岳彩军，陆维松. 东太平洋暖池及经向风异常在 ENSO 事件发生、发展过程中的作用. 大气科学，2008，**32** (5)：1051～1063
Yue Caijun, Lu Weisong. The impact of eastern Pacific warm pool and meridional wind anomaly on the genesis and development of ENSO event. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, **32** (5): 1051～1063

东太平洋暖池及经向风异常在 ENSO 事件发生、发展过程中的作用

岳彩军[1, 2]　陆维松[3]

1 中国气象局上海台风研究所，上海　200030
2 中国气象局台风预报技术重点开放实验室，上海　200030
3 南京信息工程大学大气科学学院，南京　210044

摘　要　利用 1982～1999 期间 LDEO 海表温度资料和 NCEP/NCAR 再分析风场资料，分析东太平洋暖池及经向风异常与 ENSO 事件的可能关系。结果表明，东太平洋暖池气候平均海表温度存在明显的季节变化特征，且与 El Niño 事件春季发生、夏季发展、秋季达到成熟及冬季衰亡的成长过程非常相似。经向风异常及其散度与 ENSO 事件密切相关。综合考虑，提出了东太平洋暖池及经向风异常（北风距平及经向风距平散度辐合）对 ENSO 事件发生、发展作用的概念模型：北风距平爆发通过产生北风吹洋流的作用，将东太平洋暖池暖水由北向南输送至赤道附近，从而有利于 Niño3 区海表温度上升；几乎与此同时，东太平洋暖池赤道上经向风距平散度辐合不仅能导致暖水在赤道附近堆积，而且辐合的风场对赤道附近的冷上升流有抑制作用，从而有利于 Niño3 区海表温度的增加，上述增温因素的叠加作用有（不）利于 El Niño（La Niña）事件的发生、发展。进一步分析表明，东太平洋暖池及经向风异常仅对 El Niño（La Niña）事件发生、发展起促进（抑制）作用而不起决定作用。将东太平洋暖池、经向风异常与西太平洋暖池、西风距平结合起来一并考虑，完善了 El Niño 事件发生、发展机制。最后，初步分析 1980、1990 年代 El Niño 事件特性差异的可能原因。

关键词　东太平洋暖池　经向风异常　ENSO 事件　发生和发展
文章编号　1006－9895（2008）05－1051－13　　**中图分类号**　P461　　**文献标识码**　A

The Impact of Eastern Pacific Warm Pool and Meridional Wind Anomaly on the Genesis and Development of ENSO Event

YUE Caijun[1, 2] and LU Weisong[3]

1 *Shanghai Typhoon Institute, China Meteorological Administration, Shanghai*　200030
2 *Laboratory of Typhoon Forecast Technique/China Meteorological Administration, Shanghai*　200030
3 *School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing*　210044

Abstract　By means of LDEO sea surface temperature (SST) and NCEP/NCAR reanalysis wind from 1982 to 1999, the relations of the eastern Pacific warm pool (EPWP) and abnormal meridional wind to ENSO events are analyzed. The results show that the EPWP climatologic SST has a clear intraseasonal variability, which is very similar to El Niño event growth process, i. e., occurring in spring, developing in summer, maturing in autumn and decaying in

收稿日期　2007－02－05，2007－08－21 收修定稿
资助项目　国家自然科学基金资助项目 40275016，上海市气象局科研开发项目 04A06，江苏省气象灾害重点实验室开放课题 KJS0602
作者简介　岳彩军，男，1972 年出生，博士，副研究员，主要从事海气相互作用、中尺度动力学研究。E-mail：yuecaijun2000@163.com

winter, meanwhile, the meridional wind anomaly and its divergence both are closely related to ENSO events. Based on synchronous considerations, a concept model of the EPWP and the meridional wind anomaly (north wind anomaly and convergence of meridional wind anomaly divergence) affecting the genesis and development of ENSO events is suggested, specifically, the north wind anomaly transports EPWP warm water to the equatorial neighborhood by producing southward ocean current, which, in turn, is instrumental to Niño3 SST increase, almost in the meantime, EPWP equatorial abnormal meridional wind convergence not only causes the warm water from north bank to pile up near the equator but also suppresses the cold upwelling around the equator, which, in turn, are favorable to Niño3 SST increase. Such factors are (not) favourable to genesis and development of (La Niña) El Niño events. Further analysis indicates that EPWP and abnormal meridional wind only play a motivating (suppressing) not decisional role in the genesis and development of El Niño (La Niña) events. Considering EPWP and abnormal meridional wind with inclusion of the western Pacific warm pool and abnormal west wind perfects further genesis mechanism for El Niño events. Finally, the characteristics difference of El Niño events occurring between in the 1980s and in the 1990s is simply examined.

Key words the eastern Pacific warm pool, meridional wind anomaly, ENSO event, genesis and development

1 引言

ENSO事件可以被认为是热带地区，特别是赤道地区海-气相互作用最集中的一个反映。关于其形成机制[1]及可预报性问题[2]，国内外许多海洋、气象科学工作者做了大量研究，研究[3~20]表明，西太平洋暖池及异常西风在El Niño事件发生、发展过程中起着十分重要作用。但仅依赖于西风异常及西太平洋暖池并不能完全解释El Niño事件发生、发展成因[4, 17]，这表明可能还有其他因素对El Niño事件发生、发展起着重要的促进作用。在已有关于ENSO事件形成机制的总结工作中[1]，很少关注经向风对ENSO事件发生、发展的作用，如在“延滞振子”理论中就没有涉及到经向风。最近也有研究[21]认为，在研究热带太平洋海气耦合动力学对ENSO不稳定发展的贡献时，采用忽略经向风应力作用的近似是合理可行的。此外，许多关于ENSO研究所提出的概念模式中或用于ENSO模拟的模式中也都忽略了经向风应力。但是，实际观测中发现并非（平均、异常）经向风都远小于（平均、异常）纬向风，并且国内外关于经向风作用的研究工作也一直在进行，且获得了有意义结果。1980年代，Philander和Pacanowski[22]研究表明，在El Niño成长阶段期间穿越赤道的南风呈现松弛现象，这不仅导致南赤道流减弱，同时还诱发一个沿赤道的表面向东洋流，二者都有利于东太平洋海表温度增加。Rasmusson和Carpenter[23]注意到暖事件伴随着穿越赤道的北风发展。Wallace等[24]研究发现，在冷事件的冷季节期间南风将穿越5°N。高士英等[25]分析表明，中东太平洋（180°～140°W）的经向风异常也对El Niño的发生起重要作用。1990年代，Deser和Wallace[26]发现，经向风异常导致整个热带太平洋的大部分表面风辐合异常，进而导致了与纬向、经向以及垂直热量传输密切相关的海洋环流的变化。高士英等[27]指出持续偏强的东北风对El Niño发生、发展和维持起着重要作用。Xie[28]研究气候态的经向风对维持赤道非对称的热带辐合带（ITCZ）所起得作用。Perigaud等[29]发现经向风应力异常对于维持模式ENSO变率起着关键作用。最近，张祖强等[30]研究了热带太平洋经向风异常年际变化与海表温度异常的关系。张人禾等[31, 32]对热带太平洋海表经向风应力与El Niño事件之间的关系进行了诊断分析。结果表明，超前的经向风应力距平场与Niño3区的海表温度异常有显著的超前相关，从动力学上给予了分析说明。在太平洋中除有著名的赤道西太平洋暖池常年位于太平洋的西部外，在东北太平洋还有另一个暖水区常年存在，且被称之为东太平洋暖池[33]。Kessler[33]将东太平洋暖池粗略地定义为120°W以东、赤道以北且海表温度（SST）≥27.5℃的太平洋地区，其南界与赤道冷舌相邻，北界与加利福尼亚洋流的冷水相邻。东太平洋暖池被认为是一个起源于西太平洋暖池且向东穿越洋盆的高SST暖水带的最东段，其南北跨度大于中太平洋暖水带，温度也较中太平洋海表温度高出0.5～1℃，最暖的海表温度位于中美洲沿海地区。为了研究需要，本文

