

全球大气/热带太平洋耦合距平模式中由 ENSO 增暖引起的全球大气环流异常*

杨修群¹⁾ 谢 倩²⁾ 黄士松¹⁾

¹⁾ (南京大学大气科学系, 南京 210093)

²⁾ (空军气象学院气象系, 南京 211101)

摘 要 本文利用全球大气/热带太平洋耦合距平模式模拟了一次类似于实际的 ENSO 增暖过程, 并对由 ENSO 增暖引起的海洋和全球大气环流异常的主要特征进行了分析, 指出: 耦合模式中的 ENSO 增暖在热带地区主要伴随着赤道中西太平洋 Walker 环流的减弱、中东太平洋气压降低以及表层辐合上升运动的增强; 夏季和冬季低纬环流异常具有明显的差异性, 夏季主要表现为印度夏季风环流的显著减弱和东亚季风的增强, 而冬季则主要表现为赤道所有纬向环流圈均减弱; 温带大气环流异常冬夏季也具有明显不同特征, 夏季温带大气异常主要限于东半球, 且发源于亚洲季风区, 和赤道中东太平洋海温异常似无直接联系, 但冬季温带大气异常则主要是发源于海温异常区的波列响应, 反映了海温异常直接热力强迫的结果。另外, 本文对耦合模式中的温带大气环流异常产生的可能机制也进行了讨论。

关键词 海气耦合距平模式 ENSO增暖 大气环流异常

1 引言

最近十多年来的研究表明, 大气外强迫通过大气内动力学过程是造成短期气候异常的主要原因^[1]。所谓大气外强迫包括海温异常、土壤湿度、极冰和雪盖面积变化以及地面反照率变化, 甚至包括地形的影响^[2~8], 其中以 ENSO 为中心的热带太平洋海温异常引起的全球短期气候变化过程是年际气候变化中的最强信号过程。大量观测分析已经揭示 ENSO 过程确可引起世界范围的气候异常, 同时, GCM 模拟和理论分析也提出了热带热源异常造成全球气候异常的可能动力学途径。这些研究主要体现在三个方面: 1) 着力使用 GCM 数值模拟来证实观测分析揭示的 El Niño 引起的全球大气环流异常的主要特征, 并且至今为止, 世界上几乎所有著名的模式都模拟了这一问题^[9~17]; 2) 揭示了外强迫引起大气环流异常的可能动力学途径, 指出了热带强迫通过大气行星波的传播是这种气候异常产生的主要动力学机制^[18~21]; 3) 同时也强调了和大气基本态(时间平均态)相联系的大气内动力学过程在气候异常流型形成和维持中的作用^[22,23]。显然, 上述研究结果对于理解短期气候异常形成机制具有重要动力学意义。然而, 存在的问题是: 1) 把外强迫异常作为大气固定边界条件引入模式, 没有考虑海气相互作用, 因而上述所有模拟问题均是大气对固定外强迫源的响应问题; 2) 大多采用永恒季

1994-03-14 收到, 1994-10-24 收到修改稿

* 国家攀登项目和国家自然科学基金项目共同资助

节模式,即要么冬季、要么夏季气候模式对海温异常的响应,没有考虑气候态的连续季节变化。由于上述两方面均和外强迫源的强度及大气基本态的结构有密切关系,因而将势必影响全球大气环流异常的形成过程。为了克服这些问题,并进一步揭示 El Niño 发展过程对全球大气环流的影响,本文利用一个三层全球大气距平 GCM 耦合一个热带太平洋距平模式,模拟了一次 ENSO 增暖即 El Niño 的发展过程,进而揭示了这种耦合模式中的 ENSO 增暖对全球大气环流异常的作用过程。

