

林爱兰, Li Tim, Fu Xiuhua, 等. 2009. 印度洋海气相互作用对热带夏季大气环流气候态的影响 [J]. 大气科学, 33 (6): 1123-1136. Lin Ailan, Li Tim, Fu Xiuhua, et al. 2009. Impact of air-sea interactions over the Indian Ocean on the climatological state of tropical atmospheric circulation in boreal summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1123-1136.

印度洋海气相互作用对热带夏季 大气环流气候态的影响

林爱兰¹ Tim LI^{2, 1} Xiuhua FU² Jing-Jia LUO³

1 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 热带季风重点开放实验室, 广州 510080

2 International Pacific Research Center (IPRC) and Department of Meteorology, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822

3 Frontier Research Center for Global Change, Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), Yokohama, Japan 2360001

摘要 利用分辨率较高的 SINTEX-F (Scale INteraction EXperiment-FRCGC) 海气耦合模式, 进行多组长时间积分模拟和理想试验, 分析研究热带印度洋海气耦合对夏季大气环流气候态的影响。主要结果有: (1) 热带印度洋海气相互作用使热带东印度洋产生明显的东风变化, 使热带中西太平洋赤道北部产生气旋性切变变化。(2) 印度洋海气相互作用对大气环流气候态的影响绝大部分由于大气对海气相互作用的响应存在年际变化正负距平不对称性造成, 这种年际变化不对称性包括正偶极子与负偶极子的不对称、海盆宽度正异常与海盆宽度负异常的不对称。(3) 年际和季节内两种时间尺度海气相互作用对印度洋关键区大气环流平均态都有影响, 约各占 60%、40%; 季节内尺度海气相互作用对太平洋近赤道区大气环流平均态有重要影响; 年际尺度海气相互作用对太平洋赤道外地区大气环流平均态有重要影响。热带印度洋年际尺度、季节内尺度海气相互作用对大气环流气候态的影响, 都存在年际变化以及年际变化正负距平不对称性。这两种尺度海气相互作用主要通过年际变化正负距平不对称性而对大气环流平均态产生影响。

关键词 印度洋 海气相互作用 大气环流 气候态 不对称性

文章编号 1006-9895 (2009) 06-1123-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

Impact of Air-Sea Interactions over the Indian Ocean on the Climatological State of Tropical Atmospheric Circulation in Boreal Summer

LIN Ailan¹, Tim LI^{2, 1}, Xiuhua FU², and Jing-Jia LUO³

1 Institute of Tropical and Marine Meteorology of Guangzhou /Key Open Laboratory for Tropical Monsoon, China Meteorological Administration, Guangzhou 510080

2 IPRC and Department of Meteorology, University of Hawaii, Honolulu, Hawaii 96822

3 Frontier Research Center for Global Change, JAMSTEC, Yokohama, Japan 2360001

Abstract The impact of air-sea coupling over the Indian Ocean on the climatological state of tropical atmospheric circulation in boreal summer is investigated by diagnosing the long-term simulations from the high-resolution SINTEX-F (Scale INteraction EXperiment-FRCGC) coupled ocean-atmosphere model. The main conclusions are listed as below. (1) Air-sea interactions over the tropical Indian Ocean strengthen easterlies over the tropical eastern Indian

收稿日期 2008-08-01, 2009-03-19 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40675055, 广东省科技计划项目 2005B32601007, 广东省自然科学基金项目 06020745

作者简介 林爱兰, 女, 1963 年出生, 副研究员, 硕士, 主要从事气候研究。E-mail: allin@grmc.gov.cn

Ocean, and induce cyclonic shearing circulation over the north of western and central Pacific. (2) The impact of air-sea interactions on the climatological mean state over the Indian Ocean is primarily attributed to the asymmetric atmospheric response to positive and negative Indian Ocean dipole modes and the asymmetric response to positive and negative basin-wide modes over the tropical Indian Ocean. (3) Air-sea interactions on both interannual and intraseasonal timescales contribute to the change of the climatological mean state over the Indian Ocean; they account for 60% (interannual timescale) and 40% (intraseasonal timescale) respectively. While the impact of the intraseasonal air-sea interaction on the mean circulation is more important in the equatorial Pacific region, the impact of the interannual air-sea interaction is more important in the off-equatorial Pacific region. The impact of air-sea interactions on both the timescales exhibits a significant interannual variation and amplitude asymmetry between the positive and negative anomalies.

Key words air-sea interaction, the Indian Ocean, atmospheric circulation, mean state, asymmetry

1 引言

关于海气相互作用对大气的影响,过去基本着眼于赤道东太平洋,即 ENSO 事件。近年来,不少专家注意到印度洋海温异常变化对大气环流和气候异常的重要性。印度洋海温异常与太平洋海温异常既有相关性(吴国雄等,1998;谭言科等,2003;巢纪平等,2005;赵珊珊等,2008;蔡怡等,2008),又有独立性(Saji et al., 1999; Webster et al., 1999; 杜振彩等,2006),印度洋在 ENSO 中也起到一定的作用(Anderson et al., 1985; Wu et al., 2004b)。研究表明,赤道印度洋海气相互作用与对流层准两年振荡(tropospheric biennial oscillation, 简称 TBO)及亚奥季风年际变化有关联(Li et al., 2001a, 2006; Loschnigg et al., 2000; Yu et al., 2003)。印度洋对印度季风-ENSO 关系有影响(Li et al., 2001b, 2002; Wu et al., 2004a)。印度洋海温与夏季北传季节内振荡(intraseasonal oscillation, 简称 ISO)存在很强的耦合关系(Fu et al., 2003)。赤道印度洋海气相互作用对南亚季风(Goddard et al., 1999; Chang et al., 2000; Ashok et al., 2001; Clark et al., 2003)、东亚季风(晏红明等,2000, 2007; 李崇银等,2001; 肖子牛等,2001; 温之平等,2006; 李东辉等,2006; 杨明珠等,2007; 袁媛等,2009)都存在影响。以上研究工作证明,印度洋海温异常变化对大气环流和气候异常有重要影响,印度洋海气相互作用在不少方面扮演重要角色。例如,晏红明等(2000)和 Guan et al., (2003)分析研究了印度洋低纬地区海表面温度异常和亚洲季风区环流或天气气候异常的联系,并提出赤道印度洋的变化可以在北半球中高纬度地区

激发产生与太平洋-北美型(Pacific-North American Pattern, 简称 PNA)和欧亚-太平洋型(Eurasia-Pacific pattern, 简称 EAP)类似的冬季遥相关型或夏季遥相关型波列。最近的研究结果进一步显示了大气行星波的能量传播是印度洋偶极子和北半球对流层气候异常之间遥相关的一种可能的联系方式(刘娜等,2008)。杨明珠和丁一汇(2007)研究认为,南印度洋偶极子事件主要通过三种途径影响中国降水:第一,通过影响当地马斯克林高压的强度改变越赤道气流的强度,进而影响印度夏季季风对中国地区的西南水汽输送;第二,暖(冷) SST 异常在热带中东印度洋和海洋大陆可以维持到秋季,影响当地的对流以及来自印度洋和太平洋水汽输送通道上的量值和方向,从而改变进入东亚的水汽输送;第三,改变西北太平洋副热带高压的位置和强度,对我国夏季降水造成影响。目前,已有研究基本上针对年际变化时间尺度,关于印度洋对大气气候平均环流的影响,目前较少涉及。本文将利用 SINTEX-F 海气耦合模式多组试验 70 年长时间积分结果,分析热带印度洋海气相互作用对热带夏季大气环流气候态的影响,并探讨这种影响可能原因。

2 资料和研究方法

本文利用 SINTEX-F (Scale INteraction Experiment-FRCGC) 海气耦合模式(Luo et al., 2003, 2005a)进行模拟试验研究,该模式在日本海洋地球科技中心(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, JAMSTEC)地球模拟器计算机上开发运行。SINTEX-F 海气耦合模式由 FRCGC (Frontier Research Center for Global