将东太平洋暖池具体定义为（0°～29°N，120°W～80°W）之间且 SST≥27.5℃的东北太平洋地区。岳彩军[34]分析 1997/1998 El Niño 事件成因时指出，东太平洋暖池及北风距平的爆发，对 1997/1998 El Niño 事件发生、发展起着重要的促进作用。因此，全面揭示东太平洋暖池和经向风异常在 ENSO 事件发生、发展过程的作用，具有重要的科学意义。本文将具体分析 1982～1999 年期间东太平洋暖池区海表温度的变化特征，以及该区经向风异常的演变特征，进而寻求它们与 ENSO 事件之间的可能关系，以期进一步完善 ENSO 事件发生、发展可能机制的研究工作。研究所用的海表温度资料为美国哥伦比亚大学 Lamont-Doherty（LDEO）海表温度资料，风场资料为 925 hPa NCEP/NCAR 再分析风场资料。对于逐月海表温度距平（SSTA）来讲，通过逐月平均海表温度减去其所在月的气候平均（1982 年 1 月～1999 年 12 月）海表温度值而得。风场距平计算方案则参照文献[35]。

2　东太平洋暖池气候平均海表温度的季节变化特征

为了分析研究东太平洋暖池海表温度的季节变化特征，将 1982～1999 年期间对应月的海表温度加起来求平均，得到 1～12 月的气候平均海表温度场。分别用 27.5℃、29℃等温线表示东太平洋暖池的暖水范围、强度。由图 1 可知，1 月、2 月，东太平洋暖池仅有孤立的 27.5℃以上暖水团存在；3 月，孤立的暖水团发展为片状，且出现 29℃以上的海表温度；4 月，29℃以上暖水面积迅速扩大；5 月、6 月，东太平洋暖池暖水面积及强度都达到了鼎盛时期；7 月，暖水面积、强度分别明显减小、减弱；8 月、9 月，27.5℃以上暖水面积仍呈逐月递减趋势；10 月、11 月及 12 月，东太平洋暖池暖水面积、强度都在逐月递减，且在 12 月 29℃以上暖水中心消失。上述分析表明，东太平洋暖池的海表温度存在明显季节变化特征：春季（3～5 月）达到鼎盛时期，夏季（6～8 月）、秋季（9～11 月）在逐月减弱，冬季（12、1、2 月）降到最低。从某种意义上来讲，东太平洋暖池海表温度的季节变化特征与 El Niño 事件的成长过程有许多相似之处，因为 El Niño 事件一般是在春季萌芽、发生，夏季成长，秋季达到成熟，冬季衰亡。同时，东太平洋暖池区有相当一部分与 Niño 3 区（5°S～5°N，150°W～90°W）重叠，于是自然地将这两种现象联系到一起。但东太平洋暖池的暖水是如何影响到 El Niño 事件发展、发生过程的？下面将结合 1982～1999 年期间发生的 ENSO 事件进行深入、具体分析。

3　异常经向风及其散度与 Niño3 指数相关分析

用（5°S～0°，120°W～80°W）与（0°～5°N，120°W～80°W）之间的区域平均的经向风距平之差，表示 120°W～8°W 赤道上经向风距平的散度。分别计算 1982～1999 年期间（0°～10°N，120°W～80°W）区域平均的经向风距平、120°W～80°W 赤道上经向风距平的散度与 Niño3 指数的交叉相关系数。结果表明（图 2），区域平均的经向风距平与 Niño3 指数呈明显负相关，并且通过 0.01 信度检验的超前/滞后时间可长达 6 个月。最强相关（－0.58）出现在两者的同期变化上。对于相同的滞后时间如 2～4 个月，区域平均的经向风距平超前时的相关系数高于 Niño3 指数超前时的值，这表明区域平均的经向风距平对 Niño3 区增温作用在前，而 Niño3 区海表温度可能存在的反馈作用在后。而经向风距平的散度与 Niño3 指数呈明显的正相关，最大正相关（0.45）也是出现在两者的同期变化上，且经向风距平散度超前 6 个月/滞后 3 个月内的相关系数都能通过 0.01 信度检验。对于相同的滞后时间如 2～6 个月，经向风距平散度超前时的相关系数高于 Niño3 指数超前时的值，从而表明经向风距平散度对 Niño3 区增温作用在前，而 Niño3 区海表温度可能存在的反馈作用在后。分析表明，经向风异常及其散度与 ENSO 事件密切相关。

4　异常经向风及其散度的时间演变特征

文献[36]对 1980～2000 年期间发生的 El Niño、La Niña 事件给出了详细起止时间划分，具体情况为：El Niño 事件有 6 次，1982/1983（1982 年 5 月～1983 年 9 月）、1986/1987（1986 年 9 月～1988 年 1 月）、1991/1992（1991 年 5 月～1992 年 7 月）、1993/1993（1993 年 3 月～1993 年 11 月）、1994/1995（1994 年 9 月～1995 年 2 月）及 1997/1998（1997 年 4 月～1998 年 5 月）；La Niña 事件有 4

