

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12114. 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.

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

徐志清^{1,2} 范可^{1,3}

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 中国科学院大学, 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 利用 ECHAM5 全球大气环流模式研究了印度洋海温异常年际变率模态从冬至夏的演变对我国东部地区夏季降水影响的机制。观测资料研究表明: 对于正的印度洋海温异常年际变率模态, 春、夏季热带印度洋和澳大利亚以西洋面(东极子)均为水汽的异常源区, 向马达加斯加以东南洋面(西极子)及印度洋邻近大陆提供水汽。夏季, 印度洋地区南极涛动、马斯克林高压加强; 而印度季风低压和南亚高压均减弱, 对应于印度夏季风减弱。夏季印度洋地区正压性的纬向风异常经向遥相关使热带印度洋地区出现西风异常, 导致海洋性大陆地区对流活动减弱, 而菲律宾海地区对流活动加强, 进而导致西太平洋副热带高压偏弱、位置偏东北。对于负的印度洋海温异常年际变率模态, 则反之。模式结果基本支持了已有的观测资料诊断结果。

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 数值模拟

文章编号 1006-9585 (2014) 01-0031-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.12114

Simulating the Mechanism of the Interannual Variability Mode of the Indian Ocean Sea Surface Temperature Anomalies Impacting on the Summer Rainfall over Eastern China

XU Zhiqing^{1,2} and FAN Ke^{1,3}

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

2 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 ECHAM5 atmospheric general circulation model was used to study how the evolution of the interannual variability mode (IVM) of the Indian Ocean sea surface temperature anomalies (SSTA) from winter to summer influence summer rainfall over eastern China. Observations show that, for positive IVM, the tropical Indian Ocean and the region west of Australia (the west pole) are an anomalous source of water vapor in spring and summer, and provide the water vapor for the region southeast of Madagascar (the east pole) and the continents surrounding the Indian Ocean. In summer, the intensity of Antarctic Oscillation (AAO) over the Indian Ocean region and the Mascarene High increase, whereas the Indian monsoon trough and the South Asia High decrease, which indicates that the Indian summer monsoon circulation weakens. The meridional atmospheric teleconnection of zonal wind anomalies in the Indian Ocean causes westerly anomalies in the tropical

收稿日期 2012-06-25 收到, 2012-12-04 收修定稿

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

Indian Ocean, which depress convective activities over the Maritime Continent but enhance them over the Philippine Sea during summer. This makes the western Pacific subtropical high decrease and shift northeastward. For negative IVM, the observations are the opposite. The model results basically support the abovementioned observations.

Keywords Indian Ocean SST anomalies, Interannual variability mode, Summer rainfall over eastern China, Meridional atmospheric teleconnection, Numerical simulation

1 引言

印度洋地区的 SST 异常对其邻近地区的气候有重要的影响。热带印度洋地区 SST 异常如：全场一致模态和偶极子模态及其气候影响得到了广泛的关注 (Saji et al., 1999; 李崇银和穆明权, 2001; 肖子牛等, 2002; Zhou and Wang, 2006; Yang et al., 2007; Li et al., 2008; 周波涛和崔绚, 2008; 周波涛, 2011)。研究表明南半球中高纬环流与亚洲气候关系密切 (王会军和薛峰, 2003; 薛峰等, 2003; Fan and Wang, 2004, 2007; Wang and Fan, 2005; 范可, 2006; Sun et al., 2009), 而南印度洋中高纬地区的海气相互作用可能是联系两者的一个关键物理过程。因而, 有必要深入研究南印度洋中高纬地区的 SST 异常及其与大气环流的相互作用。事实上, 副热带南印度洋地区 SST 异常也存在偶极子振荡现象, 即副热带偶极子模态 (SDP) (Behera and Yamagata, 2001)。利用观测资料和模式结果, 前人研究主要讨论了 SDP 的形成机制、年际和年代际变率、气候影响及其与 ENSO 的关系等 (Reason, 2001, 2002; Qian et al., 2002; Fauchereau et al., 2003; Hermes and Reason, 2005; Terray and Dominiak, 2005; Chiodi and Harrison, 2007; Huang and Shukla, 2008; 晏红明等, 2009; Morioka et al., 2010; Terray, 2011)。前期 SDP 对春、夏亚洲季风区的气候有重要的影响 (贾小龙和李崇银, 2005; 杨秋明, 2006; 杨明珠和丁一汇, 2006, 2007)。基于前人的研究, 徐志清和范可 (2012) 讨论了年际尺度上冬、春季整个印度洋 SST 异常的主导模态, 发现在热带印度洋地区为全场一致模态, 而副热带印度洋地区为西南—东北向的偶极模态, 并将该模态定义为印度洋海温异常年际变率模态。然后讨论了在去除春季 ENSO 影响的情况下, 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态与中国东部地区夏季降水的关系及可能的影响机制。

然而, 一个地区气候异常的成因非常复杂, 是由多个因素共同决定的, 而且各因素之间也可能存在相互作用。就亚洲季风区而言, 印度洋 SST 异常

只是其气候异常的原因之一, 北极海冰异常、太平洋和大西洋的 SST 异常等均能够对其产生重要的影响 (Wang et al., 2000; Lu et al., 2006; Wu et al., 2009a); 而这些因素之间也存在密切的联系 (Liu et al., 2004; Xie et al., 2009), 从观测资料来单独研究印度洋 SST 异常对亚洲季风区气候的影响存在一定的不确定性。因此, 本文开展印度洋海温年际变率模态对中国东部地区夏季降水影响的数值试验, 研究是否存在观测资料所揭示的影响过程。

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° (纬度) $\times 2.5^\circ$ (经度), 时间范围为 1952~2009 年; (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° (纬度) $\times 2^\circ$ (经度), 时间范围为 1952~2009 年。由于我国东部地区夏季降水存在明显的年代际振荡 (黄荣辉等, 1999; Ding et al., 2008); 印度洋地区近几十年海盆尺度增暖明显 (Alory et al., 2007), 同时也存在年代际信号 (周天军等, 2001)。因而, 与徐志清和范可 (2012) 研究一致, 本文对观测资料各要素场均进行 7 年高通滤波处理以获得年际信号。文章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 3~5 月和 6~8 月。

