

对 ENSO 循环机理的一些新认识*

张人禾

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

巢纪平

P4 A

(国家海洋局海洋环境科学和数值模拟重点实验室, 青岛 266003)

摘 要 近几年国内学者通过资料诊断、理论分析和数值试验, 对 ENSO 循环的机理提出了一些新的看法, 其中包括 El Niño 和 La Niña 的起源、与 ENSO 循环相联系的暖、冷水的传播过程, 热带西太平洋纬向风应力异常, 以及热带东太平洋经向风应力异常在 ENSO 循环中的动力作用等。作者介绍了我国在这些方面的一些研究成果。

关键词: El Niño; La Niña; ENSO 循环

1 引言

太平洋赤道附近表层海水的流动在相当程度上受风应力的驱动。由于大气低层盛吹偏东信风, 因而在太平洋赤道附近表层洋流向西流动, 在太阳辐射等过程作用下, 表层形成暖的海水。向西流动的洋流使大量暖海水在太平洋西边界表层堆积, 使得热带西边界次表层以上形成一个全球最暖的暖水团, 这就是通常所称的“暖池”。另一方面, 偏东信风使得赤道东太平洋表层海水产生离岸流动, 导致东边界次表层冷水上翻到海表, 与此同时, 赤道附近表层洋流也引起冷水上翻。在它们的共同作用下, 在表层形成一舌状的冷水, 通常称为赤道东太平洋“冷舌”。

El Niño 是指赤道东太平洋每隔几年海水异常增暖的现象。而当赤道东太平洋海面温度出现较大的负距平时, 则称发生了 La Niña 事件。在热带东南太平洋地区和热带西太平洋到印度洋地区, 大气中海平面气压场存在着跷跷板式的反相变化现象, 这种现象称为南方涛动^[1] (Southern Oscillation)。现代研究表明^[2], 大气和海洋中的这两种现象存在着内在的联系, 它们实际上是同一现象在两种介质中的不同表现, 并且它们不是一种事件, 而是一种循环, 因此, 统称为 ENSO (El Niño / Southern Oscillation) 循环。

ENSO 循环是年际气候变化中的最强信号, 它往往与大范围的大气环流异常变化相联系^[3~8]。我国学者的研究也表明, ENSO 循环对我国的天气和气候变化也有重要影响^[9~18]。因此, 对 ENSO 循环的研究, 在认识短期气候变化及其机理以及在短期气候的预测等方面具有重要的科学意义。在过去的几十年中, 国内外科学界对 ENSO 循环

2002-03-29 收到

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 (第一部分) 和国家自然科学基金资助项目 49975019 共同资助

的机理进行了大量的研究^[19~23],在对 ENSO 循环机理的认识方面取得了很大的进展。本文将着重讨论近几年来我国学者对 ENSO 循环机理的新认识。

2 El Niño/ La Niña 的起源

在 20 世纪 80 年代以前一直认为 El Niño 暖的海表温度信号首先出现在南美洲厄瓜多尔和秘鲁沿岸,然后正的海表温度距平向北发展到赤道两侧,再沿赤道向西扩展,如正的海面温度异常面积足够大,并能持续 6 个月以上高于 0.5℃ 的温度,即为一次 El Niño 事件。然而 1982/1983 年的 El Niño 事件,其初始的海表温度正距平首先出现在赤道中太平洋,然后向东扩展到东海岸,在当时形成一次有观测记录以来最强的一次 El Niño 事件。当时不少人认为这只是一次例外事件。国际热带海洋与全球大气实验计划(TOGA)的观测资料表明,1986/1987 年的 El Niño 事件的初始正距平海温也是先在西太平洋出现,并在温跃层深度有所反映,表明了 El Niño 的初始海温距平首先在西太平洋出现不是偶然的现象。10 年 TOGA 计划最重要的成绩是在热带太平洋布放了一系列浮标,并加上其他的海洋和气象要素观测,组成一个简称为 TAO 的观测阵列。就在 TAO 观测阵列初步建成和完善后,1997 年发生了 20 世纪最强的一次 El Niño 事件。国内外的科学家对资料分析后都表明^[24,25],初始的海表温度距平最早是在暖池出现的,然后海面温度正距平连同西风距平不断向东传播,并在传播过程中加强,特别是 20℃ 等温线也向东传播并加深。由此可见,过去由于热带西太平洋海洋观测资料太少、且资料质量差,影响了对 El Niño 事件全貌的认识。

