

张志森, 龚志强, 叶天舒, 等. 2015. 热带印度洋与全球大气相互作用的信息传输特征分析 [J]. 大气科学, 39 (3): 461–473, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13334. Zhang Zhisen, Gong Zhiqiang, Ye Tianshu, et al. 2015. Characteristics of information transfer of interaction between the tropical Indian Ocean and global atmosphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (3): 461–473.

热带印度洋与全球大气相互作用的信息传输特征分析

张志森¹ 龚志强² 叶天舒¹ 颜鹏程¹ 封国林²

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 基于气象场信息源汇概念和定义方法, 使用海表温度 (SST) 和位势高度场 (GH) 资料计算热带印度洋和全球大气相互作用过程中的信息传递, 给出了热带印度洋 (20°S~20°N, 50°E~100°E) 与热带地区、北半球和南半球大气之间的信息传递的区域分布特征, 并分析热带印度洋与大气相互作用中信息传递特征的季节差异和年代际变化。研究表明, 热带印度洋信息源主要分布在 (10°S~10°N, 60°E~90°E) 的区域内, 北半球和南半球大气信息汇均呈现显著的带状分布, 且主要分布在中纬度地区, 而热带地区的大气信息汇则主要分布于热带中东太平洋上空。热带印度洋对处在冬半年的半球的影响更强, 不同季节下热带印度洋与大气相互作用中的信息源汇证实了这一可能性。同时, 热带印度洋与大气之间的信息传递特征在 20 世纪 70 年代末期的年代际气候转型前后南北半球的变化不太一致: 北半球大气对热带印度洋的响应存在不同程度的减弱, 南半球则存在不同程度的增强。

关键词 海表温度 海气相互作用 信息源/汇 季节差异 年代际变化

文章编号 1006-9895(2015)03-0461-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1408.13334

Characteristics of Information Transfer of Interaction between the Tropical Indian Ocean and Global Atmosphere

ZHANG Zhisen¹, GONG Zhiqiang², YE Tianshu¹, YAN Pencheng¹, and FENG Guolin²

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

² Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract In this study, information transfer of the interaction between the tropical Indian Ocean and global atmosphere is examined by using sea surface temperature and geopotential height based on the definition of source/sink information. Information transfer between the tropical Indian Ocean (20°S–20°N, 50°E–100°E) and atmosphere in the tropics, Northern Hemisphere, and Southern Hemisphere is analyzed, and regional characteristics are indicated. In addition, decadal changes and seasonal differences of information transfer between the tropical Indian Ocean and atmosphere are discussed. Essentially, the ocean information source is mainly in an area between 10°S–10°N and 60°E–90°E, and the atmosphere information sink is mainly in mid-latitude, zonal distribution in both hemispheres. The atmosphere

收稿日期 2013-12-17; **网络预出版日期** 2014-10-21

资助项目 国家自然科学基金项目 41175067、41205040, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201306021, 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2013CB430204

作者简介 张志森, 男, 1987 年出生, 博士研究生, 主要从事非线性大气动力学研究。E-mail: zhangzsphy@163.com

通讯作者 龚志强, E-mail: gongzq@cma.gov.cn

information sink in the tropics is mainly in the lower troposphere. The distribution of source/sink information in the interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere in different seasons shows that the atmosphere response is stronger in the winter hemisphere to the tropical Indian. Accompanied by the interdecadal shift of the large-scale general circulation pattern in the late 1970s, the changes in information transfer between the tropical ocean and atmosphere in the Northern and Southern hemispheres are opposite, i.e., the Northern Hemisphere strengthens, and the Southern Hemisphere weakens.

Keywords Sea surface temperature, Air-sea interaction, Source/sink information, Interseasonal difference, Interdecadal change

1 引言

海洋是地球气候系统一个很重要的组成部分,海气相互作用是研究海洋气候的一个重要方向。人们很早就认识到太平洋、大西洋在区域气候变率中的重要作用,相对而言,对印度洋气候及其变率的了解就较为有限。直到 Saji et al. (1999) 和 Webster et al. (1999) 发现热带印度洋的偶极子模态 (Indian Ocean Dipole, IOD) 以后,热带印度洋海气相互作用及其对气候的影响成为了研究热点。印度洋海温异常与太平洋海温异常既有相关性 (吴国雄和孟文, 1998), 又有独立性 (Saji et al., 1999), 印度洋海温异常在 ENSO 循环中也能起到一定的作用 (Wu and Kirtman, 2004)。热带印度洋海表温度 (Sea Surface Temperature, SST) 的年际变化存在全区一致模态 (Indian Ocean Basin-wide Warming, IOBW) 和 IOD 两种模态 (Saji et al., 1999), 其中 IOBW 发生在 ENSO 事件成熟的冬季和次年春季, 它通过改变对流活动、Walker 环流和激发 Kelvin 波等, 像“充电器”一样延续了 ENSO 对大气环流和气候异常的影响 (陈丽娟等, 2013); 而关于 IOD 的形成还有争议, 有研究认为 IOD 主要受 ENSO 影响 (Xie et al., 2002), 也有研究认为 IOD 独立于 ENSO (Yamagata et al., 2003)。Hastenrath (2004) 的研究则指出, IOD 可能只是叠加在大范围海温变化一致背景场上的一种温度梯度扰动, 并提出印度洋地区的这种偶极变化应该看作是一种纬向海温梯度的变化, 而不应该看作东西海温差异的反位相振荡。

近十年来, 气象学家和海洋学家对印度洋海气相互作用进行了深入研究, 取得了一系列研究成果。印度洋 SST 异常能够影响亚洲季风发生发展的进程和强度 (温之平等, 2006), 进而影响东亚区域降水 (陈丽娟等, 2013)。印度洋 IOBW 为正/负时, 南海夏季风爆发较晚/早, IOD 为正/负时, 南

海夏季风爆发较早/晚 (温之平等, 2006)。近年来, IOBW 具有显著的增暖趋势, 导致亚洲夏季风减弱和中国雨带南移 (杨明珠等, 2007)。热带西印度洋还是热带大气季节内振荡 (Madden-Julian Oscillation, MJO) 的重要源地 (Zhao et al., 2013), 印度洋海温异常能够影响 MJO 的发生发展与传播 (贾小龙等, 2012)、西北太平洋热带气旋 (Zhan et al., 2011) 和菲律宾异常反气旋 (Yuan et al., 2012) 等, 进而影响全球的天气气候 (肖子牛和梁红丽, 2006; Hu et al., 2011; Mohino et al., 2011)。

综上所述, 关于热带印度洋的研究, 主要集中在其自身变率及其对低纬地区气候的影响。虽然有研究表明热带印度洋 SST 异常可以在北半球中高纬地区激发产生与太平洋—北美型 (Pacific-North American Pattern, PNA) 和欧亚—太平洋型 (Eurasia-Pacific Pattern, EAP) 类似的冬季遥相关型或夏季遥相关型波列 (Guan and Yamagata, 2003), 但关于热带印度洋对中高纬度气候影响的研究还较少。信息理论早就在气象领域得到应用: 张学文和马力 (1992) 则在 20 世纪 80 年代到 90 年代对信息熵理论在气象学中的应用进行了系统研究; 龚建东和丑纪范 (1999) 概述了历史资料在数值预报中的应用问题, 明确指出在模式不精确和资料不精确的情况下, 预报问题应提成“信息问题”; 丑纪范 (2007) 基于信息论提出动力统计相结合的短期气候预测新途径; 冯爱霞等 (2011) 基于信息传输理论分析北半球跨纬圈的信息通道, 并利用互信息熵构建海气相互作用双层网络, 分析海气相互作用的空间信息特征及其物理成因 (Feng et al., 2012)。传递熵作为一个源于信息理论的非线性方法, 能测量复杂系统内的信息传输方向 (张志森等, 2013), 已经在地球科学领域得到广泛应用。Verdes (2005) 应用传递熵进行研究, 指出二氧化碳对全球温度增加具有主要贡献; Sharma et al. (2012) 应用传递熵分析指出海表温度处于冷相位时对 CO₂ 响应更好。

海气系统具有非常复杂的非线性动力系统行为（李建平和丑纪范，2003），用非线性理论去考察海气相互作用可以提供独特的视角加深对海气相互作用的理解，因此，从信息理论的角度研究大气对热带印度洋的非线性响应非常必要。

