

刘长征, 薛峰. 2012. 1993年El Niño夭折事件及其与典型El Niño事件的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (2): 197–204, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10084. Liu Changzheng, Xue Feng. 2012. The abortion of the El Niño event in 1993 and its comparison with the typical El Niño event [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (2): 197–204.

1993年El Niño夭折事件及其与典型 El Niño事件的对比分析

刘长征¹ 薛峰²

1 国家气候中心, 北京 100081

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 除正常的El Niño事件外, 赤道中东太平洋存在一些类似但又显著不同的海水增暖事件。以1993年为例, 海水增暖事件发生在3月, 5月最强, 但随后迅速衰减, 在此称之为El Niño的夭折。通过与典型El Niño事件的对比分析, 研究了1993年暖水事件的演变特征及其夭折原因。研究发现, 1993年暖水事件是一种发生在热带中东太平洋的局地海气作用现象。由于1991~1992年发生了一次较强的El Niño事件, 造成1992~1993年热带西太平洋暖池持续偏冷, 使得1993年缺乏发生正常El Niño事件所需要的热力条件。在此背景下, 虽然在春季出现赤道西风异常自西太平洋向东太平洋扩展, 满足了El Niño事件发生的动力条件, 但由于暖池偏冷, 不能引发海盆尺度的Bjerknes型正反馈, 使得赤道中东太平洋的海水增暖只是一种短期现象, 并迅速衰减, 造成El Niño事件的夭折。

关键词 夭折 典型El Niño事件 热力条件 动力条件

文章编号 1006-9585 (2012) 02-0197-08 **中图分类号** P46 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10084

The Abortion of the El Niño Event in 1993 and Its Comparison with the Typical El Niño Event

LIU Changzheng¹ and XUE Feng²

1 *National Climate Center, Beijing* 100081

2 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029

Abstract Over the equatorial central-eastern Pacific, there is an anomalous seawater warming event that is significantly different from the typical El Niño event. In 1993, for example, an anomalous warming event occurred in March with its peak in May, then it decayed rapidly. This warming event is referred to abortion of an El Niño event. By comparing the event in 1993 with the typical El Niño event, the authors explore the feature and the cause of the abortion of this event. It is found that the event in 1993 is a local air-sea coupling phenomenon in the tropical central-eastern Pacific. Due to the relatively strong El Niño event during 1991–1992, the western Pacific warm pool was anomalously cold during 1992–1993, and the thermal condition was not suitable for the occurrence of an El Niño event in 1993. In

收稿日期 2010-06-22 收到, 2012-01-15 收到修定稿

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB951901, 国家自然科学基金 40821092, 公益性行业科研专项 200906021

作者简介 刘长征, 男, 1978年生, 理学博士, 从事季风、ENSO和短期气候预测研究。E-mail: czliu@cma.gov.cn

通讯作者 薛峰, E-mail: fxue@lasg.iap.ac.cn

this case, the eastward extension of the equatorial westerly anomaly in spring from the western Pacific to the central Pacific satisfied the dynamical condition for the occurrence of an El Niño event, but the basin-scale Bjerknes-type positive feedback failed to work due to the cold warm pool. As a result, the seawater warming in the equatorial central-eastern Pacific lasted for a short period, then it decayed rapidly, causing the abortion of an El Niño event.

Key words abortion, typical El Niño event, thermal condition, dynamical condition

1 引言

El Niño 事件具有位相锁定的特征,它在春季或夏季爆发,而在冬末春初达到最强(Rasmusson and Carpenter, 1982)。但是,除正常的 El Niño 事件外,还存在一些非正常过程,比如本文所要分析的 1993 年。在 1993 年,赤道中东太平洋海温异常在 5 月最强(峰值达 0.9°C),达到了 El Niño 事件的标准,其海温异常强度和发生时间均非常类似于 El Niño 事件的爆发,因此容易误认为是一次 El Niño 事件。但在 5 月之后,海温异常却迅速衰减,这与正常 El Niño 事件的演变显著不同。为方便起见,我们将此类事件称为 El Niño 事件的夭折。这类非正常事件的研究对 El Niño 事件的监测及相关的气候预测具有实用价值。同时,研究 El Niño 夭折事件可以使我们从不同的角度更加深入地理解 El Niño 事件的本质,也具有重要的科学意义。为此,我们以 1993 年 El Niño 夭折事件为例,与典型 El Niño 事件进行对比分析,探讨这次 El Niño 夭折的原因。

