

赤道印度洋—太平洋地区海气系统的 齿轮式耦合和 ENSO 事件

II. 数值模拟*

孟文

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

吴国雄

(中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

摘 要 首先应用 IAP/LASG GOALS 气候模式的多年积分的结果, 对赤道中西太平洋和印度洋的 SST 和纬向风场进行分析, 发现在模式中也同样存在与观测资料分析结果相似的“印太齿轮式耦合”。基于此, 设计了赤道太平洋和印度洋海域纬向风应力异常的 4 组敏感性试验, 去研究太平洋和印度洋海气相互作用的联系。结果表明, 在太平洋或印度洋上的大气异常信号通过印-太齿轮组合 (GIP) 作为桥梁 (atmospheric bridge), 影响到另一地的海气相互作用, 从而将太平洋上的 ENSO 类年际变率信号与印度洋环流和亚洲季风纬向分量的变化联系起来。

关键词: 敏感性试验; 纬向风应力; 海面温度

1 引言

在第一部分的资料分析^[1]中, 我们利用观测资料对印度洋、太平洋的海气相互作用的特征进行了诊断。发现印度洋和太平洋两地的 SST 及纬向风场存在着显著的相关性。这种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。这两个异常的纬向环流圈之间的耦合形式看起来很象是存在于赤道印度洋和太平洋上空的一对齿轮 (简称为 GIP): 当赤道太平洋上空的异常 Walker 环流作顺时向变化时, 沿赤道印度洋上空的异常的纬向季风环流则作反时向变化, 并将此定义为 GIP 的正方向; 当异常的 Walker 环流反时向变化时, 异常的纬向季风环流则作顺时向变化, 并将此定义为 GIP 的反方向。我们还证明了 ENSO 事件与 GIP 的年际异常存在很好的对应关系: 暖事件时异常 GIP 为反向运转; 冷事件时异常 GIP 为正向运转; 异常的 GIP 的啮合点位于印度尼西亚群岛附近。

本文将从海气耦合模式的数值模拟出发, 分析观测中印度洋、太平洋海气系统中的齿轮组合是否存在于海气耦合的模式中, 并检验其表现形式。进而通过一系列敏感性试

验对印太齿轮组合连接印度洋、太平洋两地的海气相互作用的机制进行研究。第 2 节对模式进行简要的介绍。第 3 节分析印-太齿轮在海气模式中的表现形式。第 4 节进行一系列的敏感试验,以进一步检验太平洋的异常或印度洋的异常对另一地的海气相互作用的影响。若干结论和讨论在第 5 节给出。

2 模式简介

采用 IAP/LASG GOALS 气候模式^[2]进行数值试验。这一模式的大气部分为纬向 15 波菱形截断,垂直方向为 9 层的大气环流谱模式,包括有辐射、扩散、干-湿对流调整的参数化方案,及动量、潜热和感热相互作用的下垫面过程。海洋部分为水平分辨率 $4^\circ \times 5^\circ$,垂直 20 层的海洋环流格点模式。采用月异常通量耦合方案^[3,4],对这一模式进行了 40 年的控制积分。对模式模拟的气候平均态、季节循环和年际变率的分析表明,这一模式能模拟出较为合理的热带太平洋和印度洋大气和海洋环流的基本特征^[5]。

3 海气耦合模式中的 GIP

图 1 显示出模式模拟的第 21~30 模式年的沿赤道平均 ($2.5^\circ\text{S} \sim 2.5^\circ\text{N}$) 的印度洋地区 ($40 \sim 100^\circ\text{E}$, 虚线) 及中东太平洋地区 ($180 \sim 90^\circ\text{W}$, 实线) 在 850 hPa 层上纬向风分量的年际变化,可以看到,太平洋与印度洋上纬向风场的年际变化呈现出相反的变化趋势,相关系数到达了 -0.23, 高于 95% 的检验信度 (0.187), 这种相关性是与观测一致的^[1]。

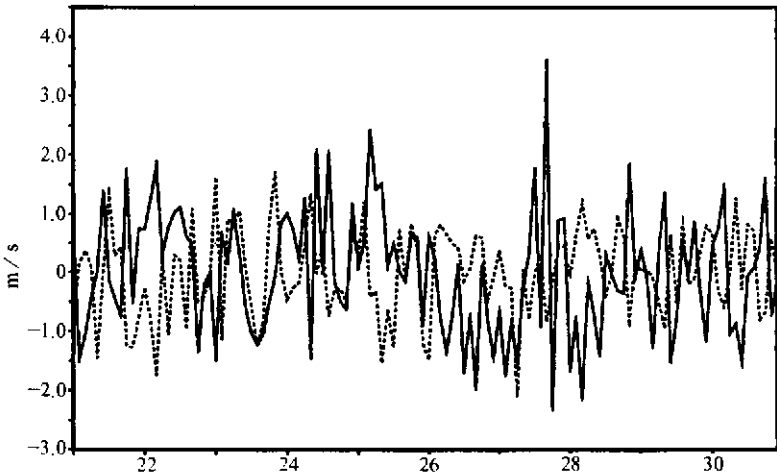


图 1 模拟的沿赤道带 ($2.5^\circ\text{S} \sim 2.5^\circ\text{N}$) 印度洋 ($40 \sim 100^\circ\text{E}$, 虚线) 及中东太平洋 ($180 \sim 90^\circ\text{W}$, 实线) 上空 850 hPa 高度处, 纬向风对其气候月平均偏差的时间演变 (单位: m s^{-1})

