the Indian Ocean SSTA on interannual time scale is characterized by southwest–northeast oriented dipole oscillation in the subtropical South Indian Ocean. The western pole is located in the southeast of Madagascar and the eastern pole lies in the west of Australia, varying consistently with the tropical Indian Ocean SSTA. Here, the positive (negative) Indian Ocean SSTA interannual variability mode is defined as positive (negative) SSTA in the western pole and negative (positive) SSTA in the eastern pole and the tropical Indian Ocean. The interannual variability mode, which can persist during winter and spring, is significantly negatively correlated with summer rainfall over the middle reach of the Yangtze River (MYR), but significantly positively correlated with rainfall over South China (SC). The possible mechanism can be described as follows: for positive Indian Ocean SSTA interannual variability mode events during winter and spring, the meridional atmospheric teleconnection of zonal wind anomalies in the Indian Ocean leads to westerly anomalies in the tropical Indian Ocean which depress the convective activities over the Maritime Continent in spring and summer. The depressed convective activities make the western Pacific subtropical high weaken and shift northward and eastward, conducting to increased rainfall over SC and reduced rainfall over MYR, and vice versa. Moreover, the Indian Ocean SSTA interannual variability mode can also influence summer rainfall over MYR by changing its water vapor transport stemming from the Indian Ocean and the Bay of Bengal.

**Key words** Indian Ocean, SSTA interannual variability mode, summer rainfall over eastern China, meridional atmospheric teleconnection

## 1 引言

印度洋作为亚澳季风区下垫面的重要组成部分,其热力状况的改变通过海气相互作用影响亚澳季风及全球气候。自 Saji et al. (1999) 和 Webster et al. (1999) 提出热带印度洋偶极子 (IOD) 后,热带印度洋海气相互作用对东亚气候的影响受到广泛关注,并取得了大量的研究成果 (李崇银和穆明权, 2001; 肖子牛等, 2002; 巢纪平等, 2003; 巢纪平和袁绍宇, 2003; 谭言科等, 2003; 闫晓勇和张铭, 2004; 梁肇宁等, 2006; 温之平等, 2006; Zhou and Wang, 2006; Huang and Shukla, 2007a, 2007b; 周波涛和崔绚, 2008; Xie et al., 2009; 袁媛和李崇银, 2009; 赵珊珊等, 2009; Yang et al., 2010)。但对南印度洋中高纬地区海气相互作用研究相对较少。同时,研究表明南极涛动作为南半球中高纬大气环流主要的气候变率模态 (Gong and Wang, 1999), 它的年际和年代际变化对我国北方沙尘生成频次、东亚季风及降水和台风生成频次等都产生重要的影响 (王会军和薛峰, 2003; 薛峰等 2003; Fan and Wang, 2004; Wang and Fan, 2005; 范可, 2006; Fan and Wang, 2007), 而南印度洋中高纬海气相互作用又是联系南半球中高纬环流与东亚气候的一个关键的物理过程。

Behera and Yamagata (2001) 发现南印度洋副热带地区海表温度异常存在偶极子振荡的现象,即副热带偶极子模态 (SDP)。SDP 主要表现为马达加斯加以东南洋面与澳大利亚以西北洋面海表温度异常的反向变化并通过改变南非地区上空水汽输送对南非夏季 (北半球冬季) 降水产生重要的影响。SDP 具有年际和年代际周期振荡 (Qian et al., 2002; 贾小龙和李崇银, 2005; 杨秋明, 2006)。自提出 SDP 后,学者们对 SDP 的形成机制和气候影响进行了一系列的研究。SDP 形成的主要原因是由于马斯克林高压位置和强度变化改变 SDP 东、西极子地区的风速,进而引起海表潜热通量的变化而形成 (Behera and Yamagata, 2001; Suzuki et al., 2004; Huang and Shukla, 2008; Terray, 2011); 其它因素如: Ekman 输送、洋流、短波辐射等对 SDP 形成也起重要的作用 (Huang and Shukla, 2008; Terray, 2011)。SDP 独立于 El Niño–Southern Oscillation (ENSO) 和 IOD, 是南印度洋副热带地区海气耦合的结果 (Behera and Yamagata, 2001; 杨秋明, 2006; Huang and Shukla, 2007b)。但 SDP 又与 ENSO 存在一定的联系 (晏红明等, 2009; Terray, 2011)。不同季节的 SDP 对我国气候的影响是不同: 贾小龙和李崇银 (2005) 揭示前一年夏季和秋季的南印度洋偶极子对次年我国夏季降水有

影响。杨秋明(2006)发现前冬 SDP 对我国北方春季降水的影响。杨明珠和丁一汇(2007)研究了春季 SDP 分别对 5 月, 6~8 月我国不同区域降水的影响, 并揭示了春季 SDP 正、负位相下海洋性大陆的海表温度变化(SST)变化和水汽输送的特征。

以上的研究都是将 SDP 和 IOD 作为独立的事件, 然而 SDP 和 IOD 两者在年际变化上具有相互联系(刘琳和于卫东, 2006)。而 SDP 与海洋性大陆和热带西太平洋热力变化如何联系? 排除 ENSO 信号后, 印度洋海温年际变率模态对我国夏季降水的影响是否存在? 这些问题并不清楚。因此, 本文把印度洋海温异常作为一个整体, 研究其主要的年际变率模态特征以及它对我国气候的可能影响过程。并通过滤波提取大气及印度洋海温的年际信号, 同时去掉 ENSO 异常年份的影响, 期望为认识印度洋海气相互作用过程、气候变异及预测提供理论依据。

## 2 资料和方法

本文使用的资料: (1) 美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)发布的月平均再分析资料, 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ; (2) 美国国家海洋大气局(NOAA)气候诊断中心提供的 SST 扩展重建资料(NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature V3b), 水平分辨率为  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ ; (3) 中国气象局国家气候中心整编的 160 站点逐月降水资料, 时间范围均为 1951 年 12 月至 2009 年 11 月。本文中各季均相对于北半球而言, 冬季指前一年 12 月至当年 2 月, 而春季和夏季则分别为当年 3 月至 5 月和 6 月至 8 月。