为开展数值试验工作, 本文采用德国马普气象研究所 (MPI) 发展的 ECHAM5 全球大气环流模式, 模式的设计和性能可参考 Roeckner et al. (2003, 2006)。ECHAM5 模式是一种谱模式, 它提供多种水平分辨率和垂直分辨率供用户选择, 本文采用的水平分辨率为 T63, 垂直方向分为 19 层。大量研究表明 ECHAM5 模式对亚洲季风区的气候变率具有很好的模拟能力 (杨军丽等, 2007)。

徐志清和范可 (2012) 将马达加斯加以东南洋

面 SST 异常（西极子）为正，澳大利亚以西洋面 SST 异常（东极子）和热带印度洋地区 SST 异常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。根据徐志清和范可（2012）研究，在去除同期 ENSO 的影响下 1952~2009 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 年，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 年。因而，本文观测资料均根据上述正、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，以讨论其气候影响。图 1 给出了对应于春季印度洋海温异常年际变率模态事件 1~8 月原始 SST 异常的演

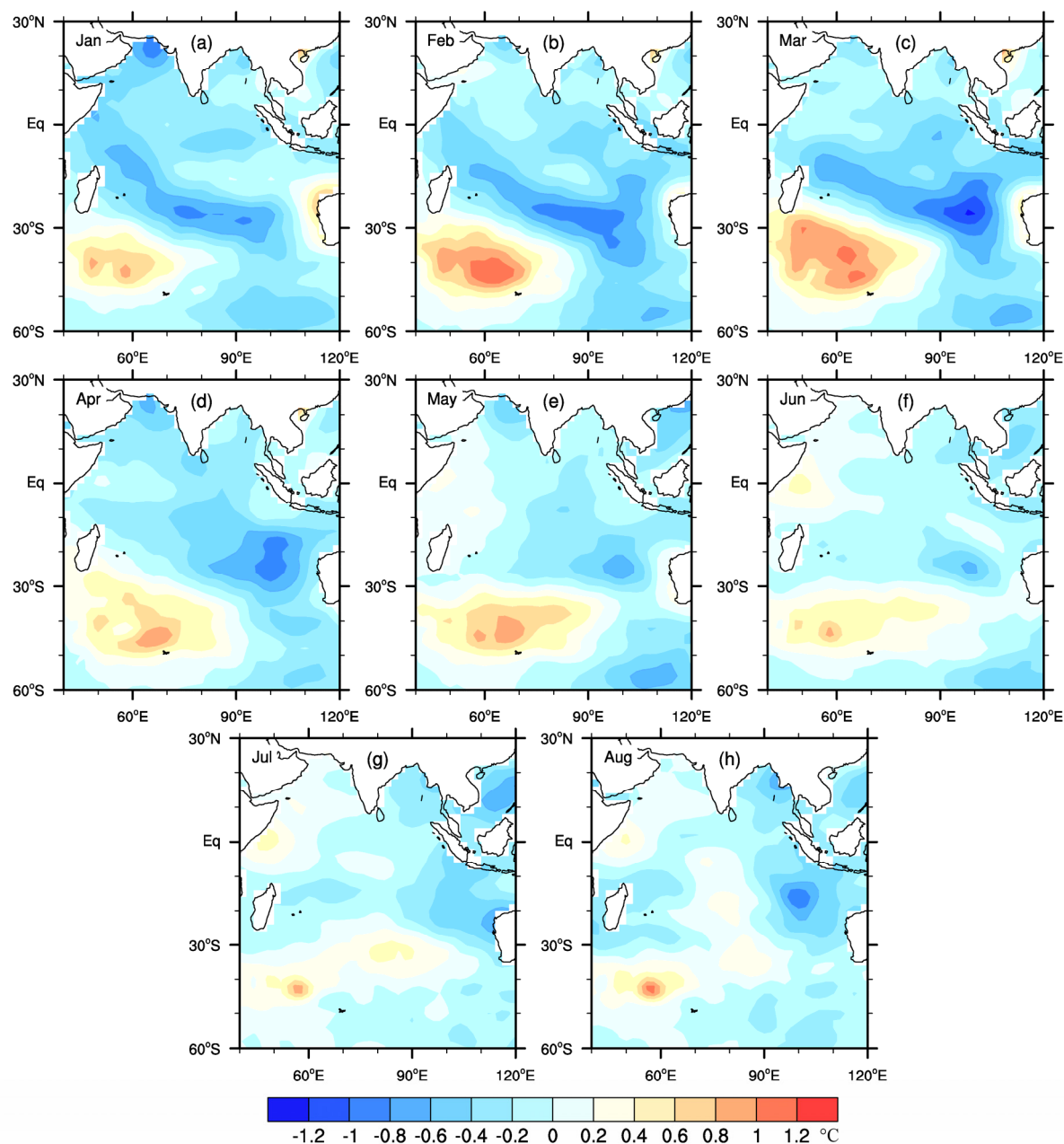


图 1 1~8 月印度洋原始海表温度异常差异场（正—负：对于观测资料而言，表示正、负春季印度洋海温异常年际变率模态事件对应的变量之差；对于模式结果而言，表示正、负印度洋海温异常年际变率模态强迫试验对应的变量之差。下同）（单位：℃）：(a) 1 月；(b) 2 月；(c) 3 月；(d) 4 月；(e) 5 月；(f) 6 月；(g) 7 月；(h) 8 月

Fig. 1 The difference field of raw sea surface temperature (SST) (°C) in Indian Ocean from January to August [positive—negative: Standing for the difference between the variables of positive and negative interannual variability mode (IVM) events of the Indian Ocean sea surface temperature anomalies (SSTA) in spring for observation, but standing for the difference between the variables of positive and negative experiment of IVM of the Indian Ocean SSTA for model result. The same below): (a) Jan; (b) Feb; (c) Mar; (d) Apr; (e) May; (f) Jun; (g) Jul; (h) Aug

