

热带太平洋年代际平均气候态变化与 ENSO 循环*

张 勤 丁汇

(国家气候中心, 北京, 100081)

摘 要

文中用观测的热带太平洋海表温度资料、风应力资料和 OLR 资料, 通过多时间尺度分析, 将与 ENSO 有关的变化分为3个主要的分量, 一是2~7 a 的 ENSO 循环尺度, 二是8~20 a 的年代际尺度, 三是20 a 以上的平均气候态变化。讨论了热带太平洋这种平均气候态变化的主要特征以及与 ENSO 循环的关系, 并用耦合模式的数值试验来研究平均气候态的变化对 ENSO 循环的影响。结果表明: 热带太平洋的平均气候态在20世纪70年代后期发生了一次由冷态向暖态的变化, 主要增暖区是沿赤道以及热带东太平洋的, 海表温度变化最大中心可以达到0.6。伴随着海表温度的变化, 赤道西太平洋的西风距平加强, 赤道东太平洋的东风距平也加强, 在赤道中太平洋形成了一个加强的辐合中心。年代际平均气候冷暖态的变化对 ENSO 最直接的线性影响是使 El Niño 位相增加, 而形成 ENSO 冷位相和暖位相的不对称。另一方面较暖的平均气候态可能引起海洋和大气之间的耦合加强, 导致 ENSO 循环振荡有所加强。

关键词: 年代际平均气候态变化, ENSO 循环, El Niño 位相加强。

1 引 言

20世纪90年代前期发生的3次厄尔尼诺事件和1997/1998年异常强烈的厄尔尼诺事件, 使许多学者认识到20世纪90年代的厄尔尼诺事件与历史上其它年代相比存在很大的差异。是什么原因造成90年代 ENSO 异常发生、发展的问題目前尚未有一致的看法, 一些学者认为它可能与人为 CO₂增加、全球气候变暖有关^[1]; 另一些学者则认为90年代 ENSO 的变化特征与海洋的长期变率及热带外海洋的相互作用有关^[2]。

已有很多证据表明, ENSO 的年代际变化是热带太平洋自然变率的一部分。例如 Wang^[3]发现20世纪70年代前后气候突变改变了 ENSO 事件的气候平均状态, 对 ENSO 暖事件的爆发有影响。1977年以前, 一般增暖首先出现在南美沿岸, 然后向西传播, 而1977年以后, 很多 El Niño 事件首先在中太平洋增暖。Trenberth 和 Webster^[4]应用15 a 滑动平滑 SSTA 资料发现 ENSO 事件的频率和振幅都有明显的年代际尺度的变化。Tren-

* 初稿时间: 1998年10月20日, 修改稿时间: 1999年8月31日。

资助课题: 国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候和天气灾害形成机理和预测理论的研究”第一部分: “我国重大气候灾害的形成机理和预测理论研究”与国家自然科学基金(49805007#)。

berth 和 Hoar^[5]指出90年代创历史纪录的暖事件增加可能与人类活动释放的 CO₂增加导致的全球气候变暖有关。根据近几十年的观测资料分析,全球气候增暖的趋势越来越明显,并且在1976年前后有一次明显的气候突变。Nitta^[6]用70年代以后的海表温度平均值减去70年代以前的平均值,发现北太平洋增温很明显,热带太平洋也增暖。最近,Seager 和 Murtugudde^[7]用一个简单海气耦合模式研究了全球增暖响应的数值试验。结果指出,热带太平洋地区最初由于冷却作用导致东—西向海表温度梯度增加。Liu^[8]也从理论模型证明了这一点。但是也有的结果刚好与之相反^[9]。平均气候态的变化除了对年际变率的距平计算有影响外,它对 ENSO 循环是否还存在其它影响? 1976年以前气候平均态相对于80年代和90年代都较冷,此时热带东太平洋地区海表温度也偏冷。90年代热带太平洋平均增暖了大约0.5。虽然增温幅度没有中纬度那么大,但对 ENSO 循环一定会产生影响。

最近 Weng 和 Lau^[10]用14 a (1980~1995年)日本静止气象卫星红外辐射的月平均资料作小波分析,发现不同时间尺度的过程对各次 ENSO 事件的发展有不同的贡献。在1982/1983年的 ENSO 事件中,增强的 QBO 起主要作用,在1986/1987年的 ENSO 中增强的4~8 a 振荡起主导作用,而1991年和1993年的 ENSO 可能是几个年际尺度过程、异常年循环和高频变化的同位相共同作用的结果。

Wang 和 Wang^[11]用小波变换和波形变换分析了 SO 的年代和年代际变化的非定常演变,发现自1872年以来 SO 的主周期已发生了两次显著的变化:一次在20世纪10年代初,另一次在20世纪60年代中。在1872~1910年的40 a 中的主周期是3~4 a,在1911~1960年的50 a 中主周期是5~6 a;而1970~1992年的20 a 中的主周期是5 a 左右。此外,SO 的振幅也有显著的变化,1872~1892年和1970~1992年最强,而20世纪20年代、30年代和60年代最弱。

文中用热带太平洋海表温度、风应力和 OLR 观测资料,通过多时间尺度分析,将与 ENSO 有关的年际变化分为3个主要的分量,一是2~7 a 的 ENSO 循环尺度,二是8~20 a 的年代际尺度,三是20 a 以上的平均气候态变化。在此基础上讨论了热带太平洋这种平均气候态变化的主要特征及其与 ENSO 循环的关系,并用耦合模式的数值试验研究了平均气候态的变化对 ENSO 循环的影响。

2 Nino 3和 Nino 4指数的小波分析

本文对1961~1998年包括了20世纪最强的 El Niño 事件的海温资料用 Mollat 子波变换,着重分析了热带太平洋海温年代际的变化。

图1是 Nino 3指数子波变换系数模的时间-频率图,最强的振荡模在2~7 a 的频带内,正值中心基本上与厄尔尼诺事件对应,负值中心与 La Nina 事件对应,这是 ENSO 循环模态。值得注意的是 ENSO 模态从20世纪60年代到90年代,振幅不断增强,而且整个波列向低频方向发展,即实际上 ENSO 模态的周期变长,能量向低频方向集中。第2个振荡模在8~16 a 的频带内,它代表着年代际的变化。ENSO 模态和年代际模态是 SSTA 的主要部分,这一点从小波功率谱的分布也可以看出。在 Nino 3指数的功率谱中,2~7 a 的 ENSO 模态有最大的方差贡献(72%),它是一个双峰结构,一个峰值在4 a,另一个峰值在6 a,年代际变化的方差贡献为15%,主周期在12~16 a 之间。我们将频率域在2~7 a 的信号

