

杨丹宁, 罗德海. 2014. ENSO 循环与太平洋—北美型遥相关事件的关系 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 278–289, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12039. Yang Danning, Luo Dehai. 2014. Relationship between Pacific–North American teleconnection events and ENSO cycle [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 278–289.

ENSO 循环与太平洋—北美型遥相关事件的关系

杨丹宁^{1,2} 罗德海²

1 辽阳市气象局, 辽阳 111000

2 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

摘 要 利用 1950~2009 年的 Niño3.4 指数和冬季 5 个月逐日太平洋—北美型遥相关 (PNA) 指数, 对 ENSO 冷、暖位相及中性年份冬季发生的 PNA 事件进行了统计分析, 结果发现 PNA 事件个数有显著的差异。ENSO 暖位相年份冬季的 PNA+事件个数是 PNA-事件个数的 4.13 倍, 而冷位相年份的 PNA-事件个数是 PNA+事件个数的 2.73 倍。PNA 事件指数和 PNA 事件对应的 300 hPa 流函数场合成分析结果显示 ENSO 暖 (冷) 位相年份的 PNA+ (PNA-) 事件的强度较小, 生命史较长, PNA- (PNA+) 事件的强度较大生命史较短, 位于北太平洋上空的南北向偶极子结构仅出现在 PNA+事件过程的成熟阶段。同时, 聚类分析也发现, ENSO 暖 (冷) 位相年份的 PNA+ (PNA-) 型的比例大于 PNA- (PNA+) 型, PNA+型波列结构中有太平洋区域的南北向偶极子结构, 而 PNA-波列结构中没有, 与合成分析结果一致。通过计算北太平洋的 300 hPa 基本流发现, ENSO 循环暖位相年份的副热带急流位置比 ENSO 循环冷位相年份的偏北, 这解释了 ENSO 循环冷暖位相年份 PNA+事件和 PNA-事件发生频率的差异。由于中性年份也存在 PNA 事件, ENSO 循环对 PNA 事件的强度与发生频率有一定的调制作用。

关键词 太平洋—北美型遥相关 (PNA) 事件 ENSO 合成分析 副热带急流

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0278-12

中图分类号 P434

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12039

Relationship between Pacific–North American Teleconnection Events and ENSO Cycle

YANG Danning^{1,2} and LUO Dehai²

1 Liaoyang Meteorological Office, Liaoyang 111000

2 Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The daily index of Pacific–North American teleconnection (PNA), the Niño 3.4 index, and NCEP/NCAR reanalysis data were used. These data cover the months November–March for 1950–2009. We extracted the PNA events for the cold and warm ENSO phase years. We found that the number of PNA+ is 4.13 times the number of PNA- in the warm phase years of the ENSO cycle, while in cold phase years, the number of PNA- is 2.73 times the number of PNA+. We composited the 300-hPa stream function field and the daily PNA index of the PNA+ and PNA- separately. The results show that the intensity of PNA+ (PNA-) is weaker than that of PNA- (PNA+), the life cycle of PNA+ (PNA-) is longer than that of PNA- (PNA+) in the warm (cold) ENSO phase years, and a north–south dipole anomaly is present over the North Pacific during the mature period of all types of PNA+ events. Using K-means clustering algorithms, three weather regimes over the Pacific–North American region were obtained. In the warm (cold) ENSO phase years, the proportion of

收稿日期 2012-03-08 收到, 2014-01-06 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 41075042

作者简介 杨丹宁, 女, 1986 年出生, 硕士, 主要从事气候动力学方面的研究。E-mail: ydanning20@126.com

the PNA+ (PNA–) regime is greater than PNA– (PNA+) regime, and a north–south dipole anomaly is present over the North Pacific for all PNA+ regimes. By calculating the basic flow over the North Pacific, we found that the subtropical stream jet of warm ENSO phase years is northerly, while the jet of cold ENSO phase years is southerly over the central part of the North Pacific, which explains the significant difference between the frequency of PNA events in the warm and cold ENSO phase years. As PNA events occur in neutral years, the ENSO cycle plays a role in the modulation of the frequency and intensity of PNA.

Keywords Pacific–North American teleconnection event, ENSO, Composite analysis, Subtropical jet stream

1 引言

太平洋北美型遥相关 (Pacific–North American teleconnection, PNA) 是北半球中纬度变化的主要环流形势之一 (Horel and Wallace, 1981; Wallace and Gutzler, 1981)。在对流层中上层的高度场, PNA 包含 4 个活动中心: 北太平洋和美国东南部同向变化的活动中心, 以及与这两个中心反向变化的近夏威夷和北美西海岸的两个活动中心 (Wallace and Gutzler, 1981)。PNA 事件的固有周期一般为 14 d (Feldstein, 2000; Cash and Lee, 2001)。PNA 等遥相关型的存在使得气候对于信息的传输尤其是热带、近热带的气候信息的传输 (Tsonis and Swanson, 2008) 更为稳定有效。PNA 事件正负位相之间的转换过程与北美地区的降水有着很大的关系, 可以此为条件对北美的降水进行预测 (Archambault et al., 2010)。根据资料分析, 人们将 PNA 与赤道东太平洋的海表温度 (sea surface temperature, SST) 异常 (ENSO) 相联系 (Horel and Wallace, 1981), 认为 PNA 就是大气对于赤道东太平洋 SST 异常的响应, 之后的数值模拟证实了这种结论 (Shukla and Wallace, 1983)。林学椿 (1992) 也指出, PNA 的波列结构的产生是对 ENSO 及北太平洋海温的响应。但近期的一些研究对于该观点提出了质疑, 吴仁广和陈烈庭 (1992) 的研究也指出: ENSO 循环对于 PNA 遥相关的影响并不能完全解释 PNA 流型的变化, 北太平洋海温也是影响其变化的一个重要因子, Straus and Shukla (2002) 通过数值模拟证实了 ENSO 的暖位相 SST 并没有驱动 PNA。同时, 数值模拟也证实了在年际变率上与 ENSO 相关联的热带海温强迫对于 PNA 异常形成和加强的重要作用 (李忠贤等, 2011; Li et al., 2011; Zhou and Zhang, 2011)。黄荣辉等 (1996) 得到的结论表明 ENSO 事件发生时, 赤道中、东太平洋 SST 异常升温, 导致热带中太平洋对流活动加强, 热源加

强, 加之遥相关的作用, 使得北半球、中高纬度环流异常。ENSO 与 PNA 的关系是确定存在的, ENSO 循环对于全球气候和局地气候的变化都起到了重要的作用 (宗海锋等, 2008; 何溪澄等, 2008)。

20 世纪末, 人们对于 PNA 的研究主要集中在 PNA 的月平均及更大时间尺度的变化上 (Wallace and Gutzler, 1981), 但近些年的研究重点转为对 PNA 事件的研究 (Yu et al., 2009; Hannachi, 2010; Franzke et al., 2011)。Renwick and Wallace (1996) 得到了在 ENSO 循环的暖位相时 PNA 指数趋于正值结论, 但该 PNA 指数是季节平均的指数。PNA 事件的生命史大约为 14 d, 季节平均的 PNA 指数只能发现长时间平均状态下的趋势。研究单个 PNA 事件的发生频率及变化特征对于了解冬季平均的 PNA 的变化有很重要的指示性意义。因此, 本文在此基础上试图研究在 ENSO 循环不同位相背景下, PNA 事件的变化特征以及 PNA 正负位相事件与 ENSO 循环的关系, 这对于了解 PNA 事件产生的机理有着重要的意义。

