

周秋林, 梅士龙. 2011. 南半球对流层大气对热带太平洋—印度洋海温异常综合模的响应及其机制解释 [J]. 大气科学, 35 (2): 339–349.
Zhou Qiulin, Mei Shilong. 2011. Teleconnection mode between the tropical Pacific – Indian Ocean temperature anomaly and Southern Hemisphere tropospheric circulation and its mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 339–349.

南半球对流层大气对热带太平洋—印度洋海温异常综合模的响应及其机制解释

周秋林 梅士龙

浙江省嘉兴市气象局, 嘉兴 314050

摘 要 利用 NOAA SST 及 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了热带太平洋—印度洋海温异常综合模和南半球对流层大气之间的遥相关模态并对其进行了机制解释。首先通过相关和合成分析, 给出了遥相关的空间模态, 结果表明: 北半球秋、冬季, 在南半球对流层大气存在和热带太平洋—印度洋海温异常综合模密切联系的遥相关作用中心, 该中心的分布构成一系列明显的从赤道中太平洋出发, 最终到达非洲中南部及赤道印度洋的 Rossby 波列, 将赤道太平洋、印度洋与南半球中高纬度大气连接起来, 起到了类似“大气桥”的作用。而单纯 IOD 和单纯 ENSO 均难以在南半球对流层激发出遥相关波列, 进一步证实了两者共同作用的影响。其次, 利用行星波能量传播理论对两者之间的遥相关进行了机制分析, 发现纬向波数为 1~3 的大气行星波的能量传播是热带太平洋—印度洋海温异常综合模与南半球对流层大气之间遥相关的一种可能的联系方式。

关键词 热带太平洋—印度洋海温异常综合模 南半球对流层 遥相关 行星波能量传播

文章编号 1006-9895(2011)02-0339-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Teleconnection Mode between the Tropical Pacific – Indian Ocean Temperature Anomaly and Southern Hemisphere Tropospheric Circulation and Its Mechanism

ZHOU Qiulin and MEI Shilong

Jiaxing Meteorological Bureau, Jiaxing 314050

Abstract The teleconnection mode between the tropical Pacific – Indian Ocean temperature anomaly and Southern Hemisphere tropospheric circulation and its mechanism are studied through NOAA SST and NCEP/NCAR reanalysis data sets. First of all, spatial teleconnection mode is presented by using correlation and composition analyses and results show that there are obvious characteristics of remote response in the Southern Hemisphere troposphere closely related with the tropical Pacific – Indian Ocean temperature anomaly in boreal autumn and winter. These centers of action compose a Rossby wave train, starting from the middle of the tropical Pacific and ending in southern Africa and the tropical Indian Ocean. The train links the tropical Pacific, the Indian Ocean to the Southern Hemisphere high latitudes and plays a similar “atmosphere bridge” role. However, the pure IOD (Indian Ocean Dipole) and pure ENSO are difficult to excite teleconnection wave train in the Southern Hemisphere, which further confirms the interaction between them. Secondly, the theory of planetary wave energy propagation can be used to explain the teleconnection. It is found that the energy propagation of planetary wave with zonal numbers 1–3 is the possible mecha-

nism for the teleconnection between the tropical Pacific - Indian Ocean temperature anomaly and the Southern Hemisphere tropospheric circulation.

Key words the tropical Pacific - Indian Ocean temperature anomaly mode, Southern Hemisphere troposphere, teleconnection, planetary wave energy propagation

1 引言

研究表明, 大气环流对于热带海洋海表面温度的变化有着极其敏感响应 (Rasmusson and Carpenter, 1983; Ropelewski and Halpert, 1987; Ashok et al., 2001; Black et al., 2003; 何溪澄等, 2008; 彭丽霞等, 2009), 热带海洋海表面温度梯度在对流层推动产生大气的辐合或辐散 (Lindzen and Nigam, 1987), 进而产生的涡度变化会引起扰动能量沿大圆路径传播 (Sardeshmukh and Hoskins, 1988; Rodwell and Hoskins, 1996), 将热带地区的海洋信号传播到中高纬从而影响到该地区的气候变化 (Liu et al., 2005; Saji et al., 2005)。

自从 Bjerknes (1966) 将海温异常的研究引入热带海洋, 提出海温异常与全球大气环流和气候变化的遥相关概念之后, 气象学家和海洋学家们对热带太平洋和印度洋海温的变化特征及该地区的海气相互作用作了全面系统的分析 (Ju and Slingo, 1995; Li, 1996; Liu et al., 2005; Saji et al., 2005; 刘娜等, 2005; Liu and Chen, 2006), 揭示了大量与它们相关的海洋现象及其与大气之间的遥相关关系。由于全球热带海洋是一个统一的系统, 近年来, 许多学者对太平洋和印度洋之间的相互关系进行了详细的研究。Tourre and White (1995, 1997) 分析了 ENSO (El Niño-Southern Oscillation) 在印度洋和西太平洋地区的影响, 发现这两个地区 SST、海洋表层 400 m 中的热容量以及纬向和经向表面风应力的变化都表现为明显的 ENSO 特征, 其第一模态变化峰值出现的时段也在冬季到春季, 与 ENSO 类似。吴国雄等 (1995)、吴国雄和孟文 (1998) 研究了印度洋海表温度的季节变化特征, 证实了赤道印度洋和东太平洋 SST 年际变化之间的正相关高达 0.76, 远高于 99% 的信度水准, 并指出这种正相关是由于沿赤道印度洋上空纬向季风环流和太平洋上空 Walker 环流之间显著的耦合造成的。这一联系机制也得到了李崇银和穆明权 (2001) 的证实。