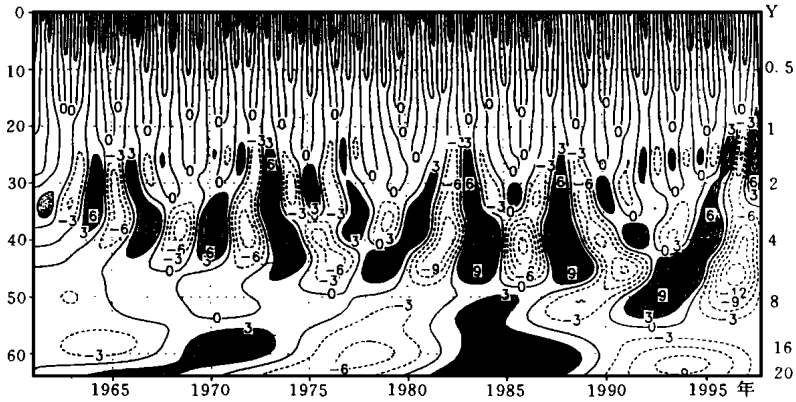


图1 Nino 指数子波变换系数的模的时间-频率图
(阴影区表示正距平, 虚线表示负距平)

定义为 ENSO 模, 8 ~ 20 a 的信号视为年代际变化, 通过小波重建时间序列, 可以将这两个模态分离开来研究 ENSO 循环和年代际变化的关系。图2是观测的 Nino 3 指数(实线)与 Nino 3(长虚线)乘 Nino 4 地区(短虚线)海温。它们分别代表了热带东太平洋和中太平洋海温的年代际变化, 可以看到这两根曲线在 1990 年以前有位相差, 但基本上是同位相, 即表明这段时间热带东太平洋和中太平洋的年代际变化是基本一致的。1990 年以后它们成了反位相的变化, 即在 Nino 3 区从 1985 年开始一直到 1995 年始终保持年代际尺度的负海温距平, 1995 年以后转变为正距平, 而且上升很快, 但是热带中太平洋的 Nino 4 区 1990 ~ 1995 年为正距平, 而 1995 年以后转为负距平。

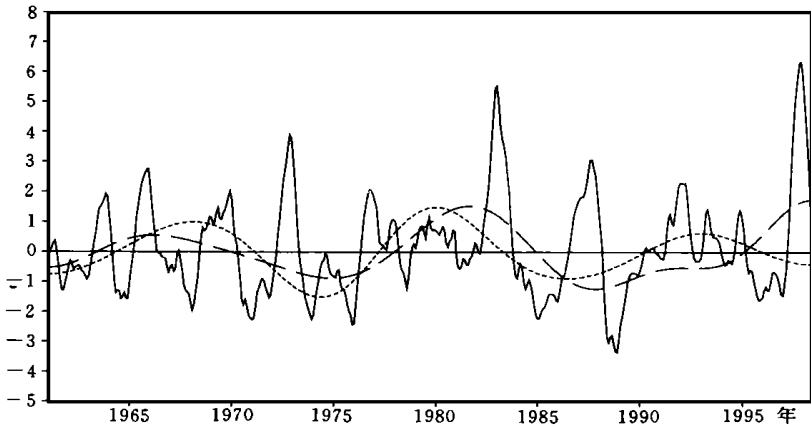


图2 Nino 指数(实线)与 Nino 3区海温的年代际变化(长虚线)
及 Nino 4区海温的年代际变化(短虚线)

3 热带太平洋海洋、大气年际变率的多时间尺度分析

3.1 海表温度

对 1955 ~ 1998 年热带太平洋地区海表温度距平作 EOF 分析(如图3所示), 第一特征向量的空间分布(图3a)表征了 ENSO 模, 其主要变率在热带东太平洋呈舌状对称于赤道

的分布。两个最大中心其一在140°W附近,另一个在120°~100°W之间。配合 EOF1的时间系数(图3c),可以看到 EOF1的变化与每一次 El Niño 事件相对应。它占整个方差比的47%。此外, EOF1的时间系数还有明显的线性倾向变化。如果对它作32点滑动平均,可以看到1976~1977年前后有一次显著的平均气候态突变(粗实线),1976年以前是较冷气候态,1976年以后气候变暖,特别是20世纪90年代,增暖更加明显。这与 Nitta 和 Yamada^[6]分析全球 SST 的观测资料的结果是一致的。关于70年代气候态的变化对 ENSO 循环的影响已有一些讨论。在 Rasmusson^[12]的文章中所总结的 ENSO 特点基本上使用了70年代以前的观测资料,而80年代的 ENSO 具有不完全相同的特点,其中最重要的影响就是这个气候态变化给 ENSO 的发生、发展提供了一个暖的背景场。而90年代这种暖背景更加明显。第二特征向量的空间分布(图3b)与 EOF1完全不同,在热带地区海温变化呈东西向偶极子型分布,即东太平洋为正中心,中西太平洋为负中心。如果对 EOF2的时间系数也作32点滑动平均,可以看到它有明显的年代际振荡(粗实线)。而且90年代前期与90年代后期是反位相。

在过去的研究工作中,对于 EOF1 特征向量已给出了较好的物理解释,它代表了 ENSO 循环模式。但是对于 EOF2 所表征的物理意义还不很明确。为此我们将 EOF2 的时间系数作一小波分析,看一看它的功率谱分布(图略)。曲线有3个明显的峰值,第1个峰值是4 a 的周期,这是与 ENSO 循环有关的变化,第2个峰值位于10 a 的周期,而且功率谱值比第1个周期还要大,说明在 EOF2 特征向量中,有很大一部分信息反映了年代际的变化特征,第3个峰值较弱,是大于20 a 的平均气候态变化,属线性倾向项。1990年以来,年代际分量有所加强,与空间分布 EOF2 相结合可以看到,20世纪90年代前期 EOF2 时间系数(图3d)是正(或负)值表示热带中太平洋 SSTA 正距平加强(或负距平减弱);而东太平洋的 SS-

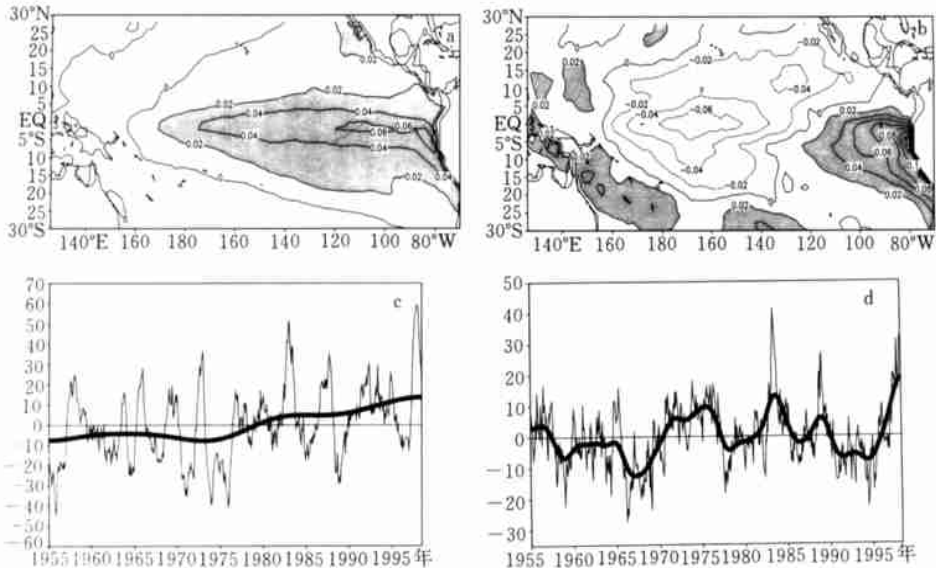


图3 1955~1998年热带太平洋海表温度距平的 EOF 分析

(a. EOF1的空间分布; b. EOF2的空间分布; c. EOF1的时间系数;

d. EOF2的时间系数。粗实线是32点滑动平均)