变。如图所示, 1~4 月(图 1a~1d) 热带印度洋地区($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) 为负的 SST 异常, 南印度洋副热带地区 SST 异常则为偶极子模态, 西极子为正的 SST 异常, 东极子为负的 SST 异常。5~8 月(图 1e~1h) 热带印度洋地区 SST 异常则为西正、东负的偶极子模态, 即正的热带印度洋偶极子模态; 副热带印度洋地区 SST 异常的偶极子模态则逐渐减弱、消亡, 西极子正的 SST 异常向东扩展明显, 导致 $50^{\circ}\text{S}\sim 40^{\circ}\text{S}$ 纬度带内基本为正的 SST 异常。

为了揭示印度洋地区海温异常年际变率模态对我国东部地区夏季降水的影响机制, 本文主要设计了 3 组集合试验, 每组集合试验包含 30 个样本。具体步骤如下: 首先, 利用模式自带的月平均 SST 的气候态驱动模式, 连续积分 30 年, 作为控制试验的样本; 同时也可以获得 30 个全球大气的初始场, 本文取控制试验各样本上一年 12 月 31 日全球大气各要素场的值。其次, 使印度洋地区月平均 SST 的气候态在 1~8 月出现如图 1 所示的异常, 在控制试验获得的 30 个全球大气初始场的情况下, 用其驱动模式, 分别积分 1 年, 以获得正强迫试验的样本。由于控制试验获得的 30 个全球大气的初始场均由模式自带的月平均 SST 的气候态强迫而得, 之间相差甚微; 因而正强迫试验相当于同一 SST 强迫下, 全球大气初始场出现细微扰动的集合试验。负的强迫试验与正的强迫试验类似, 但 SST 异常符号刚好相反。本文分析的数值试验结果均为正的强迫试验与负的强迫试验的差异场。

3 数值试验结果分析

3.1 春、夏季整层水汽输送通量辐散分量异常

研究表明降水与整层水汽输送通量的辐合、辐散关系密切 (Starr and Peixoto, 1958; Chen and Tzeng, 1990; 陈际龙和黄荣辉, 2007)。整层水汽输送通量异常辐合 (辐散), 降水增加 (减少)。为表征两则的对应关系, 本文将整层水汽输送通量分解为旋转分量和辐散分量 (Chen and Tzeng, 1990), 并集中讨论辐散分量异常。图 2 给出观测资料和模式春、夏季整层水汽输送通量辐散分量的异常分布。就观测资料而言, 春季热带中印度洋及东极子地区为整层水汽输送通量的异常辐散区, 将其上空暖湿气流输送到邻近大陆及西极子地区 (图 2a), 这导致印度洋邻近大陆、西极子地区春季降水基本

偏多, 而热带印度洋地区及东极子地区春季降水基本偏少 (图略)。夏季热带中、东印度洋至东极子地区为整层水汽输送通量的异常辐散区 (图 2c), 夏季降水减少 (图略); 整层水汽输送通量的异常辐散区将其上空水汽输送至热带西印度洋及其邻近的非洲大陆、西极子及我国华南地区地区, 使上述地区为异常辐合区 (图 2c), 夏季降水增加 (图略)。对比春、夏印度洋地区 SST 异常和整层水汽输送通量辐散分量异常的空间分布型 (图 1c~1h, 图 2a、2c) 可以发现, 两者关系密切。正 (负) 的 SST 异常一般对应于整层水汽输送通量辐散分量异常辐合 (辐散), 降水增加 (减少)。正的 SST 异常区域对流活动加强, 低层异常辐合, 降水偏多, 为整层水汽输送异常的汇。相反, 负的 SST 异常区域对流活动一般偏弱, 低层异常辐散, 降水偏少, 为整层水汽异常的源, 向其周围提供水汽。此外, 春、夏季东极子地区负的 SST 异常要大于热带印度洋地区 (图 1c~1h), 但整层水汽输送通量的异常辐散中心主要位于热带印度洋地区 (图 2a、2c)。这可能源于热带印度洋的背景 SST 更高, 与对流活动活跃的临界 SST 更为接近 (Graham and Barnett, 1987)。因而, 在热带印度洋地区, SST 异常对对流活动异常的影响更大, 导致的降水异常和整层水汽输送通量的辐散 (辐合) 异常也更大。

模式基本能够模拟出春季整层水汽输送通量辐散分量的异常空间型, 异常辐散中心也与观测基本一致 (图 2a、2c)。模式对夏季整层水汽输送通量辐散分量异常的模拟则相对差一些, 基本模拟出辐散分量异常的空间分布型, 主要差异表现为在热带西印度洋出现虚假的异常辐合中心 (图 2b、2d)。模式能够较好地模拟出春、夏季整层水汽输送通量辐散分量异常的空间分布型, 这进一步说明了 SST 异常与整层水汽输送通量辐散分量异常及降水异常关系密切。

3.2 夏季高、低层位势高度异常

观测资料夏季位势高度场异常在 30°S 以南印度洋地区较大, 为正压结构; 而 30°S 以北地区相对较小, 为斜压结构 (图 3a、3c)。就 30°S 以南印度洋地区而言, 中纬地区 ($30^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{S}$) 850 hPa 和 200 hPa 位势高度均为正异常, 而高纬、极地地区为负异常 (图 3a、3c), 表明夏季南极涛动在印度洋地区加强, 并且为正压结构。 30°S 以北地区 850 hPa 位势高度除中南半岛至菲律宾海地区为负异常外, 其他区域均为正异常 (图 3a), 表明夏季