穆明权和李崇银^[26]在对 1997/1998 年 El Niño 期间次表层海温异常分析^[25]的基础上,利用 1964~1993 年太平洋次表层海温资料,进一步分析研究了西太平洋暖池次表层海温异常与 ENSO 的关系,指出西太平洋暖池次表层(120~160 m)异常海温与赤道东太平洋暖池次表层(40~60 m)异常海温有一种反位相的“翘翘板”式变化现象。西太平洋暖池次表层海温发生异常后,这种异常信号会沿着赤道斜温层向东,并不断向东太平洋表层扩展,引起 ENSO 发生。当 ENSO 发生后,东太平洋海温异常会沿 10~20°N 向西传播,到西太平洋后向赤道扩展,在暖池区形成强的次表层海温异常。他们的研究结果表明,西太平洋暖池次表层异常海温与 ENSO 之间存在着明显的相互作用和相互联系。

巢清尘和巢纪平^[27]分析了从 1955~1998 年 44 年热带西太平洋次表层海温距平资料后指出,在这一期间共发生了 11 次 El Niño 事件,这些事件的初始海温正距平除 1994 年那次稍偏东外,其他都在“暖池”次表层 120 m 温跃层附近生成,发展到一定强度后,当西太平洋出现异常的持续西风距平时,暖的海温距平沿着气候的温跃层向东并向海表传播,经过 1 年左右的时间,传播到赤道东太平洋海表的 Niño3 海域(90~150°W, 5°S~5°N),形成通常认为的 El Niño 事件。进一步分析 1960~1999 年的 850 hPa 风场指出,在热带西太平洋西风距平爆发前,赤道东印度洋已经有距平西风持续维持了 2 年左右,然后距平西风快速地向东发展产生热带西太平洋的距平西风或真正的强西风,即产生了在西太平洋出现 El Niño 爆发不可缺少的条件之一。在这 40 年中,这一过程对所有的 El Niño 事件无一例外。同样的分析方法也用到这 44 年中的 La Niña

事件, 冷的海温距平也都首先在“暖池”的次表层形成, 然后沿着温跃层向东并向表层传播, 这时在热带西太平洋为东风异常。实际上, 在热带西太平洋出现东风异常前, 印度洋也早已是持续的东风异常。

这一分析结果无疑改变了过去认为 El Niño / La Niña 发生的源地是在赤道东太平洋的看法, 它们的源头事实上是在西太平洋暖池的次表层温跃层附近。即在那里形成后, 在一定的天气条件下 (西风或距平西风), 温度距平沿着温跃层传到东太平洋。由于东太平洋温跃层很浅, 已接近海表, 所以在没有次表层浮标或其他观测手段的情况下, 似乎 El Niño / La Niña 的源地是在美洲海岸附近。以后由于西风加强, 通过垂直混合及涌升流减弱, 使离开东海岸以西的赤道海域温跃层强的海温距平上升到海表, 于是看上去海表温度距平是由东向西发展的。

3 与 ENSO 循环相联系的暖、冷水的传播过程

形成 El Niño 的暖池次表层暖水是从那里来的, 它东传到赤道东太平洋后又到那里去了, 同样的问题也适用于 La Niña。而一般来讲, 一次 El Niño 过程完结后, 会紧跟一次 La Niña 过程, 两者之间有何联系的问题单从海洋变量在海表的变化是分析不出的, 但如果在温跃层面上来分析, 就可以有迹可寻。

分析 1994~1998 年温跃层曲面上温度距平的演变发现¹⁾: 1997/1998 年 El Niño 产生时, 在热带西太平洋暖池次表层 (120 m 附近) 的温度正距平, 是从 1994/1995 年 El Niño 在 Niño3 区的最大正距平信号传播或演变过来的。开始该温度正距平在 5~15°S 之间 (接近气候上南赤道洋流的位置) 逐渐西传, 最大正距平信号到达暖池后沿赤道转向东传, 在 1997 年 9 月到达 Niño3 区, 一次新的 El Niño 发生。当正的温度距平开始从暖池向东传播时, 一最大温度负距平信号在 Niño3 区出现, 并伴随赤道最大海温正距平信号的东传, 在其北部 (5~10°N) 最大温度负距平信号向西传, 于 1997 年 9~10 月之间到达暖池附近, 随之转向并东传, 到 1998 年底, 最大负距平信号到达 Niño3 区, 一次新的 La Niña 发生。而 El Niño 时期的温度正距平信号在 La Niña 发生前已随之转向, 在最大负距平信号的北部向西传向暖池。整个最大正距平信号的传播形成一似 8 的形状。分析表明, 1997/1998 这次完整的 El Niño / La Niña 事件中的冷、暖水主要在热带流系的温跃层附近形成并传播。