TA 正距平减弱或负距平增强。20世纪90年代后期是时间系数为负,表明分布与之相反。

ENSO 的形成和发展是热带太平洋海气相互作用的结果。大气和海洋之间的耦合可以在多种时间尺度上发生, ENSO 的主要变率表现在2~7 a 的 年际变化模态,但是它的发生和发展受到年循环的制约,同时还有年代际的影响以及更长时间尺度的气候变化为其提供不同的平均气候态场,这种多重时间尺度的海气相互作用的结果,使 ENSO 的发生具有不规则性。

3.2 风应力

我们对热带太平洋地区(30°N ~ 30°S, 120°E ~ 80°W) 1961~1996年的风应力资料(FSU 大学提供)的纬向风分量(u)进行 EOF 分析(图4)。从 EOF1 的时间系数曲线(图4b)可以发现,正的峰值都与 El Niño 事件对应,负的峰值与 La Niña 事件对应。结合第一空间特征向量(图4a)的分布,当风应力在赤道中、西太平洋附近为西风距平时,对应着赤道东太平洋的暖海温距平,反之亦然。说明 EOF1 分量代表了大气风应力场与 ENSO 循环耦合的模式,它占方差贡献的19%。

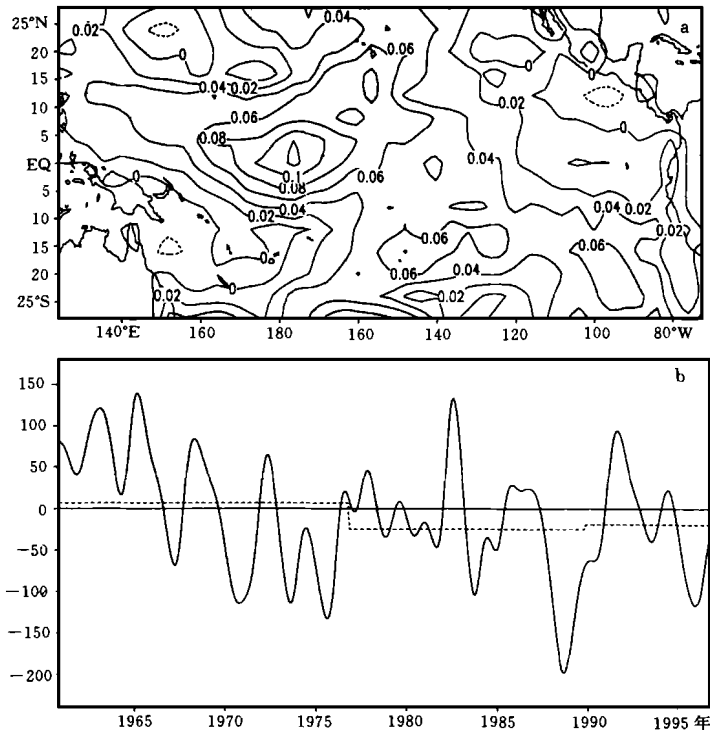


图4 1961~1996年 FSU 风应力纬向分量 EOF 展开的第一特征量
(a. 空间分布; b. 时间系数)

图5是纬向风应力 EOF2 空间分布和时间系数。值得注意的是 EOF2 时间系数除了具有与 ENSO 循环尺度相关的年际变化外,还具有明显的线性倾向变化。1976年以前,曲线基本上在大于零的平均值附近波动,而1976年以后,系数在小于零的均值附近波动。特别

是1990年以后更加显著,均值几乎达到了-100,结合 EOF2的空间分布可以看到,一个最大负值中心在热带西太平洋,一个最大正值中心在热带东太平洋,呈纬向偶极子型。1976年以前的时间系数基本为正,该时期在热带西太平洋大部分时间里平均是东风距平,而在热带东太平洋则平均为西风距平,结果在热带中太平洋出现一个辐散中心,对流较弱。1976年以后, EOF2系数基本上在负值范围内波动。与此对应,热带西太平洋由平均东风距平转变为平均西风距平,而东太平洋相反。在热带中太平洋构成一个平均辐合中心。1990年以后这种趋势更加显著,热带西太平洋的平均西风距平大大加强,热带东太平洋平均东风距平也明显加强,在热带中太平洋辐合上升,使该地区的对流加强,这样的风应力平均场的变化必定会对沃克环流产生影响,进而可能改变 ENSO 循环的频率和振幅。

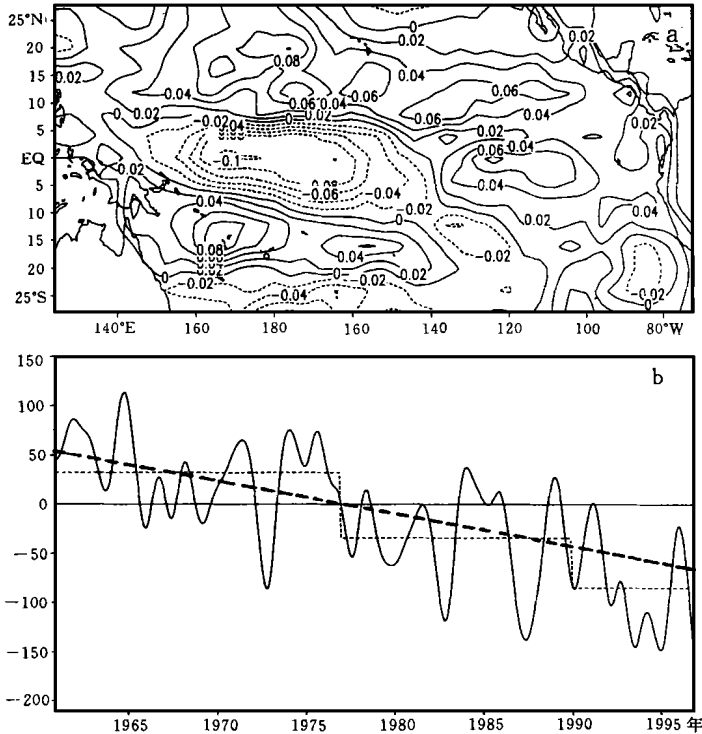


图5 1961~1996年 FSU 风应力纬向分量 EOF 展开的第二特征向量
(a. 空间分布; b. 时间系数)