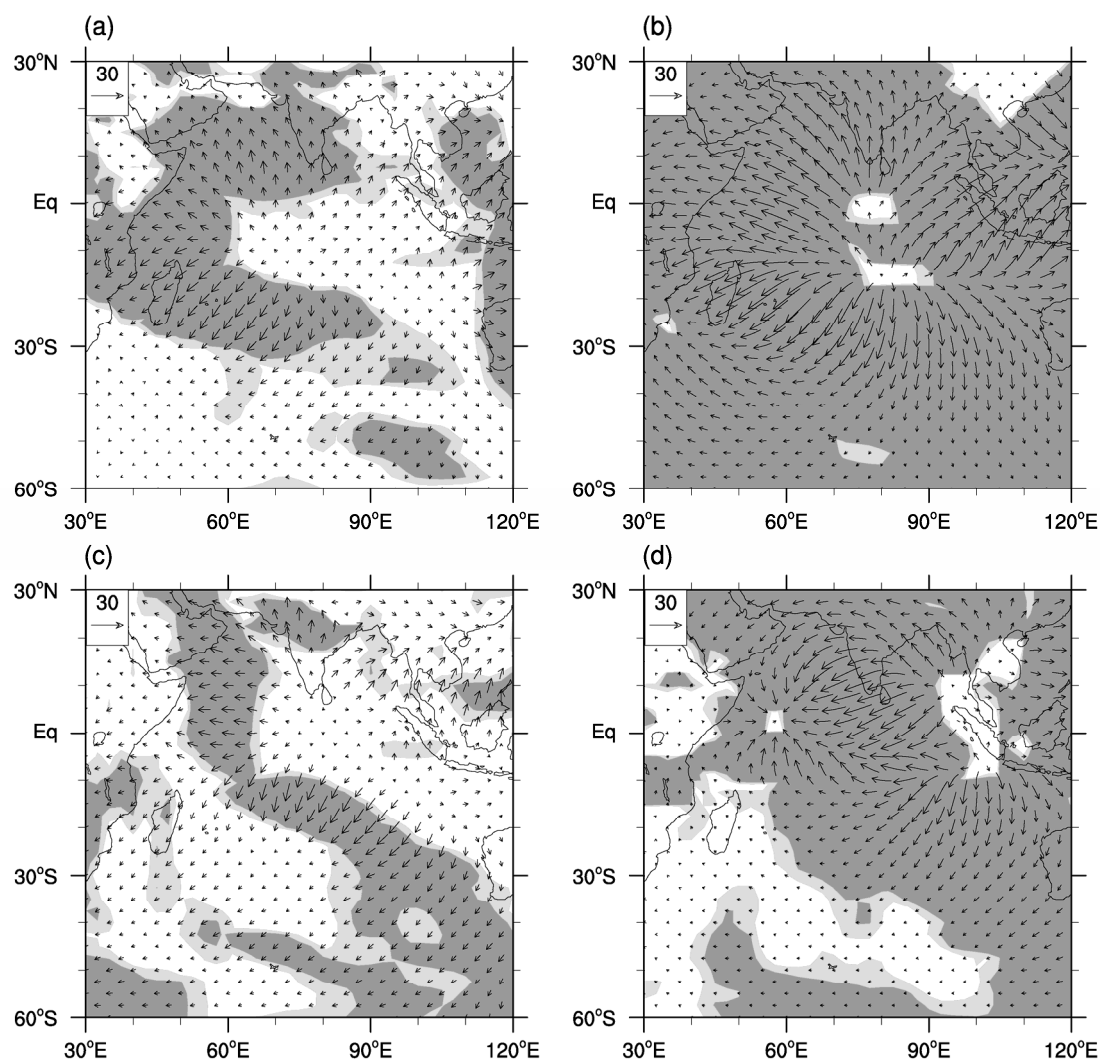


图2 7年高通滤波观测(左列)和模式模拟(右列)春、夏季整层(地表至300 hPa)水汽输送通量辐散分量的差异场(正—负)(单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$): (a、b)春季;(c、d)夏季。浅、深阴影分别表示通过置信水平为90%、95%显著性 t 检验的区域

Fig. 2 The difference fields of divergent components of vertically integrated (surface to 300 hPa) water vapor transport flux ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) in MAM (March, April, and May) and JJA (June, July, and August) for 7-year high-pass filtered observation (left panel) and simulation (right panel) (positive—negative): (a, b) MAM; (c, d) JJA. The shadings denote regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student t -test, respectively

西太平洋副热带高压和印度季风低压减弱, 马斯克林高压加强; 200 hPa 则为负异常(图 3c), 表明夏季南亚高压偏弱。夏季印度季风低压和南亚高压均减弱, 表明印度夏季风环流减弱, 印度夏季降水减少(杨明珠和丁一汇, 2006)。观测资料和模式结果的夏季高、低层位势高度异常在空间分布型上基本一致(图 3)。南极涛动、马斯克林高压的加强及印度季风低压、南亚高压的减弱均得到很好的模拟; 但对西太平洋副热带高压异常的模拟偏弱, 而且异常主要集中在菲律宾海地区(图 3b、3d)。综上所述, 夏季印度洋地区南极涛动加强, 且为正压结构, 马斯克林高压也加强, 而西太平洋副热带高压、印度季风低压和南亚高压均减弱, 印度夏季风

环流减弱; ECHAM5 模式则能够很好地模拟以上几个环流系统异常的空间型。

3.3 春季印度洋海温异常年际变率模态影响中国东部地区夏季降水可能机制的模拟

徐志清和范可(2012)研究表明, 冬、春季印度洋海温异常年际模态与我国长江中游夏季降水负相关, 而与华南地区夏季降水正相关。影响的可能机制为: 当冬、春季印度洋海温年际变率模态正异常时, 印度洋区域纬向风异常的经向大气遥相关使得热带印度洋地区出现纬向风异常, 导致低层海洋性大陆和菲律宾海地区对流活动发生变化, 进而影响夏季西太平洋副热带高压的变化, 并最终影响我国东部地区夏季降水。