我们对模式后 30 年的月平均 SST 进行了 EOF 分析, 提取出表现为 ENSO 模态的第一特征分量 (图 2)。然后, 将其与同期的 200 hPa、850 hPa 的纬向风等变量求线性

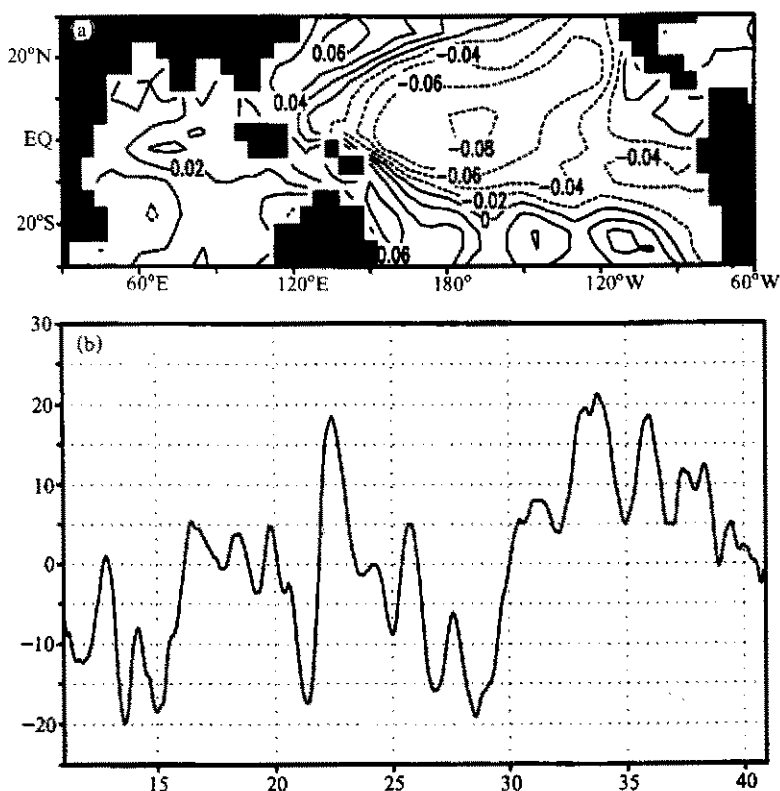


图2 利用月平均标准化 SST 资料进行 EOF 分析得到的第一特征向量
(a) 空间型; (b) 时间特征向量

回归分析, 可得到与 ENSO 型相关的各物理量场 (图 3a、b、c)。在 EOF 分析的第一主分量中, 当中东太平洋上为正 SST 异常时, 西太平洋和中东印度洋上为负 SST 异常, 在西印度洋靠非洲沿岸是与东太平洋一致的正 SST 异常, 这一模态显示的是一个太平洋暖位相的模式; 冷位相模态则与之相反。对应于太平洋上的暖位相, 各个物理量的相关场特征与观测非常相似的是: Ψ 场上为以赤道反对称的特征 (图 3a); χ 和 u 场上都具有以赤道为准对称的特征 (图 3b、c)。在赤道中东太平洋的正 SST 上空, 沿赤道南北两侧, Ψ 场在 850 hPa 上有一对气旋对, 200 hPa 上为一对反气旋对 (图 3a); 而印度洋上的形势与之相反。模式中的中东太平洋上的 SST 异常比观测偏西, 850 hPa 上的气旋对也比观测偏西。与观测不同的是: 在 150°W 以东, 高层还有一对气旋对。在 850 hPa 上, 沿赤道地区印度洋为西风异常, 中西太平洋为东风异常; 在 200 hPa 上与之相反, 印度洋为西风异常, 中西太平洋为东风异常, 呈现出与观测中类似的印—太齿轮组合, 其啮合点比观测偏西。注意到, 在东太平洋上正 SST 异常上方的 850 hPa 上, 有明显的纬向风场的辐合异常; 负的 SST 异常上方有纬向风场的辐散异常 (图 3b、c)。由于异常风场的辐合 (辐散), 使上翻流减弱 (加强), 因而有正 (负) SST 异常对应。可见, 耦合模式明显地重现了这一海气耦合的正反馈过程。