张志森等（2014）基于传递熵方法和概念提出气象场信息源汇的定义方法，给出海气相互作用中信息传输的全球特征以及热带中东太平洋的区域特征。基于以上工作，本文利用 SST 和位势高度场（Geopotential height, GH），应用信息源汇的定义方法，分区域分析热带印度洋和中低纬大气相互作用过程中的信息传递，给出信息传递的区域特征，并侧重分析热带印度洋与大气信息传递特征的季节差异与年代际变化，进而从一个新的视角来认识海气之间的相互作用及其对全球气候的影响。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料主要是：美国国家环境预报中心（National Centers for Environmental Prediction, NCEP）和国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）提供的 GH 月平均再分析资料（NCEP1; Kalnay et al., 1996），水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ；国家海洋大气管理局（National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA）提供的 SST 月平均再分析资料（NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (SST) V3b; Xue et al., 2003; Smith et al., 2008），水平分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$ ，时间从 1948 年 1 月到 2012 年 11 月。分季节讨论时，以北半球为准，将春季定义为每年 3 月至 5 月，夏季定义为 6 月至 8 月，秋季定义为 9 月至 11 月，冬季定义为 12 月至次年 2 月。对数据进行距平化处理，采用的气候态为 1981~2010 年。

2.2 方法

对于两个系统， $I: \{i_n, n=1, N\}$ 和 $J: \{j_n, n=1, N\}$ ， i_n 和 j_n 分别表示 I 和 J 系统在 $t=n$ 时刻的状态，两者之间存在某种联系， J 对 I 的信息传输量可以用传递熵（Schreiber, 2000）来表征：

$$T_{J \rightarrow I} = \sum p(i_{n+1}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log_2 \frac{p(i_{n+1} | i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{p(i_{n+1} | i_n^{(k)})}, \quad (1)$$

单位为 bit，其中 $i_n^{(k)} = (i_n, \dots, i_{n-k+1})$ ， $j_n^{(l)} = (j_n, \dots, j_{n-l+1})$ ， $p(\cdot)$ 为状态发生的概率。

一般情况下， $T_{J \rightarrow I} \neq T_{I \rightarrow J}$ ，当 $T_{J \rightarrow I} > T_{I \rightarrow J}$ 时，

表示 J 对 I 有净信息传输，即， J 是信息源， I 是信息汇，或者，在 J 和 I 相互作用过程中， J 为驱动因子， I 为响应因子；反之则相反。当 $T_{J \rightarrow I} = T_{I \rightarrow J} \neq 0$ 时，表示 I 和 J 的相互信息传输处于平衡状态。即，传递熵可以用来判断两个系统间的信息传输方向或者相互作用方向。

当考虑时间延迟时，公式（1）可以改写为（Michelis et al., 2011）

$$T_{J \rightarrow I}(\tau) = \sum p(i_{n+\tau}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log_2 \frac{p(i_{n+\tau} | i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{p(i_{n+\tau} | i_n^{(k)})}. \quad (2)$$

对比公式（1）和公式（2），可以发现：公式（1）已经是考虑时间延迟为 1 的情况。

两个气象场 X 与 Y 之间信息传输的信息源特征度、信息汇特征度分布以及传输平衡特征度可以定义为（张志森等，2014）：

X 场的信息源特征度为

$$I_{sx}(i_x, j_x) = \frac{\sum_{i_y, j_y} \delta(T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} > \Delta T) \cos \phi(i_y, j_y)}{\sum_{i_y, j_y} \cos \phi(i_y, j_y)}, \quad (3)$$

X 场的信息汇特征度为

$$I_{dx}(i_x, j_x) = \frac{\sum_{i_y, j_y} \delta(T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} < -\Delta T) \cos \phi(i_y, j_y)}{\sum_{i_y, j_y} \cos \phi(i_y, j_y)}, \quad (4)$$

X 场的传输平衡特征度为

$$I_{ex}(i_x, j_x) = \left[\sum_{i_y, j_y} \delta(-\Delta T \leq T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} \leq \Delta T) \cos \phi(i_y, j_y) \right] / \left[\sum_{i_y, j_y} \cos \phi(i_y, j_y) \right], \quad (5)$$

Y 场的信息源特征度为

$$I_{sy}(i_y, j_y) = \frac{\sum_{i_x, j_x} \delta(T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} < -\Delta T) \cos \phi(i_x, j_x)}{\sum_{i_x, j_x} \cos \phi(i_x, j_x)}, \quad (6)$$

Y 场的信息汇特征度为

$$I_{dy}(i_y, j_y) =$$

$$\frac{\sum_{i_x, j_x} \delta(T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} > \Delta T) \cos \phi(i_x, j_x)}{\sum_{i_x, j_x} \cos \phi(i_x, j_x)}, \quad (7)$$

Y 场的传输平衡特征度为

$$I_{ey}(i_y, j_y) = [\sum_{i_x, j_x} \delta(-\delta T \leq T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} - T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} \leq \delta T, T_{(i_x, j_x) \rightarrow (i_y, j_y)} > \Delta T, T_{(i_y, j_y) \rightarrow (i_x, j_x)} > \Delta T) \cos \phi(i_x, j_x)] / [\sum_{i_x, j_x} \cos \phi(i_x, j_x)], \quad (8)$$

信息源表征系统向外界输出的信息量比外界向系统输入的信息量大得多, 信息汇则相反, 而信息传输平衡表征外界输出的信息量与外界向系统输入的信息量大致相等。以上公式中, $\phi(i_x, j_x)$ 、 $\phi(i_y, j_y)$ 分别为格点 (i_x, j_x) 、 (i_y, j_y) 所处的纬度, 采用 $\cos \phi$ 加权平均主要是为了消除格点所代表面积不同引起的偏差。其中 $i_x = 1, 2, \dots, I_x$, $j_x = 1, 2, \dots, J_x$, $i_y = 1, 2, \dots, I_y$, $j_y = 1, 2, \dots, J_y$, 且当括号内条件成立时 $\delta(\cdot) = 1$, 否

则 $\delta(\cdot) = 0$ 。 $\Delta T, \delta T$ 为判别信息传输方向及是否处于信息传输平衡状态的阈值。张志森等 (2014) 已经对阈值的选择进行过讨论, 这里不再赘述。

张志森等 (2014) 基于以上方法分析全球海洋和热带中东太平洋与全球大气相互作用中的信息源汇分布, 发现大气信息源汇在对流层高、中、低层的分布是类似的, 且对流层低层对海洋的响应更直接。但为避免近地面层的高频振荡对结果的影响, 本文选择 850 hPa 进行讨论。

3 热带印度洋与大气的信息传输分析

将全球分为三个区域: $20^\circ\text{S} \sim 20^\circ\text{N}$ 的热带地区 (简称热带地区), 20°N 以北的北半球 (简称北半球) 和 20°S 以南的南半球 (简称南半球), 分别讨论热带印度洋 SST 与三个区域 GH 之间的信息传输。

图 1 为热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源汇分布。信息汇特征度 (图 1a) 与传输平衡特征

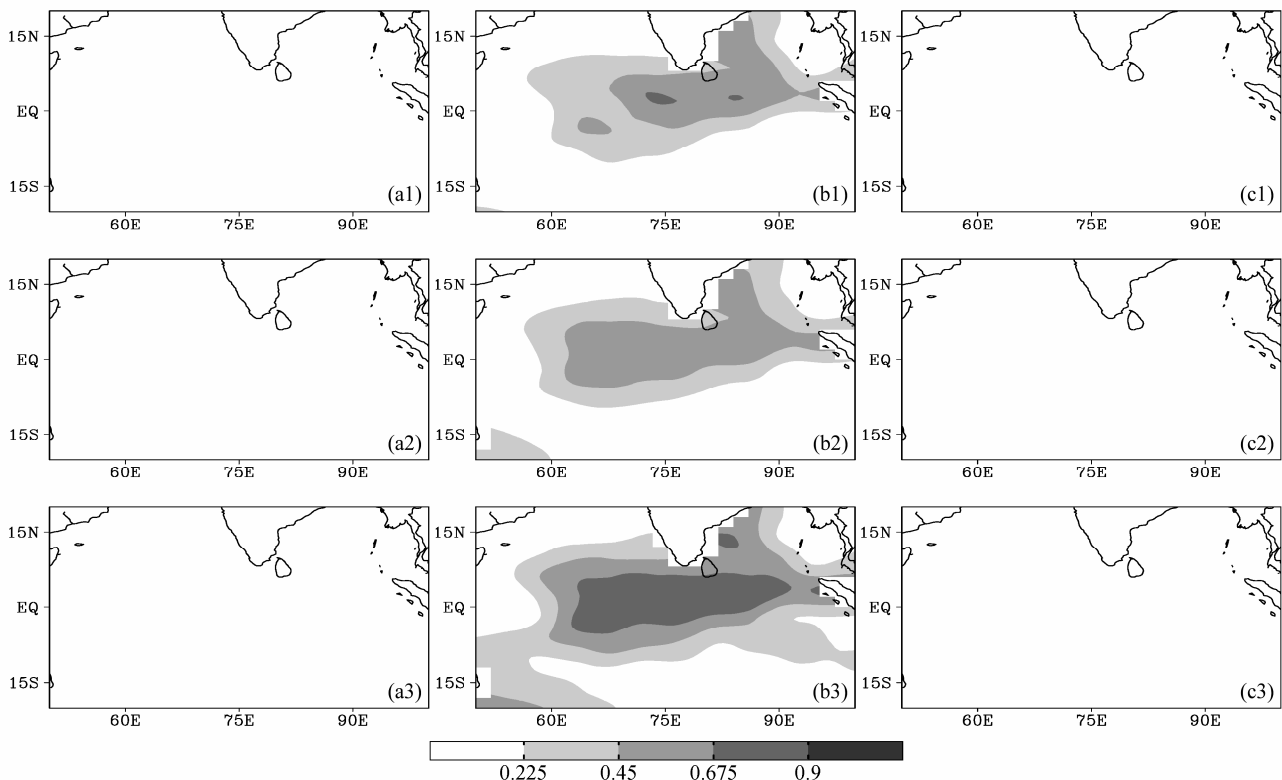


图 1 热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源/汇分布 ($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a1-a3) SST 信息汇特征度; (b1-b3) SST 信息源特征度; (c1-c3) SST 传输平衡特征度。(a1、b1、c1) 北半球; (a2、b2、c2) 热带地区; (a3、b3、c3) 南半球