2 资料和研究方法

本文使用的数据资料包括: NCEP/NCAR 逐日 00: 00 (协调世界时, 下同) 再分析资料, 使用的物理量为纬向风和经向风, 空间分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度); 美国气候预测中心 (CPC) 提供的逐日 PNA 指数数据和 Niño3.4 月平均指数数据。数据选取的时间范围为 1950 年 1 月 1 日至 2010 年 3 月 31 日。文中使用的流函数场是通过风场计算得到的。由于 PNA 在冬季最为显著, 因此本文使用的 PNA 指数及相应流函数场的时间段为每年冬季 5 个月 (11 月至次年 3 月)。本文使用的研究方法主要有合成分析、 K 均值聚类分析、 t 检验。

本文对于 PNA 事件的定义是基于 CPC 提供的 PNA 逐日指数进行的。对于 PNA 事件, 如果 PNA 指数大 (小) 于 1.25 (–1.25) 个标准差, 并且持

续 5 d 以上, 则认为发生了一次 PNA 正(负)位相事件(Franzke et al., 2011), 否则, 这个过程不属于 PNA 正(负)位相事件。由于 PNA 事件的固有周期为 14 d 左右, 且不同 PNA 事件的持续时间是不尽相同的, 所以在 PNA 事件的合成分析中, 定义 PNA 事件过程中最强 PNA 指数出现的那天为 Lag 0, 并前后各取 10 d, 即 Lag-10 至 Lag+10, 共 21 d。本文根据以上定义对 PNA 事件的指数和流函数场进行了合成分析(通过提取 PNA 事件中 Lag-10 日至 Lag+10 日对应的指数和流函数场分别进行合成分析)。若某个 PNA 事件过程超过了定义的冬季(11 月至次年 3 月)的时间范围, 则此 PNA 事件不计入统计。本文此后用 PNA+表示 PNA 的正位相事件, 用 PNA-表示 PNA 的负位相事件。根据以上定义, 1950 年至 2009 年冬季统计得到 79 个 PNA+事件和 73 个 PNA-事件。

根据 CPC 提供的 1950 年 1 月至 2010 年 9 月的月平均 Niño3.4 距平指数数据([http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices\[2011-09-01\]](http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices[2011-09-01])), 当指数偏差大(小)于等于 0.5 (−0.5) 且持续 5 个月以上时, 则判断发生一次 El Niño (La Niña) 事件, 此年定义为 ENSO 循环暖(冷)位相年份(McPhaden and Zhang, 2009)。其余年份作为中性年份。由于 PNA 在冬季最为显著, 本文的研究重点集中在冬季 PNA 与 ENSO 的关系, 因此, 我们选取当年 11 月至次年 3 月的 PNA 与这一年的 ENSO 循环位相对应。由此得到 17 个 ENSO 暖位相冬季, 14 个 ENSO 冷位相冬季及 29 个中性年份冬季(如表 1 所示)。其中, ENSO 冷、暖位相冬季的选取结果与 Renwick and Wallace (1996) 定义的 ENSO 暖位相冬季的结果与王绍武和龚道溢(1999)定义的 ENSO 冷暖位相冬季的结果基本一致(1950~1998 年)。

表 1 ENSO 循环的冷、暖位相冬季的年份

Table 1 The years of warm and cold ENSO phase events

ENSO 暖位相冬季	ENSO 冷位相冬季
1957/1958 年, 1963/1964 年,	1954/1955 年, 1955/1956 年,
1965/1966 年, 1968/1969 年,	1964/1965 年, 1970/1971 年,
1969/1970 年, 1972/1973 年,	1971/1972 年, 1973/1974 年,
1976/1977 年, 1982/1983 年,	1975/1976 年, 1984/1985 年,
1986/1987 年, 1987/1988 年,	1988/1989 年, 1995/1996 年,
1991/1992 年, 1994/1995 年,	1998/1999 年, 1999/2000 年,
1997/1998 年, 2002/2003 年,	2000/2001 年, 2007/2008 年
2004/2005 年, 2006/2007 年,	
2009/2010 年	

3 ENSO 循环与 PNA 事件的关系

3.1 在 ENSO 不同位相年份下 PNA 事件个数及指数的差异

根据表 1 的年份数据, 我们统计了 ENSO 不同位相冬季发生的 PNA 事件的个数(如图 1 所示): 在 ENSO 暖位相冬季, 共发生了 33 个 PNA+事件和 8 个 PNA-事件, 平均每个 ENSO 暖位相冬季发生 1.94 个 PNA+事件和 0.47 个 PNA-事件; 在 ENSO 冷位相冬季, 共发生了 11 个 PNA+事件和 30 个 PNA-事件, 平均每个 ENSO 冷位相冬季发生 0.79 个 PNA+事件和 2.14 个 PNA-事件; 在中性年份的冬季, 共发生了 35 个 PNA+事件和 35 个 PNA-事件, 中性年份冬季发生的 PNA+事件和 PNA-事件相同, 为 1.21 个。平均计算 60 年 PNA 事件个数发现, 每个冬季平均发生 1.32 个 PNA+事件和 1.22 个 PNA-事件。在 ENSO 暖位相年份, 发生的 PNA+事件是 PNA-事件个数的 4.13 倍; 在 ENSO 冷位相年份, 发生的 PNA-事件是 PNA+事件的 2.73 倍, 中性年份冬季二者的比值为 1.0, 二者长年平均的比值为 1.08。

在 ENSO 暖位相冬季, PNA+事件与 PNA-事件的个数比值为 4.13, 正是由于相对于其他年份冬季, 更多的 PNA+事件发生在 ENSO 暖位相年份冬季, 才在一定程度上导致 PNA 指数在 ENSO 暖位相冬季趋于正值, 这解释了 Renwick and Wallace (1996) 得到的 ENSO 暖位相冬季的 PNA 指数趋于正值的结论。因为冬季 PNA 指数的变化不但取决于不同 PNA 事件发生的频数, 而且还取决于 PNA 事件的强度和结构, 所以, 有必要考察在 ENSO 不同位相年份冬季 PNA 事件的强度和结构的差异。

根据 ENSO 不同位相及中性年份冬季的 PNA+、PNA-事件的逐日指数合成结果(图 2a 和 2b), 可以看出, ENSO 循环冷位相冬季平均的 PNA+事件在其峰值附近的强度大于暖位相冬季平均 PNA+事件的强度, 但是在 PNA+事件过程早期和衰减阶段, 冷位相冬季平均的 PNA+事件的强度小于暖位相冬季的 PNA+事件; 暖位相冬季平均 PNA-事件的早期和峰值附近的强度较大, 而在消亡阶段, 冷位相年份的强度较大。若将 PNA 事件的指数图形看作是正弦或者余弦函数的半个波, 那么由图 2 可以看出, 波动的振幅越大其周期越短, 即 PNA