正是由于两者之间的密切关系, 有学者开始将热带太平洋与印度洋作为一个统一的整体来考虑。Ashok et al. (2004) 研究 IOD (Indian Ocean Dipole, 印度洋海温偶极子) 与 ENSO 对印度季风区的影响时, 考虑了二者的单独和共同作用。据建华等 (2004) 通过对热带海洋地区海温场的经验正交函数分解, 分析其第一特征向量场发现, 春夏秋冬四季印度洋中西部及中东太平洋大范围地区的海面温度与西太平洋地区相反, 同时这一海温场的空间分布结构是稳定的, 因此定义了太平洋-印度洋海温异常模态。杨辉和李崇银 (2005)、杨辉等 (2006) 综合考虑 ENSO 和 IOD 的特征, 明确提出了太平洋-印度洋海温异常综合模的定义, 并研究了其对南亚高压及中国气候和印度夏季降水的不同影响。郑冬梅和张启龙 (2009) 通过探讨综合模与西太平洋副热带高压的关系研究了其对我国夏季降水的影响。吴海燕和李崇银 (2009a, 2009b) 对太平洋-印度洋海温异常综合模态在海表及次表层的时空演变特征进行了分析, 并通过数值模式研究了综合模态的三维热力结构、动力结构及其发生发展的可能机制。目前, 对综合模所做的研究主要集中在模态本身变化特征及其对北半球气候异常的影响方面, 对其与南半球之间关系的探索较少。

近年来, 热带海洋与南半球低频气候变化之间的联系已引起了人们的极大关注 (Mo and White, 1985; Gloersen, 1995; Ledley and Huang, 1997; 黄平和黄荣辉, 2009), 部分学者提出了与 ENSO 有关的太平洋-南美型遥相关模态 (Pacific-South American pattern, 简称 PSA) 并进行了详细研究 (Mo and Ghil, 1987; Karoly, 1989; Lau et al., 1994; Mo and Higgins, 1998; Mo, 2000)。另外一些学者也对 IOD 与南半球大气之间的联系进行了探索 (Saji and Yamagata, 2003; Liu et al., 2005; Liu and Chen, 2006)。然而, 有关太平洋-印度洋海温异常综合模对南半球气候异常影响的研究仍较为缺乏, 热带太平洋和印度洋对南半球大气变化的共同作用尚不清楚。因此, 本文拟从对流层大气遥

相关的角度来研究太平洋—印度洋海温异常综合模态对南半球位势高度场的影响, 并利用大气行星波能量传播理论对综合模与南半球对流层大气之间的遥相关给出合理的机制解释。文中所用大气资料为 NCEP/NCAR 再分析逐月大气资料, 海表面温度采用 NOAA Extended Reconstructed SST V3 逐月数据, 各变量的距平均定义为变量本身与其气候平均 (1960~2002) 之间的偏差。

2 太平洋—印度洋海温异常综合模指数定义

为了很好地描述太平洋—印度洋海温异常综合模态, 需要选择一个合适的指数。参考杨辉和李崇银 (2005) 对综合模态的定义, 综合考虑 IOD 和 ENSO 的各自特征及二者之间的联系, 用赤道印度洋和太平洋地区东西海温异常之差来定义太平洋—印度洋海温异常综合模指数。为了使两个海洋的海温异常更具有对比性, 在印度洋和太平洋地区分别进行了 SSTA 的标准化。具体计算如下:

$$\nabla T_1 = T_1 - T_2, \quad (1)$$

$$\nabla T_P = T_3 - T_4, \quad (2)$$

其中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 表示区域 ($5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 65^{\circ}\text{E}$)、($10^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$)、($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $130^{\circ}\text{W}\sim 80^{\circ}\text{W}$)、($5^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{E}$) 平均的月平均海表温度距平。综合模指数为

$$I_C = \nabla T_1 + \nabla T_P. \quad (3)$$

为了验证所选取的综合模指数 I_C 是否能真实代表热带印度洋与太平洋海温异常的变化模态, 对 I_C 与热带地区海温异常做相关分析, 其结果如图 1。从图 1 中可见, 赤道西印度洋与东太平洋地区呈现正相关, 而赤道东南印度洋与西太平洋地区呈负相关, 且正负中心的大部分区域相关系数均通过

了 99% 信度的 t 检验。由此证明, 当 I_C 为正时, 热带西印度洋与东太平洋海温明显偏高, 东南印度洋与西太平洋海温明显偏低, 与 IOD 正位相及 El Niño 模态相仿; I_C 为负时, 情况则相反, 与 IOD 负位相及 La Niña 模态类似。因此, I_C 能较好反映太平洋—印度洋海温异常综合模态。

3 太平洋—印度洋海温异常综合模与南半球对流层大气之间的遥相关模态

由于 IOD 与 ENSO 都具有明显的季节锁相特征, IOD 在每年秋季达到最强, 而 ENSO 的鼎盛期为冬季, 作为将二者结合起来考虑的综合模态, 应同时考虑其在秋季和冬季产生的影响, 因此本文选取北半球秋、冬季 (当年 9 月~次年 2 月) 作为代表季节, 研究海温异常综合模与南半球对流层大气之间的遥相关关系。此外, 由于对流层中上层较少受到如地形、海陆差异等因素的影响, 其遥相关的特征将会较对流层低层清晰, 因此, 本节选取 200 hPa 和 500 hPa 分别代表上对流层和中对流层进行研究。

3.1 遥相关模态的空间分布特征

这一部分主要采取相关分析的方法, 研究北半球秋、冬季太平洋—印度洋海温异常综合模变化指数 I_C 和南半球 200 hPa 及 500 hPa 位势高度异常之间的关系, 在整个南半球给出由综合模变化引起的位势高度异常空间变化的遥相关模态。从图 2 中可看到, 在北半球秋、冬季, 无论在 200 hPa 还是 500 hPa 对流层上, 遥相关模态均表现为明显且规律的正负相间的作用中心, 它们总体沿一个类似大圆的路径分布, 该大圆路径从赤道中太平洋出发, 向南经过南太平洋, 到达别林斯高晋海附近, 再转

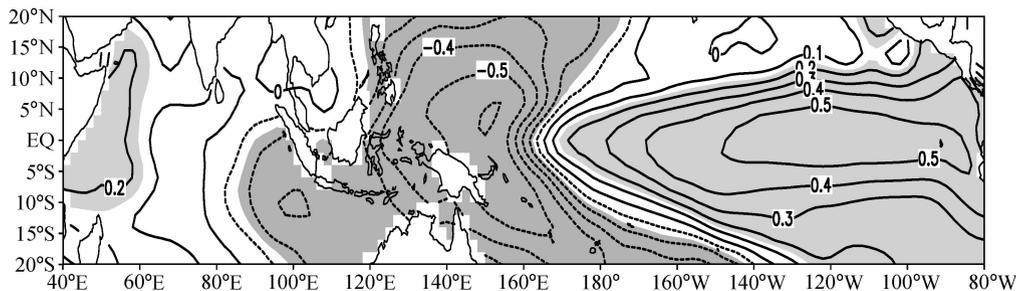


图 1 I_C 与热带太平洋、印度洋地区 SSTA 场的相关系数分布。阴影区为相关系数通过 99% 信度 t 检验的区域

Fig. 1 Correlation map of SSTA in the tropical Pacific and Indian Ocean with I_C . The areas with the confidence level equal to or greater than 99% are shaded

