

热带太平洋地区风场异常和与 El Niño 有关的年际变化

薛洪斌¹ 张 铭² 王业桂

1 总参谋部气象水文中心, 北京 100081

2 解放军理工大学气象学院, 南京 211101

摘 要 利用 1964~1993 年 NCEP/NCAR 再分析风应力资料和中国科学院大气物理研究所发展的 14 层热带太平洋环流模式 (OGCM), 对热带太平洋与 El Niño 有关的年际变化进行了研究。首先, 分析了西太平洋暖池次表层海温异常 (SOTA) 与 Niño 3 区海表温度异常 (SSTA) 的年际变化关系, 发现在 El Niño 事件之前, 暖池的次表层海温都有明显正异常出现, 它的东传导致了 El Niño 的发生, 并且 SOTA 的传播随纬度变化, 沿赤道东传, 在赤道外西传。然后, 选取了 20 世纪 70 年代和 80 年代两次最强的 El Niño 事件讨论了引起这种机制的可能原因——西风异常的作用。最后, 对 1964~1993 所有的 El Niño 年的风场、次表层海温和海表温度的异常进行了综合分析。

关键词 海表温度异常 次表层海温异常 El Niño 风应力

文章编号 1006-9585 (2006) 04-0457-13 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

Wind Anomalies of the Tropical Pacific and Interannual Variability Associated with the El Niño

XUE Hong-Bin¹, ZHANG Ming², and Wang Ye-Gui¹

1 Hydrometeorological Center of the Headquarters of General Staff, Beijing 100081

2 Institute of Meteorology, PLA university of Science and Technology, Nanjing 211101

Abstract The interannual variability associated with El Niño events in the tropical Pacific from 1964 to 1993 was studied. by using of Institute of Atmospheric Physics (IAP) 14L Tropical Pacific OGCM with NCEP/NCAR reanalysis wind stress data, First, we analyse relation of anomalies of subsurface sea temperature in the warm pool and anomalies of surface sea temperature in Niño 3. Results disclose that anomalies of subsurface sea temperature in the warm pool and their eastward propagation have very important and direct effects on the occurrence of El Niño and propagations of anomalies of subsurface sea temperature is different in different latitudes. Second, we discuss effect of westerly anomaly by selecting two strongest El Niño events. Finally, Composite structure have been described during El Niño from 1964 to 1993.

Key words sea surface temperature anomalies, subsurface oceanic temperature anomalies, El Niño, wind stress

1 引言

ENSO 是热带太平洋海-气系统年际变化的最强信号。由于它的发生, 往往造成全球不少地区

严重的气候灾害, 因此受到全世界的广泛关注。1995 年 WCRP 正式提出一个国际合作研究计划——CLIVAR (气候变率和可预报性), 该计划中的一个重要内容 CLIVAR-GOALS (季节到年际

收稿日期 2004-09-13 收到, 2005-08-15 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40233027

作者简介 薛洪斌, 男, 1977 年出生, 博士生, 主要从事海气耦合模式及气候的数值模拟研究。E-mail: xhbhyq11@163.com

时间尺度的气候变化及可预报性)就是关于 ENSO 的研究。对于 ENSO 发生的机制,先后有人提出了所谓的信风张弛理论^[1],不稳定海洋波动理论^[2]和延迟振子理论等^[3]。我国学者李崇银等^[4,5]提出 ENSO 循环实际上是由东亚季风异常造成赤道西太平洋异常纬向风所驱动的热带太平洋次表层海温距平的循环。在理论上揭示 ENSO 机制的同时,数值模拟是另一个重要的有力工具,它帮助人们描述和理解与 ENSO 现象有关的年际变化。早在 20 世纪 80 年代中期,Cane 等^[6]就利用一个简单的海气耦合模式成功地模拟出 ENSO 型的振荡,其后 Schopf 等^[7]、Neelin 等^[8]、Zhang 等^[9]、Zhou 等^[10]先后利用不同复杂程度的模式对 ENSO 进行模拟。这些理论研究和数值模拟丰富了我们对于 ENSO 事件的认识。

在以上的理论研究和数值模拟中,都强调了 El Niño 的发生与热带太平洋的西风异常有密切的关系。严邦良等^[11]分析了在 El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用,俞永强等^[12]讨论了 3 种不同的风应力对 El Niño 事件模拟的影响。这些研究表明:在 El Niño 事件发生之前,赤道西太平洋地区常有西风异常出现,而当 El Niño 事件达到最强时,赤道西太平洋地区西风异常消失,转而出现东风异常。而且,赤道西太平洋地区纬向风异常和东太平洋地区的海表温度有很好的超前相关关系。李崇银在对多次 ENSO 事件分析后提出: ENSO 的真正源区在赤道西太平洋暖池,赤道西太平洋暖池正(负)次表层海温异常(SOTA)沿赤道温跃层东传东太平洋,导致 El Niño (La Niña)的发生;在东传的同时,将有负(正) SOTA 沿 10°N 和 10°S 两个纬度带向西传播,从而构成了 ENSO 循环;而 SOTA 年际循环的主要驱动力就是赤道西太平洋纬向风异常。

由以上的研究表明,热带太平洋的风应力异常对 ENSO 循环起着重要的作用,因此在研究 ENSO 循环时可以简单地把赤道太平洋地区风应力异常作为外强迫。本文将 1964~1993 年 NCEP^[13]再分析风应力作为外强迫,来研究海洋模式对风应力的响应,特别是与 El Niño 关系密切的年际变化。主要讨论了当赤道太平洋区域出现风应力异常时,海表温度异常(SSTA)和次

表层海温异常(SOTA)之间年际变化的关系、传播机制以及在 El Niño 年海-气变量的空间结构。

2 模式简介和试验设计

本文所使用的海洋环流模式是由中国科学院大气物理研究所发展的 14 层热带太平洋环流模式,模式区域东西范围从 120°E 到 70°W,南北范围从 30.5°S 到 30.5°N;模式未考虑海底地形(取 4 000 m 深),但考虑热带太平洋真实海陆边界。模式水平分辨率为 2°×1°;垂直方向模式分为间距不等的 14 层(其中表层 60 m 分辨率为 20 m,60~240 m 之间分辨率为 30 m)。时间积分采用正、斜模分解算法,正压模时间步长为 5 min(显式求解),斜压模及平流过程和耗散过程取 2 h。模式的水平摩擦和扩散系数在南北纬 10°赤道以内取为 $2 \times 10^3 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$,而在其外更高纬地区线性增加以致到 30°N (S) 时值为 $3 \times 10^4 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$;垂直扩散和摩擦系数则与表征洋流切变和层结稳定度的 Richardson 数有关。模式中包含盐度及发生静力不稳定时所采用的对流调整方案。模式的水平侧边界取无滑动和无通量条件,但在模式的南北边界(即 30°N (S))处温盐方程中包含松弛项 $\gamma(T^* - T)$ 和 $\gamma(S^* - S)$,其中 T 和 S 分别为温度和盐度, γ 为 Newton 冷却系数(其值取为 $(60 \text{ d})^{-1}$), T^* 和 S^* 由 Levitus 观测资料给定(可随季节而变)。模式的初始条件取洋流和海面起伏为零,温盐用 Levitus 观测资料。模式的强迫场为大气海表风应力、海表热通量和海表淡水通量。其中风应力为由 Hellerman 和 Rosenstein 气候平均的风应力,热通量和淡水通量分别为由 Esbensen 和 Kushnir 根据 Haney 型公式计算以及蒸发与降水之差的气候平均值。模式能模拟出比较合理的热带太平洋区域海洋环流的平均状态、季节循环及 ENSO 事件^[14,15]。