前人研究表明,西太平洋暖池地区暖水的堆积是 El Niño 发生的必要条件,而暖池热容量异常的存在和沿温跃层东移对 El Niño 事件的发生起着更直接的作用(White et al., 1985; 李崇银和穆明权, 1999, 2002; 周广庆和李崇银, 1999; 巢清尘和巢纪平, 2001)。此外,赤道西太平洋西风异常是 El Niño 事件爆发的另一个必不可少的条件,西风异常能够激发 Kelvin 波东传,并能够直接调整温跃层厚度,它在赤道西太平洋的维持和向东扩展是暖池热容量正异常向东移动的原因(Philander, 1983; 张人禾和黄荣辉, 1998; 李崇银和穆明权, 1999; 陈幸荣和王彰贵, 2003; 张立峰等, 2006; 刘长征和薛峰, 2010)。这种赤道西太平洋西风异常和西太平洋地区的气候基本态有密切关系(严邦良和张人禾, 2002),也和前期

印度洋季风偏强有关(巢清尘和巢纪平, 2001)。此外,在 El Niño 发生年,在海气相互作用和边界条件作用下,一次西太平洋西风异常可以维持长达 3 个月(刘长征和薛峰, 2008)。基于以上研究,我们试图回答一个问题,即这次 El Niño 事件的夭折是否是因为不满足或不同时满足上述热力条件和动力条件。本文第 2 节为数据和方法介绍,我们在第 3 节对比 1993 年暖水事件与典型 El Niño 事件变化过程,第 4 节探讨 1993 年暖水事件与 1991~1992 年 El Niño 事件的联系,第 5 节为结论和讨论。

2 数据和方法介绍

我们用月平均 Niño3.4 指数 [$(5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}, 120^{\circ}\text{W}\sim 170^{\circ}\text{W})$ 地区海温异常平均值] 定义 El Niño 事件的强度(Trenberth, 1997),该指数序列由美国气候预测中心提供,时间跨度为 1950~2004 年。鉴于 Niño3.4 指数有较明显的高频变化,我们对其进行 3 个月平滑处理。类似于 Trenberth (1997) 的工作,当平滑后的 Niño3.4 指数连续 5 个月大于 0.5°C 时,我们认为发生了一次 El Niño 事件。此外,为了与 1993 年这次夭折事件进行比较,我们选取强度较大的 El Niño 事件(在本文中,强度标准选为 3 个月平滑 Niño3.4 指数的峰值大于 1.5°C)建立了典型 El Niño 事件。对 1986~1988 年 El Niño 事件而言,虽然其峰值强度满足上述条件,但该事件持续了两年,而且海水增暖最强出现在夏季。鉴于这种不规则性能够干扰合成结果,我们将其排除,只保留了 1957~1958 年、1965~1966 年、1972~1973 年、1982~1983 年、1991~1992 年、1997~1998 年和 2002~2003 年事件进行合成,从而建立典型 El Niño 事件的演变过程。

在本文中我们分析与 El Niño 事件相关的海洋和大气变量。海洋变量包括海表温度(SST)、0~400 m 上层海水温度和热容量。月平均海表温

度资料为美国国家海洋大气局 (NOAA) 发展的 ERSST 的第二个版本 (Smith and Reynolds, 2004), 分辨率为 2° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度)。此外, 上层海洋温度 (垂直方向分层为 0、20、40、60、80、120、160、200、240、300、400 m 计 11 层) 和 0~400 m 热容量数据来自加州大学圣地亚哥分校的 Scripps 海洋学研究所, 即 JEDAC 资料 ([http://jedac.ucsd.edu/\[2008-03-16\]](http://jedac.ucsd.edu/[2008-03-16])), 时间长度为 1955~2003 年, 水平分辨率为 5° (经度) $\times 2^\circ$ (纬度)。大气变量包括海平面气压场 (SLP) 和 850 hPa 风场, 数据来自于 NCEP/NCAR 月平均再分析资料集 (Kalnay et al., 1996), 分辨率为 2.5° (经度) $\times 2.5^\circ$ (纬度)。我们选取资料长度为 1951~2004 年。此外, 统一采用 1971~2000 年的气候平均来计算上述变量的异常值。

3 1993 年暖水事件与典型 El Niño 事件的对比

图 1 表明, 对典型 El Niño 事件而言, 赤道中东太平洋海表温度异常在 El Niño 发生年 2 月从负值开始转变为正值, 在 5 月达到 El Niño 事件的标准, 即 5 月开始爆发, 而峰值出现在 12 月。但在 1993 年暖水事件中, 海温异常在 El Niño 发生前一年的 11 月开始转变为正值, 较典型 El Niño 事

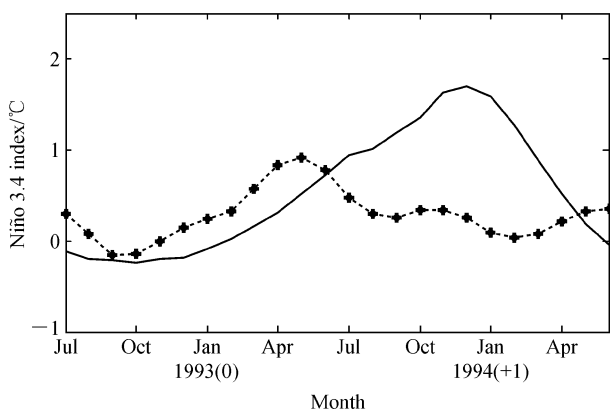


图 1 1993 年暖水事件 (点线) 以及典型 El Niño 事件 (实线) 中 Niño3.4 指数 (单位: $^\circ\text{C}$) 的变化 (0 和 +1 分别指典型 El Niño 事件爆发年和次年)