2 海气耦合模式简介

本文海气耦合模式的大气分量是一全球大气三层原始方程距平谱模式^[24],其主要特征是:1) 模式仅预报关于包括正常年循环的气候态的距平量,气候态作为已知量引入模式;2) 包含了边界层的异常热量和动量的输送过程;3) 考虑了 Wave-CISK 型热带对流加热参数化;4) 模式低层考虑了垂直扩散过程;5) 考虑了水平扩散项和牛顿冷却作用。海气耦合模式中的海洋分量是一两层海洋模式^[25],其主要特点为:1) 海洋的动力学过程由包含约化重力系统的线性浅水方程组描述;2) 包含了海洋表面边界层,因而考虑了风驱洋流的 Ekman 效应;3) 海温预报方程是一关于包含年循环气候态的完整非线性的距平预报方程,其中考虑了气候场海温、洋流(包括上翻流)、斜温层深度以及垂直温度梯度等对距平场形成的影响;4) 海洋区域为热带太平洋即 $122.5^{\circ}\text{E} \sim 82.5^{\circ}\text{W}$, $27.5^{\circ}\text{S} \sim 27.5^{\circ}\text{N}$,其中部分地考虑了不规则的海岸形状。由于海洋模式是赤道 β 平面模式,而大气是球面坐标模式,但由于海洋经向范围较小,故实际耦合计算时就直接用 β 平面海洋逼近真实的球面热带太平洋。

耦合模式的计算采用下列过程:1) 大气模式提供表面风应力距平,该距平场作为海洋模式的强迫项;2) 海洋模式提供热带太平洋海温距平场,该距平场作为引起大气表面感热通量异常产生的因子;3) 热带太平洋大气表面感热输送的异常引起局地大气环流异常(如辐合或辐散),则必然通过大气凝结反馈过程进一步引起大气环流异常,从而产生新的风应力给海洋。其中大气模式积分时步为 30 分钟,海洋模式积分时步为 60 分钟,而耦合步长为 1 天,即每隔一个模式天,海洋所受的风应力和大气所用的海温距平场变化一次,因此,大气和海洋基本上是同步耦合。模式气候态的变化时步也为 1 天,其值可根据逐月气候场线性内插而得到。

耦合距平模式的运行是在给定初始条件下进行的,由于该模式计算量大,为了使模式尽快得到 ENSO 增暖解,本文假定模式初始场仅在赤道中西太平洋区域有一稳定维持四个月的纬向西风异常,即从 1 月 1 日维持到 4 月 30 日,然后撤消该异常让耦合系统自由演变,一直积分到 12 月底,直到一个典型的 El Niño 型海温异常发展成熟。

3 模拟结果分析

本节将对耦合模式中的 ENSO 增暖引起全球大气环流异常的主要特征进行分析。

3.1 ENSO 增暖特征

图 1 给出了模式积分的月平均的海温距平分布。模式 1~4 月海温正异常逐渐在赤

道太平洋建立, 由图可见, 到 4 月份, 东太平洋的最大海温异常已达 $+1.0^{\circ}\text{C}$ 以上, 同时 160°W 以西的赤道中西太平洋也有一弱的暖异常中心, 显然, 耦合系统的前四个月的增暖主要反映的是初始赤道中西太平洋纬向西风异常强迫的结果; 进入 5 月份以后, 外加的异常西风应力已经撤消, 耦合系统将自我维持, 此时由图可见, 5 月份东太平洋海温仍继续上升, 但中太平洋原先由外加的局地纬向西风应力异常造成的海温增暖已开始减弱, 至 6~7 月份整个赤道中东太平洋的海温增暖出现了明显的减弱趋势, 至 7 月份, 最大海温增暖只有 $+0.5^{\circ}\text{C}$ 左右。这种海温增暖暂时的减弱并不是反映耦合系统不再向暖位相发展, 而是反映了一种短暂的调整过程, 即由前四个月的强迫性耦合过程向完全性自我维持的耦合过程转变, 一旦这种调整过程结束, 并且赤道太平洋有暖海温距平存在, 则耦合系统完全可以通过不稳定海气相互作用机制使海温异常继续发展, 事实上, 由 8~12 月海温异常演变特征可见, 这种海温异常确实发展, 至年底, 这种大范围赤道中东太平洋海温增暖分布完全对应于一次成熟期的 El Niño 型海温分布, 其最大的增暖中心达 $+2.5^{\circ}\text{C}$ 以上, 同时, 160°E 以西的西太平洋有弱的负距平产生, 最大负距平达 -0.5°C 。对应于 ENSO 增暖过程, 逐月风应力距平演变表现为: 模式 1~4 月位于 $145^{\circ}\text{E}\sim 160^{\circ}\text{W}$ 的纬向西风应力异常主要对应于初始西风应力强迫, 但 5~6 月份, 即初始强迫消失后, 赤道太平洋的 135°W 以西产生了自我维持的西风应力异常, 而 135°W 以东产生了东风应力异常, 至 7~12 月份, 赤道西风异常逐渐向东缓慢扩展, 而原先的东太平洋东风异常逐渐消失, 最终在整个赤道中东太平洋为稳定的西风应力所控制。此时, 赤道东太平洋温跃层显著加深, 而上翻流明显减弱, 但西部和东部变化相反, 即温跃层有弱的抬升, 而上翻流有弱的增强, 不过大洋东部主要呈 Kelvin 波结构, 而西部呈 Rossby 波结构。