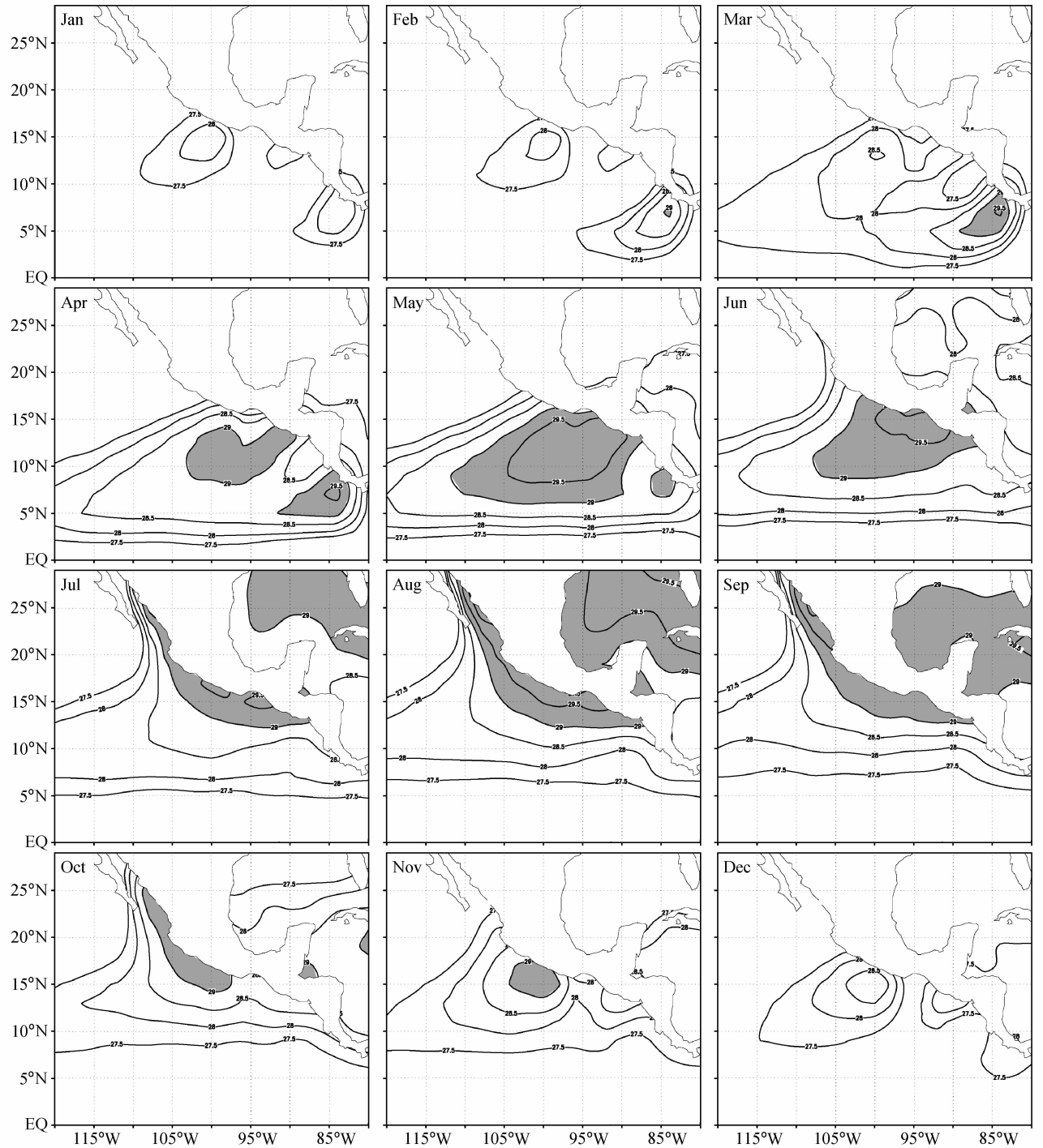

图 1 1～12 月气候平均（1982～1999 年）海表温度场（单位：℃）。等值线间隔：0.5℃；阴影：SST≥29℃

Fig. 1 Climatological mean (1982－1999) SST (℃) from Jan to Dec. Contour interval: 0.5℃; shading: SST≥29℃

次，1984/1985（1984 年 10 月～1985 年 10 月）、1988/1989（1988 年 4 月～1989 年 5 月）、1995/1996（1995 年 9 月～1996 年 4 月）及 1998/2000（1998 年 10 月～2000 年 3 月）。下面将着重分析上述 ENSO 事件期间异常经向风及其散度的时间演变特征。

4.1 异常经向风的时间演变特征

首先，分析 1982～1999 年期间 120°W～80°W

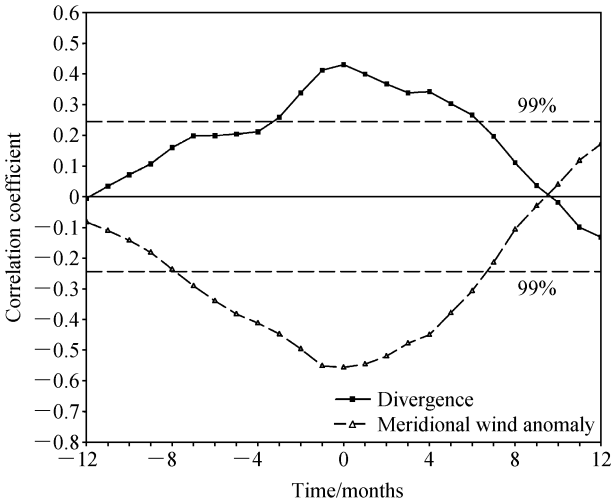

图 2　1982～1999 期间东太平洋暖池经风距平及其散度与 Niño3 指数的交叉相关。横坐标正（负）值表示经向风距平、散度超前（滞后）；水平横虚线为 99%信度标准

Fig. 2　Cross correlations of Niño3 index to the meridional wind anomaly over the eastern Pacific warm pool and its divergence during 1982－1999. Positive (negative) values of x-coordinate indicate that the meridional wind anomaly and its divergence lead (lag) the Niño3 index. The horizontal dashed lines denote 99% significance level

平均经向风距平的纬度-时间分布特征。由图 3 可以看到，1980 年代（图 3a），1982 年 3 月～1985 年 6 月赤道上几乎连续出现北风距平，1985 年 9～10 月、1986 年 2 月、1987 年 3 月、1988 年 11 月～1989 年 2 月、1989 年 11 月，赤道上也都有北风距平存在。1990 年代（图 3b），1991 年 3 月～1994 年 10 月期间，赤道上几乎是连续的北风距平出现，1996 年 1 月、3～7 月、12 月，赤道上也都有北风距平出现，1997 年 2 月～1998 年 10 月，也几乎是连续的北风距平在赤道上出现。上述分析表明，在多数 El Niño 事件期间（1982/1983、1991/1992、1993/1993、1994/1995、1997/1998），赤道上都有连续数月的北风距平爆发。当然，1986/1987 El Niño 事件期间，仅在 1987 年 3 月有北风距平由北向南穿越赤道。在个别 La Niña 事件（1984/1985、1988/1989）期间，赤道上也有明显的持续北风距平出现。

进一步分析 1982～1999 年期间（0°～10°N，120°W～80°W）区域平均经向风距平的时间演变特征（图 4）发现，在 6 次 El Niño 事件期间都有北风距平存在，但北风距平的强度差异非常明显。具体情况为，1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件期间北风距平最为显著，最大北风距平分别达到－1.3 m/s、－1.4 m/s，而 1993/1993、1994/1995 乃至 1986/1987 年 El Niño 事件期间的北风距平则明显偏弱，最大北风距平基本没有超过－0.5 m/s，相对上述 El Niño 事件来讲，1991/1992 年 El Niño 事件的北风距平强度处于中等，最大北风距平达到－0.7 m/s。同时我们也注意到，在一些 La Niña 事件期间也频繁有北风距平出现，如在 1984/1985、1988/1989 及 1995/1996 年 La Niña 事件期间都有频繁的或持续的北风距平出现，虽然强度明显较 1982/1983、1997/1998 年 El Niño 期间爆发的北风距平强度弱，但与 1986/1987、1993/1993 及 1994/1995 年 El Niño 期间爆发的北风距平强度基本相当。

4.2　异常经向风散度的时间演变特征

现在来分析 1982～1999 年期间 120°W～80°W 赤道上异常经向风散度[(5°S～0°，120°W～80°W) 与 (0°～5°N，120°W～80°W) 经向风距平之差]随时间的演变特征。由图 5 可以看到，1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件期间，有最为显著的经向风距平散度辐合，最大辐合强度分别达到 0.7 m/s、0.95 m/s。1986/1987 年 El Niño 事件期间，也有较为明显经向风距平散度辐合，最大辐合强度达到 0.35 m/s。但 1991/1992 及 1993～1995 年 El Niño 事件期间，经向风距平散度辐合不明显，最大辐合强度仅为 0.2 m/s。相反，在一些 La Niña 事件期间，却有较为明显的经向风距平散度辐合，如 1995/1996 年 La Niña 事件期间，最大辐合强度达到 0.35 m/s。此外，在 1984/1985、1988/1989 年 La Niña 事件期间，也有弱的经向风距平散度辐合现象存在。

综上所述，在 6 次 El Niño 事件期间，都有频繁的或持续的北风距平爆发，尤以 1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件期间爆发的北风距平最为显著，1991/1992 年 El Niño 事件期间也有较为明显的频繁或持续的北风距平爆发。在 6 次 El Niño 事件期间，基本都有频繁的或连续的经向风距平散度辐合出现，尤以 1997/1998、1982/1983 年 El Niño 事件期间经向风距平散度辐合最为显著，1986/1987 年 El Niño 事件期间也有较为明显的经向风距平散度辐合存在。这不仅充分表明东太

