

关于 ENSO 本质的进一步研究*

李崇银

P425 A

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

摘 要 基于 ENSO 是热带太平洋海气相互作用产物的科学观点, 一系列的分析研究表明: 赤道太平洋次表层海温异常 (SOTA) 有明显的年际变化 (循环), 并且与 ENSO 发生密切相关; 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) SOTA 沿赤道温跃层东传到东太平洋, 导致 El Niño (La Niña) 的爆发; 在暖池正 (负) SOTA 沿赤道温跃层东传的同时, 将有负 (正) SOTA 沿 10°N 和 10°S 两个纬度带向西传播, 从而构成 SOTA 的循环; 热带太平洋 SOTA 年际循环的驱动者主要是由异常东亚季风所引起的赤道西太平洋纬向风的异常。进而, 可以提出关于 ENSO 本质的一种新理论, 即 ENSO 实质上主要是由异常东亚季风引起的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年际循环。

关键词: ENSO 循环; 东亚季风异常; 纬向风异常; 次表层海温异常; 年际循环

1 引言

通过一系列的研究, ENSO (El Niño-La Niña) 已被认为是年际气候变化的最强信号; 而且它的发生往往给全球不少地方造成严重洪涝或干旱灾害, 从而受到全世界的普遍关注^[1-3]。为了搞清 ENSO 发生的原因, 国外科学家相继提出了关于 ENSO 产生机制的所谓信风张弛理论^[4], 不稳定海洋波动理论^[5,6]和延迟振子理论^[7,8]。我国学者在这方面也作了一些研究, 并指出赤道海洋 Rossby 波对 ENSO 的产生也有重要作用^[9]。上述研究虽然各自都能部分地解释 ENSO 的发生和演变特征, 但 ENSO 发生的确切原因仍未真正搞清楚, 对 ENSO 的预测也就尚处试验阶段。

根据“ENSO 是热带太平洋海气相互作用的产物”的观点^[10], 我们很早就一直强调大气环流异常在激发 ENSO 中也有重要作用。指出了持续的强 (弱) 东亚冬季风将导致赤道西太平洋地区的持续西 (东) 风异常和强 (弱) 大气季节内振荡, 通过海气相互作用它们对激发 El Niño (La Niña) 有重要作用^[11,12]。用大气环流模式 (GCM) 所作的数值模拟试验也证明, 强 (弱) 东亚冬季风所引起的热带异常通过海气相互作用, 可以在春夏开始激发出赤道东太平洋海面温度 (SST) 的正 (负) 距平, 或者说激发出 El Niño (La Niña)^[13]。

最近, 基于对新出的 JEDAC (Joint Environmental Data Analysis Center, USA) 海温资料和 NCEP (the National Center for Environmental Prediction) 再分析资料的分析研究, 我们发现西太平洋暖池次表层海温的正 (负) 异常及其向东传播与 El Niño

2002-02-20 收到

* 本研究得到国家重点基础研究发展规划项目 G1998040903 资助

(La Niña) 的发生有直接关系^[14]; 海气耦合模式的数值模拟也得到完全一致的结果^[15]。进一步分析还提出了东亚冬季风—暖池状况—ENSO 相互作用的新观念^[16]。

用 JEDAC 海温资料和 NCEP 再分析资料, 进一步分析研究了热带太平洋海区次表层海温的异常及其演变规律, 揭示了它们与 ENSO 循环的联系, 以及与赤道西太平洋纬向风异常和东亚冬季风异常的关系, 初步提出了一个关于 ENSO 本质的新看法: ENSO 实际上主要是由东亚季风异常造成的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。

2 El Niño (La Niña) 的发生与西太平洋暖池次表层海温的异常

为了搞清西太平洋暖池次表层海温距平 (SOTA) 与 El Niño 和 La Niña 的关系, 图 1 给出了西太平洋暖池区域 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 次表层 (120~160 m) 海温异常 (SOTA) 及 Niño 3 区海面温度异常 (SSTA) 的时间演变。从图 1 可以清楚地看到在 1964~1993 年期间, 每次 El Niño 事件 (例如 1965、1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991 年 El Niño) 爆发之前的半年到两年的时间内, 都有明显的 SOTA 正距平在暖池出现; 同时也能看到, 在 La Niña (例如 1967、1970、1973、1975、1984、1988 年 La Niña) 爆发前, 暖池区次表层海温都有明显的负距平出现。而在 El Niño (La Niña) 事件发生之后, 西太平洋暖池区域的 SOTA 却变为负 (正) 距平。当 El Niño (La Niña) 处于最强盛时, 西太平洋暖池 SOTA 将为最大负 (正) 距平。因此计算可得到西太平洋暖池次表层海温异常与 Niño 3 区 SSTA 基本上是一种反位相关系, 其相关系数为 -0.74。

为了进一步揭示暖池 SOTA 与 Niño 3 区 SSTA 的演变特征, 我们对 1965~1993 年间 6 次 El Niño 事件 (1968~1969、1972、1976、1982~1983、1986~1987、1991 年) 和 6 次 La Niña 事件 (1967、1970、1973、1975、1984、1988 年) 分别进行了合成分析 (图略)。其结果表明, El Niño 和 La Niña 都在春季发生, 年末达到最强。因

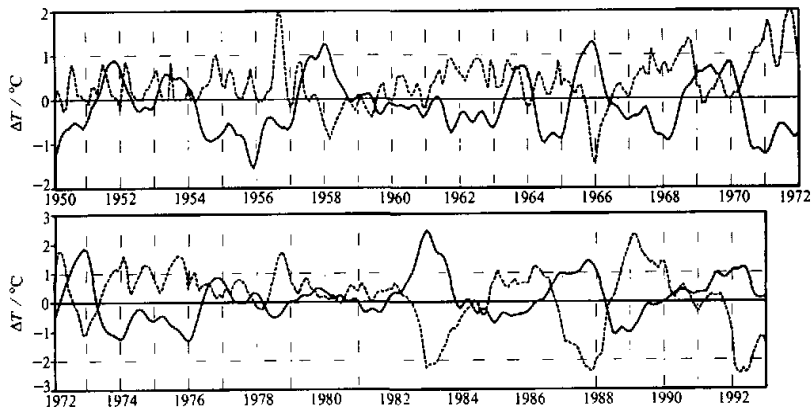


图 1 西太平洋暖池 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E}\sim 180^{\circ}$) 次表层海温异常 (虚线及 Niño 3 区 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$) 海面温度异常 (实线) 随时间的演变