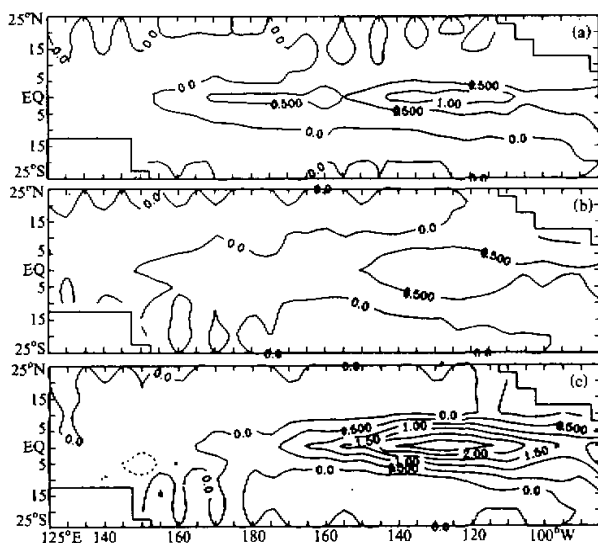


图 1 月平均海温距平分布

(a) 4 月, (b) 7 月, (c) 12 月

3.2 热带海平面气压异常特征

图 2 给出了热带区域全球海平面气压异常的月平均分布, 热带海平面气压异常的产生首先是从热带太平洋东部的气压降低开始的, 这种气压降低即负距平至 6 月份已达 -0.4 hPa 左右, 且主要限于热带东太平洋, 而其它地区异常甚小, 显然, 前六个月的海平面气压异常主要还是反映了海温增暖的局地效应。然而, 至 7~8 月的北半球盛夏季节, 海平面气压异常具有明显的全球分布特征, 除了赤道中东太平洋仍为负气压距平控制外, 东半球尤其是亚洲季风区也出现明显异常分布, 主要表现为: 印度半岛、南部非洲为正气压距平控制, 而东南亚和北部非洲为负气压距平控制。对照气候场不难看出, 上述海平面气压异常显然对应于夏季印度季风低压的减弱和东南亚地区低压的加强。由于季风低压构成了夏季风环流系统的重要成员, 故上述气压异常在一定程度上反映了 El Niño 发展期间印度季风环流减弱而东亚季风环流增强的趋势。到了秋冬季 (9~12 月) 即 El Niño 逐渐发展至成熟期, 海平面气压异常又展示了和夏季不同的特征, 此时南亚及东南亚均为正气压距平控制, 且在由夏季向秋冬季的过渡过程中, 正气压距平有自南亚次大陆逐渐向印尼附近的赤道西太平洋扩展的趋势, 其结果使得热带西太平洋的赤道低压显著减弱, 此时赤道东太平洋仍为负距平, 而非洲也为负距平, 但赤道南美洲东部为正距平 (见 12 月)。显然, 上述海平面气压的异常分布事实上反映了冬季赤道太平洋 Walker 环流的减弱。因此, 在 ENSO 增暖期, 夏季和冬季热带环流系统的异常表现出明显的差异性。