Change) 基于原来欧洲的 SINTEX 模式 (Gualdi et al., 2003; Guilyardi et al., 2003) 发展而来。该耦合模式的大气模块采用约 $1.1^\circ \times 1.1^\circ$ 高水平分辨率 (T106) 的 ECHAM4 (Roeckner et al., 1996), 海洋模块是具有 ORCA2 配置的 OPA8.2 [ORCA2 网格分布, 2° (经度) $\times 0.5^\circ \sim 2^\circ$ (纬度), 北极极点被转换到欧亚和北美大陆] (Madec et al., 1998), 没有通量校正的耦合信息每 2 小时通过 OASIS 2.4 耦合器 (Valcke et al., 2000) 在 OPA (Océan Parallélisé) 和 ECHAM4 (德国马普气象研究所开发的大气环流模式) 之间交换。SINTEX-F 耦合模式能重现年循环、ENSO 和太平洋年代振荡 (Pacific decadal oscillation, 简称 PDO), 包括 3~5 年的周期、振幅强度和热带太平洋 SST 异常在经向上大的空间型, 印度洋上的 ENSO 遥相关和印度洋偶极子 (Indian Ocean dipole, 简称 IOD) 也都真实地模拟出来 (Luo et al., 2003, 2005a; Yamagata et al., 2004; Tozuka et al., 2005)。SINTEX-F 模式有很强的季节预报能力, 对 1982~2001 间的所有 El Niño 和 La Niña, 超前 12 个月集合预报技巧评分达到 0.7 (Luo et al., 2005b)。有的 ENSO 事件甚至能提前 2 年预报 (Luo et al., 2008)。对印度洋的气候异常, 特别是 IOD 的预报技巧也能达到提前 2 个季度左右 (Luo et al., 2007)。基于此模式在模拟热带印度洋和太平洋气候上的高性能, 我们相信本文理想试验的结果应比较真实和可信。

为了从气候的角度研究热带印度洋海气相互作用对热带风场的影响, 本工作设计运行了 3 组 SINTEX-F 耦合模拟试验, 每组试验积分 70 年。第一组试验是控制试验, 大气和海洋在全球海洋上全耦合 (将控制试验记为 CTL); 在第二组理想试验中, 热带印度洋 ($30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$) 给定来自控制试验中的 SST 气候年循环 (记为 ESdI); 在第三组理想试验中, 类似 ESdI, 但热带印度洋 ($30^\circ\text{S} \sim 30^\circ\text{N}$) 给定来自控制试验中的逐年月平均 SST (记为 ESdIa)。通过分析比较第一组与第二组试验结果, 可以有效地了解热带印度洋海气相互作用对热带大气环流的气候效应, 避免了实际观测资料中包含不同海区海气相互作用信息互相干扰的情况。第三组理想试验分别与第一组、第二组试验比较, 可以进一步将季节内尺度、年际尺度海气相互作用分离出来。去掉最初的 spin-up 积分 (20 年), 本文分

析仅用模式结果后 50 年资料。

我们利用观测分析资料 [包括 NCEP/NCAR 分析资料、卫星观测向外长波辐射 (outgoing long wave radiation, 简称 OLR) 资料、CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) 降水分析资料], 从气候角度验证表明, 控制试验对热带大气环流、对流、降水、海温以及 ENSO 循环海气相互作用特征等的模拟能力较好。例如, 模式较好地模拟 850 hPa 大尺度环流形势及其季节变化 (图 1), 因篇幅关系不一一介绍。

本文仍然采用 Saji et al. (1999) 定义偶极子指数时选定的区域, 偶极子指数是热带印度洋西部 ($10^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$, $50^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{E}$) 和东部 ($10^\circ\text{S} \sim 0^\circ$, $90^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$) 海表温度距平 (SSTA) 差值。Saji et al. (2003) 对 COADS 资料分析时, 利用 ($20^\circ\text{S} \sim 20^\circ\text{N}$, $40^\circ\text{E} \sim 100^\circ\text{E}$) 范围内 SSTA 平均值表征海盆宽度异常 (basin wide anomaly, BWA)。为了便于判断每年的模态类型, 非偶极子模态则属于海盆宽度异常 (BWA) 模态, 保证具体某年模态类型的唯一性, 本文 BWA 模态指数用上述西部 ($10^\circ\text{S} \sim 10^\circ\text{N}$, $50^\circ\text{E} \sim 70^\circ\text{E}$) 和东部 ($10^\circ\text{S} \sim 0^\circ$, $90^\circ\text{E} \sim 110^\circ\text{E}$) 两个区域 SSTA 之和表示。

3 热带印度洋海气相互作用对热带大气环流的气候效应

我们通过分析对比控制试验 (CTL) 和热带印度洋海温给定年循环理想试验 (ESdI) 结果, 从而了解热带印度洋海气相互作用对热带平均流场的影响。考虑到流场的季节变化, 有必要将冬半年、夏半年分别进行分析, 本文仅针对夏半年 (5~10 月)。若没有特殊说明, 下文所指大气环流都是北半球夏半年情况。

图 2 是 CTL 与 ESdI 试验 50 年平均 (5~10 月) 850 hPa 风场及其差值 (本文所有两个试验的差值图都是 CTL 减去 ESdI)。从图 2a、b 可以看到, 850 hPa 风场在热带地区空间分布趋势两个试验大致类似, 热带西南风区主要位于夏半球, 即夏季位于印度洋北部、南海及亚洲季风区。图 2c 是 CTL 试验减去 ESdI 试验的差值风场, 其中阴影代表纬向风 u 差值达到 0.05 显著性检验、等值线区域代表经向风 v 差值达到 0.05 显著性检验。由图 2c 可见, 热带印度洋和太平洋地区风场两个试验之

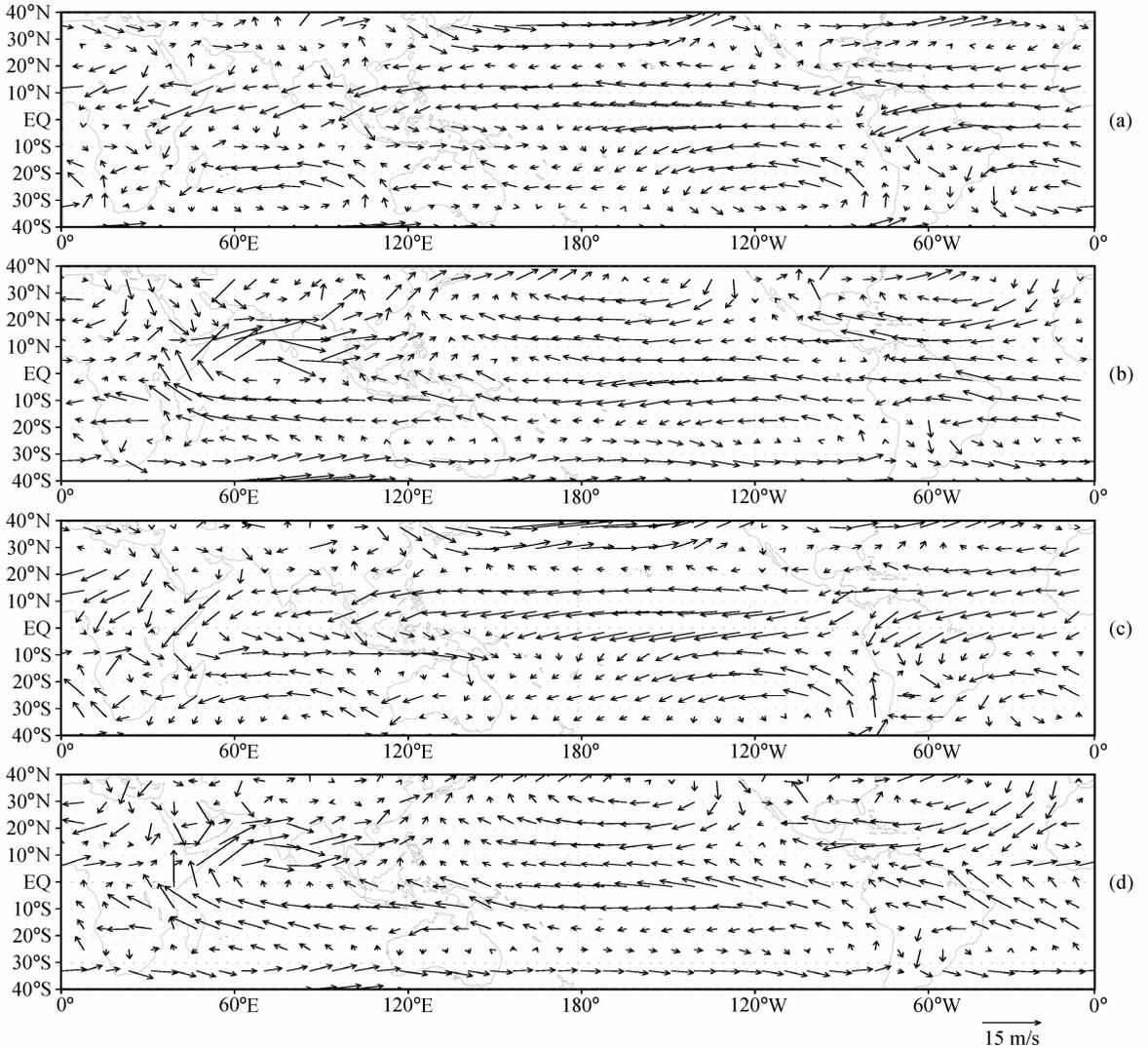


图1 (a, c) 1月和 (b, d) 7月 850 hPa 流场: (a, b) 观测; (c, d) 控制试验

Fig. 1 850-hPa stream fields in (a, c) Jan and (b, d) Jul; (a, b) Observations; (c, d) control experiment