此, 本文所指事件的当年就是事件发生年也是爆发年, 并由此可确定其前一年及后一年的情况。对于 El Niño 事件的合成结果, 在 El Niño 发生之前的近一年半时间里, 西太平洋暖池 SOTA 一直为正距平, 最大值可达正 1.5°C 以上, 而事件爆发后, 西太平洋暖池 SOTA 为负距平。对于 La Niña 事件的合成, 其异常形势基本上与 El Niño 的相反。也就是说, 在 La Niña 事件发生之前, 西太平洋暖池 SOTA 为持续的负值; 当 La Niña 事件爆发后, 又转为正距平。因而, El Niño 事件和 La Niña 事件爆发前后, 暖池次表层海温异常与 Niño 3 区 SSTA 几乎完全反相。

分析一个热带太平洋海气耦合模式的长期模拟结果, 也清楚表明有同观测十分类似的演变特征。图 2 给出了海气耦合模式模拟的西太平洋暖池 SOTA 和 Niño3 区 SSTA 的时间演变。图 2 清楚地表明: 在每次 El Niño (La Niña) 发生前, 西太平洋暖池区都先期有 SOTA 的正 (负) 异常存在; 而当每次 El Niño (La Niña) 发生后, 西太平洋暖池区又将出现负 (正) 的 SOTA。因此, 由资料分析和数值模拟的结果可以认为, 西太平洋暖池区正 (负) SOTA 的出现是 El Niño (La Niña) 发生的重要前兆。

JEDAC 海温资料和 NCEP 再分析资料的分析研究进一步表明, 西太平洋暖池区正 (负) SOTA 的出现是 El Niño (La Niña) 发生的前提条件, El Niño (La Niña) 爆发的直接原因是暖池区正 (负) SOTA 沿赤道温跃层东传到东太平洋及其向表层的扩展^[14]。

3 ENSO 循环的个例分析

1997 年初夏爆发了 20 世纪最强的一次 El Niño 事件, 而早在此次 El Niño 发生之

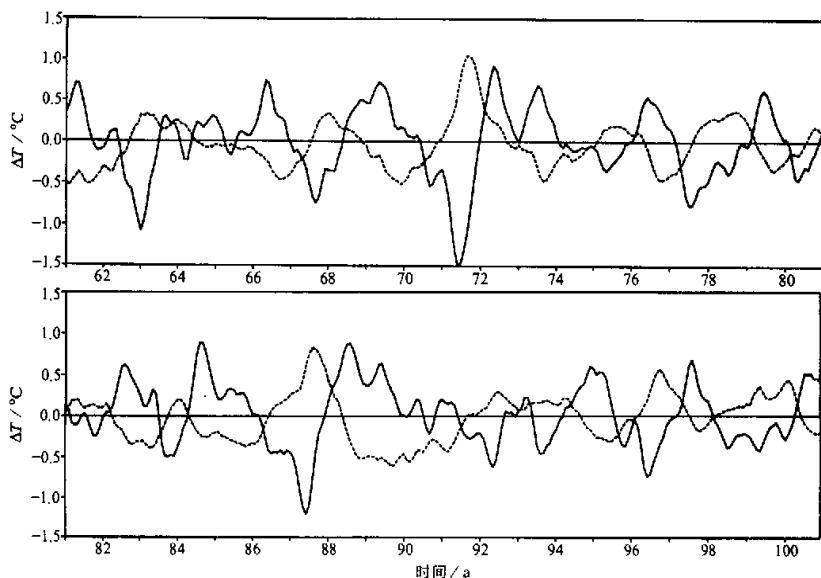


图 2 海气耦合模式模拟的西太平洋暖池 SOTA (虚线) 和 Niño3 区 SSTA (实线) 的时间演变^[15]

前, 西太平洋暖池已有极明显的 SOTA, 暖池区 SOTA 正距平沿温跃层东传到赤道东太平洋并向表层的扩展是 El Niño 事件爆发的直接原因; 当 El Niño 事件发生后, 暖池区的 SOTA 又出现负值, 其后, 暖池区 SOTA 负距平的向东传播和在赤道东太平洋的向表层扩展, 又导致了 1988 年 La Niña 的发生^[15,16]。但是, 进一步的分析可以清楚看到, 在暖池 SOTA 正距平沿赤道温跃层向东传播, 或者说是 El Niño 事件的形成过程中, 沿 10°N (主要在 $10\sim 13^{\circ}\text{N}$) 和 10°S 两个纬度带有 SOTA 负距平在温跃层向西传播 (其中以沿 10°N 纬度带的西传更清楚), 并逐渐从赤道西太平洋扩展到暖池区, 形成暖池区的 SOTA 负距平。类似地, 在西太平洋暖池 SOTA 负距平沿赤道温跃层东传和 La Niña 的形成过程中, 在 10°N 和 10°S 两个纬度带又有 SOTA 正距平的向西传播, 并逐渐从赤道西太平洋扩展到暖池区, 形成暖池区的 SOTA 正距平。换句话说, ENSO (El Niño-La Niña) 循环实际上也可认为是热带太平洋次表层海温距平沿赤道及 10°N 和 10°S 两个纬度带的循环。

是什么因素导致上述这种循环呢? 我们在文献[15]和[16]中已经指出, 东亚冬季风持续异常所引起的赤道西太平洋地区纬向风的异常是直接的重要原因。而且国外的研究也表明, 1997 年 El Niño 的发生与东亚中纬度地区大气环流异常 (实际就是冬季风异常) 有关^[17], 无疑也给出了东亚冬季风异常可激发 ENSO 的另一个例证。

为了清楚地了解 1997~1998 年 ENSO 期间热带太平洋次表层海温距平的循环过程及其与赤道西太平洋西风异常和东亚冬季风异常的关系, 我们分析了 1996~1998 年热带太平洋海温及其上空大气的各月平均异常形势, 但因篇幅有限, 图 3 仅分别给出了 1996 年 11 月、1997 年 2 月、1997 年 6 月和 1997 年 9 月东亚和太平洋地区的月平均 850 hPa 经向风距平 (VA), 850 hPa 纬向风距平 (UA), 热带太平洋 SOTA 和 SSTA 的形势及变化。其中 SOTA 取了大致沿温跃层的值, 平均来讲热带太平洋的温跃层是西深东浅, 故暖池区取为 160~120 m 厚度层之均值, 中东太平洋取为 120~80 m 之均值, 东太平洋取为 80~40 m 之均值。可以看到, 1996 年 11 月赤道东太平洋有零星 SSTA 负距平; 而在西太平洋暖池有 SOTA 正距平, 赤道东太平洋次表层主要为 SOTA 负距平所控制 (图 3a)。其后, 暖池 SOTA 正距平加强并东传, 1997 年 2 月虽然赤道东太平洋仍为 SSTA 负距平, 但 SOTA 正距平已东传到赤道东太平洋; 而且还可以看到在 10°N 和 10°S 两个纬度已开始有 SOTA 负距平西传 (图 3b)。1997 年 6 月 El Niño 已经爆发, 赤道东太平洋为强 SSTA 正距平; SOTA 正距平也主要在赤道东太平洋, 西太平洋 10°N 海区已有明显 SOTA 负距平 (图 3c)。到 1997 年 9 月, El Niño 已十分强盛, 赤道东太平洋 SSTA 已达 4°C 以上, SOTA 正距平更高; 而在热带西太平洋 SOTA 负距平也十分明显 (-4°C 以下)。在 10°N 纬度仍有 SOTA 负距平带存在, 这可能是 SOTA 负距平沿 10°N 西传较慢之故 (图 3d)。对应上述热带太平洋次表层海温及表层海温的异常, 大气环流的异常也很显著, 并且其开始时间超前海温异常。1996 年 11 月中国大陆东部及西北太平洋沿岸地区有异常北风, 赤道西太平洋为异常东风控制 (图 3a)。到 1997 年 2 月, 中国大陆东部及西北太平洋沿岸地区仍持续有异常北风, 而异常北风的范围已扩展到赤道西太平洋; 原本在赤道西太平洋的异常东风已东退到赤道中太平洋, 异常西风已控制赤道西太平洋 (图 3b)。其后, 异常北风区有所东移, 赤道西太平洋的异常西风加强并东传。到 1997 年 6 月, 异常北风已减弱, 但赤道