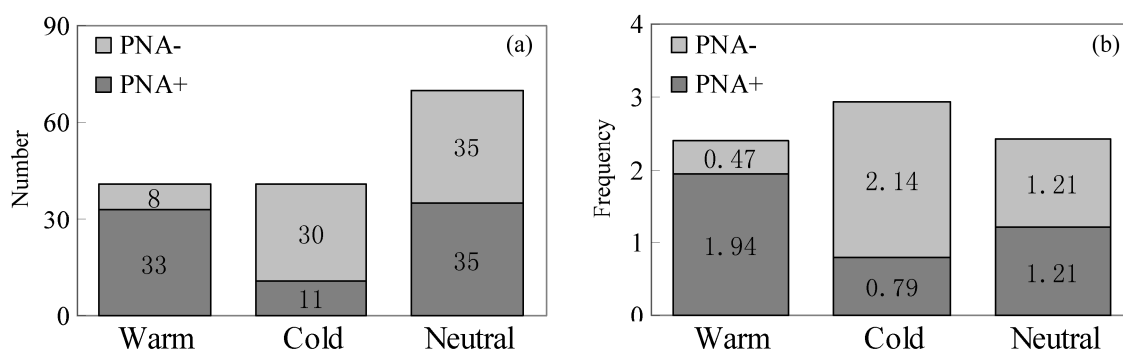


图1 ENSO 循环冷、暖位相及中性年份的 PNA 事件发生 (a) 个数及 (b) 频率

Fig. 1 The number and frequency of PNA+ and PNA- events for different ENSO phases and neutral years

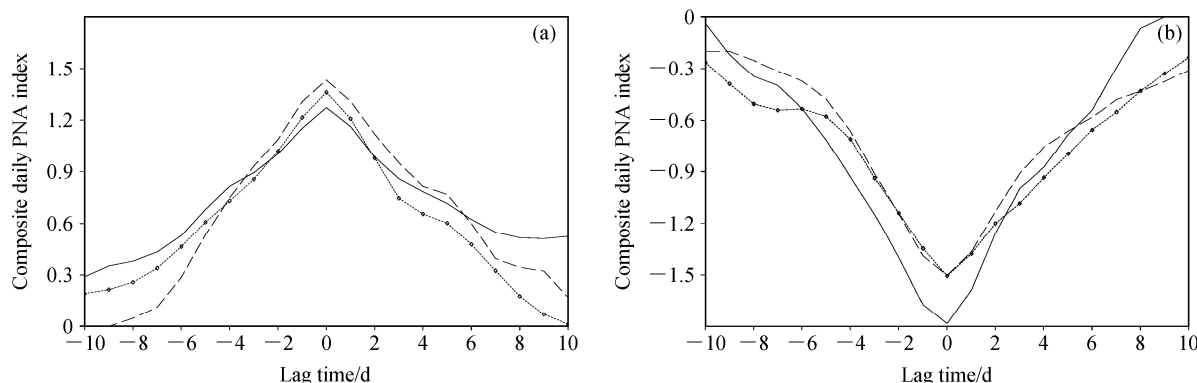


图2 ENSO 循环不同位相下的 (a) PNA+和 (b) PNA- 的指数合成图 (实线表示 ENSO 循环暖位相年份, 长虚线表示 ENSO 冷位相年份, 带点线表示中性年份)

Fig. 2 Composites of daily PNA index for (a) the positive phase and (b) the negative phase of different ENSO phase years (the solid and long dashed lines indicate warm and cold ENSO phase years, respectively, and the short dashed lines with dots indicate neutral years)

事件指数的强度越大其持续时间反而越短。

3.2 气候态 PNA 事件流场演变过程及其结构特征

我们对 1950~2009 年冬季 5 个月中所有的 PNA+和 PNA-事件进行合成 (结果如图 3a 和 3c 所示), 对于气候态的 PNA+事件流函数的合成场, 对应 Lag-8 天 (图 3a), 北太平洋白令海南侧区域出现负距平中心, 且强度上大于其西南侧的正距平中心, 随着时间的推移, 两个异常中心逐渐增强, 在北美大陆的北部和南部分别出现一个正距平中心和一个负距平中心; 在 Lag-4 时, 波列结构基本形成; 在 Lag0 时, PNA+型波列结构发展至最强; 在 Lag-4 至 Lag0 这段时间, 位于北太平洋上空的两个活动中心由东北—西南向的倾斜结构, 逐渐调整为南北向的偶极子结构。随着 PNA+的衰退, 南北向偶极子结构在 Lag+5 时调整为西北—东南向倾斜的结构 (图略)。在 Lag+8 时, PNA+波列结构消失 (PNA+或 PNA-波列结构是指北太平洋和北美上空的流函数场出现正负交替的 4 个闭合等值线中心)。

在图 3c 中, 对于气候态的 PNA-事件流函数的合成场, 在 Lag-8 时, 白令海及白令海峡区域和北美大陆南部出现一定强度的正距平中心, 夏威夷群岛附近出现负距平中心。之后, 北太平洋上空的两个距平中心不断加强, 且强度大于之后形成的两个距平中心 (Lag-4), 基本形成 PNA-流型。随着 4 个中心不断发展和加强, 在 Lag0 时, PNA-波列结构最明显, 此时北太平洋的两个距平中心为东北—西南向的结构。随着 PNA-的衰退, 在 Lag+4 时, 北美大陆的两个活动中心的强度较小。夏威夷岛附近的负距平中心逐渐东移, 移动速度大于北侧的正距平中心, 在 Lag+8 时, PNA-波列结构消失。

图 3b 和图 3d 给出的中性年份 PNA+和 PNA-事件流函数场合成结果显示, 中性年份 PNA+和 PNA-事件的流场演变过程以及强度与气候态的 PNA 事件的演变过程和强度差别很小。但我们可以看到, 中性年份的 PNA 事件过程中通过检验的区域的面积比气候态 PNA 事件的大, 说明对于冬季平均流函数场, 中性年份的 PNA 事件的流场结构