Fig. 1 Time series of Niño3.4 index for the abortion of the El Niño event in 1993 (dotted line) and the typical El Niño event (solid line), “0” and “+1” represent the onset year and the succeeding year of the typical El Niño event, respectively

件提前 3 个月, 并在 El Niño 爆发年 3 月达到 El Niño 事件的标准。我们认定 1993 年暖水事件在 3 月开始发生, 5 月强度最大, 此后迅速衰减, 因此这是一次明显的 El Niño 夭折事件。为此, 我们分析 1992 年 9 月至 1993 年 7 月一段时间, 并与典型 El Niño 事件对应的发生发展过程相比较, 研究二者演变过程中的差异。

3.1 海表温度、上层海水温度和上层海洋热容量

图 2 同时给出了 1993 年暖水事件和典型 El Niño 事件的 SST 演变过程。在 El Niño 爆发年 5 月, 典型 El Niño 事件中海水变暖分别在赤道中太平洋和南美附近两个地方同时发展, 并连为一体, 这种变化表现了 SST 异常在赤道中东太平洋局地增强发展的特征 (Li, 1997; Neelin et al., 1998)。此外, SST 异常强度在赤道外随纬度增加而迅速衰减。但对 1993 年暖水事件而言, 在赤道东太平洋 SST 异常出现之前, 即 1993 年 1 月, 在赤道中太平洋和赤道东太平洋的外围区域, 存在大面积的 SST 正异常。在 1993 年 3~5 月, SST 正异常在东太平洋出现, 迅速增强并达到峰值。同时, 海水增暖不仅发生在赤道地区, 而且向两侧伸展分布, 覆盖了热带东太平洋的绝大部分区域, 这与典型 El Niño 事件显著不同。

图 3 给出了赤道太平洋上层 (0~400 m) 海水温度异常的变化特征。对典型 El Niño 事件而言, 海水温度正异常首先出现在西太平洋次表层, 而后沿温跃层东传, 并在中东太平洋形成海洋表面增暖。同时, 有上层海水温度异常信号出现在南美附近。但对 1993 年暖水事件而言, 海水温度正异常很弱, 并且只是在赤道东太平洋局地发展 (1993 年 1~7 月)。此外, SST 正异常在 1993 年 5 月达到峰值, 而次表层海水温度正异常在此后两个月内仍继续发展。值得注意的是, 在西太平洋地区, 海水温度负异常很强, 并在整个夭折事件中持续存在。

热带太平洋上层海洋 (0~400 m) 热容量异常场的信号变化与上述 SST、赤道太平洋上层海水温度变化一致 (图略)。在典型 El Niño 事件的发生发展过程中, 主要特征表现为西太平洋正热容量异常的存在和东移, 这与前人有关 El Niño 事件演变过程的观点一致 (White et al., 1985; 李崇银和穆明权, 1999, 2002; 周广庆和李崇银,