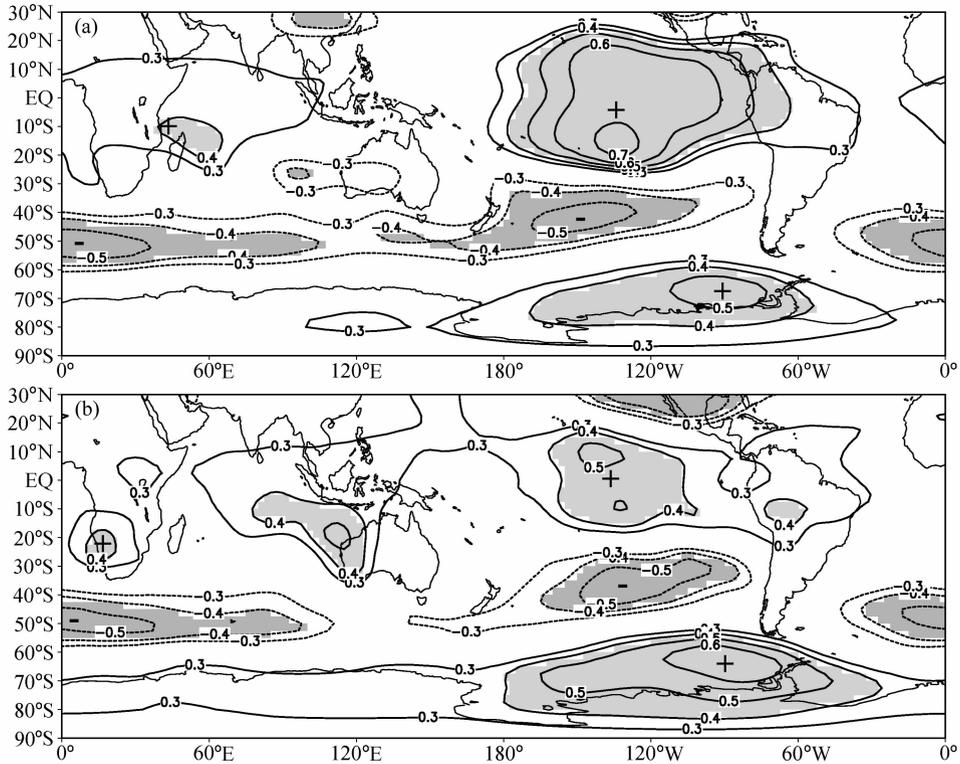


图2 北半球秋、冬季时 I_C 和 200 hPa (a)、500 hPa (b) 对流层位势高度异常场之间的相关系数及 t 检验分布。等值线: 相关系数绝对值 ≥ 0.3 ; 阴影: 相关系数超过 99% 信度 t 检验

Fig. 2 Correlation maps of geopotential height anomalies at (a) 200 hPa and (b) 500 hPa with I_C in boreal autumn and winter. The contours with the absolute value less than 0.3 are removed; the areas with the confidence level equal to or greater than 99% are shaded

而向东北经过南大西洋, 最终到达非洲中南部及赤道印度洋上空 (如图中标示), 各主要中心相关系数均通过了 99% 信度的 t 检验。这些遥相关作用中心构成了一系列 Rossby 波列, 将赤道太平洋、印度洋与南半球中高纬度大气连接起来, 起到了类似“大气桥”的作用。

为了与 IOD、ENSO 分别对南半球对流层产生的影响进行比较, 图 3 分别给出了北半球秋、冬季 IOD 和 ENSO 与上对流层位势高度异常之间的相关系数及 t 检验分布。IOD 指数定义为区域平均的热带西印度洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $50^{\circ}\text{E}\sim 70^{\circ}\text{E}$) 和热带东南印度洋 ($10^{\circ}\text{S}\sim 0^{\circ}$, $90^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$) 海表面温度距平之差 (Saji et al., 1999)。ENSO 强度用 Niño3 指数代表, 即为热带东太平洋 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 区域平均的海表面温度距平。为了避免 IOD 与 ENSO 之间的相互影响, 采用偏相关分析方法 (Cohen and Cohen, 1983) 分别研究二者与位势高度场之间的相关模态。

如图 3, 在北半球秋、冬季, IOD 指数与南半球位势高度异常之间的偏相关模态并不明显, 在整个南半球范围内没有相关系数通过 99% 信度检验的区域。而 Niño3 指数与位势高度之间的偏相关模态虽然相对较为清晰, 但主要相关区域集中在赤道低纬地区, 两个正相关中心分别位于赤道太平洋及印度洋, 而在南半球中高纬相关明显偏弱, 只有位于德雷克海峡附近的一个正中心偏相关系数通过了 99% 信度的 t 检验。为了进一步验证所得结果, 选用其他 El Niño 指数 (Niño1+2, Niño4 指数) 及南方涛动指数代表 ENSO 强度再进行以上计算, 仍然得到类似的结果 (图略)。

由此可知, 在北半球秋、冬季, 单纯 IOD 信号对南半球对流层产生的影响很弱, 而单纯 ENSO 信号只能对赤道低纬地区上空大气产生影响, 二者均难以在南半球对流层独立激发出遥相关的 Rossby 波列。只有将二者的相互作用和综合影响结合起来, 才能形成明显的遥相关作用中心, 将热带海洋