间都存在一定的差异, CTL 与 ESdI 试验相比, 赤道印度洋及其以南区域为一反气旋性异常, 而赤道太平洋及其以北区域为一气旋性异常。从纬向风 u 分量来讲, 热带印度洋、热带东印度洋-澳大利亚西北部为显著的东风异常, 西南印度洋为显著西风异常; 而太平洋地区 ($0^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$, $150^{\circ} \text{E} \sim 160^{\circ} \text{W}$) 为西风异常, 其北侧区域 ($15^{\circ} \text{N} \sim 30^{\circ} \text{N}$, $140^{\circ} \text{E} \sim 170^{\circ} \text{W}$) 为东风异常。从经向风 v 分量来讲, 从南半球向北半球越赤道气流明显加强 (即南风异常) 主要在 80°E 附近中印度洋、苏门答腊以及中东太平洋地区 (图 2c 实线区)。但索马里-西印度洋越赤道气流却有减弱 (北风异常) 的趋势。

热带地区对流加强 (减弱) 与 850 hPa 纬向风

正异常 (负异常) 基本一致 (图 3), 热带东印度洋-澳大利亚西北部、北太平洋 ($15^{\circ} \text{N} \sim 30^{\circ} \text{N}$, $140^{\circ} \text{E} \sim 170^{\circ} \text{W}$) 东风异常显著区, 对流 (OLR 负异常) 明显减弱 (图 3 浅阴影区); 西南印度洋、热带太平洋 ($0^{\circ} \sim 15^{\circ} \text{N}$, $150^{\circ} \text{E} \sim 160^{\circ} \text{W}$) 西风异常区对流 (OLR 负异常) 明显加强 (图 3 深阴影区)。可见, 尽管两个试验热带印度洋海气耦合的气候平均海温是相同的, 但由于 ESdI 只有年循环海气相互作用, 没有其它时间尺度海气相互作用, 结果两者之间大气环流平均状态却存在差异。

两个试验之间存在的大气环流气候平均差异说明, 热带印度洋海气相互作用使热带印度洋产生反气旋性变化, 则印度洋-澳大利亚反气旋高压加强,

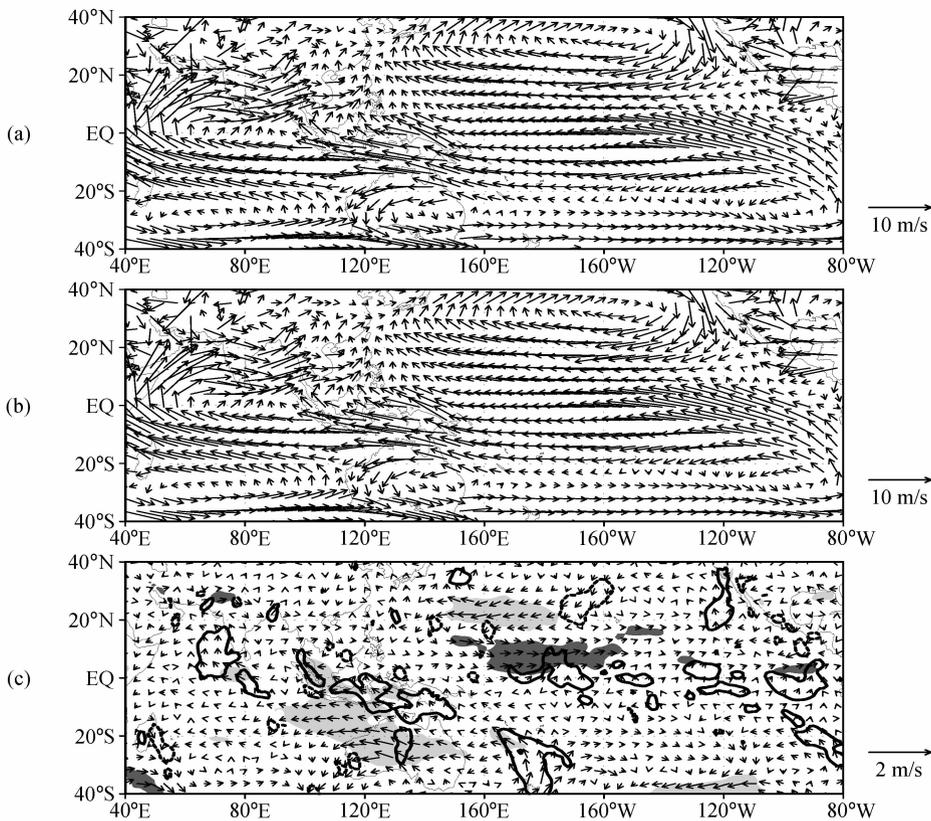


图2 (a) CTL与(b) ESdI 试验夏季 850 hPa 风场及其(c) 差值 (CTL-ESdI)。(c) 深、浅阴影：西、东风异常达到 0.05 显著性水平，实、虚线：南、北风异常达到 0.05 显著性水平

Fig. 2 Composite 850-hPa wind field (m/s) during boreal summer in (a) CTL (control experiment) and (b) ESdI (experiment of SINTEX-F decoupled over the tropical Indian Ocean), and (c) their difference (CTL-ESdI). In (c) dark (light) shading indicates westerly anomaly (easterly anomaly) at the 0.05 significance level for *t*-test, the solid (dashed) contour indicates souther anomaly (norther anomaly) at the 0.05 significance level for *t*-test

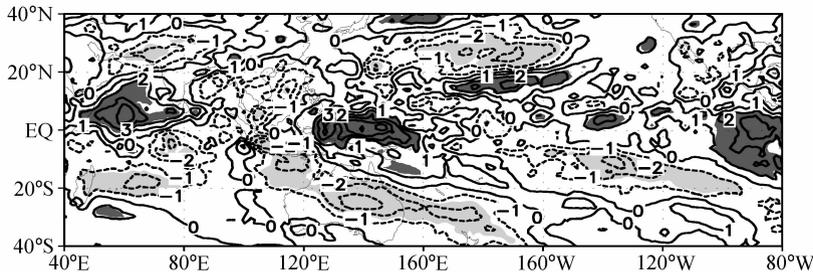


图3 CTL与ESdI 试验夏季 OLR (outgoing longwave radiation) 场差值 (单位: W/m^2)。正、负值：对流加强、减弱；深、浅阴影：对流加强、减弱达到 0.05 显著性水平

Fig. 3 The OLR (W/m^2) difference between CTL and ESdI during boreal summer. Positive (negative) values; convection enhancing (weakening), dark (light) shading; convection enhancing (weakening) at the 0.05 significance level for *t*-test

即冬季风加强。但对亚洲热带季风的作用较复杂，虽然能加强 80°E 附近中印度洋、苏门答腊越赤道气流，但对索马里-西印度洋越赤道气流却有减弱趋势。可见，热带印度洋海气相互作用的气候平均效应是加强澳大利亚冬季风，而对亚洲热带季风的

影响较复杂，总体没有显著的作用。

热带印度洋海气相互作用不仅对局地大气环流产生影响，而且对太平洋地区大气环流存在遥相关作用。两个试验之间的气候平均差异说明，热带印度洋海气相互作用使热带中西太平洋 (10°N~20°N,

150°E~180°)产生气旋性变化, 涡度加强(图略)。计算表明, 图 2c 中的热带印度洋、近赤道太平洋和赤道外太平洋三个显著区纬向风变化幅度分别占年际变化标准差(控制试验)的 48%、20%和 32%(计算范围取图 11 各长方框)。

4 影响原因分析

以上结果表明, 热带印度洋海气相互作用对热带大气环流气候特征存在明显的影响, 不同地区影响效果不同。我们知道, 本工作的海气耦合模拟试验积分长达 70 年(分析仅用后 50 年), CTL 海气相互作用包括季节尺度、年际变化尺度等不同时间尺度, 而 ESdI 理想试验中, 热带印度洋 SST 只有年循环, 没有其它尺度 SST 变化以及海气相互作用。因此, 两个试验之间热带大气环流的差异包含了热带印度洋海气相互作用年际变化的影响效果。

从年际变化尺度来讲, 热带印度洋海温变化具有不同的模态: 偶极子模态(包括正、负偶极子异常年份), 海盆宽度异常(BWA)模态(包括正、负 BWA 和正常年份)。那么, 在各种模态不同异常