对 20 世纪 70 年代以来的 8 次 El Niño 事件和 7 次 La Niña 事件的分析表明²⁾, 水团也出现类似的运动“轨迹”。基本上每次 El Niño 事件或 La Niña 事件爆发以前, 海温正、负距平信号象一对双子座一样总是伴随对方的出现而出现, 或是温跃层面上当负距平信号沿赤道向东传播时, 正距平信号在北部 10°N 附近向西传播, 或是当正距平信号沿赤道向东传播时, 负距平信号在 10°N 向西传播, 同时在热带太平洋海盆东西边界附近, 从赤道北传到 10°N 附近, 或者在西边界附近从 10°N 附近南传到赤道。这样,

1) 果纪平, 袁绍宇, 果清生, 田纪伟, 热带西太平洋暖池次表层暖水的起源—对 1997/1998 年 ENSO 事件的分析, 大气科学, 2002 (即将发表)。

2) Chao Jiping, Yuan Shaoyu, Chao Qingchen and Tian Jiwei, The data analysis study on the evolution of El Niño / La Niña cycle, Adv. Atmos. Sci., 2002 (即将发表)。

El Niño 事件和 La Niña 事件构成一个环路, 并交替出现。当然各次循环所需的时间可以各不相同, 平均来说在 3~4 年左右。也有的年份, 这种循环过程虽然存在, 但正的海温距平强度较弱, 或负的海温距平强度较弱, 达不到 El Niño 或 La Niña 所需要的温度距平强度, 即 El Niño 或 La Niña“夭折”。这种情况的出现, 经常是因为大气环流条件不支持, 对于 El Niño 的“夭折”、往往是缺乏强的西风持续支持, 对 La Niña 的“夭折”往往是没有强的东风支持。资料分析表明, 在大多数情况下, 这样的环路多数发生在赤道以北。由此可知, 暖池不仅是距平暖水或冷水运动的必经之地, 而且也是距平暖水或冷水积聚的场所; El Niño 事件之后一般紧跟一次 La Niña 事件, 正、负距平信号的传播或运动规律如前所述; 海温距平信号沿南半球环路的传播或运动不如北半球环路清楚, 这显然是受大洋西部岛屿的影响。

4 热带西太平洋风应力与 ENSO 循环

Schopf 和 Suarez^[28]提出了延迟振子理论, 用来解释 ENSO 循环产生的物理原因。在这个理论中强调了海洋中自由波及其在边界的反射维持了 ENSO 循环。张人禾和黄荣辉^[29]分析了与 ENSO 循环相联系的纬向风应力场, 发现观测的纬向风应力异常主要出现在大洋的中西部。在中东太平洋海面温度开始升高之前, 赤道西太平洋已经出现西风应力异常。随着西风应力异常不断加大且向东传播, 赤道中东太平洋的海面温度不断升高; 当西风应力异常达到最大且其最大中心东传到日期变更线附近时, 赤道中东太平洋的海面温度达到最高。随着西风应力异常向东移, 在其西边的热带西太平洋出现了东风应力异常。赤道西太平洋的东风异常, 出现在赤道中东太平洋海面温度达到最高值之前, 随后东风应力异常不断加大并向东移动。随着东风应力异常的加强和向东移动, 赤道中东太平洋的正海面温度异常不断减弱, 直至海面温度正异常消失并出现负海面温度异常。