3.3 大气内 (或斜压) 模的异常特征

速度势函数反映了大气内 (或斜压) 模的主要特征。定义辐散流 $V = \nabla \chi$, χ 为势函

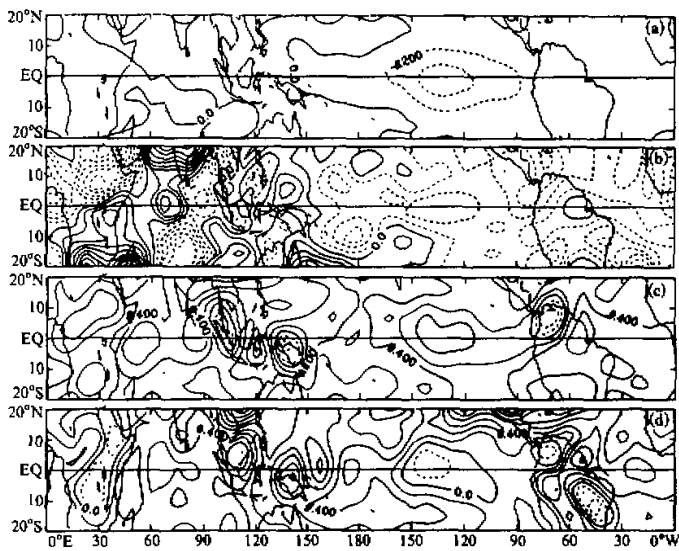


图 2 海平面气压异常 (hPa) 月平均分布

(a) 6 月, (b) 8 月, (c) 10 月, (d) 12 月

数, 图 3 给出了 300 hPa 势函数异常的月平均分布。7 月份以前, 势函数的异常仅限于赤道中东太平洋区域, 且为一弱的负距平控制, 表明这里大气高层有明显的异常辐散环流, 反映了海温增暖的局地加热作用。进入 7 月份, 势函数的异常分布发生了很大变化, 除赤道中东太平洋上空高层仍为异常的辐散中心外, 东亚及东南亚地区也为异常辐散(负距平)所控制, 而印度半岛及其以北、非洲为异常辐合中心(正距平)所控制, 低层形势和高层完全相反, 势函数的这一异常分布形势和气候场比较可知, 印度地区低层辐合、高层辐散运动减弱, 因而垂直速度减小, 从而使得主要由热力效应驱动的印度夏季风环流明显减弱; 此时, 东亚季风环流和印度季风环流变化趋势相反, 表现为增强; 同时, 由于中东太平洋地区低层辐合、高层辐散加强, 因而使得太平洋西部的 Walker 环流减弱。季风区环流的上述异常将会使得东亚地区对流加热有所增强,

但更主要的是使印度季风造成的对流凝结加热显著的减少。由此可以看出, 北半球夏季 El Niño 增暖所造成的大气主要加热异常将不再位于赤道中太平洋, 而是位于亚洲季风区尤其是印度季风区, 下文将讨论指出, 这种位于季风区的对流加热异常可能是北半球夏季温带大气环流异常产生的主要原因。夏季过后的秋冬季(9~12月)势函数异常和夏季又有明显不同, 例如在 9 月份, 高层异常辐合、低层异常辐散的距平中心已转移到东亚大陆上空以及印尼附近, 而赤道东太平洋低层辐合、高层辐散异常已明显增强, 这种形势表明赤道 Walker 环流减弱的趋势已逐渐显著, 但亚洲大陆区域仍具有明显的辐合辐散异常, 其中印度以北地区和东亚地区变化形势相反, 但主要的高层异常辐合中心仍然位于东亚上空, 因而东亚低层对流加热减少是整个辐散流异常的最主要特征。但是, 到了冬季以后(12月), 辐合辐散中心异常已主要位于热带低纬度的近赤道地区, 高层辐散环流异常的特征主要表现为: 势函数异常在赤道东太平洋和北非、西亚地区为负, 而在印尼、南美地区为正, 这种异常形势和气候场比较显然可见, 对应于赤道所有区域的 Walker 环流的减弱。因此, El Niño 发展至冬季成熟期主要使得赤道纬向环流圈减弱。