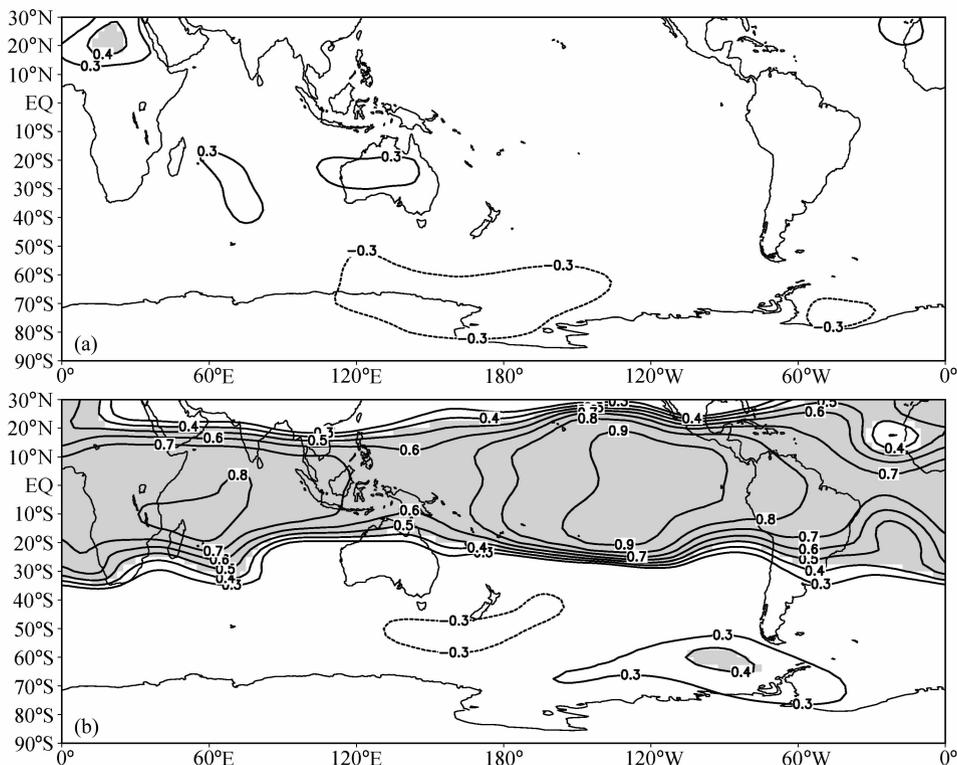


图3 北半球秋、冬季时 IOD (a) 与 Niño3 (b) 指数和 200hPa 对流层位势高度异常场之间的偏相关系数及 t 检验分布。等值线: 相关系数绝对值 ≥ 0.3 ; 阴影: 相关系数超过 99% 信度 t 检验

Fig. 3 Partial correlation maps of geopotential height anomalies at 200 hPa with (a) IOD index and (b) Niño3 index in boreal autumn and winter. The contours with the absolute value less than 0.3 are removed; the areas with the confidence level equal to or greater than 99% are shaded

的信号传播到南半球中高纬对流层大气中。

3.2 位势高度场的合成分布

由相关分析得到, 综合模的信号存在于南半球中上对流层大气中, 在 I_C 正(负)指数年, 正(负)相关中心将出现位势高度值的异常增加, 负(正)相关中心出现位势高度值异常降低。下面用合成分析来进一步验证这种遥相关模态的存在。采用吴海燕和李崇银(2009a)的做法, 选取 1960~2002 年 I_C 正指数年(1961、1965、1972、1976、1982、1983、1987、1994、1997 年)以及负指数年(1964、1970、1975、1984、1985、1988、1996、1998、1999 年), 对这些正、负指数年的秋、冬季 200 hPa 及 500 hPa 位势高度距平场的合成差值进行了分析。

如图 4 所示, 合成差值的结果与相关模态(图 2)十分相似, 同样呈现出明显的正负相间的作用中心, 可以看到一列从赤道中太平洋出发, 经南太平洋, 别林斯高晋海, 南大西洋, 最终到达非洲中南部及赤道印度洋的 Rossby 波列。在中低纬地

区, 500 hPa 合成差值场强度较 200 hPa 略弱, 但几个主要中心均通过了 99% 信度的 t 检验。因此, 合成分析进一步验证了综合模与南半球对流层之间遥相关模态的存在。

此外, 通过相关及合成分析可见, 南半球对流层上层和中层大气对太平洋—印度洋海温异常综合模变化产生的遥响应特征基本相似, 只是在中低纬地区, 对流层中层大气响应强度较上层略弱, 而在高纬地区, 二者的强度相当。这可能由于南半球中低纬地区地形相对高纬较为复杂, 因此越往低层, 受下垫面的影响就越大。总体来看, 综合模对南半球对流层大气产生的影响具有近似正压的结构, 具体较为精确的结论将有待进一步的研究。

4 太平洋—印度洋海温异常综合模与南半球对流层大气遥相关的一种可能的动力机制解释

对于大气遥相关波列的机制解释探讨, Char-

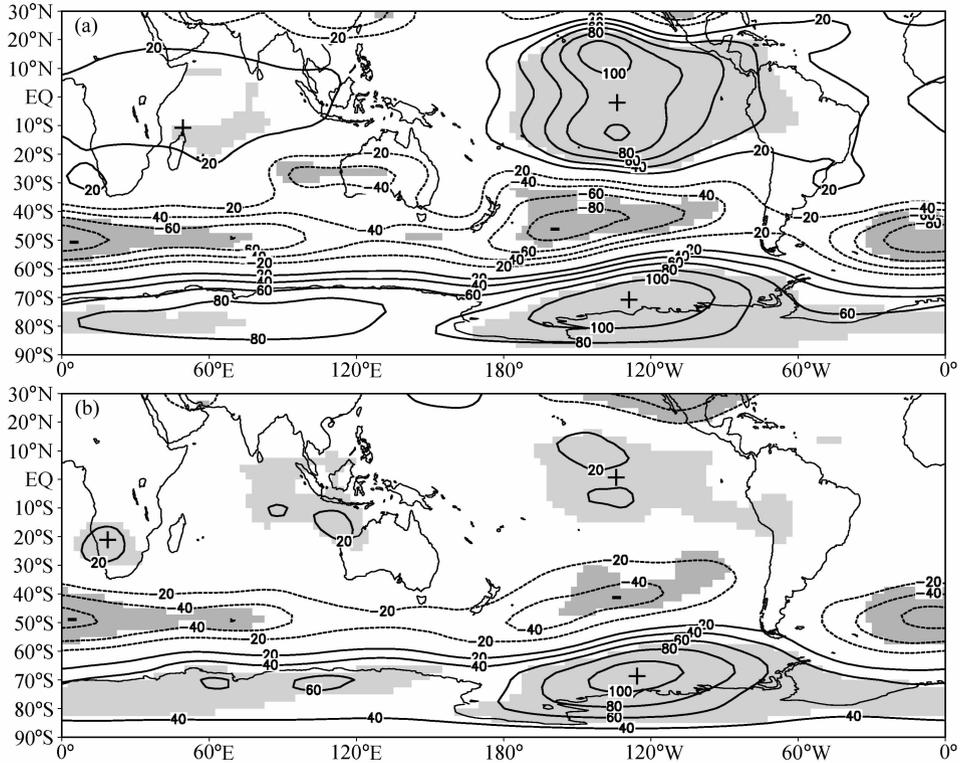


图4 北半球秋、冬季时 I_C 正负指数年合成的 200 hPa (a)、500 hPa (b) 位势高度异常场之间的差值 (单位: gpm) 及其 t 检验分布。等值线: 位势高度异常合成差绝对值 ≥ 20 ; 阴影: 合成差值超过 99% 信度 t 检验