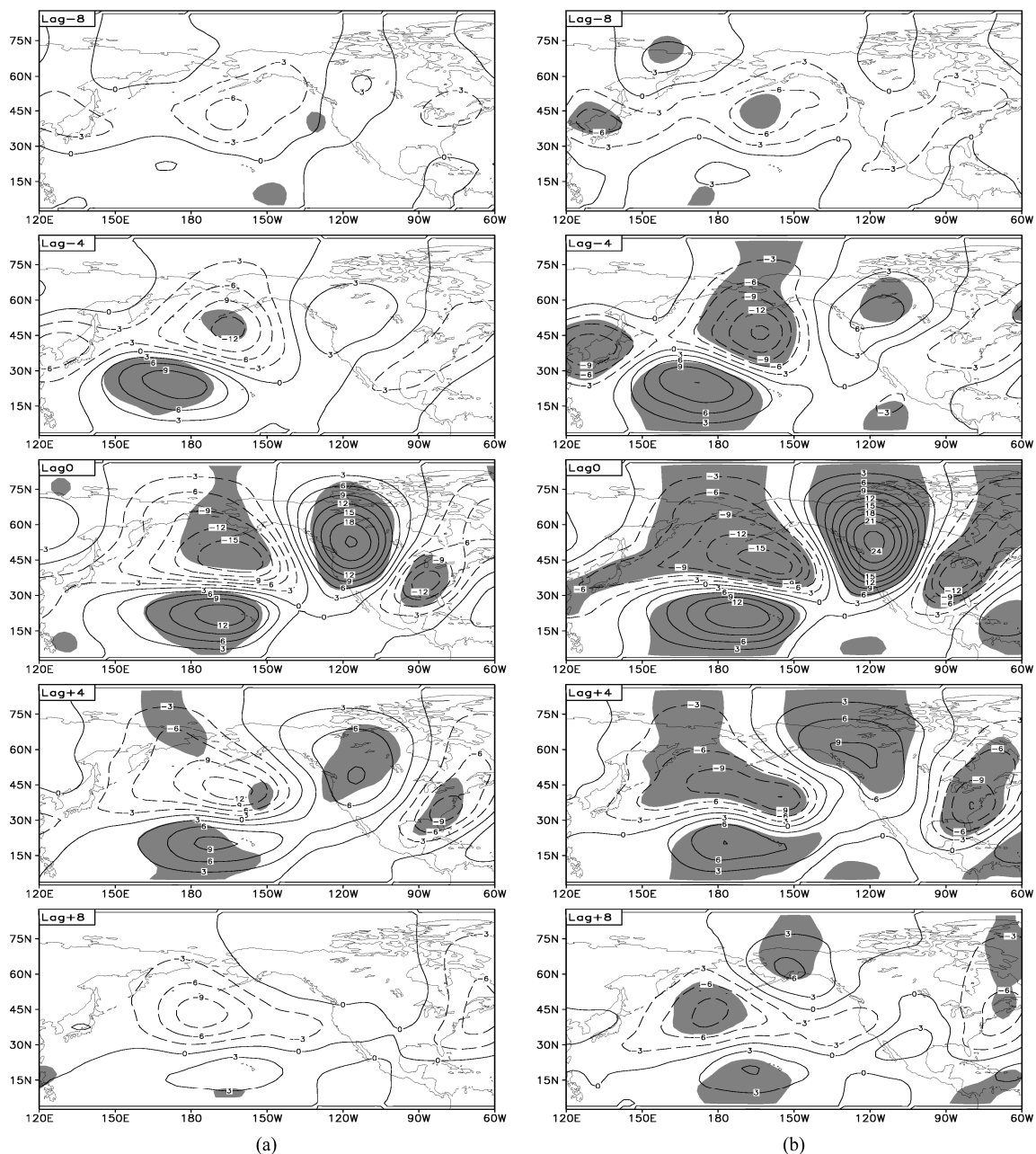
比气候态 PNA 事件的更显著 (本文对所有的流函数合成场进行了 t 检验, 对比样本均为冬季长年平均流函数场)。

3.3 ENSO 循环暖、冷位相及中性年份冬季 PNA 事件流场演变过程及其结构特征

图 4 为 ENSO 暖、冷位相冬季 PNA+事件流函数的合成场。由图 4 发现: ENSO 暖位相时的 PNA+波列结构的整体强度小于 ENSO 冷位相、中性年份以及气候态 PNA+事件 (图 3a) 的强度, 尤其在

PNA+波列结构最强的阶段 (Lag-2 至 Lag+2)。由图 2a 可见, 对于 PNA+事件 Lag0 附近时间段的指数变化表明, ENSO 冷位相和中性年份冬季的强度大于 ENSO 暖位相冬季的。指数合成结果与流函数场的合成结果是一致的, 说明 CPC 提供的 PNA 指数可以很好地反应 PNA 事件的强度。

具体分析 ENSO 不同位相 PNA+事件的流场演变过程后, 我们发现: ENSO 暖位相年份 PNA+事件的波列结构从出现到消失持续了 17 d (Lag-6 至



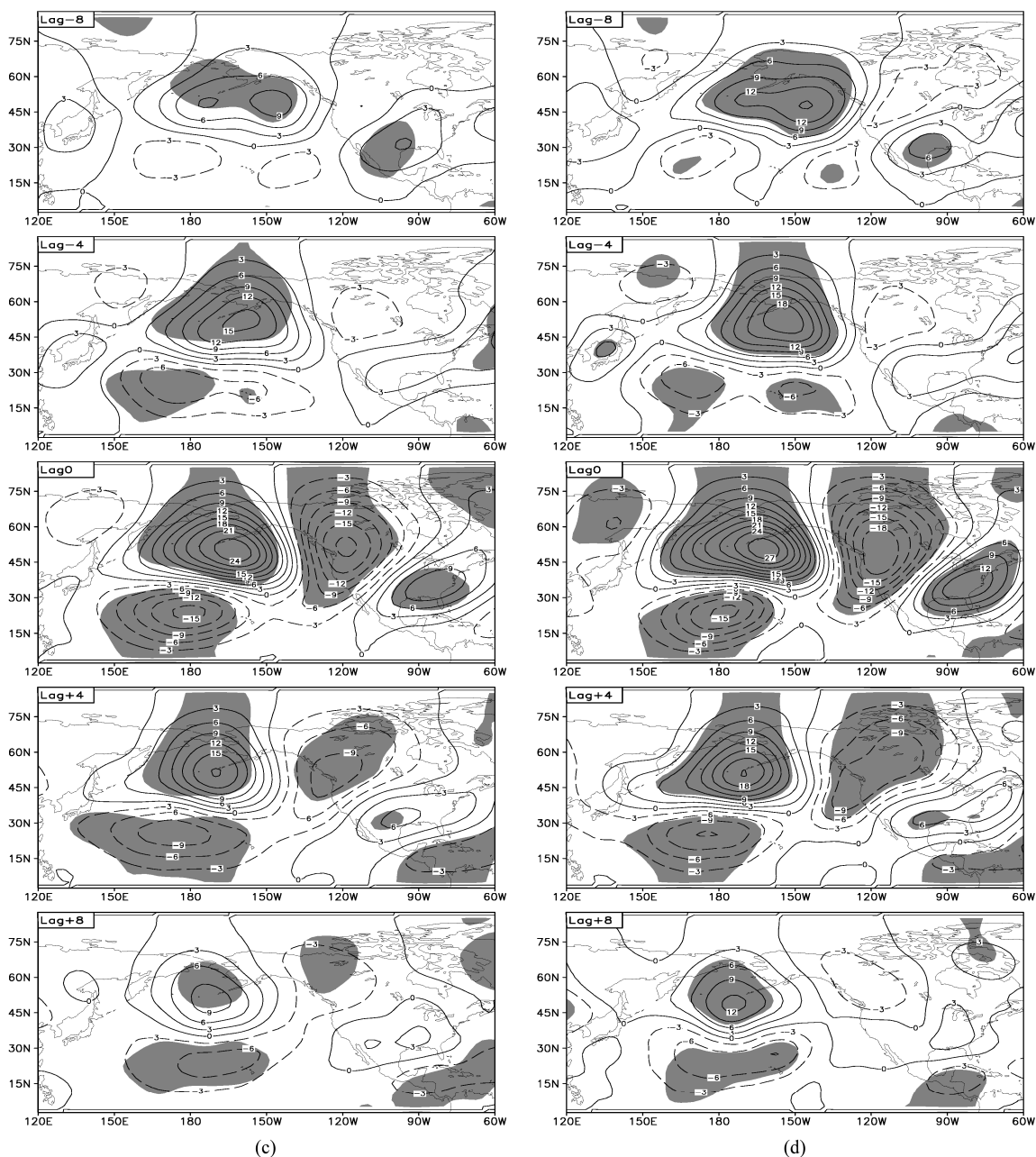


图3 (续)