Fig. 1 Ocean information source/sink of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere ($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a1-a3) Characteristics degree of SST information sink; (b1-b3) characteristics degree of SST information source; (c1-c3) characteristics degree of SST information transfer equilibrium. (a1, b1, c1) Northern Hemisphere; (a2, b2, c2) tropics; (a3, b3, c3) Southern Hemisphere

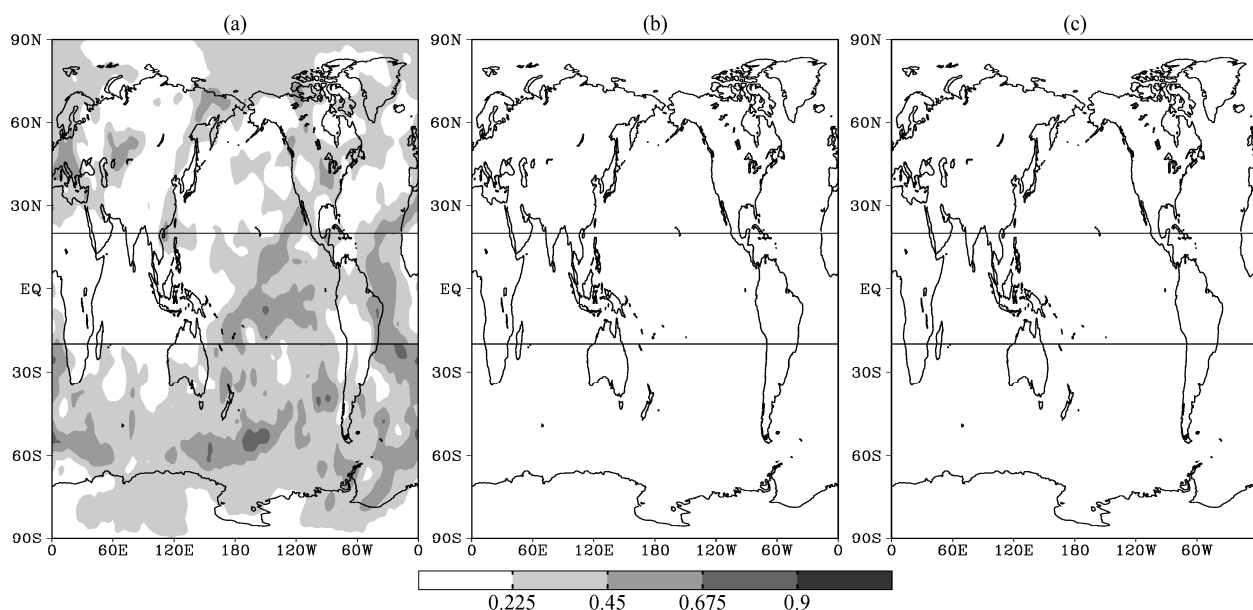


图2 热带印度洋与大气相互作用的大气信息源/汇分布 ($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a) 位势高度场 (GH) 信息汇特征度; (b) GH 信息源特征度; (c) GH 传输平衡特征度

Fig. 2 Atmosphere information source/sink of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere ($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a) Characteristics degree of geopotential height (GH) information sink; (b) characteristics degree of GH information source; (c) characteristics degree of GH information transfer equilibrium

度 (图 1c) 在热带印度洋几乎没有分布, 信息源特征度 (图 1b) 主要分布在 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 的区域内, 且与南半球 (图 1b3) 大气对应的海洋信息源特征度分布略强于北半球 (图 1b1) 和热带地区 (图 1b2), 但三者信息源特征度的分布型类似, 表明热带印度洋的影响具有全域性。图 2 为热带印度洋与大气相互作用的大气信息源/汇分布。除在热带印度洋上空有较弱的传输平衡特征度分布 (图 2c) 外, 大气没有表现出信息源特征 (图 2b) 和传输平衡特征。信息汇特征度 (图 2a) 主要在中纬度地区呈现显著的带状分布, 南北半球均是以上特征, 但是热带中东太平洋上空同样也有大值区分布。表明虽然海气相互作用在热带地区最强烈, 但是通过大气遥相关等作用, 热带印度洋与中纬度大气间可能存在一条通道, 热带印度洋的信息能够通过这条通道传输至中纬度地区, 从而能够实现热带印度洋对中纬度大气环流的影响。

热带印度洋接收 (图 3a) 的信息和输出 (图 3b) 的信息对比表明: 热带印度洋从大气接收的信息远小于输出到大气的信息, 越接近赤道这种特征越显著。大气接收 (图 4a) 的信息和输出 (图 4b) 的信息对比表明: 热带地区, 大气从海洋接收的信

息略大于向海洋输出的信息, 但这种差异并不显著; 热带外, 大气从海洋接收的信息大于输出到海洋的信息, 这种差异在 $30^{\circ}\text{S} \sim 60^{\circ}\text{S}$ ($30^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$) 最显著。以上信息收支的对比分析说明海洋的信息源分布与大气的信息汇分布是合理的。

基于以上分析, 下面的讨论将只关注海洋信息源和大气信息汇。但需要强调的是, 文中所述的信息源与信息汇本质是净信息源与净信息汇, 强调的是海洋对大气的净作用。

4 不同季节热带印度洋和大气相互作用中的信息传递

热带印度洋 SST 具有显著的季节变化 (周天军等, 2001)。因此, 针对冬季和夏季, 分析不同季节下热带印度洋与大气相互作用中的信息传递。

图 5 为不同季节下热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源分布。对于北半球而言, 冬季 (图 5a1) 热带印度洋信息源的强度比夏季 (图 5b1) 要强; 南半球有类似的特征, 夏季 (图 5b3) 热带印度洋信息源的强度比冬季 (图 5a3) 要强 (北半球冬季对应南半球夏季, 北半球夏季对应南半球冬季)。但对于热带地区而言, 冬季 (图 5a2) 热带印