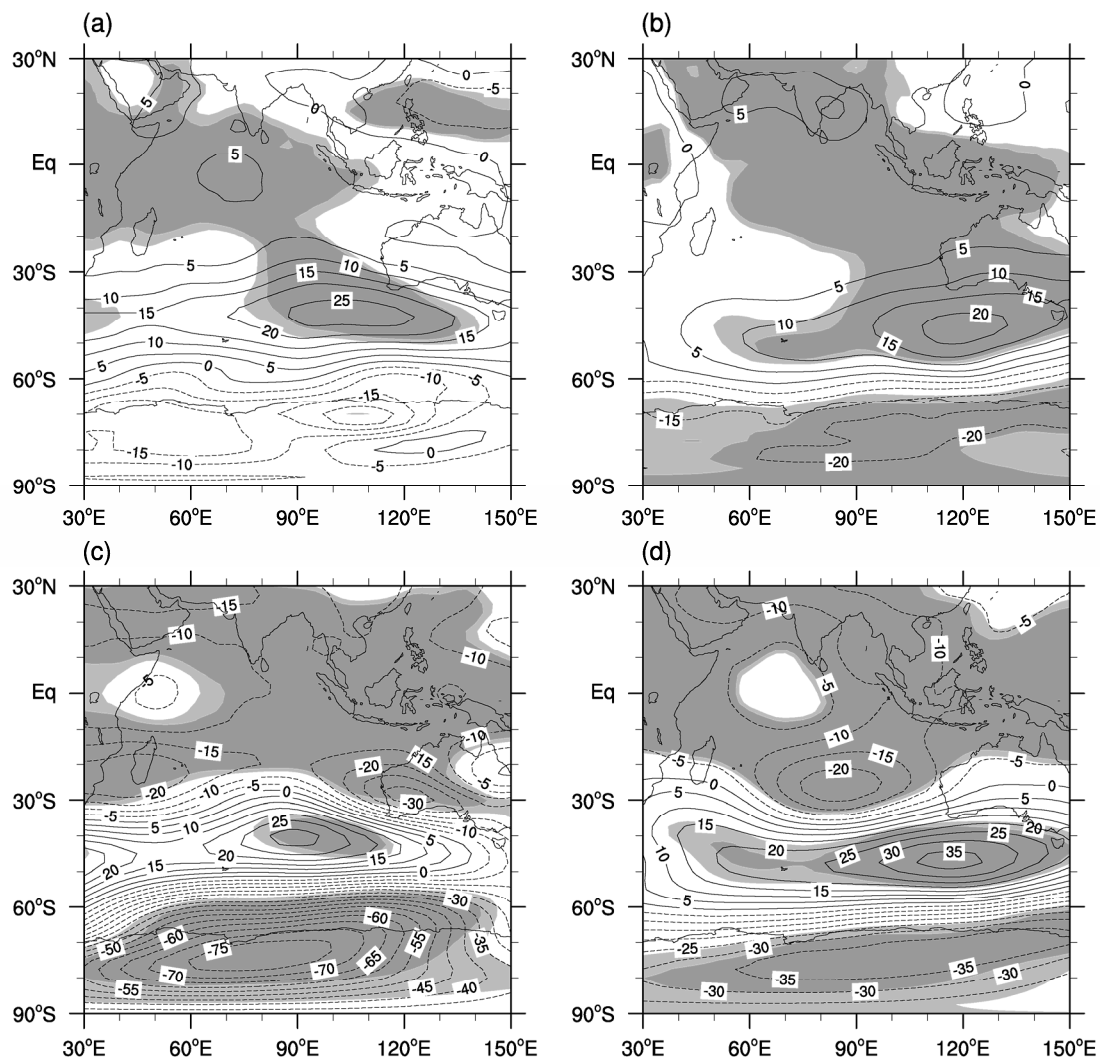


图3 7年高通滤波观测(左列)和模式模拟(右列)夏季(a、b)850 hPa、(c、d)200 hPa位势高度的差异场(正—负)(单位:gpm)。浅、深阴影分别表示通过置信水平为90%、95%显著性 t 检验的区域

Fig. 3 The difference fields of geopotential height (gpm) at (a, b) 850 hPa and (c, d) 200 hPa levels in JJA for 7-year high-pass filtered observation (left panel) and simulation (right panel) (positive—negative). The shadings denote regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student t -test, respectively

如图4a所示,对于正的春季印度洋海温异常年际变率模态事件,观测资料夏季南半球极地和中纬度地区为东风异常,而在南半球高纬和热带印度洋地区均为西风异常,表现为正、负交替的正压性经向遥相关。热带印度洋海洋地区西风异常导致夏季海洋性大陆对流活动减弱,而菲律宾海对流活动加强。在925 hPa水平散度表现为海洋性大陆地区为正异常,而菲律宾海为负异常(图5a);200 hPa水平散度异常则基本与925 hPa相反(图略)。模式结果和观测资料的纬向风异常在空间分布型上基本类似(图4),但模式在赤道印度洋地区东风异常可到达300 hPa左右(图4a),而观测资料只是在600 hPa以下存在微弱的东风异常

(图4b)。造成这种差异部分源于模式对夏季西太平洋副热带高压异常模拟偏弱,使亚洲季风区对流层中低层的异常低压位于菲律宾海地区,而观测资料在中南半岛至菲律宾海地区为异常低压(图3a、b),这导致观测资料和模式结果在赤道东印度洋地区对流层中低层风场异常较大(图略),进而导致赤道印度洋中低层地区纬向风异常纬向平均后的垂直分布差异较大(图4)。模式也基本能够模拟出夏季海洋性大陆地区对流活动的负异常中心及菲律宾海对流活动的正异常中心(图5)。