3.4 大气外(或相当正压)模的异常特征

上节揭示的主要是大气内(或斜压)模的异常特征, 由于热力直接驱动性为其产生的主要原因, 故这种环流异常主要限于热带低纬地区, 要揭示全球大气环流异常的特

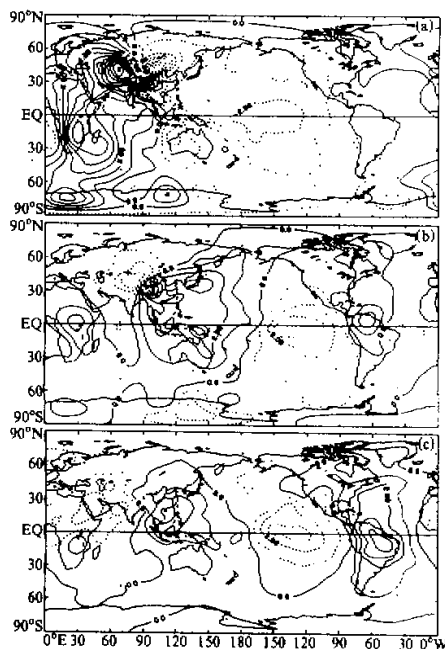


图 3 300 hPa 势函数异常 ($10^5 \text{ m}^2/\text{s}$)
月平均分布
(a) 7 月, (b) 9 月, (c) 12 月

征, 还需进一步揭示旋转流即大气外 (或相当正压) 模异常的特征。图 4 给出了 300 hPa 流函数异常的月平均分布, 早期阶段 (1~2 月) 由于海温异常微弱, 故流函数异常也较小, 直到春季阶段 (3~4 月) 太平洋至北美地区才开始有弱的波列型产生, 即东北太平洋为负、北美为正、美国东南沿海为负, 这类似于过渡季节的 PNA 流型, 反映了赤道太平洋弱的增暖引起的强迫波列。然而, 当由春季向夏季过渡时 (5~7 月), 太平洋/北美地区的波列逐渐减弱消失, 而亚洲地区开始有新的波列激发形成。例如, 到 7 月份这种波列振幅已发展得相当强, 最大的负距平中心位于阿拉伯海北部大陆上空, 这一负中心和气候场比较反映了夏季青藏高原高压的明显减弱, 由这一负中心出发向东北方向伸展, 形成一完整的波列型, 此时, 南半球发源于南非也有一个波列产生, 但振幅比较小。这一异常特征表明, El Niño 发生发展的夏季, 温带大气环流的异常主要限于东半球, 并且明显地和季风环流有着内在的联系。当由夏季向秋季过渡时 (8~9 月), 北半球亚洲地区的波列逐渐移至东亚及其沿岸地区, 并且振幅有所增强, 且这一波列已开始影响到北美地区, 南半球发源于非洲影响到南美洲的波列已逐步具有三波数的特征。当由秋季向冬季过渡时 (10~12 月), 南半球波列已逐渐消失, 东亚的波列也已开始减幅消失, 但太平洋/北美地区的类似于 PNA 型的波列开始形成, 同时横跨欧亚的 EUP 型波列也明显地增幅产生 (11~12 月)。这些波列由于仅为热带太平洋海温异常一种外强迫因子和大气内动力学过程相互作用所致, 没有包含其它外强迫因子的作用, 故其分布特征不完全类似于观测分析揭示的大气环流遥相关型^[26,27]。