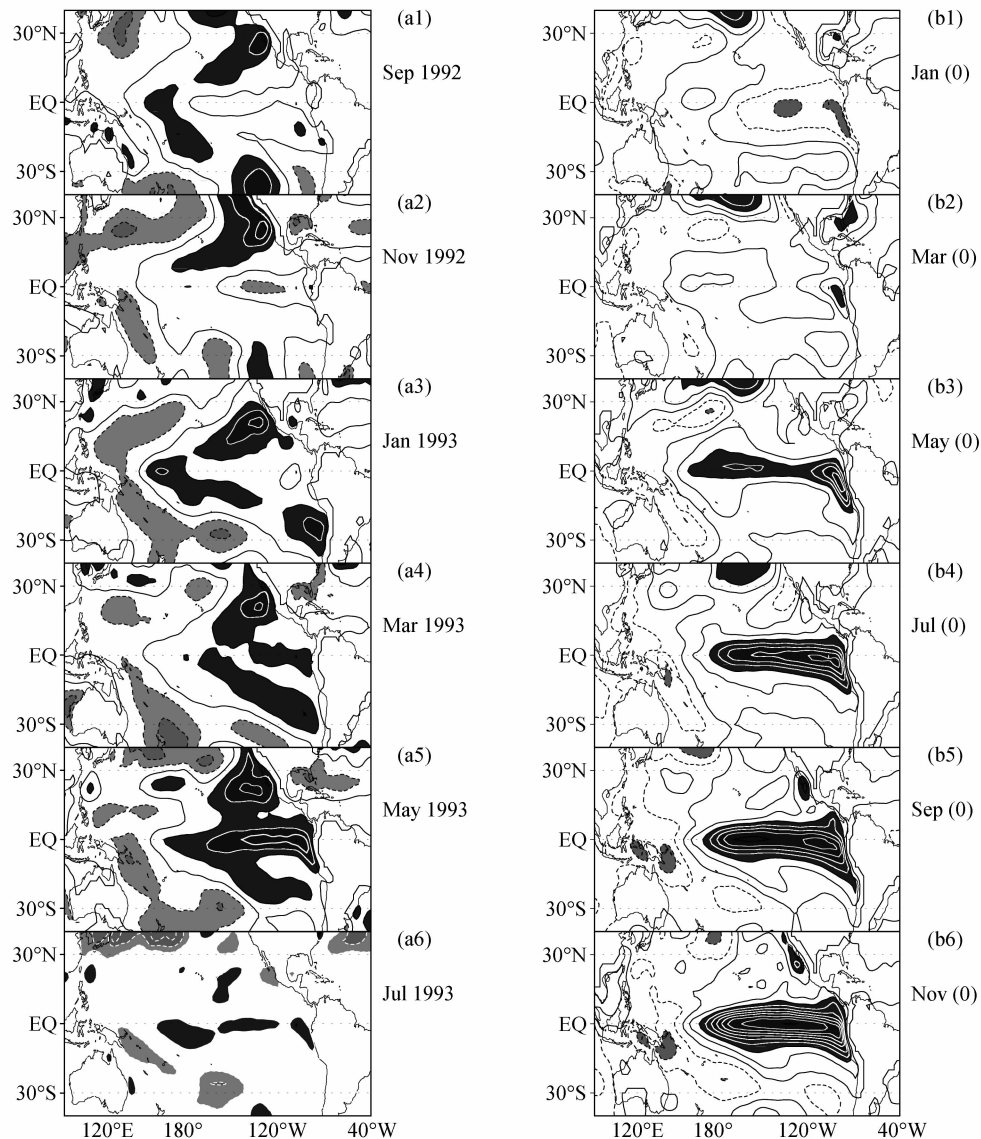


图2 1993年暖水事件（左列，等值线间隔 0.5°C ）和典型El Niño事件（右列，等值线间隔 0.25°C ）过程中SST异常（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）的演变过程，异常值大于 0.5°C 和小于 -0.5°C 的区域分别用黑色和灰色标记

Fig. 2 The evolution of SST anomalies ($^{\circ}\text{C}$) for the abortion of the El Niño in 1993 (left column, interval: 0.5°C) and the typical El Niño event (right column, interval: 0.25°C), regions above 0.5°C and below -0.5°C are shaded by black and grey, respectively

1999; 巢清尘和巢纪平, 2001; 刘长征和薛峰, 2010)。但对1993年暖水事件而言, 在其整个过程中, 很强的热容量负异常堆积在西太平洋暖池区, 而较弱的正热容量异常则分散在热带中太平洋, 并且迅速变化。在东太平洋海水增暖之前(1992年9月至1993年1月), 正热容量异常分布在赤道中太平洋外侧, 此后随着海水增暖的出现, 热容量正异常的中心迅速转移到赤道上, 并形成中太平洋和南美沿岸两个中心, 但这种异常随El Niño事件的夭折而迅速衰减。

3.2 850 hPa 风场和海平面气压场

赤道太平洋西风异常在El Niño的发生发展中有非常重要的作用(Philander, 1983; 张祖强等, 2000; 薛峰和何卷雄, 2007)。我们用850 hPa风场来分析西风异常的特征(图4)。赤道太平洋西风异常在西太平洋的出现和向东扩展是典型El Niño事件的最显著特征, 这与前人研究结果一致(李崇银和穆明权, 1999; 张人禾和黄荣辉, 1998; 薛峰和何卷雄, 2007)。但在1993年暖水事件中, 赤道西风异常的表现与典型El Niño