在本研究中,我们利用 1964~1993 年 30 年的美国国家大气研究中心和国家环境预报中心(NCEP/NCAR)月平均再分析风应力代替 Hellerman 和 Rosenstein 的气候平均风应力,积分 30 年,来研究海洋模式对给定的风应力的响应,特别是与 El Niño 事件关系密切的 SSTA 和

SOTA 的年际变化。以下先分析 SSTA 与 SOTA 年际变化的关系和传播机制，然后讨论产生这种机制的可能原因——风应力异常的影响，最后综合分析 1964~1993 年中 El Niño 年的海洋和大气的结构。

3 SSTA 与 SOTA 的年际变率

在最近的 ENSO 研究中，许多学者指出^[5, 9, 10]西太平洋暖池 SOTA 与 El Niño 有密切关系。本节讨论了在 IAP-14L OGCM 中西太平洋暖池 SOTA 与 Niño 3 区 SSTA 的年际变化关系和 SOTA 与 SSTA 的传播机制。

图 1 给出了 1964~1993 年西太平洋次表层 (150~200 m) 海温异常与 Niño 3 区海表温度异常的时间演变。以 Niño 3 区 SSTA 最大正异常大于 0.5 °C 为发生 El Niño 事件的标准，除了 1968~1969 年以外，所有 El Niño 事件 (1965, 1972, 1976, 1982~1983, 1986~1987, 1991 和 1993 年) 都能被模式刻画。而

且还可以看到几乎每次 El Niño 发生以前，西太平洋暖池次表层的海温都有明显的正异常，并且这种正异常一般比 Niño 3 区的 SSTA 大；El Niño 发生以后，暖池次表层海温的正异常转为负异常形势。

以上分析说明，Niño 3 区的 SSTA 与西太平洋暖池 SOTA 有很好的对应关系。为了进一步弄清两者之间的关系，我们给出了前 15 年 SSTA 和 SOTA (135 m) 沿赤道 (图 2) 和沿 7.5°N (图 3) 的时间-经向演变图 (后 15 年的图略)。由图 2 可以清楚地看到，沿赤道无论 SSTA 还是 SOTA 都存在冷暖位相交替的年际变化，并且两者都随时间的演变东传。从 SSTA 的变化看，大于 1 °C 的正异常值主要位于东太平洋，在西太平洋暖池几乎没有，而 SOTA 的变化有所不同，在西太平洋暖池，也有大于 1 °C 的异常值出现。从 SOTA 与 SSTA 的位相关系看，SOTA 比 SSTA 要提前，但每次提前的时间又不相同，可以有半年到两年的时间跨度。从图 3 可以看到赤道外的 SSTA 和 SOTA 的变化情况。两者仍然存在冷暖位相交替

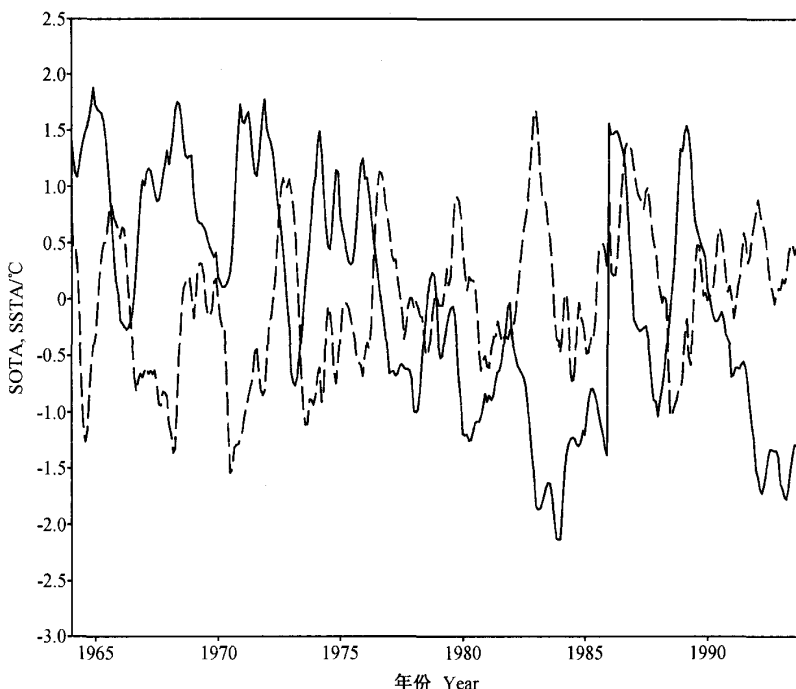


图 1 1964~1993 年西太平洋暖池 (10°S~10°N, 140~180°E) SOTA (150~200 m, 实线) 与 Niño 3 区 (5°S~5°N, 150~90°W) SSTA (长虚线) 的时间演变

Fig. 1 The time evolution of subsurface oceanic anomalies (solid line) (150~200 m) in western Pacific warm pool (10°S~10°N, 140~180°E) and sea surface temperature anomalies (dashed line) in Niño 3 region (5°S~5°N, 150~90°W) from 1964 to 1993