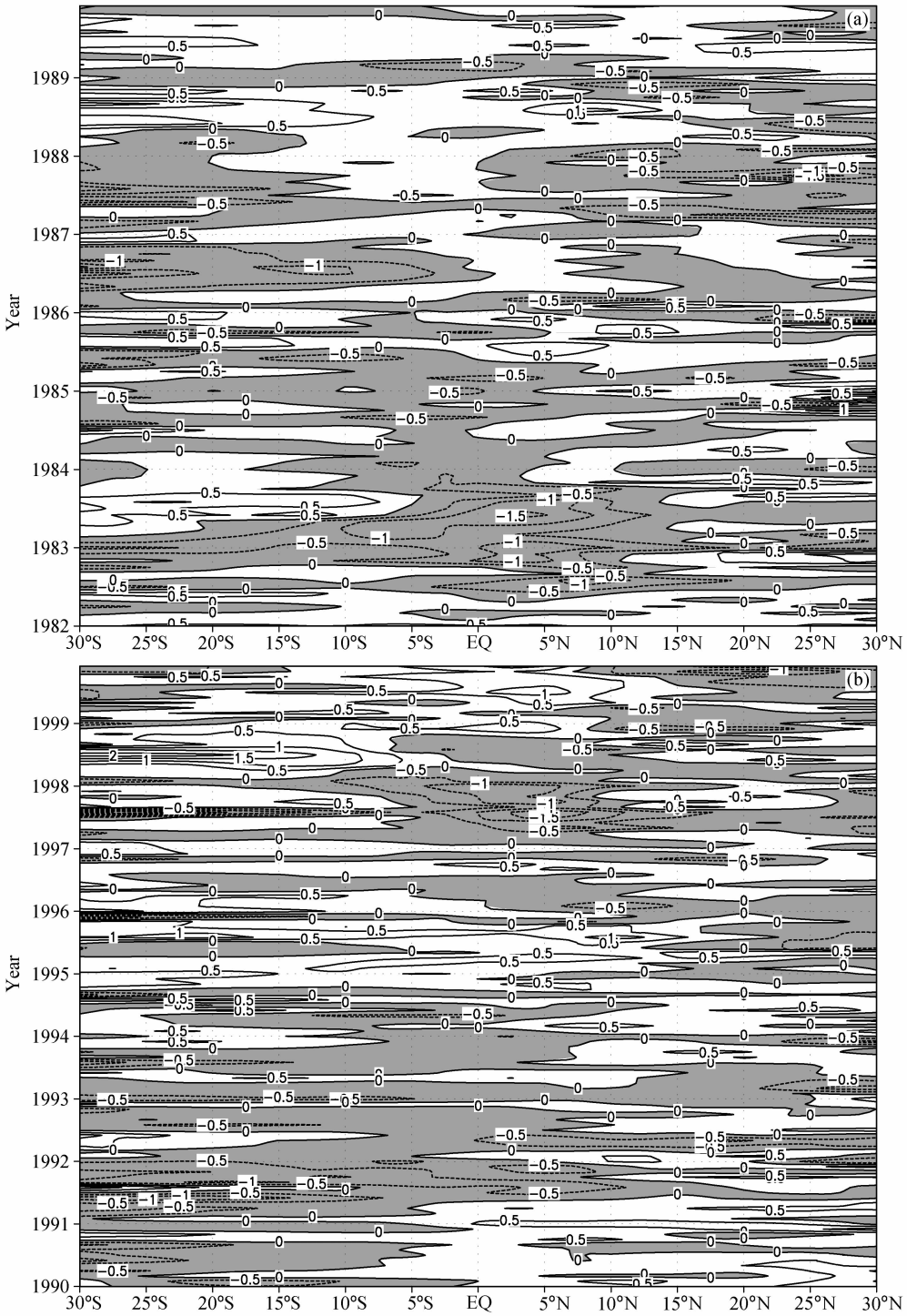

图 3 120°W～80°W 平均经向风距平的经向时间变化（单位：m/s）：(a) 1982～1989 年；(b) 1990～1999 年。等值线间隔：0.5 m/s；阴影：北风距平

Fig. 3 Meridional variation of meridional wind anomaly averaged over 120°W－80°W (m/s): (a) 1982－1989; (b) 1990－1999. Contour interval is 0.5 m/s, and shaded area indicates north wind anomaly

平洋暖池的北风距平与 El Niño 事件关系密切，而且也充分表明东太平洋暖池赤道上异常经向风散度辐合与 El Niño 事件关系密切，二者皆可能是促使 El Niño 事件发生的一个重要因素。同时我们也注意到，相对来讲，1986/1987 年 El Niño 事件期间爆发的北风距平强度明显弱于其他 El Niño 事件期

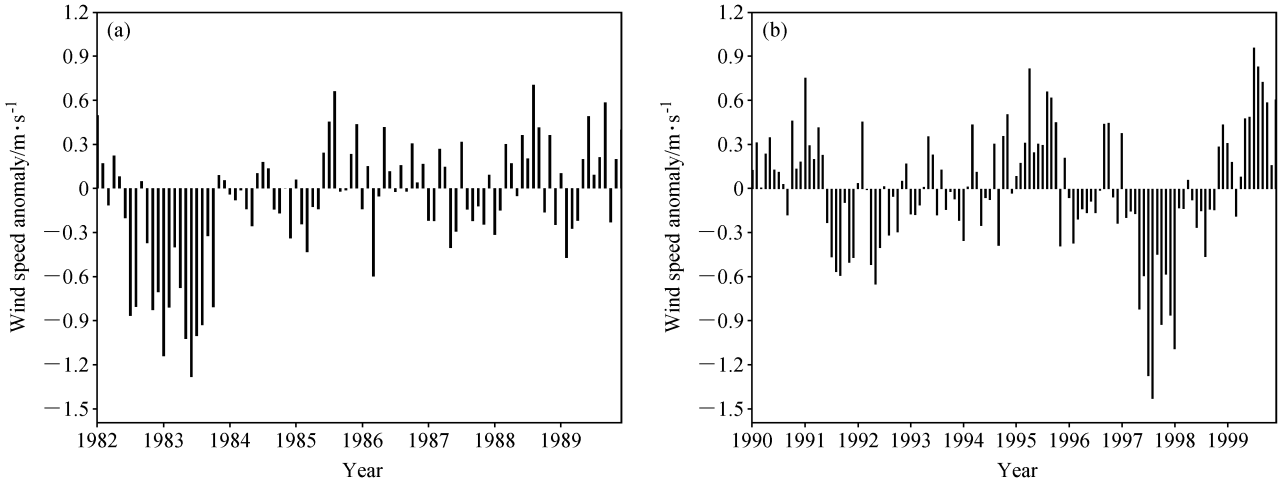

图 4　逐月平均的（0°～10°N，120°W～80°W）经向风距平（单位：m/s）：(a) 1982～1989 年；(b) 1990～1999 年

Fig. 4　Monthly meridional wind anomaly (m/s) averaged over (0°－10°N, 120°W－80°W): (a) 1982－1989; (b) 1990－1999

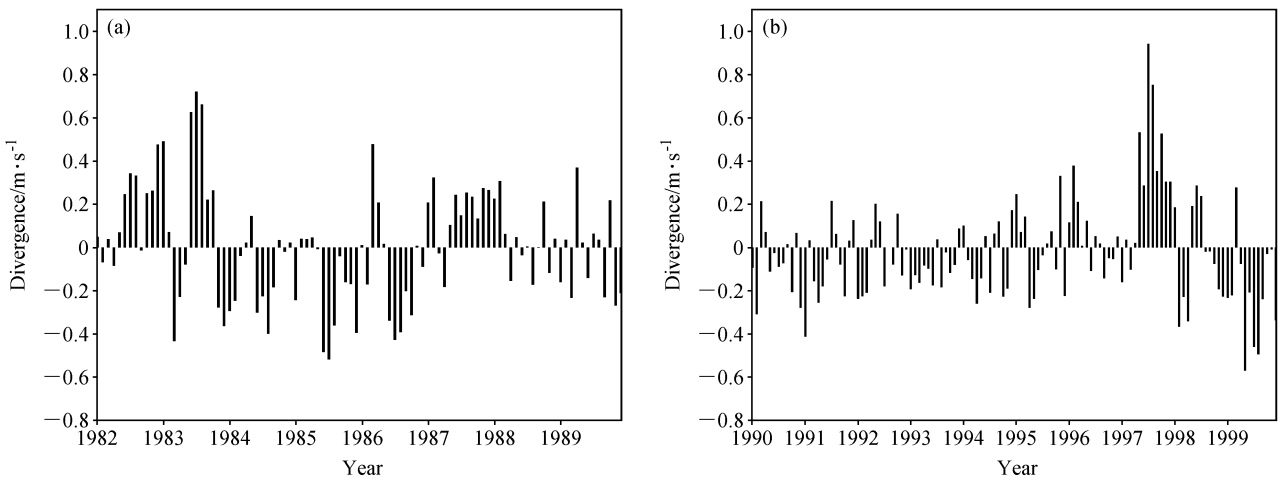

图 5　异常经向风散度的时间演变特征（单位：m/s）：(a) 1982～1989 年；(b) 1990～1999 年

Fig. 5　Temporal evolution feature of abnormal meridional wind divergence (m/s): (a) 1982－1989; (b) 1990－1999