4.1 在维持 ENSO 循环中的动力作用

张人禾和黄荣辉所揭示的观测事实与延迟振子理论不同, 强调了首先出现在热带西太平洋的纬向异常风应力及其东传在维持 ENSO 循环中的重要性。他们的理论分析^[29,30]和数值试验^[31]结果表明, 热带西太平洋纬向风应力的变化及其东移与赤道东太平洋海面温度的变化存在着内在动力学联系, 并且纬向风应力东传时比其静止时所激发出的海洋 Kelvin 波有更大的强度^[29]。理论分析结果^[29]表明, 观测到的西风应力异常可以在海洋中产生 3 类过程, 造成赤道东太平洋海面温度的升高, 即东传西风应力异常激发的下沉 Kelvin 波, 它到达大洋东边界产生的反射下沉 Rossby 波, 以及西风应力异常移到赤道东太平洋时它本身强迫产生的海洋混合层变厚, 它们的综合作用可以造成 El Niño 事件的发生和发展。观测到的东风应力异常同样可以在海洋中产生 3 类过程, 使得赤道东太平洋海面温度降低, 即东传东风应力异常激发的上翻 Kelvin 波, 它到达大洋东边界产生的反射上翻 Rossby 波, 以及东风应力异常移到赤道东太平洋时它本身强迫产生的海洋混合层厚度减小, 这些过程的综合作用可以导致 El Niño 事件的消亡。

4.2 对 El Niño 持续时间的作用

正如观测结果所示, 与 El Niño 从发展到消亡相联系的热带西太平洋风应力异常形

式是, 东部为异常西风应力, 而其西部为异常东风应力, 并且它们同时向东传播。理论分析结果^[29]表明, 大洋东部混合层厚度对这种形式风应力的响应随异常西风和东风应力的强度不同而不同。当东风应力异常的强度较弱时, 它所激发的上翻 Kelvin 波及其在大洋东边界产生的反射上翻 Rossby 波所引起的负扰动厚度较弱, 而西风应力异常所激发的下沉 Kelvin 波及其在大洋东边界产生的反射下沉 Rossby 波所引起的正扰动厚度较强。另外, 东风应力异常所激发的下沉 Rossby 波在西边界产生的反射下沉 Kelvin 波到达东太平洋后, 也加强了正扰动厚度, 这时赤道东太平洋的正扰动厚度维持时间较长, 即 El Niño 可以维持较长的时间。此正扰动厚度的消亡是由于异常风应力场移到了大洋东部, 异常西风应力后部所激发的上翻 Rossby 波形成的负扰动厚度, 以及异常东风应力直接激发出的负扰动厚度, 使得赤道东太平洋的正扰动厚度消失。当东风应力异常的强度较强时, 赤道东太平洋混合层正扰动厚度的出现机制与前面一致。但由于东风应力异常变强, 它所激发出的上翻 Kelvin 波及其在东边界产生的反射上翻 Rossby 波所引起的负扰动厚度异常变大, 同时, 西风应力异常激发出的上翻 Rossby 波在大洋西边界产生的反射上翻 Kelvin 波到达大洋东部后, 也加强了负扰动厚度异常, 使得大洋东部的正扰动厚度不能维持很长时间, 即此时 El Niño 维持的时间较短。由此可知, 当西风应力异常与东风应力异常的相对强度不同时, 赤道东太平洋混合层厚度正扰动的维持时间和消亡机制是不同的, 由此可影响到 El Niño 维持时间的长短。

4.3 对 El Niño 期间东太平洋出现两次海温峰值的可能解释

观测事实表明, 在 El Niño 期间赤道东太平洋海温异常具有明显的双峰结构, 即海温异常经常有两次极大值出现。Tang 和 Weisberg^[32]研究了 1982/1983 年的 El Niño 过程, 指出了两次峰值的出现与西风应力的两次加强有关。实际上, 对于观测到 El Niño 期间热带西太平洋风应力具有东部为西风应力, 西部为东风应力这种分布形式时, 所激发的赤道波系及其在边界的反射同样可以造成赤道东太平洋混合层厚度扰动出现二次峰值。理论分析^[29]和数值试验^[31]的结果均表明, 第一次峰值的出现, 是由于西风应力异常所激发的下沉 Kelvin 波到达赤道东太平洋后, 所引起的混合层扰动厚度产生正异常所致; 二次峰值之间的低谷区, 是由于西风应力异常之后的东风应力异常所激发的上翻 Kelvin 波到达赤道东太平洋后, 所引起的混合层扰动负异常所致; 第二个峰值的出现, 则是由于西风应力异常激发的下沉 Kelvin 波在大洋东边界反射所形成的下沉 Rossby 波, 引起赤道东太平洋混合层厚度扰动正异常, 再迭加上东风应力异常激发的下沉 Rossby 波在大洋西边界形成的反射下沉 Kelvin 波到达赤道东太平洋后, 所引起的厚度扰动正异常。