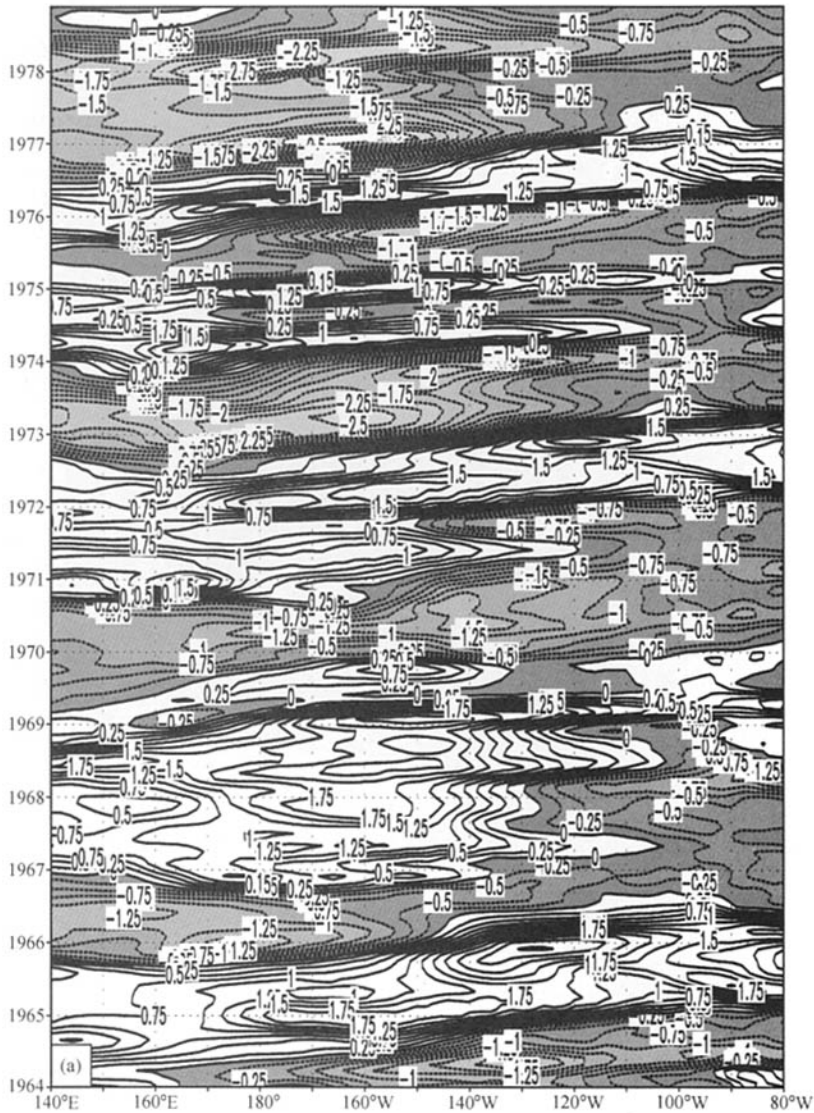


图 2 沿赤道海温异常的时间-经向剖面 (单位: $^{\circ}\text{C}$, 等值线间隔 0.25°C): (a) 135 m; (b) 海表面

Fig. 2 The longitude-time plots of oceanic temperature anomalies along Equator: (a) 135 m and (b) sea surface (the contour interval is 0.25°C)

的年际变化, 而与图 2 不同的是, SSTA 的变化很弱, SOTA 的变化较强, 并且它们随时间的演变是西传的。这样我们可以给出一个完整的 EN-SO 循环图像, 即沿赤道的年际振荡是东传的, 而在赤道外是西传的。

4 西风异常与 SSTA 和 SOTA 的关系

在本研究中, 风应力是试验中唯一具有年际

变化的外强迫, 因此模拟的 SSTA 及 SOTA 都应起因于风应力。在以前的许多研究中已经指出, El Niño 事件的发生往往伴随着赤道中西太平洋地区的西风异常^[4,11,16,17]。这里我们将分析赤道太平洋西风异常与 SSTA 及 SOTA 东移的关系。在这里, 为了具有代表性我们分别选取了 20 世纪 70 年代 1972 年和 80 年代 1982~1983 年两次最强的 El Niño 事件进行分析。

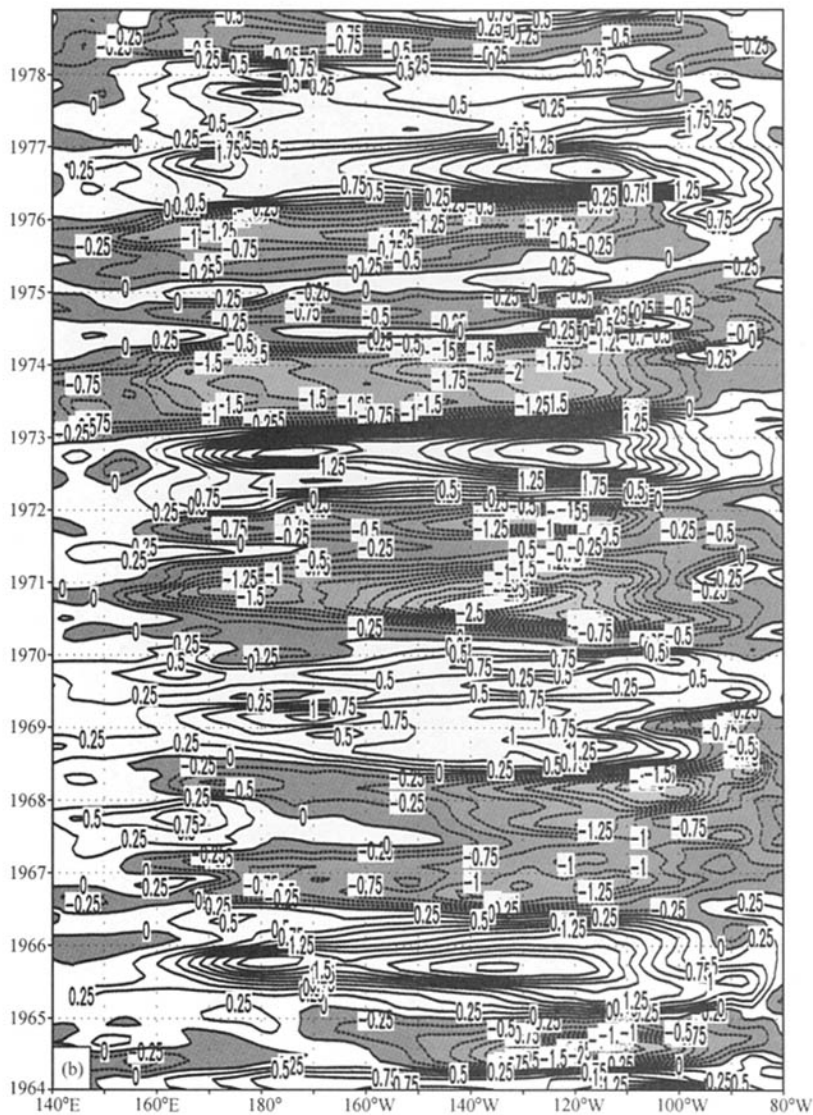


图 2 (续) Fig. 2 (Continued)

图 4、图 5 分别对应着 1972 年和 1982~1983 年 El Niño 的赤道纬向风异常, SSTA 和 SOTA 的时间-经度剖面。对于 1972 年的 El Niño 事件。赤道西太平洋在 1970 年冬季开始出现西风异常, 并加强东移, 在 1971 年 2、3 月越过日界线, 到了 1971 年底西风异常已经达到 $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上, 最强可达 $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。图 4b 给出的暖池次表层海温正异常的出现及东移与赤道西太平洋地区西风异常的出现及东移几乎一致, 只是越过日界线的时间要提前一些, 而图 4c 中海表面温度 (SST)