间爆发的北风距平强度，且 1990 年代前半时段发生的几次 El Niño 事件期间，经向风距平散度辐合不明显，这表明东太平洋暖池经向风异常可能不是 El Niño 事件发生的决定因素，即不是 El Niño 发生、发展的必需条件。此外，我们也注意到在一些 La Niña 事件（如 1984/1985、1995/1996）期间，也有较为频繁的或持续的北风距平爆发，且强度与一些 El Niño 事件（如 1986/1987）期间爆发的北风距平强度相当，同时，在一些 La Niña 事件期间也同样有频繁、持续的经向风距平散度辐合出现，况且辐合强度也并不比某些 El Niño 事件期间出现的经向风距平散度辐合强度弱，这表明东太平洋暖池经向风异常并不是 El Niño 事件的专有现象，在非 El Niño 期间也同样可以出现。那么东太平洋暖池、经向风异常对 El Niño 事件、La Niña 事件的发生、发展究竟起什么样的作用？

5　东太平洋暖池、异常经向风作用的概念模型及 El Niño 事件的可能完善机理

基于第 2～4 节分析，我们认为，东太平洋暖池的暖水不仅存在季节变化、常年存在，而且能对 Niño3 区海表温度变化产生影响，影响的主要媒介是通过东太平洋暖池爆发的北风距平，且赤道上异常经风散度辐合也是一个重要影响因素。于是提出了东太平洋暖池及经向风异常对 Niño3 海表温度

变化影响的一个概念模型：北风距平爆发通过其驱动形成的北风吹流[37, 38]，将东太平洋暖池暖水直接向南输送至赤道附近，同时，东太平洋暖池赤道上异常经向风散度辐合，不仅致使北来的暖水在赤道附近堆积，而且对赤道附近的上翻流有抑制作用，上述增温因素的叠加作用都有利于（5°S～5°N，120°W～80°W）海表温度增加，从而有利于 Niño3 区海表温度增加，即有（不）利于 El Niño（La Niña）事件发生、发展。也就是说，东太平洋暖池的存在，是东太平洋暖池北风距平爆发能对 Niño3 区海表温度变化产生影响的重要前提条件，而赤道东北太平洋北风距平的爆发，又是东太平洋暖池对 Niño3 区海表温度影响的主要媒介，同时，东太平洋暖池赤道上异常经向风散度辐合，不仅有利于暖水在赤道附近堆积，而且对赤道附近的上翻流有抑制作用，从而也有利于海表温度增加。因此，我们认为东太平洋暖池和爆发的北风距平二者对 Niño3 区海表温度变化影响存在“链锁”关系，与西太平洋暖池和爆发的西风距平二者之间对 Niño3 区海表温度产生影响的“链锁”关系相似。但是否也存在海洋波动作用有待将来进一步研究。

下面将结合 1980～2000 年期间发生的 ENSO 事件，进一步分析东太平洋暖池及经向风异常对 ENSO 事件发生、发展作用机理。在 1980～2000 年期间有 6 次 El Niño 事件，分别为 1982/1983、1991/1992、1993/1993、1994/1995 及 1997/1998 年 El Niño，它们的强度存在明显的差异，按照 Niño3 区海表温度异常强度可将它们划分为不同强度级别[36]。具体情况为，1982/1983、1986/1987 及 1997/1998 年 El Niño 为极强暖事件，1991/1992 年 El Niño 为强暖事件，而 1993/1993、1994/1995 年 El Niño 为弱暖事件。其中，1980 年代最强的暖事件为 1982/1983 年 El Niño，1990 年代最强的暖事件为 1997/1998 年 El Niño 即为 20 世纪最强的暖事件。前文分析表明，在 1986/1987 年 El Niño 事件期间，东太平洋暖池赤道上有明显的经向风距平散度辐合，在 1991/1992 年 El Niño 事件期间，东太平洋暖池有明显的北风距平爆发，而在 1980 年代最强的 1982/1983 年 El Niño 事件、1990 年代最强的 1997/1998 年 El Niño 事件期间，不仅东太平洋暖池有异乎寻常的北风距平爆发，而且东太平洋暖池赤道上也有显著的经向风距平散度辐合出现，且强度明显较其他 El Niño 事件期间大。这表明，东太平洋暖池北风距平的爆发、赤道上经向距平风散度的辐合对 El Niño 事件的发生、发展的强度乃至速度，都有明显的促进作用，若二者同时显著出现，则对 El Niño 事件发生、发展的促进效果更为明显。另外，我们也注意到，在 1986/1987 年 El Niño 事件期间东太平洋暖池没有明显的北风距平爆发，在 1991/1992 年 El Niño 事件期间东太平洋暖池赤道上没有明显的经向风距平散度辐合出现，但 1986/1987、1991/1992 年 El Niño 事件不仅发生了而且强度也达到了中等。这表明东太平洋暖池爆发北风距平、赤道上经向风距平散度的辐合对 El Niño 事件的发生、发展不起决定作用，即在没有北风距平爆发或没有经向风距平散度辐合出现的情况下，El Niño 事件同样也会发生，且强度也可以达到中等。前文分析也表明，在一些 La Niña 事件期间，东太平洋暖池也有北风距平爆发或赤道上也有经向风距平散度辐合现象发生，这意味着东太平洋暖池的北风距平、经向风距平散度辐合只可能对 La Niña 的发生的速度、发展的强度起抑制作用，仅可能削弱 La Niña 事件强度或可能加速 La Niña 事件衰亡，但无法阻止 La Niña 事件的发生，即不起决定作用。综上所述，我们认为东太平洋暖池及经向风异常（北风距平爆发、经向风距平散度辐合）对 El Niño 事件的发生、发展有促进作用，而不是决定作用；对 La Niña 事件的发生、发展有抑制作用，但也不是决定作用。

西太平洋暖池及爆发的异常西风是经常被用来解释 El Niño 事件的发生、发展机制的海、气物理因子。如果将东太平洋暖池及经向风异常对 El Niño 事件发生、发展的促进作用一并结合起来考虑的话，可能更有助于 El Niño 事件形成机制的进一步完善。当西太平洋暖池有西风距平爆发时，伴随着东太平洋暖池不仅有异常显著的北风距平爆发，而且在赤道上也有显著的经向风距平散度辐合，那么发生的 El Niño 事件强度将异常强大，这可以解释 1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件的强度为什么会那么强。当西风距平爆发时，伴随着东太平洋暖池仅有较明显的北风距平爆发，或者在赤道上仅有较明显的经向风距平散度辐合，那么 El Niño 事件的强度不会达到最强但也可以达到中等，这可以解释 1986/1987、1991/1992 年 El Niño 事

件。当西风距平爆发时，伴随着东太平洋暖池仅有弱的、甚至无北风距平爆发，或者在赤道上仅有弱的、甚至无经向风距平散度辐合，那么 El Niño 事件的强度就会较弱，这可以用来解释强度弱的 El Niño 事件。因此，在考虑 El Niño 事件发生机制时，不仅要考虑西太平洋暖池及西风异常的作用，同时也要考虑东太平洋暖池及经向风异常的作用。与前人的观点一致，我们认为西太平洋暖池、西风距平的爆发对 El Niño 事件发生起主要作用，同时也明确指出，东太平洋暖池北风距平的爆发及赤道上的经向距平风散度辐合，对 El Niño 事件的发生起重要的促进作用。因此，将东太平洋暖池及经向风异常和西太平洋暖池及异常西风一并结合起来考虑，则是对 El Niño 事件发生机制的进一步完善。