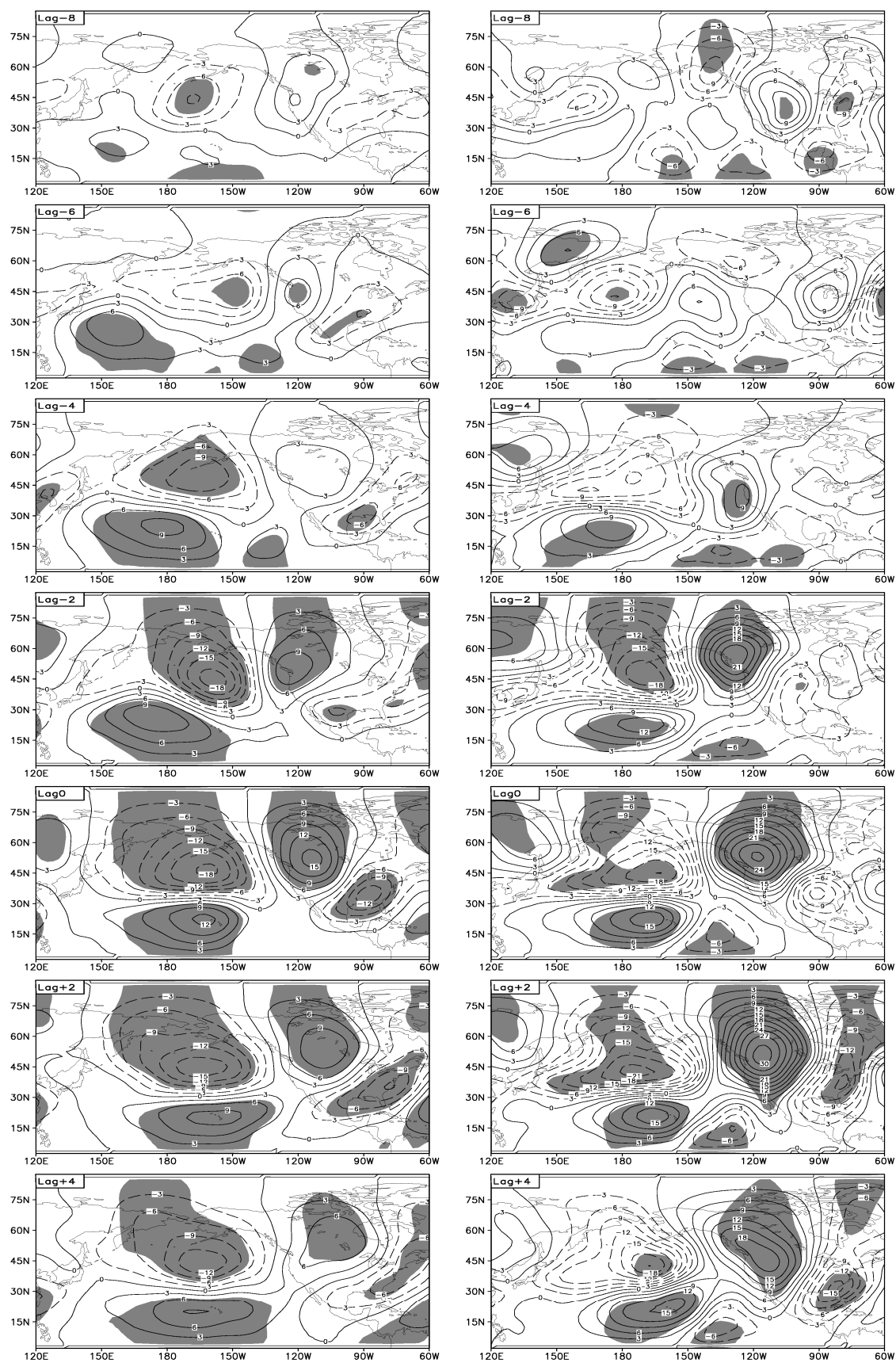
Fig. 3 (Continued)

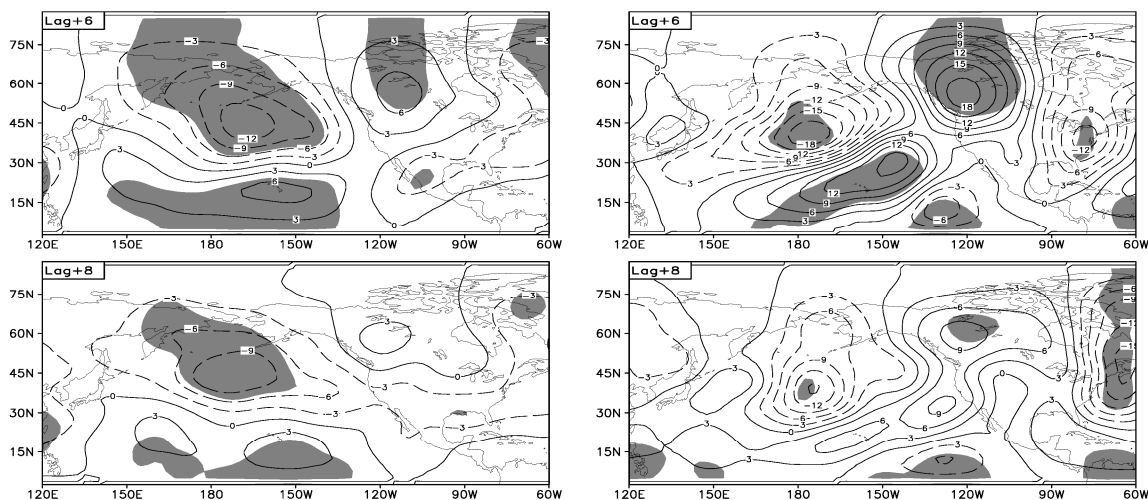
Lag+10), 从 Lag0 至 Lag+4 时北太平洋中高纬和低纬的两个距平中心呈南北向偶极子结构, 而 ENSO 冷位相年份的 PNA+波列结构持续了 11 d (Lag-4 至 Lag+6), 从 Lag-2 至 Lag+2, 两个距平中心形成的南北向偶极子结构维持在太平洋上空, 之后夏威夷群岛附近的距平中心东移使偶极子结构倾斜。在图 3b 中, 中性年份冬季的 PNA+事件的强度整体上稍大于气候态的 PNA+事件的强度, 且小于 ENSO 冷位相年的 PNA+事件的强度。中性年份的 PNA+事件生命史为 12 d (Lag-5 至 Lag+6), 北太平洋

