

太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 循环的特征

吕俊梅^{1,2} 琚建华³ 张庆云² 陶诗言²

1 云南大学大气科学系, 昆明 650091

2 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

3 中国气象局培训中心, 北京 100081

摘要 利用英国气象局哈德莱中心的月平均海温距平资料、美国 Scripps 海洋研究所联合环境分析中心 (JEDAC) 的海表和次表层海温观测资料以及 NCEP/NCAR 再分析资料, 研究了太平洋年代际振荡 (PDO) 不同背景下 ENSO 循环的特征。结果表明, PDO 为 ENSO 循环提供了一个年代际气候背景, 在 PDO 的暖位相时期, El Niño 事件发生的频率较高, 强度较强; 反之, 在 PDO 的冷位相时期, La Niña 事件发生的频率较高, 强度较强。而且在不同的太平洋年代际振荡背景下, ENSO 循环表现出不同的特征。在 PDO 冷位相时期, 发生 El Niño (La Niña) 事件时, 正 (负) 的 SOTA 从西太平洋沿温跃层向东传播, 正 (负) 的 SSTA 从赤道东太平洋向西扩展到中太平洋, ENSO 事件先在赤道东太平洋爆发。在 PDO 的暖位相时期, 发生 El Niño (La Niña) 事件时, 正 (负) 的 SOTA 首先出现在赤道中太平洋, 然后沿温跃层向东传播, 正 (负) 的 SSTA 从赤道中太平洋向东扩展到东太平洋, ENSO 事件首先在中太平洋爆发。这为 ENSO 预测提供了新的线索。

关键词 太平洋年代际振荡 冷位相 暖位相 ENSO 循环

文章编号 1006-9585 (2005) 02-0238-12 **中图分类号** P732 **文献标识码** A

The Characteristics of ENSO Cycle in Different Phases of Pacific Decadal Oscillation

LÜ Jun-Mei^{1,2}, JU Jian-Hua³, ZHANG Qing-Yun², and TAO Shi-Yan²

1 *Department of Atmospheric Sciences, Yunnan University, Kunming 650091*

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

3 *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081*

Abstract The monthly sea surface temperature anomaly of Hadley Centre for Climate Prediction and Research, subsurface ocean temperature data of Joint Environmental Data Analysis Center (JEDAC) and NCEP/NCAR monthly reanalysis dataset are used to demonstrate the characteristics of ENSO cycle in different phases of Pacific Decadal Oscillation (PDO). The results show that PDO provides a interdecadal climatic background for ENSO cycle. The occurrences of El Niño events are relatively higher and the intensity of El Niño is stronger in the warm phase of PDO. On the contrary, the occurrences of La Niña events are relatively higher and the intensity of La Niña is stronger in the cold phase of PDO. Furthermore, The ENSO cycle exhibits different characteristics in different phases of PDO. During the cold phase of PDO, the occurrence of El Niño (La Niño) is characterized by eastward propagation of positive (negative) SOTA in western Pacific along the equatorial thermocline. Concurrently, positive (negative) SSTA extends westward from equatorial eastern Pacific to central Pacific, so that the onset of El Niño

收稿日期 2004-05-08 收到, 2005-04-12 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40365001、中国科学院资源环境领域知识创新工程重要方向项目 KZCX2-SW-210、以及云南大学校内科研 (青年) 项目 2002Q014ZH

作者简介 吕俊梅, 女, 1972 年 6 月出生, 讲师, 主要从事海气相互作用与热带季风的研究。E-mail: lujunmei@ynu.edu.cn

(La Niña) happens in equatorial eastern Pacific primely. In the warm phase of PDO, the occurrence of El Niño (La Niña) is characterized by the primal appearance of positive (negative) SOTA in equatorial central Pacific which propagate eastward along the equatorial thermocline then. Meanwhile, the positive (negative) SSTA extends eastward from central Pacific to eastern Pacific. The onset of El Niño (La Niña) takes place in equatorial central Pacific firstly. These results give some new clues for the prediction of ENSO.

Key words Pacific decadal oscillation, warm phase, cold phase, ENSO cycle

1 引言

ENSO 是热带海气系统中最强的年际变化信号。ENSO 循环表现为它的冷 (La Niña)、暖位相 (El Niño) 的交替变更。ENSO 循环对天气气候有着重要的影响, 因此对它的研究在短期气候预测方面具有重要的意义。最近几年有关 ENSO 循环机理的研究表明, 西太平洋暖池次表层异常海温沿着温跃层向赤道中东太平洋的传播, 对 ENSO 事件的爆发有直接的联系^[1,2]。而且 ENSO 循环还与赤道西太平洋上空对流层下层的纬向风异常有很大的关系, El Niño 事件发生前, 赤道西太平洋 850 hPa 纬向风有较大的西风异常, 而在 La Niña 事件发生前, 赤道西太平洋有较大的东风异常^[3~5]。现在人们已经认识到, El Niño /La Niña 事件发生的源地是在西太平洋暖池次表层温跃层附近, 在那里形成后, 在一定的大气条件下 (西风或西风距平), 温度距平沿着温跃层传到东太平洋, 引起 ENSO 事件^[6]。

由于 El Niño 和 La Niña 事件对全球天气和气候的异常变化有着非常重要的影响^[7~10], 科学家们开展了大量的有关 ENSO 形成的机制、循环的特征、对其预测以及 ENSO 对全球天气气候影响等方面的研究, 并取得了重要的进展。但是, 目前对 ENSO 事件做出准确的预报仍然很困难。

近年来许多研究表明, 北太平洋海气系统在 20 世纪出现了明显的年代际变化^[11~14], 这种数十年尺度的低频振荡使人们发现了一种新的海洋现象, 并且称之为太平洋年代际振荡 (PDO)^[15]。PDO 处于冷、暖位相时的空间分布形态具有与 ENSO 非常类似的特征, 所以它通常被描述为一种长期存在的与 ENSO 较为相像的太平洋年代际气候变化模态^[16]。随后的研究发现, PDO 不仅对北美地区的天气气候、捕鱼业和生态系统有着重

要的影响^[14,15,17,18], 而且对中国的气候变化也有明显的影响。朱益民和杨修群指出, 处于 PDO 不同位相阶段的 ENSO 事件对中国夏季气候异常的影响明显受到 PDO 的调制^[19]。因此, PDO 在气候年代际变率中的作用引起了人们的注意。

关于 PDO 对 ENSO 的调制作用, Wang^[20]发现在 1977 年左右赤道东太平洋出现了年代际的增暖; 与此同时, 北太平洋副热带地区和南太平洋变冷。海温背景场出现明显的年代际变化特征, 其结果是 El Niño 事件的爆发发生了年代际的变化。Wang 的工作主要是对 ENSO 循环中 El Niño 事件的爆发进行了较为详细的研究, 对于不同太平洋年代际振荡背景下 ENSO 循环的特征, 还有待进一步研究。本文将研究在 PDO 的冷、暖位相背景下 ENSO 循环的基本特征, 揭示 PDO 不同的年代际背景对 ENSO 冷、暖事件发生的频率、强度以及对 ENSO 发展过程的影响, 为 ENSO 预测提供一定的预报因子。