西太平洋的异常西风已扩展到赤道东太平洋(图3c)。1997年9月,中国大陆东部出现了异常南风,130°E以西的赤道西太平洋及中国南海地区则出现了异常东风。

上述分析十分清楚地表明,在El Niño的生成和发展阶段,暖池有SOTA的正距平存在且明显沿赤道向东传播,并扩展到赤道东太平洋海表,形成SSTA正距平和El Niño;而SOTA正距平的沿赤道东传直接与赤道西太平洋的西风异常相联系;并且在赤道西太平洋西风异常之前,东亚沿海及西北太平洋地区一直有持续的北风异常,表明东亚冬季风持续偏强。还有一个十分明显的现象是在SOTA正距平沿赤道东传的同时,有SOTA负距平在10°N和10°S两个纬度带沿温跃层向西传播,然后在暖池区形成SOTA负距平区,并取代原来的SOTA正距平。也就是说,伴随着El Niño的发生,热带太平洋的SOTA正距平由暖池沿赤道东传到赤道东太平洋,而原在赤道东太平洋的SOTA负距平同时沿10°N和10°S两个纬度带向西传到暖池区,构成一个循环过程。但这里仅给出了SOTA正距平由暖池沿赤道东传的情况,对ENSO而言只能是半圈循环,而这半圈循环直接与赤道西太平洋的西风异常和持续的强东亚冬季风相联系。

类似图3,分析1997年12月、1998年2月、1998年5月和1998年8月的月平均异常形势,可以看到由El Niño向La Niña转变的情况(图略)。我们将看到在暖池有负SOTA沿赤道东传,并在赤道东太平洋扩展到海表,形成了负SSTA和La Niña。而SOTA负距平沿赤道的东传直接与赤道西太平洋的东风异常相联系;并且在赤道西太平洋出现东风异常之前东亚冬季风持续偏弱,有南风异常。同时,在SOTA负距平沿赤道东传的时候,有SOTA正距平沿10°N和10°S两个纬度带向西传播,并逐渐在暖池区形成SOTA正距平区,这个暖池SOTA正距平又为下一次ENSO循环准备了条件。很显然,这里表现了SOTA负距平由暖池沿赤道东传,而SOTA正距平沿10°N和10°S两个纬度带西传的另半圈循环。将这里的分析结果与图3结合在一起,就构成了一个完整的热带太平洋SOTA的循环及ENSO循环。对于SOTA的循环,即SOTA正(负)距平沿赤道东传,而SOTA负(正)距平沿10°N和10°S两个纬度带西传,赤道西太平洋纬向风的异常起着重要作用。因此也可以认为,东亚冬季风持续偏强(弱)所导致的赤道西太平洋西(东)风异常,分别驱动了暖池SOTA正(负)距平沿赤道东传。

对近50年历次ENSO循环的分析都表明有上述1997~1998年ENSO的演变形势。图4给出了1988年La Niña的演变情况,不仅可以清楚看到暖池SOTA负距平沿赤道东传并在赤道东太平洋扩展到海表,从而形成La Niña,也可以看到SOTA正距平沿10°N和10°S两个纬度带由赤道东太平洋向西传播到赤道西太平洋的过程。这些传播过程与赤道西太平洋的东风异常和弱的东亚冬季风直接有关。因此,主要由异常东亚冬季风导致的赤道西太平洋纬向风异常所驱动的热带太平洋次表层海温异常的循环,确实存在的一种气候系统的年际变化现象。

已有研究表明,异常海温沿赤道东传主要是赤道西太平洋异常纬向风所激发的异常海洋Kelvin波的作用^[18,19];而异常海温沿10°N和10°S两个纬度带的西传,既有海洋Rossby波的作用也有赤道洋流的作用,具体过程和动力学还需进一步研究。