主要使用的方法有: 滤波、经验正交函数(EOF)展开、相关及合成分析等。对大气、海温资料采用 Butterworth 滤波器进行 7 年高通滤波。春季 Niño3.4 区域的原始海温距平大于等于  $0.5^{\circ}\text{C}$  (小于  $-0.5^{\circ}\text{C}$ ) 的赤道东太平洋海温异常定义为春季 El Niño (La Niña) 事件。在合成分析时去掉了春季 ENSO 事件的影响。

## 3 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态的时空分布特征

我们对冬、春季整个印度洋海表温度异常(SSTA)进行 EOF 展开可以发现(图 1a、b), 冬季第一空间模态表现为( $50^{\circ}\text{S} \sim 40^{\circ}\text{S}$ ,  $80^{\circ}\text{E}$ )以西是

正的 SSTA, 其它中高纬和热带印度洋地区为负的 SSTA, 异常中心分别在马达加斯加以东南洋面(正异常)与澳大利亚以西洋面(负异常), 两者呈现反向变化类似于 SDP, 但副热带异常中心的位置与 SDP 有差异。春季印度洋海温模态的特征与冬季相似, 只是马达加斯加以东南洋面的正 SSTA 显著向东扩展, 澳大利亚以西洋面负 SSTA 减弱, 正、负 SSTA 梯度较冬季显著减弱。为方便讨论, 本文将冬、春季海印度洋温异常的第一空间模态定义为印度洋海温异常年际变率模态。冬、春季第一空间模态的方差贡献率分别为 29.52% 和 25.77%, 说明印度洋海温异常年际变率模态在冬季更为显著。冬、春季印度洋海温异常年际变率模态时间系数的相关系数为 0.835, 超过了 99% 的置信水平, 说明整个印度洋海温异常年际变率模态在冬、春季节具有很好季节持续性。

## 4 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态与我国东部地区夏季降水的关系

本文将马达加斯加以东南洋面 SSTA (西极子) 为正, 澳大利亚以西洋面 SSTA (东极子)、热带印度洋 SSTA 为负, 定义为正的印度洋海温异常年际变率模态; 反之, 则为负的印度洋海温异常年际变率模态。将第一空间模态标准化的时间系数定义为印度洋海温异常年际变率模态指数。并将该指数大于等于 0.5 (小于 -0.5) 的印度洋海温异常为正(负)的印度洋海温异常年际变率模态事件。冬、春季印度洋海温异常年际变率模态与我国东部地区夏季降水有何关系? 若将冬、春季印度洋海温异常年际变率模态指数(印度洋 SSTA 第一空间模态标准化的时间系数)分别与我国东部地区夏季降水异常的求相关(图 2)。由图 2 可知, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水的影响基本一致, 它们分别与我国长江中游地区夏季降水负相关, 而与我国华南夏季降水正相关, 说明对于正(负)的冬、春季印度洋海温异常年际变率模态, 夏季华南降水增多(减少), 长江中游降水减少(增多)。由此, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水有预测意义, 预测信号可以提前到冬季。

我国东部地区夏季降水异常与东亚地区夏季大气环流异常有密切联系, 而这种环流异常是否源

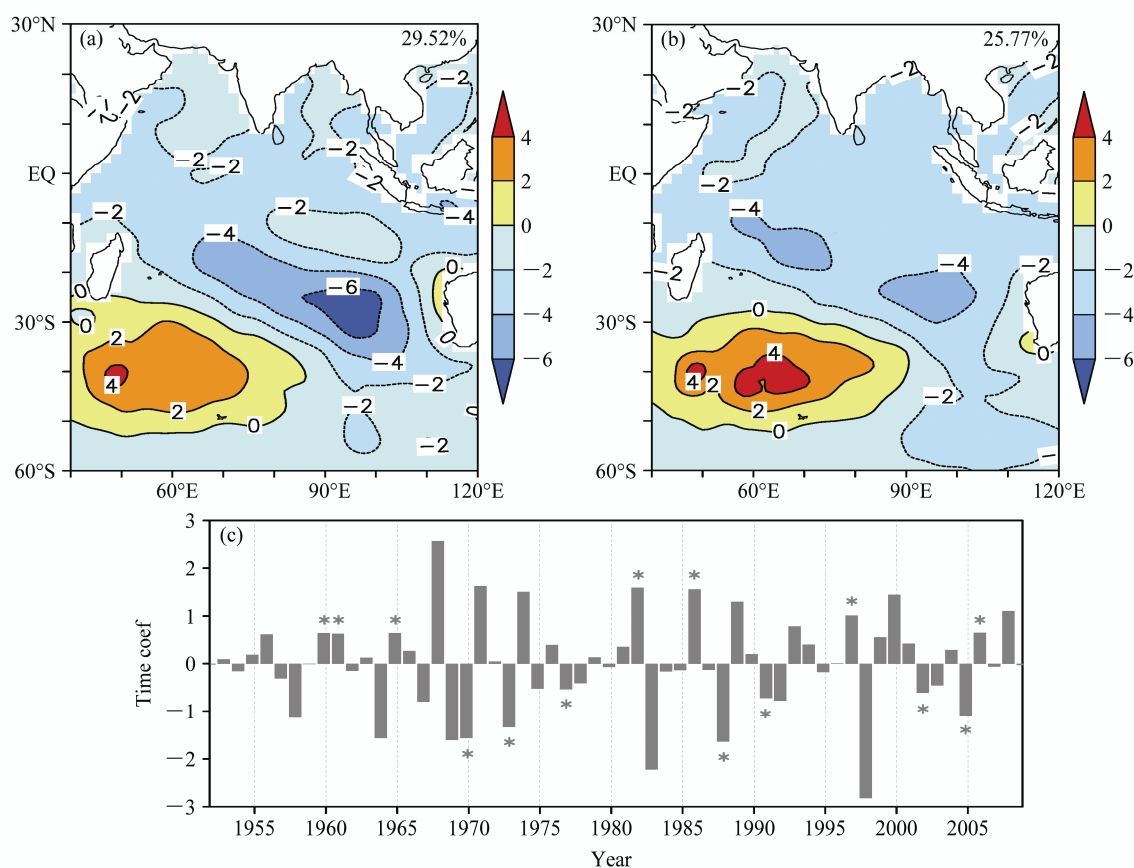


图1 冬、春季印度洋(60°S~30°N, 40°E~120°E)海表温度异常 EOF 展开的第一空间模态: (a) 冬季(DJF); (b) 春季(MAM); (c) 春季第一空间模态标准化的时间系数(星号表示用于合成分析的年份)