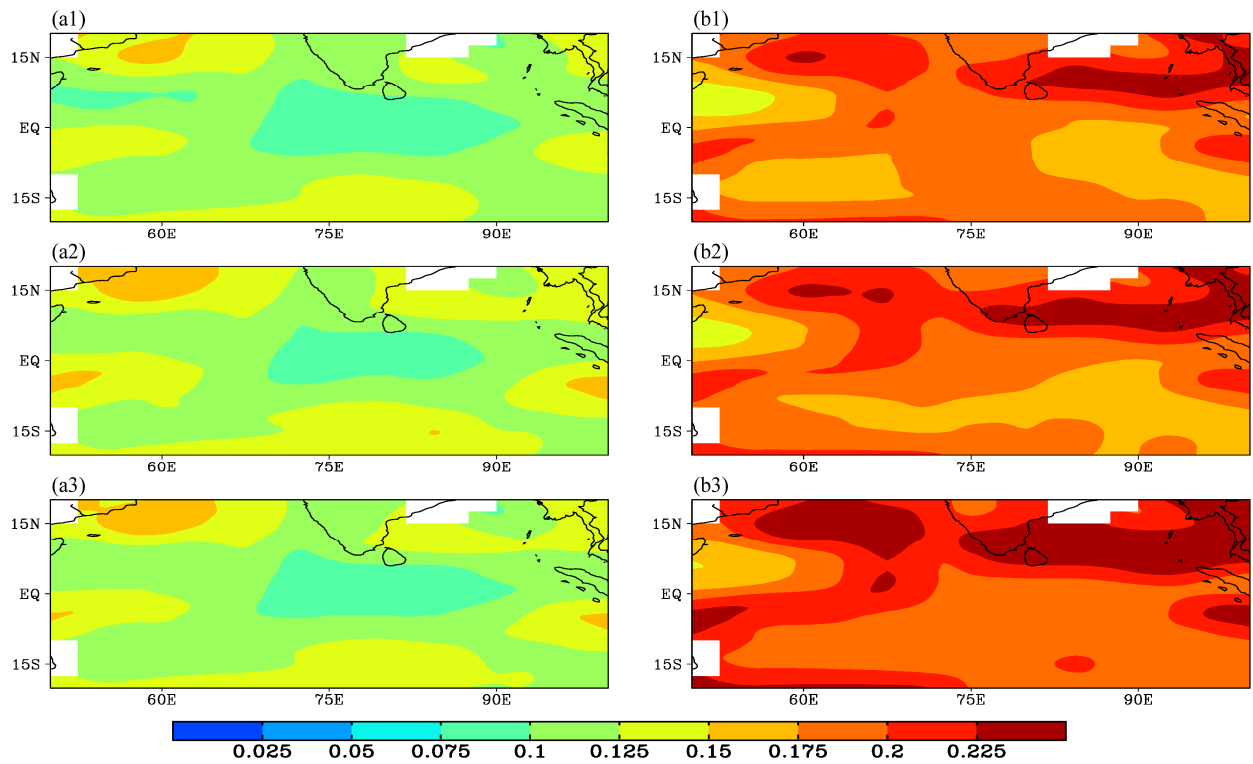


图3 热带印度洋 (a1-a3) 接收和 (b1-b3) 输出的信息。(a1、b1) 北半球; (a2、b2) 热带地区; (a3、b3) 南半球
Fig. 3 Information (a1-a3) received and (b1-b3) exported by the tropical Indian Ocean. (a1, b1) Northern Hemisphere; (a2, b2) tropics; (a3, b3) Southern Hemisphere

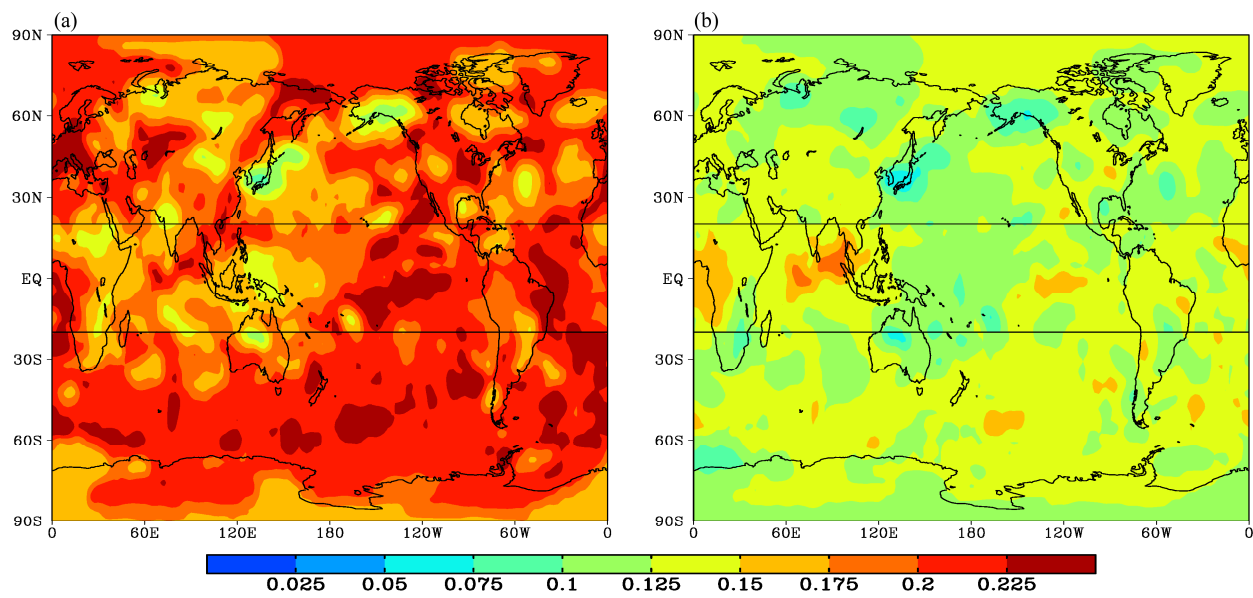


图4 大气 (a) 接收和 (b) 输出的信息
Fig. 4 Information (a) received and (b) exported by atmosphere

度洋信息源的强度要强于夏季(图 5b2)。图 6 为不同季节下大气信息汇分布。与海洋信息源类似,大气信息汇同样存在季节依赖:冬季(图 6a),大气信息汇主要分布在北半球,夏季(图 6b),大气信

息汇主要分布在南半球;对于热带地区,冬季时大气信息汇在热带中东太平洋上空,夏季时大气信息汇在南美大陆北端上空。

不同季节下海洋接收和输出的信息(图 7)对

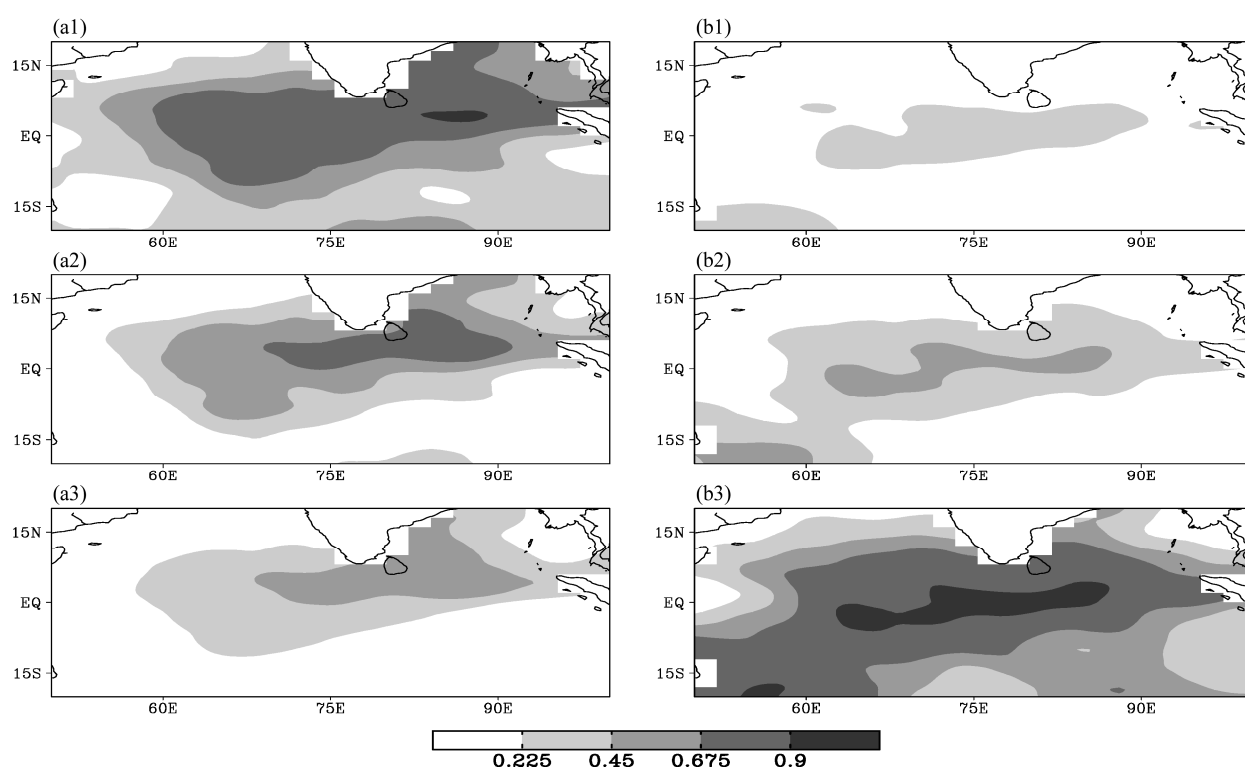


图5 不同季节下热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源分布 ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a1-a3) 冬季; (b1-b3) 夏季。(a1、b1) 北半球; (a2、b2) 热带地区; (a3、b3) 南半球

Fig. 5 Ocean information source of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a1-a3) Winter; (b1-b3) summer. (a1, b1) Northern Hemisphere; (a2, b2) tropics; (a3, b3) Southern Hemisphere