2 资料

由于指数能够较好地代表气候模态的变化特征, 在研究中我们将用 PDO 指数和 Niño 3 指数来分别代表 PDO 和 ENSO 这两个气候模态的变化。虽然我们可以得到美国华盛顿大学在网站上提供的 1900 年至今的 PDO 指数, 但是在本文的研究中还需要用到另外一个同样也是由太平洋海表面温度 (SST) 资料计算得到的指数, 即 Niño 3 指数。为了使计算结果具有一致性和可比性, 我们选用英国气象局哈德莱中心的全球海冰和海表面温度 (GISST) 数据集的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 网格点上的月平均 SST 距平资料^[21], 分别计算得到 1900 年 1 月至 1999 年 12 月的 PDO 指数以及 Niño 3 指数。

用到的资料还包括美国 Scripps 海洋研究所联合环境分析中心 (JEDAC) 的海表和次表层海温

观测资料,垂直方向上为 11 个标准层 (0、20、40、60、80、120、160、200、300、400 m),水平分辨率为 $2^{\circ}\times 5^{\circ}$ (纬度 $\times$ 经度),资料的时间长度从 1955 年 1 月到 2000 年 12 月。850 hPa 的纬向风取自 NCEP/NCAR 的月平均大气环流再分析资料^[22],水平分辨率为 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$,时间取 1949 年 1 月至 2000 年 12 月。

3 PDO 和 ENSO 的时间演变特征和显著变化周期

根据文献 [15, 16] 中给出的 PDO 指数的定义方法,可以利用 GISST 的月平均海表面温度距平 (SSTA) 资料来计算 1900 年 1 月至 1999 年 12 月的逐月 PDO 指数。在计算过程中,首先把北太平洋 20°N 以北的 SST 场中每个网格点上的月平均 SSTA 减去相应月份全球平均的 SSTA,以便去除 SST 资料中的全球增暖趋势;然后对处理后的 SST 场进行 EOF 分解,得到的第一主分量时间系列即为 PDO 指数。在本文中我们对 PDO 指数进行了标准化处理。

分析 PDO 的时间演变特征时,如果我们分别对春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、

冬 (12~2 月) 4 个季节的 PDO 指数求 11 年滑动平均 (图略),可以发现在不同的季节中 11 年滑动平均曲线所表示的 PDO 的年代际变化特征都非常相近。这说明 PDO 的季节变化不明显,它是一个常年存在的、较为稳定的气候模态。因此图 1 中仅给出了 1900~1999 年年平均的 PDO 指数 (直方条) 以及它的 11 年滑动平均曲线。PDO 的年代际变化特征是非常明显的:20 世纪初至 20 年代中期及 40 年代中期至 70 年代中期, PDO 处于冷位相;20 世纪 20 年代中期至 40 年代中期及 70 年代中期至 90 年代中期, PDO 处于暖位相。PDO 的冷、暖位相持续的时间较长,在 20 世纪中, PDO 仅完成两次周期性循环。

对 ($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $90^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{W}$) 范围的 SSTA 求区域平均即可得到 Niño 3 指数。图 2 给出 1900 年 1 月至 1999 年 12 月 Niño 3 指数 (标准化) 的时间演变。对代表 ENSO 循环的 Niño 3 指数的时间演变特征进行分析发现, ENSO 循环除了具有明显的年际变化外,同时也表现出了冷、暖位相交替出现的特征。根据日本气象厅划分的 ENSO 事件发生的年份^[23],图中对 El Niño 事件 (W) 和 La Niña 事件 (C) 做了标注,在 20 世纪中发生了 22 次 El Niño 事件,以及 24 次 La Niña 事件。

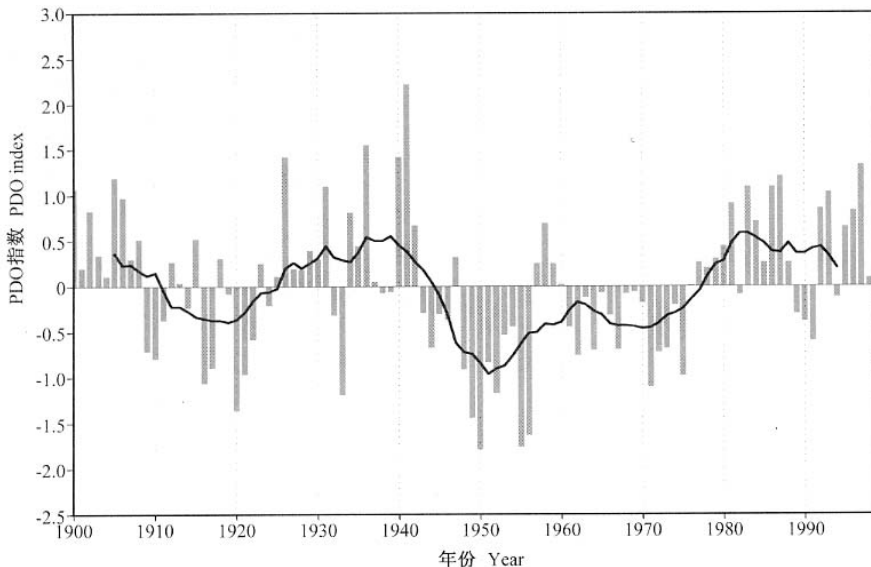


图 1 年平均的 PDO 指数 (直方条) 以及相应的 11 年滑动平均

Fig. 1 Annual mean of PDO index (bar) and its 11-yr running mean

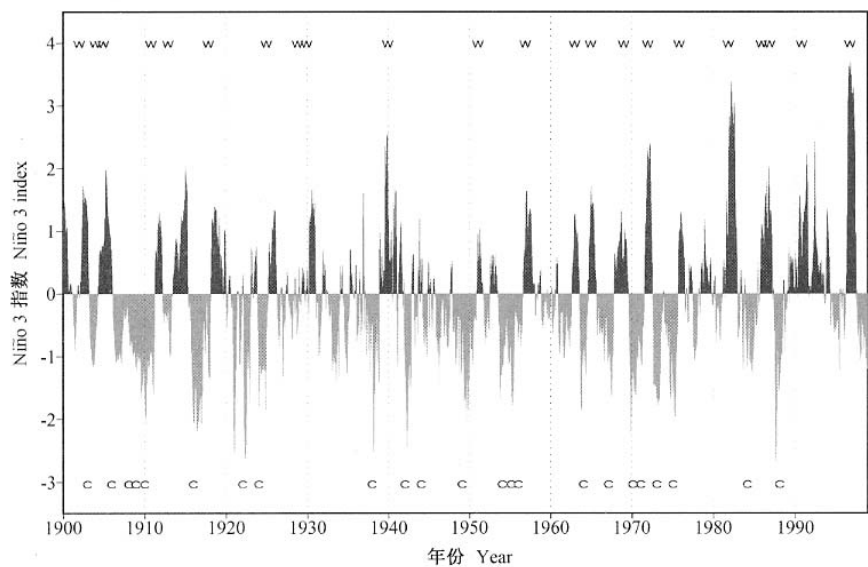


图 2 1900 年 1 月至 1999 年 12 月逐月的 Niño 3 指数（标准化）。图中 W 和 C 分别表示 El Niño 事件和 La Niña 事件发生的年份
Fig. 2 Monthly Niño 3 index (normalized) during the period from January 1900 to December 1999. W indicates El Niño events and C indicates La Niña events, respectively