的南北向偶极子结构仅维持了 2 d (Lag+1 至 Lag+2)。

图 5 为 ENSO 暖、冷位相冬季 PNA-事件流函数的合成场。由图 5a 和 5b 中 Lag-2 至 Lag+2 时两个 PNA+事件流场结构活动中心的最大值可以看出, 此时, ENSO 暖位相冬季的 PNA-事件的强度大于冷位相年份的 PNA-事件的强度。这与图 2b 的结果一致。

图 5a 和 5b 中, ENSO 暖位相时 PNA-型波列结构维持了 11 d (Lag-6 至 Lag+4), 而冷位相时



图4 (续)
Fig. 4 (Continued)

此结构持续了 19 d (Lag-8 至 Lag+10, Lag+10 图略)。图 3d 中,中性年份的 PNA-事件的生命史为 13 d (Lag-4 至 Lag+8)。另外,在 ENSO 暖位相年份 PNA-型波列结构衰减过程中,夏威夷群岛附近的负距平中心向东北方向迅速移动,逐渐与北美大陆北部的负距平中心合并。特别需要指出的是, PNA-型波列结构在 Lag-2 至 Lag+2 时南北向偶极子结构没有出现并维持,但本文仅发现合成平均场存在此现象,不排除特例出现的可能。

4 ENSO 循环不同位相下 PNA 事件特征的原因分析

本文比较了 ENSO 循环不同位相下 PNA 事件的变化特征,结果发现 ENSO 暖位相年份发生 PNA+事件的个数是 PNA-事件的 4.13 倍,而在 ENSO 冷位相年份发生的 PNA-事件的个数是 PNA+事件的 2.73 倍。张耀存和郭兰丽 (2005)、蔡琼琼等 (2011) 运用不同数值模式模拟北太平洋副热带急流的变化特征,其中,蔡琼琼等 (2011) 的数值研究指出北太平洋副热带急流的年际变率主要表现为南北移动,并与 ENSO 关系紧密。我们对观测资料分析也发现不同 ENSO 位相冬季的副热带急流存在南北移动 (如图 6c 所示),标示区域为 PNA 事件在太平洋上空的两个距平中心区域,该区域中 20°N 以北主要为正值,而 20°N 以南的主要为负值,这表示该区域 ENSO 暖位相年份副热带急流

位置相对偏北,而冷位相年份副热带急流位置相对偏南。

Luo et al. (2008) 的理论研究指出:当急流位置偏北 (南) 时,急流与北太平洋上的定常波 (该定常波是由海陆热力性质差异引起的) 相互作用会激发出北低南高 (北高南低) 的环流结构,该结构可以看作正 (负) 位相胚胎或正 (负) 位相的初始扰动。Franzke et al. (2011) 也指出,副热带急流位置是 PNA 事件形成的重要先决条件。PNA+事件前期,副热带在 150°W 有一个东北向伸展的急流出口,急流的位置变化增强气旋性剪切加大经向位势涡度梯度,与气旋性波破碎典型特征一致; PNA-事件前期,基本流反向变化,与反气旋性波破碎典型特征一致; PNA+ (PNA-) 事件与气旋性 (反气旋性) 波破碎为正反馈的关系,天气尺度波对 PNA 的发展和维持起到很重要的作用。根据前人的理论研究成果以及 ENSO 不同位相的太平洋副热带急流经向位置差异,可以推测,在 ENSO 暖位相年份冬季,东太平洋海温异常偏高,赤道与两极的温度梯度增大,副热带急流增强,急流位置偏北,偏北急流与北太平洋上定长波相互作用激发出北侧负距平、南侧正距平的正位相初始扰动,在天气尺度波强迫作用下更容易形成 PNA+事件;而在 ENSO 冷位相年份冬季,东太平洋海温异常偏低,半球南北向温度梯度减弱,副热带急流减弱并且位置偏南,偏南急流与北太平洋上定长波相互作用激发出北侧正距平、南侧负距平的负位相初始扰动,在天