Fig.1 Spatial distribution of the first component of Empirical Orthogonal Function analysis (EOF1) of Indian Ocean (60°S~30°N, 40°E~120°E) sea surface temperature anomalies (SSTA) for (a) DJF (Dec-Jan-Feb) and (b) MAM (Mar-Apr-May); (c) the standardized time series of EOF1 for MAM, the asterisks stand for the years used for composite

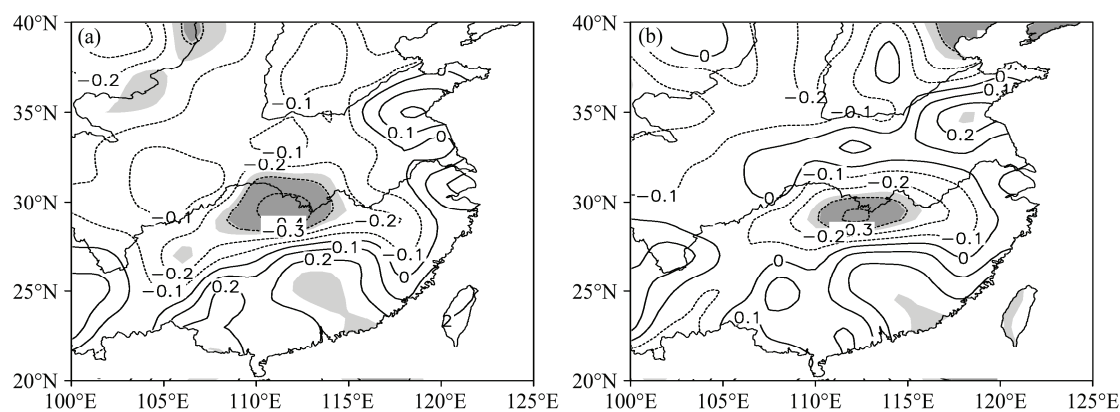


图2 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态指数与中国东部地区夏季(JJA)降水的相关系数: (a) 冬季; (b) 春季。浅、深阴影: 通过置信水平为 90%、95%显著性  $t$  检验的区域(下同)

Fig.2 Correlation maps of the Indian Ocean SSTA interannual variability mode index during (a) DJF and (b) MAM with rainfall over eastern China in JJA (Jun-Jul-Aug). The shading denotes regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student  $t$ -test (the same below)

于冬、春季印度洋海温年际变率模态的影响? 影响的机制是什么? 由于冬、春季印度洋海温异常年际变率模态及其对我国东部地区夏季降水的影响都

具有很好的季节持续性, 因而本文主要集中于探讨在去除同期 ENSO 事件的影响下, 春季印度洋海温异常年际变率模态对东亚地区夏季大气环流的影

响及其可能的机制。如图 1c 所示, 在去除同期 ENSO 事件的影响下, 1952 年至 2009 年中, 发生正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件的年份为 1960、1961、1965、1982、1986、1997、2006, 发生负的春季印度洋海温异常年际变率模态事件的年份为 1970、1973、1977、1988、1991、2002、2005。因而, 本文根据上述正、负春季印度洋海温异常年际变率模态事件年份对各要素场进行合成分析。

## 5 印度洋海温异常年际变率模态相关的大气环流和水汽输送

为进一步研究冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水的可能影响机制, 我们首先分析了印度洋海温异常年际变率模态相关的大气环流。图 3a 是春季印度洋海温异常年际变率模态指数与夏季海平面气压的相关场。春季印度洋海温异常年际变率模态与副热带印度洋和热带印度洋海平面气压是显著的正相关, 与西太平洋区域和南太平洋副热带区域海平面气压是显著的负相关, 表明对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态, 夏季南半球的副热带高压包括马斯克林高压和澳大利亚高压加强, 印度低压减弱, 南太平洋副热带高压和西太平洋副热带高压减弱; 对于负的春季印度洋海温异常年际变率模态, 则反之。Fan (2007) 发现南极涛动在 6~9 月具有纬向的不对称性, 并指出它与南方涛动的变化有关。我们注意到印度洋海温异常年际变率模态与南极涛动纬向不对称性相关, 正的春季印度洋海温异常年际变率模态对应于东半球南极涛动加强和西半球南极涛动减

弱。同时, 夏季 200 hPa 风场相关场中 (图 3b), 南印度洋中高纬 (70°S~50°S) 盛行西风异常, 中纬度地区 (50°S~30°S) 盛行东风异常, 热带印度洋盛行西风异常。南太平洋中纬度地区 (60°S~40°S) 盛行东风异常, 副热带地区 (35°S~25°S) 则为西风异常, 北太平洋副热带 30°N 附近盛行西风异常, 热带盛行东风异常, 由此说明印度洋海温异常年际变率模态与南极涛动及亚洲夏季季风系统 (马斯克林高压、澳大利亚高压、西太平洋副热带高压等) 关系密切, 进而影响我国东部地区夏季降水。