Fig. 4 Composite differences of geopotential height anomalies (units: gpm) at (a) 200 hPa and (b) 500 hPa in boreal autumn and winter between positive-phase and negative-phase years of I_C . The contours with the absolute value less than 20 are removed; the areas with the confidence level equal to or greater than 99% are shaded

ney and Eliassen (1949)、Smagorinsky (1953) 首先给出了大气对于大尺度地形和热源的线性、定常响应的描述。后来, 人们在进行大气对地形和热源强迫响应的数值模拟中发现, 无论是在正压或斜压模式中, 由强迫源区出发的对流层高层波列都是非常类似的, 波长较长的波在东传的同时直接向极地传播, 波列可形成一个不典型的大圆; 而波长短的波其扰动则表现出向赤道的被“捕捉”特征。此外, 对于热带的强迫, 大气响应的振幅在中高纬度地区最大。为了对这些强迫响应的数值模拟试验结果给予理论解释, Hoskins and Karoly (1981) 提出了行星波能量传播理论 (大圆理论)。该理论被提出后, 在大气遥相关的诸多领域已经被成功地应用 (Nitta, 1987; Sardeshmukh and Hoskins, 1988; Rodwell and Hoskins, 1996)。在南半球, 大圆理论也曾被应用于解释 ENSO 和 IOD 与南半球气候和海洋异常之间的遥相关 (Karoly, 1983, 1989; Karoly et al., 1989; Liu et al., 2002; Liu et al.,

2005; Liu and Chen, 2006)。前文通过相关及合成分析显示了太平洋—印度洋海温异常综合模能够在南半球对流层激发一系列从赤道太平洋出发, 到达非洲中南部及赤道印度洋的 Rossby 波列, 因此本节将以 200 hPa 为例, 利用大气行星波的能量传播理论对太平洋—印度洋海温异常综合模与南半球对流层之间的遥相关模态给出一种可能的动力机制解释。

根据李崇银 (2000) 研究所述, 在行星波传播路径计算中, 考虑基本气流的纬向速度为常数的情况, 其结果同真实纬向气流情况只有很小的差异。因此, 参考 Hoskins and Karoly (1981) 用大圆理论解释大气遥相关的方法, 在假定背景风场的纬向风速恒定的条件下, 只要选定大气行星波扰动源的经纬度和纬向波数, 就可以由以下两个公式求出南半球相应波数的大气行星波的能量传播路径:

$$\tan \phi = \tan \alpha \sin(\lambda - \lambda_0), \quad (4)$$

$$\cos \alpha = \sqrt{n\epsilon}, \quad \epsilon = 0.125, \quad (5)$$

其中, λ 、 ϕ 为球坐标下的 Mercator 投影坐标的经

度和纬度, λ_0 为扰动源的起始经度, α 为转向点即大圆达到的最南端所在的纬度, n 为纬向波数。

为了计算大气行星波的传播路径, 首先要确定扰动源的起始位置。由于热带海洋是全球气候系统中最大的对流区域, 激发其上空大气辐合或辐散的产生是引起大气遥相关型最直接的因素 (Lindzen and Nigam, 1987), 因此将通过分析热带地区大气辐合辐散的分布来选取扰动源的位置。根据 Helmholtz 定理 (Holton, 1992), 将 200 hPa 速度场分解为无辐散分量和无旋分量两部分, 图 5a 给出了北半球秋、冬季, I_c 正负指数年的速度势和散度风的合成差值分布。其中, 速度势的高值中心对应风场的辐合, 低值中心对应风场的辐散。由于大气的辐合或辐散引起的涡度的变化是推动行星波能量传播的有利介质, 图 5b 还给出了流函数和旋转风的分布, 其中北半球流函数的高值中心代表反气旋, 低值中心代表气旋, 南半球情况则相反 (如图中标示)。

如图 5a 所示, 在 200 hPa 对流层上, 赤道中太平洋附近为一个速度势的强低值中心, 风场上表现为明显的辐散, 对应此处低层必为一个强烈的辐合区域。在印度尼西亚南部、巴西及非洲南部各有一个速度势的强高值中心, 风场上为辐合, 则对应其低层为辐散区域。由此说明赤道中太平洋地区是大气行星波能量传播的源, 印度尼西亚南部、巴西及非洲南部则为波动能量聚集的汇。从图 5b 中也可看到, 在赤道中太平洋附近, 强烈的辐散中心引起其南北两侧涡度的变化, 形成两个以赤道为对称轴的反气旋中心, 继而沿着大圆路径在南半球激发出一系列气旋及反气旋中心, 将扰动能量从热带地区向中高纬传播, 与前文所得到的遥相关 Rossby 波列路径相似。

以上分析表明, 太平洋—印度洋海温异常综合模在南半球对流层激发出的 Rossby 波列的扰动源在赤道中太平洋, 有旋场的分布也初步证实了波动能量的传播路径。根据速度势的极值中心, 可将波