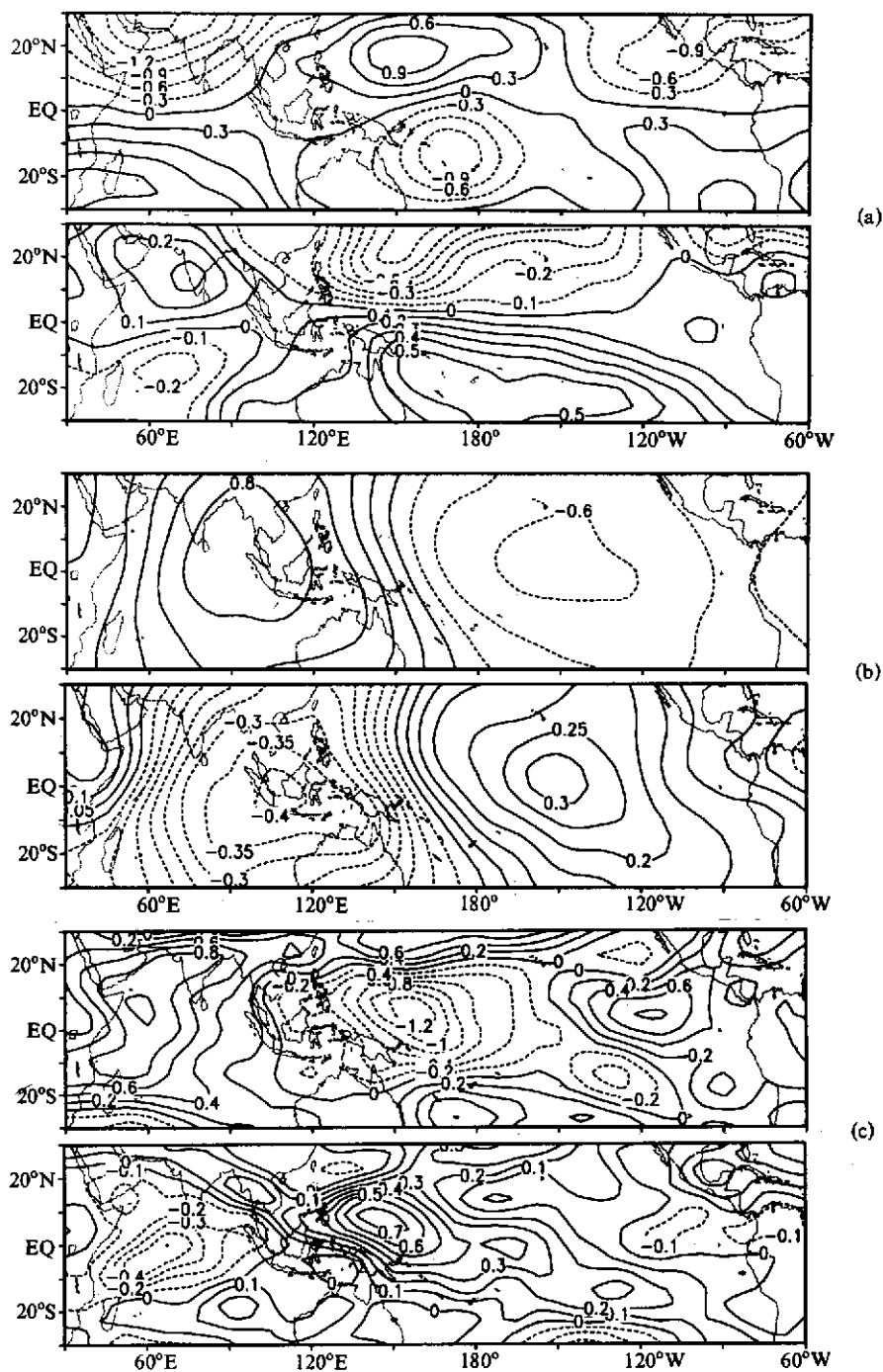


图 3 表征 ENSO 事件的时间特征向量与 200 hPa (上图) 和

850 hPa (下图) 气象要素的回归场分布

(a) 流函数场 ψ (单位: $10^6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$); (b) 速度位势场 χ (单位: $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$);

(c) 纬向风速 u (单位: m s^{-1})

上述分析表明, 在我们的海气耦合的模式中, 同样存在印—太齿轮式组合, 只不过啮合点比观测偏西, 这与耦合模式中的 ENSO 类的太平洋 SST 异常比观测偏西是相对应的。

4 有关 GIP 的敏感性试验

首先在海气耦合的模式背景试验 (control run) 中寻找联系印度洋和太平洋海气相互作用中印—太齿轮耦合的过程。由于在模式背景试验中, 热带的年际变率较弱, 我们将用暖事件和冷事件之差来增强异常的信号。选取的一个暖事件为背景试验的第 28 年, 冷事件为第 27 年 (详细分析参见文献[5])。图 4a、b、c 分别为沿赤道印度洋到太平洋上暖事件减去冷事件的海表纬向流和海洋上层 25 m 处的减弱的上翻流 (以阴影表示), 以及 SST、850 hPa 上的纬向风差异的分布。可以看到, 从 1 月份开始, 赤道东太平洋上的表层海流有向东的异常 (图 4a), 海流上翻减弱使暖 SST 异常发展 (图 4b)。这一暖 SST 异常上方 850 hPa 上大气辐合加强, SST 异常的东侧为东风异常, 西侧为西风异常 (图 4c)。暖 SST 异常的中心在 5、6 月, 而西风异常的中心在 4、5 月, 比 SST 异常的中心早近一个月。太平洋上的暖 SST 和西风异常都有着由东向西的传播。同时也看到, 印度洋上有西风异常向东传播, 使西太平洋的西风异常加强。从 5 月份开始出现一个明显的印—太齿轮反转组合: 中西太平洋上为西风异常, 印度洋上为东风异常。印度洋上的东风异常, 引起向西的表面海流异常, 中西部的上翻减弱, SST