夏季菲律宾地区对流活动与西太平洋副热带高压关系密切,而夏季西太平洋副热带高压的变化则是我国东部地区夏季降水变化的主要原因之一。

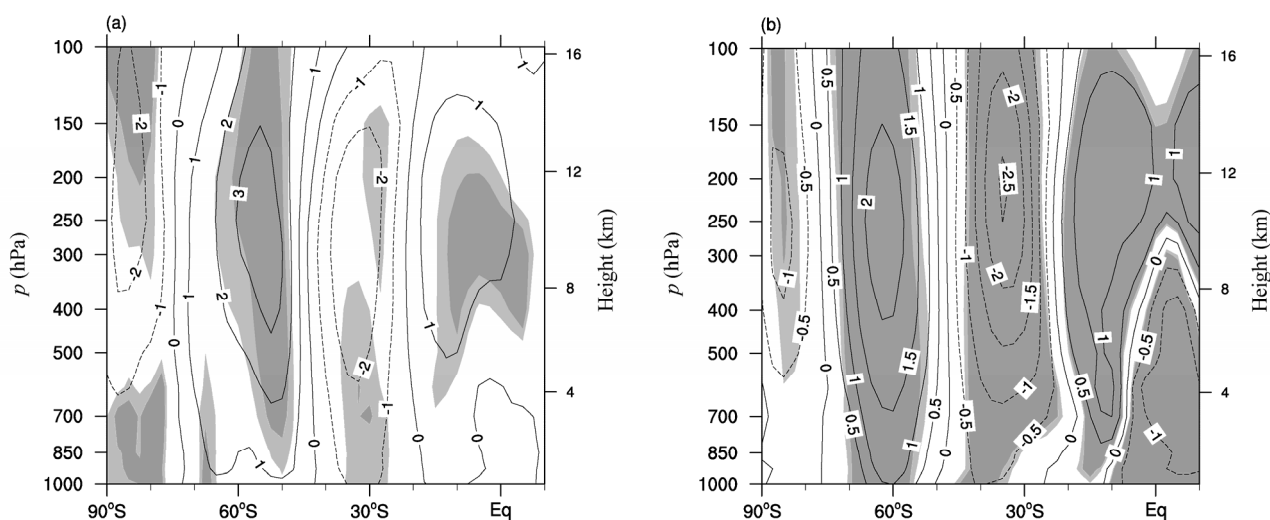


图4 7年高通滤波(a)观测和(b)模式模拟夏季印度洋地区平均经圈(40°E~105°E)纬向风差异场(单位: m s^{-1})的经向—垂直剖面(正—负)。浅、深阴影分别表示通过置信水平为90%、95%显著性 t 检验的区域

Fig. 4 The latitude–pressure cross sections of zonally averaged (40°E–105°E) zonal wind difference fields (m s^{-1}) in the Indian Ocean in JJA for 7-year high-pass filtered (a) observation and (b) model (positive–negative). The shadings denote regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student t -test, respectively

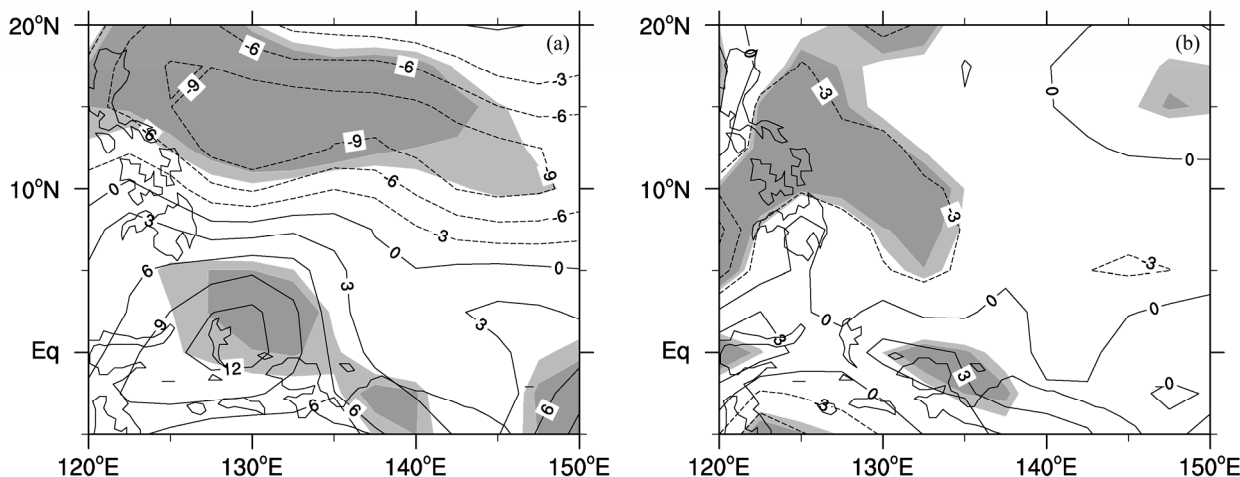


图5 7年高通滤波(a)观测和(b)模式模拟夏季925 hPa水平散度的差异场(正—负)(单位: 10^{-7} s^{-1})。浅、深阴影分别表示通过置信水平为90%、95%显著性 t 检验的区域

Fig. 5 The difference fields of horizontal divergence (10^{-7} s^{-1}) at 925 hPa level in JJA for 7-year high-pass filtered (a) observation and (b) simulation (positive–negative). The shadings denote regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student t -test, respectively

黄荣辉和孙凤英(1994)研究表明,夏季菲律宾附近地区对流活动加强(减弱)时,西太平洋副热带高压位置偏北(南),我国江淮流域夏季降水偏少(多)。就500 hPa位势高度场而言,观测资料夏季(图6a)我国东部及其以东洋面为负的位势高度异常;在我国台湾以东地区存在一个异常低压环流中心,而该异常低压环流中心东北侧存在一个异常高压环流中心。这表明对于正春季印度洋海温异常年际变率模态,夏季西太平洋副热带高压偏弱,位置偏东偏北,不利于水汽向长江流域输送,使其

夏季降水减少;而华南地区则处于西太平洋副热带高压的外围,夏季降水增加(徐志清和范可,2012)。模式结果(图6b)夏季菲律宾北部地区存在一个异常低压环流中心,在其北也为一个异常低压环流中心,东北为并不存在异常高压环流,这表明模式结果中夏季西太平洋副热带高压减弱,但其位置则基本保持不变,这与观测资料(图6a)向东北方向移动差异较大。