在过去的研究中，人们分别对 PDO 或者 ENSO 的变化周期进行过研究，所用的资料不尽相同。本文将采用来源于同一套 SST 资料的 PDO 指数和 Niño 3 指数研究 PDO 和 ENSO 的周期变化关系，这样得到的结果将更具有可比性。PDO 指数和 Niño 3 指数都经过了标准化处理，时间取 1900 年 1 月至 1999 年 12 月。

对 PDO 指数和 Niño 3 指数进行离散功率谱分析，结果见图 3 所示，超过 99% 显著性水平的 F 值所对应的周期即为显著变化周期。由图可知，PDO 最显著的变化周期为 50 a，其次为 5.6 a。ENSO 最显著的变化周期为 3.6 a。在 10~33 a 周期的波段上，除了 12.5 a 周期外，PDO 其余的周期都通过了显著性检验；ENSO 也有 33、20、14、12.5 a 这几个周期通过了显著性检验。功率谱分析的结果表明，虽然 PDO 和 ENSO 都具有年代际尺度和年际尺度的显著变化周期，但是 PDO 的主要变化周期为年代际尺度上的，而 ENSO 的主要变化周期为年际时间尺度上的。PDO 和 ENSO 是两个不同时间尺度上的气候模态，PDO 是年代际时间尺度的气候模态，ENSO 是年际时间尺度的气候模态。

4 不同 PDO 位相下 ENSO 循环的特征

4.1 ENSO 事件的频率和强度

由于 PDO 和 ENSO 在其时间演变过程中均呈现出冷、暖位相周期性变化的特征，并且 PDO 相对于 ENSO 来说是一个较长周期的气候变化模态，我们认为 PDO 可能为 ENSO 循环提供了一个年代际气候背景。因此，根据前面得到的 PDO 处于冷、暖位相的主要时期，即 1909~1924 年以及 1946~1976 年 PDO 处于冷位相；而 1925~1945 年及 1977~1999 年 PDO 处于暖位相，我们进一步分析不同 PDO 位相下 ENSO 循环的特征。

表 1 给出 20 世纪 PDO 处于不同位相下 El Niño 事件和 La Niña 事件发生的年份。统计结果表明，PDO 的冷、暖位相对 ENSO 事件的发生具有明显的调制作用。1909~1924 年 PDO 处于冷位相阶段，此时 La Niña 事件发生了 5 次，El Niño 事件发生了 3 次。在另一个 PDO 冷位相的阶段，即 1946~1976 年，La Niña 事件发生了 10 次，El Niño 事件发生了 7 次。这表明当 PDO 处

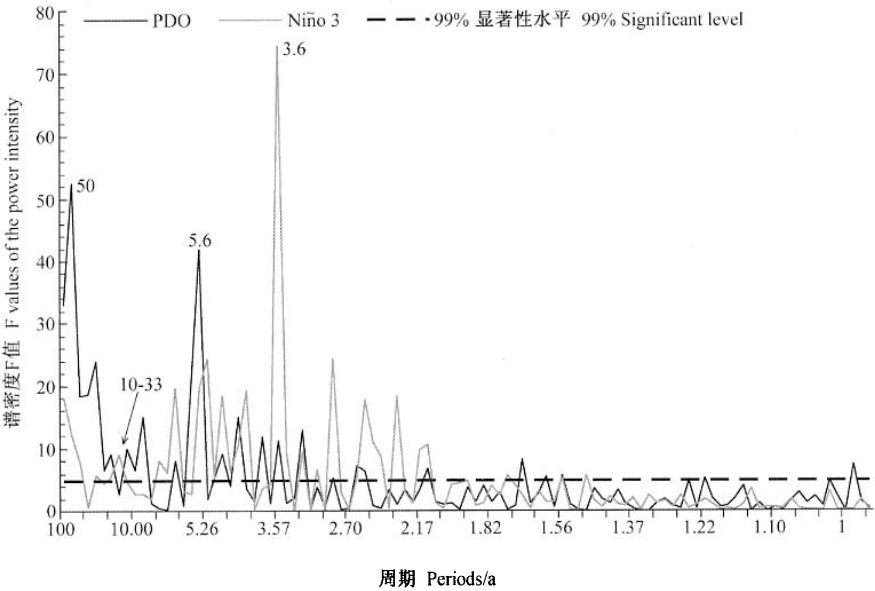


图3 PDO指数和Niño 3指数的离散功率谱分析
Fig. 3 Dispersible power spectrum analysis of PDO index and Niño 3 index

表1 PDO的冷、暖位相下El Niño和La Niña事件发生的年份
Table 1 The years when El Niño and La Niña events occurred in cold and warm phases of PDO

PDO的冷、暖位相期 The epochs when PDO is in cold and warm phases	El Niño事件 El Niño events	La Niña事件 La Niña events
1909~1924 (冷 Cold)	1911 1913 1918	1909 1910 1916 1922 1924
1925~1945 (暖 Warm)	1925 1929 1930 1940	1938 1942 1944
1946~1976 (冷 Cold)	1951 1957 1963 1965 1969 1972 1976	1949 1954 1955 1956 1964 1967 1970 1971 1973 1975
1977~1999 (暖 Warm)	1982 1986 1987 1991 1997	1984 1988 1999

于冷位相时，La Niña事件发生的次数多于El Niño事件。反之，当PDO处于暖位相时，El Niño事件发生的次数多于La Niña事件。例如，1925~1945年El Niño事件发生了4次，La Niña事件发生了3次；1977~1999年El Niño事件发生了5次，La Niña事件发生了3次。

翟盘茂等^[24]用赤道中、东太平洋海温距平峰值来表示ENSO事件的强度。我们将直接引用他们给出的历次ENSO事件发生时的海温距平峰值，来对PDO的冷、暖位相时期El Niño和La Niña事件的强度变化进行对比分析。仅考虑PDO的一个完整循环周期阶段，冷位相取1946~1976年，暖位相取1977~2000年，并且将正的海温距平峰值从小到大排列，负的海温距平峰值从大到小排列，按PDO的冷、暖位相时期来画El Niño事件