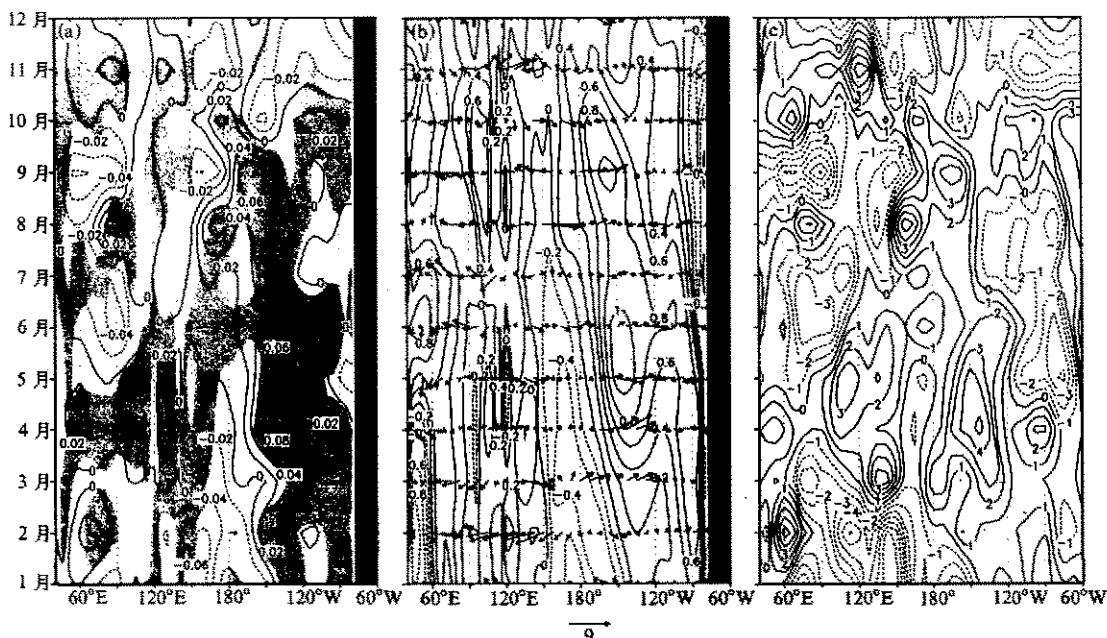


图 4 沿赤道地区的一个暖事件和一个冷事件之间的差异场分布

(a) 表层纬向海流 (等值线表示, 单位: m s^{-1}) 和上层 25 m 处减弱的上翻流 (阴影区表示);

(b) SST (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 850 hPa 风场; (c) 850 hPa 纬向风场 (单位: m s^{-1})

变暖，在 6 月份 SST 异常最大达 0.8℃。

从这一差异分析中看到，在太平洋上向东的表面海流异常和减弱的上翻流，在中东太平洋上产生暖的 SST 异常。在其上方的低层大气辐合加强，在中西太平洋上呈现西风异常，通过反转的印-太齿轮组合，在印度洋上形成东风异常，影响到印度洋的环流变化，反之亦然。可见，太平洋上的异常信号会通过局地的海气相互作用，将异常信号反映到大气环流中，通过印-太齿轮影响印度洋的海气相互作用。在下面的一节中，我们将采用海气耦合模式进行一系列的敏感试验，以进一步检验太平洋的异常或印度洋的异常对另一地的海气相互作用的影响。

4.1 试验设计

从观测和模拟的资料分析都表明了 GIP 的存在。为了检验两个海域的海气相互作用是否能通过 GIP 的转动联系起来，我们在本节中，首先人为地改变其中一只“齿轮”的转动方向，然后检验另一只“齿轮”的变化情况。为了达到此目的，我们将分别沿赤道印度洋和太平洋加入向东和向西的异常的风应力，从同一时刻的第 27 年 1 月 1 日起积分模式，然后研究这两地的海气相互作用的关联。我们设计了以下的试验：

试验 1——印度洋东风应力场试验

在赤道印度洋（6°N~6°S，60°E~120°E）上，风应力场中加入东风应力异常，异常强度为 $-14\times10^{-3}\text{ N/m}^2$ ，这一强度与模式的控制试验中年际异常的强度相当，在各个网格点上均匀分布，持续的时间为一年，而后去掉异常强迫，继续积分模式一年，共积分 24 个月。

试验 2——印度洋西风应力场试验

试验设计与试验 1 类似，但在赤道印度洋（6°N~6°S，60°E~120°E）上加入的异常强迫为西风应力异常。

试验 3——太平洋西风应力场试验

试验设计与试验 1 类似，但将西风应力异常的强迫加在赤道太平洋（6°N~6°S，130°E~90°W）上。

试验 4——太平洋东风应力场试验

试验设计与试验 3 类似，但在赤道太平洋上（6°N~6°S，130°E~90°W）上加入的异常强迫为东风应力异常。

以上试验设计归纳于表 1。然后，把各个异常试验的结果分别减去未经扰动的背景试验（control run）的结果，以揭示其影响状况。

表 1 试验设计方案

试验	范围	异常强迫	积分时间
试验 1	6°N~6°S, 60°E~120°E	东风异常	24 个月
试验 2	6°N~6°S, 60°E~120°E	西风异常	24 个月
试验 3	6°N~6°S, 130°E~90°W	西风异常	24 个月
试验 4	6°N~6°S, 130°E~90°W	东风异常	24 个月