3.3 OLR

对1979~1996年的 OLR 资料进行 EOF 展开。EOF1 的时间系数负峰值对应着 El Niño 事件。如1983, 1987和1992, 1993, 1994/1995年。相应 EOF1 的空间分布是在热带东太平洋地区对称于赤道的正距平分布(图6a), 其中心位于140~130 W, 恰好与海温的 EOF1 空间分布完全吻合。而在热带西太平洋是一个变化相对较小的负距平, 中心位于西太平洋暖池附近。EOF1 占整个方差贡献的47%。由此可以看出 EOF1 的物理意义非常清楚, 它代表着与 ENSO 循环相对应的大气对流变化特征。当 El Niño 发生时, 东太平洋海温升高, 对流活动加强, 大气向外长波辐射由于较高云顶的作用在该地区形成了一个负距

平中心。相反, 原来西太平洋暖池地区的对流相对减弱, 因而出现了 OLR 的正距平中心。这完全是热带地区在 ENSO 尺度上的海气相互作用的结果。占方差贡献 18% 的第 2 特征向量(EOF2) 其空间分布是沿热带太平洋的偶极子型分布(图 6b)。负距平中心在热带中太平洋日期变更线附近, 负值区占据了几乎整个热带中太平洋。结合 EOF2 的时间系数, 可以看到当 El Niño 发生时, EOF2 的时间系数有时为正, 有时为负。例如 1983 年, EOF2 为负, 表明在 El Niño 暖期对应的热带中太平洋对流活动也同时减弱。1991 年也是如此。但是 EOF2 的时间系数在 1987, 1993, 1994/1995 年 El Niño 发生时, 全部为正, 结合空间分布分析, 表明该地区对流活动加强。虽然 EOF2 在每次 El Niño 发生时并不完全相同, 但如果将 EOF2 的时间系数分为两个阶段(1979~1989 年, 1990~1996 年) 求平均值, 1990 年以前平均值为负, 1990 年以后平均值为正。说明 1990 年以后热带中太平洋地区对流活动加强。由此可以推测与海温变化相同, 大气的平均气候态亦发生了变化, 与上面分析的风应力平均气候态的变化相一致。

总之, 通过对风应力、海温和 OLR 资料进行 EOF 分析后, 可以发现热带太平洋无论是大气还是海洋 20 世纪 70 年代以后的平均气候态确实发生了变化。由较冷态转变为较暖态, 而且 90 年代以来变暖的趋势更加明显, 这种变化可能与 90 年代 ENSO 异常发展有密切联系。

4 年代际平均气候态变化的空间分布特征

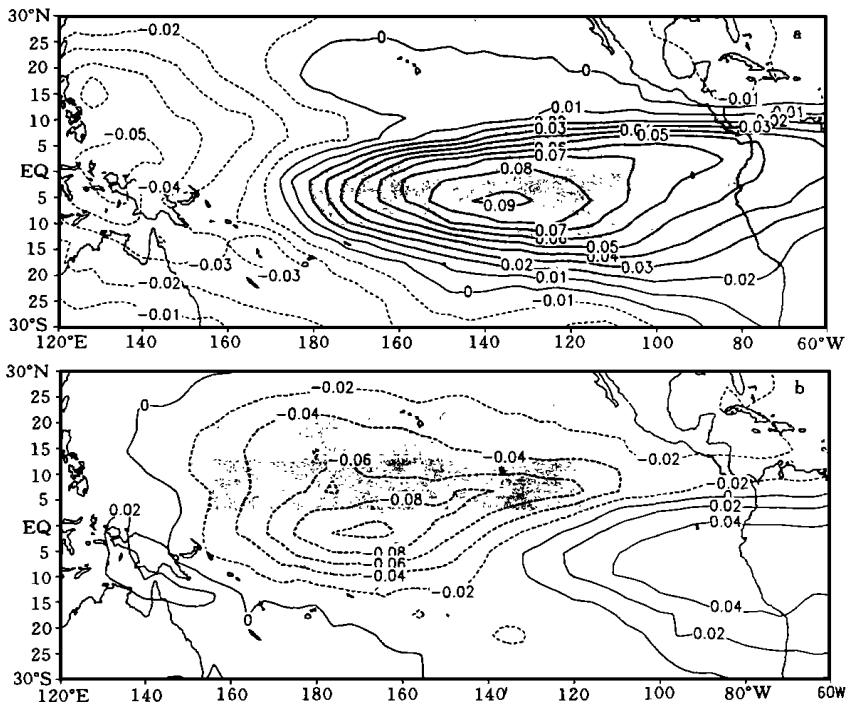


图6 1979~1996年 OLR 距平 EOF 展开

为了研究平均气候态的变化以及这种变化对 ENSO 形成和发展的影响,将根据多时间尺度分析的结果,把平均气候态的变化分为两个时期,第1时期是1961~1976年。因为1976年前后是一个明显的气候突变点,特别是热带地区的海表温度气候平均值有明显的跃变。一般认为1976年以前的气候为较冷态。第2时期是1977~1997年。该时期气候明显变暖,El Niño 强烈发生而且是暖位相的发生明显多于冷位相。将资料按上述两个时期作气候平均,以分析冷态、暖态的平均气候态变化的空间特征,以及这种平均气候态的变化对 ENSO 的影响。

4.1 海表温度气候平均场的变化

要研究热带海表温度平均气候态的变化对 ENSO 的影响,首先要弄清楚平均气候态变化的特征。先将热带太平洋地区(30°S~30°N, 120°E~60°W) 1961~1997年的 SST 作一平均气候场(称为 A),再用1961~1976年的气候平均(称为 C)减去这个平均气候场($C-A$),可以得到一个较冷的平均气候变化(图7a)。同样用1977~1997年的气候平均(称为 W)减去平均气候场($W-A$),可以得到较暖的平均气候变化(图7b)。由图7可见,冷态和暖态的气候变化空间分布完全相同,但符号相反。较冷气候态时,热带东太平洋基本上是负距平;较暖气候态时,那里是正距平,最大中心与平均气候场(A)相差0.3。一个中心位于赤道东太平洋,另一个中心位于北美沿岸的20°N附近。而在热带中西太平洋的气候变