年, 热带印度洋海气相互作用对风场的影响有何不同? 为了回答这个问题, 根据 CTL 试验的热带印度洋海温变化模态和位相对不同年份进行分类, 分别进行合成分析, 并与 ESdI 理想试验结果比较。

4.1 偶极子模态

取偶极子指数大于等于 1 个标准差的年份为正偶极子年份(有 9 年), 偶极子指数小于等于负的 1 个标准差的年份为负偶极子年份(8 年)。图 4 是 CTL 试验正偶极子年份与 ESdI 试验平均风矢量场及其差值, 由图可以发现, 在正偶极子年份, 热带印度洋海气相互作用使印度洋产生反气旋性变化, 使热带北太平洋产生气旋性变化, 明显地加强热带太平洋地区纬向风, 减弱热带印度洋地区纬向风。这种影响趋势与多年平均的影响效果(见图 2c)类似, 但影响强度更强。在负偶极子年份(图 5), 热带印度洋海气相互作用影响趋势相反, 印度洋产生气旋性变化, 热带北太平洋产生反气旋性变化, 即减弱热带太平洋地区纬向风, 加强热带印度洋地区纬向风。

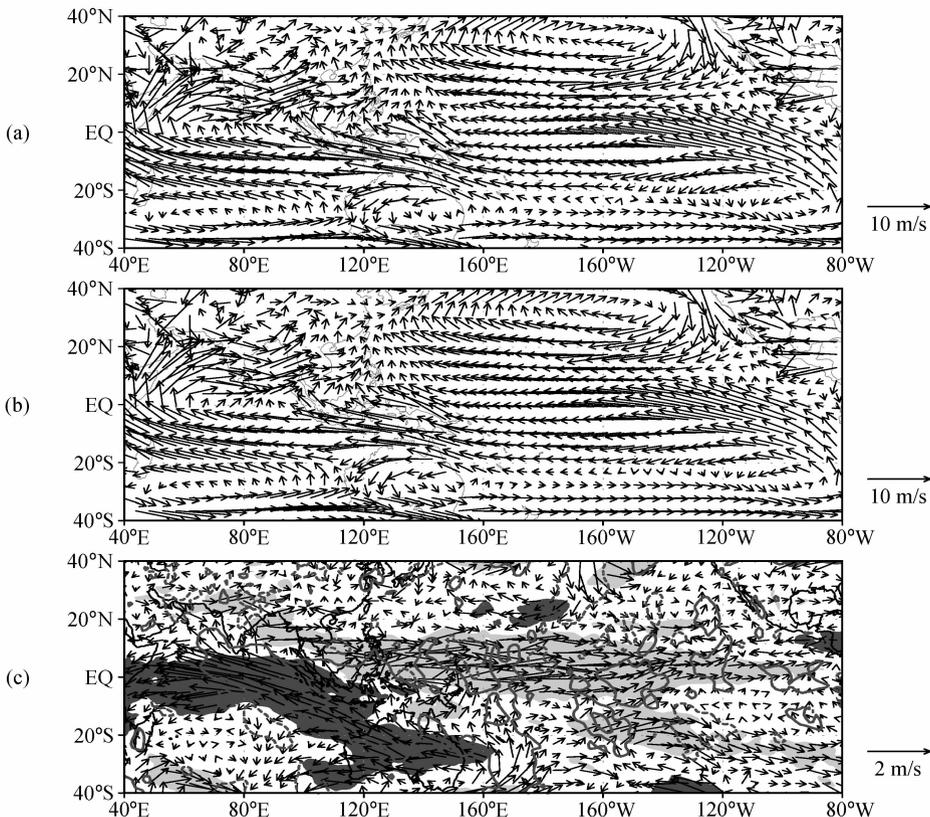


图 4 (a) CTL 正偶极子年份与 (b) ESdI 试验夏季平均 850 hPa 风矢量场及其 (c) 差值。(c) 说明同图 2c
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for (a) CTL during positive dipole years and (b) ESdI, and (c) their difference

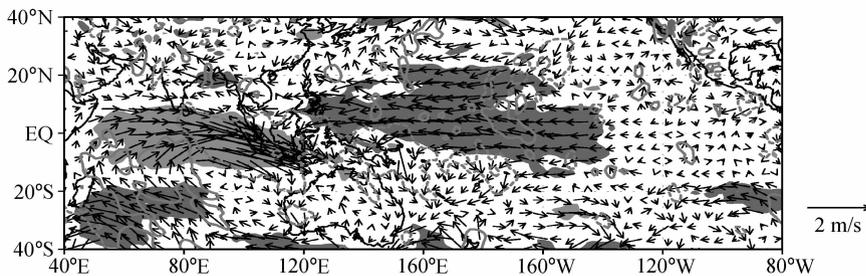


图 5 CTL 负偶极子年份与 ESdI 夏季平均 850 hPa 风矢量差值。说明同图 2c

Fig. 5 Same as Fig. 2c, but for the difference between CTL during negative dipole years and ESdI

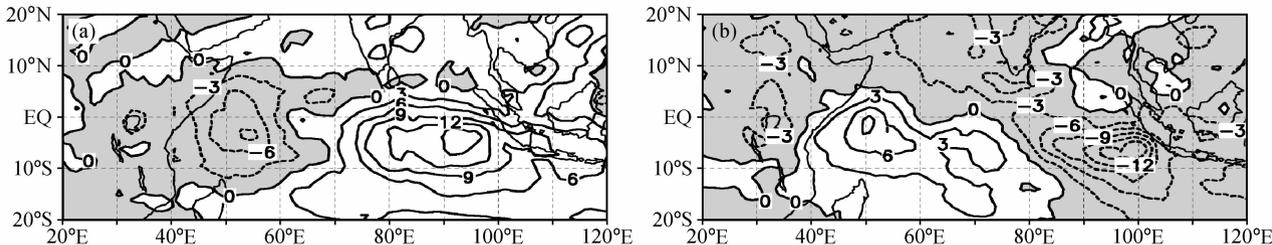


图 6 ESdI 试验与 CTL (a) 正偶极子年份、(b) 负偶极子年份夏季平均 OLR 差值分布 (单位: W/m^2)。阴影: 负值, 代表对流加强

Fig. 6 Composite summer OLR (W/m^2) differences: (a) Between CTL during positive dipole years and ESdI (CTL-ESdI); (b) between CTL during negative dipole years and ESdI (CTL-ESdI). Negative (enhanced convection) is shaded

热带印度洋海气相互作用对热带印度洋纬向风影响存在明显的年际变化, 其物理机制可以利用 Matsuno-Gill 模式 (Matsuno, 1966; Gill, 1980) 来解释。根据 Matsuno-Gill 模式关于大气对热带异常热(冷)源响应形式, 在热(冷)源的西侧由于 Rossby 波异常响应, 形成赤道南、北两个异常气旋(反气旋)。在印度洋为正偶极子情况下, 印度洋东部为海温负异常, 海温负异常使对流减弱(见 OLR 合成图 6a), 大气对该冷源产生响应, 其西侧为反气旋性环流(图 9a), 因此热带印度洋地区为东风异常, 20°S 以南(或 20°N 以北)为西风异常。当印度洋为负偶极子, 情况则相反, 此时印度洋东部为海温正异常, 海温正异常使对流加强(OLR 合成图 6b), 大气对该热源产生响应, 其西侧为气旋性环流(图 9b), 因此热带印度洋地区为西风异常, 20°S 以南(或 20°N 以北)为东风异常。

一般情况下, 正偶极子年夏季通常是 El Niño 发展阶段, 而负偶极子年夏季通常是 La Niña 发展阶段(后面将进一步证明), 因此, 热带太平洋分别对应西风异常和东风异常。

4.2 偶极子模态年际变化不对称性

仔细比较可以发现, 由于正偶极子对低层风场

影响强度更强, 并且正偶极子年比负偶极子年多 1 年, 因此正、负偶极子年平均, 热带印度洋海气相互作用的影响仍然存在, 影响趋势比较类似正偶极子年份(图 7)。计算表明, 正、负偶极子年份的夏半年平均海温偶极子指数为 0.81°C、-0.71°C (CTL), 正偶极子年份比负偶极子年份海温异常更强, 因此正偶极子年份对热带印度洋大气低层风场的影响强度更强, 这是正、负偶极子模态海气相互作用对热带印度洋环流的影响年际变化不对称的主要原因之一。接下来需要弄清的问题是: 对热带太平洋大气低层风场影响的年际变化不对称性原因是什么?