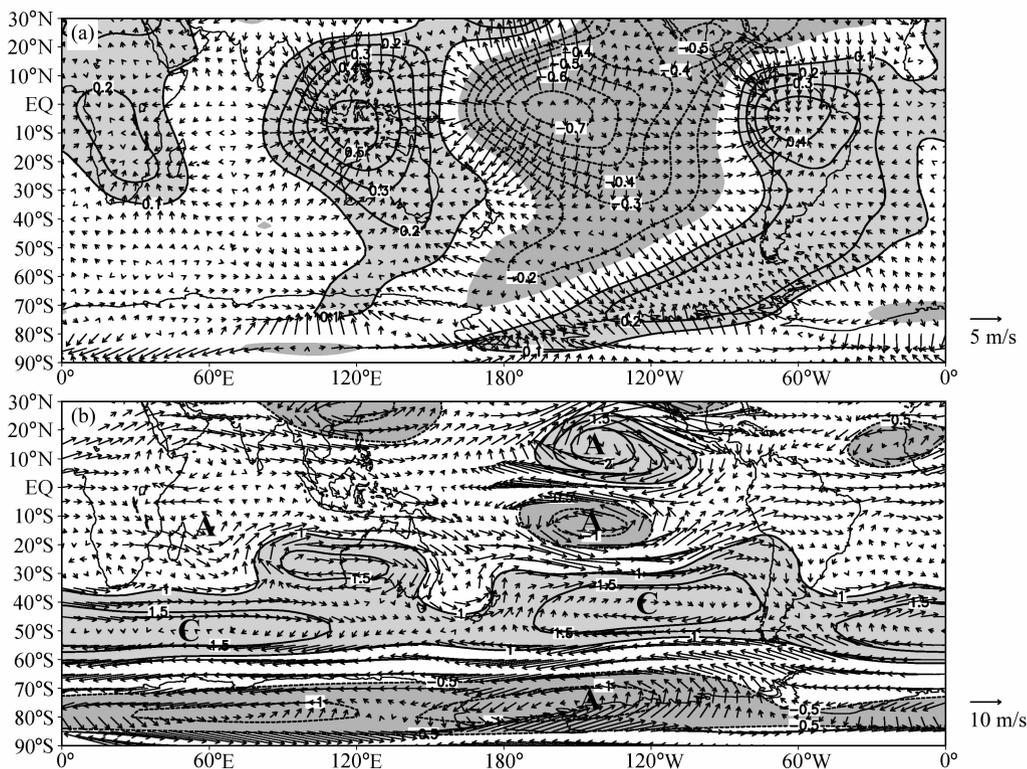


图 5 北半球秋、冬季时 I_c 正负指数年 200 hPa 对流层合成差值: (a) 速度势 (等值线, 单位: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) 和散度风 (箭头, 单位: m/s);

(b) 流函数 (等值线, 单位: $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) 和旋转风 (箭头, 单位: m/s)。"A" 代表反气旋, "C" 代表气旋

Fig. 5 Composite differences at 200 hPa in boreal autumn and winter between positive-phase and negative-phase years of I_c : (a) Velocity potential (contours, units; $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) and the divergence wind (arrow); (b) stream function (contours, units; $10^7 \text{ m}^2/\text{s}$) and the rotational wind (arrow). Letter "A" is anticyclone and "C" is cyclone

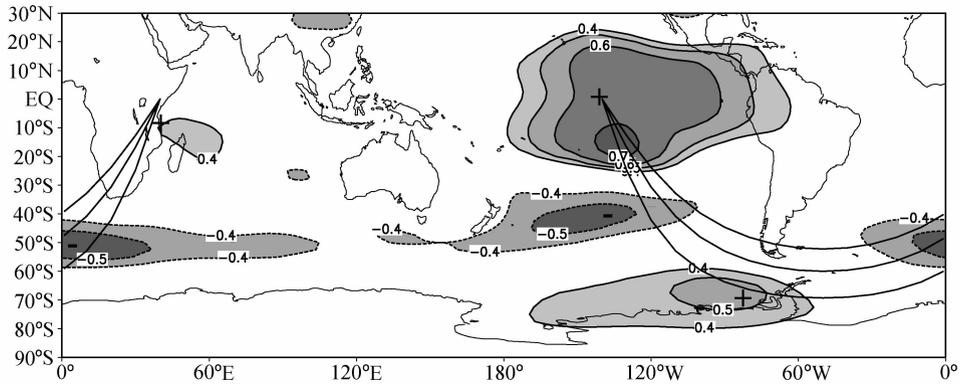


图6 北半球秋、冬季时 200 hPa 对流层纬向波数为 1~3 的大气行星波能量传播路径。等值线： I_C 与位势高度距平场的相关系数绝对值 ≥ 0.4 的区域；弧线：从下至上分别为 1~3 波的波射线

Fig. 6 Ray traces of Rossby wave with wave numbers 1, 2, and 3 at 200 hPa in boreal autumn and winter. The contours represent the significant correlations between geopotential height anomalies and I_C . The arcs from the bottom up are the wave rays with wave numbers 1, 2, and 3

列起点位置选在 ($0^\circ, 140^\circ\text{W}$)。

根据大气行星波能量传播路径计算公式，确定了扰动源的位置后，还要确定哪些纬向波数的大气行星波在南半球占主导地位。根据刘娜等 (2005) 的研究，纬向波数为 1~3 的大气行星波在南半球对流层占据接近或超过 90% 的能量百分比，因此，以纬向波数为 1~3 的大气行星波为代表，研究其能量传播的路径。经过计算，1~3 波的波射线到达南半球的最南端纬度分别为 69°S 、 60°S 和 52°S 。

根据以上的计算分析，图 6 给出了 200 hPa 对流层纬向波数为 1~3 的大气行星波的能量传播路径。从图 6 中可见，波数为 1~3 的波射线从赤道中太平洋出发，沿着相关系数的高值和低值中心最终到达非洲东岸，将赤道太平洋和印度洋与南半球中高纬度大气的遥响应联系在一起，与第 3 节得出的遥相关 Rossby 波列路径基本相符。其中行星波能量扰动始于赤道中太平洋，最终汇集于非洲地区，与速度势和散度风场的分布也比较吻合。因此，由以上的分析和结论可以说明纬向波数为 1~3 的大气行星波的能量传播极有可能是太平洋—印度洋海温异常综合模和南半球对流层位势高度异常之间遥相关的一种联系方式。

5 结论与讨论

5.1 结论

本文详细地探讨了太平洋—印度洋海温异常综合模对南半球对流层大气产生的影响，通过相关与

合成分析给出了综合模指数与南半球中上对流层位势高度异常之间的遥相关模态，并从大气行星波能量传播的角度对遥相关的空间模态给出了一种可能的动力机制解释，主要结论如下：