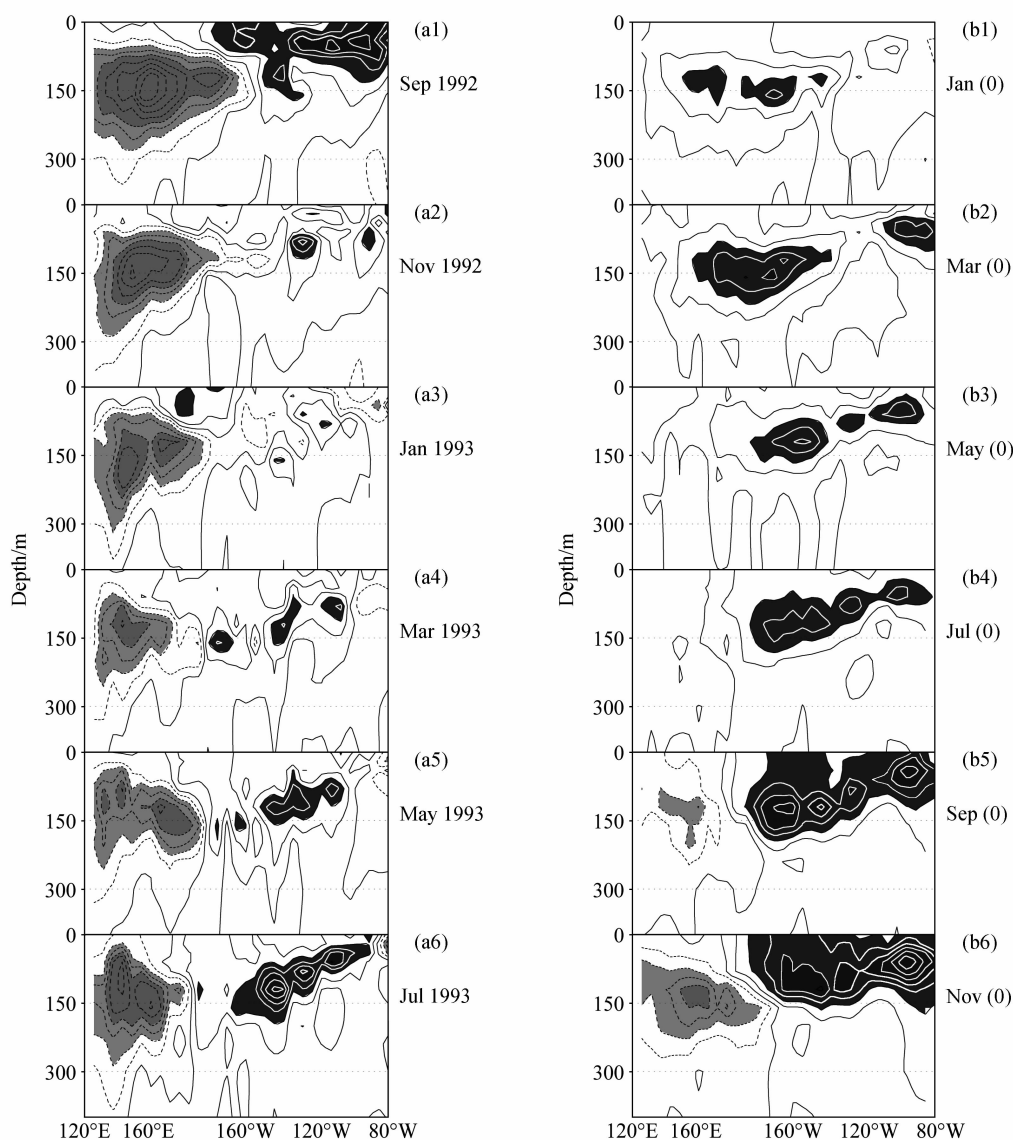


图3 1993年暖水事件(左列)和典型El Niño事件(右列)过程中上层海洋海水温度异常(单位:℃,等值线间隔为0.5℃)经度—垂直剖面图,异常值大于1℃和小于-1℃的区域分别用黑色和灰色标记

Fig. 3 The longitude-vertical cross-section of sea water temperature anomalies (℃, interval: 0.5℃) for the abortion of the El Niño event in 1993 (left column) and the typical El Niño event (right column), regions above 1℃ and below -1℃ are shaded by black and grey, respectively

事件存在一定程度的差别。从1992年9月至1993年1月,即夭折事件发生之前,西风异常长时间维持在赤道中太平洋。而在1993年3~5月,随着夭折事件发生和发展,西风异常却出现在赤道西太平洋并向东扩展,此后伴随该异常增暖事件迅速衰亡,西风异常迅速消失。上述特征支持了已有的结论,即西风异常从赤道西太平洋到东太平洋的扩展是El Niño事件发生发展的必要条件。

对典型El Niño事件而言,虽然西风爆发可能是大气扰动的结果,在其发生发展阶段,西风

异常自西太平洋向中东太平洋的扩展与南方涛动的变化,尤其是东南太平洋副高长时间偏弱是一致的(图略)。但1993年暖水事件却并非这样,在其发生之前,即1992年9月至1993年1月,东南太平洋副高明显偏弱,并伴随赤道中太平洋盛行西风异常。之后,东南太平洋副高异常的维持并不稳定,1993年3月中太平洋存在正气压异常,导致东南太平洋副高异常与当时盛行于赤道西太平洋的西风异常缺乏直接联系。在1993年5月,虽然中太平洋盛行西风异常,但东南太平洋