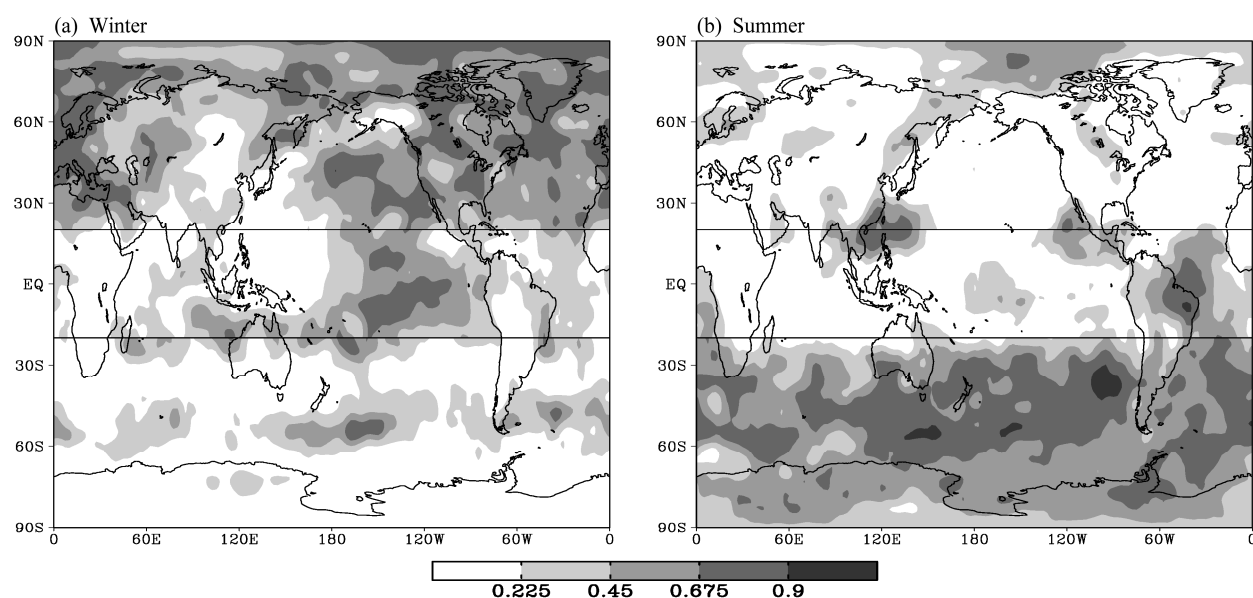


图6 不同季节下热带印度洋与大气相互作用的大气信息汇分布 ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a) 北半球冬季; (b) 北半球夏季

Fig. 6 Atmosphere information sink of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a) Winter; (b) summer

比分析表明, 冬季时, 热带印度洋以向北半球输送信息为主(图 7c1), 从北半球接收的信息亦较强(图 7a1); 夏季时, 热带印度洋以向南半球输送信息为

主(图 7d3), 从南半球接收的信息亦较强(图 7b3)。不同季节下大气接收和输出的信息(图 8)对比分析同样得出类似结论: 冬季时, 北半球比南半球从

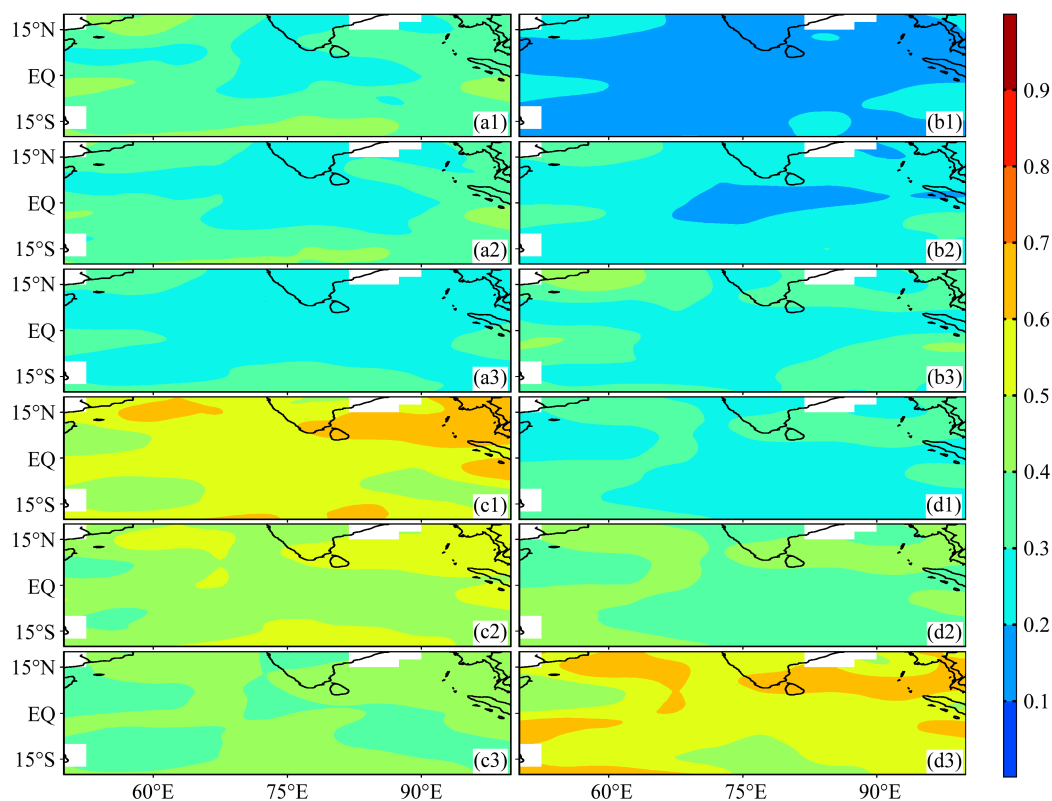


图7 不同季节下热带印度洋 (a1-a3, b1-b3) 接收和 (c1-c3, d1-d3) 输出的信息: (a1-a3, c1-c3) 冬季; (b1-b3, d1-d3) 夏季。 (a1、b1、c1、d1) 北半球; (a2、b2、c2、d2) 热带地区; (a3、b3、c3、d3) 南半球

Fig. 7 Information (a1-a3, b1-b3) received and (c1-c3, d1-d3) exported by the tropical Indian Ocean in different seasons: (a1-a3, c1-c3) Winter; (b1-b3, d1-d3) summer. (a1, b1, c1, d1) Northern Hemisphere; (a2, b2, c2, d2) tropics; (a3, b3, c3, d3) Southern Hemisphere

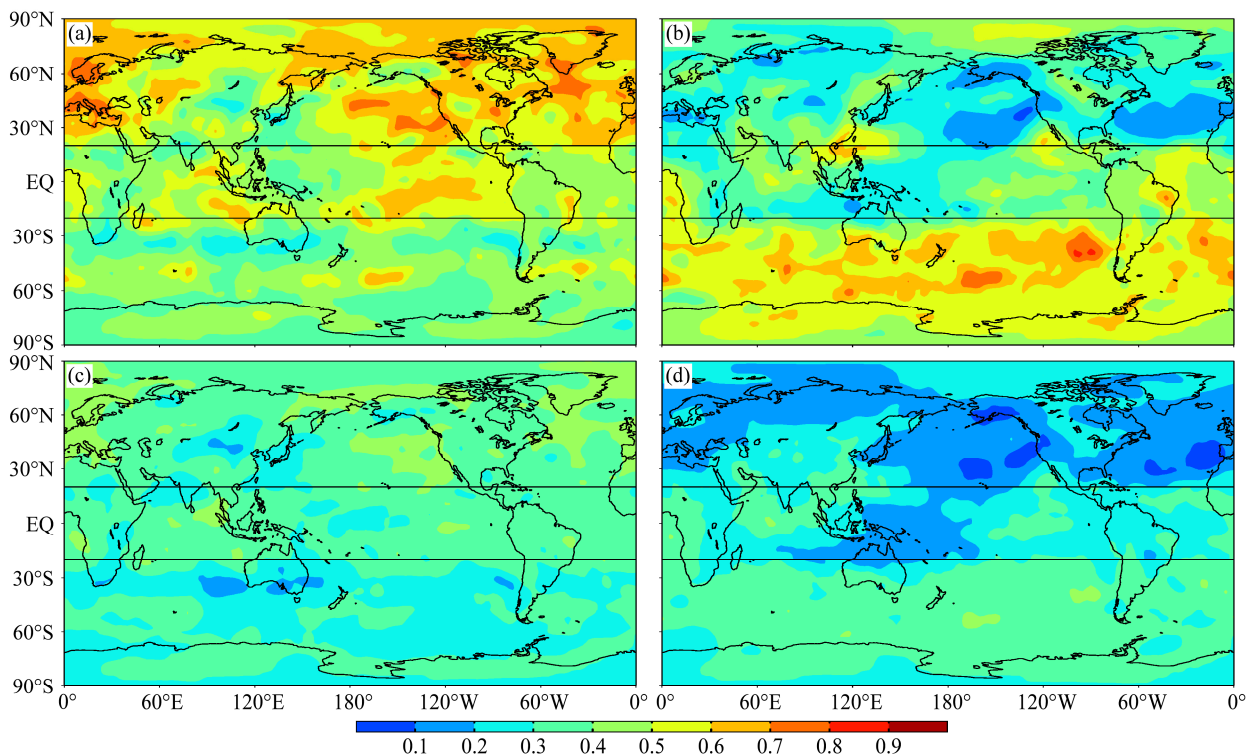


图8 不同季节下大气 (a、b) 接收和 (c、d) 输出的信息: (a、c) 冬季; (b、d) 夏季

Fig. 8 Information (a, b) received and (c, d) exported by atmosphere in different seasons: (a, c) Winter; (b, d) summer