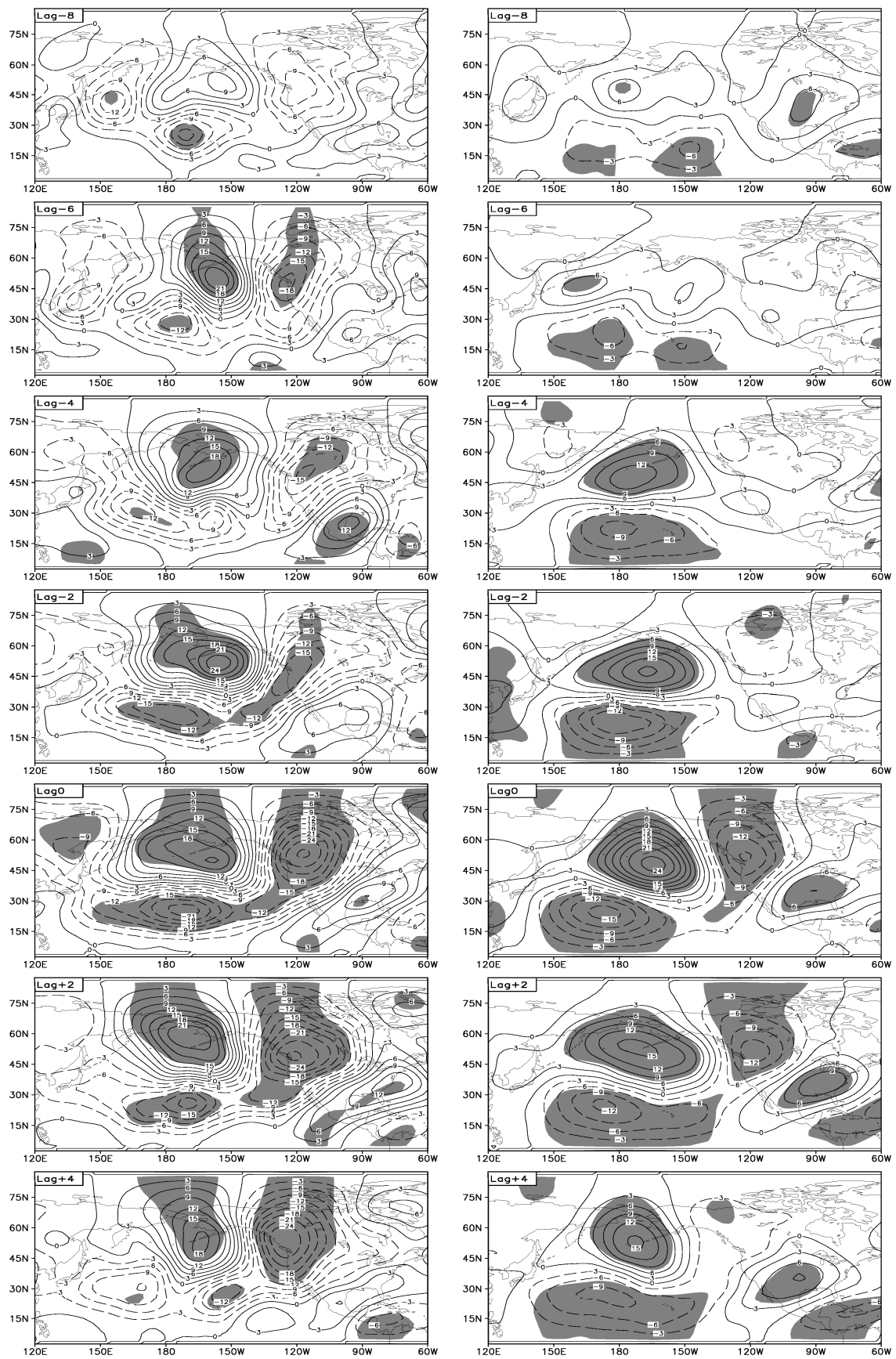
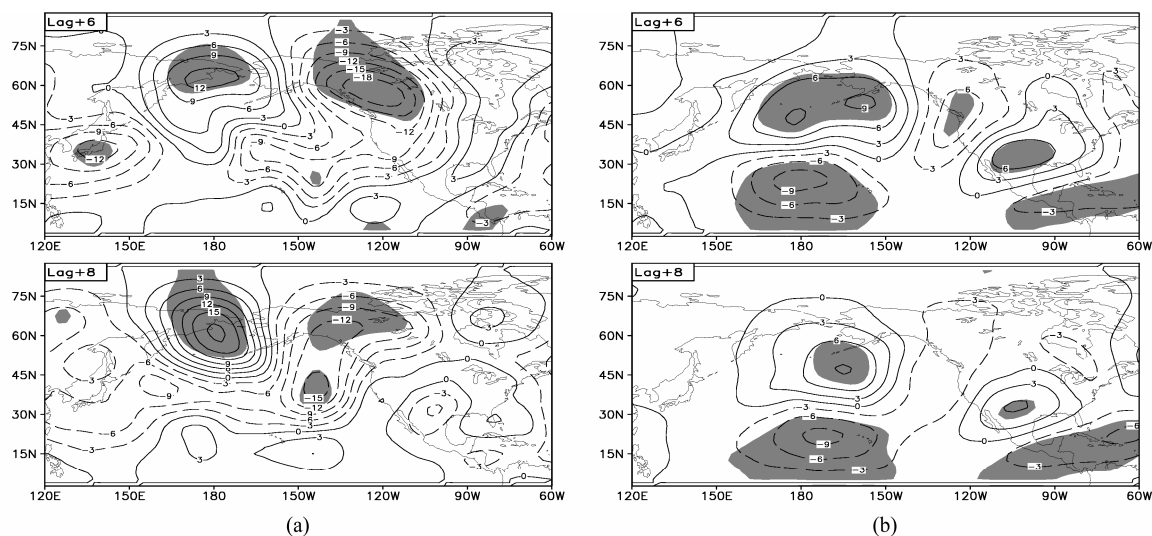
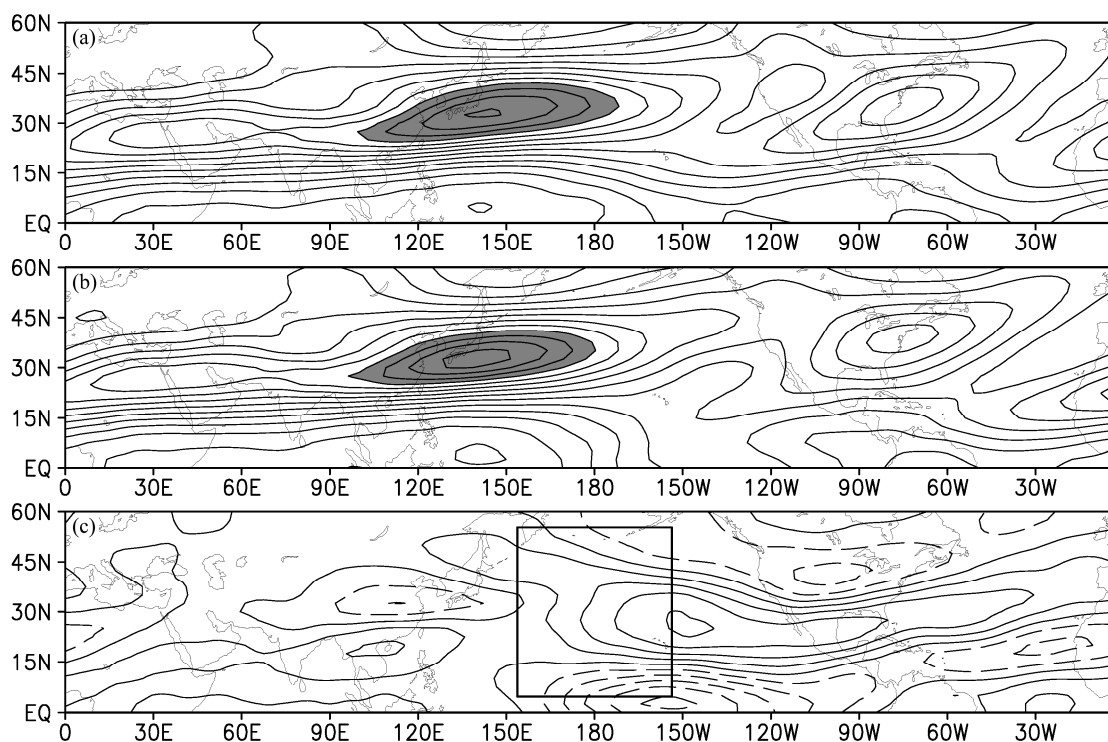


图5 同图4, 但为 PNA—

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for PNA—

图5 (续)
Fig. 5 (Continued)图6 ENSO 循环 (a) 暖位相和 (b) 冷位相年份的 300 hPa 平均纬向风分布 (等值线间隔为 5 m s^{-1} , 阴影区风速大于 40 m s^{-1}), (c) 为 (a) 减去 (b) 的差值 (等值线间隔为 2 m s^{-1} , 实线表示正值, 虚线表示负值)Fig. 6 300-hPa mean zonal wind for (a) warm and (b) cold ENSO phase years (the contour intervals are 5 m s^{-1} and zonal wind values above 40 m s^{-1} are shaded) and (c) is (a) minus (b) (the contour intervals are 2 m s^{-1} ; solid and dashed lines indicate positive and negative values, respectively)

气尺度波强迫作用下容易形成 PNA-事件。因此, 在 ENSO 暖(冷)位相年份冬季, PNA+ (PNA-) 事件比 PNA- (PNA+) 事件的发生概率更高。需要指出, 由副热带急流径向移动所激发的初始扰动, 在天气尺度波强迫作用下, 发展为 PNA 事件