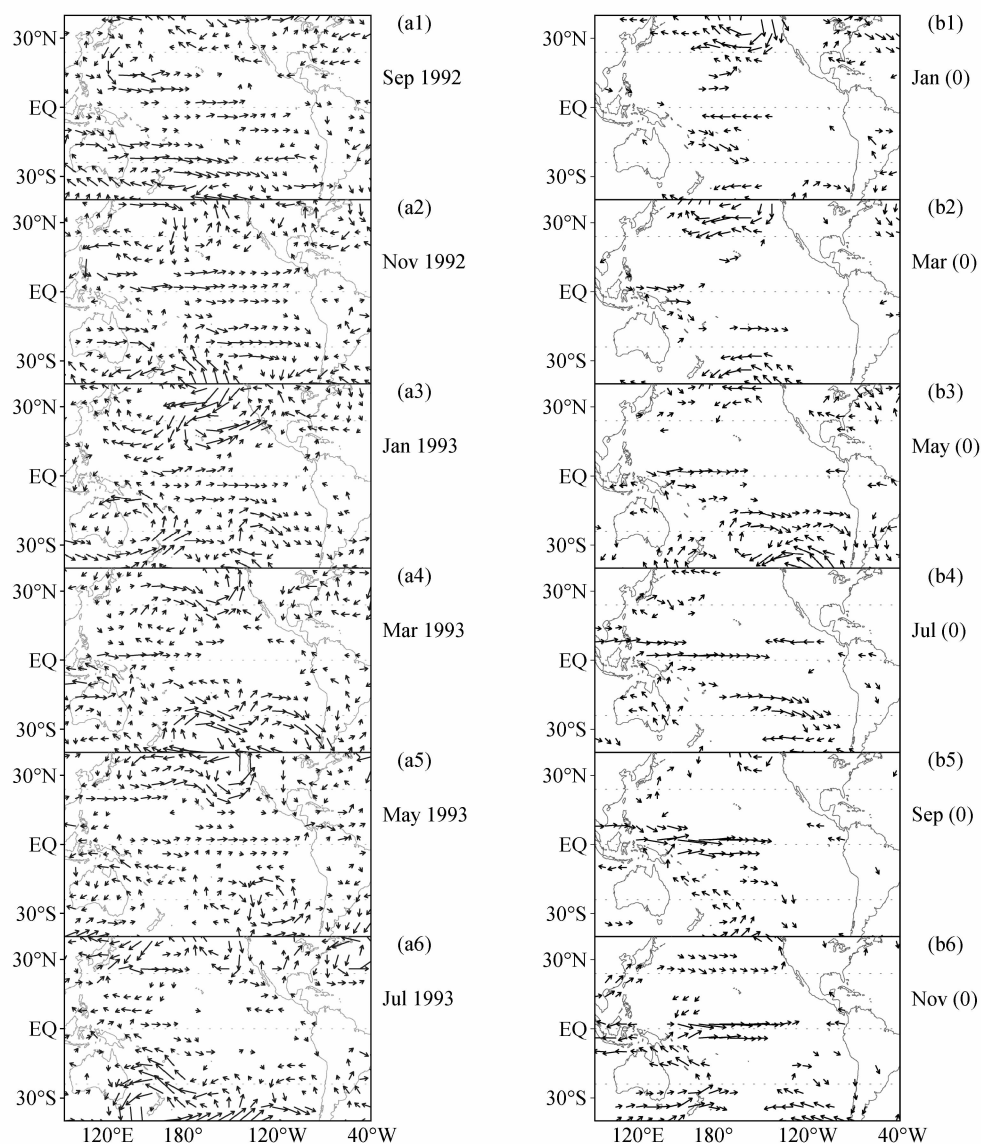


图4 1993年暖水事件(左列)和典型El Niño事件(右列)过程中850 hPa风场异常(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)的演变过程(略去风速小于 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的风矢量)

Fig. 4 The evolution of 850-hPa wind anomalies ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) for the abortion of the El Niño in 1993 (left column) and the typical El Niño event (right column), vectors less than $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ are not shown

副高负异常却消失并在原地出现正异常。换言之,在1993年暖水事件中,赤道西风异常的维持和传播缺乏东南太平洋副高异常的支持,这与西风异常东传在中太平洋短时间维持是一致的。

4 1993年暖水事件与1991~1992年El Niño事件的联系

为了表征和比较El Niño事件的热力状况,我们利用西太平洋暖池区($10^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$, $140^{\circ}\text{E} \sim$

180°)平均热容量异常建立暖池热力指数(李崇银和穆明权,1999),来比较典型El Niño事件和1993年暖水事件的热力条件变化。图5表明,对典型El Niño事件来说,在其发生前半年至更长时间,暖池热容量为显著正异常,而后随着El Niño的发生和发展,暖池热容量转为负异常。李崇银和穆明权(1999)对1950~1993年的El Niño事件逐一分析,也注意到了这种情形。