正异常的出现及东移要比前两者滞后。对于 1982~1983 年的 El Niño 事件也有类似的情况, 1980 年底赤道西太平洋开始出现西风异常, 并加强东移, 到了 1981 年 4、5 月越过日界线, 1981 年底最强时可达 $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上。图 5b 中的暖池次表层海温 (SOT) 正异常的出现与东移和 1972 年的情况不同, 它要滞后西风异常东移大约 1 年, 而图 5c 中暖池 SST 正异常的演变又滞后于 SOT 正异常的变化。

由以上的比较分析, 我们可以看出, 赤道西

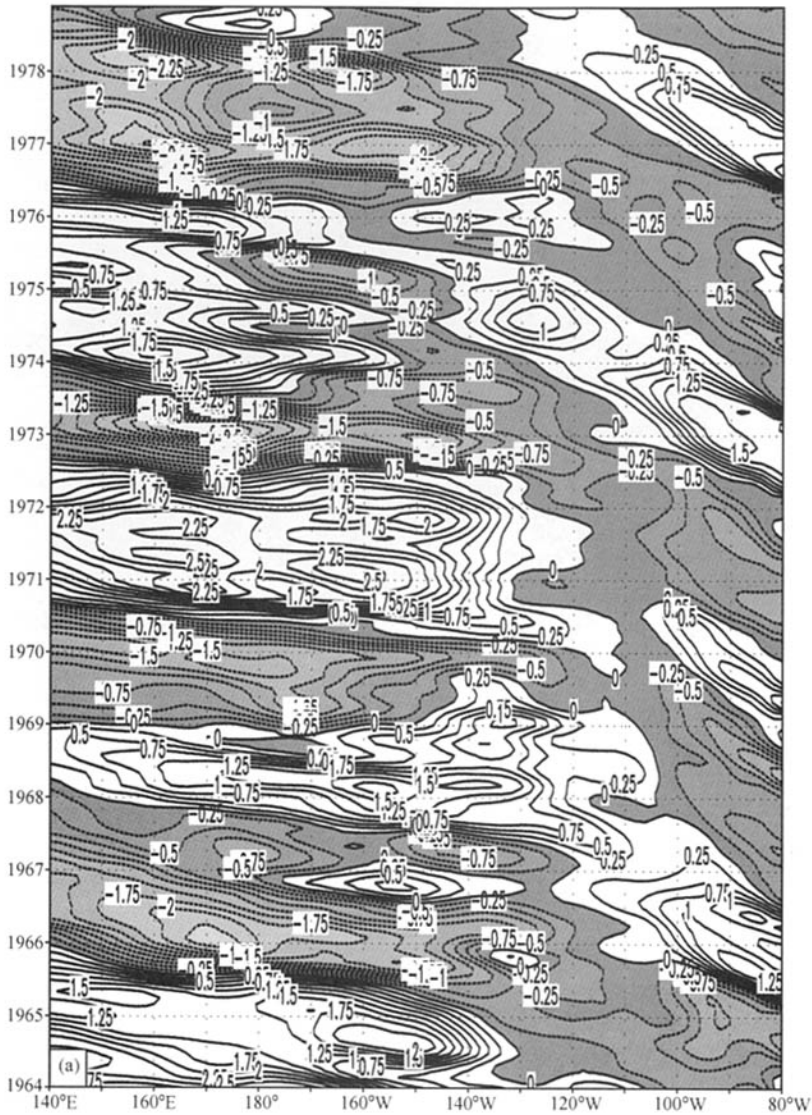


图 3 沿 7.5°N 海温异常的时间-经向剖面 (单位: °C, 等值线间隔 0.25 °C): (a) 135 m; (b) 海表面

Fig. 3 The longitude-time plots of oceanic anomalies along 7.5°N: (a) 135 m and (b) sea surface (the contour interval is 0.25 °C)

太平洋 SST 正异常的出现及东移落后于 SOT 正异常和西风异常的出现及东移, SOT 正异常的出现及东移和西风异常的出现和东移同时或滞后, 我们可以初步推测, 西风异常的出现及东移可能与 SOT 正异常的出现及东移有直接的关系。

5 El Niño 事件的合成分析

本节中, 我们对 El Niño 年的大气和海洋变

量进行合成分析。在 1964~1993 年中, 共有 8 次 El Niño 发生, 它们分别是 1965、1968~1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991 和 1993 年。若以 Niño 3 区 SSTA 大于 0.5 °C 为标准, 模式对 1968~1969 年 El Niño 事件没能反映出来, 因此我们把这一次和 1993 年的 El Niño 事件去掉, 综合分析其他 6 次的大气和海洋的综合结构。

图 6、7、8 分别给出了 El Niño 前一年、当

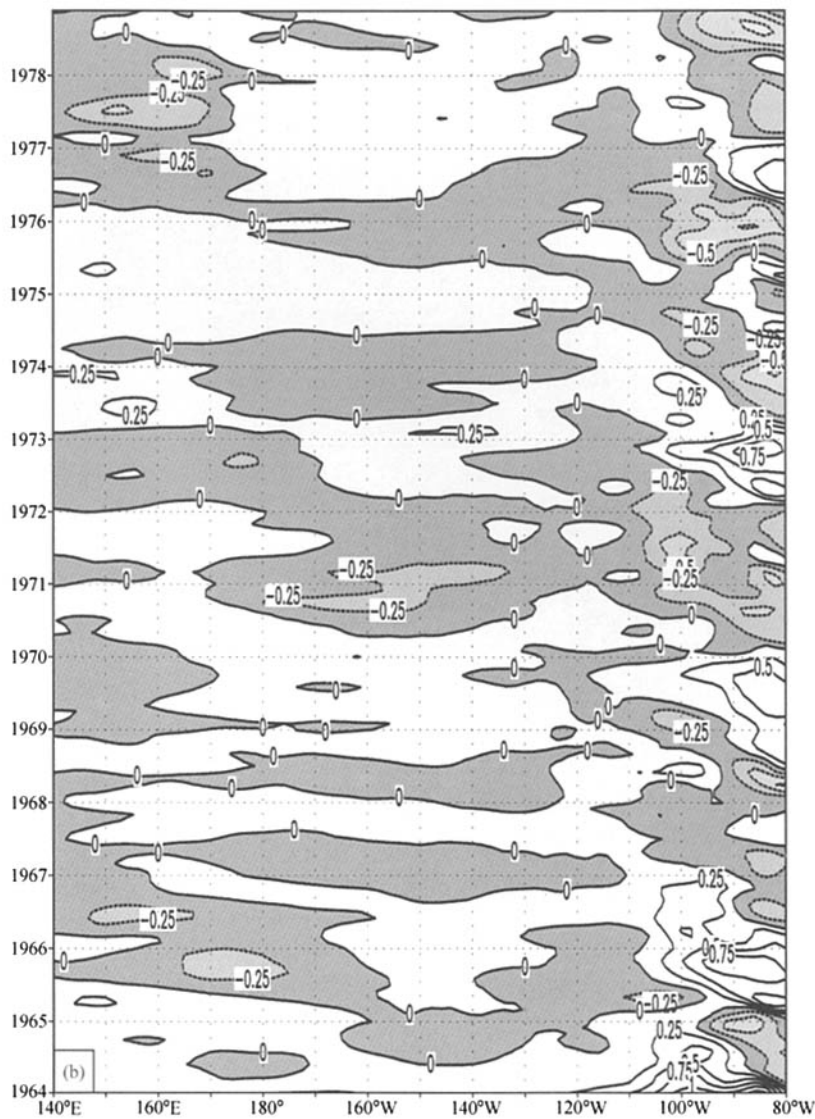


图 3 (续) Fig. 3 (Continued)