过程中首先形成于北太平洋上空的两个距平中心。

对于 ENSO 不同位相年份冬季 PNA 事件强度和流场结构的差异, 本文并未找到合理解释, 这部分工作对了解 PNA 事件过程的动力机制有重要的意义, 研究产生差异的原因是下一步工作的重点。

5 结论

这篇文章主要研究了在 ENSO 循环不同位相下 PNA 事件的变化特征, 有如下结论:

(1) 在 ENSO 暖位相年份冬季, PNA+事件的个数是 PNA-事件的 4.13 倍, 在 ENSO 冷位相年份冬季, PNA-事件的个数是 PNA+事件的 2.73 倍, 气候态与中性年份发生的 PNA+与 PNA-个数比均约等于 1。在 ENSO 暖(冷)位相年份冬季更容易发生 PNA+(PNA-)事件。

(2) 在 ENSO 暖位相年份冬季, PNA-事件强度较大, PNA+型波列结构维持时间相对较长, 而在 ENSO 冷位相年份冬季, PNA+事件强度较大, PNA-型波列结构维持时间较长。

(3) 在 PNA+事件流场结构演变过程中, PNA+型波列结构强度较大时, 位于北太平洋的南北向偶极子结构出现并维持超过 1 d。

(4) 除了 ENSO 冷、暖位相年份, 中性年份也发生了 PNA+事件和 PNA-事件, 说明 ENSO 循环对 PNA 事件的发生频率、强度及流场结构起调制作用, ENSO 循环并不是 PNA 发生的根本原因。

(5) 本文根据前人的理论研究结果以及 ENSO 不同位相冬季北太平洋副热带急流存在南北移动的现象, 我们可以解释 ENSO 不同位相冬季 PNA+和 PNA-事件发生频率的差异产生的原因。

参考文献 (References)

Archambault H M, Keyser D, Bosart L F. 2010. Relationships between large-scale regime transitions and major cool-season precipitation events in the northeastern United States [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 3454–3473.

蔡琼琼, 周天军, 吴波, 等. 2011. 东亚副热带西风急流及其年际变率的海气耦合模式模拟 [J]. *海洋学报*, 33 (4): 38–48.

Cai Qiongqiong, Zhou Tianjun, Wu Bo, et al. 2011. The East Asian subtropical westerly jet and its interannual variability simulated by a climate system model FGOALS_g1 [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 33 (4): 38–48.

Cash B A, Lee S. 2001. Observed nonmodal growth of the Pacific–North American teleconnection pattern [J]. *J. Climate*, 14: 1017–1028.

Feldstein S B. 2000. The timescale, power spectra, and climate noise properties of teleconnection patterns [J]. *J. Climate*, 13: 4430–4440.

Franzke C, Feldstein S B, Lee S. 2011. Synoptic analysis of the Pacific–North American teleconnection pattern [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 137: 329–346.

Hannachi A. 2010. On the origin of planetary-scale extratropical winter circulation regimes [J]. *J. Atmos. Sci.*, 67: 1382–1401.

何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. *大气科学*, 32: 335–344.

He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32: 335–344.

Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary scale atmospheric phenomenon associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 813–829.

黄荣辉, 傅云飞, 臧晓云. 1996. 亚洲季风与 ENSO 循环的相互作用 [J]. *气候与环境研究*, 1 (1): 38–54.

Huang Ronghui, Fu Yunfei, Zang Xiaoyun. 1996. Asian monsoon and ENSO cycle interaction [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 1 (1): 38–54.

李忠贤, 周天军, 孙照渤, 等. 2011. GAMIL 模式海气湍流通量参数化方案的改进及其对大气环流年际变率模拟效果的影响 [J]. *大气科学*, 35 (2): 311–325.

Li Zhongxian, Zhou Tianjun, Sun Zhaobo, et al. 2011. Improvement of air–sea turbulent fluxes parameterization scheme in GAMIL model and its impact on simulation of interannual variations of atmospheric circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (2): 311–325.

Li Z X, Zhou T J, Sun Z B, et al. 2011. A method for improving simulation of PNA teleconnection interannual variation in a climate model [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4: 86–90.

林学椿. 1992. 北太平洋海温和 PNA 波列 [J]. *海洋学报*, 14: 29–38.

Lin Xuechun. 1992. North Pacific SST and PNA wave train [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 14: 29–38.

Luo D, Gong T, Zhong L. 2008. Dynamical relationship between the phase of North Atlantic Oscillations and the meridional excursion of a preexisting jet: An analytical study [J]. *J. Atmos. Sci.*, 65: 1838–1858.

McPhaden M J, Zhang X B. 2009. Asymmetry in zonal phase propagation of ENSO sea surface temperature anomalies [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36: L13703, doi: 10.1029/2009GL038774.

Renwick J A, Wallace J M. 1996. Relationships between north Pacific wintertime blocking, El Niño, and the PNA pattern [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 124: 2071–2076.

Shukla J, Wallace J M. 1983. Numerical simulation of the atmospheric response to equatorial Pacific sea surface temperature anomalies [J]. *J. Atmos. Sci.*, 40: 1613–1630.

Straus D M, Shukla J. 2002. Does ENSO force the PNA? [J]. *J. Climate*, 15: 2340–2358.

Tsonis A A, Swanson K L. 2008. On the role of atmospheric teleconnections in climate [J]. *J. Climate*, 21: 2990–3001.

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 784–812.

王绍武, 龚道溢. 1999. 近百年来的 ENSO 事件及其强度 [J]. *气象*, 25 (1): 9–14.

Wang Shaowu, Gong Daoyi. 1999. ENSO events and their intensity during the past century [J]. *Journal of Meteorology (in Chinese)*, 25 (1): 9–14.

吴仁广, 陈烈庭. 1992. PNA 流型的年际变化及温、热带太平洋海温的作用 [J]. *大气科学*, 16 (5): 583–591.

Wu Renguang, Chen Lieting. 1992. Interannual variation of the PNA flow pattern and impacts of extratropical and tropical SSTs [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 16 (5): 583–591.

- Chinese), 16 (5): 583–591.
- Yu B, Tang M Y, Zhang B X, et al. 2009. An analysis on observed and simulated PNA associated atmospheric diabatic heating [J]. *Climate Dyn.*, 33: 75–91.
- 张耀存, 郭兰丽. 2005. 东亚副热带西风急流偏差与中国东部雨带季节变化的模拟 [J]. *科学通报*, 50 (13): 1394–1399. Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2005. The deviation of the East Asian subtropical westerly jet and the simulation of seasonal variation of the East China rain bands [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 50 (13): 1394–1399.
- Zhou T J, Zhang J. 2011. The vertical structures of atmospheric temperature anomalies associated with two flavors of El Niño simulated by AMIP II models [J]. *J. Climate*, 24 (4): 1053–1070.
- 宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 2008. 东亚—太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. *大气科学*, 32: 220–230. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2008. A study of the processes of East Asia–Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32: 220–230.