和La Niña事件的强度变化图(图4)。图中水平零线以上的两条曲线为PDO的不同位相下El Niño事件的强度变化，很明显，在PDO的暖位相时期发生的4次El Niño事件(1991/1992、1986/1987、1982、1997年)其强度大于在PDO的冷位相时期发生的7次El Niño事件(1963、1976、1951、1969、1965、1957、1972年)。由水平零线以下表示不同PDO背景下La Niña事件强度变化的两条曲线可知，PDO冷背景下发生的8次La Niña事件(1956、1967、1964、1949、1970/1971、1973、1975、1954/1955年)明显比发生在PDO暖背景下的3次La Niña事件(1984、1988、1999年)强。统计结果表明，PDO为ENSO循环提供了一个年代际的海温背景场，PDO的暖位相有利于El Niño事件的发生；

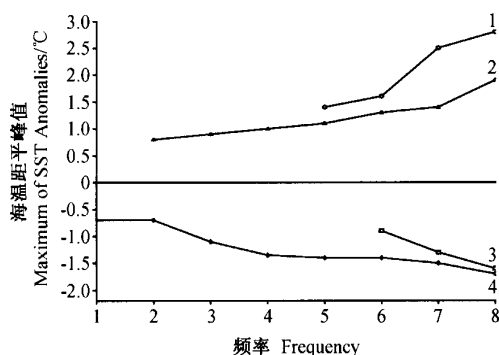


图4 PDO的冷、暖位相下 El Niño 事件和 La Niña 事件的强度变化。图中 1 代表暖位相下的 El Niño 事件, 2 代表冷位相下的 El Niño 事件, 3 代表暖位相下的 La Niña 事件, 4 代表冷位相下的 La Niña 事件

Fig. 4 The intensity variability of El Niño and La Niña events in cold and warm phases of PDO. 1 indicates El Niño events in warm phase of PDO, 2 indicates El Niño events in cold phase of PDO, 3 indicates La Niña events in warm phase of PDO, and 4 indicates La Niña events in cold phase of PDO

而 PDO 处于冷位相有利于 La Niña 事件的发生。

4.2 ENSO 循环不同阶段海温和 850 hPa 纬向风的异常

ENSO 循环具有季节锁相性, 大多数 ENSO 事件都开始于春到秋季, 然后逐渐增强, 一般在 12 月前后达到最强, 之后减弱、衰亡。因此本文将 ENSO 循环划分为爆发前冬季、发展期夏季、盛期冬季和衰亡期夏季 4 个阶段。由于次表层海温仅有 1955 年 1 月到 2000 年 12 月的资料, 在这个时间段中 1955~1976 年为 PDO 的冷位相阶段, 暖位相阶段为 1977~1999 年。参照表 1 中给出的 ENSO 事件发生的年份, 并且不考虑持续时间超过 18 个月的 ENSO 事件, 这样 PDO 的冷位相阶段 El Niño 事件有 5 个, 分别是 1957~1958、1963~1964、1965~1966、1972~1973、1976~1977 年。La Niña 事件有 4 个, 分别是 1964~1965、1967~1968、1970~1971、1973~1974 年。PDO 的暖位相阶段 El Niño 事件有 3 个, 分别是 1982~1983、1991~1992、1997~1998 年。La Niña 事件有 3 个, 分别是 1984~1985、1988~1989、1999~2000 年。

根据挑选出来的这些年份对 PDO 的冷、暖背景下 ENSO 循环不同阶段海温和 850 hPa 纬向风的异常变化进行合成分析。图 5 给出 PDO 的冷位

相时期, 合成的 El Niño 事件发展的不同阶段赤道太平洋地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) 次表层海温距平异常 (SOTA) 的演变情况。El Niño 事件发生前的冬季 (图 5a), SOTA 的正异常中心位于西太平洋 160°E 以西暖池附近的温跃层中, 一次新的 El Niño 事件开始酝酿。随着时间的推移, 在发展期的夏季 (图 5b), 异常的暖海水沿着温跃层向东传播到达赤道中太平洋地区, 同时赤道东太平洋地区出现异常暖中心。当异常暖海水传到赤道东太平洋地区, 并且到达海表面时, El Niño 事件发展到成熟时期 (图 5c)。此后 El Niño 逐渐减弱、消亡 (图 5d)。La Niña 事件发展的不同阶段, SOTA 的传播路径与 El Niño 事件类似, 异常的冷海水首先出现在西太平洋, 然后沿着温跃层向东传播到达赤道中、东太平洋 (图 6)。ENSO 冷、暖事件中异常冷、暖水团的传播构成了一个 SOTA 循环^[1]。

当 PDO 处于暖位相时, El Niño 事件爆发前的冬季 (图 7a), SOTA 的正异常中心位于中太平洋 $160^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{W}$ 的温跃层, 并且在 180°E 附近暖海水向上伸展到海表面, 此时西太平洋为一弱的冷海水区。发展期夏季 (图 7b) 暖海水已经传播到赤道东太平洋, 并且从中太平洋到东太平洋海面温度变为正距平。当 El Niño 事件发展到鼎盛时 (图 7c), 赤道太平洋地区的整个次表层 ($0\sim 400\text{ m}$) 海温表现为西负东正的偶极型异常分布。此后, El Niño 事件逐渐减弱 (图 7d)。La Niña 事件爆发前的冬季 (图 8a), SOTA 的负异常中心位于 $180^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{W}$ 的温跃层中, 在 160°W 附近异常冷海水向上伸展到海表面, 在冷海水以西的西太平洋存在着一个暖海水区。随着 La Niña 事件的发展冷海水从中太平洋向东传播到东太平洋, 并向上伸展到海表面 (图 8b、c)。显然 PDO 处于暖位相时 ENSO 循环中 SOTA 的传播路径与前面一个阶段有所不同, SOTA 的源地在赤道中太平洋, 但是 ENSO 冷、暖事件中异常冷、暖水团的传播仍然构成了一个 SOTA 循环。

Wang^[20]研究了 El Niño 事件爆发的年代际变化指出, 1970 年代末以前, El Niño 事件首先出现于南美沿岸, 1970 年代末以后, 中太平洋首先增暖。从本文得到的 PDO 冷、暖位相下 ENSO 事件中 SOTA 的传播路径可知, 1970 年代末以后,