4.2 赤道印度洋纬向风应力强迫对赤道太平洋海温的影响

4.2.1 试验 1——印度洋东风应力异常

在赤道印度洋的风应力场中加入东风异常后，会产生向西的表面海流异常，中东印

度洋的上层海流上翻增强 (图 5a), 从而引起中东印度洋负 SST 异常的发展 (图 5b), 在其东侧产生东风异常, 西太平洋上为西风异常 (图 5c)。西太平洋和印度洋上的这种纬向风异常, 由西向东传播。其分界点在当年的 7 月份移到了 150°E 以东, 使中太平洋上西风异常进一步加强; 与之相对应产生正的 SST 异常 (图 5b)。在此期间中西太平洋上西风异常, 对应着西太平洋和印度洋上的东风异常, 显示出了“印-太齿轮”的反转组合状态。在第二年后, 印度洋的风应力异常强迫已去掉, 印-太海气耦合系统进入自然耦合相互作用的状态。与低空异常西风相对应, 太平洋上的 SST 异常在第二年得到了充分的发展, 正 SST 异常由东向西移动, 低层大气的纬向风场也有西风异常向西传, 在第二年夏天, 移到了 130°E 以西。这时中东太平洋出现东风异常, 与之相对应有 SST 负异常的发展, 东太平洋上的一次“暖事件”结束。

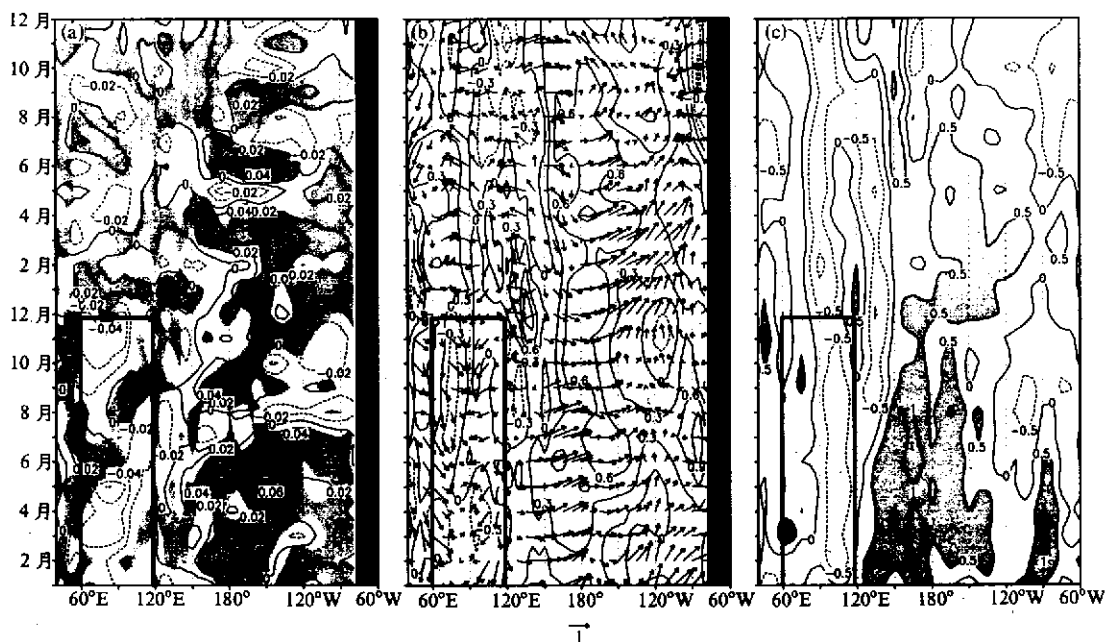


图 5 试验 1 和背景试验的差异分布 (图中黑框为加入异常风场的区域和时段)

- (a) 表层纬向海流 (等值线表示, 单位: m s^{-1}) 和上层 25 m 处减弱的上翻流 (阴影区表示) 的差异;
(b) SST (单位: $^{\circ}\text{C}$) 和 850 hPa 风场的差异; (c) 850 hPa 纬向风场差异 (单位: m s^{-1})

4.2.2 试验 2——印度洋西风应力异常

在赤道印度洋的风应力场上加入西风应力异常, 产生向东的表面海流异常, 印度洋东部上翻减弱 (图 6a), 但这时 SST 异常为负, 表明通量交换对海表温度异常有重要贡献。在其上方有异常的辐散风场, 东部为西风异常, 西部为东风异常 (图 6b)。赤道中东太平洋上, 从第一年 2 月份开始, 东风逐渐加强, 并向西移动, 在 10 月份达到最大, 中心位置在 160°E (图 6c)。在此期间太平洋上为负的 SST 异常。最大中心出现在第一年的 11 月份 (图 6b), 比纬向风场的中心迟一个月, 位置也偏东。东印度洋上的西风异常与中西太平洋上的东风异常构成出一个正转的印-太齿轮组合 (图 6c)。在第