6　1980 年代、1990 年代 El Niño 事件特性差异的可能原因

在 1980 年代发生 2 次 El Niño 事件，而在 1990 年代出现 4 次 El Niño 事件，其中 1997/1998 年 El Niño 事件是 20 世纪最强的一次暖事件。从某种意义来讲，1990 年代 El Niño 事件不仅爆发的频率较 1980 年代明显增加，而且最强 El Niño 事件的强度也增加了。那么究竟是什么原因导致这种现象出现？原因可能有多种。下面将通过比较 1980 年代与 1990 年代东太平洋暖池气候平均海表温度的差异以及经向风异常状况的差异，来进行探讨分析。

6.1　1980 年代、1990 年代相关分析的比较

首先，比较 1980 年代和 1990 年代（0°～10°N，120°W～80°W）区域平均的经向风距平和 120°W～80°W 赤道上经向风距平散度与同期 Niño3 指数的交叉相关系数之间的差异。由图 6a 可知，区域平均的经向风距平在 1980 年代、1990 年代与 Niño3 指数都有显著的负相关。在 1980 年代，Niño3 指数超前 1 个月有（绝对值）最大负相关（−0.57），而在 1990 年代，区域平均经向风距平超前 1～4 个月有（绝对值）最大负相关（−0.63）。120°W～80°W 赤道上经向风距平散度在 1980 年代、1990 年代与 Niño3 指数都有显著的正相关（图 6b）。在 1980 年代，Niño3 指数超前 1 个月有最大正相关（0.45），而在 1990 年代，经向风距平散度超前 5 个月有最大正相关（0.47）。显然，1980 年代、1990 年代经向风距平和其散度与 Niño3 指数的关系存在明显的差异。在 1990 年代经向风距平变化、经向风距平散度变化都超前于 Niño3 指数的变化，而在 1980 年代却相反。从某种意义上来讲，在 1990 年代，北风距平爆发、经向风距平散度辐合超前于 Niño3 指数增长几个月，也就是说北风距平的爆发及经向风距平的辐合提前几个月为 El Niño 事件的发生作准备。而在 1980 年代，El Niño 事件发生 1 个月后，北风距平才爆发，随后才出现经向风距平散度辐合。显然，在 1990 年代，北风距平爆发及经向风距平散度辐合不仅对 El Niño 事件发展有明显的促进作用，而且对 El Niño 事件的发生也有明显的促进作用，但

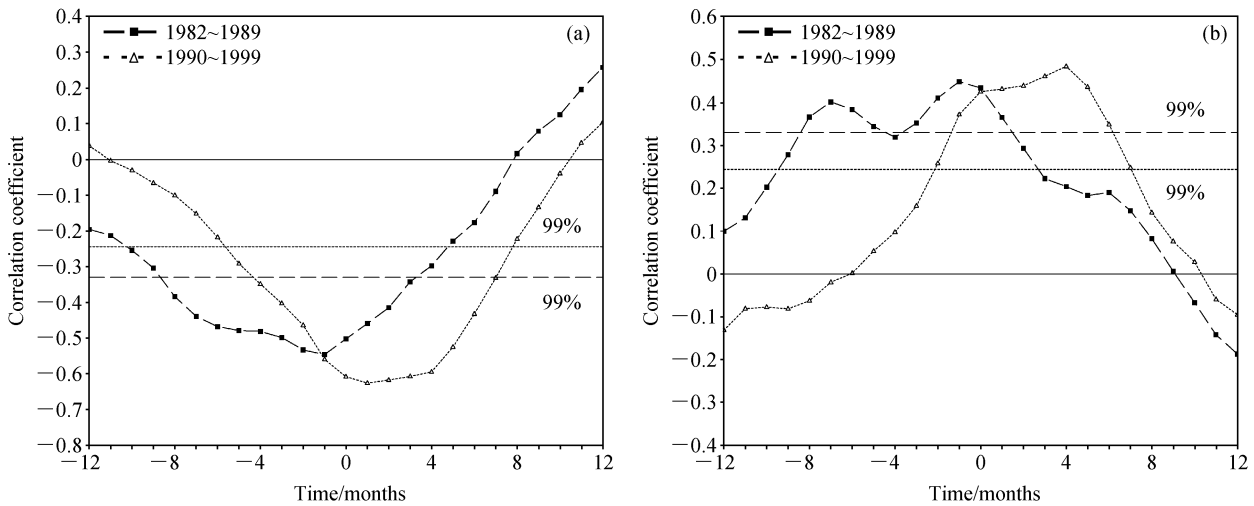

图 6　东太平洋暖池经风距平（a）及其散度（b）与 Niño3 指数的交叉相关，其余同图 2

Fig. 6　Same as Fig. 2, except for cross-correlations of Niño3 index to meridional wind anomaly over the eastern Pacific warm pool (a) and its divergence (b)

在 1980 年代，北风距平的爆发及经向距平风散度的辐合，仅对 El Niño 事件的发展有明显的促进作用，而对 El Niño 事件发生的促进作用相对 1990 年代来讲不明显。因此，通过相关计算，可从一定角度初步解释为什么 1990 年代 El Niño 事件发生的频率要高于 1980 年代。

6.2 1980 年代、1990 年代东太平洋暖池气候平均海表温度的差异

下面，分析 1980 年代与 1990 年代东太平洋暖池气候平均海表温度的差异。具体的比较方案是：先分别将 1980 年代、1990 年代对应月海表温度加起来求平均，这样便得到 1980 年代、1990 年代的 1～12 月海表温度的气候平均值，然后将二者对应相减，这样便得到 1990 年代与 1980 年代的 1～12 月气候平均海表温度的差（简称 SSTAC）。分析表明，2～8 月不仅整个分析区域内正 SSTAC 的面积大于负 SSTAC 的面积，且在 5°N 以南地区正 SSTAC 的面积也大于负 SSTAC 的面积，尤其是在 5～6 月（图 7）达到最为鼎盛时期。El Niño 事件一般是在春季酝酿发生，在夏季迅速成长，到秋季达到成熟。因此，在 2～8 月期间尤其是 5～6 月期间，1990 年代东太平洋暖池较 1980 年代拥有更多、更丰富的暖海水，这不仅更有利于 El Niño 事件的发生，即导致 El Niño 事件发生频率增加，而且也有利于 El Niño 事件的发展，即导致 El Niño 事件强度加大。

6.3 1980 年代、1990 年代东太平洋暖池气候平均经向风距平的差异

东太平洋暖池主要以异常经向风爆发作为媒介，来对 El Niño 事件的发生、发展造成影响。因此，下面分析 1980 年代、1990 年代东太平洋暖池 1～12 月气候平均经向风距平的差异。具体的比较方案是，首先利用 LDEO 方案[35]求得 1982～1999 年期间逐月的经向风距平，然后分别将 1980 年代、1990 年代各自对应月的经向风距平加起来求平均，这样便得到 1980 年代、1990 年代各自 1～12 月逐月经向风距平的气候平均值，然后二者对应相减，于是得到 1990 年代与 1980 年代 1～12 月逐月气候平均经向风距平的差。分析表明，1990 年代东太平洋暖池在冬、春两季爆发的北风距平强度并不比 1980 年代强，甚至还弱，而夏（图 8）、秋两季 1990 年代东太平洋暖池爆发的北风距平强度要大于 1980 年代，这显然有利于 El Niño 事件的迅速发展及强度增加。此外，对于东太平洋暖池赤道上经向风距平散度来讲，1990 年代与 1980 年代 1～12 月的气候平均值相差不大（图略）。

综上所述，东太平洋暖池的海表温度在 2～8 月，尤其是 5～6 月期间，1990 年代明显强于 1980 年代，在春、夏两季增加的海表温度有利于 El Niño 事件的发生、发展，即有利于 El Niño 事件的