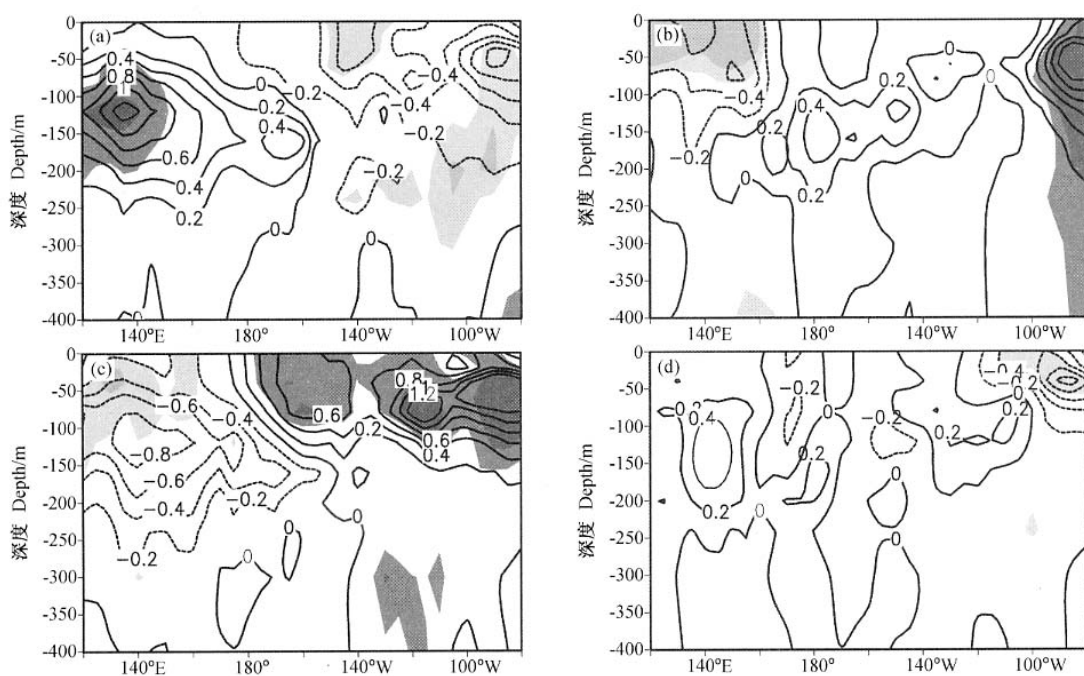


图5 合成的 PDO 冷位相下 5 次 El Niño 事件不同阶段中赤道太平洋地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) SOTA 的深度-经度剖面。(a) 爆发前冬季; (b) 发展期夏季; (c) 盛期冬季; (d) 衰亡期夏季。阴影区表示海温异常的 t 检验超过了 0.05 的信度

Fig. 5 Composite deep-longitude cross section of Subsurface Ocean Temperature Anomalies (SOTA) averaged over equatorial Pacific ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) for the antecedent phase (a), development phase (b), mature phase (c), and weakening phase (d) for the five El Niño events in cold phase of PDO. The areas where the Student t test reaches confidence level of 0.05 are shaded

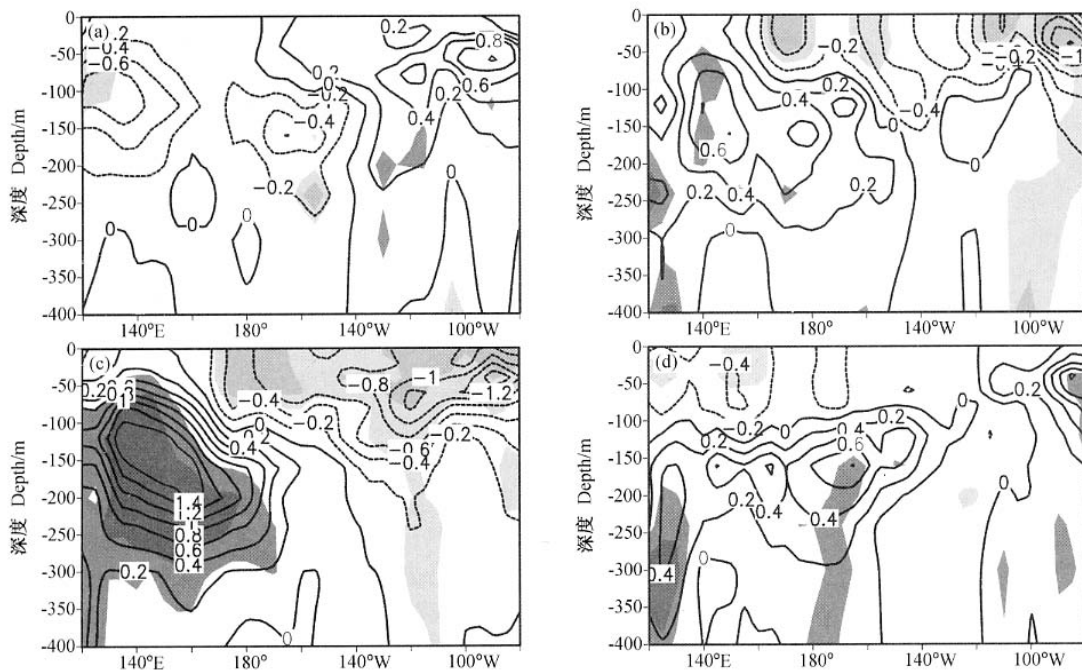


图6 合成的 PDO 冷位相下 4 次 La Niña 事件不同阶段中赤道太平洋地区 ($10^{\circ}\text{S}\sim 10^{\circ}\text{N}$) SOTA 的深度-经度剖面。图注同图 5

Fig. 6 As in Fig. 5 except for the four La Niña events in cold phase of PDO

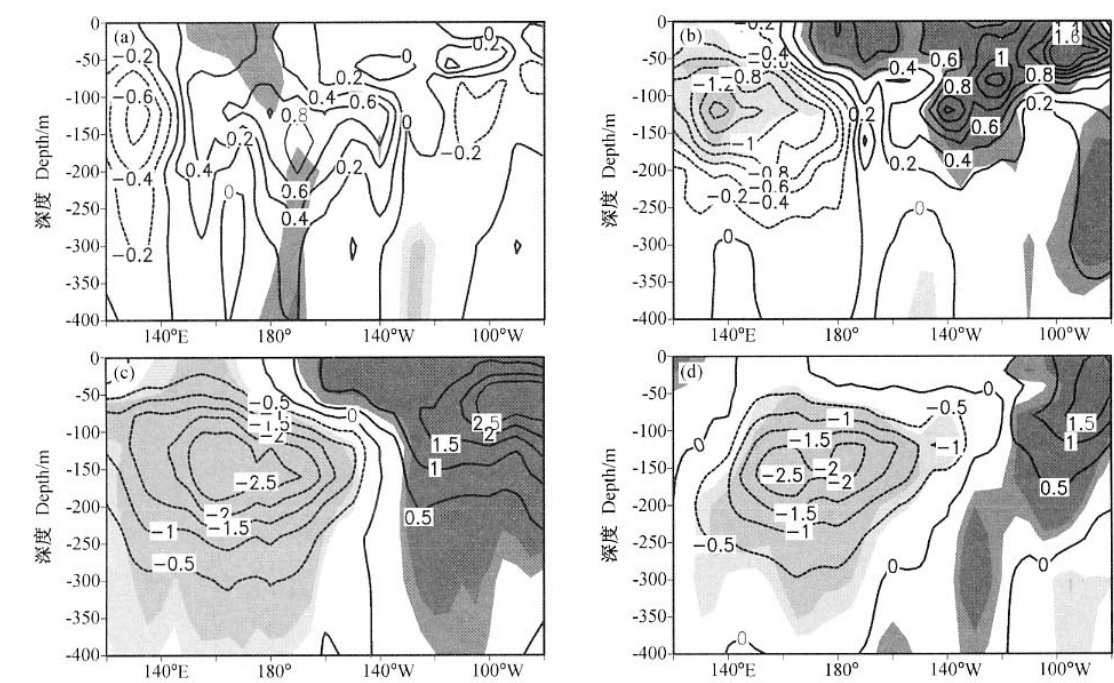


图 7 合成的 PDO 暖位相下 3 次 El Niño 事件不同阶段中赤道太平洋地区 (10°S~10°N) SOTA 的深度-经度剖面。图注同图 5
Fig. 7 As in Fig. 5 except for the three El Niño events in warm phase of PDO