(1) 在北半球的秋、冬季，太平洋—印度洋海温异常综合模的变化在南半球对流层大气产生较为显著的影响，其遥相关作用中心构成一系列明显的 Rossby 波列，该波列从赤道中太平洋出发，经过南太平洋、别林斯高晋海、南大西洋，最终到达非洲中南部及赤道印度洋地区。

(2) 通过比较分析得知，在北半球秋、冬季，单纯 IOD 与单纯 ENSO 均难以在南半球对流层激发出遥相关的 Rossby 波列，只有将二者的作用综合起来，才能形成明显的遥相关波列，将热带海洋的信号传播到南半球中高纬对流层大气中。

(3) 速度势及散度风分布确定综合模激发出的 Rossby 波列的扰动源在赤道中太平洋，流函数及旋转风分布初步证实了遥相关波动能量的传播路径。

(4) 大圆理论分析表明纬向波数为 1~3 的大气行星波的能量传播极有可能是太平洋—印度洋海温异常综合模与南半球对流层位势高度异常之间遥相关的一种联系方式。

5.2 讨论

已有的研究表明，南半球地区也存在与 ENSO 相关的 PSA 型遥相关模态，但是由于在 1999 年之前尚未提出 IOD，因此，前人所作研究并未区分出

单纯 ENSO 和太平洋—印度洋海温异常综合模的影响差异。本文的研究更注重强调综合模的作用, 结果表明单纯 ENSO 存在时 PSA 现象并不明显, 而综合模期间这种遥相关结构却非常清楚, 只是其模态与传统的 PSA 有所差异。

尽管第 4 节中用大气行星波理论对综合模与南半球大气的遥相关进行了初步的解释, 但综合模对南半球影响的具体机制仍有待更加深入的探索。由于赤道太平洋和印度洋海温异常的分布和变化都与 Walker 环流紧密相关, 该环流在两大洋上空分支的变化对这些地区的海气相互作用有重要影响, 因此, 下面就试图从这个角度入手进行讨论。

对单纯 IOD 及单纯 ENSO 期间沿赤道的经向—垂直环流情况进行了考察(通过偏回归的方法分别去除掉对方的影响, 图略), 结果发现: 单纯 IOD 正位相时, 印度洋区域存在一个在西印度洋上升、东印度洋下沉的反 Walker 环流, 而在太平洋区域也存在一个较弱的在中太平洋上升、西太平洋下沉的环流; 单纯 El Niño 出现时, 太平洋区域存在一个明显的在中太平洋上升, 西太平洋下沉的反 Walker 环流, 而在印度洋区域则是一致的下沉气流。当综合模发生时, 考虑两者作用相互叠加, 在太平洋区域, 相互叠加会导致该地区的反 Walker 环流更加强盛, 中太平洋的上升支增强; 而在印度洋区域, El Niño 引起的下沉气流削弱了 IOD 引起的反 Walker 环流, 导致该地区辐合上升运动减弱。因此, 综合模期间纬向环流最强盛的上升支在中太平洋, 这进一步证实了本文第 4 节选择中太平洋为波源的合理性。它反映了综合模期间 IOD 和 ENSO 共同影响的结果, 而不仅仅是 ENSO 的单独作用。

经向环流方面, 由于综合模期间中太平洋的上升运动异常强盛, 因此该区域的 Hadley 环流也会比单纯 IOD 和 ENSO 期间强大, 在对流层上层大气形成异常强迫源, 将热带海洋的信号在经向上传播的距离更远, 最终导致遥相关波列的产生。而单纯 IOD 和单纯 ENSO 期间, 上升运动产生的辐散源相对较弱, 其产生的扰动能量无法形成明显的遥相关型波列, 这也部分解释了本文图 2 和图 3 的差异。

本文的讨论仅基于诊断分析的结果, 我们在下一步打算用大气环流模式来对此工作进行更深入的

研究, 初步考虑用单纯 IOD、单纯 ENSO 和太平洋—印度洋海温异常综合模三种海温型 (Ashok et al., 2004, Fig. 1) 对大气进行强迫, 讨论不同情况下大气环流响应的差异。

致谢 论文在完成后得到了南京信息工程大学管兆勇教授热心的指点, 在联合模影响机制的探索方面给予了作者很大的帮助和启发, 两位评审专家也提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

参考文献 (References)

- Ashok K, Guan Z, Yamagata T. 2001. Impact of the Indian Ocean dipole on the relationship between the Indian monsoon rainfall and ENSO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 4499 - 4502.
- Ashok K, Guan Z, Saji N H, et al. 2004. Individual and combined influences of the ENSO and the Indian Ocean dipole on the Indian summer monsoon [J]. *J. Climate*, 17 (16): 3141 - 3155.
- Black E, Slingo J, Sperber K R. 2003. An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal East Africa and Indian Ocean SST [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 131: 74 - 94.
- Bjerknes J. 1966. A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature [J]. *Tellus*, 18 (3): 820 - 829.
- Charney J G, Eliassen A. 1949. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitudes westerlies [J]. *Tellus*, 1: 38 - 54.
- Cohen J, Cohen P. 1983. *Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Sciences* [M]. New Jersey, U S: Routledge Academic Press, 736pp.
- Gloersen P. 1995. Modulation of hemispheric sea - ice cover by ENSO events [J]. *Nature*, 373: 503 - 506.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. *大气科学*, 32 (2): 335 - 344.
- He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 335 - 344.
- Holton J R. 1992. *An Introduction to Dynamic Meteorology* [M]. 3rd ed. London, U K: London Academic Press, 511pp.
- Hoskins B J, Karoly D J. 1981. The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing [J]. *J. Atmos. Sci.*, 38: 1179 - 1196.
- 黄平, 黄荣辉. 2009. El Niño 事件发生对南北半球大气环流异常的对称及非对称性影响及其机理分析 [J]. *大气科学*, 33 (1): 1 - 15.
- Huang Ping, Huang Ronghui. 2009. Southern - Northern Hemispheres symmetric and asymmetric effect of El Niño events on general circulation and analysis on its mechanism [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (1): 1 - 15.
- 琚建华, 陈琳玲, 李崇银. 2004. 太平洋—印度洋海温异常模态及其指数定义的初步研究 [J]. *热带气象学报*, 20 (6): 617 - 624.