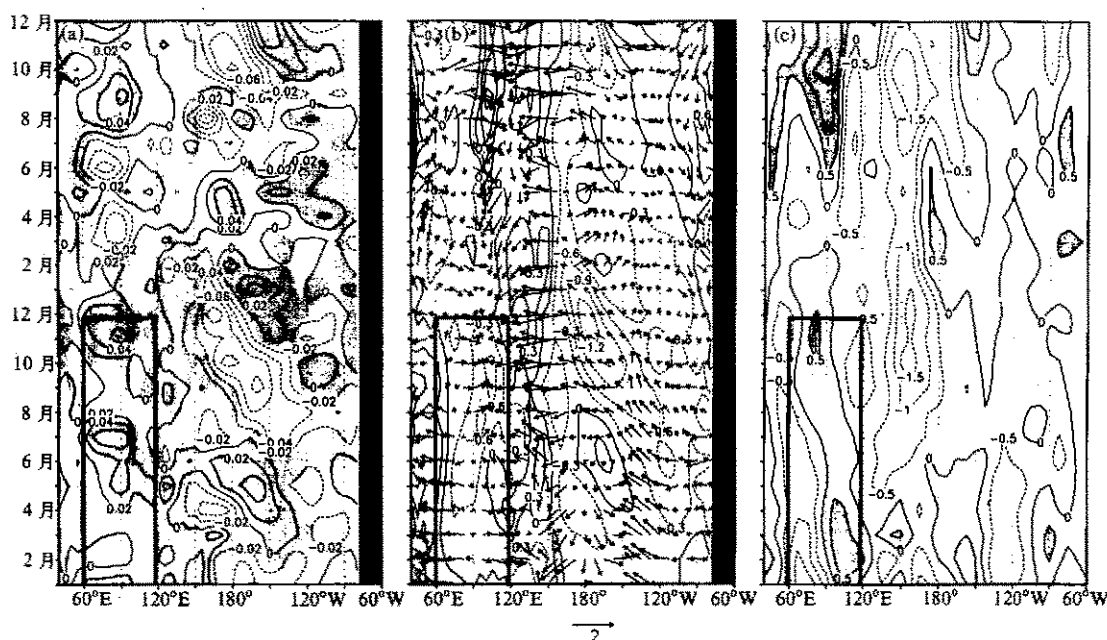


图 6 试验 2 和背景试验的差异分布, 其余同图 5

二年, 风应力场的异常强迫去掉后, 印度洋、太平洋海气系统进入自然耦合状态, 这种正转的齿轮组合的形式仍然存在。但随着异常 SST 和 850 hPa 纬向风异常的西移, 在东太平洋出现西风 and SST 正异常。到了第二年春天, 中东太平洋上的一次“冷事件”已基本结束。

上述两试验表明, 赤道印度洋上的纬向风应力异常, 可以影响局地的海气相互作用, 然后通过“印-太齿轮”这一大气过程, 快速地影响赤道太平洋地区的纬向风和海温异常。

4.3 赤道太平洋纬向应力强迫对赤道印度洋 SST 的影响

4.3.1 试验 3——太平洋西风应力异常

在赤道太平洋的风应力场上加入西风异常, 产生了向东的表面海流异常, 使东太平洋上的上翻流减弱 (图 7a), 出现正 SST 异常。这一 SST 异常的位置在中太平洋国际日期变更线附近, 在 11 月份到达了最强, 达到 3.5°C 以上 (图 7b)。正 SST 的发展, 使其上方的大气辐合加强, 在其西侧的中西太平洋上有西风异常, 东侧有东风异常, 在 120°E 以西到 80°E 的东印度洋上都为东风异常 (图 7c)。第二年, 去掉太平洋上的风应力异常强迫, 太平洋上的 SST 异常的变化逐渐趋于平缓。而从纬向风场的变化上看, 从积分一开始, 中西太平洋上为西风异常, 在印度洋上为东风异常, 形成了印-太齿轮组合反转的状态 (图 7c)。与这一组合对应, 在赤道中东太平洋上有 SST 的正异常, 西太平洋有负 SST 异常, 而印度洋上为正 SST 异常。