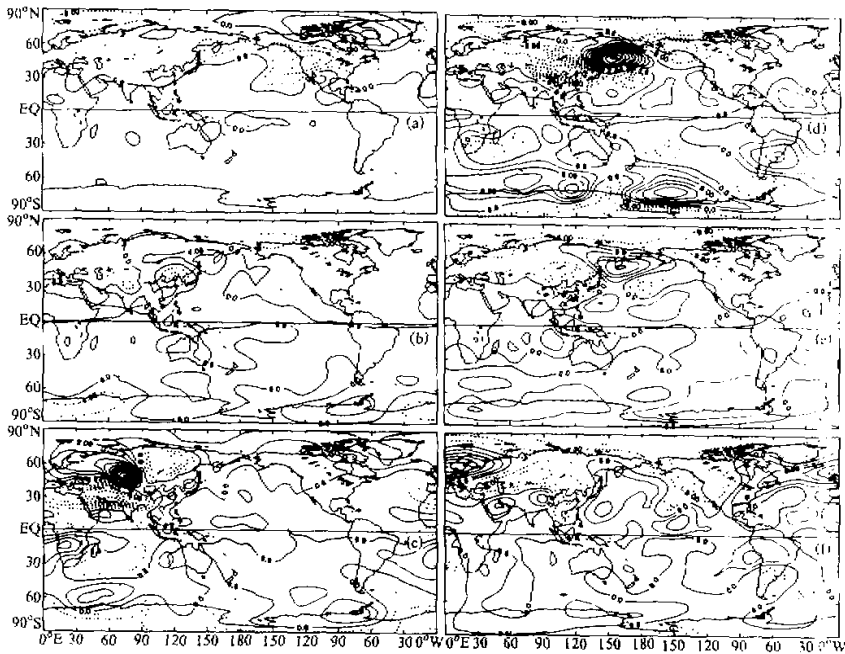


图 4 300 hPa 流函数异常 ($10^5 \text{ m}^2/\text{s}$) 的月平均分布

(a) 4 月, (b) 6 月, (c) 7 月, (d) 9 月, (e) 10 月, (f) 12 月

3.5 产生温带大气环流异常的可能机制

上述模拟结果表明: 耦合模式模拟出了 ENSO 增暖引起的全球大气环流异常的主要特征, 但本文考虑了海温缓慢的增幅并且引入了气候态逐日连续的演变, 因而耦合模式中不同季节的大气异常展示出明显的差异性。例如, 夏季的温带大气环流异常主要发源于季风区, 似乎与赤道中东太平洋海温异常无直接联系, 但冬季的温带大气环流异常又发源于赤道海温增暖区附近, 要理解这种差异性必需首先要理解这些温带大气环流产生的机制。本文认为, 夏季温带大气环流异常产生的主要原因可能是由于亚洲夏季风区域对流凝结潜热释放异常强迫所形成的。因为由图 3 分析已知, 夏季最主要的辐合、辐散场异常位于亚洲季风区, 表现为印度季风减弱而东亚季风增强, 季风的这种异常必然伴随着对流凝结潜热释放的异常, 而夏季青藏高原上空强大的势函数异常正中心 (图 3) 和流函数异常负中心 (图 4) 即青藏高压的减弱正是印度季风区对流凝结潜热释放异常减弱的反映。亚洲夏季风的变异则主要是通过热带海温异常强迫产生的热带遥相关过程实现的。因此, 赤道中东太平洋海温升高, 减弱了印度夏季风, 引起了印度季风区对流凝结潜热释放的异常减少, 从而引起了亚洲地区波列的产生。同样夏季南半球波列的产生也可能与非洲地区内部加热异常有关。因此, 夏季温带大气环流的异常型是海温异常引起的其它地区大气内部加热源 (或汇) 异常激发形成的, 温带主要异常波列发源区似与海温异常区没有直接的关系。同时由于夏季西风带强度较弱且离开赤道较远, 故海温异常的直接热力强迫难以激发波列自源区向温带能量频散, 故太平洋/北美区域没有明显的波列形成。显然通过大气内部动力学过程的间接强迫机制是夏季温带大气环流异常形成的主要动力学途径。但是冬季由于西风带位于较低纬度且强度大, 有利于低纬热源 (汇) 强迫出 Rossby 波列向中高纬传播, 直接热力强迫机制是产生冬季温带大气环流异常的主要原因, 例如冬季的类似于 PNA 型的波列即是这种机制作用的结果。当然, 对于过渡季节的春秋季节直接强迫和间接强迫机制可能共同起作用。

4 结论和问题

本文利用全球大气/热带太平洋耦合距平模式模拟了一次类似于实际的 ENSO 增暖过程, 并对由 ENSO 增暖引起的海洋和全球大气环流异常的主要特征进行了细致分析, 并进一步对产生温带大气环流异常的机制进行了讨论, 得到了以下主要结论:

(1) 耦合模式中的 ENSO 增暖在热带地区主要伴随着赤道中西太平洋 Walker 环流的减弱和中东太平洋气压降低。

(2) ENSO 增暖过程中夏季和冬季低纬环流异常具有明显的差异性, 夏季主要表现为印度夏季风环流的显著减弱和东亚季风的增强, 但冬季则主要表现为赤道所有纬向环流圈均减弱。

(3) 温带大气环流异常冬夏季也具有明显不同特征, 夏季温带大气异常主要限于东半球, 且发源于亚洲季风区, 和赤道中东太平洋海温异常没有直接的联系, 但冬季温带大气异常则主要是发源于海温异常区的波列响应, 反映了海温异常直接热力强迫的结果。

(4) 对温带大气环流异常形成机制讨论表明, 外强迫引起大气内部加热源 (汇) 的

重新分布即大气内部过程是产生夏季温带大气环流异常的主要原因,而直接热力强迫是冬季温带大气环流异常形成的主要机制,对于过渡季节(秋春季)则上述两类机制共同起作用。

当然,本文的研究仅是针对 ENSO 增暖的一个位相进行分析的,由于积分时间的限制,特别是计算条件的不足,没有能够对这一耦合模式进行长时间的积分,因而本文的研究结果还是相当初步的,还难以给出一个 ENSO 循环内的全球大气异常特征,更难以给出长时间的变化以得到全球大气和热带海洋相互作用对 ENSO 循环的本质影响过程。但是,本文的研究已是一个开端,它表明 ENSO 增暖过程确实涉及到许多大气环流系统,这一系统不仅包括热带环流、季风环流,而且还涉及到南北半球温带大气环流,因此,只有理解 ENSO 的全球特征,才能更加全面地揭示出 ENSO 循环形成机制和 ENSO 引起全球大气环流异常的形成机制,也只有这样才能在耦合动力学基础上较为成功地预报短期气候变异。显然,这一重要的扩展性研究是需要继续深入探究的,尽管存在很多困难,但正如对热带耦合系统研究取得的成功一样,ENSO 过程的全球特征及其形成机制研究也将取得进展。

参 考 文 献

- 1 杨修群, 1991, 近年来国外气候动力学过程若干问题数值模拟研究进展, 气象科技, No.3, 1~10.
- 2 杨修群、黄士松, 1992, 北半球夏季南极冰气候效应的数值试验, 大气科学, 16, 69~76.
- 3 Yang Xiuqun and Huang Shisong, 1992, Numerical simulation of influence of the anomalies of the central-eastern equatorial Pacific SST and Arctic sea ice cover in summer on the atmospheric circulation, *Acta Oceano. Sinica*, 11, 401~411.
- 4 Huang Shisong, Yang Xiuqun and Xie Qian, 1992, The effect of the Arctic sea ice on the variations of atmospheric general circulation and climate, *Acta Meteor. Sinica*, 6, 1~14.
- 5 杨修群、黄士松, 1992, 欧亚雪盖的气候效应及其在冬季风形成中的作用, 南京大学学报, 28, 326~335.
- 6 杨修群、谢倩、黄士松, 1992, 大西洋海温异常对东亚夏季大气环流影响的数值试验, 气象学报, 50, 349~354.
- 7 杨修群、黄士松, 1993, 外强迫引起的夏季大气环流异常及其机制探讨, 大气科学, 17, 696~702.
- 8 杨修群、谢倩、黄士松, 1993, 南极地区冰雪消失对全球大气环流和气候影响的研究, 地理学报, 48, 394~402.
- 9 Julian, P.R. and R.M. Chervin, 1978, A study of the Southern Oscillation and Walker Circulation phenomenon, *Mon. Wea. Rev.*, 106, 1433~1451.
- 10 Keshavamurty, R.N., 1982, Response of the atmosphere to sea surface temperature anomalies over the equatorial Pacific and the teleconnections of the Southern Oscillation, *J. Atmos. Sci.*, FH39FS, 1241~1259.
- 11 Blackmon, M.L., J.E. Geisler and E.J. Pitcher, 1983, A general circulation study of January climate anomaly patterns associated with interannual variation of equatorial Pacific sea surface temperatures, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1410~1425.
- 12 Shukla, J. and J. M. Wallace, 1983, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 40, 1613~1630.
- 13 Geisler, J.E., M.L. Blackmon, G.T. Bates and S. Munoz, 1985, Sensitivity of January climate response to the magnitude and position of equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 42, 1037~1049.
- 14 Tokioka, T., K. Yamazaki and M. Chiba, 1985, Atmospheric response to the sea surface temperature anomalies observed in early summer of 1983: A numerical experiment, *J. Meteor. Soc. Japan*, 63, 565~588.
- 15 Palmer, T.N. and D.A. Mansfield, 1986, A study of winter time circulation anomalies during past El Niño events, using a high-resolution general circulation model, I: Influence of model climatology, *Quart. J. Roy. Me-*