1991~1992年发生了一次较强的El Niño事件,它给1993年暖水事件提供了一个独特的气候

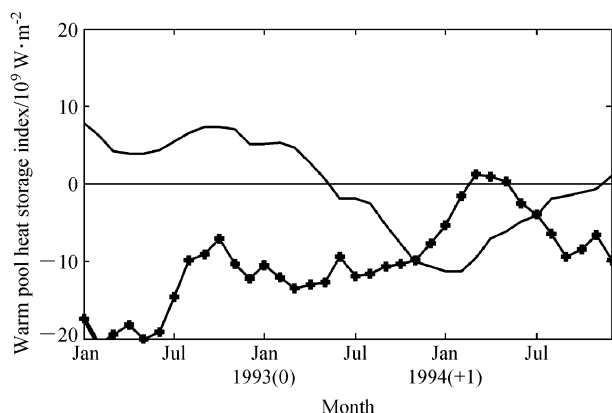


图5 1993年暖水事件(点实线)和典型El Niño事件(实线)过程前后西太平洋暖池热力指数(单位: $10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$)的变化(0和+1分别指典型El Niño事件当年和次年)

Fig. 5 The warm pool heat storage index ($10^9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$) for the abortion of the El Niño in 1993 (line with dots) and the typical El Niño event (solid line), “0” and “+1” represent the the onset and the succeeding year of the typical El Niño event, respectively

背景场。作为1991~1992年El Niño事件发生的结果,1992年暖池区热容量为负异常,并且由于异常强度非常大,这种状况持续维持至1993年之后,导致1993年缺乏El Niño发生的热力条件,虽然赤道中东太平洋出现了海水增暖,但该异常状态却快速消亡。

1991~1992年El Niño事件同样影响了热带中东太平洋的大气与海洋各分量的分布。通常在El Niño发生前,赤道东太平洋海水偏冷,信风偏强(Wyrtki, 1975)。1991~1992年El Niño衰减进入平常态,造成赤道中东太平洋存在不均匀分布的热容量正异常,赤道中太平洋西风异常长时间维持,这种异常分布不利于热带太平洋海气耦合系统位相的迅速转变,因而对1993年发生El Niño有阻碍作用。

5 结论和讨论

由于不满足El Niño事件发生的热力条件,1993年暖水事件与典型El Niño事件在海洋和大气环流变化上有很大差异,未能发展成为一次正常的El Niño事件。从上层海洋热容量、赤道太平洋上层海水温度和SST异常来看,热带西太平洋为持续偏冷状态,并无热容量正异常自西太平

洋向东传播,也不存在热量在东西太平洋重新分配的过程,这使得当年的海水增暖只是一个局地现象。从850 hPa风场来看,在1993年3~5月,赤道西风异常在西太平洋出现并向东扩展,这与正常El Niño发生发展的动力条件一致。但是,虽然满足了动力条件,但因未满足热力条件,1993年出现的赤道中东太平洋海水增暖只是一种迅速夭折的“假”El Niño事件。我们的研究支持了已有的关于El Niño发生的观点。从以上分析还可以看出,暖池区热容量积累是El Niño发生的第一要素,西风异常在赤道西太平洋的出现和向东扩展是第二要素,二者缺一不可,并通过海盆尺度的海气耦合机制共同作用,引起El Niño的发生和发展。虽然局地变化可以导致赤道中东太平洋出现海温增暖,但由于缺乏大尺度背景条件,这种增暖缺乏持续发展的潜力并很快衰亡。

1993年El Niño夭折事件并不是一个特例,历史上也曾发生过类似的夭折事件,如1953年。虽然一些研究将该事件归为正常El Niño事件(Rasmusson and Carpenter, 1982),但从海表温度演变过程来看,该事件并不是一次典型的El Niño事件,因此美国气候预测中心在定义El Niño年的时候将其排除在外(http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml [2009-06-02])。

El Niño夭折事件和正常El Niño事件虽有诸多相似之处,但二者的演变和对气候的影响却显著不同。因此,在El Niño事件的监测和预测中,我们对春、夏季赤道中东太平洋的海水变暖需要谨慎判断。当赤道中东太平洋出现了强的海水增暖,不能贸然断定为El Niño已经发生,因为它有可能是一次El Niño夭折事件。根据我们的研究,要综合考虑热带太平洋的整体状况并谨慎判断。除赤道中东太平洋海表温度异常以外,还应考虑西太平洋暖池区的热容量异常情况,如无热容量积累,这种海水增暖很可能是一种局地异常状态,不一定产生El Niño事件。此外,以1991~1992年El Niño事件与1993夭折事件的联系来看,El Niño事件是很难连续发生的,这是因为El Niño事件过程导致暖池热容量出现严重亏损,从而破坏了短期内再次发生El Niño的热力条件,这对我们预测El Niño的发生也具有重要的参考意义。

参考文献 (References)