热带印度洋接收更多的信息（图 8a），输送至热带印度洋的信息也较南半球多（图 8c）；夏季时，则以南半球为主。但需要指出的是，热带印度洋虽然以向冬季北半球（夏季南半球）输出的信息为主，从其接收的信息也较多，但是与夏季北半球（冬季南半球）同样有信息交换，但是强度较弱。

基于以上分析可以得出以下结论：热带印度洋主要向处在冬半年的半球（南半球或北半球）输送信息，即热带印度洋对处在冬半年的半球的影响更强。冯爱霞等（2011）研究指出冬季大气环流自身不确定性强于夏季，然而冬季大气环流的持续性强于夏季（王启光等，2009），李建平和高丽（2006）关于扰动位能的研究指出：冬季大气总动能强于夏季，且非绝热加热导致的热带 SST 异常能通过扰动位能的变化影响处在冬半年的半球的动能和质量分布。因此，本节得到的结论是合理可信的。对于处在冬半年的半球而言，此时太阳直射点位于处在夏半年的半球，即此时接收的太阳辐射量最少，但此时大气内部变率最强（图略），需要从海洋吸收更多的能量来维持大气环流，而热带海洋储存相对

更多的能量，因此热带海洋对处在冬半年的半球的影响更强。

5 不同年代热带印度洋和大气相互作用中的信息传递

20 世纪 70 年代末期发生一次气候突变（Trenberth and Hurrell, 1994）。选取突变年份为 1979 年，分析突变年代前后两个时段（1948~1979 年和 1980~2011 年）的热带印度洋和大气相互作用中信息传递的差异。

图 9 为突变前后夏季热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源分布，其分布型均与图 5b 一致，但区别也很明显：海洋信息源分裂成两个高值中心，一个位于西南热带印度洋，另一个位于热带印度洋中部。图 10 为突变前后夏季大气信息汇分布，其分布型均与图 6b 一致。虽然此时热带印度洋并不主要影响北半球，但是海洋信息源与大气信息汇在突变后均有所减弱：位于西南热带印度洋的海洋信息源强度减弱，而位于热带印度洋中部的海洋信息源几乎消失（图 9b1）；挪威海上空的大气信息汇

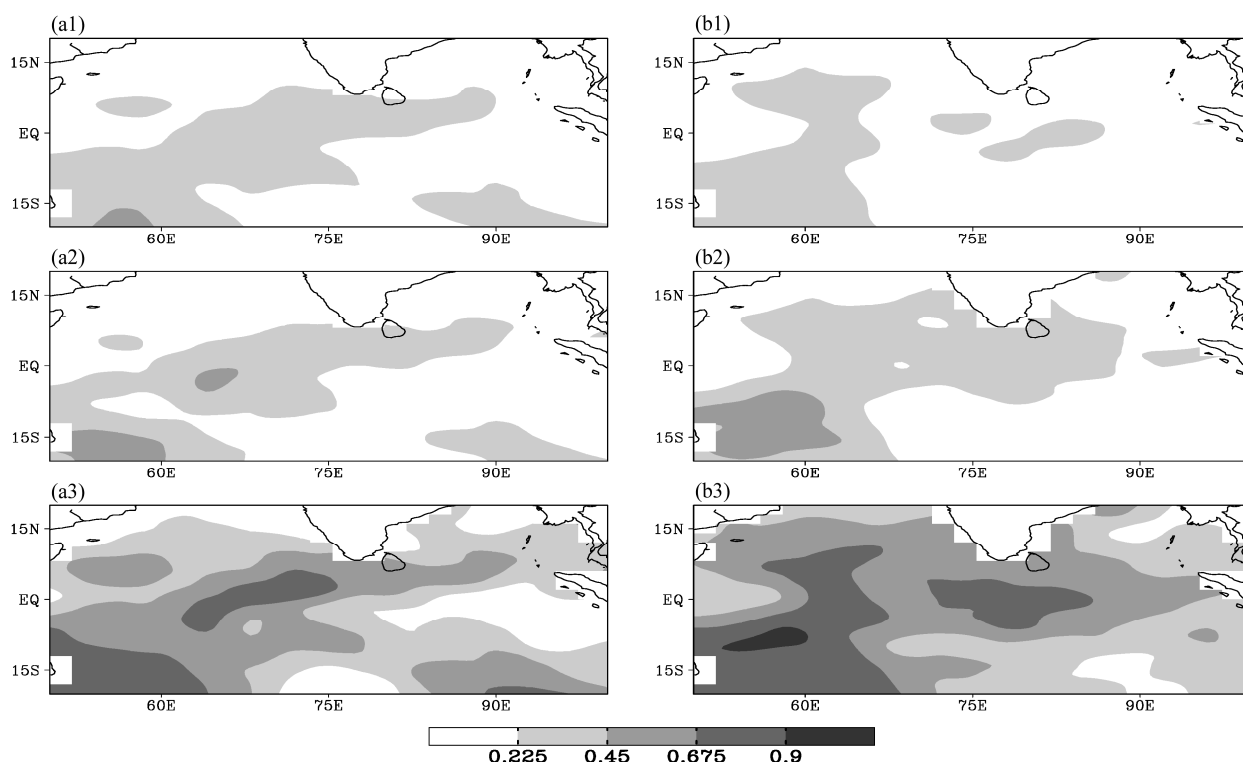


图 9 不同年代下夏季热带印度洋与大气相互作用的海洋信息源分布 ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a1-a3) 1948~1979 年; (b1-b3) 1980~2011 年。(a1、b1) 北半球; (a2、b2) 热带地区; (a3、b3) 南半球

Fig. 9 Ocean information source of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere in summer ($\Delta T = 0.2, \delta T = 0.007$): (a1-a3) 1948-1979; (b1-b3) 1980-2011. (a1, b1) Northern Hemisphere; (a2, b2) tropics; (a3, b3) Southern Hemisphere

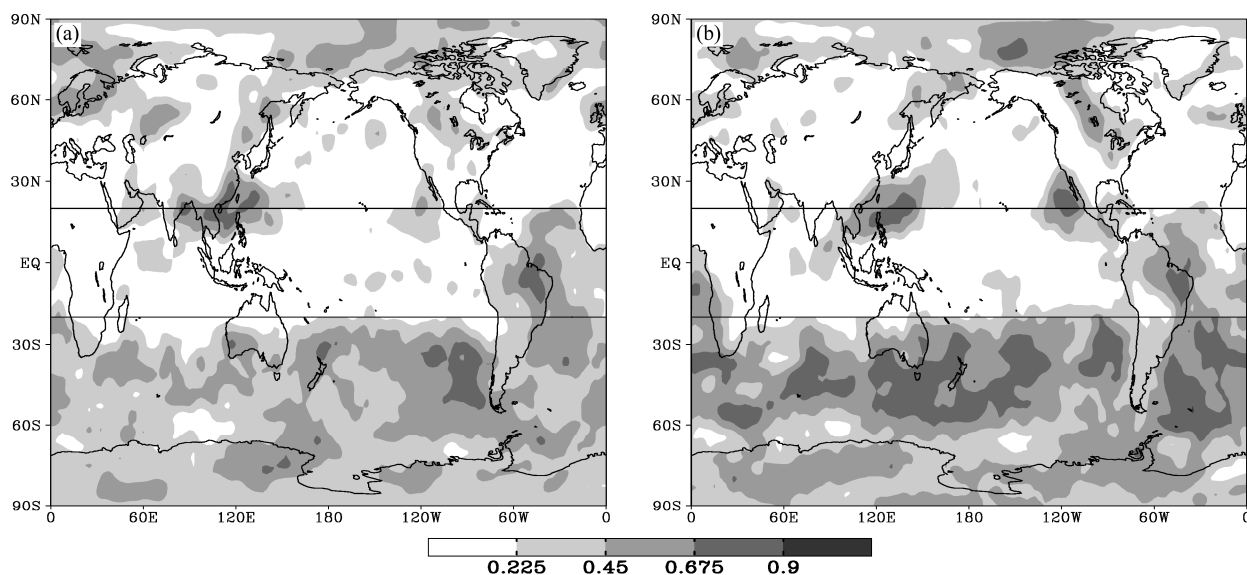


图 10 不同年代际下夏季热带印度洋与大气相互作用的大气信息汇分布($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a) 1948~1979 年; (b) 1980~2011 年

Fig. 10 Atmosphere information sink of interaction between the tropical Indian Ocean and atmosphere in summer($\Delta T = 0.094, \delta T = 0.007$): (a) 1948-1979; (b) 1980-2011