从 CTL 正、负偶极子年份与 ESdI 试验夏季平均 SST 差值分布可以看出, CTL 正偶极子年份与 ESdI 试验夏季平均 SST 差值表现为 El Niño 分布形式(图 8a), CTL 负偶极子年份与 ESdI 试验夏季平均 SST 差值表现为 La Niña 分布形式(图 8b), 并且图 8a 的 El Niño 强度比图 8b 的 La Niña 强, 因此, 正、负偶极子对热带太平洋大气风场的影响也存在不对称性, 正、负偶极子年平均体现出与正偶极子类似的影响特征趋势。

为进一步了解印度洋对太平洋大气环流遥相关

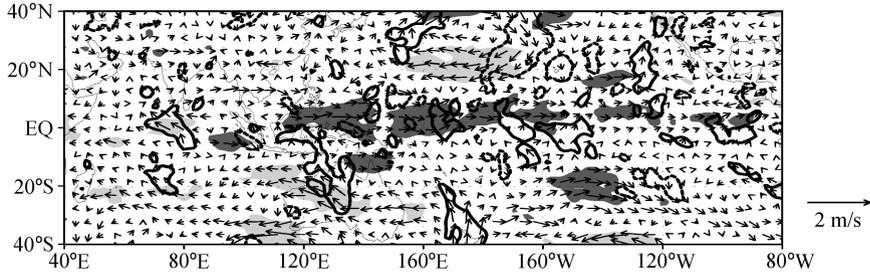


图7 CTL的正和负偶极子年份与ESdI夏季平均850 hPa风矢量差值。说明同图2c

Fig. 7 Same as Fig. 2c, but for the difference between CTL during positive and negative dipole years and ESdI

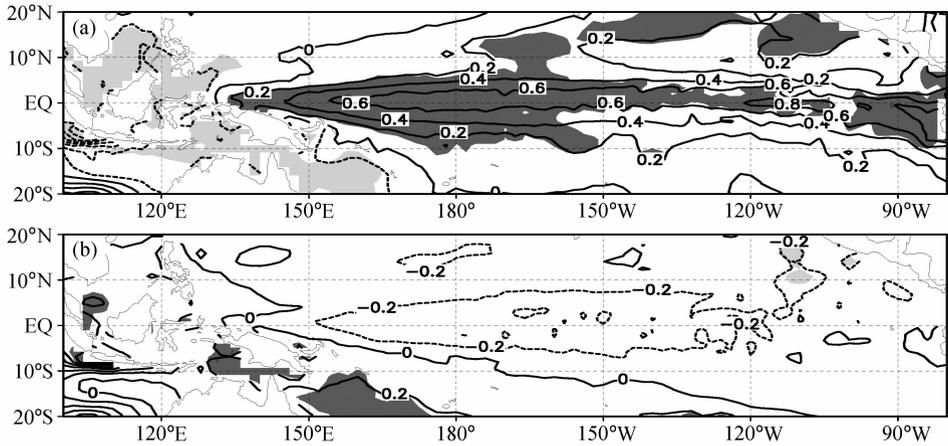


图8 CTL (a) 正、(b) 负偶极子年份与ESdI试验夏季平均SST差值分布(单位: K)。阴影: 差异达到 t 检验0.05显著性水平

Fig. 8 Composite summer SST (K) differences; Between CTL during positive dipole years and ESdI; (b) between CTL during negative dipole years and ESdI. Shading: at the 0.05 significance level for t -test

影响的物理过程, 我们做了一个辅助的理想试验, 该试验中热带太平洋 ($30^{\circ}\text{S}\sim 30^{\circ}\text{N}$) 给定来自控制试验中的 SST 气候年循环 (记为 ESdP), 其它海区则自由耦合。图 9 是 ESdP 试验中在印度洋 SSTA 正、负偶极子情况下的纬向风距平 (相对于 ESdP 本身的气候平均值) 分布。图 9 表明, 在热带太平洋没有海气耦合情况下, 印度洋偶极子对印度洋局地大气环流有显著的影响, 而对太平洋大气环流的影响甚微。与上述结果比较, 说明印度洋偶极子对太平洋大气环流的遥相关影响需要通过太平洋当地海气相互作用来实现, 而不是直接的“大气桥”作用。

4.3 热带印度洋海盆宽度异常 (BWA) 模态对大气环流的影响

除了正、负偶极子年份, 我们将 BWA 模态指数大于 0.7 倍标准差的年份定为正 BWA 模态年份 (有 9 年), BWA 模态指数小于负的 0.7 倍标准差的年份定为负 BWA 模态年份 (5 年)。从 CTL 中热带印度洋为正 BWA 模态异常年份与 ESdI 试验

平均风矢量差值 (图 10a) 可以看出, 热带印度洋 ($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) 为两对气旋性环流, 赤道附近为西风异常, 赤道外东风异常。这种分布是大气对热源 (高 SST) 产生 Rossby 波异常响应的结果。而 CTL 中热带印度洋为负 BWA 模态异常年份与 ESdI 试验平均风矢量差值分布 (图 10b) 基本上与图 10 a 相反, 但图 10b 中热带印度洋 ($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$) 反气旋性环流明显偏强, 其范围几乎比图 10a 的气旋性环流偏大一倍, 反气旋性环流呈西北-东南走向, 印度洋 $5^{\circ}\text{N}\sim 15^{\circ}\text{S}$ 地区以及澳大利亚西北部都为较强的东风异常。这种不对称性在一定程度上与海温异常强度有关, 负 BWA 模态年海温异常幅度比正 BWA 模态年异常幅度强 (图略)。

图 10a (图 10b) 热带中西太平洋也有类似印度洋的气旋性环流 (反气旋性环流), 这是由于对应于印度洋正 (负) BWA 模态年, 热带中太平洋分别为正 (负) 海温异常。从超前、滞后海温分布可以看到 (图略), 夏季印度洋正 (负) BWA 模态年的上一年为 El Niño (La Niña) 发展年, 当年则为衰

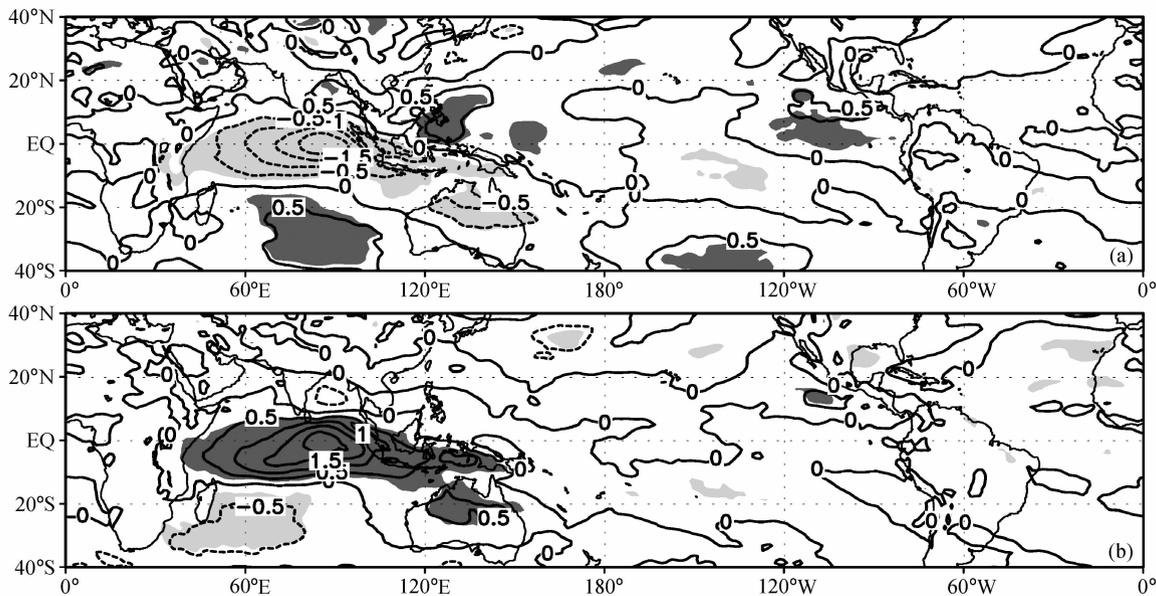


图 9 ESdP 试验 (a) 正、(b) 负偶极子年份夏季平均纬向风距平分布 (单位: m/s)。深、浅阴影: 西、东风距平达到 0.05 显著性水平
 Fig. 9 Composite 850-hPa zonal wind anomalies (m/s) in ESdP (experiment of SINTEX-F decoupled over the tropical Indian Ocean) during (a) positive and (b) negative dipole summers. Dark (light) shading indicates westerly anomaly (easterly anomaly) at the 0.05 significance level for *t*-test