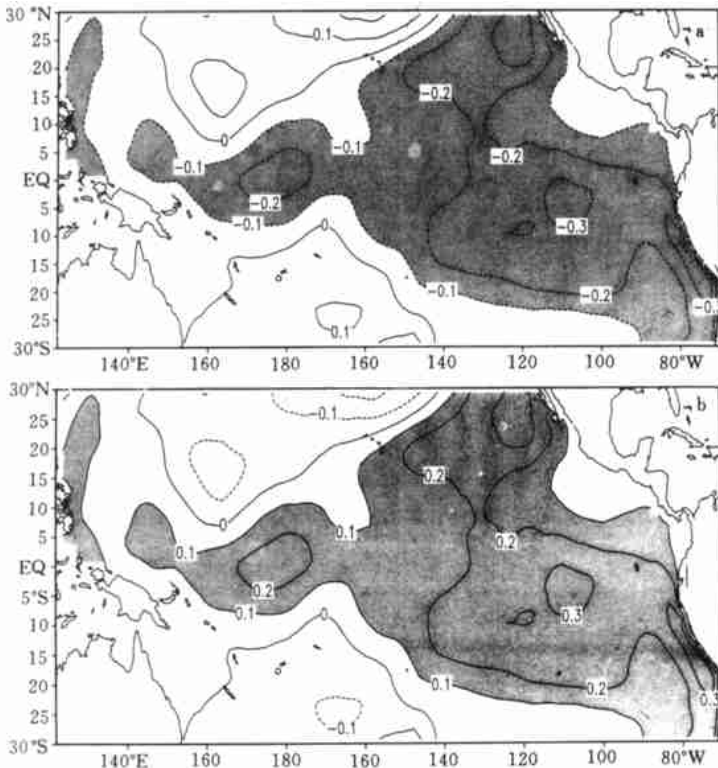


图7 海表温度的气候特征

(a. 1961~1976年的 SST 平均值与多年平均差值; b. 1977~1997年的 SST 平均值与多年平均差值)

化与赤道附近的变化呈相反的距平分布; 在较冷气候时期, 中、西太平洋沿赤道附近是负距平, 赤道外的南太平洋和北太平洋是正距平。在较暖气候时期, 距平分布也完全相反。沿赤道是正海温距平的气候变化, 赤道外是负海温距平的气候变化。中、西太平洋的气候变化比东太平洋小, 与平均气候相差 0.2 , 赤道外只有 0.1 。

气候平均场的空间变化分布特征基本上可以看作是由这3个距平中心组成的三角形区域。而且赤道东太平洋的变化比较大, 从冷态变为暖态相差达 0.6 ($W-C$), 已超出了通常所定义的 El Niño 暖事件发生的指标(Niño 3指数大于 0.5 即为 El Niño 事件开始)。可见, 平均气候态的冷暖态变化可能对 ENSO 产生影响。

4.2 风应力平均气候场的变化

对1961~1997年的 FSU 风应力资料作同样气候平均后相减的气候平均风应力结果如图8所示。图8a和b的分布特征完全相同但流线方向相反。最显著的是从赤道西太平洋至东太平洋的一条切变线。1976年以前比较弱, 风应力距平的平均值呈辐散状。1976年以后平均距平为辐合。表明在较冷气候态时, SPCZ 比较弱, 对应着该时期海表温度偏冷的状态, 在较暖气候态时, SPCZ 比较强, 对应着该时期海表温度偏暖的状态。

如果对风应力的纬向分量 u 和经向分量 v 分别减去总的平均值(A) 可以看到, 1961~1976年第一时期($C-A$), 中、西太平洋地区上空纬向风为负距平, 即东风距平, 东太平

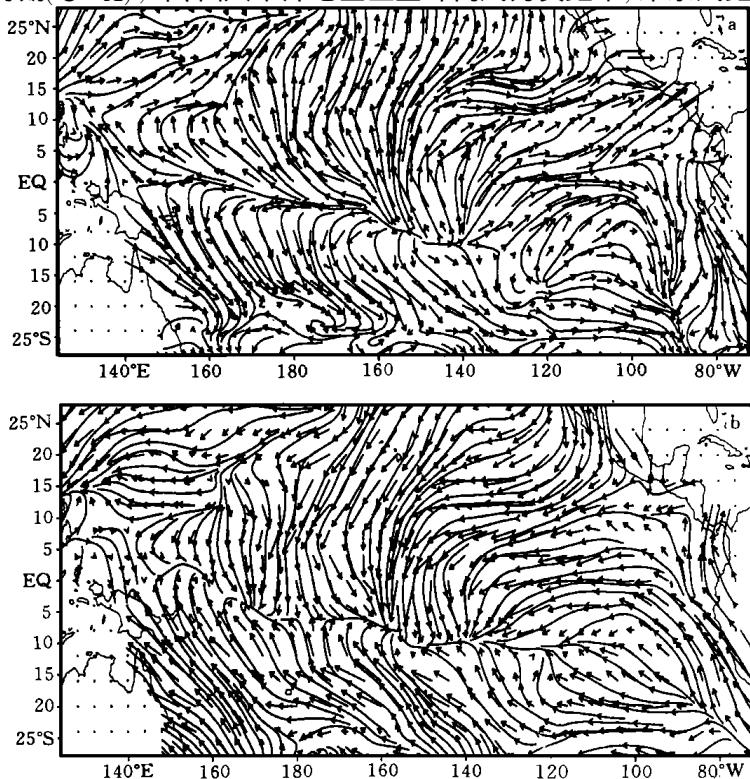


图8 FSU 风应力气候平均

(a. 1961~1976年, b. 1977~1997年)

洋地区上空为正距平即西风距平。因此在热带中太平洋是低层辐散的平均气候态,气流在该地区辐散流出,向西然后分别转向南北半球中高纬地区,向东也是如此。对应的经向风,北太平洋有经向风正距平,代表向北的分量加强;南太平洋基本是负距平,代表向南的分量加强。所以无论是经向风还是纬向风在1976年以前都出现了在热带中太平洋的辐合减弱的趋势。1977~1997年的平均纬向风和经向风的空间分布($W-A$)几乎与1976年以前完全相反。原来位于热带中、西太平洋的东风距平变成了西风距平,东太平洋的西风距平变成了东风距平。经向风在北太平洋南风分量加强,南太平洋则是北风分量加强,其结果必然在热带中太平洋出现了辐合加强。这就在热带中太平洋形成了一个长期维持的辐合中心。这是由于海表温度气候变暖对大气加热形成的辐合中心,它也是对海表温度平均气候态变暖产生一种补偿作用。但是这种赤道西太平洋西风距平的加强,以及东太平洋东风距平的加强,必然会对 ENSO 产生作用,一方面可以使 ENSO 循环的强度变化,另一方面可能使其距平中心移动。

5 年代际气候平均冷暖态的变化与 ENSO 循环的关系

20世纪90年代 ENSO 的异常发展与年代际气候自然变率有关,也可能与温室气体增加造成的全球增暖效应有关。Latif 等^[13]分析了最近几十年的海温距平资料,指出热带海温的低频变化可以由3个模态组成:年际变化模态(ENSO 模态)、年代际变化模态和倾向变化。关于平均气候态的变化特征前面已作了讨论,现在的问题是平均气候态冷暖态的变化与 ENSO 的关系是怎样的?