强度和范围均减弱,位于北极的大气信息汇范围收缩,高值中心从弗兰格尔岛北部上空移动到波弗特海上空(图 10b)。另外,突变前从热带印度洋东北部连接西太平洋暖池并且向东北方向延伸直至极区的大气信息汇带状分布,突变后在我国华北—东北地区上空发生明显断裂(图 10b)。近几十年来,热带印度洋增温趋势显著(杨明珠等, 2007),导致西北太平洋副热带高压偏南偏强(Zhou et al., 2009),相关分析同样支持以上结论(图略),西太副高的偏南偏强可能割裂了大气信息汇带状分布。南半球是夏季热带印度洋的主要影响区域,海洋信息源和大气信息汇的强度和范围在突变后均有不同程度的增强:海洋信息源两个高值中心的强度和范围均显著增强(图 9b3),大气信息汇的范围变化较小,但位于南大西洋上空、南印度洋上空、南太平洋中东部上空的大气信息汇强度均显著增强(图 10b)。对于热带地区,海洋信息源位于西南热带印度洋的高值中心增强,位于热带印度洋中部的高值中心减弱(图 9b2),而大气信息汇并没有明显变化(图 10b)。夏季热带印度洋信息源以及相应大气信息汇在突变前后的变化表明,夏季印度洋对南半球大气的影响增强,对北半球大气的影响减弱,而对热带地区大气的影响几乎没有变化。

图 11 突变前后冬季热带印度洋与大气相互作

用的海洋信息源分布,其分布型均与图 5a 类似,区别也同样显著:突变前海洋信息源为单极分布(图 11a),突变后海洋信息源分裂为双极,均位于热带印度洋中部,一个位于赤道以北,强度较强,另一个位于赤道以南,强度较弱(图 11b)。图 12 为突变前后冬季大气信息汇分布,其分布型均与图 6a 类似。冬季热带印度洋主要影响北半球,海洋信息源与大气信息汇在突变后均有所减弱:位于赤道以北的海洋信息源范围减小和强度减弱比较显著,而赤道以南的海洋信息源变化并不明显(图 11b1);位于欧亚大陆西部上空的大气信息汇增强,而位于北太平洋中东部上空和北美大陆上空的大气信息汇减弱,位于北大西洋上空的大气信息汇变化不大(图 12b)。不同于夏季,冬季热带印度洋对南半球和热带地区的影响变化不大。

以上分析表明:全球变暖背景下,大气对热带印度洋的响应存在南北不一致性(Li et al., 2010):北半球的响应在减弱,南半球的响应在增强。

6 结果与讨论

本文基于 SST 和 GH 分析热带印度洋与中低纬大气相互作用过程中的信息传递,给出信息传递的区域分布特征。结合热带印度洋的不同模态,着重分析热带印度洋与大气信息传递特征的季节差异

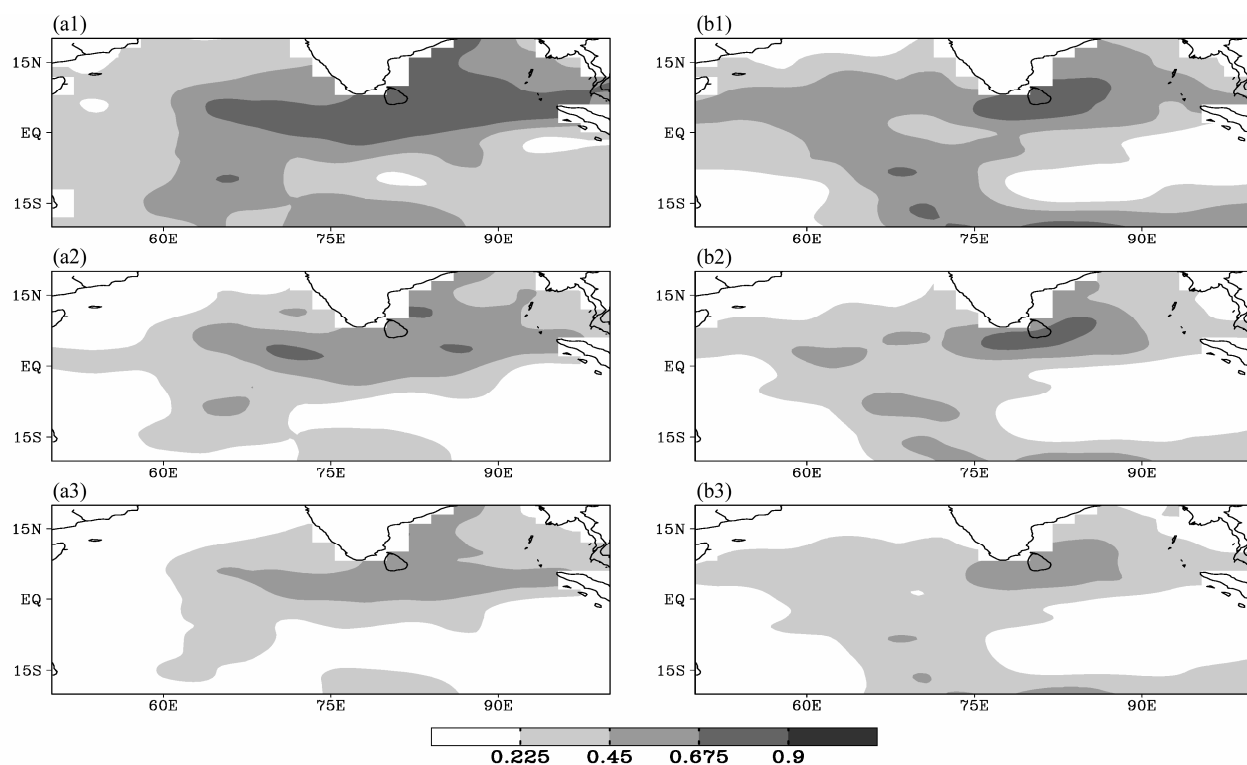


图 11 同图 9, 但为冬季

Fig. 11 Same as Fig.9, but for winter

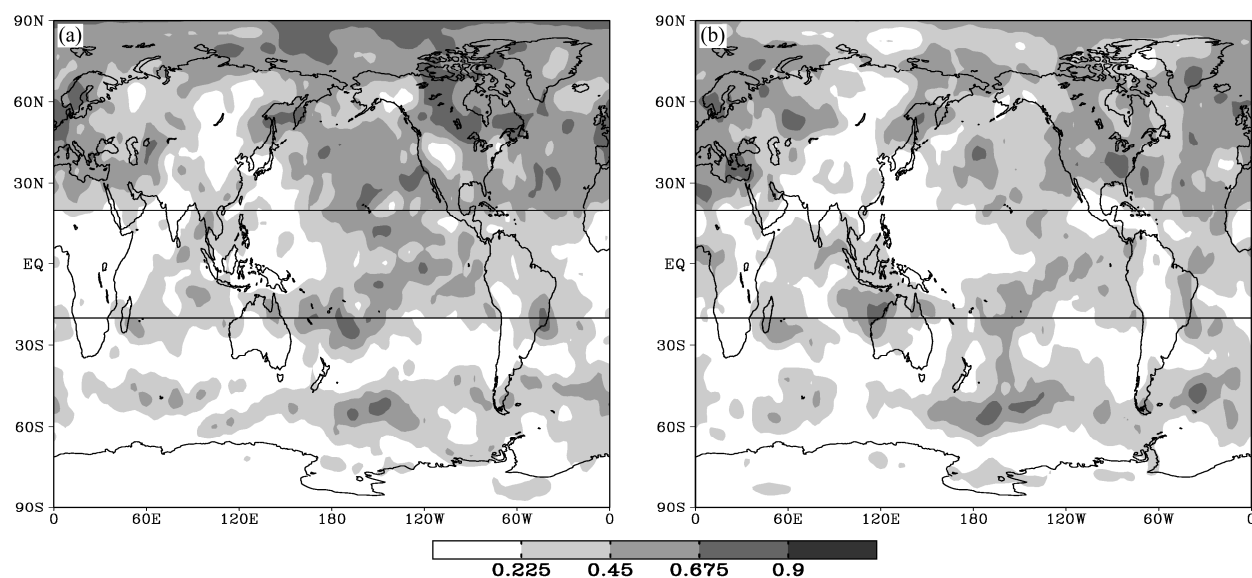


图 12 同图 10, 但为冬季

Fig. 12 Same as Fig.10, but for winter

与年代际变化特征。初步得到以下结论:

(1) 热带印度洋信息源集中分布在 ($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{E} \sim 90^{\circ}\text{E}$) 的区域内; 北半球和南半球的大气信息汇呈现显著的带状分布, 北半球为欧亚大陆中部—鄂霍茨克海—北美大陆中部的上空—北