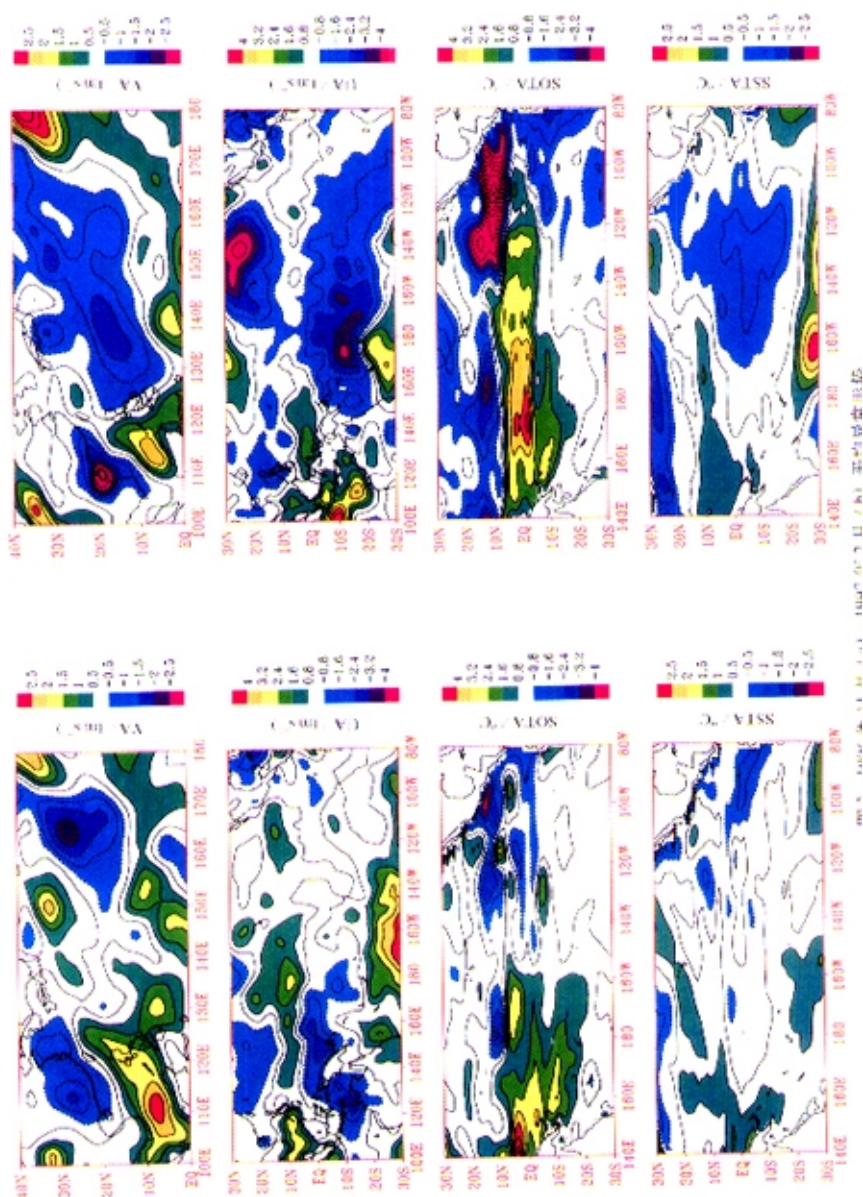


图3 1996年11月(a)、1997年2月(b)平均异常形势

VA: 东亚和太平洋850 hPa经向风距平; UA: 热带太平洋850 hPa纬向风距平;
SOTA: 热带太平洋次表层海温距平; SSTA: 热带太平洋表层水温距平

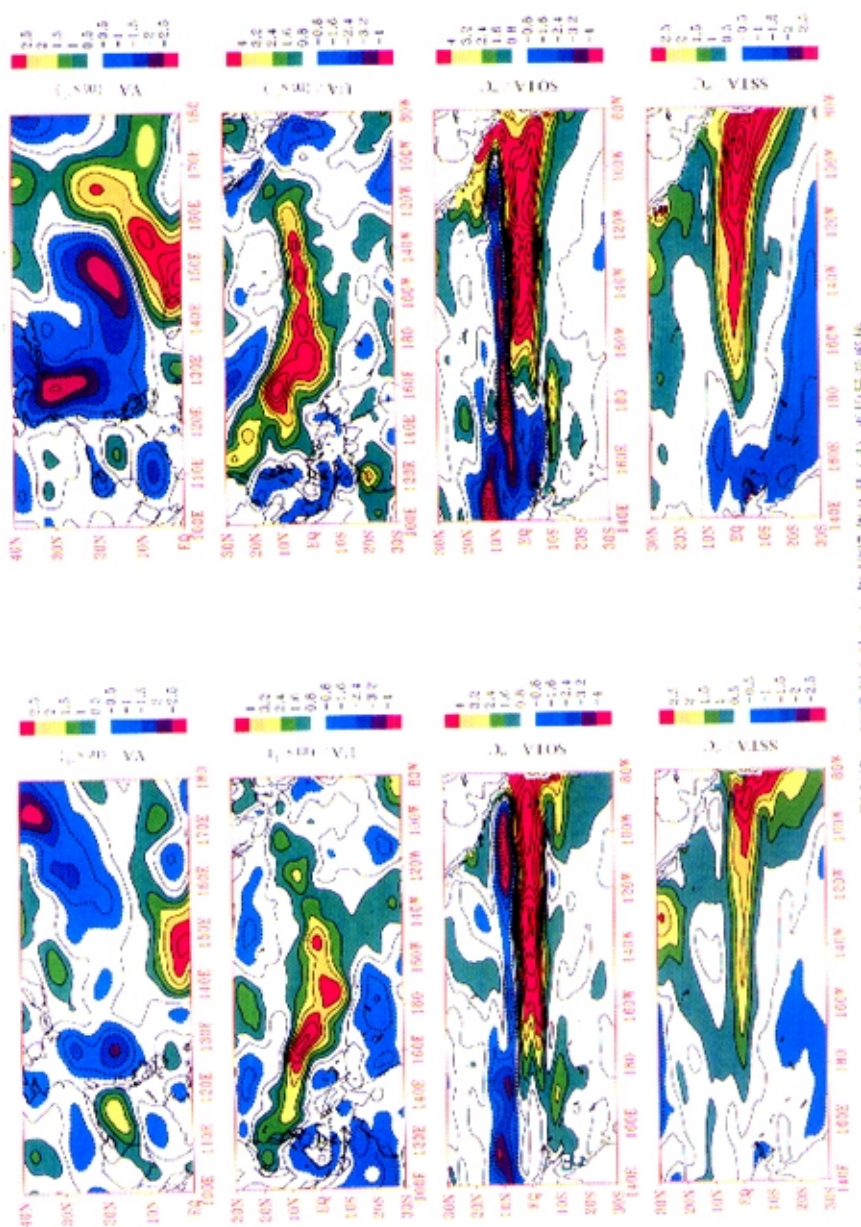


图 3(续) 1997 年 6 月 (c) 和 1997 年 9 月 (d) 平均异常形势

VA: 东亚和太平洋 850 hPa 经向风距平; UA: 热带太平洋 850 hPa 纬向风距平;
SSTA: 热带太平洋次表层海温距平; SSS: 热带太平洋表层水温距平