年、后一年的风场异常及 SSTA、SOTA (135 m) 的水平分布。在 El Niño 前一年，赤道太平洋 (5°S~5°N) 之间出现较强的异常东风，在西北、西南太平洋各有一气旋性的环流，在东北太平洋出现北风异常，这对应着热带辐合带 (ITCZ) 的北移。在海温异常中，次表层的强度要比表层大，在赤道西太平洋，SOT 被较大的正异常占据，正异常甚至延伸到中太平洋，而 SST 则有较弱的正异常出现且范围较小。在赤道中、东太平洋，无论 SOT 还是 SST 都出现较强的负异常，但 SOTA

要更强一些。在赤道太平洋外的形式与赤道反相，但强度远远不及赤道内的。在 El Niño 年，赤道太平洋前一年的东风异常转变为强的西风异常，西北、西南太平洋的气旋性环流西移；东北太平洋的 ITCZ 南移至赤道。在海温的异常演变中，赤道太平洋出现明显的海温正距平，强中心位于东太平洋，SOTA 与 SSTA 的强度大致相当，但 SOTA 在西太平洋也有一个强中心。在赤道外，情况与赤道相反，SOTA 有较大的负异常，而 SSTA 负异常非常弱。在 El Niño 后一年，赤道内

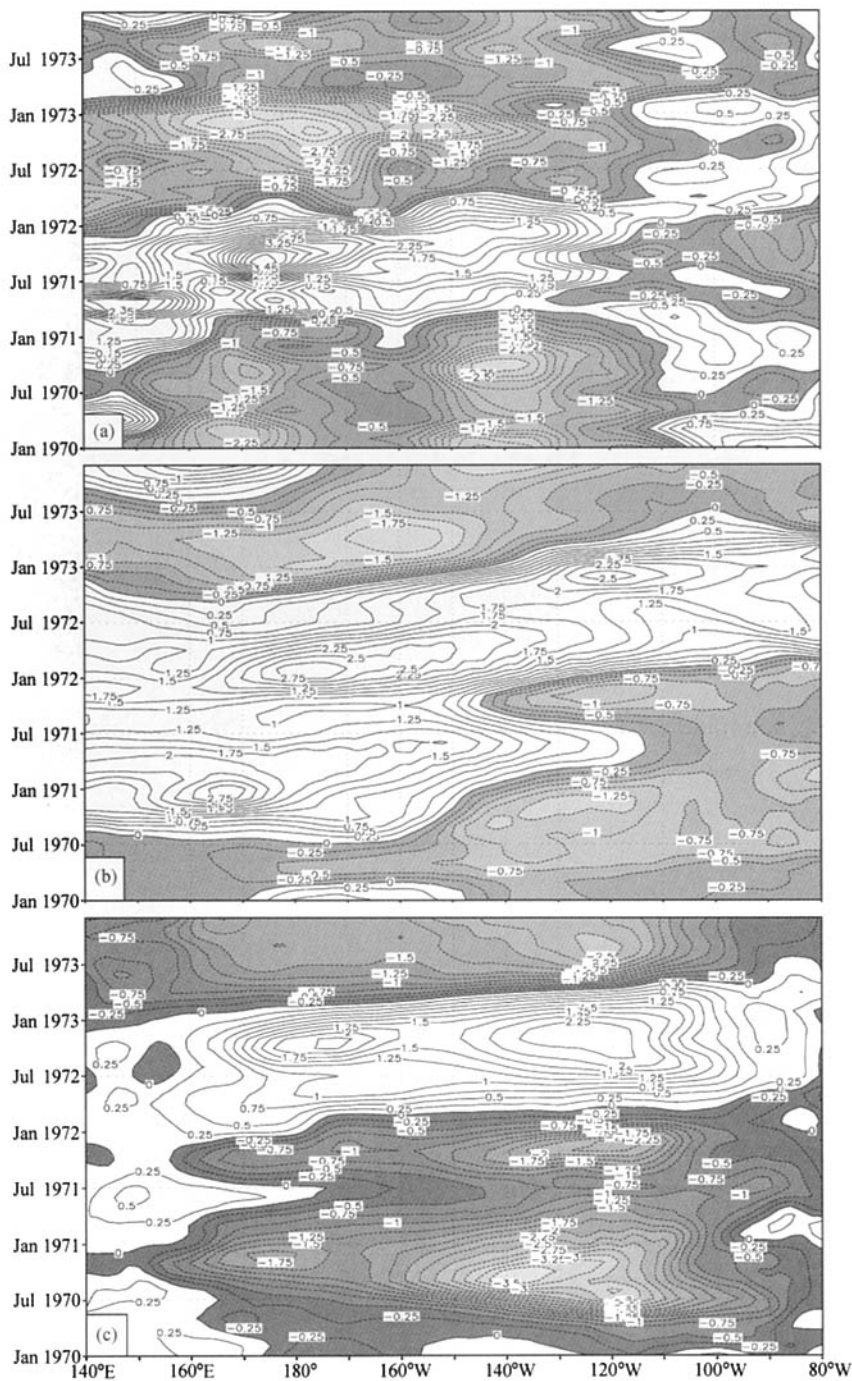


图4 1970~1973年期间赤道太平洋(5°S~5°N)的(a)纬向风异常(等值线间隔0.25 m · s⁻¹)、(b)SOTA(135 m)和(c)SS-TA的时间-经向剖面(等值线间隔0.25 °C)

Fig. 4 The longitude-time plots of (a) zonal wind anomalies in the tropical Pacific (5°S–5°N) (the contour interval is 0.25 m · s⁻¹), (b) subsurface oceanic temperature (135 m) (c) sea surface temperature anomalies from 1970–1973 (The contour interval is 0.25 °C)