4.4 ENSO 循环与热带西太平洋上空对流层低层的环流异常

黄荣辉等^[33]分析了与 20 世纪 80 年代以来的 4 次 ENSO 循环相联系的热带西太平洋上空大气对流层低层的环流异常。结果表明, 在 El Niño 发展阶段, 热带西太平洋赤道以北为一气旋式环流异常; 而在 El Niño 盛期时为一反气旋式环流异常。他们的研究指出, 在 El Niño 事件发展阶段前, 西太平洋暖池变暖造成了此气旋性环流异常, 与此气旋性环流异常相联系, 在印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生西风异常; 而当 El Niño 事件发展到成熟阶段, 西太平洋暖池变冷造成了此反气旋性环流异常, 从而使印度尼西亚和赤道西太平洋上空产生东风异常。由此形成的赤道附近的纬向风异常, 通

过激发出海洋中的赤道波系,对 El Niño 事件的发展与衰减和 La Niña 事件的发生产生重要的动力作用。

黄荣辉等的研究结果,强调了暖池的热状况导致热带西太平洋上空大气对流层低层风场的形成,此风场通过激发出海洋中的赤道波动,引起海洋中热量的重新分配,使得赤道中东太平洋和赤道西太平洋的热状况发生变化。暖池热状况的变化又会造成热带西太平洋上空大气对流层低层风场的变化,并激发出性质与其相应的海洋赤道波动,再一次造成海洋中热量的重新分配。因此,黄荣辉等的研究,暗示着热带西太平洋上空大气对流层低层风场和海洋中的赤道波动之间的“自组织”行为,可能在 ENSO 循环的形成中具有一定的作用。

5 热带东太平洋经向风应力的变化与 El Niño 的发生

现有的研究强调了纬向风应力异常在 ENSO 循环中的作用,国际 TOGA 项目的执行中也发现 El Niño / La Niña 的发生与热带西太平洋的海气状况有关。McCreary^[34]研究了热带海洋对风应力的响应,指出经向风应力异常对 El Niño 并不重要,因为它激发不出赤道 Kelvin 波。但是观测事实表明,El Niño 发生的一个前兆是大气中的热带辐合带(ITCZ)的异常南移^[35]。由于 ITCZ 的异常南移必然会带来经向风应力场的变化,因此,经向风应力场与 El Niño 的发生是否具有内在的联系是值得研究的一个问题。

Zhang 等^[36]利用观测资料,对热带太平洋海表经向风应力异常在 El Niño 事件发生过程中的作用进行了诊断分析。发现在热带中东太平洋经向风应力距平场中,关于赤道附近辐合的经向风应力异常与 Niño3 区海温指数有很好的超前相关,这种相关性在超前 6 个月甚至更早一些就有显示。表明这种超前于增暖事件出现的辐合经向风应力与 El Niño 事件的发生可能具有一定的内在联系,并对 El Niño 的发生具有一定的先兆意义。通过利用奇异值分解(SVD)方法,分析了超前的异常经向风应力场与太平洋海表温度异常场的耦合模。结果表明,对应于 El Niño 类型的海温异常的分布,大气风应力场在超前 6 个月甚至更早的时候,在赤道中东太平洋表现为辐合的经向异常风应力场,即赤道以北为北风异常应力,赤道以南为南风异常应力。这种耦合模的时间系数与 Niño3 区海面温度异常指数所表示的 El Niño 事件有很好的对应关系,表明这种耦合模反映的正是超前的经向风应力异常与 El Niño 事件所对应的海表温度异常之间的相关模态。

为了研究观测资料分析中揭示的关于赤道辐合的经向异常风应力场是否与 El Niño 的发生具有内在的动力学联系,Zhang 等^[37]根据观测资料分析的结果,建立了一个关于赤道辐合的理想经向风应力形式,并利用简单的热带海洋动力学模式,分析求解在该形式风应力强迫下热带海洋的定常与非定常响应。对于风应力作用在整个纬向区域上的定常响应,海洋中赤道两侧的海水向赤道堆积,使赤道及附近的海洋混合层加厚;在赤道附近响应出向西的流动;对于风应力作用于纬向有限宽度区间上的非定常响应,在海洋中激发出向西传播的关于赤道对称的 Rossby 波,它使波动到达的区域混合层变厚;而且在强迫区之外 Rossby 波经过后的区域,在赤道及其附近响应出向西的流动,而且这支向西流动的范围随 Rossby 波的西传不断向西扩展;同时,由于 Rossby 波的作