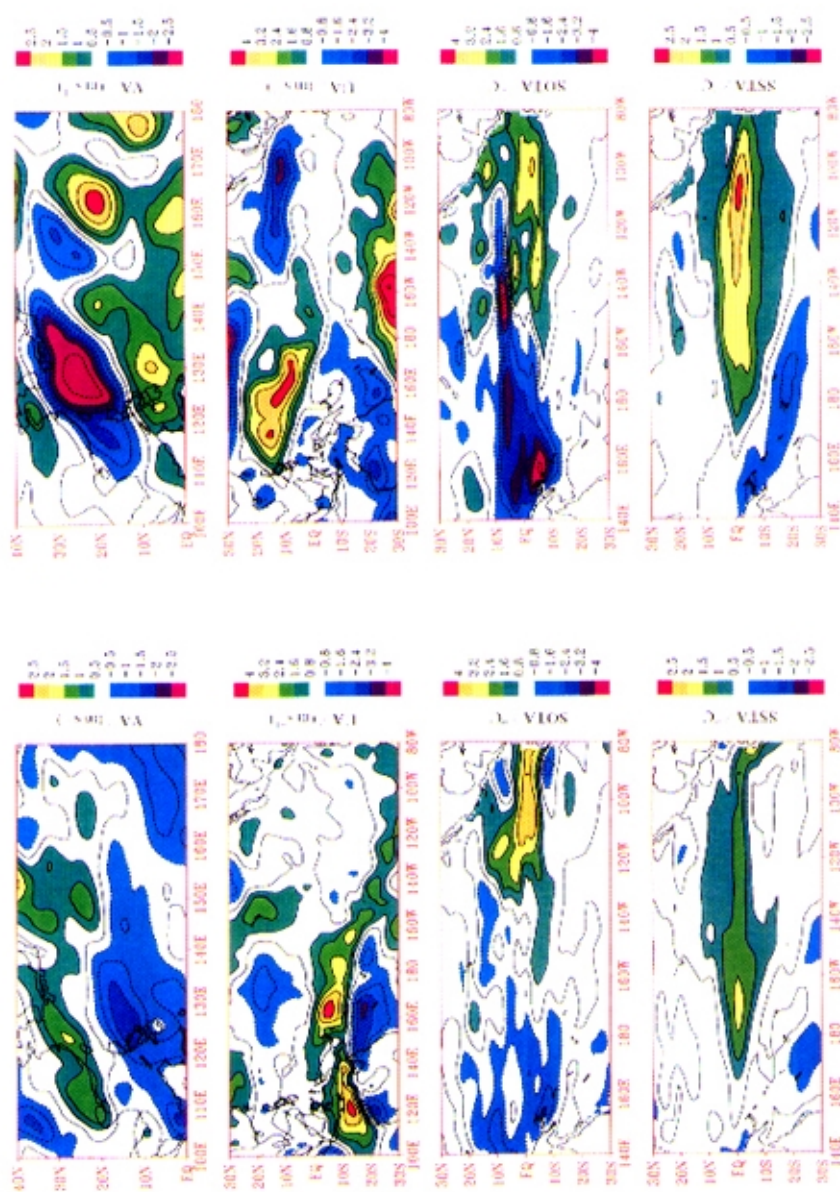


图 4 同图 3, 和为 1987 年 2 月 (a), 1987 年 9 月 (b) 情况

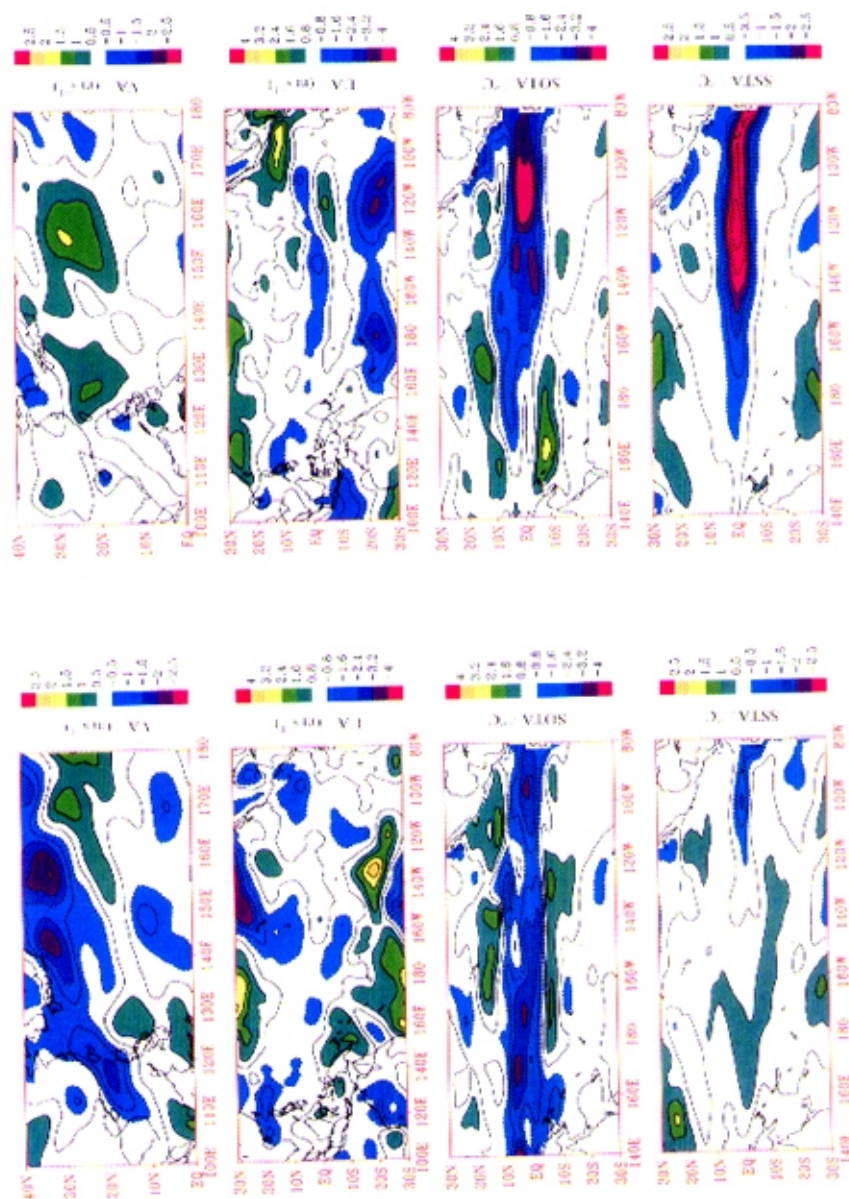


图 4(续) 同图 3, 但: 1988 年 2 月 (c) 和 1988 年 6 月 (d) 情况

4 SOTA 循环的时间剖面分析

在上一节的各个个例分析中我们可以初步看到 ENSO 循环实际上是热带太平洋次表层海温异常的一种循环, 而且在那里主要表明了这种循环与持续的赤道西太平洋纬向风异常和异常东亚季风 (主要是冬季风) 的关系。为了更清楚地看到热带太平洋次表层海温异常的循环特征, 在图 5 中分别给出了 1979~1993 年沿赤道 (C) 和沿 10°N 纬带 (A) 的 SOTA 时间-经度剖面, 以及西太平洋 SOTA 的时间-纬度剖面 (B)。为方便, 我们从 C 中 1981 年开始看, 可清楚看到有 SOTA 正距平由暖池区 ($140^{\circ}\sim 180^{\circ}\text{E}$) 东传, 并于 1982 年夏在赤道东太平洋形成强正距平, SSTA 也在那里出现强正距平; 然后正距平沿 10°N 纬带西传 (A) 并于 1984 年到达西太平洋, 其后南传 (B) 到赤道西太平洋。后来, 在赤道西太平洋暖池区的 SOTA 正距平, 从 1985 年又开始东传 (C), 1986 年夏在赤道东太平洋形成 SOTA 正距平, 并导致 1986 年的 El Niño。同样, SOTA 负距平也有完全类似的循环过程, 并形成 1984 年和 1988 年的 La Niña (冷事件)。