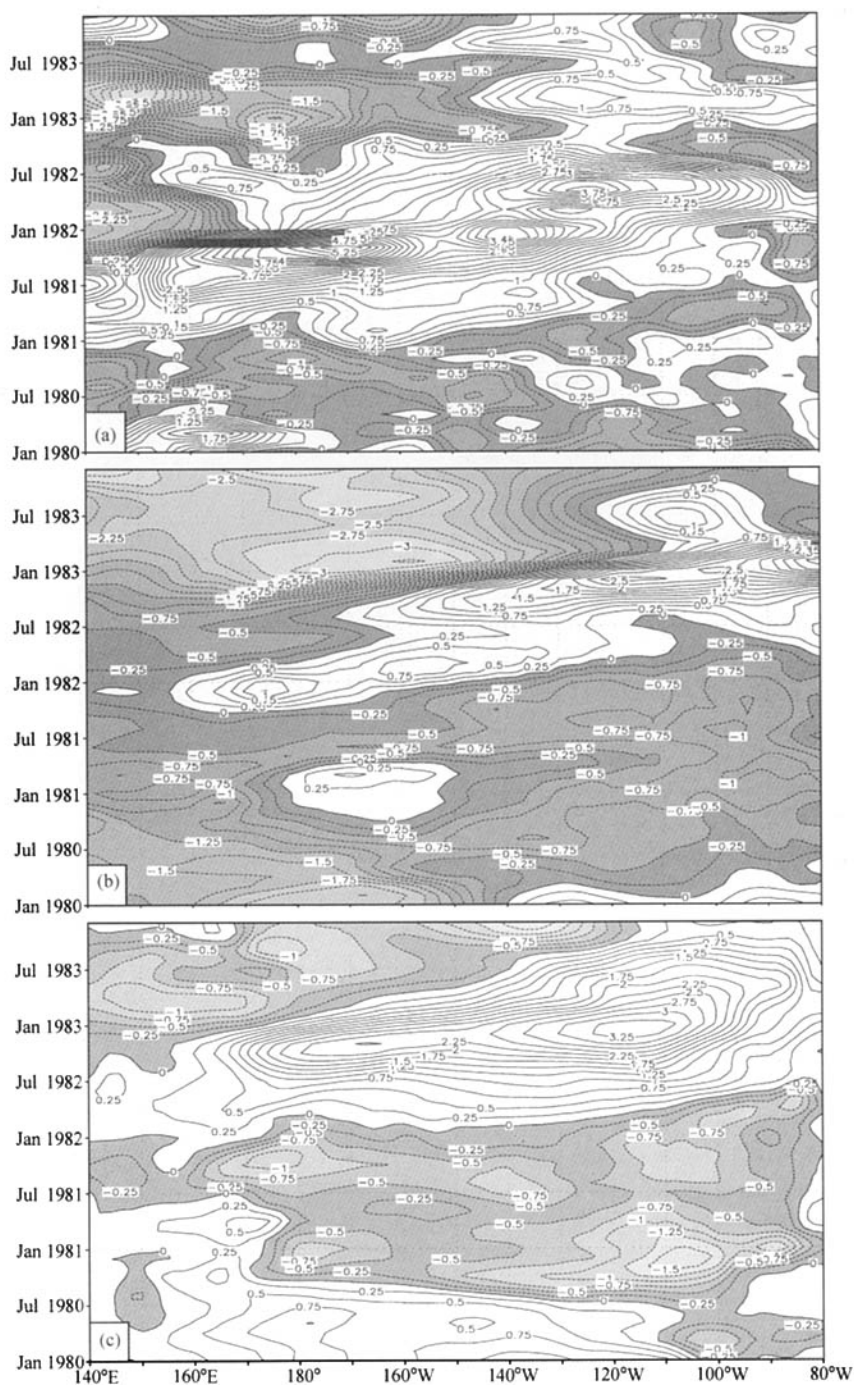


图 5 1980~1983 年期间赤道太平洋 (5°S~5°N) 的 (a) 纬向风异常 (等值线间隔 $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)、(b) SOTA (135 m) 和 (c) SSTA 的时间-经向剖面 (等值线间隔 $0.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 5 The longitude-time plots of (a) zonal wind anomalies in the tropical Pacific (5°S–5°N, the contour interval is $0.25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) subsurface oceanic temperature (135 m), (c) sea surface temperature anomalies from 1980–1983 (the contour interval is $0.25 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

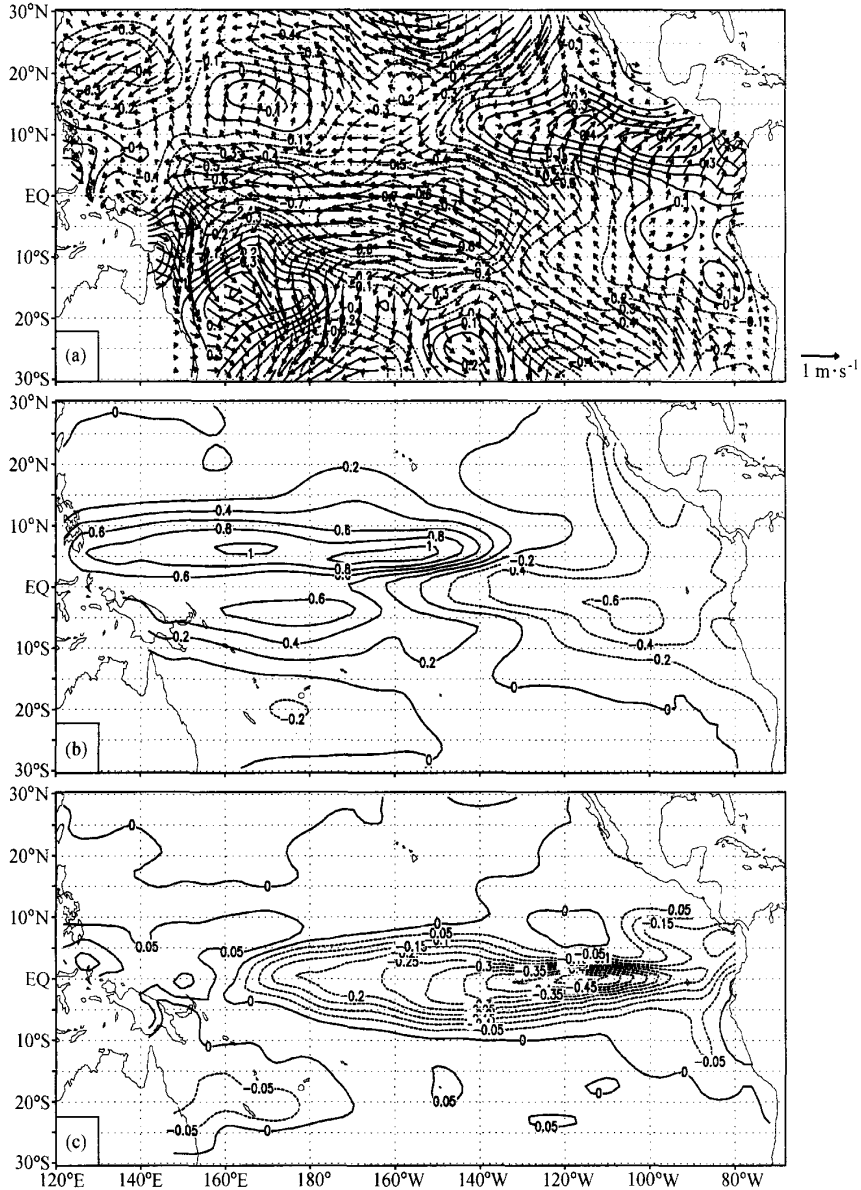


图 6 1964~1993 年 El Niño 前一年水平结构: (a) 风场异常 (等值线为纬向风异常, 间隔 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) SOTA (135 m, 等值线间隔 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$); (c) SSTA (等值线间隔 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 6 The horizontal distribution of (a) wind anomalies (the contour interval is $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) subsurface oceanic temperature anomalies (135 m, the contour interval is $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), (c) sea surface temperature anomalies (the contour interval is $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in the year before the El Niño year from 1964 to 1993