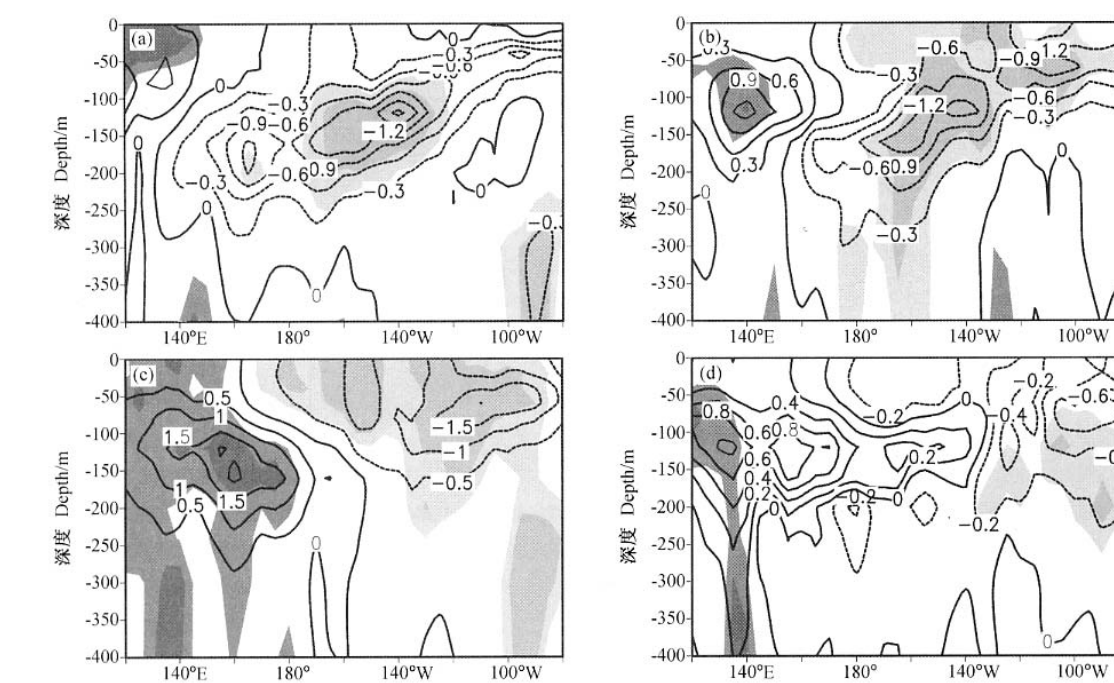


图 8 合成的 PDO 暖位相下 3 次 La Niña 事件不同阶段中赤道太平洋地区 (10°S~10°N) SOTA 的深度-经度剖面。图注同图 5
Fig. 8 As in Fig. 5 except for the three La Niña events in warm phase of PDO

SOTA 首先出现在中太平洋地区的温跃层,并向
上扩展到海表层,然后向东传播,因此表现出
Wang 所指出的 El Niño 事件的增暖首先出现在中
太平洋。

不同的 PDO 背景下, SST 和 850 hPa 纬向风
在 ENSO 事件发展过程中也有明显不同的演变特
征。图 9a 和 9b 为 PDO 冷位相下合成的 El Niño
以及 La Niña 事件中 SSTa 的时间-经度剖面图,
图中纵坐标表示时间, -1 表示 ENSO 事件爆发
前 1 年, 0 表示爆发当年, +1 表示爆发后第 2
年。在 El Niño (La Niña) 事件发生前 1 年的 12
月至爆发当年的 1 月, 赤道中东太平洋地区 SS-
TA 为负 (正) 值, 爆发当年的 4 月左右正 (负)
的 SSTa 首先在赤道东太平洋出现, 然后逐步向

西扩张, 爆发当年 8 月正 (负) 的 SSTa 到达赤
道中太平洋地区, 并且一直持续到爆发第 2 年的 3
月。在这个阶段中赤道西太平洋地区为负 (正)
的 SSTa。赤道中、东太平洋 SSTa 的最大值出
现在爆发当年的 11 月至第二年的 1 月, 这个时期
也是 El Niño (La Niña) 事件的鼎盛时期。爆发
后第 2 年的 4 月, 赤道中、东太平洋的 SSTa 变
为负 (正) 值, 表明 El Niño (La Niña) 事件开
始消亡。

在 PDO 的暖位相下, El Niño (La Niña) 事
件中 SSTa 的演变表现出赤道中太平洋首先增暖
(变冷) 的迹象 (图 9c 和 9d)。El Niño (La
Niña) 事件爆发前的 12 月, 在中太平洋的 170°E
~160°W 附近有正 (负) 的 SSTa 出现, 并且一