从1961年~1999年2月的 Nino 3指数可以反映 ENSO 循环的强度变化。其中最明显的是几次很强的振幅都由 El Niño 事件产生,而且呈线性增加的趋势,最强的一次是最近发生的1997/1998年的 El Niño 事件。值得注意的是20世纪90年代不但 El Niño 事件频繁发生,而且振荡的强度也加强。

为了研究平均气候态的变化与 ENSO 的关系,分别将1976年以前和以后的 El Niño 事件以及 La Nina 事件作合成(如图9,图10所示),可以很明显地看出,1976年以后暖态平均气候态时,无论是 El Niño 事件还是 La Nina 事件,都比1976年以前要强。冷态平均气候态时,El Niño 成熟位相中心最大距平为1,暖态平均气候态时,中心强度达到2。冷态平均气候态时,La Nina 成熟位相的强度基本上与 El Niño 相当(-0.8),ENSO 循环比较对称,但是1977年以后的暖平均气候态使 La Nina 的强度与 El Niño 相比明显减小,但是 La Nina 比1976年以前还是增强了,这就是说暖态平均气候态与 ENSO 的关系不仅是简单的线性倾向的影响,还包含了更复杂的热力和动力过程。暖的气候态背景不仅使 El Niño 和 La Nina 的发生产生不对称,还使 ENSO 循环的振荡加强了。即除了由于线性倾向变化在计算距平时的影响外,暖态的平均气候态可能还加强了海气之间的相互作用,使 ENSO 的暖位相和冷位相同时略有增强。

6 年代际气候平均态的变化对 ENSO 循环影响的数值试验

6.1 耦合模式中的 ENSO 循环

统计大气和动力海洋模式^[14]在热带西太平洋外加了90 d 西风距平扰动后,耦合积分

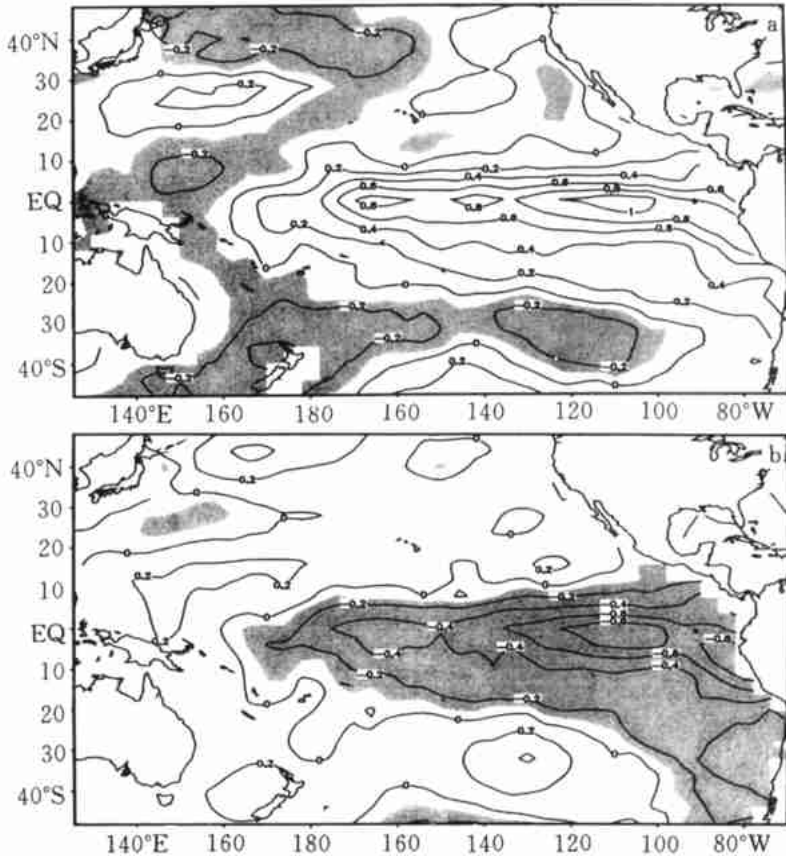


图9 1976年以前(1961~1976年)El Niño 和 La Niña 事件 SSTA 分布合成
(a. El Niño, b. La Niña, 单位: $^{\circ}\text{C}$)

$20 \text{ a}^{[15]}$ 。从模式输出的 Nino 3 指数, 可以看到海气耦合系统产生了类似 ENSO 循环的
年际振荡, 其周期非常接近 4 a, 振幅达到 ± 1.5 。由于是比较简单的热带太平洋海气耦合
模式, 这种年际振荡只是单一模态的 ENSO 循环, 与 Z-C 模式积分的结果非常类似。

如果将模拟出的 ENSO 循环分为 8 个位相(图略), 可以分析模式中 ENSO 循环的演
变过程。位相 1 是海表温度距平在赤道东太平洋达到最大正值的阶段, 这时 SSTA 的水平
分布有两个最大中心分别位于 130°W 和 90°W 附近, 中心最大值达到 2 与实际观测到的
El Niño 成熟位相非常一致。在赤道东太平洋是正距平, 赤道西太平洋是负距平, 而在西
太平洋赤道外地区为正距平; 位相 2 中海表温度距平中心向西移到了 140°W , 同时伴随着
SSTA 沿赤道西移, 中心强度减弱; 位相 3 时 SSTA 迅速减小, 在赤道东太平洋出现了负距
平中心, 中太平洋的正距平中心仍然一边衰减一边西移, 这是一个由 El Niño 到 La Niña
的过渡位相, 与观测到的 ENSO 循环的过渡位相很类似; 位相 4 是发展中的冷位相, SSTA
的负中心在赤道东太平洋达到了 -2; 位相 5 时, 最大负中心向西移动, 此时与观测
到的 La Niña 成熟位相的分布相当一致; 位相 6 时, SSTA 负中心一边西移一边衰减; 位相
7 中赤道中太平洋是负 SSTA, 而赤道东太平洋 Nino 3 区又有正海温距平出现, 这是由 La
Niña 到 El Niño 的过渡位相, 分布与位相 3 相反; 位相 8 是暖位相的发展阶段, 在赤道东太