用, 在赤道附近强迫区及其以西的区域海洋混合层变厚, 并且由于耗散的作用, 变厚的混合层表现出西薄东厚, 使得温跃层出现“西抬东降”的响应, 混合层的这种结构在耗散作用较大时更为明显。因此, 当关于赤道辐合的经向风应力强迫作用于赤道东太平洋时, 可以减弱气候平均状态下热带太平洋混合层西厚东薄的分布状态, 这将有利于 El Niño 事件发生; 另一方面, 在赤道及其附近响应出的向西流动, 可以使中东太平洋的表层水不断向西输送。这有利于表层水在西太平洋堆积, 为后来暖事件的发生累积能量。这里的结果也表明, 在 El Niño 发生之前, 不仅纬向偏东信风的增强可以驱动更多的暖海水向西输送^[38], 出现在赤道中东太平洋的辐合经向风应力异常也可以强迫出向西的流动, 为 El Niño 的发生提供前期条件。

6 结束语

本文总结了国内有关 ENSO 循环研究方面的一些新的进展, 但基本上只涉及到将 ENSO 循环看成热带太平洋区域海气相互作用问题的研究。实际上, ENSO 循环不仅是一个热带问题。由于 ENSO 循环与暖池的热状况有密切联系, 暖池上空强烈的对流活动使该地区成为热带纬圈环流的上升分支所在, 其西侧的纬圈环流成为西太平洋和印度洋热带大气的桥梁, 因此, ENSO 循环与热带印度洋的海气相互作用以及印度季风的变化应该在一定程度上具有内在的联系。除了与暖池热状况相联系的纬圈环流外, 在西太平洋和东亚上空存在着一个与纬圈环流相联系的经圈环流, 它把暖池上空大量的热量和动量带到副热带和中纬度, 改变和加强了那里的大气环流。热带西太平洋也是与东亚季风爆发有关的海域, 此海域的热状况会在一定程度上影响季风的活动, 而反过来季风的爆发又会改变海洋的热力状态和表层洋流的强度和方向, 因此, 中纬度环流和东亚季风也应该与 ENSO 循环有关。综上所述, 东亚季风、暖池、ENSO 和热带印度洋应该是一个有机的整体, 它们的变异存在着内在的相互联系。因此, 只有对它们进行综合的研究, 才能真正认识清楚 ENSO 循环的机理。

参 考 文 献

- 1 Walker, G. T. and E. W. Bliss, Some applications to seasonal forecasting, *World Weather IV*, 1930, **3**, 53~84.
- 2 Philander, S. G. H., El Niño Southern Oscillation phenomena, *Nature*, 1983, **302**, 295~301.
- 3 Horel, J. D. and J. M. Wallace, Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Wea. Rev.*, 1981, **109**, 813~829.
- 4 Pan Y. H. and A. Oort, Global climate variations connected with sea surface temperature anomalies in the eastern equatorial Pacific Ocean for the 1958~73 period, *Mon. Wea. Rev.*, 1983, **111**, 1244~1258.
- 5 Shukla, J. and J. M. Wallace, Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies, *J. Atmos. Sci.*, 1983, **40**, 1613~1630.
- 6 Lau, N. C., Modeling the seasonal dependence of the atmospheric response to observed El Niño in 1962~76, *Mon. Wea. Rev.*, 1985, **113**, 1970~1996.
- 7 Hamilton, K., A detailed examination of the extratropical response to tropical El Niño / Southern Oscillation, *J. Climatol.*, 1988, **8**, 67~86.
- 8 Held, I. M., S. W. Lyons and S. Nigam, Transients and the extratropical response to El Niño, *J. Atmos. Sci.*, 1989, **46**, 163~174.