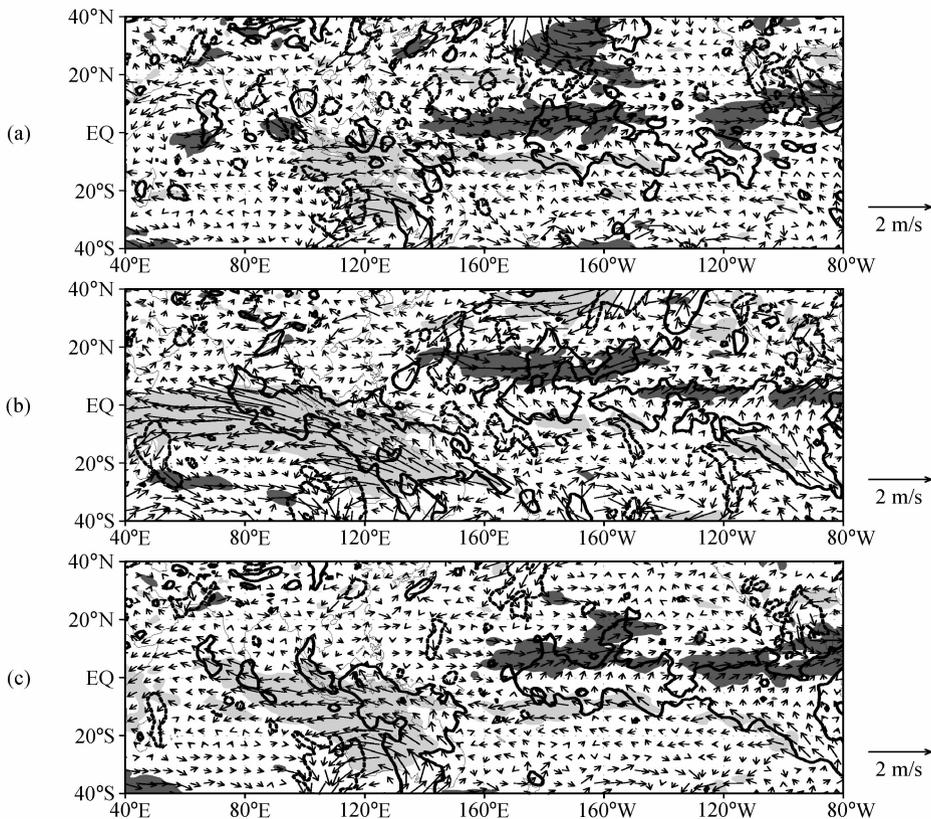


图 10 CTL 试验 (a) 正、(b) 负 BWA 年份与 ESdI 试验平均 850 hPa 流场差值; (c) CTL 试验正、负 BWA 年份与 ESdI 试验平均 850 hPa 流场差值。说明同图 2c

Fig. 10 Composite summer 850-hPa wind differences between CTL during (a) positive BWA years, (b) negative BWA years and ESdI; (c) composite 850-hPa wind difference between CTL during positive and negative BWA years and ESdI. Illumination is the same as Fig. 2c

减年。比较发现,热带中太平洋气旋性环流(图 10a)比反气旋性环流(图 10b)强。这主要由于热带中太平洋海温正异常幅度比负异常幅度高(图略)。另外,热带中太平洋海温气候背景比较低,大气对海温正异常的响应更明显。可见,大气对海温正、负异常响应的不对称性在印度洋与中太平洋是不同的。因此,CTL 试验 BWA 模态正、负异常年份与 ESdI 试验平均 850 hPa 风矢量差值(图 10c)表现为:印度洋为反气旋性环流,热带中太平洋为气旋性环流。这种变化趋势与多年平均情况(图 2c)类似。

综上所述,不论是印度洋正和负偶极子模态对大气影响的不对称性(图 7),还是正、负 BWA 模态影响的不对称性(图 10c),都与印度洋海气相互作用对大气总体气候效应(图 2c)一致,那么它们各自的贡献到底多大?下面进一步量化分析。

5 定量分析

为了定量地分析印度洋海气相互作用不同年际变化模态对气候平均态的相对贡献,需要定义三个指数分别表征印度洋海气相互作用对印度洋和太平洋大气环流的影响。考虑到 u 分量变化显著区较明显(见图 2c),将用 u 分量变化各显著区平均值及其变化符号来组成指数。具体地,印度洋指数(I_1)定义为:

$$I_1 = -u_1, \quad (1)$$

太平洋近赤道指数(I_{P1})定义为:

$$I_{P1} = u_2, \quad (2)$$

太平洋赤道外指数(I_{P2})定义为:

$$I_{P2} = u_3, \quad (3)$$

其中, u_i 是第 i ($i=1, 2, 3$) 区域(图 11 长方形框)平均纬向风变化值。

这里综合考虑影响强度(即年平均指数)及年数来计算不同模态的贡献百分比。以正偶极子年份为例,首先计算 CTL 与 ESdI 试验结果 50 年平均纬向风差值场,再根据公式(1)、(2)、(3)计算印度洋气候平均指数、近赤道太平洋气候平均指数和赤道外太平洋气候平均指数(分别记为 I_{1c} 、 I_{P1c} 和 I_{P2c})。类似地,计算 CTL 中 9 个正偶极子年与 ESdI 试验年平均纬向风差值场,根据公式(1)~(3)计算三个区域正偶极子年平均指数(记为 I_{1D} 、 I_{P1D} 和 I_{P2D})。最后,根据以下公式:

$$P_{IO,D} = [(9 \times I_{1D}) / (50 \times I_{1c})] \times 100\%, \quad (4)$$

$$P_{Pa1,D} = [(9 \times I_{P1D}) / (50 \times I_{P1c})] \times 100\%, \quad (5)$$

$$P_{Pa2,D} = [(9 \times I_{P2D}) / (50 \times I_{P2c})] \times 100\%, \quad (6)$$

计算 9 个正偶极子年对印度洋大气环流气候平均态的贡献百分比($P_{IO,D}$)以及对太平洋大气环流气候平均态的贡献百分比($P_{Pa1,D}$ 、 $P_{Pa2,D}$)。

类似以上步骤可计算其它模态年份的贡献百分比。从贡献百分比曲线(图 12)可以看出,正、负偶极子模态年际变化不对称性(Dip+-)对印度洋大气环流气候态的贡献约占 27%,对太平洋大气环流气候态的贡献约占 40%;正、负 BWA 模态年际变化不对称性(Bas+-)对印度洋大气环流气候态的贡献占 49%,对太平洋近赤道和赤道外大气环流气候态的贡献各占 36%和 16%。也就是说,印度洋海气相互作用年际变化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)对印度洋和太平洋近赤道地区大气环流气候态的影响占了 76%,对太平洋赤道外地区大气环流气候态的影响占了 56%。可见,印

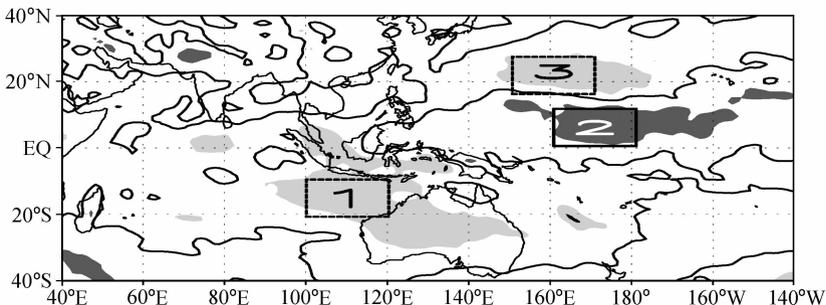


图 11 CTL 与 ESdI 试验夏季 850 hPa 纬向风差值(等值线,单位: m/s)及指数计算区域(长方形框)。深、浅阴影:正、负差值达到 0.05 显著性水平

Fig. 11 Composite summer 850-hPa zonal wind (m/s) difference between CTL and ESdI (contour) and calculation areas of indexes (rectangle boxes). Dark (light) shading indicates positive (negative) at the 0.05 significance level for t -test

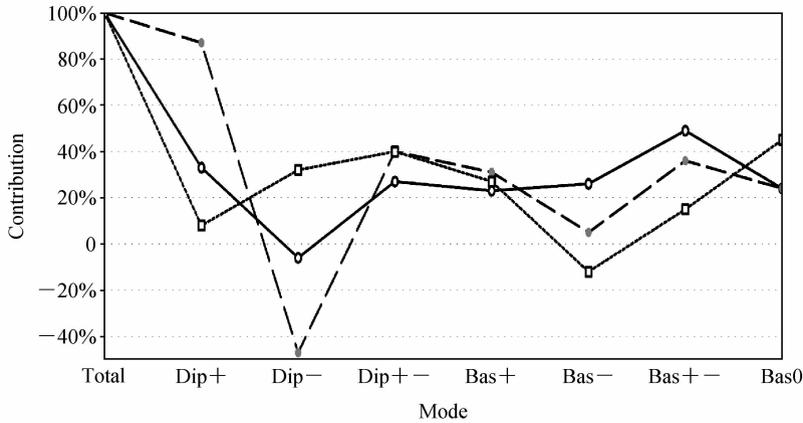


图 12 印度洋海气相互作用不同年际变化模式对印度洋(实线)、太平洋近赤道(长虚线)、太平洋赤道外(短虚线)大气环流气候态的贡献百分比。横坐标: Total: 所有年份 50 年; Dip+: 正偶极子; Dip-: 负偶极子; Dip+-: 正和负偶极子; Bas+: 正 BWA 模式; Bas-: 负 BWA 模式; Bas+-: 正和负 BWA 模式; Bas0: 正常年