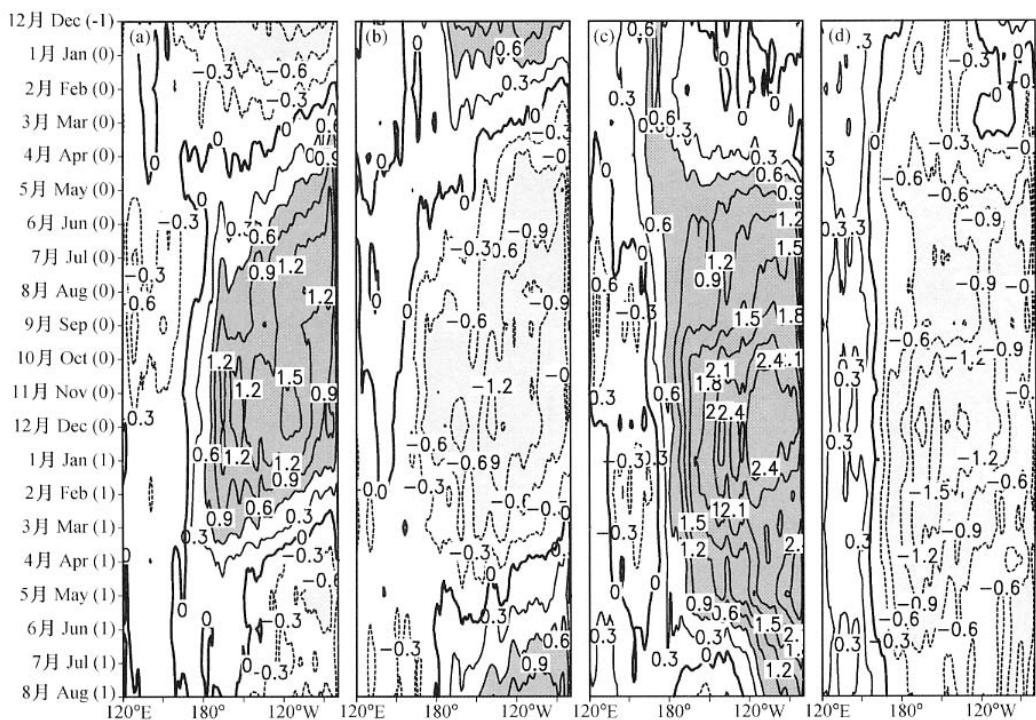


图9 PDO 冷、暖位相下合成的 El Niño 和 La Niña 事件中沿赤道太平洋 (5°S~5°N) 平均的 SSTa 的时间-经度剖面。(a) PDO 冷位相下 El Niño 事件; (b) PDO 冷位相下 La Niña 事件; (c) PDO 暖位相下 El Niño 事件; (d) PDO 暖位相下 La Niña 事件。阴影表示 SST 的绝对值大于 0.6 °C; -1 表示 ENSO 事件爆发前 1 年, 0 表示爆发当年, +1 表示爆发后第 2 年

Fig. 9 Composite time-longitude cross section of SSTa averaged over equatorial Pacific (5°S~5°N) for El Niño and La Niña events in cold and warm phases of PDO. (a) represents El Niño events in cold phase of PDO, (b) represents La Niña events in cold phase of PDO, (c) represents El Niño events in warm phase of PDO, (d) represents La Niña events in warm phase of PDO. The areas where the absolute values of SSTa are greater than 0.6 °C are shaded. -1 indicates the year before the onset of ENSO events, 0 indicates the year when ENSO events occur, +1 indicates the year after the onset of ENSO events

直持续到爆发当年的 4 月，5 月正（负）的 SSTA 突然向东扩展到赤道东太平洋地区，这种正（负）的 SSTA 维持到爆发后第 2 年的 6 月，此时西太平洋为负（正）的 SSTA 区。

图 10 给出 PDO 不同位相下沿（10°S~10°N）平均的 850 hPa 纬向风的时间-经度剖面图。在 PDO 的冷位相时期，从 El Niño（La Niña）事件爆发前的 12 月份至爆发当年的 3 月份西太平洋开始出现西（东）风距平，赤道中、东太平洋仍为东（西）风距平（见图 9a 和 9b）。爆发当年的 4 月西（东）风距平开始向中太平洋传播，爆发当年冬季 El Niño（La Niña）事件达到强盛期时，西（东）风距平东传到东太平洋，同时在其西部的西太平洋又出现了东（西）风距平，并向东传播。爆发后第 2 年 4 月东太平洋的西（东）风距

平减弱，西太平洋到中太平洋为东（西）风距平，ENSO 事件减弱。

在 PDO 的暖位相时期，El Niño 事件中从爆发前 12 月份到爆发当年的 10 月份，西风距平几乎在整个太平洋地区盛行。当 El Niño 事件达到强盛以后西太平洋变为东风异常。La Niña 事件中，中、西太平洋为东风异常，东太平洋为西风异常。当 La Niña 事件达到强盛以后西太平洋出现西风异常。因此，PDO 的暖位相下 El Niño（La Niña）事件发展过程中西（东）风距平的东传并不明显。

5 结论

本文对 PDO 和 ENSO 这两种气候模态的时间

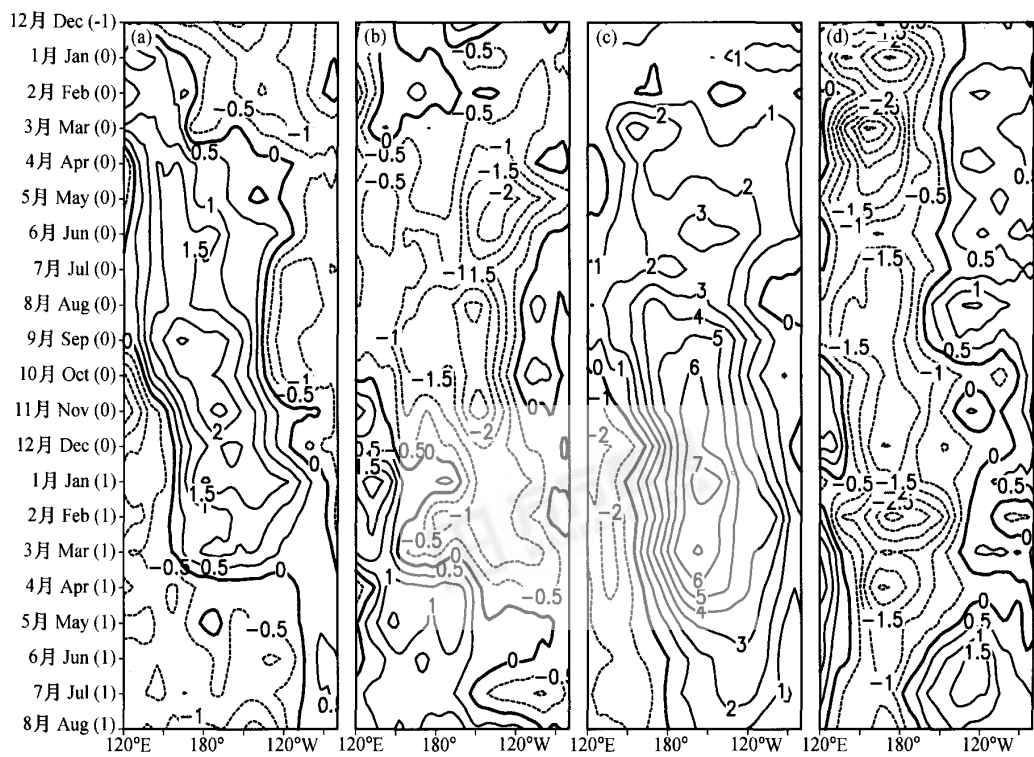


图 10 PDO 冷、暖位相下沿（10°S~10°N）平均的 850 hPa 纬向风的时间-经度剖面（单位： $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ）。(a) PDO 冷位相下 El Niño 事件合成；(b) PDO 冷位相下 La Niña 事件合成；(c) PDO 暖位相下 El Niño 事件合成；(d) PDO 暖位相下 La Niña 事件合成。-1 表示 ENSO 事件爆发前 1 年，0 表示爆发当年，+1 表示爆发后第 2 年