西太平洋副热带高压变化是影响我国东部地区夏季降水异常分布的一个重要系统。黄荣辉和孙凤英 (1994) 研究指出热带西太平洋暖池增暖, 从菲律宾周围经南海到中印半岛的对流活动增强, 西太平洋副热带高压的位置偏北, 我国江淮流域夏季降水偏少; 相反, 若热带西太平洋暖池变冷, 菲律宾周围的对流活动减弱, 副热带高压偏南, 江淮流域降水偏多, 黄河流域降水偏少。Chang et al. (2000) 研究指出西太平洋副热带高压加强造成长江流域夏季降水偏多主要通过 3 种途径: (1) 西太平洋副热带高压阻碍了梅雨锋的南移, 使梅雨锋在长江流域停留的时间偏长; (2) 使西太平洋副热带高压西北侧的气压梯度加大, 使梅雨锋偏强; (3) 使南海地区海洋下沉运动加强, 进而使南海地区 SST 偏暖, 使长江流域获得的水汽偏多。图 4 为正、负春季印度洋海温异常年际变率模态事件夏季西太平洋副热带高压变化。对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件, 西太平洋副热带高压强度偏弱, 位置偏东偏北。对于负的印度洋海温异常年际

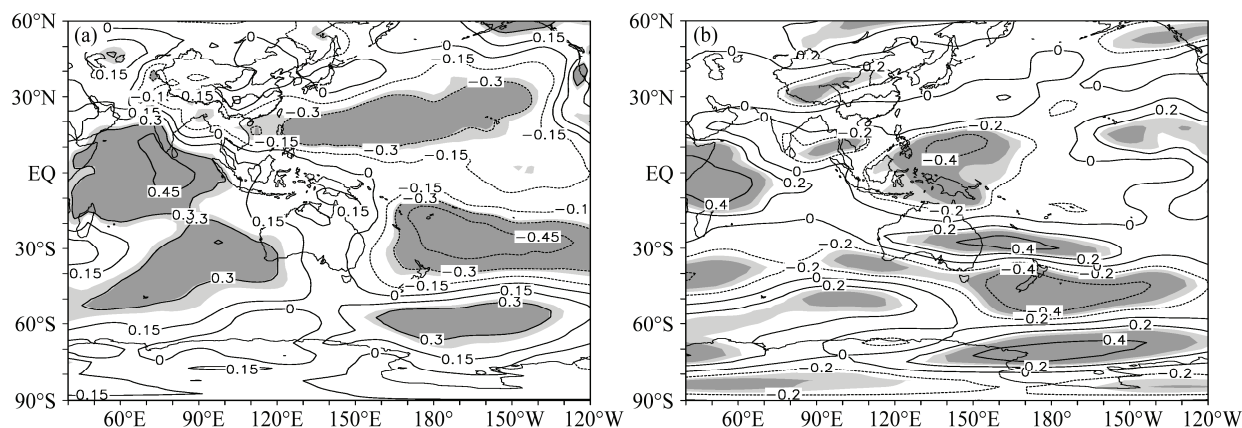


图3 春季印度洋海温异常年际变率模态指数与夏季 (a) SLP 和 (b) 200 hPa 纬向风相关场

Fig.3 Correlation maps of the Indian Ocean SSTA interannual variability mode index during MAM with (a) Sea Level Pressure (SLP) and (b) 200-hPa zonal wind in JJA, respectively

变率模态事件, 西太平洋副热带高压强度偏强, 位置偏西偏南。夏季西太平洋副热带高压的变化是华南和长江中游地区降水变化的原因。

水汽输送是影响我国东部地区夏季降水的另一个重要条件。夏季南大洋水汽主要通过两个路径到达我国东部地区, 一个是通过索马里低空越赤道气流, 途经阿拉伯海、孟加拉湾及中南半岛到达我国东部地区, 另一路径则是通过  $105^{\circ}\text{E}$  附近的越赤道气流, 经南海到达我国东部地区 (图略)。当发生正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件时, 夏季南印度洋和孟加拉湾北部地区出现水汽辐合 (图略), 由此造成印度洋和孟加拉湾向长江中游

地区水汽输送减少, 而华南和南海地区处于水汽辐合带, 有利于华南降水增加。反之, 亦然。

## 6 可能的影响机制

冬、春季南印度洋海气相互作用过程是如何持续影响到夏季西太平洋副热带高压和水汽输送的变化? 对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件, 夏季  $850\text{ hPa}$  等压面上 (图 5a), 南印度洋中高纬地区为反气旋环流异常, 反气旋环流异常中心位于  $(40^{\circ}\text{S}, 100^{\circ}\text{E})$  附近。热带西太平洋地区则存在一个异常气旋对, 南侧气旋性环流异常位于澳大利亚的西北侧, 异常中心位于  $(10^{\circ}\text{S}, 120^{\circ}\text{E})$  附近, 北侧气旋性环流异常位于南海至菲律宾以东洋面。热带西太平洋两侧异常气旋对加强了赤道西风, 使澳大利亚北侧赤道至菲律宾以东洋面出现西风异常。而 Xue et al. (2004) 研究揭示, 随着澳大利亚高压及其越赤道气流加强, 热带西太平洋两侧异常气旋对加强赤道西风, 通过影响南海至菲律宾以东洋面对流活动而影响西太平洋副热带高压的强度和位置。春季 (图略) 环流异常与夏季基本一致, 但强度偏弱, 异常中心也存在一定差异。在这种环流形势下, 导致了南印度洋高纬出现西风带异常和中纬度东风带异常。南印度洋中纬度东风异常表示中纬度西风减弱, 由此将减弱高纬的冷海水向赤道的 Ekman 输送, 导致南印度洋中高纬海温增暖。与此同时, 由于春、夏季南印度洋中高纬和澳大利亚西北侧的气压梯度加大, 造成澳大利亚西岸的