大西洋上空, 南半球为南印度洋澳洲大陆南面海洋—南美大陆南面海洋的上空, 热带地区的大气信息汇则主要位于热带中东太平洋上空。

(2) 热带印度洋对处在冬半年的半球具有更强的影响: 冬季时, 以北半球大气为信息汇的热带印

度洋信息源分布较强,夏季时,以南半球大气为信息汇的热带印度洋信息源分布较强。即热带印度洋对热带外大气的信息传输存在季节依赖性,但热带印度洋对热带地区大气信息传输的季节差异并不显著。

(3) 20 世纪 70 年代气候突变发生以后,大气对热带印度洋响应的变化存在南北不一致性:北半球对热带印度洋的响应主要显示出减弱的特征,南半球对热带印度洋的响应以增强为主。当然这也与大气对热带印度洋不同模态响应的季节依赖性有关。

需要再次强调的是,本文的信息源特征度、信息汇特征度以及传输平衡特征度是通过比较海洋传递给大气的信息量与大气传递给海洋的信息量的大小定义的,给出的信息源与信息汇分布本质上都是净信息源与净信息汇,强调的是热带海洋对中纬度大气的净作用。

参考文献 (References)

- 陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用气象学报, 24 (5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. 2013. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (5): 521–532.
- 丑纪范. 2007. 数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题 [J]. 气象学报, 65 (5): 673–682. Chou Jifan. 2007. An innovative road to numerical weather prediction—From initial value problem to inverse problem [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (5): 673–682.
- 冯爱霞, 龚志强, 王启光, 等. 2011. 北半球环流系统季节内及年际以上振荡信号的信息传输 [J]. 物理学报, 60 (5): 059205. Feng Aixia, Gong Zhiqiang, Wang Qiguang, et al. 2011. Information communication of the Northern Hemisphere on intra-seasonal and over inter-annual oscillation signals [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 60 (5): 059205.
- Feng A X, Gong Z Q, Wang Q G, et al. 2012. Air–sea interaction described by bilayer networks [J]. Theor. Appl. Climatol., 109 (3–4): 635–643.
- 龚建东, 丑纪范. 1999. 论过去资料在数值天气预报中使用的理论和办法 [J]. 高原气象, 18 (3): 392–399. Gong Jiandong, Chou Jifan. 1999. The theories and methods of utilizing historical data in numerical weather forecast [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (3): 392–399.
- Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia: IOD teleconnections [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (10): 1544, doi:10.1029/2002GL016831.
- Hastenrath S. 2002. Dipoles, temperature gradients, and tropical climate anomalies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 83 (5): 735–738.
- Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. J. Climate, 24 (20): 5365–5377.
- 贾小龙, 袁媛, 任福民, 等. 2012. 热带大气季节内振荡 (MJO) 实时监测预测业务 [J]. 气象, 38 (4): 425–431. Jia Xiaolong, Yuan Yuan, Ren Fumin, et al. 2012. The real time MJO monitoring and prediction operation in NCC [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (4): 425–431.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- 李建平, 丑纪范. 2003. 非线性大气动力学的进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 653–673. Li Jianping, Chou Jifan. 2003. Advances in nonlinear atmospheric dynamics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 653–673.
- 李建平, 高丽. 2006. 扰动位能理论及其应用——扰动位能的概念、表达及其时空结构 [J]. 大气科学, 30 (5): 834–948. Li Jianping, Gao Li. 2006. Theory on perturbation potential energy and its applications—Concept, expression and spatiotemporal structures of perturbation potential energy [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 834–948.
- Li S L, Perlwitz J, Hoerling M P, et al. 2010. Opposite annular responses of the Northern and Southern Hemispheres to Indian Ocean warming [J]. J. Climate, 23 (13): 3720–3738.
- Michelis P D, Consolini G, Materassi M, et al. 2011. An information theory approach to the storm–substorm relationship [J]. J. Geophys. Res., 116 (A8): A08225, doi:10.1029/2011JA016535.
- Mohino E, Rodríguez-Fonseca B, Mechoso C R, et al. 2011. Impacts of the tropical Pacific/Indian oceans on the seasonal cycle of the West African monsoon [J]. J. Climate, 24 (15): 3878–3891.
- 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.
- Schreiber T. 2000. Measuring information transfer [J]. Phys. Rev. Lett., 85 (2): 461–464.
- Sharma S D, Ramesh D S, Bapanayya C, et al. 2012. Sea surface temperatures in cooler climate stages bear more similarity with atmospheric CO₂ forcing [J]. J. Geophys. Res., 117 (D13): D13110, doi:10.1029/2012JD017725.
- Smith T M, Reynolds E W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land–ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. J. Climate, 21 (10): 2283–2296.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9 (6): 303–319.
- Verdes P F. 2005. Assessing causality from multivariate time series [J]. Phys. Rev. E, 72 (2): 026222, doi:10.1103/PhysRevE.72.026222.
- 王启光, 侯威, 郑志海, 等. 2009. 东亚区域大气长程相关性 [J]. 物理学报, 58 (9): 6640–6650. Wang Qiguang, Hou Wei, Zheng Zhihai, et al. 2009. The long range correlation of East Asia's atmosphere [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 58 (9): 6640–6650.
- Webster P J, Moore A M, Loschnig J P, et al. 1999. Coupled ocean–atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–1998 [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.
- 吴国雄, 孟文. 1998. 赤道印度洋—太平洋地区海气系统的齿轮式耦合和 ENSO 事件 I. 资料分析 [J]. 大气科学, 22 (4): 470–480. Wu Guoxiong, Meng Wen. 1998. Gearing between the Indo-monsoon circulation and the Pacific-Walker circulation and the ENSO. Part I: Data analyses [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 470–480.
- Wu R G, Kirtman B P. 2004. Impacts of the Indian Ocean on the Indian Summer Monsoon–ENSO relationship [J]. J. Climate, 17 (15): 3037–3054.
- 肖子牛, 梁红丽. 2006. 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 [J]. 大气科学, 30 (5): 791–801. Xiao Ziniu, Liang Hongli. 2006. The meridian pattern of summer rainfall in 2004 and its relationship with Indian Ocean dipole [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 791–801.
- Xie S P, Annamalai H, Schott F A, et al. 2002. Structure and mechanisms of South Indian Ocean climate variability [J]. J. Climate, 15 (8): 864–878.
- Xue Y, Smith M T, Reynolds R W. 2003. Interdecadal changes of 30-yr SST normals during 1871–2000 [J]. J. Climate, 16 (10): 1601–1612.
- Yamagata T, Behera S K, Rao A S, et al. 2003. Comments on “Dipoles, Temperature Gradients, and Tropical Climate Anomalies” [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84 (10): 1418–1422.
- 杨明珠, 丁一汇, 李维京, 等. 2007. 印度洋海表温度主模态及其与亚洲夏季季风的关系 [J]. 气象学报, 65 (4): 527–536. Yang Mingzhu, Ding Yihui, Li Weijing, et al. 2007. Leading mode of Indian Ocean SST and its impacts on Asian summer monsoon [J]. Acta. Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (4): 527–536.
- Yuan Y, Yang S, Zhang Z Q. 2012. Different evolutions of the Philippine Sea anticyclone between the eastern and central Pacific El Niño: Possible effects of Indian Ocean SST [J]. J. Climate, 25 (22): 7867–7883.
- Zhan R F, Wang Y Q, Lei X T. 2011. Contributions of ENSO and East Indian Ocean SSTA to the Interannual variability of northwest pacific tropical cyclone frequency [J]. J. Climate, 24 (2): 509–521.
- 张学文, 马力. 1992. 熵气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 159–162. Zhang Xuewen, Ma Li. 1992. Entropy Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 159–162.
- 张志森, 龚志强, 支蓉. 2013. 利用传递熵对 Lorenz 系统和 Walker 环流信息传输方向的分析 [J]. 物理学报, 62 (12): 129203. Zhang Zhisen, Gong Zhiqiang, Zhi Rong. 2013. Analysis of the direction of information transfer of Lorenz system and Walker circulation with transfer entropy [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 62 (12): 129203.
- 张志森, 龚志强, 封国林, 等. 2014. 热带海洋与中低纬大气相互作用的信息传输特征分析 [J]. 物理学报, 63 (2): 029202. Zhang Zhisen, Gong Zhiqiang, Feng Guolin, et al. 2014. Characteristics of information transfer of interaction between mid and low-latitudes atmosphere and the tropical ocean [J]. Acta Physica Sinica (in Chinese), 63 (2): 029202.
- Zhao C B, Li T, Zhou T J. 2013. Precursor signals and processes associated with MJO initiation over the tropical Indian Ocean [J]. J. Climate, 26 (1): 291–307.
- 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 Meteor. Sinica (in Chinese), 59 (3): 257–270.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. J. Climate, 22 (8): 2199–2215.