Fig. 10 Composite time-longitude cross section of zonal wind (units: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) at 850hPa averaged over equatorial Pacific (10°S~10°N) for El Niño and La Niña events in cold and warm phases of PDO. (a) represents El Niño events in cold phase of PDO, (b) represents La Niña events in cold phase of PDO, (c) represents El Niño events in warm phase of PDO, (d) represents La Niña events in warm phase of PDO. -1 indicates the year before the onset of ENSO events, 0 indicates the year when ENSO events occur, +1 indicates the year after the onset of ENSO events

演变特征和显著变化周期进行对比分析,进而研究了太平洋年代际振荡冷、暖背景下 ENSO 循环的特征,得到以下结论:

(1) 1900~1999 年期间 PDO 的年代际变化特征非常明显,20 世纪中 PDO 完成了两次完整的周期循环,在 1909~1924 年以及 1946~1976 年这两个阶段 PDO 处于冷位相;而 1925~1945 年及 1977~1999 年为 PDO 的暖位相时期。ENSO 循环具有明显的年际变化特征,同时也表现出冷、暖位相交替出现的特征。

(2) 尽管 PDO 和 ENSO 均具有年际和年代际的显著变化周期,但是 PDO 最显著的变化周期为 50 a, ENSO 最显著的变化周期为 3.6 a。这就决定了 PDO 是一个年代际时间尺度的气候模态,而 ENSO 为年际时间尺度的气候模态。

(3) PDO 为 ENSO 循环提供了一个年代际的气候背景。当 PDO 处于暖位相时,El Niño 事件发生的频率较高,强度较强;反之,当 PDO 处于冷位相时,La Niña 事件发生的频率较高,强度较强。

(4) 在 PDO 冷位相时期,发生 El Niño (La Niña) 事件时,正(负)的 SOTA 从西太平洋沿温跃层向东传播,与此同时西(东)风距平也从西太平洋向东传播。正(负)的 SSTA 从赤道东太平洋向西扩展到中太平洋, ENSO 事件先在赤道东太平洋爆发。

(5) 在 PDO 的暖位相时期,发生 El Niño (La Niña) 事件时,正(负)的 SOTA 首先出现在赤道中太平洋,然后沿温跃层向东传播。与此相对应,正(负)的 SSTA 从赤道中太平洋向东扩展到东太平洋, ENSO 事件首先在中太平洋爆发。西(东)风距平的向东传播不很明显。

(6) 对于在不同 PDO 背景下 ENSO 循环产生差异的原因,现在还不是很清楚,这有待于进一步研究。本工作中得到的在不同的 PDO 位相下 ENSO 循环所表现出来的特征为 ENSO 事件的预测提供了一些新的思路。

参考文献

- [1] 李崇银. 关于 ENSO 本质的进一步研究. 气候与环境研究, 2002, 7 (2): 160~174
- [2] 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 (4): 346~352
- Zhou Guangqing, Li Chongyin. Simulation on the relation between the subsurface temperature anomaly in western Pacific and ENSO by using CGCM. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1999, 4 (4): 346~352
- [3] 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 (8): 697~704
- Huang Ronghui, Zhang Renhe, Yan Bangliang. Dynamical effect of the zonal wind anomalies over the tropical western Pacific on ENSO cycles. *Science in China* (Ser. D), (in Chinese), 2001, 31 (8): 697~704
- [4] 黄荣辉, 陈文. 关于亚洲季风与 ENSO 循环相互作用研究最近的进展. 气候与环境研究, 2002, 7 (2): 146~159
- Huang Ronghui, Chen Wen. Recent progresses in the research on the interaction between Asian monsoon and ENSO cycles. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7 (2), 146~159
- [5] Huang Ronghui, Zang Xiaoyun, Zhang Renhe, 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 (2): 135~151
- [6] 张人禾, 巢纪平. 对 ENSO 循环机理的一些新认识. 气候与环境研究, 2002, 7 (2): 175~183
- Zhang Renhe, Chao Jiping. Some new aspects in understanding of ENSO cycle. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, 7 (2): 175~183
- [7] 金祖辉, 陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. 大气科学, 1999, 23 (6): 663~671
- Jin Zuhui, Tao Shiyun. A study on the Relationships between ENSO Cycle and Rainfalls during summer and winter in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 1999, 23 (6): 663~671
- [8] 李超. 埃尔尼诺对我国汛期降水的影响. 海洋学报, 1992, 14 (5): 45~51
- Li Chao. The effects of the El Niño on the summer rainfall in China. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1992, 14 (5): 45~51
- [9] Ropelewski C F, Halpert M S. Global and regional scale temperature patterns associated with the El Niño /Southern Oscillation. *Mon. Wea. Rev.*, 1987, 115: 1606~1626
- [10] Harrison D E, N K Larkin. Seasonal U.S. temperature and precipitation anomalies associated with El Niño: Historical results and comparison with 1997~1998. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, 25: 3959~3962

- [11] Trenberth K E, Hurrell J W. Decadal atmosphere-ocean variation in the Pacific. *Climate Dyn.*, 1994, **9**: 303~319
- [12] Latif M, Barnett T P. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America. *Science*, 1994, **266**: 634~637
- [13] Latif M, Barnett T P. Decadal climate variability over the North Pacific and North America: Dynamics and predictability. *J. Climate*, 1996, **9**: 2407~2423
- [14] Minobe S. A 50~70 year climatic oscillation over the North Pacific and North America. *Geophys. Res. Lett.*, 1997, **6**: 683~686
- [15] Mantua N J, Hare S R, Zhang Y, et al. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 1069~1079
- [16] Zhang Y, Wallace J M, Battisti D S. ENSO-like interdecadal variability, 1900~93. *J. Climate*, 1997, **10**: 1004~1020
- [17] Bond N A, Harrison D E. The Pacific Decadal Oscillation, air-sea interaction and central north Pacific winter atmospheric regimes. *Geophys. Res. Lett.*, 2000, **5**: 731~734
- [18] Gershunov A, Barnett T, Cayan D. North Pacific interdecadal oscillation seen as factor in ENSO-related north American climate anomalies. *EOS*, 1999, **80**: 25~30
- [19] 朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, **61** (6), 641~654
- Zhu Yimin, Yang Xiuqun. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2003, **61** (6): 641~654
- [20] Wang B. Interdecadal changes in El Niño onset in the last four decades. *J. Climate*, 1995, **8**: 267~285
- [21] Rayner N A, Horton E B, Parker D E, et al. Version 2.2 of the Global sea-Ice and Sea Surface Temperature Data Set, 1903~1994. *Climate Research Technical Note 74*, unpublished document available from Hadley Centre for Climate Prediction and Research. 1996, Meteorological Office, London Road, Bracknell, RS12 2SY, UK
- [22] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437~471
- [23] Legler D M. ENSO Index According to JMA SSTA (1868-present). http://www.coaps.fsu.edu/~legler/jma_index1.shtml
- [24] 翟盘茂, 李晓燕, 任福民. 厄尔尼诺. 北京: 气象出版社, 2003. 17~19
- Zhai Panmao, Li Xiaoyan, Ren Fumin. *The El Niño* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 17~19