- Ju Jianhua, Chen Linling, Li Chongyin. 2004. The preliminary research of Pacific-Indian Ocean sea surface temperature anomaly mode and the definition of its index [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 20 (6): 617-624.
- Ju J, Slingo J M. 1995. The Asian summer monsoon and ENSO [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 121: 1133-1168.
- Karoly D J. 1983. Rossby wave propagation in a barotropic atmosphere [J]. *Dyn. Atmos. Oceans.*, 7: 111-125.
- Karoly D J. 1989. Southern Hemisphere circulation features associated with El Niño-Southern Oscillation events [J]. *J. Climate*, 2: 1239-1252.
- Karoly D J, Plumb R A, Ting M. 1989. Examples of the horizontal propagation of quasi-stationary waves [J]. *J. Atmos. Sci.*, 46: 2802-2811.
- Lau M K, Sheu P J, Kang I S. 1994. Multiscale low-frequency circulation modes in the global atmosphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 51: 1169-1193.
- Ledley T S, Huang Z. 1997. A possible ENSO signal in the Ross Sea [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 24: 3253-3256.
- Li Chongyin. 1996. A further study on interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 10: 309-320.
- 李崇银. 2000. 气候动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 515pp. Li Chongyin. 2000. Introduction to Climatic Dynamics (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 515pp.
- 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.
- Lindzen R S, Nigam S. 1987. On the role of sea surface temperature gradients in forcing low-level winds and convergence in the tropics [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 2418-2436.
- Liu J P, Yuan X J, Rind D, et al. 2002. Mechanism study of the ENSO and southern high latitude climate teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 1679-1682.
- 刘娜, 陈红霞, 陈显尧. 2005. 印度洋海温偶极子型振荡与热带太平洋之间的对流层遥相关模态及相应的机制解释 [J]. *科学通报*, 50 (17): 1893-1897. Liu Na, Chen Hongxia, Chen Xian-yao. 2005. A dynamic view of the tropospheric teleconnection between IOD and the Pacific Ocean [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 50 (17): 1893-1897.
- Liu Na, Chen Hongxia, Min Jinzhong, et al. 2005. Spatial teleconnection pattern between IOD and the southern high-latitude sea level pressure field [J]. *Progress in Natural Science*, 15 (12): 93-97.
- Liu Na, Chen Hongxia. 2006. Southern meridional atmospheric circulation associated with IOD [J]. *Journal of Ocean University of China*, 5 (2): 99-105.
- Mo K C, White G H. 1985. Teleconnections in the Southern Hemisphere [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 113: 22-37.
- Mo K C, Ghil M. 1987. Statistics and dynamics of persistent anomalies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44: 877-901.
- Mo K C, Higgins R W. 1998. The Pacific-South American modes and the tropical convection during the Southern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126: 1581-1596.
- Mo K C. 2000. Relationships between low-frequency variability in the Southern Hemisphere and sea surface temperature anomalies [J]. *J. Climate*, 13 (20): 3599-3610.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 65: 373-390.
- 彭丽霞, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2009. 夏季南亚高压年际变化及其与 ENSO 的关系 [J]. *大气科学*, 33 (4): 783-795. Peng Lixia, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2009. Interannual variation of summer South Asia high and its association with ENSO [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (4): 783-795.
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1983. The relationship between eastern equatorial Pacific sea surface temperatures and rainfall over Indian and Sri Lanka [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 517-528.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1996. Monsoons and the dynamics of deserts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 1385-1404.
- Ropelewski C F, Halpert M S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115: 1606-1626.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401 (23): 360-363.
- Saji N H, Yamagata T. 2003. Possible impacts of Indian Ocean Dipole mode events on global climate [J]. *Clim. Res.*, 25: 151-169.
- Saji N H, Ambrizzi T, Simone S. 2005. Indian Ocean Dipole mode events and austral surface temperature anomalies [J]. *Dyn. Atmos. Oceans.*, 39 (12): 87-101.
- Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence [J]. *J. Atmos. Sci.*, 45: 1228-1251.
- Smagorinsky J. 1953. The dynamical influence of large-scale heat sources and sinks on the quasi-stationary mean motions of the atmosphere [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 79: 342-366.
- Tourre Y M, White W B. 1995. ENSO signals in global upper-ocean temperature [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 25: 1317-1332.
- Tourre Y M, White W B. 1997. Evolution of the ENSO signal over the Indo-Pacific domain [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 27: 683-696.
- 吴国雄, 孙凤英, 王敬方. 1995. 降水对热带海表温度异常的邻域响应 II. 资料分析 [J]. *大气科学*, 19 (6): 663-676. Wu Guoxiong, Sun Fengying, Wang Jingfang. 1995. Neighbourhood response of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies. Part II: Data analysis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sci-*

- ences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (6): 663 - 6761.
- 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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 470 - 480.
- 吴海燕, 李崇银. 2009a. 赤道太平洋—印度洋海温异常综合模与次表层海温异常 [J]. 海洋学报, 31 (2): 24 - 33. Wu Haiyan, Li Chongyin. 2009a. The preliminary research of equatorial Pacific - Indian Ocean temperature anomaly mode and subsurface ocean temperature anomalies [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 31 (2): 24 - 33.
- 吴海燕, 李崇银. 2009b. 热带太平洋—印度洋海温异常综合模的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 567 - 586. Wu Haiyan, Li Chongyin. 2009b. Numerical simulation of tropical Pacific - Indian Ocean associated temperature anomaly mode [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 567 - 586.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 热带太平洋—印度洋海温异常综合模对南亚高压的影响 [J]. 大气科学, 29 (1): 99 - 110. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Effect of the tropical Pacific - Indian Ocean temperature anomaly mode on the South Asia high [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (1): 99 - 110.
- 杨辉, 贾小龙, 李崇银. 2006. 热带太平洋—印度洋海温异常综合模及其影响 [J]. 科学通报, 51 (17): 2085 - 2090. Yang Hui, Jia Xiaolong, Li Chongyin. 2006. The tropical Pacific - Indian Ocean temperature anomaly mode and its effect [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (17): 2085 - 2090.
- 郑冬梅, 张启龙. 2009. 热带印度洋—太平洋热力异常联合模对我国夏季降水的影响 [J]. 热带气象学报, 25 (5): 581 - 588. Zheng Dongmei, Zhang Qilong. 2009. Impacts of the tropical Indian - Pacific Ocean thermodynamic anomaly joint mode on the summer rainfall over China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 25 (5): 581 - 588.