- 巢清尘, 巢纪平. 2001. 热带西太平洋和东印度洋对 El Niño 事件发展的影响 [J]. 自然科学进展, 11 (12): 1293–1300. Chao Qingchen, Chao Jiping. 2001. The influences of tropical western Pacific and eastern Indian Ocean on the advance of El Niño [J]. Progress in Natural Sciences (in Chinese), 11 (12): 1293–1300.
- 陈幸荣, 王彰贵. 2003. 西风爆发、次表层暖水东移与厄尔尼诺现象 [J]. 海洋学报, 25: 19–27. Chen Xingrong, Wang Zhanggui. 2003. Westerly anomaly, eastward propagation of the sub-surface temperature anomaly and El Niño event [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 25: 19–27.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437–471.
- 李崇银, 穆明权. 1999. 厄尔尼诺的发生与赤道西太平洋暖池次表层海温异常 [J]. 大气科学, 23: 513–521. Li Chongyin, Mu Mingquan. 1999. El Niño occurrence and sub-surface ocean temperature anomalies in the Pacific warm pool [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23: 513–521.
- 李崇银, 穆明权. 2002. El Niño-7 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 [J]. 地球科学进展, 17: 631–638. Li Chongyin, Mu Mingquan. 2002. A further inquiry on essence of the ENSO cycle [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 17: 631–638.
- Li T. 1997. Phase transition of the El Niño–Southern Oscillation: A stationary SST mode [J]. J. Atmos. Sci., 54: 2872–2887.
- 刘长征, 薛峰. 2008. ENSO 发生发展阶段赤道西太平洋西风异常长时间维持的分析 [J]. 气候与环境研究, 13: 161–170. Liu Changzheng, Xue Feng. 2008. The persistent maintenance of the strong westerly anomalies over the equatorial western Pacific during the onset and development phase of ENSO [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13: 161–170.
- 刘长征, 薛峰. 2010. 不同强度 El Niño 的衰减过程. I, 强 El Niño 的衰减过程 [J]. 地球物理学报, 53: 39–48. Liu Changzheng, Xue Feng. 2010. The decay of El Niño with different intensity. Part I, The decay of the strong El Niño [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 53: 39–48.
- Neelin J D, Battisti D S, Hirst A C, et al. 1998. El Niño theory [J]. J. Geophys. Res., 103: 14261–14290.
- Philander S G H. 1983. El Niño Southern Oscillation phenomena [J]. Nature, 302: 295–301.
- Rasmusson E M, Carpenter T H. 1982. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño [J]. Mon. Wea. Rev., 110: 354–384.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. J. Climate, 17: 2466–2477.
- Trenberth K E. 1997. The definition of El Niño [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 78: 2771–2777.
- White W B, Meyers G A, Donguy J R, et al. 1985. Short-term climatic variability in the thermal structure of the Pacific Ocean during 1979–1982 [J]. J. Phys. Oceanogr., 15: 917–935.
- Wyrtki K. 1975. El Niño—the dynamic response of the equatorial Pacific Ocean to atmospheric forcing [J]. J. Phys. Oceanogr., 5: 572–584.
- 薛峰, 何卷雄. 2007. 外热带大气扰动对 ENSO 的影响 [J]. 地球物理学报, 50: 1311–1318. Xue Feng, He Juanxiong. 2007. The influence of the extratropical atmospheric disturbances on ENSO [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50: 1311–1318.
- 严邦良, 张人禾. 2002. 热带西太平洋大气气候基本态与厄尔尼诺期间赤道附近西风异常 [J]. 海洋学报, 24: 39–50. Yan Bangliang, Zhang Renhe. 2002. The role of atmosphere climate basic state in the formation of westerly over the equatorial Pacific [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 24: 39–50.
- 张立峰, 许建平, 何金海. 2006. 西太平洋暖池研究的新进展 [J]. 海洋科学进展, 24: 108–116. Zhang Lifeng, Xu Jianping, He Jinhai. 2006. Recent advances in the western Pacific warm pool studies [J]. Advance in Marine Sciences (in Chinese), 24: 108–116.
- 张人禾, 黄荣辉. 1998. 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: 资料和理论分析 [J]. 大气科学, 22: 597–609. Zhang Renhe, Huang Ronghui. 1998. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22: 587–599.
- 张祖强, 丁一汇, 赵宗慈. 2000. ENSO 发生前与发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题 [J]. 气象学报, 58: 11–25. Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2000. On the westerly wind outbursts in equatorial western Pacific during the onset and development phase of ENSO and before [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58: 11–24.
- 周广庆, 李崇银. 1999. 西太平洋暖池次表层海温异常与 El Niño 关系的 CGCM 模拟结果 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 346–352. Zhou Guangqing, Li Chongyin. 1999. Simulation on the relation between the subsurface temperature anomaly in western Pacific and ENSO by using CGCM [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 4 (4): 346–352.