Fig. 12 Air-sea interaction contribution percent for different Indian Ocean interannual modes to the climatological mean state of atmospheric circulation over the Indian Ocean (solid line), the near-equatorial Pacific (long dashed line), and the off-equatorial Pacific (short dashed line). 'Total': total 50 years, 'Dip+' : positive dipole mode, 'Dip-' : negative dipole mode, 'Dip+-' : positive dipole mode and negative dipole mode, 'Bas+' : positive basin-wide mode, 'Bas-' : negative basin-wide mode, 'Bas+-' : positive basin-wide mode and negative basin-wide mode, 'Bas0' : normal mode

度洋海气相互作用对大气环流气候态的影响绝大部分由年际变化不对称性造成。

进一步考虑, 上述年际变化不对称性不仅包含年际尺度海气相互作用, 也包含了季节内尺度海气相互作用。那么, 如何区分各种尺度海气相互作用, 各种尺度所占比例多少? 需要进一步分析研究。这里除了利用 CTL 和 ESdI 试验输出资料外, 还使用另一试验 ESdIa 的输出结果。由于 ESdIa 印度洋海温包含年循环和年际变化, 但没有季节内尺度变化, 因此, CTL 与 ESdIa 之间的差异反映了季节内尺度海气相互作用所起的作用, 而 ESdIa 与 ESdI 之间的差异则代表了年际尺度海气相互作用所起的作用。表 1 是上述三个关键区不同试验纬向风之差值及其相对于 CTL 与 ESdI 差值的百分比。由表 1 可见, 年际和季节内两种时间尺度海气相互作用对印度洋关键区大气环流平均态都有影响, 其中年际尺度作用较大(约 60%); 季节内尺度、年际尺度海气相互作用分别对太平洋近赤道区和太平洋赤道外地区大气环流平均态有重要影响, 而年际(季节内)尺度海气相互作用对太平洋近赤道区(太平洋赤道外区)大气环流平均态的贡献很小, 并且与热带印度洋整体作用相反。

表 2 是 (ESdIa-ESdI) 相对于 (CTL-ESdI) 的百分比, 代表年际尺度海气相互作用的贡献率。

表 1 三个关键区不同试验纬向风之差值(单位: m/s)及其相对于 CTL 与 ESdI 差值的百分比

Table 1 Zonal wind differences (m/s) between different experiments and the percents relative to the difference between CTL and ESdI over the three key regions

	印度洋区	太平洋近赤道区	太平洋赤道外区
CTL-ESdI	-0.31(100%)	0.27(100%)	-0.29(100%)
CTL-ESdIa	-0.13(40.4%)	0.29(110.1%)	0.05(-17.0%)
ESdIa-ESdI	-0.19(59.6%)	-0.03(-10.1%)	-0.33(117.0%)

表 2 年际尺度海气相互作用相对于 CTL 与 ESdI 差值的百分比

Table 2 Percents of air-sea interactions on interannual time scale relative to the difference between CTL and ESdI

	印度洋区	太平洋赤道外区
Dip+-	17.8	31.5
Bas+-	16.9	42.0
Dip+- + Bas+-	34.7	73.5

考虑到年际尺度海气相互作用对太平洋近赤道区大气环流平均态的贡献很小, 表 2 不列出该区域的百分比值。基于类似考虑, 由于季节内尺度海气相互作用对太平洋赤道外区大气环流平均态的贡献很小, 表 3 不列出太平洋赤道外区的百分比值。由表 2 可见, 印度洋年际尺度海气相互作用由于年际变

表 3 在印度洋海温不同模态下季节内尺度海气相互作用相对于 CTL 与 ESdI 差值的百分比

Table 3 Percents of air-sea interactions on intraseasonal time scale for different Indian Ocean SST anomaly modes relative to the difference between CTL and ESdI

	印度洋区	太平洋近赤道区
Dip+	26.7	130.4
Dip-	-17.4	-99.7
Dip+-	9.2	30.7
Bas+	35.6	156.1
Bas-	-3.2	-77.4
Bas+-	32.4	78.7
Bas0	-1.3	0.6

化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)对印度洋区和太平洋赤道外区大气环流气候态的影响分别占 34.7%和 73.5%。

年际尺度海气相互作用主要由于年际变化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)而对大气环流平均态产生影响,那么季节内尺度海气相互作用如何对大气环流气候态产生影响?表 3 说明季节内尺度海气相互作用对大气环流气候态的影响,同样存在年际变化以及年际变化不对称性。无论对印度洋区还是太平洋近赤道区大气环流, Dip+(Bas+)模态下的正贡献率明显比 Dip-(Bas-)模态下的负贡献率大。印度洋季节内尺度海气相互作用由于年际变化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)对印度洋区和太平洋近赤道区大气环流气候态的影响,分别达到印度洋海气相互作用整体效应的 42%和 109%。可见,类似年际尺度,印度洋季节内尺度海气相互作用主要由于年际变化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)而对大气环流平均态产生影响。

6 结论与讨论

(1) 热带印度洋海气相互作用不仅对印度洋局地大气环流产生影响,而且对太平洋地区大气环流存在遥相关作用。热带印度洋海气相互作用使赤道印度洋及以南地区产生明显的反气旋性变化,使澳大利亚冬季风加强。热带印度洋海气相互作用使热带中西太平洋赤道北部产生气旋性切变变化。

(2) 印度洋海气相互作用对大气环流气候态的

影响绝大部分由于大气对海气相互作用的响应存在年际变化正负距平不对称性造成,这种年际变化正负距平不对称性包括正偶极子与负偶极子的不对称、正 BWA 模与负 BWA 模的不对称。

印度洋正偶极子年份比负偶极子年份海温异常更强,因此,正偶极子年份对热带印度洋大气环流的影响强度更强。同时,与印度洋正偶极子相伴随的热带太平洋 El Niño 海温异常,比与印度洋负偶极子相伴随的热带太平洋 La Niña 强,这种不对称性使得正偶极子和负偶极子年平均,对热带印度洋和太平洋大气环流的影响趋势都类似正偶极子年份,也与印度洋海气相互作用对大气总体气候效应一致。值得一提的是,印度洋对太平洋大气环流的遥相关影响需要通过太平洋当地海气相互作用来实现。

热带印度洋 BWA 模态负异常年份对热带印度洋环流影响比 BWA 模态正异常年份强。与印度洋 BWA 模态正(负)异常年相伴随,热带中太平洋为正(负)海温异常,大气对热带中太平洋海温正异常的响应反而更明显。这些影响的不对称性特征造成 BWA 模态对热带印度洋大气环流总的影响趋势类似负 BWA 模态年,对热带太平洋大气环流总的影响趋势却类似正 BWA 模态年。正 BWA 模态和负 BWA 模态对大气影响的不对称性与印度洋海气相互作用对大气总体气候效应一致。

(3) 对不同地区大气环流的影响,印度洋海气相互作用的主要时间尺度有所不同。年际和季节内两种时间尺度海气相互作用对印度洋关键区大气环流平均态都有影响,约各占 60%、40%;季节内尺度海气相互作用对太平洋近赤道区大气环流平均态有重要影响;年际尺度海气相互作用对太平洋赤道外地区大气环流平均态有重要影响。年际(季节内)尺度海气相互作用对太平洋近赤道区(太平洋赤道外区)大气环流平均态的贡献很小。

热带印度洋年际尺度、季节内尺度海气相互作用对大气环流气候态的影响,都存在年际变化以及年际变化不对称性。这两种尺度海气相互作用主要通过年际变化不对称性(包括偶极子模态和 BWA 模态)而对大气环流平均态产生影响。

需要指出的是,从年际变化的角度来看,模式控制试验模拟的赤道东南印度洋海表温度异常比观测分析结果强,有可能引起风场出现误差。因此,

本文得到的关于印度洋海气相互作用对热带夏季大气环流气候态的影响效果, 到底对模式有多大的依赖性, 需要进一步的研究。

参考文献 (References)

Anderson D L T, McCreary J P Jr. 1985. On the role of the Indian Ocean in a coupled ocean-atmosphere model of El Niño and the Southern Oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 42 (22), 2439–2442.

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.