- 9 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.
- 10 中国科学院地理研究所长期天气情报组, 热带海洋对副热带高压长期变化的影响, *科学通报*, 1977, **22**, 313~317.
- 11 符淙斌, 滕星林, 我国夏季的气候异常与厄尔尼诺—南方涛动现象的关系, *大气科学*, 1988, 特刊, 133~141.
- 12 中国科学院大气物理研究所, 赤道东太平洋表面温度与西太平洋台风发生频率的负相关, *科学通报*, 1980, **25**, 987~989.
- 13 李崇银, El Niño影响西太平洋台风活动的研究, *气象学报*, 1987, **45**, 229~236.
- 14 Huang Ronghui and Wu Yufang, The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanisms, *Adv. Atmos. Sci.*, 1989, **6**, 21~32.
- 15 Wu Guoxiong and N. C. Lau, A GCM simulation of the relationship between tropical storm formation and ENSO, *Mon. Wea. Rev.*, 1992, **120**, 958~977.
- 16 Zhang Renhe, A. Sumi and M. Kimoto, Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/'87 and '91/'92 events, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1996, **74**, 49~62.
- 17 Zhang Renhe, A. Sumi and M. Kimoto, A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China, *Adv. Atmos. Sci.*, 1999, **16**, 229~241.
- 18 张人禾, El Niño盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用, *高原气象*, 1999, **18**, 567~574.
- 19 Philander, S. G. H., *El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation*, Academic Press, 1990, 289pp.
- 20 McCreary, J. P. and D. L. T. Anderson, An overview of coupled ocean-atmosphere models of El Niño and the Southern Oscillation, *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**, 3125~3150.
- 21 张人禾, ENSO循环的物理机制及其模拟与预测研究进展, *地球科学进展*, 1993, **8** (6), 50~56.
- 22 张人禾, 埃尔尼诺/南方涛动 (ENSO) 动力学研究进展, 现代大气科学前沿与展望, 国家自然科学基金委员会等编, 北京: 气象出版社, 1996, 108~114.
- 23 Neelin, J. D. et al., ENSO theory, *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**, 14262~14290.
- 24 McPhaden, M. J., Genesis and evolution of the 1997-98 El Niño, *Science*, 1999, **283**, 950~954.
- 25 李崇银, 穆明权, El Niño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.
- 26 穆明权, 李崇银, 西太平洋暖池次表层海温异常与ENSO循环, *大气科学*, 2000, **24**, 447~460.
- 27 巢洁生, 巢纪平, 热带西太平洋和东印度洋对ENSO发展的影响, *自然科学进展*, 2001, **11**, 1293~1300.
- 28 Schopf, P. S. and M. J. Suarez, Vacillations in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Atmos. Sci.*, 1988, **45**, 549~566.
- 29 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**, 597~609.
- 30 Huang Ronghui, Zang Xiaoyun, Zhang Renhe and Chen Jilong, The westerly anomalies over the tropical Pacific and their dynamical effect on the ENSO cycles during 1980-1994, *Adv. Atmos. Sci.*, 1998, **15**, 135~151.
- 31 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.
- 32 Tang, T. Y. and R. H. Weisberg, On the equatorial Pacific response to the 1982-83 El Niño-Southern Oscillation event, *J. Mar. Res.*, 1984, **42**, 809~829.
- 33 黄荣辉, 张人禾, 严邦良, 热带西太平洋纬向风异常对ENSO循环的动力作用, *中国科学 (D辑)*, 2001, **31**, 697~704.
- 34 McCreary, J., Eastern tropical ocean response to changing wind systems: with application to El Niño, *J. Phys. Oceanogr.*, 1976, **6**, 632~645.
- 35 Philander, S. G. H., El Niño Southern Oscillation phenomena, *Nature*, 1983, **302**, 295~301.
- 36 Zhang Renhe, Zhao Gang and Tan Yanke, Meridional wind stress anomalies over tropical Pacific and the onset of El Niño, Part I: Data Analysis, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 467~480.
- 37 Zhang Renhe and Zhao Gang, Meridional wind stress anomalies over tropical Pacific and the onset of El Niño, Part II: Dynamical Analysis, *Adv. Atmos. Sci.*, 2001, **18**, 1053~1065.
- 38 Wyrtki, K., El Niño — the dynamic response of the Pacific Ocean to atmosphere forcing, *J. Phys. Oceanogr.*, 1975, **5**, 570~584.

Some New Aspects in Understanding of ENSO Cycle

Zhang Renhe

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Chao Jiping

(Key Laboratory of Marine Environment Sciences and Their Numerical Modelling,

State Oceanic Administration, Qingdao 266003)

Abstract In recent years, Chinese scientists found some new mechanisms of the ENSO cycle by data diagnoses, theoretical analysis and numerical experiments. The findings include the origin of the El Niño and the La Niña, the propagation of the warm or cold water associated with the ENSO cycle, dynamical roles of the zonal wind stress over tropical western Pacific and of the meridional wind stress over the tropical eastern Pacific, etc. In this paper, a review is given to introduce some aspects of these new findings achieved by Chinese scientists.

Key words: El Niño; La Niña; ENSO cycle