的西风异常被东风异常代替, 西北太平洋的气旋性环流东撤, 而西南太平洋的气旋性环流继续西移到东太平洋; ITCZ北撤至 10°N 附近。SSTA出现了与 El Niño 前一年相似的分布, 而 SOTA 的分布与前一年反相。

从以上的分析中, 我们可以看到, 风场异常

与海温异常有很好的对应关系, 异常东风对应着海温负异常, 而异常西风对应着海温正异常, 但通常 SOTA 的强度比 SSTA 的要大。在 SOTA 的纬向分布中, 赤道内、外是反相的, 这与 ENSO 循环机制相一致。

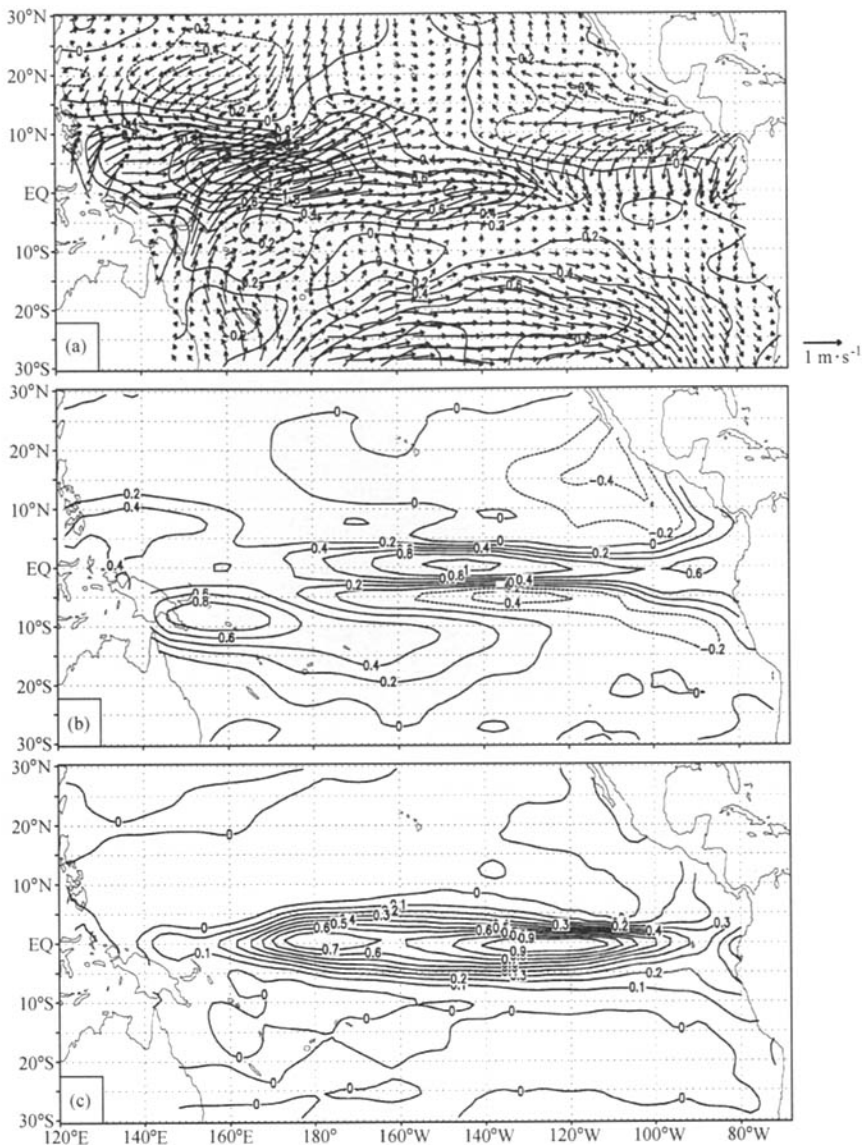


图 7 1964~1993 年 El Niño 当年水平结构：(a) 风场异常（等值线为纬向风异常，间隔 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）；(b) SOTA (135 m，等值线间隔 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$)；(c) SSTA（等值线间隔 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ）

Fig. 7 The horizontal distribution of (a) wind anomalies (the contour interval is $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) subsurface oceanic temperature anomalies (135 m) (the contour interval is $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), (c) sea surface temperature anomalies (The contour interval is $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in the year of the El Niño year from 1964 to 1993

6 结语

本文利用中国科学院大气物理研究所发展的 14 层热带太平洋环流模式，使用 1964~1993 年共 30 年逐月平均的 NCEP/NCAR 热带太平洋再分

析风应力以及多年气候平均的 COADS (The Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set) 按 Haney 公式计算的热通量强迫该模式。对热带太平洋地区与 El Niño 有关的年际变化进行了研究，主要结论如下：