蔡怡, 李海, 张人禾. 2008. 热带印度洋海温异常与 ENSO 关系的进一步研究 [J]. *气象学报*, 66 (1): 120–124. Cai Yi, Li Hai, Zhang Renhe. 2008. A study on relationship between ENSO and tropical Indian Ocean temperature [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 66 (1): 120–124.

Chang C P, Li T. 2000. A theory for the tropical tropospheric biennial oscillation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 57: 2209–2224.

巢纪平, 巢清尘, 刘琳. 2005. 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件 [J]. *气象学报*, 63 (05): 594–602. Chao Jiping, Chao Qingchen, Liu Lin. 2005. The ENSO events in the tropical Pacific and dipole events in the Indian Ocean [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 63 (5): 594–602.

Clark C O, Webster P J, Cole J E, et al. 2003. Interdecadal variability of the relationship between the Indian Ocean zonal mode and East African coastal rainfall anomalies [J]. *J. Climate*, 16; 548–554.

杜振彩, 谭言科, 张人禾, 等. 2006. 热带印度洋海温异常单、偶极模态及其相互作用 [J]. *大气科学*, 30 (1): 11–24. Du Zhencai, Tan Yanke, Zhang Renhe, et al. 2006. Two modes of sea surface temperature anomalies in the tropical Indian Ocean; Monopole, dipole and their interactions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (1): 11–24.

Fu Xiuhua, Wang Bin, Li Tim, et al. 2003. Coupling between northward-propagating, intraseasonal oscillations and sea surface temperature in the Indian Ocean [J]. *J. Atmos. Sci.*, 60 (15): 1733–1753.

Gill A E. 1980. Some simple solutions for heat-induced tropical circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 447–462.

Goddard L, Graham N E. 1999. Importance of the India Ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa [J]. *J. Geophys. Res.*, 104: 19099–19116.

Gualdi S, Navarra A, Guilyardi E, et al. 2003. Assessment of the tropical Indo-Pacific climate in the SINTEX CGCM [J]. *Ann. Geophys.*, 46: 1–26.

Guan Z Y, Yamagata T. 2003. The unusual summer of 1994 in East Asia; IOD teleconnections [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (10): 1541–1544.

Guilyardi E, Delecluse P, Gualdi S, et al. 2003. Mechanisms for ENSO phase change in a coupled GCM [J]. *J. Climate*, 16; 1141–1158.

李崇银, 穆明权. 2001. 赤道印度洋海温偶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.

李东辉, 朱益民, 谭言科, 等. 2006. 热带印度洋春季海表温度异常与南海夏季风强度变化的关系 [J]. *气候与环境研究*, 11 (4): 514–524. Li Donghui, Zhu Yimin, Tan Yanke, et al. 2006. Relationships between spring ocean sea surface temperature anomalies in the tropical Indian Ocean and the strength of South China Sea summer monsoon [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (4): 514–524.

Li T, Tham C-W, Chang C-P. 2001a. A coupled air-sea-monsoon oscillator for the tropospheric biennial oscillation [J]. *J. Climate*, 14: 752–764.

Li T, Zhang Y S, Chang C-P, et al. 2001b. On the relationship between Indian Ocean SST and Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28: 2843–2846.

Li T, Zhang Y. 2002. Processes that determine the quasi-biennial and lower-frequency variability of the South Asian monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 80: 1149–1163.

Li T, Liu P, Fu X, et al. 2006. Tempo-spatial structures and mechanisms of the tropospheric biennial oscillation in the Indo-Pacific warm ocean regions [J]. *J. Climate*, 19 (13): 3070–3087.

刘娜, 周秋林, 管兆勇, 等. 2008. 北半球对流层气候异常对热带印度洋海温偶极子型振荡的响应及动力机制解释 [J]. *自然科学进展*, 18 (6): 668–673. Liu Na, Zhou Qiulin, Guan Zhaoyong, et al. 2008. Response of climatic anomaly at troposphere in Northern Hemisphere to the tropical Indian Ocean dipole and its dynamic mechanism [J]. *Advance in Natural Science* (in Chinese), 18 (6): 668–673.

Loschnigg J, Webster P J. 2000. A coupled ocean-atmosphere system of SST modulation for the Indian Ocean [J]. *J. Climate*, 13 (19): 3342–3360.

Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2003. South Pacific origin of the decadal ENSO-like variation as simulated by a coupled GCM [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30: 2250.

Luo J-J, Masson S, Roeckner E, et al. 2005a. Reducing climatology bias in an ocean-atmosphere CGCM with improved coupling physics [J]. *J. Climate*, 18, 2344–2360.

Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2005b. Seasonal climate predictability in a coupled OAGCM using a different approach for ensemble forecasts [J]. *J. Climate*, 18: 4474–4497.

Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2007. Experimental forecasts of the Indian Ocean dipole using a coupled OAGCM [J]. *J. Climate*, 20: 2178–2190.

Luo J-J, Masson S, Behera S, et al. 2008. Extended ENSO predic-

- tions using a fully coupled ocean-atmosphere model [J]. *J. climate*, 21: 84–93.
- Madec G, Delecluse P, Imbard M, et al. 1998. OPA 8.1 ocean general circulation model reference manual [R]. LODYC/ IPSL Tech. Rep. Note 11, Paris, France, 91pp.
- Matsuno T. 1966. Quasi-geostrophic motions in the equatorial area [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 44: 25–43.
- Roeckner E, Brokopf R, Esch M, et al. 1996. The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate [R]. Max-Planck-Institut für Meteorologie Rep. 218, 90pp.
- Saji N H, Goswami B N, Vinayachandran P N, et al. 1999. A dipole mode in the tropical Indian Ocean [J]. *Nature*, 401: 360–363.
- Saji N H, Yamagata T. 2003. Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean dipole mode events: COADS observations [J]. *J. Climate*, 16: 2735–2751.
- 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.
- Tozuka T, Luo J J, Masson S, et al. 2005. Annual ENSO simulated in a coupled ocean-atmosphere model [J]. *Dyn. Atmos. Oceans*, 39: 41–60.
- Valcke S, Terray L, Piacentini A. 2000. The OASIS coupler user guide version 2.4 [R]. CERFACE Tech. Rep. TR/CGMC/00-10, 85pp.
- Webster P J, Moore A M, Loschnigg J P, et al. 1999. Coupled ocean-atmosphere dynamics in the Indian Ocean during 1997–98 [J]. *Nature*, 401: 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 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 (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 22 (4): 470–480.
- Wu R, Kirtman B P. 2004a. Impacts of the Indian Ocean on the Indian summer monsoon – ENSO relationship [J]. *J. Climate*, 17 (15): 3037–3054.
- Wu R, Ben P K. 2004b. Understanding the impacts of the Indian Ocean on ENSO variability in a coupled GCM [J]. *J. Climate*, 17 (20): 4019–4031.
- 肖子牛, 晏红明. 2001. El Niño 位相期间印度洋海温异常对中国南部初夏降水及初夏亚洲季风影响的数值模拟研究 [J]. *大气科学*, 25 (2): 173–183. Xiao Ziniu, Yan Hongming. 2001. A numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on the early summer precipitation of the southern China during an El Niño year [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (2): 173–183.
- Yamagata T, Behera S K, Luo J-J, et al. 2004. Coupled ocean-atmosphere variability in the tropical Indian Ocean [M]//Wang C, Xie S-P, Carton J A, Eds. *Earth's Climate: The Ocean-Atmosphere Interaction*, Geophys. Monogr. Vol. 147, AGU, Washington D. C., 189–212.
- 晏红明, 肖子牛. 2000. 印度洋海温异常对亚洲季风区天气气候影响的数值模拟研究 [J]. *热带气象学报*, 16 (1): 18–27. Yan Hongming, Xiao Ziniu. 2000. The numerical simulation of the Indian Ocean SSTA influence on climatic variations over Asia monsoon region [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 26 (1): 18–27.
- 晏红明, 李崇银. 2007. 赤道印度洋纬向海温梯度模及其气候影响 [J]. *大气科学*, 31 (1): 64–76. Yan Hongming, Li Chongyin. 2007. A study of the sea surface temperature zonal gradient mode in the equatorial Indian Ocean and its influence on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 64–76.
- 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.
- Yu J Y, Weng S P, Farrara J D. 2003. Ocean roles in the TBO transitions of the Indian-Australian monsoon system [J]. *J. Climate*, 16 (18): 3072–3080.
- 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. 2008. 1976/1977 年前后热带印度洋海表温度年际异常的变化 [J]. *大气科学*, 32 (2): 371–379. Zhao Shanshan, Zhou Tianjun, Yang Xiunqun, et al. 2008. Interannual variation of the tropical Indian Ocean sea surface temperature pre- and post-1976/1977 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 371–379.