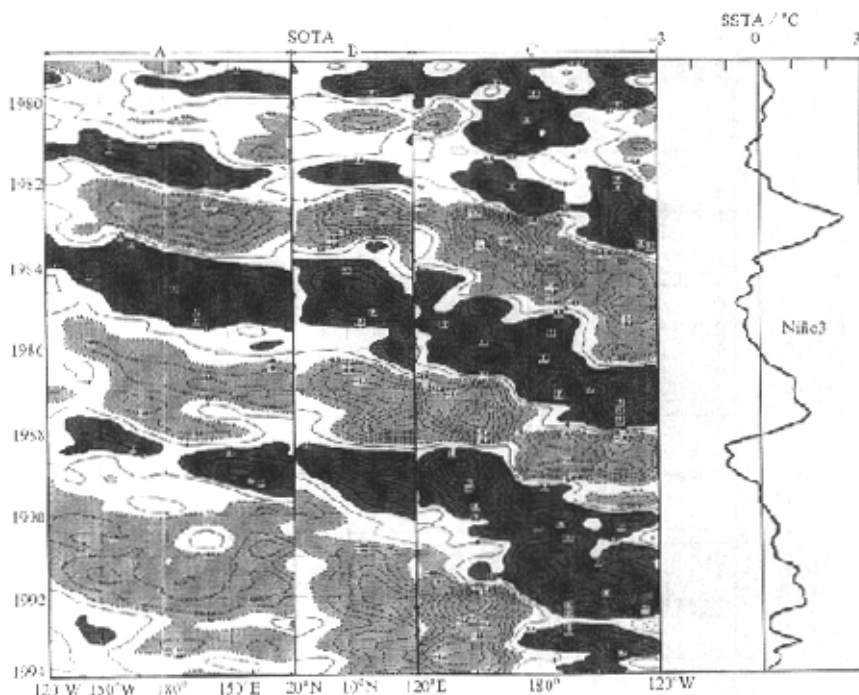


图 5 太平洋 SOTA 沿赤道 ($6^{\circ}\text{N}\sim 6^{\circ}\text{S}$ 平均) (C) 和沿 10°N ($10^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{N}$ 平均) 纬带 (A) 的时间-经度剖面 and 西太平洋 ($120^{\circ}\sim 160^{\circ}\text{E}$ 平均) SOTA 的时间-纬度剖面 (B) 以及 Niño3 区 SSTA 的时间变化 (右图)

图5仅给出了SOTA沿赤道和沿 10°N 纬带的传播情况,分析沿赤道和 10°S 纬带的SOTA传播情况也有类似的结果。因此它们再次清楚地表明,ENSO(El Niño-La Niña)循环实际上是热带太平洋次表层海温异常沿赤道和 $10^{\circ}\text{N}/10^{\circ}\text{S}$ 两个纬带作年际循环在赤道东太平洋的反映。热带太平洋次表层海温异常最强的海区是西太平洋暖池区,但那里温跃层比较深(150~200 m),与之相对应的SSTA并不大;然而赤道东太平洋温跃层比较浅(30~50 m),SOTA在那里与SSTA近乎一样。因此对于ENSO来讲,在赤道东太平洋反而会观测到更大的SSTA。就SSTA而论,用赤道东太平洋海表温度异常来定义ENSO循环也是自然的;但是,如果就热带太平洋SOTA而论,ENSO的真正源是在西太平洋暖池次表层。

5 异常东亚季风驱动赤道太平洋次表层海温距平循环的概念模型

为了进一步说明异常东亚冬季风导致的赤道西太平洋纬向风异常对热带太平洋次表层海温异常的循环所起的驱动作用,图6给出了东亚冬季风异常、赤道西太平洋纬向风异常、正SOTA东传的合成分析(对1950~1995年间的所有El Niño)结果。可以看

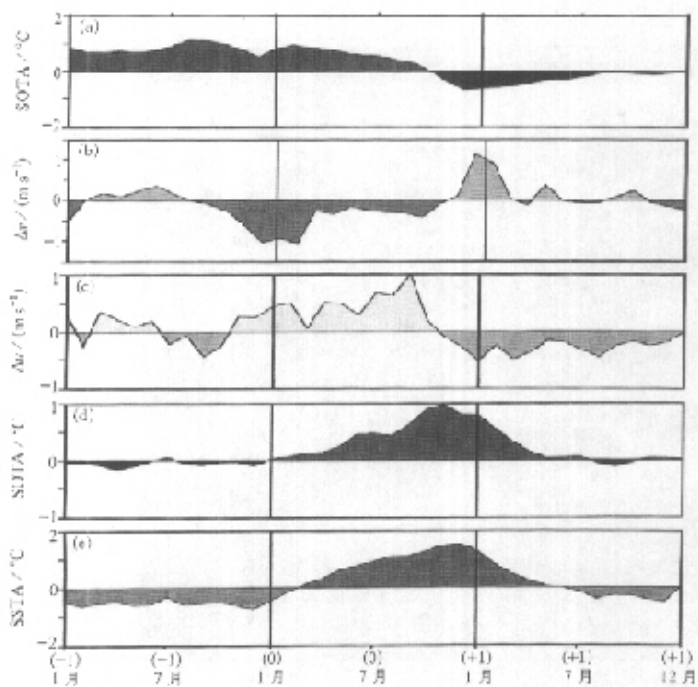


图6 对El Niño事件的合成分析结果

(a) 西太平洋暖池区的SOTA; (b) 西北太平洋地区($25^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $120^{\circ}\sim 140^{\circ}\text{E}$)的经向风异常; (c) 赤道西太平洋的纬向风异常; (d) 赤道东太平洋($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $170^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{W}$)的SOTA; (e) Niño 3.4区的SSTA

到, 在 El Niño 事件 (图 6c) 发生之前, 正 SOTA 已东传到赤道东太平洋 (图 6d); 在更前一些时间的冬季, 已先后有西北太平洋的北风异常 (图 6b) 和赤道西太平洋的西向风异常 (图 6c); 而在赤道西太平洋暖池区却早有持续的正 SOTA 存在 (图 6a)。合成分析结果表明, 异常东亚冬季风导致的赤道西太平洋西向风异常对热带太平洋表层海温正异常的东传和 El Niño 的产生有重要作用。

我们还分析了暖池次表层 (120~160 m 平均) 海温异常的东传与赤道西太平洋异常纬向风, 以及与西北太平洋地区 (20~30°N, 120~150°E) 异常经向风的时滞相关系数随时间的演变, 其结果如图 7 所示。图中横坐标是滞后的月份, 其负值表示 SOTA 东传到赤道东太平洋在东亚冬季风异常和赤道西太平洋纬向风异常之后发生。可以看到, 暖池次表层 SOTA 东传到赤道东太平洋与赤道西太平洋纬向风异常有明显正相关, 而与东亚冬季风异常有明显负相关。赤道西太平洋纬向风异常超前 2~3 个月有最大正相关, 而东亚冬季风异常超前 4~5 个月有最大负相关。