(1) SSTA 与 SOTA 年际变化的关系。在

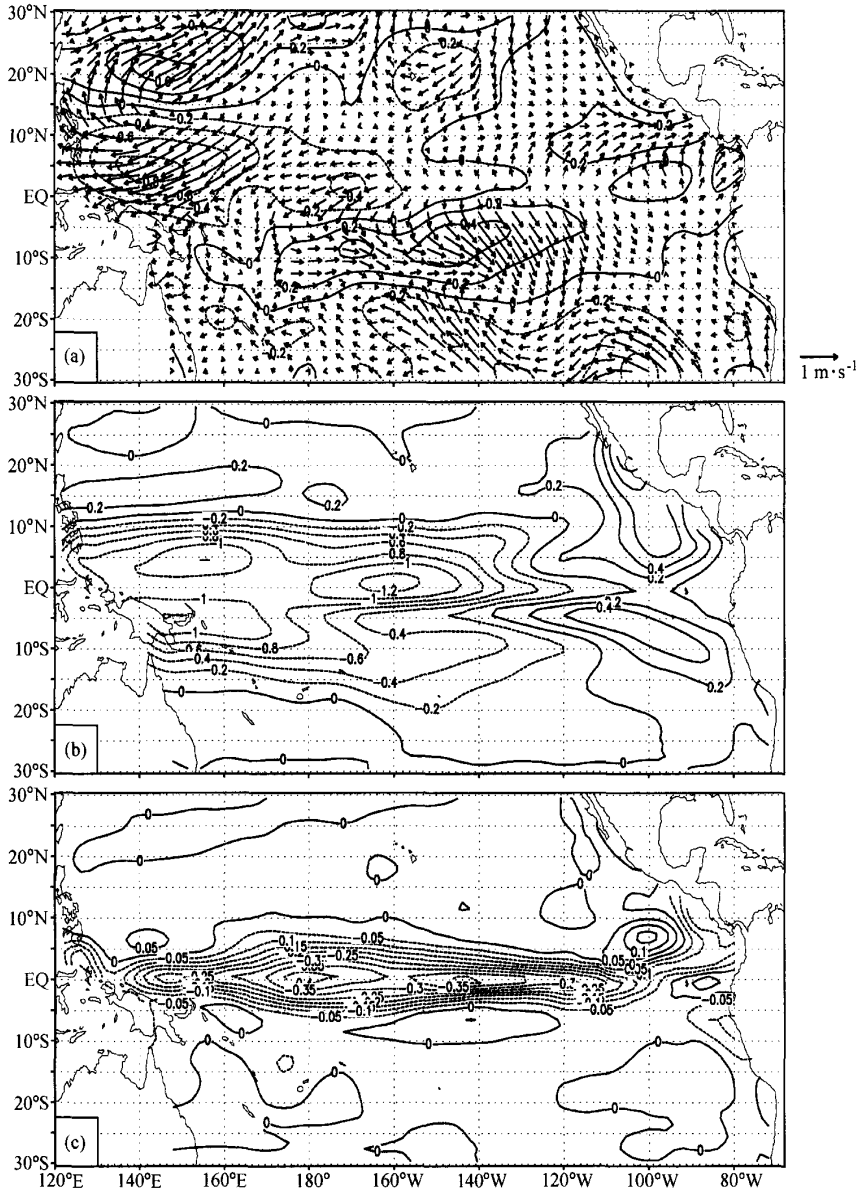


图 8 1964~1993 年 El Niño 后一年水平结构: (a) 风场异常 (等值线为纬向风异常, 间隔 $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) SOTA (135 m, 等值线间隔 $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$); (c) SSTA (等值线间隔 $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$)

Fig. 8 The horizontal distribution of (a) wind anomalies (The contour interval is $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$), (b) subsurface oceanic temperature anomalies (135 m, the contour interval is $0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$), (c) sea surface temperature anomalies (the contour interval is $0.05 \text{ }^{\circ}\text{C}$) in the year after the El Niño year from 1964 to 1993

El Niño 事件之前, 西太平洋暖池的次表层海温都有明显正异常出现, 它的东传导致了 El Niño 的发生, 并且 SOTA 的传播随纬度变化, 沿赤道东传, 在赤道外西传。

(2) 西风异常与 SSTA 和 SOTA 的关系。赤道西太平洋 SST 正异常的出现及东移落后于 SOT

正异常和西风异常的出现及东移, SOT 正异常的出现及东移与西风异常的出现和东移同时或滞后, 西风异常的出现及东移可能与 SOT 正异常的出现及东移有直接的关系。

(3) El Niño 事件海气变量异常的综合分析。风场异常与海温异常有很好的对应关系, 异常东

风对应着海温负异常, 而异常西风对应着海温正异常, 但通常 SOTA 的强度比 SSTA 的要大。在 SOTA 的纬向分布中, 赤道内、外是反相的, 这与 ENSO 循环机制相一致。

本文综合分析了热带太平洋地区与 El Niño 有关的年际变化, 揭示了西风异常与 SOTA 和 SSTA 在年际变化上的关系, 这些结果与许多观测分析的结果一致, 但这仅仅是风场异常的初步结果, 对与年际变化密切相关的其他因子的作用, 还需进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Wyrski K. El Niño-the dynamic response of equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing. *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**: 572~583
- [2] Philander S G, Yamagata T, Pacanowski R C. Unstable air-sea interaction in the tropics. *J. Atmos. Sci.*, 1984, **41**: 604~613
- [3] Suarez M J, Schopf P. A delayed action oscillator for ENSO. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 3283~3287
- [4] 李崇银, 穆明权. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. *大气科学*, 1998, **22**: 481~490
Li Chongyin, Mu Mingquan. Numerical simulations of anomalous winter monsoon in the east Asia exciting ENSO. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1998, **22**: 481~490
- [5] 李崇银, 穆明权. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常. *大气科学*, 1999, **23**: 513~521
Li Chongyin, Mu Mingquan. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, **23**: 513~521
- [6] Cane M A, Zebiak S E. A theory for El Niño and the Southern Oscillation. *Science*, 1985, **321**: 827~832
- [7] Schopf P S, Suarez M J. Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**: 549~566
- [8] Neelin J D. A hybrid coupled general circulation model for El Niño studies. *J. Atmos. Sci.*, 1990, **47**: 674~693
- [9] Zhang R H, Levitus S. Interannual variability of the coupled tropical Pacific Ocean-Atmosphere System associated with the El Niño-Souther Oscillation. *J. Climate*, 1996, **10**: 1312~1330.
- [10] Zhou Guangqing, Zeng Qingcun. Prediction of ENSO with a coupled atmosphere-ocean general circulation model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18** (4): 587~601
- [11] 严邦良, 黄荣辉, 张人禾. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 II. 模式结果分析. *大气科学*, 2001, **25**: 160~172
Yang Bangliang, Huang Ronghui, Zhang Renhe. Dynamical role of zonal wind stresses over the tropical Pacific in the occurring and vanishing of El Niño. Part II: analyses of modeling results. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**: 160~172
- [12] 俞永强, Antoine Izard, 张学洪, 等. IAP/LASG 海洋环流模式对风应力的响应. *大气科学*, 2001, **25**: 721~739
Yu Yongqiang, Antoine Izard, Zhang Xuehong, et al. A response of IAP/LASG oceanic general circulation model to the observed wind stress. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25**: 721~739
- [13] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [14] Zhang R H, Endoh M. A free surface general circulation model for the tropical Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97** (C7): 11237~11255
- [15] Zhang R H, Endoh M. Simulation of the 1986-1987 El Niño and 1988 La Niña events with a free surface tropical Pacific Ocean general circulation model. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99** (C4): 7743~7759
- [16] 张人禾, 黄荣辉. El Niño 事件发生和消亡中热带太平洋纬向风应力的动力作用 I. 资料诊断和理论分析. *大气科学*, 1998, **22**: 587~599
Zhang Renhe, Huang Ronghui. Dynamical role of zonal wind stresses over the tropical Pacific in the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1998, **22**: 587~599
- [17] 李崇银. 关于 ENSO 本质的进一步研究. *气候与环境研究*, 2002, **7**: 160~174
Li Chongyin. A further study of essence of the ENSO. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7**: 160~174