- teor. Soc.*, **112**, 613~638.
- 16 Palmer, T.N. and D.A. Mansfield, 1986, A study of winter time circulation anomalies during past El Niño events, using a high-resolution general circulation model, II: Variability of the seasonal mean response, *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **112**, 639~660.
 - 17 Mechoso, C.R. et al., 1987, Numerical simulations of the atmospheric response to a sea surface temperature anomaly over the equatorial eastern Pacific Ocean, *Mon. Wea. Rev.*, **115**, 2936~2956.
 - 18 Hoskins, B.J. and D. Karoly, 1981, The steady, linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 1179~1196.
 - 19 Webster, P.J., 1981, Mechanisms determining the atmospheric response to sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, **38**, 554~571.
 - 20 Webster, P.J. and H.R. Chang, 1988, Energy accumulation and emanation regions at low latitudes: Impacts of a zonally varying basic state, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 803~829.
 - 21 Sardeshmukh, P.D. and B.J. Hoskins, 1988, The generation of global rotational flow by steady idealized tropical divergence, *J. Atmos. Sci.*, **45**, 1228~1251.
 - 22 Simmons, A.J., J.M. Wallace, and G.W. Branstator, 1983, Barotropic wave propagation and instability and atmospheric teleconnection patterns, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1363~1392.
 - 23 Branstator, G.W., 1983, Horizontal energy propagation in a barotropic atmosphere with meridional and zonal structure, *J. Atmos. Sci.*, **40**, 1689~1708.
 - 24 杨修群, 黄土松, 1995, 多层全球大气原始方程距平谱模式的研制, *气象学报*, **53**(1), 19~29.
 - 25 杨修群, 1993, ENSO 动力学过程的数值研究, 南京大学博士论文, 235pp.
 - 26 Wallace J.M. and D.S. Gutzler, 1981, Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter, *Mon. Wea. Rev.*, **109**, 784~812.
 - 27 杨修群, 1992, 北半球夏季位势高度场遥相关型的观测研究, *大气科学*, **16**, 513~521.

Global Atmospheric Anomalies during Warm ENSO Period in a Coupled Atmosphere–Ocean Anomaly Model

Yang Xiuqun¹⁾, Xie Qian²⁾ and Huang Shisong¹⁾

¹⁾(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

²⁾(Department of Meteorology, Air Force Institute of Meteorology, Nanjing 211101)

Abstract By using a multi-level anomaly GCM coupled to a tropical Pacific anomaly model, a warm, developing ENSO phase has been preliminarily simulated. The characteristic of both the ocean anomaly and the global atmospheric anomaly in each season during the warm period has also been depicted. It is pointed out that the warm ENSO period is generally accompanied by the anomalously weak Walker cell in the central–western equatorial Pacific. However, the atmospheric anomalies at lower latitudes exhibit notable seasonal difference. In summer, it is characterized by the anomalously weak Indian monsoon and strong East Asian monsoon, while, in winter, it is by the weakening of all the equatorial circulation cells. Atmospheric anomalies in the extratropics in summer are also different from those in winter. In summer, they originate in Asian monsoon areas and seem to be indirectly connected with the equatorial SST anomaly, while, in winter, they reflect direct wave train response to the SST anomaly. Finally, the dynamical mechanism explaining the atmospheric anomalies appearing in the coupled atmosphere–ocean system is also discussed.

Key words coupled atmosphere–ocean anomaly model warm ENSO period global atmospheric anomalies