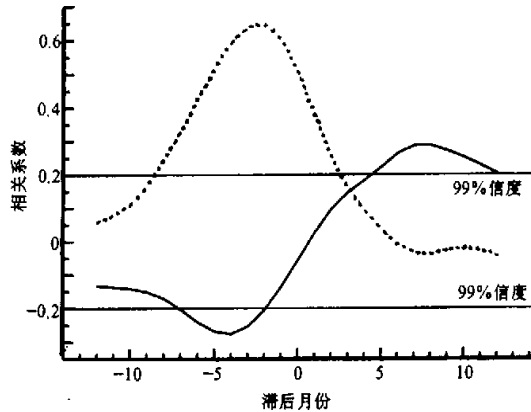


图 7 西太平洋暖池 SOTA 的东传与赤道西太平洋纬向风异常 (虚线), 以及与西北太平洋地区 (20~30°N, 120~150°E) 经向风异常 (实线) 的时滞相关系数随时间的演变^[20]

在上面几个个例分析及时间剖面分析的基础上, 我们还针对 1950 年以来的各次 El Niño 和 La Niña 分别进行了合成分析。ENSO 循环特征以及热带太平洋 SOTA 的循环和赤道西太平洋纬向风、东亚/西太平洋经向风的演变特征都十分类似图 3 和图 4 所给出的形势。因篇幅关系, 这里无法给出合成分析的各个结果 (El Niño/La Niña 的前一年、当年及后一年各月的形势), 只能根据那些结果简要地给出其示意图 (图 8)。但它完全反映了在主要由异常东亚季风所引起的赤道西太平洋异常纬向风驱动下热带太平洋 SOTA 的循环特征, 也就是 ENSO 循环的特征。

图 8 仅给出了最为典型和重要的 4 个形态, 图 8a 表明暖池区有正 SOTA, 而赤道东太平洋有负 SOTA, 对应着 El Niño 前期或由 La Niña 向 El Niño 的转变期 (一般为冬春季)。如果这时有异常的强东亚冬季风 (持续北风异常), 赤道西太平洋西部开始产生西风异常, 暖池正 SOTA 开始向东扩展。随着异常强东亚冬季风的影响, 赤道西太平洋整个出现西风异常, 在其驱动下, 正 SOTA 整个东传到赤道东太平洋, 并导致正 SSTa 和 El Niño (图 8b); 与正 SOTA 由暖池区东传到赤道东太平洋同时, 负 SOTA 沿 10°N 和 10°S 两个纬度带逐渐西传到赤道西太平洋, 并在那里形成主要的负 SOTA 中心; 图 8b 对应 El Niño 发展和成熟期 (一般为秋冬季)。图 8c 显示由 El Niño 向 La Niña 的转变期 (一般也为冬春季), 西太平洋暖池区有负 SOTA, 而赤道东太平洋为正

SOTA 控制。如果这时东亚冬季风持续偏弱（异常偏南风），将引起异常东风出现在赤道西太平洋的西部，暖池区负 SOTA 开始向东扩展。在持续的弱东亚冬季风影响下，赤道西太平洋整个出现东风异常，负 SOTA 沿赤道整个东传到赤道东太平洋，并导致负 SSTA 和 La Niña 的发生（图 8d）；与负 SOTA 由暖池东传的同时，正 SOTA 由赤道东太平洋沿 10°N 和 10°S 两个纬度带西传到西太平洋，并在那里形成正 SOTA 中心，图 8d 对应 La Niña 的发展及成熟期（一般也为秋冬季）。

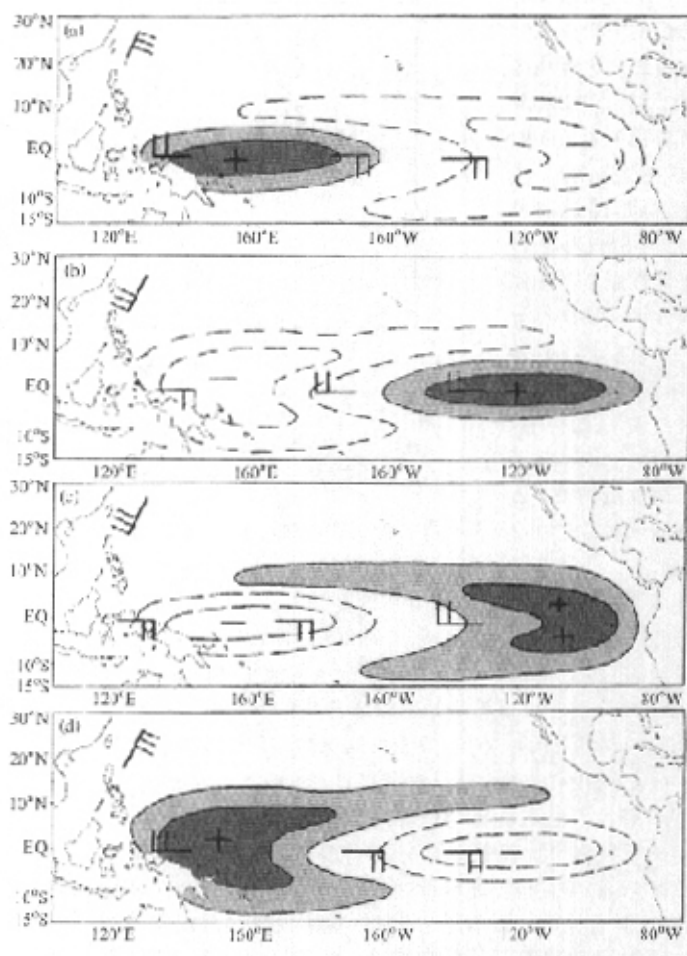


图8 异常东亚季风（风标）/异常赤道西太平洋纬向风（风标）驱动的热带太平洋 SOTA
（实线和虚线分别表示正、负距平）循环的概念模型

6 结语

在已有研究的基础上，根据 ENSO 是热带太平洋海气相互作用产物的观点，通过

对 JEDAC 海温资料和 NCEP 再分析资料等的分析研究, 可以归纳如下几点重要结果:

(1) El Niño (La Niña) 发生之前, 西太平洋暖池次表层的海温已有持续的正 (负) 距平 (SOTA) 存在; 而正 (负) SOTA 沿赤道温跃层东传到东太平洋是 El Niño (La Niña) 发生的直接原因。