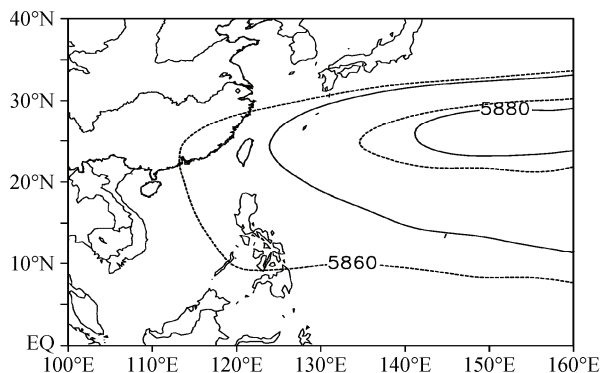


图 4 正 (实线)、负 (虚线) 春季印度洋海温异常年际变率模态事件夏季  $500\text{ hPa}$  西太平洋副热带高压的位置 (单位: gpm)

Fig.4 The composite  $500\text{-hPa}$  western Pacific subtropical high in JJA for positive (solid line) and negative (dashed line) Indian Ocean SSTA interannual variability mode events during MAM (units: gpm)

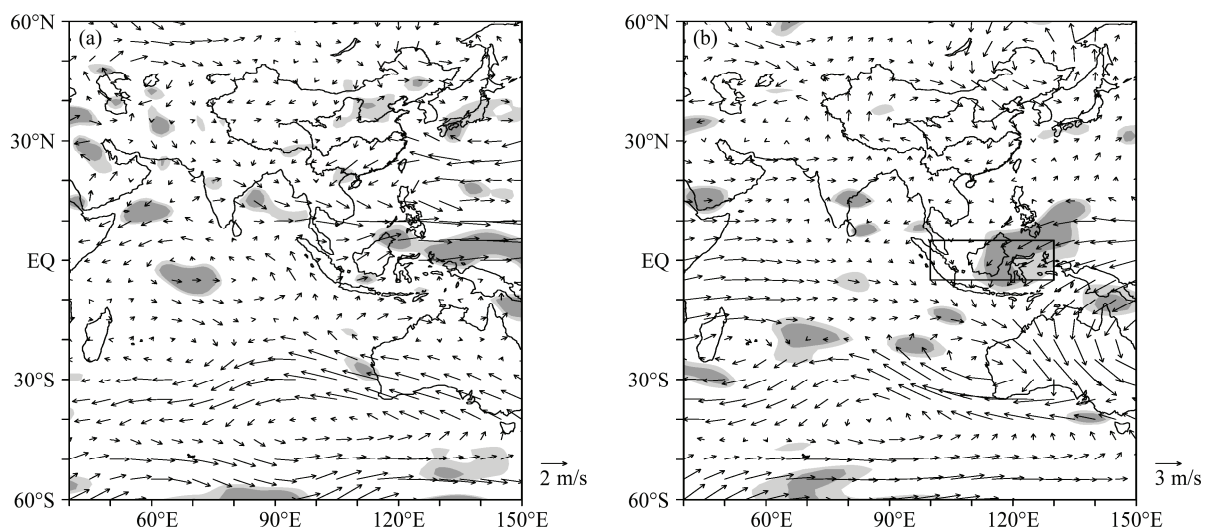


图 5 春季印度洋海温异常年际变率模态事件对应的夏季 (a)  $850\text{ hPa}$  和 (b)  $200\text{ hPa}$  风场差异场 (正-负)。矩形框: 异常风场的辐合区

Fig.5 The difference fields of the wind vectors at (a)  $850\text{ hPa}$  and (b)  $200\text{ hPa}$  in JJA for the Indian Ocean SSTA interannual variability mode events during MAM (positive-negative). The rectangle stands for the convergence region of anomalous wind vectors

东南风加强, 根据风驱动的海洋动力过程, 分别在东南风的东北侧(西南侧), 由于蒸发加强(减弱), 使得澳大利亚北侧(西南印度洋中高纬)海温变冷(暖)。研究表明澳大利亚附近和西南印度洋海温的异常与海洋性大陆和南海至菲律宾以东洋面对流活动关系密切, 它们可以激发南北半球的遥相关, 影响西太平洋副热带高压进而影响东亚气候(Sun et al., 2009; Liu et al., 2010; 周波涛, 2011)。

对流层高层 200 hPa 合成风场特征在春、夏季同样具有很好季节持续性(图 5b)。其主要特征是: 对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件, 南印度洋高纬盛行西风异常, 中纬度则为东风异常, 热带印度洋盛行西风异常, 同时热带西太平洋

盛行东风异常, 印度洋西风异常和西太平洋东风异常在海洋性大陆附近辐合(图 5b、6c、6d), 导致低层辐散(图 6a、b), 由此抑制低层对流活动。而已有研究表明海洋大陆对流变化是联系两半球气候主要关键系统(Sun et al., 2009; 周波涛, 2011)。

然而, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态通过何种途径使热带印度洋出现西风异常? 我们发现对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件, 印度洋地区对流层高层平均经圈(40°E~120°E)异常纬向风的分布(图 7)表现为正、负、正的正压性经向大气遥相关分布, 且这个遥相关在春、夏季持续存在。由此猜想, 春季印度洋海温年际变率模态通过印度洋区域正压性经向遥相关, 使