4.3.2 试验 4——太平洋东风应力异常

与上一组试验相反, 在赤道太平洋的同样区域的风应力场上加入与上组试验中西风

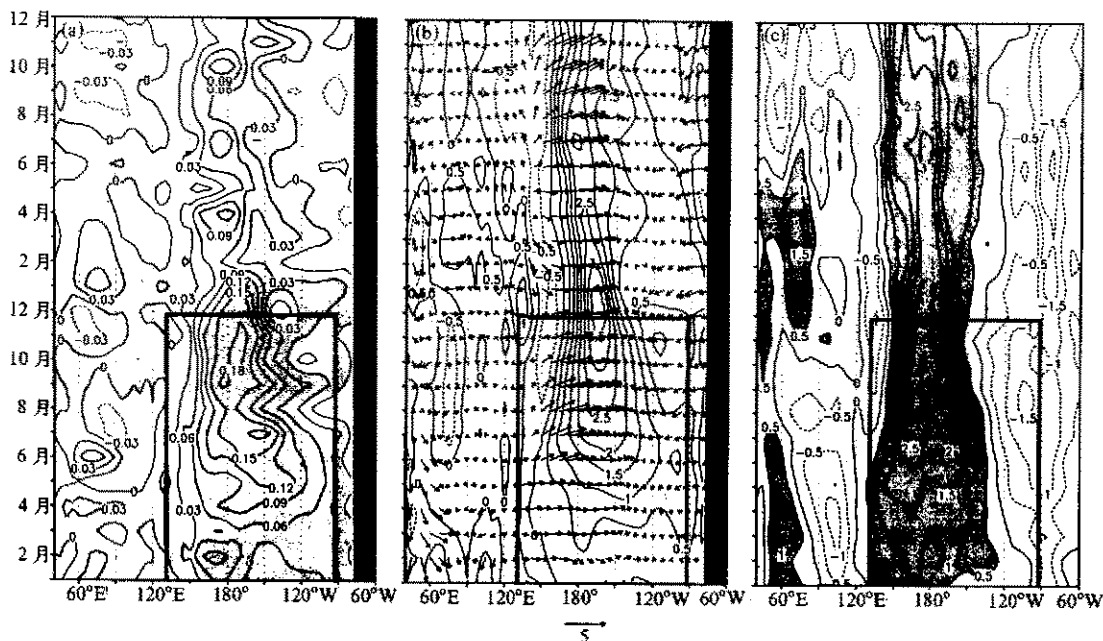


图7 试验3和背景试验的差异分布, 其余同图5

应力同样大小的东风应力。东风异常使表面海流呈现向西的异常, 中东太平洋的上翻加强 (图 8a), 有负的 SST 异常产生, 其中心在第一年的 11 月, 最大为 -2.5°C (图 8b)。负 SST 异常, 使其上方的大气低层纬向风场辐散加强, 在 SST 异常的东侧为西风异常, 西侧为东风异常 (图 8c), 充分地体现了太平洋上风应力与 SST 的这种正反馈过程。

第二年去掉异常强迫, 印度洋、太平洋海气系统进入自由耦合的阶段。从第一年 11 月份开始, 赤道印度洋上低层有西风异常出现, 与中、西太平洋的东风异常对应 (图 8c), 呈现出一个正转的印-太齿轮组合。赤道印度洋上的西风异常, 使表层的海流为向东的异常 (图 8a), 因而西印度洋上有负的 SST 异常产生, 正 SST 异常出现在印度洋中东部 (图 8b)。

这两个试验的结果表明, 沿赤道太平洋的纬向风应力异常, 通过太平洋局地的海气相互作用, 使大气纬向环流发生变化, 带动印-太齿轮的正转或反转。从而使赤道印度洋的纬向风场发生变化, 进而影响印度洋的海气相互作用, 导致印度洋地区发生 SST 异常。

从以上 4 个试验的结果来看, 在赤道太平洋和印度洋上的风应力场上分别引入一个异常强迫, 通过局地的海气相互作用, 影响到海洋环流的变化, 再反馈到大气环流的变化中, 通过印-太齿轮组合的变动, 最终影响到另一地的海洋和大气的变化。但注意到, 同样强度的强迫加到印度洋和太平洋的风应力场中, 太平洋的局地变化更为敏感些。这是因为在赤道太平洋上以风生洋流为主, SST 与风应力的正反馈作用表现得更为明显。在印度洋上, 大气风应力对海洋环流的这种影响在模式中也有反映, 但不如太