模式基本模拟出冬、春季印度洋海温异常年际变率模态影响我国东部夏季降水的过程。模式模拟

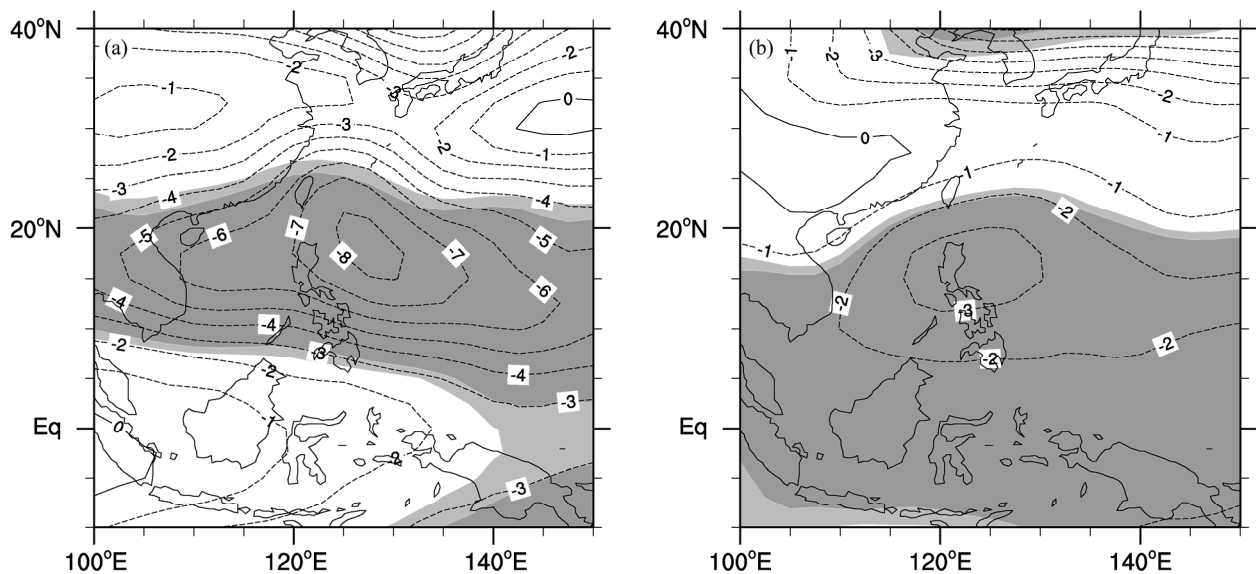


图 6 7 年高通滤波 (a) 观测和 (b) 模式模拟夏季 500 hPa 位势高度的差异场 (正—负) (单位: gpm)。浅、深阴影分别表示通过置信水平为 90%、95% 显著性 t 检验的区域

Fig. 6 The difference fields of 500-hPa geopotential height (gpm) in JJA for 7-year high-pass filtered (a) observation and (b) simulation (positive—negative). The shadings denote regions at 90% (light color) and 95% (dark color) confidence levels by Student t -test, respectively

夏季印度洋地区纬向风异常、海洋大陆和菲律宾海的对流活动异常的空间分布型与观测基本一致。模式可以模拟出夏季西太平洋副热带高压强度的异常, 但对其位置的变化模拟较差。

4 结论与讨论

观测资料研究表明 (徐志清和范可, 2012), 冬、春季印度洋海温异常年际变率模态对南极涛动及亚洲季风环流系统, 如: 印度季风低压、西太平洋副热带高压等均有重要的影响, 进而影响亚洲季风区的气候。本文利用 ECHAM5 全球大气环流模式验证了从冬至夏印度洋海温异常年际变率模态演变对我国东部地区夏季降水影响的机制。模式基本能够模拟出春、夏季整层水汽输送辐散分量异常的空间型。夏季印度洋地区主要的环流系统异常空间型与观测资料基本一致。印度洋海温异常年际变率模态影响我国东部地区夏季降水的基本过程也得到很好的模拟。模式结果基本支持了观测资料诊断结果。

大量研究表明, 夏季热带印度洋海盆尺度增暖在西北太平洋对流层低层产生异常反气旋的机制可分为两个方面: 一方面可激发东传的 Kelvin 波使西北太平洋地区对流层低层出现异常反气旋 (Yang et al., 2007; Li et al., 2008; Xie et al., 2009; Wu

et al., 2010)。另一方面, 可增加印度洋地区海表附近的大气水汽含量, 从而使海洋大陆地区低层水汽输送和对流活动增加, 并通过局地 Hadley 环流使西北太平洋地区出现异常下沉运动, 进而在该地区产生异常反气旋 (Chang and Li, 2000; Wu et al., 2009b)。西太平洋地区对流低层异常反气旋与对流活动异常相对应, 而该地区的对流活动异常可激发经向 Rossby 波列即 P-J 波列, 进而对东亚地区的气候产生重要的影响 (Nitta, 1987; Huang and Sun, 1992)。夏季热带印度洋海盆尺度增暖对西北太平洋异常反气旋的维持作用是其影响东亚夏季风的一个途径。夏季热带印度洋海盆尺度增暖在对流层高层可产生 Rossby 波响应, 使南亚高压加强, 进而影响东亚夏季风环流 (Yang et al., 2007; Li et al., 2008)。同时, 热带印度洋海盆尺度增暖也可直接影响东亚夏季风环流 (Li et al., 2008)。

由图 1 可知, 印度洋海温异常年际变率模态在春季热带印度洋地区为海盆尺度的变冷, 而在夏季索马里沿岸出现正 SST 异常, 热带印度洋地区并不表现为海盆尺度的变冷; 但夏季亚洲季风区高低空环流异常与热带印度洋地区海盆尺度 SST 变化对亚洲环流的影响基本一致。这在模式结果和观测资料中均有很好的体现。夏季 850 hPa 位势高度异常场菲律宾海地区为负异常中心 (图 3a、3b), 这是由赤道印度洋地区加热激发东传的 Kelvin 波而