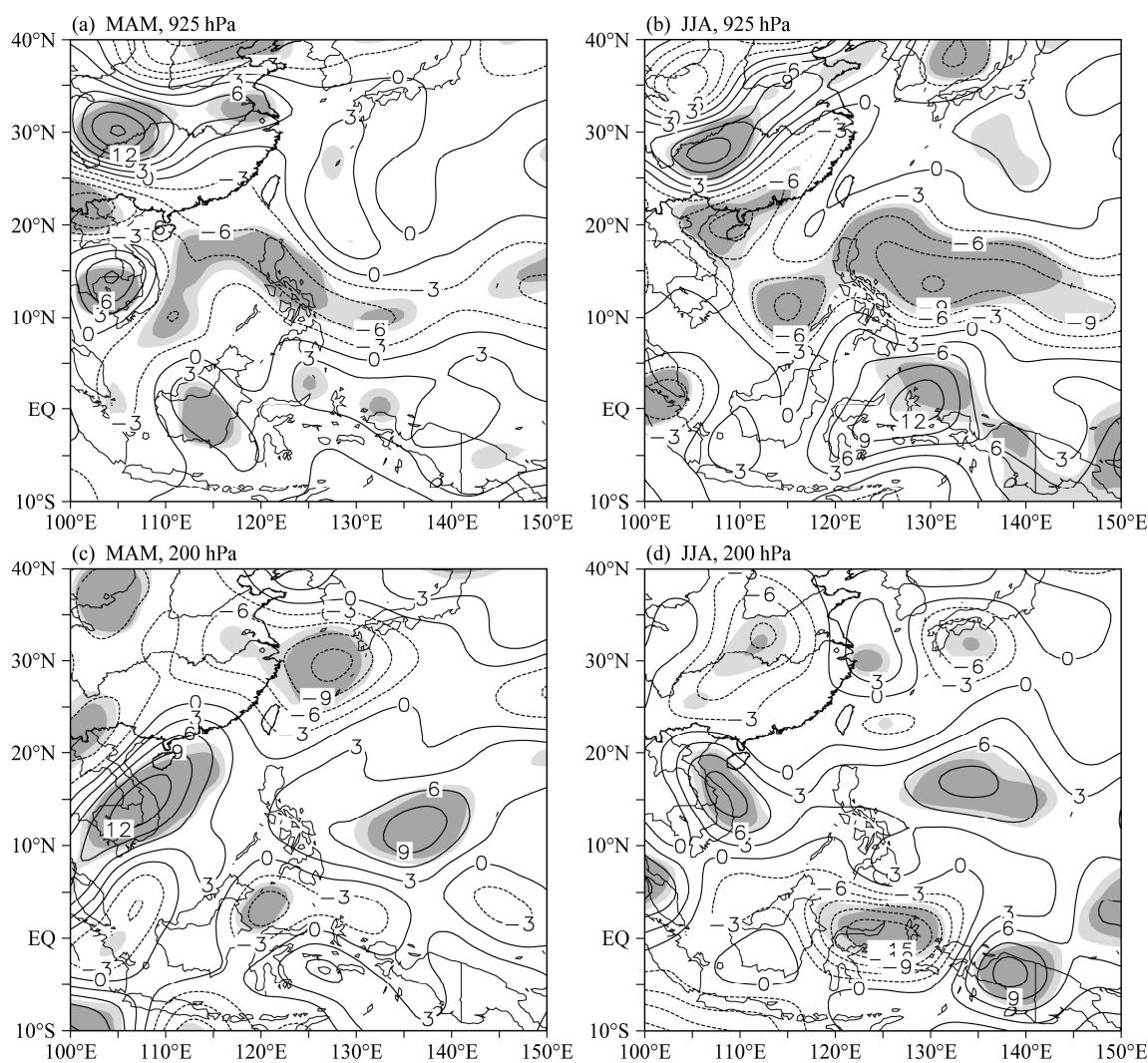


图 6 春季印度洋海温异常年际变率模态事件对应的 (a、b) 925 hPa 和 (c、d) 200 hPa 水平散度差异场 (正—负) (单位:  $10^{-7} \text{s}^{-1}$ ): (a、c) 春季; (b、d) 夏季

Fig.6 The difference fields of the horizontal divergence at (a, b) 925 hPa and (c, d) 200 hPa in (a, c) MAM and (b, d) JJA for the Indian Ocean SSTa inter-annual variability mode events during MAM (positive—negative) (units:  $10^{-7} \text{s}^{-1}$ )

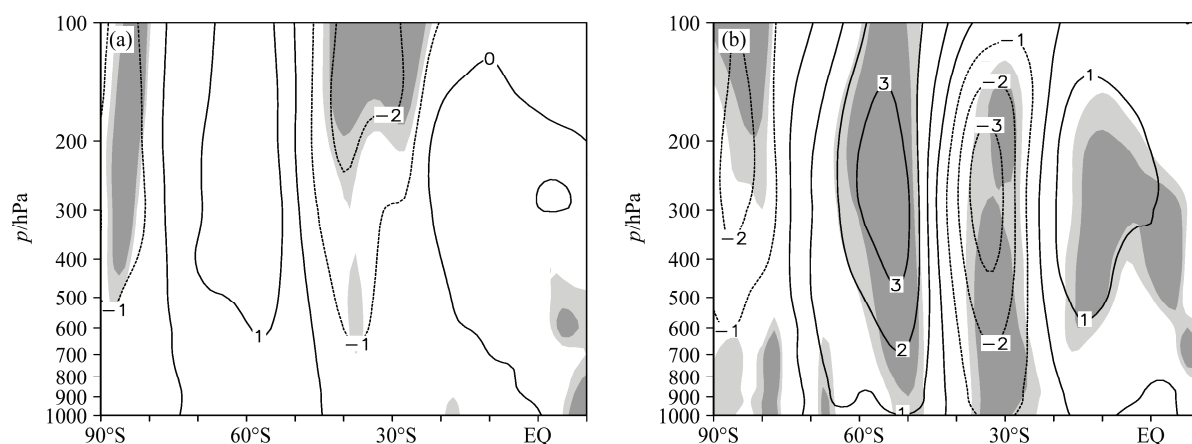


图7 春季印度洋海温异常年际变率模态事件对应的(a)春、(b)夏季印度洋地区平均经圈(40°E~120°E)纬向风的经向垂直剖面差异场(正—负)(单位: m/s)

Fig.7 The latitude–pressure cross sections of zonal averaged (40°E–120°E) zonal wind difference fields in the Indian Ocean in (a) MAM and (b) JJA for the Indian Ocean SSTa interannual variability mode events during MAM (positive–negative) (units: m/s)