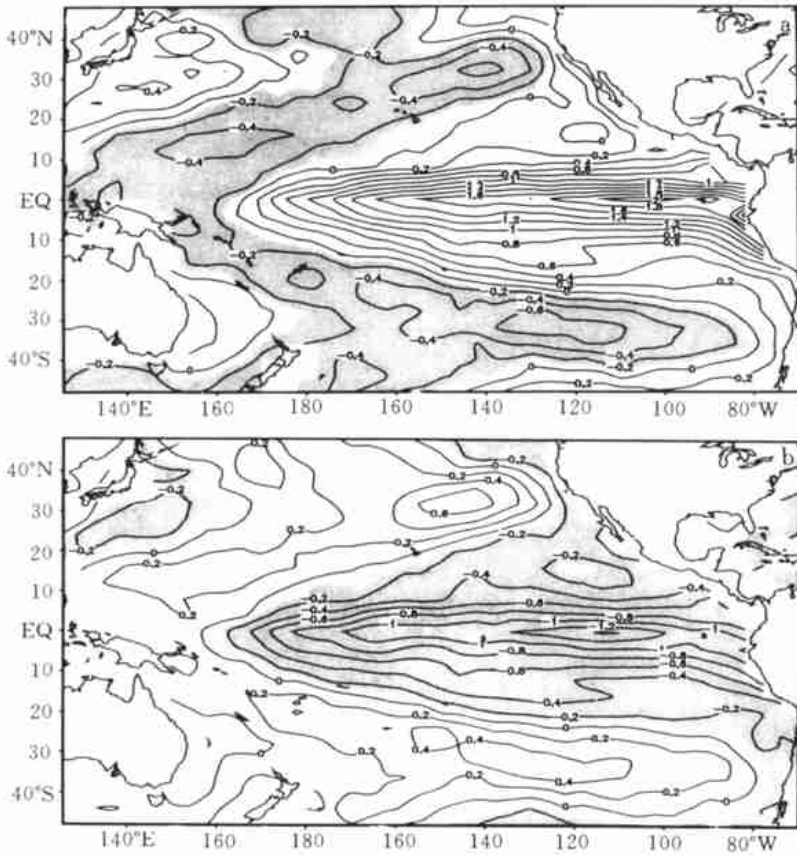


图10 1976年以后(1977~1998年)El Niño和La Niña事件SSTA分布合成
(a. El Niño, b. La Niña; 单位:)

平洋又有较强的正距平发展并向西移动。整个 ENSO 循环的演变过程都有 SSTA 距平中心向西运动的特征。

对应于 SSTA 的8个位相, 热含量距平(图略)的变化反映了上层海洋的信息和斜温层厚度的变化以及开尔文波和罗斯贝波在 ENSO 循环中的传播特征。位相1中热含量的分布在赤道东太平洋是正距平, 赤道西太平洋是负距平, 但在西太平洋赤道外地区有正距平存在, 沿赤道热含量呈现东高西低的分布, 表明东太平洋斜温层厚度增加, 同时有热量积累, 而西太平洋斜温层厚度减小, 热含量减小; 位相2时热含量在赤道东太平洋的正距平迅速减弱, 赤道西太平洋的负距平向东扩展, 而在10°N 以北的正距平中心则向西移动。位相3中整个赤道地区已演变为负距平区, 但北太平洋赤道外地区是正距平, 特别是该正距平向西传播并且在西太平洋加强, 在赤道地区形成了纬向型的距平分布, 这种分布对应着由 El Niño 转变为 La Niña 的过渡位相, 与位相1东西向的距平分布型完全不同; 位相4是赤道东太平洋负距平发展, 赤道西太平洋正距平加强; 位相5中热含量距平的分布形成了东低西高型, 与位相1完全相反, 代表了 La Niña 位相的热含量分布; 位相6时赤道的热含量距平减弱同时向东移动, 而10°N 以北的负距平向西移动; 位相7时, 这个负距平在西太

平洋加强, 原来赤道东太平洋的负距平被正距平取代, 又形成了纬向型距平分布, 与位相3相反; 位相8是热带西太平洋又演变为负距平区, 热带东太平洋又成为正距平区, 意味着又将有一次 ENSO 循环发生。

热含量的变化反映了模式海洋中 Kelvin 和 Rossby 波的传播。从该模式中看到了沿赤道向东传播的 Kelvin 波的存在以及在 ENSO 循环中的作用。同时还在赤道外的北太平洋有明显的 Rossby 波向西传播。但在南半球不明显。从热含量沿赤道和 10°N 的时间剖面图(图略), 可以清楚地看到开尔文波沿赤道东传和罗斯贝波在赤道外西传的特性, 与观测的热含量距平变化完全一致, 从另一个侧面证实了时滞振子理论对 ENSO 循环产生机制的解释。

6.2 年代际平均气候态的变化对 ENSO 循环影响的数值试验

在热带太平洋简单耦合模式中, 加热率是由海温气候平均来参数化得到的, 统计大气中计算出的风应力距平, 再与气候平均风应力相加来强迫海洋模式。因此, 可以设计一组数值试验, 改变模式中的气候平均场, 来研究平均气候态的变化对 ENSO 循环的影响。文中可简称为平均气候态数值试验(C 试验)。

6.2.1 数值试验方案

CA 试验是控制试验。取1961~1998年的 SST 和风应力气候平均值作为模式中的平均场, 作为控制试验, 模式积分30 a, 可以得到 ENSO 循环的年际变化。

CC 试验是指用1961~1976年的较冷气候态的 SST 和风应力气候平均场代替 CA 的平均值, 研究在较冷平均气候态下 ENSO 循环的特征。

CW 试验是用1977年~1998年的较暖气候态的 SST 和风应力气候平均值作为耦合模式的气候平均场, 同样积分30 a, 研究较暖平均气候态对 ENSO 循环的影响。

6.2.2 数值试验结果

在耦合模式中, 3种不同的平均气候态得到的 ENSO 循环可以用模式输出的 Nino 3 指数来代表。积分30 a 的 ENSO 循环4 a 周期基本不变, CC 和 CA 几乎相同, CW 周期有微小的变长(图略)。3种试验的 ENSO 循环振幅也略有不同, 但是差别很小。CC 和 CA 的振幅除了在模式刚开始的10 a 有超过0.5 的差异, 10 a 后的振幅变化在0.4 以下。平均气候态较冷时, ENSO 循环振幅最小, 平均气候态较暖时, ENSO 循环振荡加强, CA 控制试验介于两者之间。从合成的3个试验的 Nino 3 指数(图略)中一些细节的差异可以看到平均气候态变化对 ENSO 循环的影响。其中最值得一提的是冷态背景时(实心方块曲线), 无论是 El Niño 或 La Nina 的峰值都是在冬季, 这就是“锁相”现象。但是暖态平均气候态时, 峰值有向春季移动的趋势。90年代前期发生的 El Niño 事件就是如此。Nino 3 指数对 CW 和 CC 试验分别用合成方法得到振幅最大时的 SSTA 水平分布, 一个代表 El Niño 位相, 另一个代表 La Nina 位相。用 CM 减 CC 的合成结果, 就可以分析由于平均气候态由冷态变为暖态后对 ENSO 循环影响的空间分布特征。从图中清楚地看出主要的变化在赤道东太平洋, El Niño 位相时为正, La Nina 位相时为负, 表明气候变暖后, ENSO 循环振幅加强。这可能是暖平均气候态下, 与热带太平洋海气相互作用加强有关。

同样的方法, 对模式的热含量(HC)也作位相合成后, 再相减(图略)。可以看到西太平洋的变化也很明显, El Niño 位相时, 赤道西太平洋 HC 为负, 赤道东太平洋为正。在 10°N

以北的热带地区也有两个正差值中心,一个位于西太平洋,另一个在150°W附近。La Nina位相时,差值中心的分布完全与它相反。这表明,无论是赤道向东传播的开尔文波还是赤道外的罗斯贝波振幅都增加,即 ENSO 循环在较暖平均气候态下得到了一些加强。