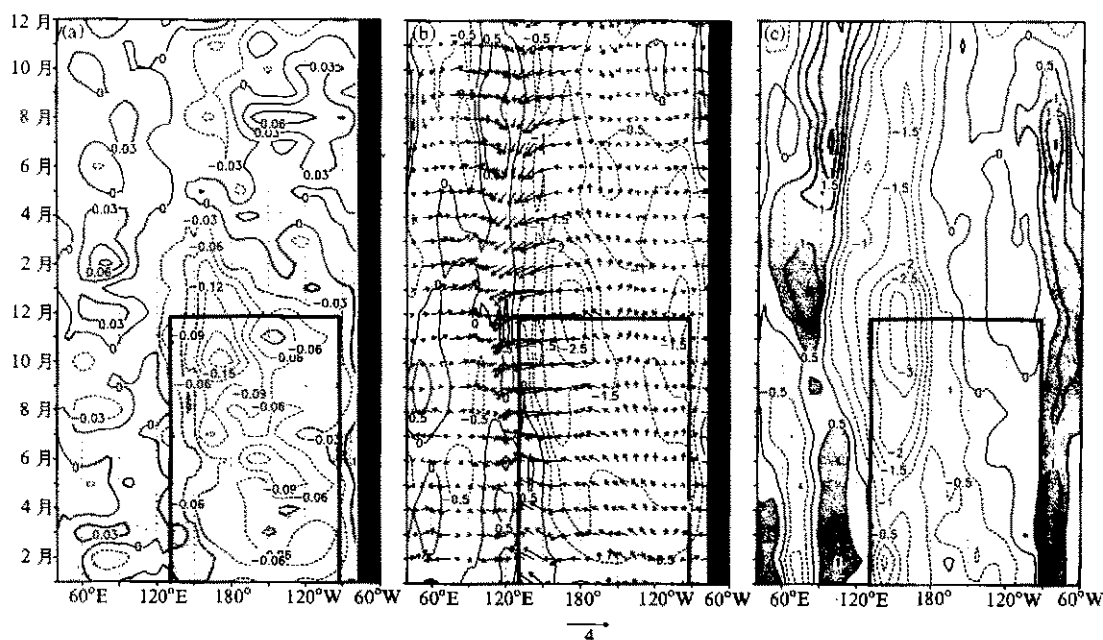


图8 试验4和背景试验的差异分布, 其余同图5

洋明显。关于印度洋海气相互作用的机制, 由于观测资料的缺乏等原因, 目前尚未有肯定的结论。Goswami^[6]采用简单海气耦合模式对印度洋的年际变化的机制进行了研究, 认为印度洋上蒸发与风场的反馈作用 (EWF) 对其海气相互作用起着很重要的作用。Latif^[7]和 Lau^[8]也认为印度洋上热通量的作用很重要。在我们的模式中, 也看到了风应力在印度洋上并不是起着绝对的主导地位。印度洋的海气相互作用中风应力场与热通量的作用哪一个更大, 需要进行更多的观测资料的分析和模式研究。

5 讨论与结论

通过对海气耦合模式控制试验的结果的分析, 发现观测中的印-太齿轮组合也存在于海气耦合的模式中, 赤道印度洋上的东风异常与中东太平洋的西风异常相对应; 赤道印度洋上的西风异常与中东太平洋上的东风异常相对应。但与观测不同的是在模式中东太平洋上 150°W 以东的纬向风异常与其以西的异常反号。这可能与模式的水平分辨率太低, 不能表述东传的 Kelvin 波有关系。

通过分别在印度洋和太平洋的纬向风应力场中加入异常扰动的一系列试验, 来研究这两地的海气相互作用的联系。印度洋 (太平洋) 上的风应力异常, 引起其海洋环流的变化, 反馈到大气环流中, 通过印-太齿轮的耦合, 使太平洋 (印度洋) 的纬向风场变化, 最终影响到太平洋 (印度洋) 的 SST 的变化。结果表明: 在印度洋或太平洋上的异常信号由局地的海气相互作用传入大气环流中, 通过印-太齿轮组合作为桥梁 (atmospheric bridge), 能影响另一地的海气相互作用。在模式中, 清楚地表现出这样一种海气耦合的正反馈的过程, 暖 SST 引起其上方的大气低层风场辐合, 西侧为西风异

常, 东侧为东风异常, 而西风异常又进一步加强 SST 暖异常的发展; 冷 SST 异常的发展则与之相反, 在太平洋上表现尤为明显。

因此, 印-太齿轮组合并不是孤立的大气环流中的异常现象, 它是与赤道印度洋、太平洋的海气相互作用密切相关的。正是通过局地的海气相互作用和印-太齿轮组合的转动, 才将太平洋上的 ENSO 类的年际变率与印度洋环流和亚洲季风的变化联系起来。

参 考 文 献

- 1 吴国雄、孟文, 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, 大气科学, 1998, 22(4), 470~480.
- 2 吴国雄等, LASG 全球海洋—大气—陆面系统模式 (GOALS/LASG) 及其模拟研究, 应用气象学报, 1997, 增刊, 15~28.
- 3 Zhang Xuehong, Coupling scheme experiments based on an atmospheric and an oceanic GCM, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 1992, 16(2), 129~144.
- 4 俞永强, 海—冰—气耦合方案的设计及年代纪气候变化的数值模拟研究, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1997.
- 5 孟文, 赤道印度洋和太平洋的海气相互作用的关系与 ENSO 事件, 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 1997.
- 6 Prashant Goswami and Nandini Havinth, A mechanism for observed interannual variabilities over the equatorial Indian Ocean, *J. Atmos. Sci.*, 1997, 54(13), 1689~1700.
- 7 Latif, M., Interaction of the tropical ocean, MPI Techn. Report, No. 140, 1994.
- 8 Lau, N. C., Simulation of ENSO-like phenomena with a low-resolution coupled GCM of the global ocean and atmosphere, *J. Climate*, 1994, 5, 284~307.

Gearing between the Indo-Monsoon Circulation and the Pacific-Walker Circulation and the ENSO Part II: Numerical Simulation

Meng Wen

(Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081)

Wu Guoxiong

(State Key Laboratory of Numerical Modeling Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract The analysis of the multi-year integrations from the global climate model IAP/LASG GOALS shows that the gear-like connection in the air-sea interaction between the equatorial Indian and Pacific Oceans, "GIP" in short, is well represented in the model. Sensitivity experiments were then designed to further investigate such GIP connections. Results reveal that, through such kind of gearing, the air-sea interaction in one ocean basin forced by the zonal-wind stress anomaly causes the air-sea interaction in the other ocean, and then results in anomalous SST there. Therefore, the "GIP" is considered to be the atmospheric bridge linking the ENSO over the Pacific Ocean on one side and the zonal wind component of the Asian monsoon over the Indian Ocean on the other.

Key words: sensitive experiment; zonal wind stress; sea surface temperature