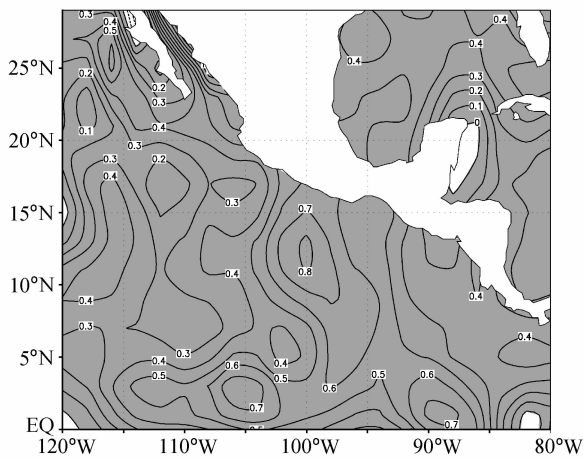

图 7 6 月份东太平洋暖池海表温度气候平均值（1990～1999 年与 1982～1989 年）的差。等值线间隔为 0.1℃，阴影表示差值大于 0

Fig. 7 The difference of climatologic mean sea surface temperature over the eastern Pacific warm pool in June between 1990－1999 and 1982－1989. Contour interval is 0.1℃, and shaded area indicates that difference is larger than 0

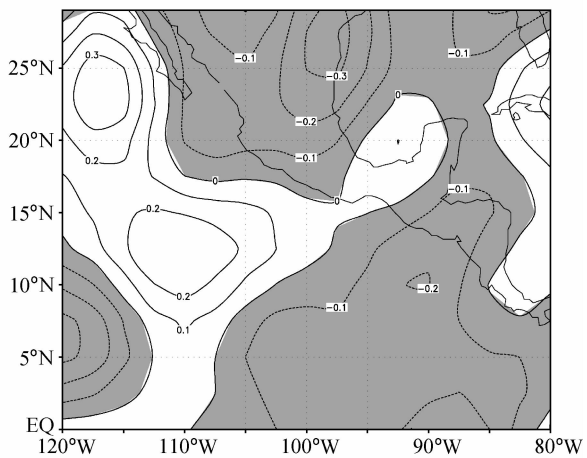

图 8 8 月份东太平洋暖池经向风距平气候平均值（1990～1999 年与 1982～1989 年）的差。等值线间隔为 0.1 m/s，阴影表示差值小于 0

Fig. 8 The difference of climatologic mean meridional wind anomaly over the eastern Pacific warm pool in Aug between 1990－1999 and 1982－1989. Contour interval is 0.1 m/s, and shaded area indicates that difference is less than 0

频率增加、强度加大。与此同时，在夏、秋两季东太平洋暖池爆发的北风距平强度也是 1990 年代大于 1980 年代，这有利于暖水由北向南输送，从而有利于 El Niño 事件的迅速发展和强度急剧加大。因此，1990 年代东太平洋暖池海表温度在春、夏两季较 1980 年代强，以及北风距平在夏、秋两季较 1980 年代强，可能是导致 1990 年代 El Niño 事件出现的频率高于 1980 年代、强度大于 1980 年代的原因之一。

最后值得注意的是，促使东太平洋暖池北经向洋流距平形成的因子，除爆发的北风距平通过风吹流的作用而形成北经向洋流距平外，西风距平爆发也能导致北经向洋流距平产生，因为根据简化的埃克曼漂流表达式 $v=-\tau^x/fH$ 可知，若有西风距平爆发（在北半球），则会有北经向洋流距平产生，这也意味着在赤道东太平洋没有北风距平爆发时，同样可以有北经向洋流距平产生的可能。因此，对于东太平洋暖池来讲，通过西风距平爆发作为媒介也同样可以对 Niño3 区海表温度变化产生影响。这也表明东太平洋暖池的存在是非常重要的，其对 Niño3 区海表温度的影响媒介可以有多种。此外，由于缺乏可靠的洋流资料，本文没有给出东太平洋暖池经向洋流距平的时间演变特征，这也是本文的不足之处。

7　小结

通过上述分析，得到以下结论：

（1）东太平洋暖池气候平均海表温度，存在明显的季节变化特征，且与 El Niño 事件的成长过程即春季发生、夏季发展、秋季达到成熟及冬季衰亡非常相似。

（2）基于观测资料分析的结果，提出东太平洋暖池及经向风异常对 ENSO 事件发生、发展作用的概念模型：北风距平爆发通过产生北风吹洋流的作用，将东太平洋暖池暖水由北向南输送至赤道附近，从而有利于 Niño3 区海表温度上升，几乎与此同时，赤道上经向风距平散度辐合不仅能导致暖水在 Niño3 区堆积，而且对 Niño3 区的上升流有抑制作用，从而也有利于 Niño3 区海表温度的增加，上述增温因素的叠加作用有（不）利于 El Niño（La Niña）事件的发生、发展。

（3）进一步分析表明，东太平洋暖池及北风距平爆发、经向风距平散度辐合仅对 El Niño 事件发生、发展起促进作用而不是起决定作用，也就是说，它们只能促进 El Niño 事件发生速度、发展强度而不能决定 El Niño 事件是否发生；它们对 La Niña 事件的发生、发展仅起抑制作用，对 La Niña 事件是否发生同样不能起决定作用。

（4）将东太平洋暖池、经向风异常（北风距平及经向风距平散度辐合）与西太平洋暖池、西风距平结合起来一并考虑，实现了对 El Niño 事件发生、发展机制的进一步完善。

（5）从 1980 年代、1990 年代东太平洋暖池气候平均海表温度及经向风距平强度的差异，初步给出了 1990 年代 El Niño 事件出现的频率较 1980 年代高、（最大）强度较 1980 年代大的一个可能原因。

不可否认，针对有的 El Niño 事件发生时并没有西风爆发的现象，以及有异常西风爆发时而并无 El Niño 事件发生这一特殊现象，利用本文完善后的 El Niño 事件发生机制也不能给出满意的解释，这表明可能还有其他因素影响或决定 El Niño 事件的发生。另外，关于 El Niño 成因也曾有研究[39]提出与众不同的观点，认为 El Niño 事件的发生仅与东太平洋暖水库（即东太平洋暖池）季节性的南、北移动有关：东太平洋暖水库季节性地移到赤道以南（北）则出现 El Niño（La Niña），而与西风的爆发及西太平洋暖水库（即西太平洋暖池）无关。也就是说，该研究认为东太平洋暖水库是 El Niño 出现的决定因素，而与西太平洋暖池及西风的爆发无关。可见，关于 El Niño 事件的形成机制还有待于将来一步全面、深入地研究与认识。

致谢　美国哥伦比亚大学地球观象台（LDEO）提供了海表温度资料，南京大气资料中心提供了 NCEP/NCAR 再分析风场资料。同时，审稿专家对本文提出了许多宝贵意见和建议，《大气科学》编委给予了热情帮助，在此一并表示由衷的感谢！

参考文献（References）

[1] Wang C Z. On the ENSO mechanisms. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (5): 674～691

[2] 段晚锁，穆穆. 用非线性最优化方法研究 El Niño 可预报性的进展与前瞻. 大气科学，2006，**30** (5)：759～766
Duan Wansuo, Mu Mu. Advance and prospect of the studies of El Niño predictability by nonlinear optimization method.

Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2006, **30** (5): 759～766

[3] Philander S G H. The response of equatorial oceans to a relaxation of the trade winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 1981, **11**: 76～89

[4] Luther D S, Harrison D E, Knox R A. Zonal winds in the central equatorial Pacific and El Niño. *Science*, 1983, **222** (4621): 327～330

[5] Harrison D E, Giese B S. Remote westerly wind forcing of the eastern equatorial Pacific; some model results. *Geophys. Res. Lett.*, 1988, **15**: 804～807

[6] Giese B S, Harrison D E. Eastern equatorial Pacific response to three composite westerly wind types. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**: 3239～3248

[7] Kindle J C, Phoebus P A. The ocean response to operational westerly wind bursts during the 1991－1992 El Niño. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 4893～4920

[8] 傅云飞，黄荣辉. 热带太平洋西风异常对 ENSO 事件发生的作用. 大气科学，1996，**20** (6)：641～654
Fu Yunfei, Huang Ronghui. The effect of the westerly anomalies over the tropical Pacific on the occurrence of ENSO events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1996, **20** (6): 641～654

[9] 傅云飞，黄荣辉. 东亚西风异常活动对热带西太平洋西风爆发及 ENSO 发生的作用. 大气科学，1997，**21** (4)：485～492
Fu Yunfei, Huang Ronghui. Impacts of westerly anomalies over East Asia on westerly burst over the western tropical and the occurrence of ENSO events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1997, **21** (4): 485～492

[10] 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** (4)：587～599
Zhang Renhe, Huang Ronghui. Dynamical roles of zonal wind stresses over the tropical Pacific on the occurring and vanishing of El Niño. Part I: Diagnostic and theoretical analyses. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1998, **22** (4): 587～589

[11] McPhaden M J, Yu X. Equatorial waves and the 1997－1998 El Niño. *Geophys. Res. Lett.*, 1999, **26**: 2961～2964

[12] McPhaden M J. Genesis and evolution of the 1997－98 El Niño. *Science*, 1999, **283**: 950～954

[13] Vecchi G A, Harrison D E. Tropical Pacific sea surface temperature anomalies, El Niño, and equatorial westerly wind events. *J. Climate*, 2000, **13**: 1814～1830

[14] 张祖强，丁一汇，赵宗慈. ENSO 发生前与发展初期赤道西太平洋西风异常的爆发问题. 气象学报，2000，**58** (1)：11～25
Zhang Zuqaing, Ding Yihui, Zhao Zongci. On the westerly wind outbursts in equatorial western Pacific during the onset and development phases of ENSO and before. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (1): 11～25

[15] 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)，2001，**31** (8)：697～704
Huang Ronghui, Zhang Renhe, Yan Bangliang. The dynamic impact of tropical west Pacific zonal wind anomaly on ENSO cycle. *Science in China* (Series D) (in Chinese), 2001, **31** (8): 697～704

[16] 严邦良，张人禾. 热带西太平洋风应力异常在 ENSO 循环中作用的数值试验. 大气科学，2002，**26** (3)：315～329
Yan Bangliang, Zhang Renhe. A numerical test of the effects of wind anomaly over the equatorial western Pacific on ENSO cycle. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, **26** (3): 315～329

[17] Fedorov A V. The response of the coupled tropical ocean－atmosphere to westerly wind bursts. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 2002, **128**: 1～23

[18] 严邦良. 海洋平流的季节变化对 La Niña 事件成熟位相锁定的作用. 大气科学，2005，**29** (2)：283～291
Yan Bangliang. The role of the seasonal variation of the oceanic advection in the locking of the La Niña event mature phase to the end of the year. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 283～291

[19] 杨辉，陈隽，孙淑清. 东亚冬季风异常激发 El Niño 现象的数值试验研究. 大气科学，2005，**29** (2)：321～333
Yang Hui, Chen Jun, Sun Shuqing. Numerical experiment on the El Niño event stimulated by the East Asian winter monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2005, **29** (2): 321～333

[20] 薛洪斌，张铭，王业桂. 热带太平洋地区风场异常和与 El Niño 有关的年际变化. 气候与环境研究，2006，**11** (4)：457～469
Xue Hongbin, Zhang Ming, Wang Yegui. Wind anomalies of the tropical Pacific and interannual variability associated with the El Niño. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2006, **11** (4): 457～469

[21] 房佳蓓，杨修群. 经向风应力在热带不稳定海气相互作用中的角色. 热带气象学报，2003，**19** (1)：43～52
Fang Jiabei, Yang Xiuqun. Role of meridional wind stress in the tropical unstable air－sea interaction. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2003, **19** (1): 43～52

[22] Philander S G H, Pacanowski R C. The oceanic response to cross-equatorial winds (with application to coastal upwelling in low latitudes). *Tellus*, 1981, **33**: 201～210

[23] Rasmusson E M, Carpenter T H. Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, **110**: 354～384

[24] Wallace J M, Mitchell T P, Deser C. The influence of sea-

surface temperature on surface wind in the eastern equatorial Pacific: Seasonal to interannual variability. *J. Climate*, 1989, **2**: 1492～1499

[25] 高士英，王静曙，许淙，等. 中东太平洋赤道地区风场的变化与埃尔尼诺. 大气科学，1989，**13** (4)：410～416
Gao Shiying, Wang Jingshu, Xu Cong, et al. Variability of the wind fields in the mid-east equatorial Pacific and El Niño. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1989, **13** (4): 410～416

[26] Deser C, Wallace J M. Large-scale atmospheric circulation features of warm and cold episodes in the tropical Pacific. *J. Climate*, 1990, **3**: 1254～1281

[27] 高士英，吕竟夕，张林. 东北太平洋冬季风的异常与埃尔尼诺. 海洋学报，1991，**13** (4)：500～506
Gao Shiying, Lü Jingxi, Zhang Lin. Winter monsoon anomaly over northeastern Pacific and El Niño. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1991, **13** (4): 500～506

[28] Xie S-P. The maintenance of an equatorially asymmetric state in a hybrid coupled GCM. *J. Atmos. Sci.*, 1994, **51**: 2602～2612

[29] Périgaud C, Zebiak S E, Mélin F, et al. On the role of meridional wind anomalies in a coupled model of ENSO. *J. Climate*, 1997, **10**: 761～773

[30] 张祖强，丁一汇，赵宗慈，等. 热带太平洋经向风异常年际变化与海温异常的关系. 热带气象学报，2002，**18** (2)：111～120
Zhang Zuqiang, Ding Yihui, Zhao Zongci, et al. Relationship of the interannual meridional wind anomalies over tropical Pacific and ENSO. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 2002, **18** (2): 111～120

[31] Zhang Renhe, Zhao Gang, Tan Yanke. Meridional wind stress anomalies over tropical Pacific and the onset of El Niño. Part I: Data analysis. *Advances in Atmosphere Sciences*, 2001, **18** (4): 467～480

[32] Zhang Renhe, Zhao Gang. Meridional wind stress anomalies over tropical Pacific and the onset of El Niño. Part II: Dynamical analysis. *Advances in Atmosphere Sciences*, 2001, **18** (6): 1053～1065

[33] Kessler W S. Mean three-dimensional circulation in the northeast tropical Pacific. *J. Phys. Oceanogr.*, 2002, **32** (9): 2457～2471

[34] 岳彩军. Zebiak-Cane 海气耦合模式的改进及对 1997/1998 El Niño 事件的模拟与诊断分析. 南京气象学院博士学位论文，2003. 68～91
Yue Caijun. The improvement of Zebiak-Cane coupled ocean-atmosphere model and the simulation and diagnosis of 1997/1998 El Niño event. Ph. D. dissertation (in Chinese). Nanjing Institute of Meteorology, 2003. 68～91

[35] Cane M A, Zebiak S E, Dolan S C. Experimental forecasts of El Niño. *Nature*, 1986, **321**: 827～832

[36] 李晓燕，翟盘茂. ENSO 事件指数与指标研究. 气象学报，2000，**58** (1)：102～109
Li Xiaoyan, Zhai Panmao. On indices and indicators of ENSO episodes. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2000, **58** (1): 102～109

[37] 宁波海洋学校编. 海洋学. 北京：海洋出版社，1986，158～167pp
Ningbo Ocean School. *Oceanography* (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 1986. 158～167

[38] 赵其庚. 海洋环流及海气耦合系统的数值模拟. 北京：气象出版社，1999. 18～27
Zhao Qigeng. *Numerical Simulation of Ocean Circulation and Ocean－Atmosphere Coupled System* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1999. 18～27

[39] 修日晨. El Niño 事件成因初析. 海洋通报，1991，**10** (5)：91～98
Xiu Richen. Review on causes of El Niño event. *Marine Science Bulletin* (in Chinese), 1991, **10** (5): 91～98