导致的。热带地区在夏季 200 hPa 位势高度异常场在 80°E 以西的南、北半球副热带地区分别存在一个异常低压中心(图 3c、3d), 为大气对赤道加热的 Rossby 波相应。北半球副热带地区的异常使南亚高压减弱, 进而影响东亚夏季风环流。因而, 夏季热带印度洋在印度洋海温异常年际变率模态对中国东部地区夏季降水的影响中起重要作用。

致谢 感谢苏京志博士和韩哲博士对本文数值试验工作给予的极大帮助。

参考文献 (References)

- Alory G, Wijffels S, Meyers G. 2007. Observed temperature trends in the Indian Ocean over 1960–1999 and associated mechanisms [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (2): L02606.
- 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, Li T. 2000. A theory for the tropical tropospheric biennial oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57 (14): 2209–2224.
- 陈际龙, 黄荣辉. 2007. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送 [J]. *大气科学*, 31 (5): 766–778. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2007. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon subsystems. Part II: Water vapor transport by summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 766–778.
- Chen T C, Tzeng R Y. 1990. Global-scale intraseasonal and annual variation of divergent water-vapor flux [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44 (1–4): 133–151.
- Chiodi A M, Harrison D E. 2007. Mechanisms of summertime subtropical Southern Indian Ocean sea surface temperature variability: On the importance of humidity anomalies and the meridional advection of water vapor [J]. *J. Climate*, 20 (19): 4835–4852.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (9): 1139–1161.
- 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, Wang H J. 2004. Antarctic Oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (10): 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.
- Fauchereau N, Trzaska S, Richard Y, et al. 2003. Sea-surface temperature co-variability in the Southern Atlantic and Indian Ocean and its connections with the atmospheric circulation in the Southern Hemisphere [J]. *International Journal of Climatology*, 23 (6): 663–677.
- Graham N E, Barnett T P. 1987. Sea surface temperature, surface wind divergence, and convection over tropical oceans [J]. *Science*, 238 (4827): 657–659.
- Hermes J C, Reason C J C. 2005. Ocean model diagnosis of interannual coevolving SST variability in the South Indian and South Atlantic Oceans [J]. *J. Climate*, 18 (15): 2864–2882.
- 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.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 70 (1): 243–256.
- 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 (in Chinese)*, 18 (2): 141–151.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 465–476.
- 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.
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study [J]. *J. Climate*, 21 (22): 6080–6088.
- Liu J P, Curry J A, Hu Y Y. 2004. Recent Arctic sea ice variability: Connections to the Arctic Oscillation and the ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (9): L09211, doi: 10.1029/2004GL019858.
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24701, doi:10.1029/2006GL027655.
- Morioka Y, Tozuka T, Yamagata T. 2010. Climate variability in the southern Indian Ocean as revealed by self-organizing maps [J]. *Climate Dyn.*, 35 (6): 1059–1072.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impacts on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373–390.
- 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.
- Reason C J C. 2001. Subtropical Indian Ocean SST dipole events and southern African rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (11): 2225–2227.
- Reason C J C. 2002. Sensitivity of the southern African circulation to dipole

- sea-surface temperature patterns in the South Indian Ocean [J]. *International Journal of Climatology*, 22 (4): 377–393.
- Roeckner E, Bäuml G, Bonaventura L, et al. 2003. The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part 1: Model description [R]. Max-Planck-Institut für Meteorologie.
- Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. 2006. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model [J]. *J. Climate*, 19 (16): 3771–3791.
- Saji N H, Gowsami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360–363.
- Starr V P, Peixoto J P. 1958. On the global balance of water vapor and the hydrology of desert s[J]. *Tellus*, 10 (2): 188–194.
- 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.
- Terray P. 2011. Southern Hemisphere extra-tropical forcing: A new paradigm for El Niño–Southern Oscillation[J]. *Climate Dyn.*, 36 (11–12): 2171–2199.
- Terray P, Dominiak S. 2005. Indian Ocean sea surface temperature and El Niño–Southern Oscillation: A new perspective [J]. *J. Climate*, 18 (9): 1351–1367.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-east Asian teleconnection: How does ENSO affect east Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536.
- 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 (24): 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.
- Wu B Y, Zhang R H, Wang B, et al. 2009a. On the association between spring Arctic sea ice concentration and Chinese summer rainfall [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (9): L09501, doi: 10.1029/2009GL037299.
- Wu B, Zhou T J, Li T. 2009b. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate [J]. *J. Climate*, 22 (11): 2992–3005.
- Wu B, Li T, Zhou T J. 2010. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer [J]. *J. Climate*, 23 (11): 2974–2986.
- 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.
- 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.
- 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 influences on summer rainfall over East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (5): 492–497.
- 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.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (2): L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- 杨军丽, 郭裕福, 王斌. 2007. 亚洲季风降水的多模式模拟结果分析[J]. *气候与环境研究*, 12 (4): 533–545. Yang Junli, Guo Yufu, Wang Bin. 2007. Analysis of AGCMs in Asian monsoon precipitation simulations [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (4): 533–545.
- 杨明珠, 丁一汇. 2006. 印度洋海表温度的变化及其对印度夏季季风降水影响的诊断研究 [J]. *海洋学报*, 28 (4): 9–16. Yang Mingzhu, Ding Yihui. Diagnostic study of the variation of Indian Ocean sea surface temperature and its impact on Indian summer monsoon rainfalls [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 2006, 28 (4): 9–16.
- 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.
- 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. 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 (D16): D16109, doi: 10.1029/2005JD007006.
- 周天军, 宇如聪, 李薇, 等. 2001. 20 世纪印度洋气候变率特征 [J]. *气象学报*, 59 (3): 257–270. Zhou Tianjun, Yu Rucong, Li Wei, et al. 2001. On the variability of the Indian Ocean during the 20th century [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (3): 257–270.