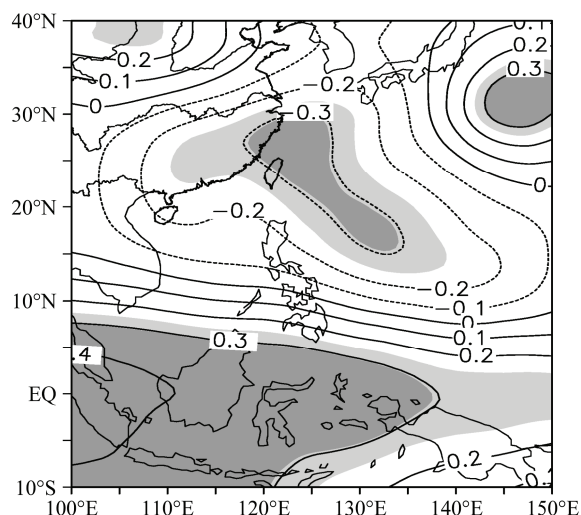


图8 夏季海洋性大陆地区区域平均(5°S~5°N, 120°E~135°E)的925 hPa水平散度与同期500 hPa位势高度的相关场

Fig.8 Correlation map of the maritime continent area averaged (5°S–5°N, 120°E–135°E) horizontal divergence at 925 hPa level in JJA with simultaneous 500-hPa geopotential height field

热带印度洋出现西风异常,与热带西太平洋高层东风异常辐合(图5b、6c、6d),导致低层海洋性大陆对流活动减弱(图6a、b),进而使夏季我国长江以南及其以东洋面500 hPa出现负位势高度异常,而日本以东南洋面则为正位势高度异常(图8),即西太平洋副热带高压偏东偏北。这表明对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态,夏季海洋性大陆地区高空辐合、低空辐散,使该地区对流活动偏弱,造成西太平洋副热带高压位置偏东偏北。

综上所述,春季印度洋海温异常年际变率模态

影响夏季西太平洋副热带高压的一个可能机制为:春季印度洋海温异常年际变率模态通过印度洋区域异常纬向风的正压经向遥相关,使得春、夏季高层热带西风加强,进而影响春、夏季海洋性大陆对流活动,而春夏季海洋性大陆对流活动异常又与西太平洋副热带高压位置和强度的变化相联系,进而影响我国东部地区夏季降水。此外,正(负)的春季印度洋海温异常年际变率模态事件造成印度洋和孟加拉湾水汽出现异常辐合(辐散)而减弱(加强)向我国长江中游的水汽输送,造成长江中游夏季降水减少(增多)。

## 7 结论

本文研究了年际尺度上冬、春季印度洋海温异常变率主导模态的特征及其对我国东部地区夏季降水的可能影响过程,研究表明冬、春季整个印度洋海温异常年际变化的主导模态为南印度洋副热带地区西南—东北向偶极子模态、热带地区则与东极子一致。冬、春季印度洋海温异常年际变率模态具有很好的季节持续性,通过海气相互作用影响夏季东亚地区的大气环流及水汽输送,对我国东部地区夏季降水产生影响,与华南地区夏季降水正相关,而与我国长江中游地区夏季降水负相关。因此,冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水形势预测有意义。

海洋性大陆是联系两半球气候异常的一个重要途径,冬、春季印度洋海温异常年际变率模态通过印度洋区域异常纬向风的正压性经向遥相关,使

热带印度洋出现西风异常, 并与热带西太平洋高层东风异常辐合导致海洋性大陆对流变化; 进而影响西太平洋副热带高压和东亚夏季降水。事实上, 海洋性大陆地区对流活动的变化不仅受印度洋海温异常年际变率模态的影响, 也受到太平洋海温及 Walker 环流变动的影响。

此外, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态可改变印度洋及孟加拉湾北部地区水汽输送, 进而影响长江中游地区夏季降水。然而, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态影响东亚夏季降水的物理过程极其复杂, 本文从观测资料揭示可能的联系过程, 未来将通过数值试验进一步研究南印度洋中高纬地区海气相互作用。

**致谢** 感谢审稿专家及编辑提出的宝贵意见!

## 参考文献 (References)

- Behera S K, Yamagata T. 2001. Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (2): 327–330.
- Chang C P, Zhang Y S, Li T. 2000. Interannual and interdecadal variations of the East Asian summer monsoon and tropical Pacific SSTs. Part I: Roles of the subtropical ridge [J]. *J. Climate*, 13 (24): 4310–4325.
- 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*, 13 (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)*, 13 (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): 251–256. Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Cai Yi. 2003. Large-scale air-sea interaction in the tropical Indian Ocean [J]. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 61 (2): 251–256.
- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. *地球物理学报*, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 49 (3): 672–679.
- Fan K. 2007. Zonal asymmetry of the Antarctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L02706, doi: 10.1029/2006GL028045.
- Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic Oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L10201, doi: 10.1029/2004GL019465.
- Fan K, Wang H J. 2007. Dust storms in North China in 2002: A case study of the low frequency oscillation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (1): 15–23.
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Definition of Antarctic Oscillation index [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 26 (4): 459–462.
- Huang B H, Shukla J. 2007a. Mechanisms for the interannual variability in the tropical Indian Ocean. Part I: The role of remote forcing from the tropical Pacific [J]. *J. Climate*, 20 (13): 2917–2936.
- Huang B H, Shukla J. 2007b. Mechanisms for the interannual variability in the tropical Indian Ocean. Part II: Regional processes [J]. *J. Climate*, 20 (13): 2937–2960.
- Huang B H, Shukla J. 2008. Interannual variability of the south Indian Ocean in observations and a coupled model [J]. *Indian Journal of Marine Sciences*, 37 (1): 13–34.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. *大气科学*, 18 (2): 141–151.
- Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 18 (2): 141–151.
- 贾小龙, 李崇银. 2005. 南印度洋海温偶极子型振荡及其气候影响 [J]. *地球物理学报*, 48 (6): 1238–1249. Jia Xiaolong, Li Chongyin. 2005. Dipole oscillation in the southern Indian Ocean and its impacts on climate [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 48 (6): 1238–1249.
- 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.
- 梁肇宁, 温之平, 吴丽姬. 2006. 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 [J]. *大气科学*, 30 (4): 619–634. Liang Zhaoning, Wen Zhiping, Wu Liji. 2006. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of South China Sea summer monsoon. I. Coupling analysis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (4): 619–634.
- Liu G, Ji L R, Sun S Q, et al. 2010. An inter-hemispheric teleconnection and a possible mechanism for its formation [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (3): 629–638.
- 刘琳, 于卫东. 2006. 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 [J]. *海洋科学进展*, 24 (3): 301–306. Liu Lin, Yu Weidong. 2006. Connection between tropical Indian Ocean dipole event and subtropical Indian Ocean dipole event [J]. *Advances in Marine Science (in Chinese)*, 24 (3): 301–306.
- Qian W H, Hu H R, Deng Y, et al. 2002. Signals of interannual and interdecadal variability of air-sea interaction in the basin-wide Indian Ocean [J]. *Atmos.–Ocean*, 40 (3): 293–311.
- Saji N H, Gowsami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401(6751): 360–363.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. *International Journal of Climatology*, 29 (9): 1276–1284.
- Suzuki R, Behera S K, Iizuka S, et al. 2004. Indian Ocean subtropical dipole simulated using a coupled general circulation model [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: C09001, doi: 10.1029/2003JC001974.
- 谭言科, 张人禾, 何金海. 2003. 热带印度洋海温的年际异常及其海气耦合特征 [J]. *大气科学*, 27 (1): 53–66. Tan Yanke, Zhang Renhe, He