(2) ENSO (El Niño-La Niña) 循环其实是热带太平洋 SOTA 沿赤道及沿 10°N 和 10°S 两个纬度带作年际循环在赤道东太平洋的一种表现。

(3) 热带太平洋 SOTA 的最强信号在西太平洋暖池区, 暖池区 SOTA 的动向又对 ENSO 循环起关键作用。因此, ENSO 循环的真正源区是西太平洋暖池次表层。

(4) 只有在赤道西太平洋纬向风异常的驱动下, 暖池区的 SOTA 才沿赤道温跃层东传, 赤道东太平洋的 SOTA 也才明显系统性西传。因此, 赤道西太平洋的纬向风异常是 SOTA 循环 (或 ENSO 循环) 的驱动力。

(5) 已有的一系列分析表明, 持续的强 (弱) 东亚冬季风异常是引起赤道西太平洋西 (东) 风异常的主要原因^[11,12,21], 本文的分析也清楚表明了这一点。因此, 相对国外的几种理论, 我们可以提出关于 ENSO 循环的新理论: ENSO 主要是东亚季风异常引起的赤道西太平洋纬向风异常所驱动的热带太平洋次表层海温异常的循环。

(6) 根据已有研究结果, 可以初步认为 SOTA 沿赤道东传主要是 Kelvin 波的作用, 而 SOTA 沿 10°N 和 10°S 两个纬度带的西传主要是 Rossby 波的作用; 当然, 洋流也有一定的作用。

最后, 我们还要指出, 已有的一系列分析研究已经表明, 赤道西太平洋的纬向风异常主要原因是东亚冬季风的异常, 有关的物理过程和动力学分析将在另文中专门讨论, 这里没有涉及。同时, 虽然本文强调了东亚冬季风的异常对赤道西太平洋的纬向风异常的重要作用, 但并不排除南半球中纬度大气环流 (澳大利亚冬季风) 异常的作用。最近几年还有一些研究表明, 东亚冬季风及其大气环流的异常具有持续性, 不仅表现在冬季或冬半年。在强 (弱) 东亚冬季风之后, 往往会跟着出现弱 (强) 的东亚夏季风^[22]。因此, 本文有时用了“东亚季风异常”一词, 本质上与过去研究论文中的“东亚冬季风异常”是一致的。

参 考 文 献

- 1 陈烈庭, 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响, 大气科学, 1977, 1, 1~12.
- 2 Rasmusson, E. M. and J. M. Wallace, Meteorological aspects of El Niño / Southern Oscillation, *Science*, 1983, 222, 1195~1202.
- 3 臧恒范, 王绍武, 赤道东太平洋水温对低纬大气环流的影响, 海洋学报, 1984, 6, 16~24.
- 4 Wyrtki, K., El Niño — the dynamic response of equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, 5, 572~583.
- 5 Philander, S. G., T. Yamagata and R. C. Pacanowski, Unstable air-sea interactions in the tropics, *J. Atmos. Sci.*, 1984, 41, 604~613.
- 6 Hirst, A. C., Unstable and damped equatorial modes in simple coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1986, 43, 606~630.
- 7 Suarez, M. J. and P. Schopf, A delayed action oscillator for ENSO, *J. Atmos. Sci.*, 1988, 45, 3283~3287.

- 8 Neelin, J. D., The slow sea surface temperature mode and the fast-wave limit. Analytic theory for tropical interannual oscillations and experiments in a hybrid coupled model, *J. Atmos. Sci.*, 1991, **48**, 584~606.
- 9 Zhang Renhe and Chao Jiping, Unstable tropical air-sea interaction waves and their physical mechanisms, *Adv. Atmos. Sci.*, 1993, **10**, 61~70.
- 10 Bierknes, J., Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Wea. Rev.*, 1969, **97**, 163~172.
- 11 李崇银, 赖繁强东亚大槽活动与El Niño的发生, 中国科学 (B辑), 1988, 667~674.
- 12 Li Chongyin, Interaction between anomalous winter monsoon in East Asia and El Niño events, *Adv. Atmos. Sci.*, 1990, **7**, 36~46.
- 13 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.
- 14 李崇银, 穆明权, ENSO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.
- 15 周广庆, 李崇银, 西太平洋暖池次表层海温异常与ENSO关系的CGCM模拟结果, 气候与环境研究, 1999, **4**, 346~352.
- 16 李崇银, 穆明权, 东亚冬季风、暖池状况-ENSO循环的关系, 科学通报, 2000, **45**, 678~685.
- 17 Yu, L. and M. Rienecker, Evidence of an extratropical atmospheric influence during the onset of the 1997-98 El Niño, *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**, 3537~3540.
- 18 Yamagata, T., On the recent development of simple coupled ocean-atmosphere models of ENSO, *J. Oceanogr. Soc. Japan*, 1986, **42**, 299~307.
- 19 黄荣辉, 付云飞, 戴晓云, 亚洲季风与ENSO循环相互作用, 气候与环境研究, 1996, **1**, 38~54.
- 20 Mu Mingquan and Li Chongyin, Interaction between subsurface ocean temperature anomalies in the western Pacific warm pool and ENSO cycle, *Chinese J. Atmos. Sci.*, 2000, **24**, 107~121.
- 21 Li Chongyin, Westerly anomalies over the equatorial western Pacific and Asian winter monsoon, Proceeding of International Scientific Conference on the TOGA Programme, 557~561, WCRP-91-WMO/TP, No. 17, 1985.
- 22 Sun Bomin and Sun Shuqing, The analysis on features of the atmospheric circulation in preceding winter for the summer drought and flooding in the Yangtze and Huaihe River valley, *Adv. Atmos. Sci.*, 1994, **11**, 79~90.

A Further Study of Essence of the ENSO

Li Chongyin

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

Abstract Based on a scientific viewpoint: The ENSO results from air-sea interaction in the tropical Pacific Ocean region, some analyses are completed with the JEDAC data and NCEP reanalysis data in this study. The results show that: The subsurface ocean temperature anomalies (SOTA) exist interannual cycle which is closely related to the ENSO; The occurrence of El Niño (La Niña) is directly associated with positive (negative) SOTA in the warm pool and its eastward propagation along the equatorial thermocline; Real originate of the ENSO is in warm pool of the equatorial western Pacific; The interannual cycle of SOTA in the tropical Pacific is driven by zonal wind anomaly over the equatorial western Pacific which is caused mainly by anomalous East-Asian winter monsoon. Further, a new theory on the ENSO cycle is advanced in this study, i. e., the ENSO is interannual cycle of SOTA in the tropical Pacific driven by zonal wind anomaly over the equatorial western Pacific which is caused mainly by anomalous East-Asian winter monsoon.

Key words: ENSO cycle; East-Asian monsoon anomaly; zonal wind anomaly; subsurface ocean temperature anomaly (SOTA); interannual cycle