6.3 讨 论

通过用耦合模式对不同平均气候态下的数值试验初步分析的结果表明,平均气候态的变化对 ENSO 的影响可以分为两个方面。一是由于气候变化所引起的相对于气候的际变率距平值的计算。二是由于平均气候态冷暖的变化导致海气耦合系统的相互作用过程产生了变化而对 ENSO 循环的影响,这与用观测资料分析的结论完全一致。从这里可以部分地解释为什么自20世纪70年代以后 ENSO 比70年代以前强,而且 El Niño 暖位相比 La Nina 冷位相振幅大。

总的说来,年代际平均气候态的变化对 ENSO 的影响还是较小的,其量级在 ± 0.5 左右,虽然可以解释一些趋势,但是于20世纪80年代和90年代强 El Niño 事件的发生,可能还与年代际的振荡有关。

7 结 论

通过对热带地区海表温度、大气风应力和 OLR 资料的分析以及数值试验结果分析,得到以下几点结论:

1) 用小波分析发现2~7 a 的 ENSO 模态20世纪70年代以后有所加强,同时8~20 a 的年代际变量在90年代也增强。Nino 3指数和 Nino 4指数的年代际变化在90年代以前基本是同位相,或有较小的位相差,90年代以后,两者呈相反位相变化。

2) 通过 EOF 分析,可以将海表温度距平、风应力距平和 OLR 距平的变化可以划分为3种不同时间尺度的分量,第一是 ENSO 循环分量(2~7 a),第二是年代际变化分量(8~20 a),第三是平均气候态的线性倾向变化(20 a 以上)。

3) 热带太平洋的平均气候态在20世纪70年代后期发生了一次由冷态向暖态的变化,主要是沿赤道地区以及热带东太平洋的增暖,海表温度变化最大中心可以达到0.6。伴随着海表温度的变化赤道西太平洋的西风距平加强,赤道东太平洋的东风距平也加强,在赤道中太平洋形成了一个加强的辐合中心。

4) 年代际平均气候冷暖态的变化对 ENSO 最直接的线性影响是使 El Niño 位相增加,而形成 ENSO 冷位相和暖位相的不对称发生。另一方面较暖的平均气候态会引起海洋和大气之间的耦合加强,这可能导致 ENSO 循环振荡有所加强。

参考文献

- 1 Trenberth K E, Hoar T J. The 1990– 1995 El Niño Southern Oscillation event: longest on record. *Geophys Res Lett*, 1996, 23(1): 57 ~ 60
- 2 Gu D, Philander S G H. Interdecadal climate fluctuations that depend on exchanges between the tropics and extratropics. *Science*, 1997, 275: 805 ~ 807
- 3 Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J Climate*, 1995, 8: 267 ~ 285
- 4 Trenberth K E, Webster P J. Inherent limits to interannual predictability preprints. In: Eighth conf. On Air-Sea Interactions and Conference on the Global Ocean-Atmosphere-Land system (GOALS). Atlanta, Georgia, Amer Meteor Soc, 1996, 74 ~ 77
- 5 Trenberth K E, Hoar T J. El Niño and climate change. *Geophys Res Lett*, 1997, 24: 3057 ~ 3060
- 6 Nitta T, Yamada S. Recent warming of tropical sea temperature and its relationship to the Northern Hemisphere circulation. *J Meteor Soc Japan*, 1989, 67: 375 ~ 383
- 7 Seager R, Murtugudde R. Ocean dynamics, thermocline adjustment and regulation of tropical SST. *J Climate*, 1997, 10: 521 ~ 534
- 8 Liu Z. The role of ocean in the response of tropical climatology to global warming: The west-east SST contrast. *J Climate*, 1998, 11: 864 ~ 875
- 9 Meehl G A, Washington W. El Niño-like climate change in a model with increased atmospheric CO₂ concentrations. *Nature*, 1996, 382: 56 ~ 60
- 10 Weng H, Lau K-M. Low-frequency time-space regimes in tropical convection. *Theor Appl Climatol*, 1996, 55: 89 ~ 98
- 11 Wang B, Wang Y. Temporal structure of the Southern Oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. *J Climate*, 1996, 9: 1586 ~ 1597
- 12 Rasmusson E M, Wallace J M. Meteorological aspects of El Niño/Southern Oscillation. *Science*, 1983, 222: 1195 ~ 1202
- 13 Latiff M, Kleeman R, Eckert G. Greenhouse warming, interdecadal variability, or El Niño? An attempt to understand the anomalous 1990s. *J Climate*, 1997, 10: 2221 ~ 2239
- 14 Balmaseda M A, Anderson D L T, Davey M K. ENSO prediction using a dynamical ocean model coupled to statistical atmospheres. *Tellus*, 1994, 46A: 497 ~ 511
- 15 Zhang Qin, Haines K. Numerical study on dominating factor and key area of El Niño cycle formation. *Acta Meteor Sinica*, 1997, 11(2): 176 ~ 186

DECADAL CLIMATE CHANGE AND ENSO CYCLE

Zhang Qin Ding Yihui

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract

The observed strongest global climate variation on the interannual timescale is the El Niño –Southern Oscillation (ENSO) phenomenon, which is an irregular interannual oscillation resulting primarily from coupled ocean–atmosphere interaction in the tropical Pacific. Since 1970s the El Niño events have been stronger than the La Nina both on frequency and amplitude. Perhaps it links with the global climate warming. In this paper, sea surface temperature, wind stress and OLR data sets are diagnosed by using wavelet transform. The ENSO cycle (2– 7 years) signal and decadal variability (8– 20 years) are filtered out to form the data sets in order to investigate the features of the decadal climate change and its effect on ENSO cycle. Then the numerical experiments are designed to identify the effect by running a hybrid tropical Pacific coupled model.

The main results of the paper can be outlined as follows:

1) For the behavior of SST A and wind stress in tropical Pacific by wavelet analysis, it is clear that not only the energy density of ENSO cycle (2– 7 years) gets stronger during 1990s, but also does so the decadal oscillation (8– 20 years). The long-term linear trend of climate change (more than 20 years) can be identified with a catastrophe climate change in 1976 from cold climate state turning to warm state.

2)The main warming regions of the sea surface temperature after 1976 is the east tropical areas and extended westward along the equator with the maximum value up to 0.6 . The main features of wind stress pattern are the increasing westerly anomaly in west tropical Pacific and easterly anomaly at east tropical Pacific so that low level convection occurs near the date line.

3)However, the average state in the tropical Pacific in the 1990s is warmer than that in 1980s. This climate background change in the 1990s may cause the asymmetry of the warm and cold phases. On the other hand, the decadal oscillation has directly affected the ENSO cycle on both frequency and amplitude.

Key words: Decadal climate change, ENSO cycle, Anomalous occurrence.