- Jinhai. 2003. Features of the interannual variation of sea surface temperature anomalies and the air-sea interaction in tropical Indian Ocean [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 53–66.
- Terray P. 2011. Southern Hemisphere extra-tropical forcing: A new paradigm for El Niño-southern Oscillation [J]. Climate Dyn., 36 (11-12): 2171–2199.
- Wang H J, Fan K. 2005. Central-North China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty: Signal of the antarctic atmospheric oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L24705, doi: 10.1029/2005GL024562.
- 王会军, 薛峰. 2003. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响 [J]. 地球物理学报, 46(1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 46 (1): 18–25.
- Webster P J, Moore A M, Loschnig J P, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98 [J]. Nature, 401 (6751): 356–360.
- 温之平, 梁肇宁, 吴丽姬. 2006. 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 [J]. 大气科学, 30(6): 1138–1146. Wen Zhiping, Liang Zhaoning, Wu Liji. 2006. The relationship between the Indian Ocean sea surface temperature anomaly and the onset of the South China Sea summer monsoon. II. Analyses of mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1138–1146.
- 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 2002. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系 [J]. 热带气象学报, 18 (4): 335–344. Xiao Ziniu, Yan Hongming, Li Chongyin. 2002. The relationship between Indian Ocean SSTA dipole index and the precipitation and temperature over China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (4): 335–344.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-Western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. J. Climate, 22 (3): 730–747.
- 薛峰, 王会军, 何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响 [J]. 科学通报, 48 (3): 287–291. Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influence on the East Asian summer rainfall over East Asian [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (5): 492–497.
- Xue F, Wang H J, He J H. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon [J]. J. Meteor Soc Japan, 82 (4): 1173–1186.
- 晏红明, 李崇银, 周文. 2009. 南印度洋副热带偶极模在 ENSO 事件中的作用 [J]. 地球物理学报, 52 (10): 2436–2449. Yan Hongming, Li Chongyin, Zhou Wen. 2009. Influence of subtropical dipole pattern in southern Indian Ocean on ENSO event [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 52 (10): 2436–2449.
- 闫晓勇, 张铭. 2004. 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响 [J]. 气候与环境研究, 9 (3): 435–444. Yan Xiaoyong, Zhang Ming. 2004. A study of the Indian Ocean dipole influence on climate variations over East Asian monsoon region [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (3): 435–444.
- Yang J L, Liu Q Y, Liu Z Y. 2010. Linking observations of the Asian monsoon to the Indian Ocean SST: Possible roles of Indian Ocean basin mode and dipole mode [J]. J. Climate, 23 (21): 5889–5902.
- 杨明珠, 丁一汇. 2007. 中国夏季降水对南印度洋偶极子的响应研究 [J]. 大气科学, 31 (4): 685–694. Yang Mingzhu, Ding Yihui. 2007. A study of the impact of South Indian Ocean dipole on the summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (4): 685–694.
- 杨秋明. 2006. 南印度洋副热带偶极子型海温异常与全球环流和我国降水变化的关系 [J]. 海洋学报, 28 (3): 47–56. Yang Qiuming. 2006. Indian Ocean subtropical dipole and variations of global circulations and rainfall in China [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 28 (3): 47–56.
- 袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. 大气科学, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Chongyin. 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China sea summer monsoon onset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 325–336.
- 赵珊珊, 周天军, 杨修群, 等. 2009. 热带印度洋偶极子与中国夏季年际气候异常关系的年代际变化 [J]. 气象学报, 67 (4): 549–560. Zhao Shanshan, Zhou Tianjun, Yang Xiuqun, et al. 2011. Interdecadal change of the relationship between the tropical Indian Ocean dipole mode and the summer climate anomaly in China [J]. Acta Meteorologica Sinica, 25 (2): 129–141.
- 周波涛. 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制 [J]. 科学通报, 56 (16): 1301–1307. Zhou Botao. 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism [J]. Chinese Science Bulletin, 56 (17): 1821–1827.
- 周波涛, 崔绚. 2008. 春季 Hadley 环流与长江流域夏季降水关系的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 13 (2): 182–188. Zhou Botao, Cui Xuan. 2008. Modeling the relationship between spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (2): 182–188.
- Zhou B T, Wang H J. 2006. Relationship between the boreal spring Hadley circulation and the summer precipitation in the Yangtze River valley [J]. J. Geophys. Res., 111: D16109, doi: 10.1029/2005JD007006.